

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İÇ İÇE BORULU BİR ISI DEĞİŞTİRİCİDE METAL OKSİT
NANOAKIŞKANLARIN ISI TRANSFER PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Celal Fatih AKBAŞ

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Dinçer BURAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2023**



© 2023 [Celal Fatih AKBAŞ]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	5
3. NANOAKIŞKANLAR.....	15
3.1. Nanoakışkanlar ve Nanoakışkan Uygulamaları.....	15
3.2. Nanoakışkan Üretim Yöntemleri	17
3.2.1. Tek adımlı yöntem	18
3.2.2. İki adımlı yöntem.....	19
3.3. Nanoakışkan Kullanımları İle İlgili Zorluklar	20
3.4. Metal Oksit Nanoakışkanlar ve Termofiziksel Özellikleri.....	21
4. ISI TRANSFER PARAMETRELERİNİN KARAKTERİZASYONU	23
4.1. Hidrodinamik ve Isı Transfer Parametreleri	23
4.2. Isı Değiştiriciler	29
4.2.1. Isı değiştirici türleri	29
4.2.1.1. Konstrüksiyon geometrilerine göre.....	29
4.2.1.1.1. Borulu ısı değiştiriciler	29
4.2.1.1.2. Plakalı ısı değiştiriciler	30
4.2.1.1.3. Contalı ısı değiştiriciler.....	30
4.2.1.1.4. Lamelli ısı değiştiriciler	30
4.2.1.1.5. Spiral plakalı ısı değiştiriciler.....	31
4.2.1.1.6. Kompakt sistemler	31
4.2.1.2. Isı transfer mekanizmasına göre.....	31
4.2.1.3. Akış şekline göre.....	32
4.2.1.4. Akış düzenlemelerine göre	32
4.2.1.5. Isı transfer işlemine göre	32
4.2.2. İç içe borulu ısı değiştiriciler.....	32
5. DENEYSEL KURULUM	34
5.1. Isı Değiştirici Tasarımı.....	34
5.2. Deney Düzenekinin İmalatı ve Montajı	35
5.3. Nanoakışkan Hazırlığı.....	45
5.4. Su ve Nanoakışkan Deneyleri.....	46
5.4.1. CuO/H ₂ O+Al ₂ O ₃ hibrit nanoakışkan deneyleri.....	47
6. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	48
6.1. Deneysel Sonuçlar	49
6.2. Sayısal Analiz Sonuçları.....	60
6.3. Nanoakışkan Kararlılığı Hakkında Değerlendirme	63
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ.....	74

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İÇ İÇE BORULU BİR ISI DEĞİŞTİRİCİDE METAL OKSİT NANOAKIŞKANLARIN ISI TRANSFER PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Celal Fatih AKBAŞ

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dinçer BURAN

Bu çalışmada, tek adım yöntemiyle sentezlenmiş bakır oksit/su ($\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$) nano akışkanın hidrodinamik ve ısı transfer karakteristiklerinin ters akışlı iç içe borulu bir ısı değiştirici kullanılarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla hazırlanan deney düzeneğinde 1 metre uzunluğunda, bakır borular kullanılarak imal edilmiş ters akışlı iç içe borulu bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Çalışmada tek adım yöntemiyle üretilmiş ağırlıkça %3,3 CuO konsantrasyonuna sahip su bazlı bakır oksit nano akışkan kullanılmıştır. Deneyler farklı akış koşullarını oluşturabilmek amacıyla, farklı sıcak ve soğuk akışkan debilerinde gerçekleştirilmiştir. Kararlı rejim şartlarında, ısı değiştirici giriş ve çıkış sıcaklıkları K tipi termokupl kullanılarak ve ısı değiştirici boyunca sıcak akışkandaki basınç kaybı bir U manometresi kullanılarak ölçülmüştür. Bakır oksit/su nano akışkanı için hesaplanan hidrodinamik ve ısı performans parametreleri benzer koşullarda test edilen deiyonize suyun parametreleriyle karşılaştırılmıştır. Su için sayısal modelleme yapılmış ve bulunan sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışmada ayrıca, $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ nanoakışkanına alüminyum oksit (Al_2O_3) nanopartiküller iki adım üretim yöntemine göre eklenerek, hibrit nanoakışkan üretimi de gerçekleştirilmiştir. Ancak deney düzeneğine hibrit nanoakışkan ilave edildikten sonra oluşan çökeltme ve topaklaşma problemleri sebebiyle, hibrit nanoakışkan ile yapılan deneylerin sonuçları analiz edilmemiştir.

Yapılan deneyler süresince, nispeten yüksek sıcaklıklarda çalışan bakır oksit/su nanoakışkanın, stabilitesini genel olarak muhafaza ettiği gözlenmiştir. Analizler neticesinde elde edilen sonuçlar, nanoakışkanın deiyonize suya nazaran daha fazla basınç düşümü ve daha yüksek sürtünme faktörüne ($\text{Re}=10000\text{-}20000$ aralığında ortalama %17 civarında) sahip olduğunu göstermiş olup, ihtiyaç duyulan pompa gücünün artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Isı transfer karakteristikleri açısından, akışın türbülans seviyesine göre değişmekle birlikte bakır oksit/su nanoakışkanın ısı taşınım katsayısında baz akışkana kıyasla iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir ($\sim\%12$ @ $\text{Re}=10000$). Bakır oksit/su nano akışkanın ısı performans faktörünün (Nusselt sayısının hesaplanmasında göz önüne alınan yaklaşım metoduna göre değişiklik göstermesine rağmen) incelenen türbülanslı akış koşullarının tamamında 1'in üzerinde olduğu ve

Reynolds sayısının 30000 değerinde 1,27'ye kadar çıktığı hesaplanmıştır. Endüstriyel uygulamalarda su yerine CuO/su nanoakışkanını kullanımı halinde, ısı transferindeki iyileşme etkisiyle basınç dūřūřündeki artış etkisinin bastırılabilceği anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bakır Oksit, Nano Akışkan, Tek Adım, ısı Transferi, İ İçe Borulu ısı Değiştirici

2023, 74 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF METAL OXIDE NANOFLUIDS ON HEAT TRANSFER PERFORMANCE IN A CONCENTRIC TUBE HEAT EXCHANGER

Celal Fatih AKBAŞ

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Dinçer BURAN

In this study, it is aimed to investigate the hydrodynamic and heat transfer characteristics of copper oxide/water ($\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$) nanofluid synthesized by the one-step method using a counter-flow concentric tube heat exchanger. In the experimental setup prepared for this purpose, a counter flow, concentric tube heat exchanger with a length of 1 meter manufactured using copper pipes was used. In the study, water-based copper oxide nanofluid with a CuO concentration of 3.3% by weight, produced by the one-step method, was used. Experiments were carried out at different hot and cold flow rates in order to create different flow conditions. Under steady-state conditions, the heat exchanger inlet and outlet temperatures were measured using a K-type thermocouple and the pressure loss in the hot fluid across the heat exchanger was measured using a U manometer. The hydrodynamic and thermal performance parameters calculated for the copper oxide/water nanofluid were compared with the parameters of deionized water tested under similar conditions. Numerical modeling was done for water and the results were verified by comparing with the experimental data. In this study, hybrid nanofluid, named as $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}/\text{H}_2\text{O}$, production was also carried out by adding aluminum oxide (Al_2O_3) nanoparticles to the $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}$ nanofluid. Due to the precipitation and aggregation occurred after the hybrid nanofluid addition in the experimental study, the results of the experiments with the hybrid nanofluid were not considered to analyze for further study.

During the experiments, it was observed that the copper oxide/water nanofluid operating at relatively high temperatures generally maintained its stability. The results obtained as a result of the analyzes showed that the nanofluid has more pressure drop and higher friction factor (around 17% in the range of $\text{Re}=10000\text{-}20000$) compared to deionized water, revealing that the required pump power should be increased. In terms of heat transfer characteristics, although it varies according to the turbulence level of the flow, it has been determined that the heat transfer coefficient of the copper oxide/water nanofluid is improved compared to the base fluid ($\sim 12\%$ @ $\text{Re}=10000$). According to the Nusselt number calculated from approach method, the thermal performance factor of the copper oxide/water nanofluid is over 1 under all applied turbulent flow conditions. So, the thermal performance factor of the mentioned nanofluid's value was increased

upto 1.27 while the Reynolds number was at 30000. It is understood that if CuO/water nanofluid is used instead of water in industrial applications, the increase in pressure drop can be suppressed with the improvement in heat transfer.

Keywords: Copper Oxide, Nano Fluid, One Step, Heat Transfer, Concentric Tube Heat Exchanger

2023, 74 pages



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın deney kurulumu dâhil, yüksek lisans öğreniminin her aşamasında desteklerini ve teşviklerini esirgemeyip, bir hoca tanımı dışında kendisini abi gibi görmüş olduğum danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Dinçer BURAN'a teşekkürlerimi borç bilirim. Bu çalışmanın tamamlanmasındaki katkılarını hiçbir zaman unutmayacağım.

Çalışmada nanoakışkan temini ve bu konuda bilgilerini paylaşarak yardımcı olan Sayın Doç. Dr. Mehmet Fahri SARAÇ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cem Levent Altan hocalarıma; deney düzeneğinin tasarımında, teorik hususlar noktasında ve kurulumdaki emekleri için Sayın Dr. Öğr. Üyesi Karani KURTULUŞ ve Prof. Dr. Ahmet COŞKUN hocalarıma; çalışma süresince kıymetli yardımları için Sayın Doç. Dr. Barış GÜREL hocama;

Deney esnasında karşılaştığım zorluklar ve sorunları çözme konusunda ismini zikrettiğim kıymetli hocalarım ile beraber okulumdaki tüm hocalarıma; Süleyman Demirel Üniversitesi bünyesinde çalışan tekniker abilerime; lisans öğrenci arkadaşlarımdan Metehan KARAMANOĞLU ve Ulaş Ümit URAL'a yardımları ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın deneysel kurulum aşamasında fikri ve fiili yardımları için kıymetli babama; yüksek lisans süresince maddi-manevi yardımları ile destek olan aileme ve bu süreçte yanımda olan dostlarıma teşekkürlerimi borç bilirim.

Celal Fatih AKBAŞ
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. (a) Farklı ağırlık oranlarında termal iletkenlik değerleri, (b) 26 kW/m ² sabit ısı akısı altında akışkanların farklı Reynolds sayılarında basınç düşümü	6
Şekil 2.2. (a) ortalama konvektif ısı transfer katsayısının ve (b) basınç kaybının Reynolds Sayısına göre değişimi.....	7
Şekil 2.3. (a) sıcaklığa bağlı viskozitenin, (b) Reynolds sayısına bağlı sürtünme faktörünün farklı oranlardaki akışkanlarda elde edilen sonuçları	8
Şekil 2.4. Farklı ağırlık oranına sahip nanoakışkanların Reynolds sayısına göre performans indeksi.....	11
Şekil 2.5. Farklı kütle oranlarında hazırlanmış nanoakışkanların CPU yüzey sıcaklığına etkisi, (a) Al ₂ O ₃ -su nanoakışkanı, (b) TiO ₂ -su nanoakışkanı.....	12
Şekil 3.1. Tek adımlı yöntemle nanoakışkan üretim aşamaları	18
Şekil 3.2. İki adımlı yöntemle nanoakışkan üretim aşamaları	19
Şekil 5.1. Tasarımı yapılan iç içe borulu ısı değiştiricinin üç boyutlu katı modeli.....	34
Şekil 5.2. Deney düzeneği şematik resmi	35
Şekil 5.3. Bağlantı elemanlarının ısı değiştirici ile kaynaklanması	37
Şekil 5.4. Merkezleme elemanının işlenmesi	38
Şekil 5.5. İç ve dış borunun kaynak işlemi	38
Şekil 5.6. (a) imalat sonrası parça görüntüsü, (b) temizlik işlemi sonrası görüntüsü	39
Şekil 5.7. Montaj için hazırlanan ısı çifti	39
Şekil 5.8. Bağlantı elemanı montajı.....	40
Şekil 5.9. İmalattan sonra tankın iç görüntüsü	40
Şekil 5.10. Tank kapağına yerleştirilen alüminyum ısı değiştirici.....	41
Şekil 5.11. Deney düzeneği hortum bağlantıları.....	41
Şekil 5.12. Manometre giriş bağlantıları.....	42
Şekil 5.13. Rotametre ve vana bağlantısı.....	42
Şekil 5.14. Nanoakışkan ilavesi sonrası rotametre görüntüsü.....	43
Şekil 5.15. Döner kanatlı tip debimetre bağlantısı	43
Şekil 5.16. Şebeke suyu hattına debimetre bağlantısı	44
Şekil 5.17. Deney düzeneği son hali.....	45
Şekil 5.18. Tek adım yöntemiyle sentezlenmiş su bazlı bakır oksit nanoakışkanı	46
Şekil 5.19. Al ₂ O ₃ nanopartikül ilavesi sonrasında oluşan çökelmelerin numune görüntüsü.....	47
Şekil 6.1. Deneylerden alınan tipik bir sıcaklık-zaman grafiği.....	50
Şekil 6.2. CuO nanoakışkan ve su için a) ısı iletim katsayısının b) özgül ısı kapasitesinin c) viskozitenin ve d) yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimleri	51
Şekil 6.3. Isı değiştirici çıkış sıcaklıklarının debiler oranına bağlı değişimi	52
Şekil 6.4. Isı değiştirici çıkış sıcaklıklarının Re sayıları oranına bağlı değişimi	53

Şekil 6.5. Isı değıştirici çıkış sıcaklıklarının sıcak akışkanın akış hızına bağlı değışimi	53
Şekil 6.6. Su ve nanoakışkan kullanımında oluşan logaritmik ortalama sıcaklık farkının sıcak akışkanın Reynolds sayısına göre değışimi	54
Şekil 6.7. Su ve nanoakışkan kullanımında transfer edilen ısı miktarının Reynolds sayısına göre değışimi	55
Şekil 6.8. İki farklı yaklaşıma göre Nusselt sayısının sıcak akışkanın Reynolds sayısına bağlı değışimi	56
Şekil 6.9. Su ve nanoakışkan kullanımında, taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değışimi	57
Şekil 6.10. Su ve nanoakışkan kullanımında gerçekleşen basınç düşümünün Reynolds sayısına göre değışimi	58
Şekil 6.11. Su ve nanoakışkan kullanımında gerçekleşen basınç düşümünün ortalama akış hızına bağlı değışimi	58
Şekil 6.12. Su ve nanoakışkan için sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değışimi	59
Şekil 6.13. Isıl performans faktörünün Reynolds sayısına göre değışimi	60
Şekil 6.14. Isı değıştiriciye ait mesh yapısı ve kesit görünümü	60
Şekil 6.15. Isı değıştiricideki soğuk akışkan giriş bölgesi hız vektörleri (Deney koşulları: $\dot{m}_h : 0,067956 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_c : 0,103201 \text{ kg/s}$, $T_{hi} : 73,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ci} : 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$)	61
Şekil 6.16. Isı değıştiricideki soğuk akışkan çıkış bölgesi hız vektörleri (Deney koşulları: $\dot{m}_h : 0,067956 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_c : 0,103201 \text{ kg/s}$, $T_{hi} : 73,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ci} : 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$)	62
Şekil 6.17. Isı değıştirici giriş ve çıkış bölgelerine ait sıcaklık kontürleri (Deney koşulları: $\dot{m}_h : 0,067956 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_c : 0,103201 \text{ kg/s}$, $T_{hi} : 73,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ci} : 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$)	62
Şekil 6.18. Su için ısı değıştirici çıkış sıcaklıklarının deneysel ölçüm ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması	63
Şekil 6.19. CuO/H ₂ O deneylerinde oluşan köpürmeler	64
Şekil 6.20. CuO/H ₂ O deneyleri sonrası alınan numune örneği	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Metalik nanopartikül içeren nanoakışkanlarla yapılan bazı çalışmalar	22
Çizelge 5.1. Isı değıştirici boru çapları.....	34
Çizelge 6.1. Deney koşulları.....	48
Çizelge 6.2. Sayısal analiz için kullanılan debi ve sıcaklık değeri	49



1. GİRİŞ

Günümüzde enerjinin verimli kullanımı, enerji kaynaklarının korunması ve aynı zamanda ekonominin ve toplumun sürdürülebilir kalkınması açısından oldukça önem taşımaktadır (Xiao vd., 2013; Peng vd., 2019; Pukšec vd., 2019; Tian vd., 2021). Sürekli artan dünya nüfusu, beraberinde getirdiği enerji ihtiyacı, tükenmekte olan fosil yakıtlar öte yandan iklim değişikliği ve bu değişikliğin yol açtığı sorunlar enerji alanında en önemli endüstriyel süreçlerden birisi olan ısı transferini çok daha önemli bir boyuta taşımıştır. Isı transferinin söz konusu olduğu uygulamalarda, gerçekleşen transferin verimliliğini artırmak daima ilgi odağı olmuştur. Etkili şekilde gerçekleşen ısı transferi, sistem tasarımlarını kolaylaştırmakla kalmayıp küçük alanlarda daha efektif çalışan soğutma sistemleri ile gelişen teknolojinin ihtiyaçlarını da daha etkin bir şekilde karşılayabilecektir (Saidur vd., 2011).

Etkili ve verimli sistem tasarımlarının birçok avantajı ve gerekliliği vardır. En temel nedenler arasında kısıtlı enerji kaynaklarının israf edilmeden kullanılması gelmektedir. Bunların yanı sıra teknolojinin gelişmesiyle birlikte küçülen sistemlerin soğutulması önemli bir husustur. Fakat diğer yönden daha etkili soğutma sistemlerin tasarımı, sistemlerin genel verimi üzerinde de büyük rol almaktadır. Örnek olarak bir otomobil radyatöründe daha etkili bir sistem ile küçülen radyatör hacmi, ağırlıkta azalmanın yanında rüzgâr direncinden kaynaklanan sürtünmeleri de azaltmaya yardımcı olacaktır (Saidur vd., 2011). Bu ise daha az malzeme ve işçilik harcanarak imal edilecek bir aracın yanında yakıt tasarrufu sağlayacak ve çevrenin daha az kirletilmesine olanak tanıyacaktır. Bu ve bunun gibi sebepler, ısı transferinin iyileştirilmesi yönünde motivasyon kaynağı olmaktadır (Saidur vd., 2011).

Isıyı transfer etmek amacıyla genellikle kullanılan su, etilen glikol, pompalama yağı gibi geleneksel ısı transfer sıvıları, düşük termal performansları nedeniyle, günümüz endüstriyel sistemlerinde kullanılan teknolojik ısı değiştirici tasarımlarına rağmen, ısının etkili bir şekilde taşınması konusunda yetersiz kalmaktadır (Mohammed vd., 2013). Bu nedenle, konvansiyonel akışkanların ısı

özelliklerini iyileştirmek amacıyla, yüksek verimli ısı transfer akışkanlarının geliştirilmesi üzerine günümüzde pek çok çalışma yapılmaktadır.

Geçmişten günümüze, soğutma sistemlerinin performansını artırmak üzere yapılan çalışmalarda en dikkat çekici kısım, soğutma sıvılarının performansını artırmak üzere yapılanlardır. Bu bağlamda sıvıların termal performanslarını iyileştirmek için çeşitli geliştirmeler denenmiş ve sıvı içerisinde termal iletkenliği yüksek katı materyaller dağıtma fikri araştırmacıların ilgi odağı olmuştur(Erkut, 2012).

Özellikle yüksek teknoloji uygulamalarında, ısı transfer akışkanlarının performansını artırmaya yardımcı olabilecek nanoakışkanlar konularında yapılan çalışmalara ilgi gün geçtikte artmaktadır (Tzeng vd., 2005; Jang ve Choi, 2006; Wang ve Mujumdar, 2007; Yu vd., 2007; Shokouhmand vd., 2008; Xie ve Chen, 2009; Escher vd., 2011). Yapılan araştırmalarda, pek çok yazarın, nanoakışkanların partikül konsantrasyonuna bağlı olarak baz akışkanlara kıyasla daha yüksek termal iletkenlik sağladığı; sıcaklık, parçacık boyutu, dağılım ve kararlılık gibi özelliklerin nanoakışkanların termal iletkenliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı gibi konularda hemfikir oldukları görülmüştür. Yine yapılan çalışmalar, nanoakışkanların, temel sıvıya kıyasla daha yüksek termal iletkenlik göstermesinin yanı sıra konvektif ısı transfer katsayıları gibi termal özelliklerinin de geliştiğini göstermiştir (Saidur vd., 2011; Mohammed vd., 2011; Saidur vd., 2011; Mohammed vd., 2011).

Nanoakışkanlar, ulaşımdan enerji üretimine; mikroişlemciler ve Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler gibi elektronik sistemlerden biyoteknoloji alanına kadar çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilmektedir. Nanoakışkanlar ayrıca, otomobil motorlarını ve kaynak ekipmanlarını soğutmak, yüksek güçlü mikrodalga tüpleri ve yüksek güçlü lazer diyot dizileri gibi yüksek ısı akışlı cihazları soğutmak için de kullanılabilmektedir (Saidur vd., 2011). Fakat mevcut nanoakışkanların ısı değiştiricilerde kullanımı, özellikle endüstriyel uygulamalarda yüksek basınç kayıplarına neden olduğundan yüksek pompalama gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle nanoakışkanların türbülanslı akışta ve

tam gelişmiş bölgedeki termal performansları, nanoakışkanların daha düşük özgül ısı ve daha yüksek üretim maliyeti gibi diğer faktörler nanoakışkanların geliştirilmesini ve uygulamalarını etkileyebilmektedir.

Son yıllarda araştırmacıların ana odak noktasının, ısı sistemlerde kullanılan ısı değiştiricilerin tasarimsal özelliklerini iyileştirmekten daha çok nanoparçacık malzeme türleri üzerinde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Öte yandan nanoakışkanlar farklı yöntemler kullanılarak hazırlanabilmektedir. Bu yöntemler arasında bir adım ve iki adım yönteminin diğer yöntemlere göre bazı ayrıcalıkları vardır. Nanoakışkanların ısı ve hidrodinamik performanslarını araştırmak amacıyla yapılan çalışmaların çok büyük bir bölümünde iki adım yöntemi kullanılarak hazırlanmış nanoakışkanların test edildiği görülmüştür. Literatürde, tek adım yöntemiyle hazırlanmış nanoakışkanların ısı ve hidrodinamik performanslarına ilişkin çalışmaların çok sınırlı olması oldukça dikkat çekicidir. Halbuki, üretim yöntemine göre nanoakışkanların performanslarının karşılaştırıldığı sınırlı sayıdaki çalışmada, tek adım yöntemiyle hazırlanmış nanoakışkanların iki adım yöntemine göre hazırlananlara nazaran daha iyi ısı performans sergiledikleri anlaşılmaktadır (Parsa vd., 2022).

Literatürde yapılmış çok sınırlı sayıdaki tek adımlı yöntemle üretilmiş nanoakışkanlarla ilişkili çalışmalara katkı sağlamak amacıyla, bu çalışmada metal oksit nanoakışkanlar arasından seçilmiş bir nanoakışkanın ısı transfer karakteristiklerinin deneysel olarak araştırılması hedeflenmiştir. Bu maksatla, tek adım yöntemi ile sentezlenmiş ağırlıkça %3,3 bakır oksit konsantrasyonuna sahip su bazlı nano akışkanın ısı transfer ve hidrodinamik karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Benzer şekilde CuO/H₂O nanoakışkan içerisine ağırlıkça %0,1 Al₂O₃ ilave edilerek hazırlanan hibrit nanoakışkanın ısı transfer karakteristiklerinin de incelenmesi hedeflenmiştir. Sözü edilen karakteristiklerin ölçülebilmesi için iç içe borulu ters akışlı bir ısı değiştirici tasarlanarak imal edilmiş ve hazırlanan deney düzeneği üzerinde kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda sıcak akışkan olarak CuO/H₂O nanoakışkan, soğuk akışkan olarak ise şebeke suyu kullanılmıştır. CuO/H₂O nanoakışkan için ölçülen Reynolds Sayısı, Nusselt Sayısı, transfer edilen ısı, sürtünme faktörü, ısı taşınım katsayısı,

logaritmik ortalama sıcaklık farkı gibi hidrodinamik ve ısı transfer parametreleri deiyonize su ile yapılan deneylerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, nanoakışkanların ısı transfer karakteristiklerini ortaya çıkarabilmek amacıyla bugüne kadar yapılmış literatürde yer alan bazı çalışmaların özeti kronolojik sıraya göre verilmiştir.

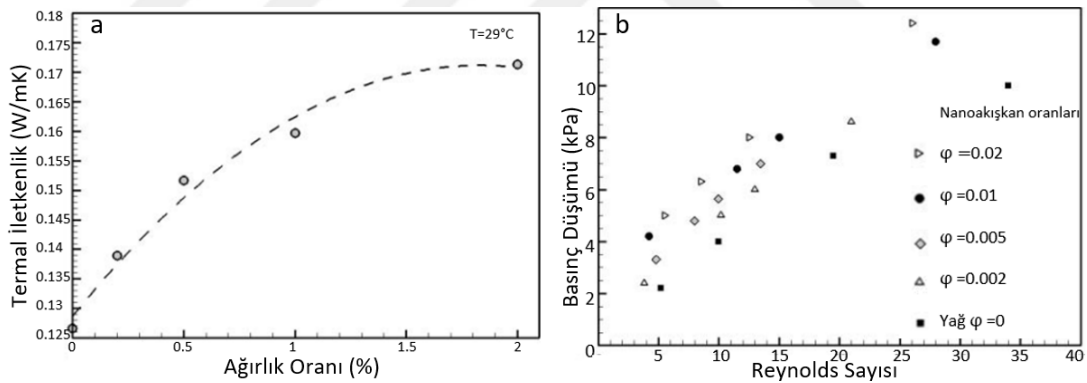
Heris vd. (2009), bakır-su nanoakışkanının dairesel borulu bir ısı değiştiricide konvektif ısı transferini deneysel olarak incelemişlerdir. Laminer akış şartlarında, sabit duvar sıcaklığı kabulü ile nanopartiküllerin farklı konsantrasyonları için Nusselt ve Peclet sayılarını hesaplayan yazarlar, geleneksel korelasyonlara göre bulunan daha düşük sonuçların Cu nanopartikül konsantrasyonunun optimizasyonu ile ilişkili olduğunu göstermişlerdir.

Kole ve Dey (2009), bir araç radyatöründe Al_2O_3 içerikli nanoakışkan kullanarak, sıcaklıkla ve nanopartikül konsantrasyonu ile nanoakışkanın viskozitesindeki değişimi incelemişlerdir. Oleik asit ile stabilitesi sağlanan nanoakışkanın 80 günden fazla stabil şekilde kaldığını belirten yazarlar, nanoakışkanların viskozitelerini partiküllerin hacimsel oranlarını da dikkate alarak ve 10-50 °C sıcaklıklar arasında ölçümlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, baz akışkanın Newtonian davranış sergilediğini gösterirken az da olsa nanopartikül ilavesiyle sıvının Newtonian davranıştan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Nanopartikül oranının artmasıyla viskozitenin artış gösterdiği ve sıcaklığın artması ile viskozitenin azaldığı görülmüştür.

Warrier ve Teja (2011), nanopartikül boyutlarının termal iletkenlik üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, ağırlıkça %0,3 polivinilpirolidon (PVP) ile 20 nm, 30-50 nm ve 80 nm boyutlarında gümüş nanopartiküllerin etilen glikol içerisinde dağıtılmasıyla elde edilen nanoakışkanları kullanarak deneyler yapmışlardır. Sıcak tel yöntemi yardımıyla termal iletkenlik ölçümü yapan araştırmacılar, referans sıvısı olarak su ve dimetil ftalat kullanmışlardır. Gümüş nanopartiküllerin termal iletkenliğinin azalan partikül boyutları ile beraber azaldığı gözlenmiştir. Araştırmacılar buldukları

sonuçların önceki çalışmaları doğrular nitelikte olduğunu ancak bazı noktalarda ayrıştığını belirtmişlerdir.

Ghazvini vd. (2011), laminar akışlı borulu ısı değiştiricide nanoelmas partikül ilaveli motor yağının ısı transfer özelliklerini incelemişlerdir. Nanoakışkanların farklı hacimsel oranları ve sıcaklıkları için karakteristik özellikleri not edilmiştir. Yazarların deneylerden alınan sonuçlara göre termal iletkenliğin yaklaşık %35 seviyelerine kadar yükseldiğini ve bununla beraber özgül ısının da %20 seviyelerine kadar ulaştığını belirtmişlerdir. Fakat bu sonuçların yanında viskozitede ki artış önemli bir dezavantajdır. Reynolds sayısı yükseldikçe ısı transfer katsayılarının da yükseldiği de görülmektedir. Bu şartlar altında ısı transfer katsayısının %60 seviyelerinde olması ve daha düşük çalışma sıcaklıklarındaki artışların daha belirgin olması da yazarların belirttiği durumlar arasındadır. Deneylerden elde edilen konsantrasyona bağlı termal iletkenlik ve Reynolds sayısına bağlı basınç düşümü grafikleri, Şekil 2.1’de verilmiştir.

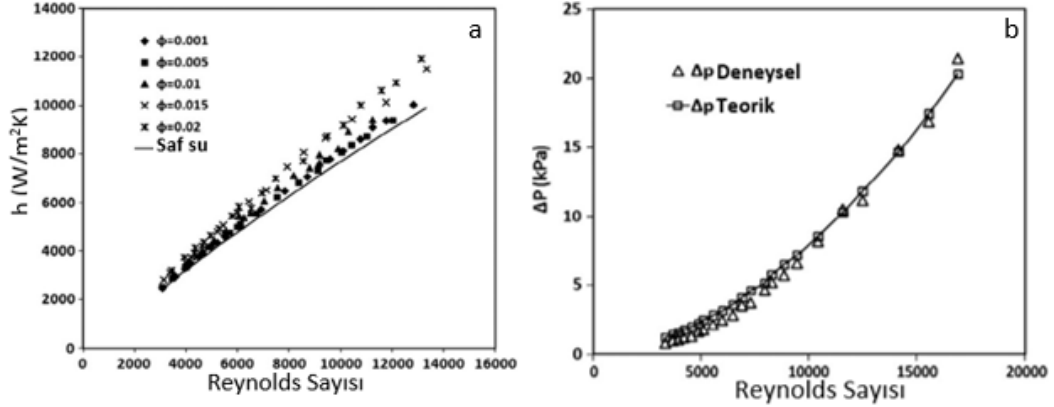


Şekil 2.1. (a) Farklı ağırlık oranlarında termal iletkenlik değerleri, (b) 26 kW/m² sabit ısı akısı altında akışkanların farklı Reynolds sayılarında basınç düşümü (Ghazvini vd., 2011)

Ayrıca yazarlar, kritik bir nokta olarak %2 konsantrasyonda basınç düşüşünün %50 seviyelerine ulaştığını ve bu kayıp miktarının sistem tasarımında önemli bir husus olduğunu da belirtmişlerdir.

Heyhat vd. (2012), %0,1; 0,5; 1; 1,5 ve %2 hacimsel oranlarında ortalama 40 nm çapında Al₂O₃ nanopartiküller ile yüzey aktif madde uygulanmadan hazırlanan Al₂O₃-su nanoakışkanının ısı transfer hızına etkisini ve basınç kayıplarını

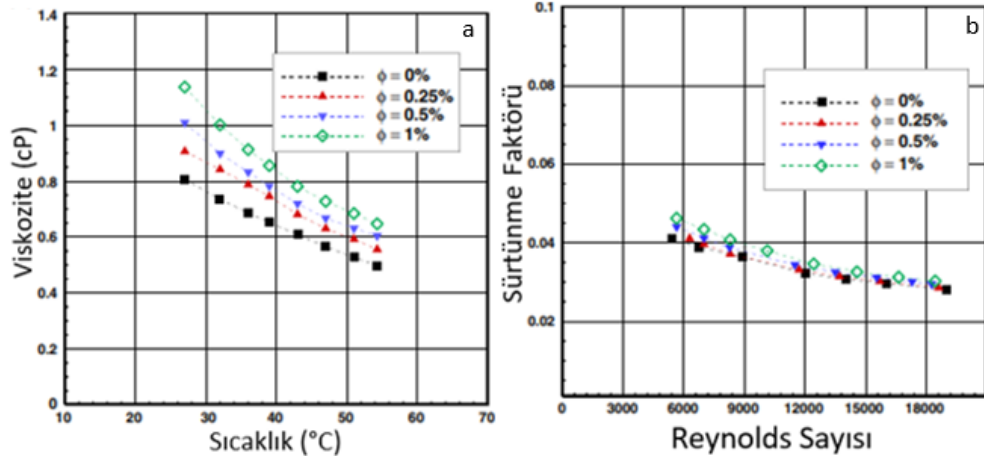
türbülanslı akış rejimi altında incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, ısı transfer katsayısının baz akışkana göre %23 kadar fazla olduğu ve konvektif ısı transfer katsayısının, artan partikül oranı ile arttığını da rapor etmişlerdir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. (a) ortalama konvektif ısı transfer katsayısının ve (b) basınç kaybının Reynolds Sayısına göre değişimi (Heyhat vd., 2012)

Artan Reynolds sayısının ısı transferine etkisinin düşük olduğunu bildiren yazarlar; Nusselt sayısının hesaplanmasında, nanoakışkan numunelerinin ölçüm verilerinin kullanılması durumunda literatürdeki korelasyonların çok büyük bir uyum içerisinde sonuç verdiğini de belirtmişlerdir.

Darzi vd. (2013), 20 nm ortalama boyutlu Al₂O₃ nanopartikül katkılı akışkanın çift borulu bir ısı değiştirici üzerinde ısı transfer ve hidrodinamik özelliklerini incelemişlerdir. Reynolds sayısının 5000-20000 aralığındaki akış şartları için %1; 0,5 ve %0,25 hacimsel oranlarındaki numuneler ile yapılan deneylerde gerçekleşen basınç kayıplarının tolere edilebilir düzeyde olduğu bulunmuş ve partikül oranının artmasıyla beraber basınç kayıplarının da arttığı gözlenmiştir. Şekil 2.3'te verilen grafiklerde, deneye ilişkin viskozitenin sıcaklığa bağlı ve sürtünme faktörünün Reynolds sayısına bağlı değişimleri verilmiştir.



Şekil 2.3. (a) sıcaklığa bağlı viskozitenin, (b) Reynolds sayısına bağlı sürtünme faktörünün farklı oranlardaki akışkanlarda elde edilen sonuçları (Darzi vd., 2013)

Sonawane vd. (2013), ortalama 5 nm çapında TiO₂ nanoparçacıklarının termal iletkenliklerinin ve sonikasyon sürecinin termal özelliklere etkisinin incelenmesi üzerine yüzey aktif madde ilavesiz hazırlanan nanoakışkan numuneleri ile bir çalışma yürütmüşlerdir. Sol jel metodu ve ultrasonik karıştırma ile baz sıvı olarak su, etilen glikol ve parafin yağı kullanılarak nanoakışkan üretimi yapılmıştır. Yapılan deneylerde termal iletkenlik artışının önemli ölçüde geliştiği ve %22 seviyelerine ulaştığı; bunun yanında sonikasyon süreci uzadıkça da nanoakışkanın termal özelliklerinin iyileştiğini rapor etmişlerdir.

Jiang vd. (2014), bakır nanopartiküllerini n-tetradekan içerisinde iki adımlı yöntemle göre dağıtarak hazırlamış oldukları nanoakışkanın termal özelliklerini incelemişlerdir. 0,0001 ve 0,02 arasında değişen farklı hacimsel oranlarda hazırlanan numuneler üzerinde, 306,22-452,66 °K sıcaklık aralığında termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Araştırmacılar Jang ve Choi modeli ile elde edilen sonuçların, deneysel sonuçlarla benzerlik gösterdiğini ve termal iletkenliğin, 452,66 °K'de Brownian hareketinin etkisiyle çok daha büyük bir artış sergilediğini tespit etmişlerdir.

Behabadi vd. (2015), çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)-su nano akışkanının ısı transfer özellikleri ve hidrodinamik özelliklerini incelemek için bir çalışma yürütmüştür. Deneyde kullanılan numuneler distile su içerisinde %0,005; 0,1; 0,2

ağırlık oranlarında nano partiküllerin ultrasonik karıştırma yöntemiyle dağıtılması ile hazırlanmıştır. Yazarlar nanopartikül miktarı arttıkça ısı transfer katsayısının da arttığını belirtmişler, artışın sebebi olarak ise Brownian hareketi ve mikro konveksiyonu göstermişlerdir. Nanoakışkanın ısı transfer katsayısı, ağırlıkça %0,2 konsantrasyonda ve Reynolds sayısının 20000 olduğu durumda %33,18 artmış, sürtünme faktörü ve basınç düşüşündeki artışın ise önemsiz olduğu yazarlar tarafından bildirilmiştir. Fakat deneylerden elde edilen sonuçlar, boru içerisindeki ısı transferini artırmak amacıyla kullanılan elemanların hatvelerinin veya tel çapının artırılması ısı transferi ile birlikte sürtünme faktörünü de artırdığını ortaya çıkarmıştır. Yazarlar bu sonuçlarla beraber sürtünme faktörü ve Nusselt sayısının teorik tahmini için bir regresyon denklemi de geliştirmişlerdir.

Jiang vd. (2015), karbon nanotüp (CNT) içerikli nanoakışkan ile efektif termal iletkenlik ölçümü üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışma kapsamında farklı CNT konsantrasyonlarında hazırlanan nanoakışkan numuneleri üzerinde testler yapılmıştır. %0,22-%1 hacimsel oranlar ve 30-90 °C sıcaklıklarda yapılan deneyler sonucu partikül konsantrasyonu arttıkça termal iletkenlik doğrusal bir davranış sergilemeden arttığı görülmüştür. Çalışma sonucunda ise CNT ile hazırlanan nanoakışkanlarda efektif termal iletkenlik hesabı için bir model de önerilmiştir.

Esfe vd. (2015), %0,1; 0,2; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 3 hacimsel partikül konsantrasyonlarında iki adımlı yöntemle göre hazırlanmış MgO/su-etilen glikol nanoakışkan örneklerinin, termal etkilerini araştırmışlardır. Sıcak tel yöntemi kullanılarak 20-50 °C arasında termal iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Termal iletkenliğin, nanoakışkan içerisindeki nanopartiküllerin artan oranları ve sıcaklık ile arttığı gözlenmiştir. Yazarlar elde edilen sonuçlar ışığında yeni bir korelasyon önermişlerdir.

Çakır (2015), Al₂O₃ içeren nanoakışkan kullanarak ısı borularının performanslarını geliştirmeyi hedeflemiştir. Bu bağlamda bir ısı borusu üzerinde %2 Al₂O₃ partikül konsantrasyonuna sahip nanoakışkan kullanılarak deneyler

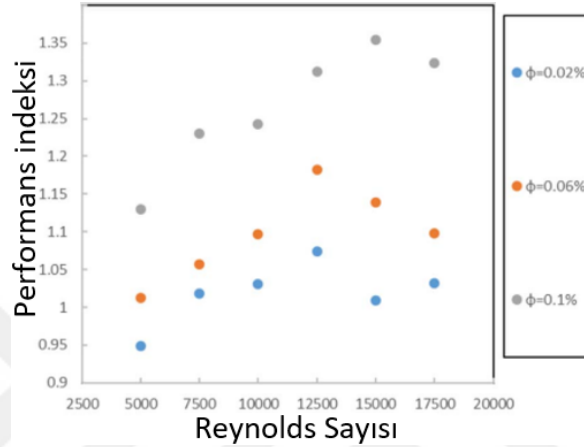
yapılmıştır. Kurulan deney düzeneğinde, evaporatör bölgesi 40 cm uzunlukta ve bir ısı kaynağı ile çevrelenmiştir. Sistemde adyabatik bölge 20 cm ve kondenser bölgesi ise 40 cm uzunluğunda düzenlenmiştir. Deneylerde 3 farklı kütleli debi ve evaporatör kısmında 3 farklı güçte ısı kaynağı kullanılmıştır. Deneyler 2 farklı eğim açısında gerçekleştirilmiştir. Bu şartlarda altında nanoakışkan kullanımı ile ısı direnç %46 kadar düşürülmüş; 0,0075 kg/s debi 500W ısıtma gücü ve 75 derece açıda suya kıyasla nanoakışkan %35,7 daha verimli çalışmıştır.

Dhale vd. (2015), bir otomobil radyatöründe nanoakışkan kullanımının, ısı transferine olan katkısını araştırmışlardır. Yazarlar hacimce %1,2 Al_2O_3 konsantrasyonuna sahip su bazlı soğutma akışkanında, kütleli debinin sabit olduğu durumda etkenliğin %23'e kadar arttığını rapor etmişlerdir. Ayrıca ısı transfer hızının nanoakışkan içerisindeki Al_2O_3 konsantrasyonuna bağlı olarak arttığı ve hacimce %1 Al_2O_3 oranı için, ısı transferindeki artışın %40 seviyelerine ulaştığı tespit edilmiştir.

Aberoumand ve Jafarimoghaddam (2017), tek adım yöntemi ile ağırlıkça %0,2; 0.5; 1 derişimlerinde hazırlamış oldukları ve baz akışkan olarak motor yağının kullanıldığı Cu nanopartiküllerinden oluşan nanoakışkan numunelerinin termofiziksel özellikleri ve stabilitesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yazarlar stabilite kontrolleri sonucu tek adımlı yöntemle göre üretilmiş nanoakışkanların, iki adımlı yöntemle üretilenlere göre daha kararlı bir yapıda olduklarını not etmişlerdir. Yüksek ağırlık konsantrasyonuna sahip nanoakışkanın termal iletkenliği 40-100 °C sıcaklıklar arasında 0.153- 1.17 W/mK olarak ölçülmüş fakat baz akışkanın termal iletkenliğinin tutarsız bir düşüş eğiliminde olduğu belirtilmiştir. Termal iletkenlik %1 ağırlık oranına sahip numunede %27-49 arasında bir artış sergilemiştir. 35 °C'nin altındaki sıcaklıklar için akışkanın Newtonian olmayan davranış sergilediği de belirtilmiştir.

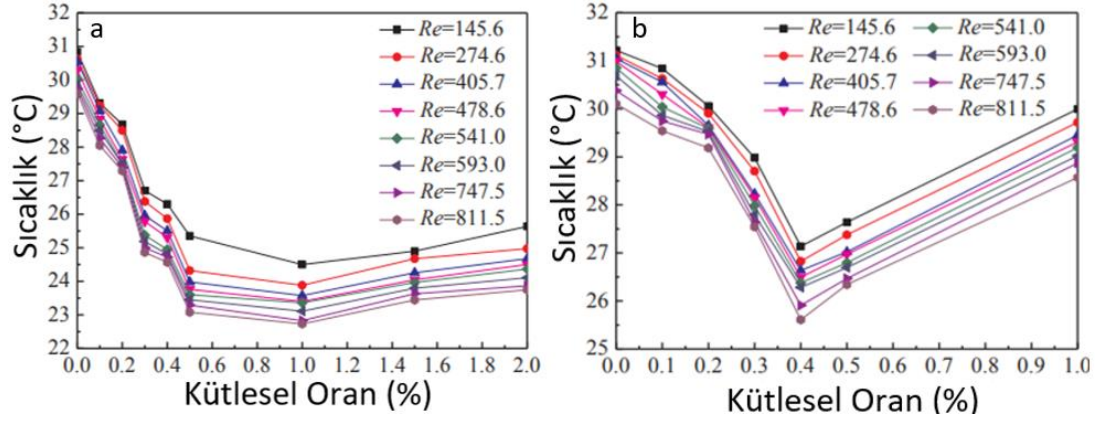
Yarmand vd. (2017), hibrit grafen nanoplatelet-platin nanoakışkanlarının hidrodinamik ve termal özelliklerini bir deney düzeneğinde sabit ısı akısı şartlarında incelemişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, baz sıvıya göre tüm örneklerin daha iyi ısı transfer karakteristiği gösterdiği yönündedir. Nusselt

sayısı için en büyük artış oranı %28,48, ağırlıkça %0,1 konsantrasyona sahip numune ile yapılan deneylerde Reynolds sayısı 17500 için, sürtünme faktöründe %10,98'lik bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Nusselt sayısındaki artış göz önüne alındığında sürtünme faktöründeki artışın ihmal edilebilir olduğu belirtilmiştir. Çalışmadan elde edilen performans indeksinin Reynolds Sayısına bağlı değişimi ise Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Farklı ağırlık oranına sahip nanoakışkanların Reynolds sayısına göre performans indeksi (Yarmand vd., 2017)

Qi vd. (2017), CPU soğutmak için kullanılacak bir nanoakışkanın kararlılığını ve ısı transfer özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla kurulan deney düzeneğinde, Al_2O_3 -su nanoakışkanı için %0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1; 1,5 ve %2 kütle oranlarında numuneler ve TiO_2 için %1 ve %0,4 kütle oranlarında numuneler test edilmiştir. Numunelerin ısı transfer performansındaki iyileşmeler, partikül konsantrasyonunun artmasıyla beraber bir noktaya kadar arttığı ve sonrasında azaldığı yazarlar tarafından belirtilmiştir. Optimum oran ise Al_2O_3 -su için %1, TiO_2 -su için %0,4 olduğu görülmüştür. Bu iyileşmeler eşliğinde CPU sıcaklığını Al_2O_3 -su, %23,2; TiO_2 -su ise %14,9 oranlarında azaltmıştır. Nusselt sayılarında ise Al_2O_3 %140,4; TiO_2 , %27,7 oranında artış sağlamıştır. Deney sonucunda alınan grafiklerden, Al_2O_3 -su ve TiO_2 -su nanoakışkanının farklı kütle oranları ve farklı Reynolds sayılarında CPU yüzey sıcaklığına etkisi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Farklı kütle oranlarında hazırlanmış nanoakışkanların CPU yüzey sıcaklığına etkisi, (a) Al₂O₃-su nanoakışkanı, (b) TiO₂-su nanoakışkanı (Qi vd., 2017)

Asadi vd. (2018), yapmış oldukları çalışmada baz akışkan olarak termal yağ kullanılan, MgO-MWCNT hibrit nanoakışkanın, ısı transferine ve pompalama gücüne etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada 50 °C sıcaklık ve %2'lik partikül konsantrasyonunda, termal iletkenlikteki maksimum artış %65 olarak bulunmuştur. Yazarlar, belirli bir sıcaklık ve partikül konsantrasyonu aralığında termal iletkenliği tahmin etmek için bir korelasyonu da sunmuşlardır. Çalışmada, pompalama gücünde artış olacağı görülse de buna rağmen baz akışkan yerine nanoakışkan kullanımının hem laminar hem de türbülanslı akış rejimlerinde verimli olacağı belirtilmiştir.

Keyvani vd. (2018), seryum oksit nanoparçacık ilaveli bir nanoakışkan ile etilen glikolün termal iletkenliklerindeki farklarını görmeyi hedeflemiştir. Bu amaçla 10-30 nm partikül çapına sahip nanopartiküller kullanılarak iki aşamalı yöntemle; 0,25-2,5 hacimsel orana sahip nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Sıcak tel yöntemi ile 25-50 °C aralığında tüm örneklerin termal iletkenliği de ölçülmüştür. Sonuçlarda 50 °C için nanopartiküllerin hacimsel oranı %2,5 değerine ulaştığında, etilen glikolün termal iletkenliği %22 oranında arttığı görülmüştür. Yazarlar nanoakışkanın termal iletkenliğini tahmin etmek amacıyla bir korelasyon sunmuşlardır. Sıcaklık ve hacimsel oranların fonksiyonu olarak tanımlanan bu korelasyonda, termal iletkenlik oranı ile değişkenlerin doğrusal bir ilişki sergilediği de görülmüştür.

Wu vd. (2019), motor yağına çinko oksit ve çok duvarlı karbon nanotüp nanopartikülleri ekleyerek, oluşan hibrit nanoakışkanın termal özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu deneylerde partiküllerin ve sıcaklığın nanoakışkan üzerindeki termal özelliklere etkileri de incelenmiştir. Yazarlar deneyleri 25-50 °C sıcaklıklarda ve %0,05-%0,8 hacimsel oran aralığında gerçekleştirmişlerdir. Deneylerin sonucunda, yükselen hacimsel oranlarla beraber nano yağlayıcının termal iletkenliğindeki artışları gözlemlemişlerdir. Maksimum ısı iletkenlik değeri, 50 °C ve %0,8 hacimsel oranda gerçekleşmiştir. Yazarlar ayrıca, hata miktarının deneysel verilerden alınan sonuçlara göre %1'den az olduğu bir korelasyon da geliştirmişlerdir.

Singh vd. (2021), yüzey aktif madde ile sudan oluşan çözeltinin ve CNT nanoakışkanının, ısı transfer ve hidrodinamik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre yüzey aktif madde ve suyun beraber çalışmasında, suya göre viskozite artışı görülmemiş fakat yoğunlukta az miktarda artış gerçekleşmiştir. Suyun toplam ısı transfer katsayısının Reynolds sayısı ile arttığı ve sürtünme faktörünün de azaldığı görülmüştür. CNT nanoakışkan kullanımında ise, artan Reynolds sayısı ile sürtünme faktörünün azaldığı tespit edilmiştir. Nanoakışkan kullanımı halinde yüzey aktif madde-su çözeltisine göre %162, suya kıyasla %152'ye ulaşan termal iletkenlik artışı gözlenmiştir. Reynolds sayısının 5000 olduğu durum için, suya göre CNT nanoakışkanın toplam ısı transfer katsayısında %62,62'lik bir iyileşmenin olduğu rapor edilmiştir.

Karaca ve Altun (2022), yapmış olduğu çalışmada iç içe borulu bir ısı değiştiricide ters ve paralel akış şartlarında sıcak akışkanın kütleli debisini sabit tutarak, farklı soğuk akışkan debilerinde ısı transferine etkilerini ve boruda engeller olması halinde ısı transferinde oluşacak farklılıkları ANSYS Fluent yazılımı ile sayısal olarak incelemişlerdir. Analizler neticesinde boruda engel olmadığı durum için zıt akış şartlarında etkenlik değerinin paralel akışa kıyasla %4,5 arttığı gözlenmiş ve dairesel engellerin bulunduğu ısı değiştirici tipinde ise, pürüzsüz boruda gerçekleşen zıt akışa göre %44 arttığını bulmuşlardır.

Parsa vd. (2022), yapmış oldukları çalışmada bir adım ve iki adım olmak üzere iki farklı yöntemle hazırlanmış, %1, %3 ve %5'lik farklı konsantrasyonlara sahip gümüş nanoakışkanın, fotovoltaiik/termal (PV/T) sistemin performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tek adım yöntemiyle hazırlanmış nanoakışkan kullanıldığında, PV/T'nin enerjisinin ve ekserjisinin, iki adım yöntemiyle hazırlanan nanoakışkan kullanımına kıyasla önemli ölçüde iyileştiği tespit edilmiş, nanoakışkan hazırlama yönteminin ve kararlılığının PV/T'lerin performansı üzerinde önemli rol oynadığı sonucuna varılmıştır.



3. NANOAKIŞKANLAR

3.1. Nanoakışkanlar ve Nanoakışkan Uygulamaları

Isı transferini daha etkili şekilde sağlamak üzere, ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanını arttırmak, mikro kanallar açmak veya transfer yüzeylerinin titreşime maruz bırakmak gibi sıkça uygulanan yöntemler bulunmaktadır (Dirlik, 2018). Bu amaçla yapılan tasarımlar, boyut ve ağırlık sınırının olmadığı sistemlerde etkili bir çözüm olabilirken, mikroişlemci gibi soğutma alanı oldukça sınırlı olan sistemlerde, kapasite artırımı ya da boyutların küçültülmesi yönündeki beklentiler geleneksel soğutma sistemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır (Saidur vd., 2011).

Diğer yandan ağırlık ve hacim sınırlaması olmasa dahi sistemlerin küçültülmesi, birçok alanda tasarruf ve iyileşme sağlayabilir. Örnek olarak bir otomobil radyatöründe küçülen radyatör hacmi, ağırlıkta azalmanın yanında rüzgar direncinden kaynaklanan sürtünmeleri de azaltmaya yardımcı olacaktır (Saidur vd., 2011). Bu durum daha az malzeme ve işçilikle aracın imal edilmesini sağladığı gibi aynı zamanda daha düşük yakıt sarfiyatı ile çevrenin daha az kirletilmesine de olanak tanıyacaktır (Leong vd., 2010).

Isı transferinin geliştirilmesinin önem taşıdığı bir başka alan ise askeri sistemlerdir. Yeni nesil silahlar, araçlar ve savunma sistemleri ile artan ısıнын uzaklaştırılması sorun olmaktadır. Askeri araç ve ekipmanlardan beklenen yüksek güçlerin bir sonucu olarak bu sistemlerin güç devrelerinde, yüksek güçlü elektronik ve mekanik komponentlerinde oluşan atık ısılar, savunma sistemlerinin güçlerini ve tasarımlarını geleneksel akışkanlarla kısıtlamaktadır (Saidur vd., 2011). Bu sebeple sadece tasarımları minyatürleştirme veya gelişen teknolojiye olanak sağlamanın yanında çok daha farklı alanlarda gerçekleşecek sorunlar, kullanılan geleneksel akışkanların geliştirilmesiyle çözülebilecektir.

Birçok araştırmacı bu amaçla soğutma sıvısını modifiye etmeye çalışmış veya farklı sıvı arayışlarına girmiştir. Bu çalışmalarla birlikte sistemde kullanılan

soğutma sıvısından daha iyi termal özelliklere sahip materyalleri sıvı içerisinde dağıtarak, genel performansı artırmayı hedeflemişlerdir (Soylu, 2018).

İlk denemelerde sıvı içerisinde dağıtılan partiküller çökelme, dolaşım hattında erozyon artışı, küçük soğutma kanallarında tıkanıklık, ciddi miktarda artan pompalama gücü gibi dolaşım ve ısı transferi ile ilgili çok büyük olumsuzluklara sebebiyet vermekteydi (Dirlik, 2018). Bu olumsuzlukları çözmek amacıyla Choi'nin yapmış olduğu tanımlamayla, uzun süreli bir fenomen olan sıvı içerisinde katı partikül dağıtma fikri gerçekleşme imkanı bulmuştur (Choi ve Eastman, 1995). Choi sıvının içerisindeki partikül boyutlarının 100nm altında olması ve sıvıda asılı kalması gerektiğini belirtip, oluşan bu yeni sıvıya da nanosıvı diyerek bu terimi literatüre kazandırmıştır (Choi ve Eastman, 1995).

Katı partiküllerin akışkan dolaşımına katılması; sıvıdan daha iyi iletim özelliğine sahip partiküllerin akışın gerçekleştiği yüzey alanlarına teması sonucu ısı transferini artırması, çalkantı ve türbülanslar ile ısı transferini hızlandırması, akışkanın ısı iletim katsayısının artması gibi nedenlerle ısı transferinde önemli iyileştirmeler gerçekleştirir (Xuan ve Li, 2000). Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında ise nanosoğutucuların, sıcaklığın arttığı noktalarda termal iletkenlik değerlerinin daha da yükselmesi, onları yeni nesil soğutma sıvıları olarak tanımlamanın dışında, akıllı sıvılar olarak tanımlamamızı da sağlamıştır (Demirpolat, 2018). Sıcaklık ile birlikte artan termal iletkenlikleri sayesinde, yüksek sıcaklık uygulamalarında nanoakışkanların daha başarılı olacağı düşünülmektedir. Termal performansın artışına sebep olan temel etkenin, partiküllerin sıvı içerisinde rastgele hareketi olarak tanımlanan Brownian hareketi olduğu yönünde genel bir kanı oluşmuştur (Jang ve Choi, 2004).

Nanosıvılar ilk aşamada sadece sıvının mevcut özelliklerini geliştirmeye yönelik bir çalışmanın sonucu olsa da bu konuyu ilgi çekici yapan, nanoboyutta malzemelerin mikro boyuta göre çok daha farklı davranışlar sergiliyor olmasıdır (Canan, 2012). Yoo vd. (2007), nanoakışkanların termal özelliklerinin iyileşmesinde, nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı-hacim oranlarının nanoakışkanın termal iletkenlik artışından daha baskın bir etki olduğunu

belirtmişlerdir. Nano boyutta, parçacıkların yüzey alanı-hacim oranının artması, onları reaktif bir yapıya sokarak beklenen etkilerinin ötesinde davranışlarla birlikte daha heyecan verici bir çalışma alanı olmaktadır. Buna en belirgin örnek ise altının nano boyutta katalizör görevi görmesidir (Canan, 2012).

Nanoakışkanlar belirtilen üstün özellikleri sayesinde endüstride birçok alanda sistemlerin verimli hale gelmesine olanak sağlamaktadır. Nanoakışkanların ilgi uyandırdığı bu alanlar içerisinde;

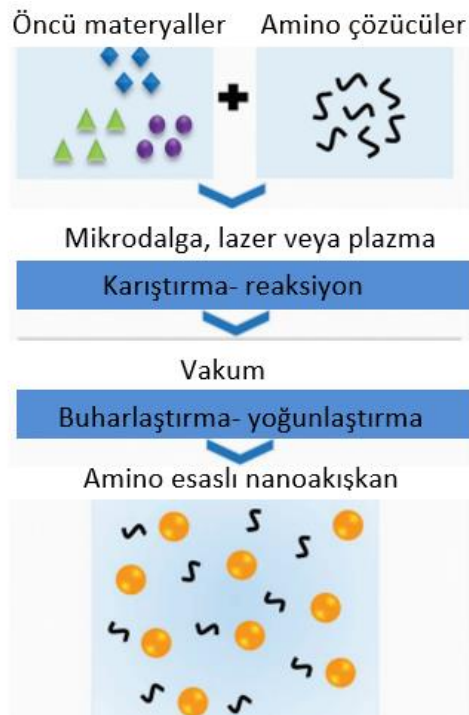
- Yağlama sıvıları
- Nükleer sistemlerin soğutulması
- Güneş enerji sistemleri
- Yüksek güçlü lazerler
- Talaşlı imalat tezgâhları
- Isı transfer sistemleri
- Motor soğutma sıvıları
- Transmisyon yağları
- Jeneratörlerde gömlek soğutma sıvıları
- Elektronik devrelerin soğutulması
- Transformatörlerin soğutulması
- Soğutma çevrimleri
- Uzay sanayisi ve sağlık sektörü de bulunmaktadır (Saidur vd., 2011).

3.2. Nanoakışkan Üretim Yöntemleri

Nanoakışkanların üretimi, kullanılacak sıvıda olması gereken özelliklere göre tercih edilen tek adımlı yöntem ve iki adımlı yöntem olmak üzere 2 metot ile yapılmakta ve farklı araştırmacılar bu üretim yöntemlerinin bazı konularda birbirlerine karşı avantajlarının olduğunu savunmaktadırlar (Wang ve Mujumdar, 2007).

3.2.1. Tek adımlı yöntem

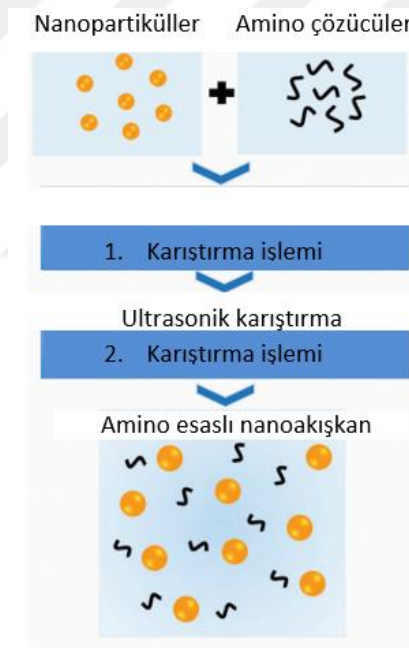
Nanopartikül sentezine baz sıvının da dahil edildiği bir üretim yöntemidir. Nanopartikül sentezi ile partiküllerin sıvıda dağıtılması aynı anda gerçekleşir (Demirpolat, 2018). Nanopartiküllerin, içerisinde dağıtılacağı sıvı ile birlikte kimyasal süreçlerden geçtiği, buharlaştırma ve yoğunlaştırma yoluyla nanoakışkanın sentezlendiği bir üretim yöntemidir (Şekil 3.1). Mikrodalga, lazer veya plazmalar ile desteklenerek hazırlanan nanoakışkanın fiziksel özellikleri, pH değerleri ve sıcaklık kontrolü sağlanarak ayarlanır. Bu yöntemde kullanılan metotların sonucu olarak, ısı iletim katsayısı yüksek olan ve hızlı oksitlenme yeteneğine sahip metalik partiküller ile nanoakışkan üretimi tercih edilmekte olup, düşük buhar basınçlı akışkanların üretimi için uygun görülmektedir (Erol, 2018; Tuğan, 2019). İki adımlı yöntemle göre avantajları ise, daha kararlı bir karışım, düşük topaklanma eğilimi ve daha iyi termal iletkenlik gösteriyor olmasıdır. Bu yöntem ile yapılan çalışmalar, istenilen her partikül sentezi için uygun olmayışı, pahalı ve süreç gerektiren bir yöntem oluşu gibi dezavantajlar sebebiyle kısıtlıdır (Demirpolat, 2018). İşlemi basitçe tarif eden görsel Şekil 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1. Tek adımlı yöntemle nanoakışkan üretim aşamaları (Yu vd., 2019)

3.2.2. İki adımlı yöntem

Üretimi yapılan ve toz halde bulunan nanopartiküllerin, sıvı içerisinde dağıtılması ile nanoakışkan hazırlama yöntemidir. Ucuz olması ve nispeten daha kolay üretim yöntemiyle, en sık kullanılan üretim yöntemidir (Erkut, 2012). Bu metotla üretim için sol-jel, kimyasal-mekanik ayrıştırma ve farklı karıştırma teknikleri gibi yöntemlerle toz halinde nanopartiküller elde edilir. Partiküllerin boyutlarını küçültmek ve homojen bir boyut dağılımı sağlamak amacıyla da mekanik öğütme işlemleri uygulanarak partiküller, bir sıvı içerisinde dağıtılmaya hazırlanılır. Sonrasında ultrasonik karıştırma, yüksek hızlı karıştırma işlemleri gibi süreçler sonunda sıvı içerisinde homojen bir dağılım elde edilmesi hedeflenir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. İki adımlı yöntemle nanoakışkan üretim aşamaları (Yu vd., 2019)

İki adımlı yöntemin dezavantajı ise nanoakışkanın kararlılığını sağlama noktasında ortaya çıkmaktadır. Nanopartiküllerin yüksek reaktivitesi ve Van der Waals kuvvetleri sebebiyle kümelenmeler artmakta ve bu durum daha sıvı içerisinde karışmadan nanopartiküllerden beklenen özellikleri yitirmesine neden olmaktadır (Kılınç, 2015). Temel sıvı ile karışan nanopartiküllerde ise kararlı durumda bir nanoakışkan hazırlamak için pH dengeleme işlemleri, yüzey

aktif madde ilavesi, ultrasonik karıştırma gibi fiziksel ve kimyasal işlemler kullanmak gerekmektedir (Tuğan, 2019). Fakat bu durumda da yüksek sıcaklıklarda, eklenen katkı malzemelerin görevlerini yerine getirememesi sorunları oluşturmaktadır (Çifci, 2014). Bu sorunların ortadan kalkması için nanoakışkanın kullanılacağı sistem şartlarının çok iyi tespit edilmesi gerekmektedir ve hazırlanan nanoakışkanın stabilitesi sağlanırken bu parametreler göz önünde bulundurulmalıdır.

3.3. Nanoakışkanların Kullanımları ile İlgili Zorluklar

Nanoakışkanların pek çok farklı alanda kullanımı, alanın gelişimi açısından umut verici görünmektedir. Ancak araştırmacılardan gelen sonuçların zaman zaman birbiriyle uyuşmaması, süspansiyon karakterizasyonu ile ilgili yetersizlikler ve nanoakışkan özelliklerindeki değişikliklerin tam olarak anlaşılmaması nedeniyle nanoakışkanların kullanımına yönelik bazı zorluklar ortaya çıkabilmektedir (Saidur vd., 2011). Aşağıda kısaca açıklanan bu tür bazı zorlukların aşılması halinde nanoakışkanların kullanım alanındaki çeşitliliğin ve kullanım yoğunluğunun artabileceği öngörülmektedir.

Kararlılık: Nanopartiküller her zaman çok güçlü Van der Waals etkileşimleri nedeniyle topaklaşmaya meyilli olduklarından, homojen bir süspansiyon hazırlanması teknik bir zorluk olmaya devam etmektedir. Kararlı nanoakışkanlar elde edebilmek için, yüzey aktif madde ilavesi, asılı parçacıkların yüzey modifikasyonu veya asılı parçacık kümelerine kuvvet uygulanması gibi fiziksel veya kimyasal işlemler yapılmaktadır. Dispersiyon ajanları ve yüzey aktif ajanlar, ince hidrofobik malzeme parçacıklarını sulu çözeltide dağıtmak için kullanılabilir (Hwang vd., 2006).

Basınç düşüşünde ve pompalama gücünde artış: Nanoakışkanların bazı akışkana göre daha yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip olması, akış sırasında oluşan basınç düşüşünü ve buna bağlı olarak da pompalama gücünü artırmaktadır. Bu durum nanoakışkan kullanımının önemli dezavantajlarından birisi olarak görülse de çoğu durumda nanoakışkandan elde edilen ısı kazancının

yüksek olması nedeniyle basınç kaybındaki artışlar genellikle göz ardı edilebilmektedir (Saidur vd., 2011, Pordanjani vd., 2021).

Farklı akış koşulları altındaki nanoakışkanların ısı performansları:

Özellikle tam gelişmiş ve türbülanslı akış koşulları altında nanoakışkanların ısı performansları konusunda araştırmacıların bulguları arasındaki tutarsızlıklar, bu konuda yapılacak çalışmaların dikkatle ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır (Pordanjani vd., 2021).

Viskozite artışı: Özellikle büyük hacimlerde nanoakışkana ihtiyaç duyulan türbülanslı akış koşullarının hakim olduğu endüstriyel sistemlerde, geleneksel akışkanların nanoakışkanlarla ikame edilmesinin, viskozite artışı nedeniyle çok güven verici olmadığı kanaati oluşmaktadır. Bu nedenle nanoakışkan içerisindeki nanoparçacık konsantrasyonunun hacimce % 0,2 seviyelerinde sınırlandırıldığı görülmektedir (Saidur vd., 2011).

Düşük özgül ısı: Literatürdeki bilgilere göre nanoakışkanların özgül ısıları temel akışkanın özgül ısısına göre daha düşüktür. Bu fark özellikle nanoakışkanın soğutucu akışkan olarak kullanılması halinde dezavantajlı bir durumun ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Saidur vd., 2011).

Yüksek maliyet ve üretim zorlukları: Nanoakışkanlar genellikle tek adım ya da iki adım yöntemiyle üretilmektedirler. Her iki yöntemde de sofistike ekipmanlara ve işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum üretim maliyetini artırdığı gibi aynı zamanda üretim sürecini de zorlaştırmaktadır (Saidur vd., 2011).

3.4. Metal Oksit Nanoakışkanlar ve Termofiziksel Özellikleri

Metallerin yüksek termal özellikleri, onları bir soğutma sıvısında kullanılması için ilgi odağı yapmıştır. Fakat metal nanopartiküller ile hazırlanan nanoakışkanlar istenilen stabiliteyi vermemektedir. Çalışmalarda metal nanoakışkanların yüksek termal özellikleri dikkat çekmekte ancak araştırmacılar metal oksit partiküller ile daha kararlı akışkanların oluşturulabileceğini de

belirtmektedir (Saidur vd., 2011). Önceden de belirtildiği gibi, tek adımlı yöntem ile üretilen nanosıvıların daha kararlı bir yapıda olması ve bazı metal oksit nanopartiküllerin, tek adımlı yöntemle üretilmeye elverişli olması çalışmaların bu yönde yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Literatürde bulunan bazı metal oksit nanoakışkanların termal iletkenlik oranı ve viskozite oranı gibi termofiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Metalik nanopartikül içeren nanoakışkanlarla yapılan bazı çalışmalar (Suganthi ve Rajan, 2017)

Nanoakışkan	Nanopartikül oranı	Sıcaklık (°C)	k_n/k_{ts}	μ_n/μ_{ts}
	Hacimsel (%) (*)Kütleli (%)			
CuO-su	0.016	28	1.13	1.09
CuO-EG	1	30	1.076	0.818
CuO-PG	1.5	30	1.255	0.601
Al₂O₃-su	3	Oda sıcaklığı	1.10	1.48
Fe₂O₃-su	20*	30	1.10	2.49
TiO₂-EG	5	30	1.272	3.2
TiO₂-su	2	25	1.07	1.13
ZnO-EG	4	28	1.334	0.608

Tablodaki termal iletkenlik artışı, viskozite artışı ya da k_r/μ_r oranlarını değerlendirmek suretiyle hangi uygulamada hangi nanoakışkanın kullanılması gerektiğine karar vermek çok daha avantajlı olacaktır.

4. ISI TRANSFER PARAMETRELERİNİN KARAKTERİZASYONU

Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak iç içe borulu bir ısı değiştiricinin hem su hem de nanoakışkanın kullanıldığı durumlar için ısı transfer ve hidrodinamik parametrelerin analizi yapılırken kullanılan yöntemler bu bölüm içerisinde anlatılmıştır. Ayrıca, tek adım yöntemiyle sentezlenmiş bakır oksit-su nanoakışkanın hidrodinamik ve ısı transfer karakteristiklerinin ters akışlı iç içe borulu bir ısı değiştirici yardımıyla belirlenmesi hedeflendiği için, ısı değiştiriciler konusunda da kısa bir bilgi verilmiştir.

4.1. Hidrodinamik ve Isı Transfer Parametreleri

Bu çalışma esnasında kurulan deney düzeneğinde, sıcak akışkan olarak de-iyonize su ve CuO-H₂O nanoakışkan, soğuk akışkan olarak ise şebeke suyu kullanılmıştır. Deney düzeneğine yerleştirilen cihazlar yardımıyla, sıcak akışkan debisi ($\dot{m}_h$), soğuk akışkan debisi ($\dot{m}_c$), sıcak akışkanın ısı değiştiriciye giriş sıcaklığı ($T_{h,i}$), sıcak akışkanın ısı değiştiriciden çıkış sıcaklığı ($T_{h,o}$), soğuk akışkanın ısı değiştiriciye giriş sıcaklığı ($T_{c,i}$), soğuk akışkanın ısı değiştiriciden çıkış sıcaklığı ($T_{c,o}$) ve iç boru uzunluğu boyunca meydana gelen basınç kaybı (ΔP) ölçülmüştür. Sürekli rejim şartlarında ölçülen bu deneysel veriler kullanılarak suya ve nanoakışkana ait aşağıdaki ısı transfer ve hidrodinamik parametrelerin hesabı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bağıntılar Fundamentals of Heat and Mass Transfer ve Isı ve Kütle Transferi: Pratik Bir Yaklaşım isimli kaynaklardan alınmıştır (Çengel, Y.A., 2011; Incropera vd., 2007).

Kütlesel debi;

$$\dot{m} = \dot{v} \cdot \rho \quad (4.1)$$

$\dot{m}$; kütlesel debi (kg/s)

$\dot{v}$; hacimsel debi (m³/s)

ρ ; akışkan yoğunluğu (kg/m³)

Sürtünme faktörü;

$$f = \frac{2.D_h.\Delta P}{(\rho.u_m^2.L)} \quad (4.2)$$

D_h ; hidrolik çap (m)

ΔP ; basınç farkı (Pa)

ρ ; akışkan yoğunluğu (kg/m³)

u_m ; ortalama akış hızı (m/s)

L ; akış uzunluğu (m)

Basınç kaybı;

$$\Delta P = \rho.g.\Delta h \quad (4.3)$$

ΔP ; basınç farkı (Pa)

ρ ; akışkan yoğunluğu (kg/m³)

g ; yerçekimi ivmesi (m/s²)

Δh ; manometredeki seviye farkı (m)

Ortalama akış hızı;

$$u_m = \frac{4.\dot{m}}{\rho.\pi.D_h^2} \quad (4.4)$$

$\dot{m}$; akışkanın kütleli debisi (kg/s)

ρ ; akışkan yoğunluğu (kg/m³)

D_h ; hidrolik çap (m)

Birim zamanda transfer edilen ısı;

$$\dot{Q} = \dot{m}.c_p.\Delta T \quad (4.5)$$

$\dot{Q}$; birim zamanda transfer edilen ısı (kW)

$\dot{m}$; akışkanın kütleli debisi (kg/s)

c_p ; akışkanın özgül ısı (kJ/kgK)

ΔT ; akışkanın ısı değiştiriciye giriş ve çıkış noktalarındaki sıcaklık farkı (K)

Toplam ısı transfer katsayısı;

$$U = \frac{\dot{Q}}{A_h \cdot \Delta T_{lm}} \quad (4.6)$$

U; toplam ısı transfer katsayısı (kW/m²K)

q; transfer edilen ısı miktarı (kW)

A_h; hidrolik alan (m²)

ΔT_{lm}; ortalama logaritmik sıcaklık farkı (K)

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,o} - T_{c,i}) - (T_{h,i} - T_{c,o})}{\ln\left(\frac{T_{h,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,o}}\right)} \quad (4.7)$$

T_{h,i}; sıcak akışkan giriş sıcaklığı

T_{h,o}; sıcak akışkan çıkış sıcaklığı

T_{c,i}; soğuk akışkan girişi sıcaklığı

T_{c,o}; soğuk akışkan çıkış sıcaklığı

Bu çalışmada kullanılan boyutsuz sayılar ise aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (4.8)$$

Pr; Prandtl sayısı (-)

μ; akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s)

c_p; akışkanın özgül ısısı (kJ/kgK)

k; ısı iletim katsayısı (W/mK)

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_h \cdot \mu} \quad (4.9)$$

Re; Reynolds sayısı (-)

ṁ; akışkanın kütledebisi (kg/s)

D_h; hidrolik çap (m)

μ; akışkanın dinamik viskozitesi (Pa.s)

Nusselt sayısını hesaplamak için literatürde farklı yaklaşımlar mevcuttur. Genel kullanım olarak taşınım katsayısı bilindiği takdirde Nusselt sayısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k} \quad (4.10)$$

Nu; Nusselt sayısı (-)

h; ısı taşınım katsayısı (W/mK)

D_h; hidrolik çap (m)

k; ısı iletim katsayısı (W/mK)

Şayet Nusselt sayısı taşınım katsayısından bağımsız şekilde bulunabilirse, yukarıdaki eşitlikten ısı taşınım katsayısı da hesaplanabilmektedir.

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \quad (4.11)$$

h; ısı taşınım katsayısı (W/mK)

Nu; Nusselt sayısı (-)

k; ısı iletim katsayısı (W/mK)

D_h; hidrolik çap (m)

Literatürde ısı taşınım katsayısından bağımsız olarak Nusselt sayısının hesaplanabildiği birkaç farklı yaklaşım da mevcuttur. En yaygın kullanılan bağıntılardan birisi Dittus- Boelter eşitliğidir. Bu eşitlik Prandtl sayısının 0,7-160 değerleri arasında, Reynolds sayısının 10000'den büyük veya eşit olduğu ve L/D değerinin 10'a eşit veya daha büyük olduğu durumlar için kullanılmaktadır.

$$Nu_{DB} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^a \quad (4.12)$$

Soğuma durumunda; $a = 0,3$

Isınma durumunda; $a = 0,4$

Nu_{DB} ; Dittus- Boelter yaklaşımına göre Nusselt sayısı (-)

Re; Reynolds sayısı (-)

Pr; Prandtl sayısı (-)

Yaygın olarak kullanılan ve geniş akış rejimleri altında doğru sonuç verdiği kabul edilen bir başka yaklaşım ise Gnielinski yaklaşımıdır.

$$Nu_G = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + (12,7) \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (4.13)$$

Nu_G ; Gnielinski yaklaşımına göre Nusselt sayısı (-)

f ; sürtünme faktörü (-)

Pr ; Prandtl sayısı (-)

Kullanılan bir diğer yaklaşım ise Colburn yaklaşımıdır.

$$Nu_C = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad (4.14)$$

Nu_C ; Colburn yaklaşımına göre Nusselt sayısı (-)

Re ; Reynolds sayısı (-)

Pr ; Prandtl sayısı (-)

Laminer akışta Nusselt sayısı sabit ısı akısı altında 4,36 olarak kabul edilmektedir.

Basınç kaybı verisinden bağımsız olarak sürtünme faktörü hesaplanmak istenirse, $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ gibi geniş bir Reynolds sayısı aralığında farklı bir yaklaşım da kullanılabilmektedir.

$$f = \left((0,79) \cdot \ln Re - (1,64) \right)^{-2} \quad (4.15)$$

f ; sürtünme faktörü (-)

Re ; Reynolds sayısı (-)

Tam gelişmiş laminer rejim altında ise sürtünme faktörü aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilmektedir.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4.16)$$

f ; sürtünme faktörü (-)

Re ; Reynolds sayısı (-)

Akışın laminer ve türbülanslı olmasına bağlı olarak hidrodinamik giriş uzunluğunun bilinmesi önemlidir.

Laminer akış için hidrodinamik giriş uzunluğu;

$$L_l = D_h \cdot (0,05) \cdot Re \quad (4.17)$$

L_l ; Laminer akış için hidrodinamik giriş uzunluğu (m)

Re ; Reynolds sayısı (-)

D_h ; hidrodinamik çap (m)

Türbülanslı akış için hidrodinamik giriş uzunluğu;

$$L_t = D_h \cdot (1,359) \cdot Re^{0.25} \quad (4.18)$$

L_t ; türbülanslı akış için hidrodinamik giriş uzunluğu (m)

D_h ; hidrodinamik çap (m)

Re ; Reynolds sayısı (-)

Isıl performans faktörü Maradiya vd. (2018), η ;

$$\eta = \frac{\frac{Nu_{nf}}{Nu_w}}{\left(\frac{f_{nf}}{f_w}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (4.19)$$

Nu_{nf} ; nanoakışkan Nusselt sayısı

Nu_w ; su Nusselt sayısı

f_{nf} ; nanoakışkan sürtünme faktörü

f_w ; su sürtünme faktörü

4.2. Isı Değiştiriciler

Isı değiştiriciler, iki veya daha fazla akışkanın birbirleri arasında ısı transferini gerçekleştirmek amacıyla imal edilen ekipmanlardır.

4.2.1. Isı değiştirici türleri

Endüstriyel alanda ısı kontrolü gereken yerlerde kullanılan ısı değiştiriciler, kullanım amaçları ve imalat yöntemlerine göre sınıflandırılırlar (Kılınç, 2015).

4.2.1.1. Konstrüksiyon geometrilerine göre

Isı değiştiriciler, konstrüksiyon geometrilerine göre borulu, plakalı, boru ve plakaların beraber kullanıldığı kompakt sistemler olarak sınıflandırılırlar (Kılınç, 2015).

4.2.1.1.1. Borulu ısı değiştiriciler;

Dairesel tipte borular ile imal edilen ve bazı durumlarda farklı geometrilerde borulara sahip olan ısı değiştiriciler; tasarımlarının ihtiyaca yönelik rahatlıkla ayarlanabiliyor olması ile kullanım alanlarında rahatlık sağlamaktadır (Kılınç,

2015). Bu tür ısı değiştiriciler, çift borulu, gövde borulu, spiral borulu, olarak sınıflandırılabilir (Kakaç vd., 2012). Kullanıldığı sistemler genellikle basınç farkları yüksek olan sıvılar veya faz değişimi bulunan sistemlerdir (Kılınç, 2015).

4.2.1.1.2. Plakalı ısı değiştiriciler;

Akış kanalları levhalar ile ayrılan plakalı ısı değiştiriciler, sıvı-gaz gibi iki fazda bulunan akışkanların ısı transferini gerçekleştirmek için kullanılır (Kılınç, 2015). Contalı, lamelli, ve spiral levhalı olarak sınıflandırılırlar (Kakaç vd., 2012).

4.2.1.1.3. Contalı plakalı ısı değiştiriciler

Plakalarda conta yardımıyla sızdırmazlığın sağlandığı ve akışın yönlendirildiğı bu tip ısı değiştiriciler sıklıkla 250 °C sıcaklık ve 25 bar basınç şartlarında kullanılırlar (Kılınç, 2015). Parçaların modüler şekilde montajı sebebiyle sökölüp temizlenmesine olanak sağlar ve bu sayede gıda endüstrisinde kullanımını da mümkün olur (Kılınç, 2015). Bu şekilde imal edilmesinde bir avantaj ise gerektiğı takdirde eklenen veya çıkartılan levhalar ile ısı değiştiricin transfer edebileceğı ısı miktarı değiştirilebilir (Kakaç vd., 2012). Gövde borulu tip ısı değiştiricilere göre daha düşük sıcaklık ve basınç altında çalışmaya uygundur.

Contalı plakalı ısı değiştiricilerin avantajlarına rağmen çalışabileceğı belirli sıcaklık ve basınç değerleri onları kısıtlamaktadır buna çözüm olarak ise kaynaklı plakalı ısı değiştiriciler kullanılır. Fakat contalı plakalı ısı değiştiricinin sahip olduğı kolay temizlik ve demontaj işlemleri bu sistemde dezavantaj olarak kendini göstermektedir (Kakaç vd., 2012).

4.2.1.1.4. Lamelli plakalı ısı değiştiriciler

Borulu ısı değiştiricilerin aksine, dairesel borulardan değil yassı borulardan oluşan ısı değiştiricilerdir. Yassılaştırılmış borulardan oluşan lamel demetinin içinden bir akışkan akışı gerçekleşirken lameller arasından diğer akışkan akışı gerçekleşir. Gövdede akışkan yönünü değiştirecek bir materyal bulunmaz bu

sebeple akış tek yönlü gerçekleşir. Lamellerdeki yüksek türbülans sebebiyle kirlilik oranı azdır. Isı taşınım katsayıları ise küçük hidrolik çap nedeniyle yüksektir (Kılınç, 2015).

4.2.1.1.5. Spiral plakalı ısı değıştirciler

Bu tip ısı değıştirciler, levhaların spiral şekilde sarılarak akışkan geçmesine izin veren ısı değıştirici tipidir. Isı transfer katsayıları levhalı tip ısı değıştircilerden az olmakla birlikte, gövde boru tipi ısı değıştircilerden fazladır. Yüksek akış hızları için ve sıcaklığa karşı hassas akışkanlar için kullanımı uygundur (Kakaç vd., 2012).

4.2.1.1.6. Kompakt sistemler;

Kompakt sistemler, borular veya plakaların üzerinde kanat gibi ısı transferini artırmaya yönelik eklentileri bulunan ısı değıştircilerdir. Isı transferinin gerçekleşmesi gereken akışkanlar arasında yüksek miktarda ısı geçişine izin veren sistemlerdir. Tasarımın boyutları sınırlandırılmaya girdiğinde, en az alandan en fazla ısı transferini gerçekleştirmek adına kullanılan yöntemdir (Kakaç vd., 2012). Yaygın iki türü, kanatlı plakalı ısı değıştirciler iki akışkanın da gaz olduğu durumlarda, kanatlı borulu ısı değıştirciler ise sıvı-gaz fazlarında bulunan akışkanlar için kullanılırlar. Mekanik yöntemlerle temizliği zor olduğu için kimyasal temizlik işlemlerini zorunlu tutarlar (Kakaç vd., 2012).

4.2.1.2. Isı transfer mekanizmasına göre

Isı transfer mekanizmasına göre ısı değıştirciler; iki yönde tek fazlı taşınım, bir yöne tek fazlı, diğer yöne iki fazlı taşınım, iki yönde de iki fazlı taşınım şeklinde üç gruba ayrılırlar (Kılınç, 2015).

4.2.1.3. Akış şekline göre

Isı değıştircinin kullanıldığı sistemlerde akışlarda gerçekleşecek basınç düşümü, hızlar, akış yönü gibi parametreler tasarımı şekillendiren unsurlardır. Akışkan geçişine göre tek geçişli ve çok geçişli olarak ikiye ayrılırlar.

4.2.1.4. Akış düzenlemelerine göre

Isı değıştircide gerçekleşen akış yönüne bağılı olarak paralel akış, ters akış ve çapraz akış olarak sınıflandırılırlar (Kahveci, 2021).

Paralel akışta, akışkanların ısı değıştirciye girdiği yönler ve çıktıkları yönler aynıdır. Karşıt akışta akışkanlar birbirlerine ters yönde akış gerçekleştirirler. Çapraz akışta ise akışkanlar giriş ve çıkış noktaları farklı düzlemlerde gerçekleşir (Kakaç vd., 2012).

4.2.1.5. Isı transfer işlemine göre

Doğrudan temaslı ve dolaylı temaslı olarak iki grupta incelenen ısı değıştircilerdir. Doğrudan temasta, akışkanlar arasında engel bulunmaz ve karışmayan materyaller tercih edilir. Bunlar sıvı-gaz veya katı partiküller ile sıvı veya gaz çiftleri olabilir (Kılınç, 2015). Bu şekilde gerçekleşen ısı transferinin beraberinde kütle transferi de gerçekleşir. Dolaylı temasa sahip ısı değıştirciler ise, akışkanların arasında temas olmayan tipleridir (Kılınç, 2015).

4.2.2. İç içe borulu ısı değıştirciler

İç içe borulu ısı değıştirciler en basit ve en temel ısı değıştirci türüdür. Kullanılacak sisteme göre basınç kaybı, hız, ısı transfer miktarları gibi parametrelere göre içte birden çok boru veya tek boru olmak üzere hepsini çevreleyen bir boru ile imal edilirler (Kahveci, 2021; Kakaç vd., 2012; Kılınç, 2015). İstenilen işletme şartlarına göre seri veya paralel halde montajları yapılır, ters akışta çalışmasını düzenlemek ise oldukça kolaydır. Fakat yüksek ısı

kapasiteler için pahalı bir çözüm olmaktadır. Modüler bir tasarım ile beraber yüksek basınç altında çalışabilirler. Temizliği kolay olması sebebiyle kirleticiliği yüksek akışkanlar ile kullanılabilir. İmalatında kullanılacak materyal seçimi geniş bir aralıkta bulunduğu için kullanılacak akışkanlar için bir sınırlama yoktur (Kakaç vd., 2012).

Yukarıda sözü edilen avantajları dolayısıyla, bu çalışmada ters akışlı iç içe borulu ısı değiştirici kullanımı tercih edilmiş ve bakır malzemeden bu amaca uygun bir ısı değiştirici tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.



5. DENEYSEL KURULUM

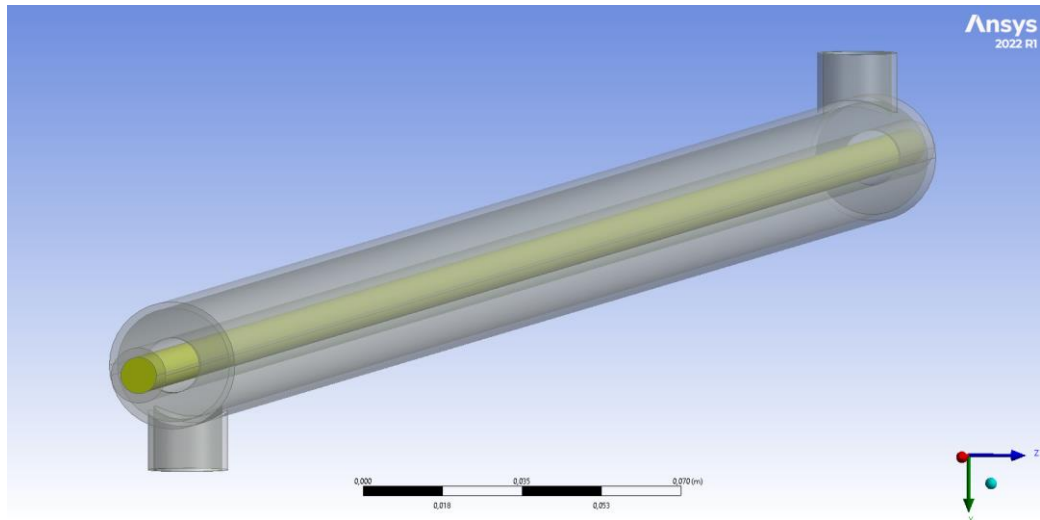
5.1. Isı Değiştirici Tasarımı

Tek adımlı yöntemle göre üretilmiş olan CuO-H₂O nanoakışkanın etkenliğinin, ters akışlı, iç içe borulu bir ısı değiştirici üzerinde incelenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda deneylerde kullanılacak ısı değiştiricinin ölçüleri, farklı akış debileriyle elde edilebilecek Reynolds sayısının geniş bir aralığında çalışılabilecek şekilde, EES (Engineering Equation Solver) programı desteğiyle hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı değiştirici ölçüleri Çizelge 5.1' verilmiştir.

Çizelge 5.1. Isı değiştirici boru çapları

	İç çap (mm)	Dış çap (mm)	Uzunluk (mm)
İç boru ölçüleri	8	12.17	1000
Dış boru ölçüleri	25	28	1000

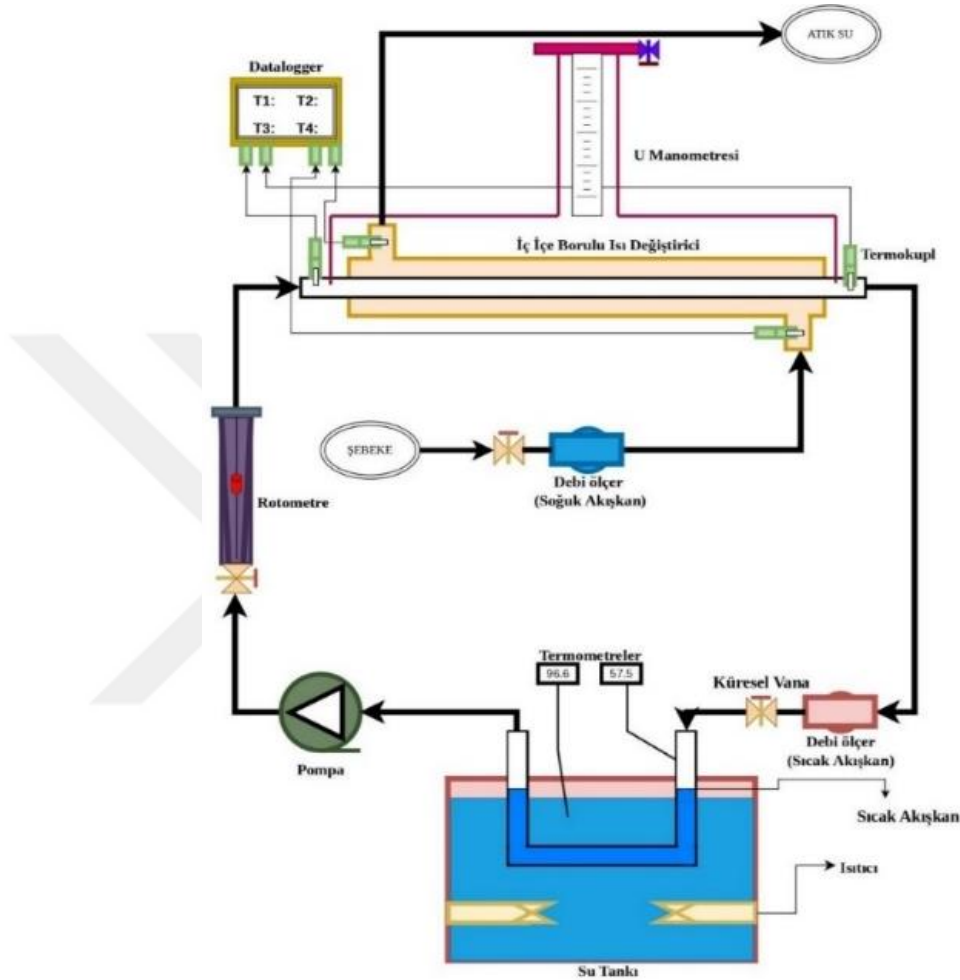
Belirlenen ölçülere uygun olarak tasarlanan iç içe borulu ısı değiştiricinin üç boyutlu katı modeli şekil 5.1'de gösterilmiştir.



şekil 5.1. Tasarımı yapılan iç içe borulu ısı değiştiricinin üç boyutlu katı modeli

5.2. Deney Düzeneğinin İmalatı ve Montajı

Bu çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Deney düzeneği şematik resmi

Deney düzeneği üzerindeki tüm ekipmanlar, tasarımı yapılan ısı değiştiricinin içteki borusundan sıcak akışkan, iç borudaki akışa ters yönlü olacak şekilde dıştaki borusundan soğuk akışkan akışını sağlayacak düzende yerleştirilmişlerdir. Bu çalışmada soğuk akışkan olarak sabit sıcaklık değerine sahip olması nedeniyle şebeke suyu kullanılmıştır. Deneylerde deiyonize su ve bakır oksit nanoakışkan olmak üzere iki farklı akışkan sıcak akışkan olarak kullanılmıştır. Isı değiştiricinin iç borusundan akacak akışkanı istenilen sıcaklığa ısıtabilmek amacıyla sistemde yaklaşık 125 Litrelik hacme sahip bir su tankı ve

içerisindeki suyu ısıtmak için ise her biri 2 kW gücünde iki adet ısıtıcı rezistans kullanılmıştır.

Su tankı içerisinde ısıtılan suyun enerjisini sistemde dolaştırılacak sıcak akışkana aktarabilmek amacıyla U borusu şeklinde yapılmış ikinci bir ısı değiştirici tank kapağına monte edilerek su tankı içerisine yerleştirilmiştir.

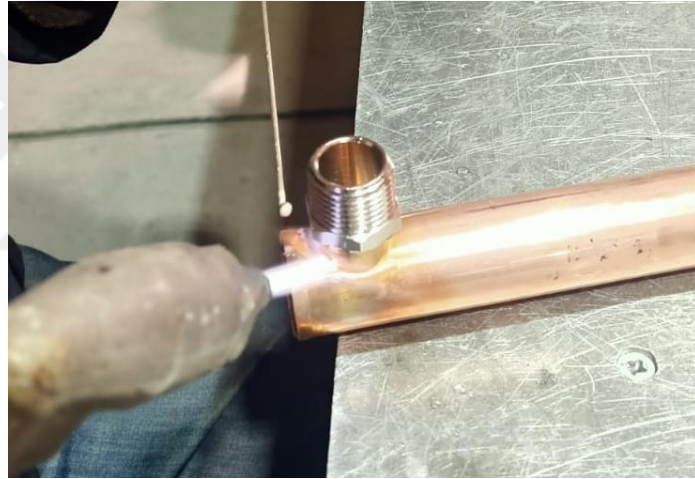
Sistemde sıcak akışkan sirkülasyonu 40 W gücünde, maksimum 780 l/h debiye sahip bir santrifüj pompa ile sağlanmıştır. Sıcak akışkan debisi 40-400 l/h ölçme aralığına sahip, su için kalibre edilmiş LZS-15 model bir rotametre kullanılarak ölçülmüştür. Rotametre girişine yerleştirilen bir şiber vana yardımıyla sıcak akışkan debisi kontrol altına alınmıştır. Nanoakışkan kullanılan deneylerde nanoakışkanın koyu rengi dolayısıyla, rotametre içindeki hareketli elamanın görünürlüğü tamamen kaybolduğu ve rotametre üzerinden debi kontrolü mümkün olmadığı için, ısı değiştirici çıkışında döner kanatlı tip ikinci bir debi ölçer daha kullanılmıştır. Soğuk akışkan debisi de benzer şekilde döner kanatlı tip bir debi ölçer kullanılarak ölçülmüş ve debi ölçer önüne yerleştirilen bir vana ile kontrol edilmiştir. Her iki debi ölçer için en küçük okuma bölüntüsü 0,00005 m³tür.

Isı değiştirici giriş ve çıkış sıcaklıkları K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüş ve AZ 88598 K tipi 4 kanallı bir dataloger marifetiyle saniyede bir ölçüm alınarak SD kart üzerine kaydedilmiştir. Ayrıca tank içerisindeki su sıcaklığı ve sıcak akışkanın tanka dönüş sıcaklığı dijital göstergeli 0,1° C hassasiyetli termometreler kullanılarak ölçülmüştür.

Kurulan deney düzeneğinde, sürekli rejim şartlarında ısı değiştiricide gerçekleşen ısı transferini inceleyebilmek için, tanktaki suyun kaynama noktası sıcaklığından istifade edilmiştir. Tanktaki su kaynamaya devam ettikçe sıcak akışkan hattındaki sıcaklıklar da sabit tutulabilmiş, böylece sürekli rejim şartları sağlanabilmiştir. Özetle bu çalışmada kullanılan tüm sonuçlar, tanktaki su kaynama halindeyken ölçülmüş, yani sürekli rejim şartlarında toplanmış verilerden oluşmaktadır.

Sistemdeki ısı kayıplarını en aza indirmek için ısı değiştirici ve bağlantı elemanlarının tamamı üzerinde yalıtım uygulanmıştır. Basınç kaybını ölçmek için ısı değiştiricinin sıcak akışkan giriş ve çıkış noktalarına birer şeffaf hortum şekil 5.2'deki gibi bağlanarak bir U manometresi oluşturulmuş ve iki kol arasındaki yükseklik farkı bir cetvel yardımıyla ölçölerek oluşan basınç farkları kayıt altına alınmıştır.

Deneyde kullanılacak olan ısı değiştirici, bakır borulardan üretilmiştir. Bu amaçla üretilen eşanjörün imalattan düzgün bir formda çıkması için borularda deformasyonların olmamasına özen gösterilmiştir. İlk aşama olarak dıştaki boru ile gerçekteşecek akış bağlantıları için gerekli yarım parmak bağlantı elemanları gümüş kaynağı ile birleştirilmiştir (şekil 5.3).



şekil 5.3. Bağlantı elemanlarının ısı değiştirici ile kaynaklanması

Bu aşamada eksenelliği sağlamak üzere, şekil 5.4'te gösterilen merkezleme elemanı, içteki ve dıştaki borunun belirlenen konumda kalması için torna tezgahında işlenmiştir.



Şekil 5.4. Merkezleme elemanının işlenmesi

İmalatı bakır plakadan yapılan parça, ısı değıştiricinin iç ve dış boruları arasında yerini alarak gümüş kaynağı ile Şekil 5.5'te gösterildiğı üzere birleştirilmiştir.



Şekil 5.5. İç ve dış borunun kaynak işlemi

İmalatı tamamlanan ısı değıştiricinin üzerinde üretimden kalan artıkların temizlenmesinden sonra ulaştığı son görünüm Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. (a) imalat sonrası parça görüntüsü, (b) temizlik işlemi sonrası görüntüsü

Deney sırasında kullanılacak ısıl çiftler K tipi olup, sisteme uygulanmasının kolay olması için paslanmaz çelik boru üzerine puntalanmıştır. Isı değiştiriciye bağlanmadan önceki hali ise Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7. Montaj için hazırlanan ısıl çift

Uygulanan bağlantı şekli ile sıcaklık verilerinin alınacağı konumlar kolayca ayarlanabilmektedir.

Isı değiştirici üzerindeki sıvı giriş ve çıkış hatları, manometre bağlantıları, ısıl çift bağlantıları için gerekli istavroz bağlantı elemanı, PPRC materyal olarak seçilmiştir. Böylece yalıtım yapmanın zor olduğu bölümlerde ısı transferi daha az gerçekleşecek ve istenildiği takdirde malzeme üzerinde rahatlıkla delikler açılarak farklı ölçümler için cihazlar eklenebilecektir. Malzemeye tornada diş açılarak bağlantı için hazır hale getirilmiş ve Şekil 5.8’de sistem üzerindeki konumu gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Bağlantı elemanı montajı

Isı değıştiricinin imal edilmesinin ardından, ikincil ısı değıştirici olarak görev yapacak sistemin imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 50x50x50 cm ölçülerinde kübik formda imal edilen sıcak su tankı içersine 2 kW gücünde 2 adet rezistans montajlanmıştır. Kaynak yerlerinin su sızdırmasını engellemek için yalıtım yapılmıştır. Tankın iç görseli Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. İmalattan sonra tankın iç görüntüsü

Sıcak akışkanı istenilen sürekli rejim sıcaklığına ısıtmak için kullanılacak ikinci ısı değiştirici, yapılan ilk tasarımda tank içerisine yerleştirilmiş bir bakır spiral boru şeklinde tasarlanmış, ancak nanoakışkanın köpürmesi halinde sistemde hava sorunu yaşatacağı düşüncesiyle kapalı sistem yerine daha sonra açık sisteme çevrilmiştir. Yeni tasarımda ısı değiştirici, sıcak su içerisine daldırılmış bir U borusu şeklinde tasarlanmış ve alüminyum borulardan imal edilerek tank kapağına monte edilmiştir (Şekil 5.10).



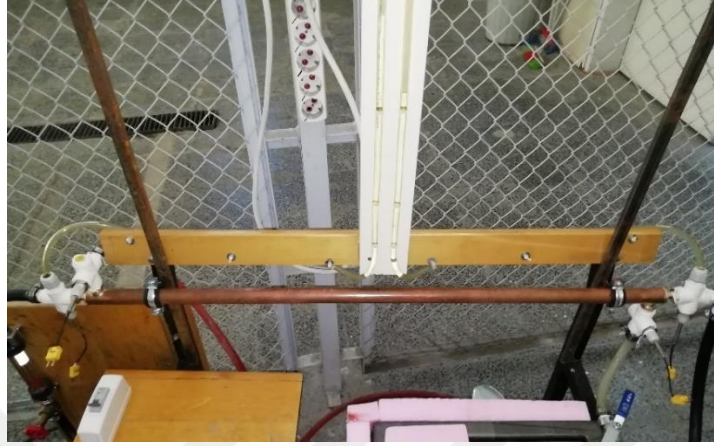
Şekil 5.10. Tank kapağına yerleştirilen alüminyum ısı değiştirici

İmalat aşamalarından sonra deney düzeneği kurulumuna geçilmiştir. Bu aşamada ısı değiştirici giriş ve çıkışlarına sıcak su hortumları Şekil 5.11'deki gibi bağlanmış, sıcak akışkan debisinin ölçüleceği rotametre ve basınç farkını ölçmek için kullanılacak U manometresi su terazisi yardımıyla konumlandırılmıştır.



Şekil 5.11. Deney düzeneği hortum bağlantıları

Rotametre nin girişine bağlanan şiber vana yardımı ile debi kontrolü sağlanmıştır. U manometresi için kullanılan şeffaf boru bağlantıları Şekil 5.12’de, rotametre ve şiber vana bağlantıları ise Şekil 5.13’te verilmiştir.



Şekil 5.12. Manometre giriş bağlantıları



Şekil 5.13. Rotametre ve vana bağlantısı

Pompanın ve ısıtıcı rezistansların çalışması için gerekli elektrik bağlantıları tamamlanmış ve güvenlik için sisteme 25A değerinde sigorta eklenmiştir.

Nanoakışkan kullanılarak yapılan deneylerde rotametre içerisindeki hareketli elemanın görünürlüğü kaybolmuştur (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. Nanoakışkan ilavesi sonrası rotametre görüntüsü

Bu aşamada rotametre üzerinden sıcak akışkan debisinin kontrolü mümkün olmadığı için sıcak akışkan çıkış hattına döner kanatlı tip bir debimetre Şekil 5.15'te görüldüğü gibi bağlanmıştır.



Şekil 5.15. Döner kanatlı tip debimetre bağlantısı

Aynı tip bir diğer debimetre Şekil 5.16’da gösterildiği gibi ısı değıştiricinin şebeke suyu giriş noktasından önce konumlandırılarak montajlanmıştır.



Şekil 5.16. Şebeke suyu hattına debimetre bağlantısı

Sistemin montajı tamamen bittikten sonra gerekli yalıtımlar tekrar uygulanmıştır. Bu aşamada nanoakışkanın buharlaşarak derişiminin değişmemesi için alüminyum borudan oluşan ikincil eşanjörün tüm açık kısımları kapatılarak izole edilmiştir. Manometredeki yükseklik ayarını daha sağlıklı yapabilmek amacıyla sıcak hattın alüminyum boruya döndüğü kısma bir vana eklenerek, çıkış noktasındaki basıncın kontrol edilmesi hedeflenmiştir. Soğuk hattın bağlanması ile tamamlanan düzeneğin görüntüsü Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17. Deney düzeneği son hali

5.3. Nanoakışkan Hazırlığı

Bu çalışmada kullanılan $\text{CuO-H}_2\text{O}$ nanoakışkan, Yeditepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarlarında Dr. Öğr. Üyesi Cem Levent Altan tarafından hazırlanmıştır. Bakır oksit nanoparçacıklarının sentezi için Zhu vd. (2011) literatürde önermiş oldukları yöntem kullanılmıştır. Bunun için, 200 ml 0.2 M bakır asetat solüsyonu hazırlanmıştır. Bakır asetat solüsyonuyla beraber 600 mikrolitre asetik asit solüsyonu eklenmiştir. Herhangi bir madde kaybı yaşanmaması için reaksiyon ortamı geri akış sistemine bağlanmıştır. Yağ banyosu kullanılarak bakır asetat ve asetik asit bulunan solüsyonu 100 °C'ye ısıtılmış ve istenen sıcaklığa gelindiğinde 10 mililitrelik 8M sodyum hidroksit solüsyonu eklenmiştir. Sodyum hidroksit solüsyonunun eklenmesinin ardından nanoparçacık oluşumu sebebiyle maviden siyaha renk değişimi gözlemlenmiş ve ortam sıcaklığı 110 °C'ye getirilmiştir. 2 saat sürenin ardından elde edilen süspansiyon oda sıcaklığına getirildikten sonra 10 dakika süre ve 6000 RPM hızda santrifüj edilmiş (Hettich Zentrifugen EBA 21) ardından nanoparçacıklar

ökelti halinde elde edilmiştir. ökelti halindeki parçacıklar, 30 °C sıcaklıkta ve 20 mbar basınçta 24 saat boyunca vakum fırını (Memmert VO – 200) içinde kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan parçacıkların üzerine distile su eklenip 9 saat sonikatörde (Bandelin Sonorex RK 156 BH) bırakılmıştır. Tek adım yöntemiyle elde edilen stabil nanoparçacık süspansiyonun görüntüsü Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Tek adım yöntemiyle sentezlenmiş su bazlı bakır oksit nanoakışkanı

5.4. Su ve Nanoakışkan Deneyleri

Hazırlanan deney düzeneğinde sıcaklıkların sabit kaldığı kararlı durumda gerçekleşecek ısı transferi incelenmiştir. Sistem ilk aşama olarak dolaşımda hava kabarcıkları olmaması için bir süre çalıştırılarak mevcut kabarcıkların ve manometre kollarındaki havanın tahliyesi sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra tank içerisindeki rezistanslar çalıştırılmış ve soğuk su dolaşımı açılmıştır. Tankın kaynama noktasına gelme süresince soğuk su olarak kullanılan şebeke suyunun sabit bir sıcaklık profiline gelmesi sağlanmıştır. Tank sıcaklığı, tankın içindeki suya daldırılan bir termometre vasıtasıyla kontrol edilerek deney için hedeflenen sıcaklıklara yaklaştığında pompa çalıştırılarak soğuk su ve sıcak akışkan hatlarının debileri ayarlanmıştır. Sistemde hava sorununun olmadığı ve debilerin tam olarak ayarlandığından emin olunduktan sonra datalogger veri kaydı başlatılmıştır. Bu aşamada ısı değıştiricinin iç hattından geçen sıcak akışkanın,

ikincil ısı değiştiriciye dönüş yaptığı noktada bulunan termometre ile çıkış sıcaklıkları kontrol edilmiş, tank kaynamaya başladıktan sonra oluşacak kararlı durumda yaklaşık 20 dakika kalması sağlanmıştır. Bu süre zarfında ise basınç farkları ve deneyde akışkanlarla ilgili özel durumlar not edilmiştir. Bekleme süreci sonunda tank içerisindeki rezistanslar kapatılarak sistem soğumaya bırakılmıştır. İstenilen hedef sıcaklığa düşmesiyle birlikte datalogger kayıttan çıkarılmıştır. Her deney seti bu şekilde tekrar edilerek alınan sonuçlar aynı şekilde deiyonize su ile yapılan deneylerden alınan verilerle kıyaslanmıştır.

5.4.1. $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}+\text{Al}_2\text{O}_3$ hibrit nanoakışkan deneyleri

Deiyonize su ve bakıroksit nanoakışkanla yapılan deneyler tamamlandıktan sonra, mevcut 2 litre hacmindeki bakır oksit nanoakışkan içerisine 1 gr Al_2O_3 nano partikül ilave edilerek manyetik karıştırıcı ile karıştırılmak suretiyle $\text{CuO}/\text{H}_2\text{O}+\text{Al}_2\text{O}_3$ hibrit nanoakışkan hazırlanmıştır. Bakır oksit nanoakışkanla yapılan deneylerdeki aynı şartlar için hibrit nanoakışkan deneyleri tekrar edilmiştir. Ancak deneyler sırasında pompadan gelen yoğun gürültüler ve nanoakışkan içerisindeki Al_2O_3 nanopartiküllerde zaman zaman yoğun topaklaşmaların olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, hibrit nanoakışkanla yapılan deney sonuçlarının sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesini olumsuz yönde etkileyeceği düşünölmüş ve alınan hibrit nanoakışkan verileri analiz edilmemiştir. Alınan numuneye ait örnek ise şekil 5.19’da verilmiştir.



şekil 5.19. Al_2O_3 nanopartikül ilavesi sonrasında oluşan çökelmelerin numune görüntüsü

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada, tek adım yöntemi ile sentezlenmiş ağırlıkça %3,3 bakır oksit konsantrasyonuna sahip su bazlı nano akışkanın, iç içe borulu ve ters akışlı bir ısı değiştiricideki ısı transfer ve hidrodinamik karakteristikleri, farklı debi koşulları altında deneysel olarak incelenmiştir. Nanoakışkanla yapılan deneylerdeki benzer şartlarda, nanoakışkan yerine deiyonize su kullanılarak deneyler tekrar edilmiş ve her iki akışkanla yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak bu bölümde sunulmuştur. Her iki akışkanla yapılan deneyler ve deney koşulları, şebeke suyunu soğuk akışkan olarak kullanmak üzere, Çizelge 6.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.1. Deney Koşulları

<i>Deney No</i>	<i>Sıcak Akışkan</i>	<i>Sıcak Hacimsel Debi $\dot{V}_h$ (L/h)</i>	<i>Soğuk Hacimsel Debi $\dot{V}_c$ (L/h)</i>	<i>Sıcak Kütlesel Debi $\dot{m}_h$ (kg/s)</i>	<i>Soğuk Kütlesel Debi $\dot{m}_c$ (kg/s)</i>	<i>Kararlı Bölgedeki Ölçüm Sayısı</i>
1	Deiyo. Su	80	161,7530	0,02168	0,04487	1420
2	Deiyo. Su	106	351,5886	0,02882	0,09756	1161
3	Deiyo. Su	107	595,3237	0,02920	0,16530	177
4	Deiyo. Su	150	125,6066	0,04069	0,03479	193
5	Deiyo. Su	150	357,3786	0,04088	0,09906	118
6	Deiyo. Su	150	570,1358	0,04088	0,15806	104
7	Deiyo. Su	200	149,2281	0,05433	0,04132	175
8	Deiyo. Su	200	360,6856	0,05444	0,09997	133
9	Deiyo. Su	200	563,3750	0,05453	0,15618	281
10	Deiyo. Su	250	124,5271	0,06777	0,03447	130
11	Deiyo. Su	250	372,3430	0,06796	0,10320	186
12	Deiyo. Su	250	574,8976	0,06816	0,15937	737
13	Deiyo. Su	300	139,8689	0,08136	0,03872	344
14	Deiyo. Su	300	365,8060	0,08157	0,10138	174
15	Deiyo. Su	300	605,0992	0,08175	0,16774	478
1	CuO_Nan.	108,789	67,75146	0,02990	0,01875	647
2	CuO_Nan.	108,789	267,8783	0,03002	0,07425	749
3	CuO_Nan.	108,789	526,1505	0,03014	0,14599	287
4	CuO_Nan.	148,799	126,5427	0,04101	0,03507	1119
5	CuO_Nan.	148,799	344,8507	0,04114	0,09559	309
6	CuO_Nan.	148,799	545,1355	0,04119	0,15113	573
7	CuO_Nan.	188,809	128,8251	0,05196	0,03568	871
8	CuO_Nan.	188,809	358,2443	0,05215	0,09930	454
9	CuO_Nan.	188,809	547,2857	0,05225	0,15172	927

10	CuO_Nan.	228,819	140,7769	0,06297	0,03899	1301
11	CuO_Nan.	228,819	368,8622	0,06317	0,10224	901
12	CuO_Nan.	228,819	509,6707	0,06327	0,14129	321

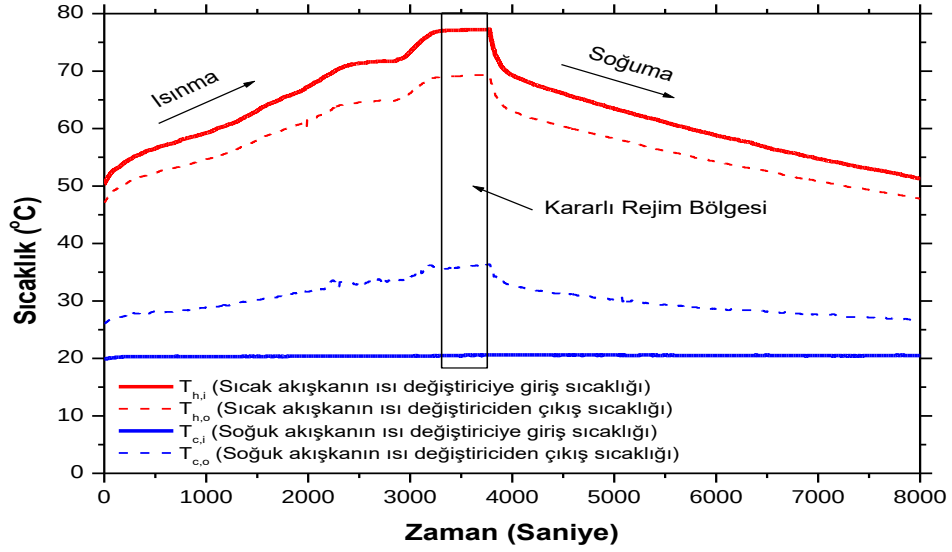
Bu çalışmada ayrıca, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırabilmek amacıyla, detay bilgileri Bölüm 6.2’de verilen ANSYS-Fluent modellemesi gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal modellemede, zaman kısıtlılığı sebebiyle sadece su ile yapılan deney sonuçlarının karşılaştırılabileceği sınırlı sayıda sayısal çözümleme gerçekleştirilmiştir. Su ile ilgili yapılan sayısal analizde kullanılan debi ve giriş sıcaklık değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Sayısal analiz için kullanılan debi ve sıcaklık değerleri

<i>Analiz No</i>	<i>Sıcak Kütlesel Debi $\dot{m}_h(kg/s)$</i>	<i>Soğuk Kütlesel Debi $\dot{m}_c(kg/s)$</i>	<i>T_{hi} (°C)</i>	<i>T_{ci} (°C)</i>
1	0,0406944	0,0347874	77,3	20,4
2	0,0408761	0,1580597	71,8	19,9
3	0,5444037	0,0999683	72,0	19,9
4	0,0679556	0,1032006	73,3	19,9
5	0,0815699	0,1013806	72,2	20,1
6	0,0817511	0,1677390	68,8	20,0

6.1. Deneysel Sonuçlar

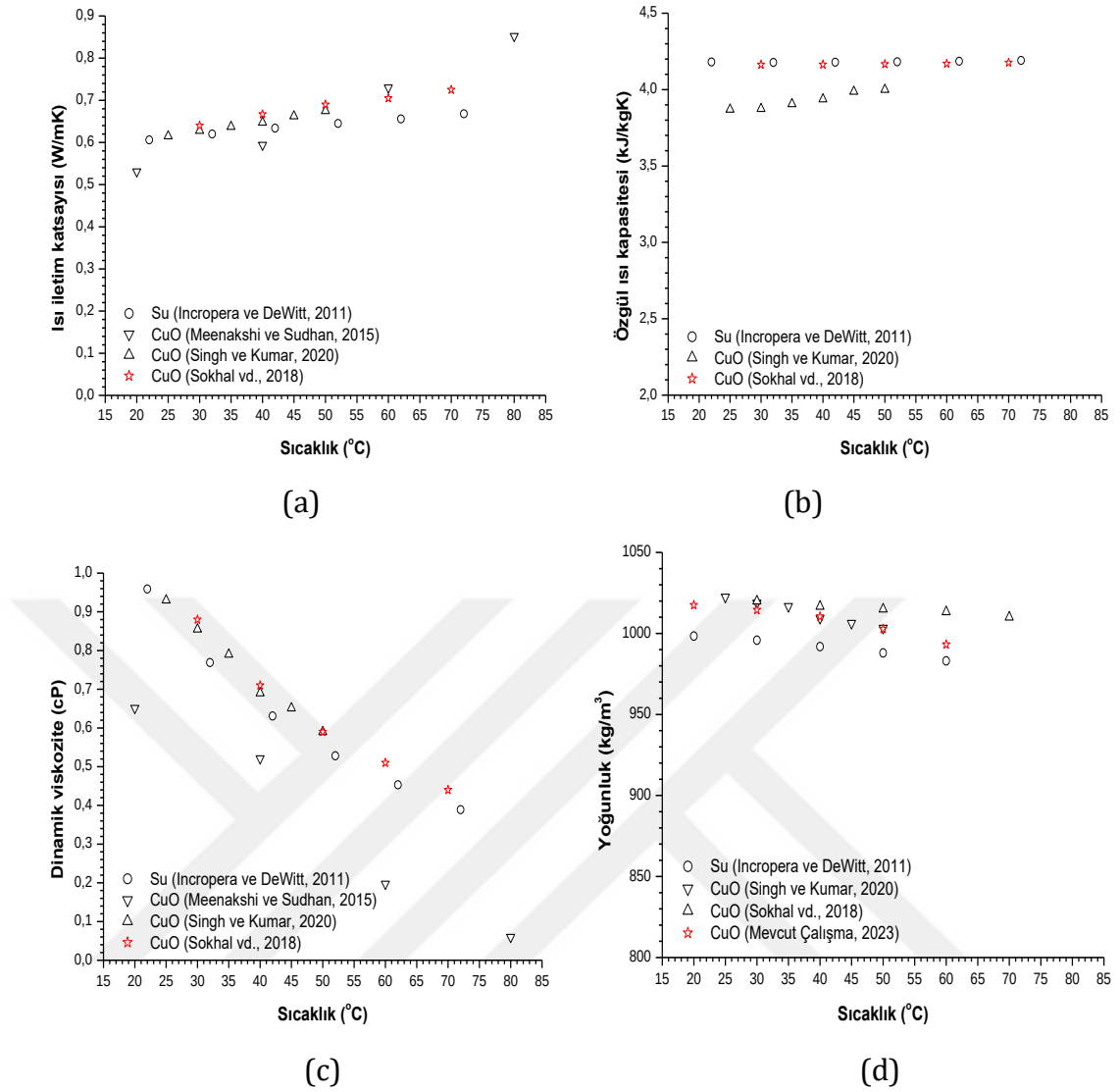
Deneysel çalışmalar sırasında, deney düzeneğinde yer alan tank içerisindeki suyun sıcaklığı kaynama noktasına ulaşıncaya kadar geçen ısınma periyodu, ısı değiştirici giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişmediği yani tanktaki suyun kaynadığı sürekli rejim periyodu ve ısıtıcı rezistanslar kapatıldıktan sonraki soğuma periyodu boyunca sıcaklık değerleri 1 Hz frekansla kayıt altına alınmıştır. Datalogger tarafından kaydedilen tipik bir deneye ait ısı değiştirici giriş ve çıkış sıcaklıklarının zamana bağlı değişim grafiği Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Deneylerden alınan tipik bir sıcaklık-zaman grafiği

Bu çalışmada grafikte gösterilen verilerden sadece Kararlı Rejim Bölgesi içerisinde ölçülen ve ölçüm sayıları Çizelge 6.1’de belirtilen sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak yapılan hesaplamalarda kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan CuO nanoakışkanın temin edilebilen miktarının çok sınırlı olması nedeniyle, yapılan hesaplamalarda ihtiyaç duyulan suya ve nanoakışkana ait bazı termofiziksel özellikler için literatürde yayınlanan benzer çalışmaların verilerinden istifade edilmiştir. Bakıroksit nanoakışkan ve suya ait bazı termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

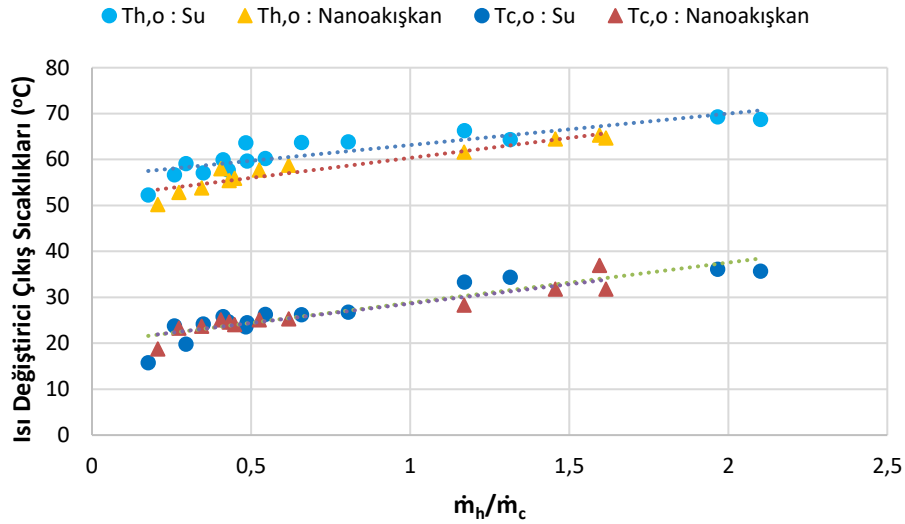


Şekil 6.2. CuO nanoakışkan ve su için a) ısı iletim katsayısının b) özgül ısı kapasitesinin c) viskozitenin ve d) yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimleri

Literatürden alınan verilerde, bu çalışmada kullanılan CuO konsantrasyonuna yakın sayılabilecek veriler tercih edilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 6.2’de verilen grafiklerdeki renklendirilmiş veriler kullanılarak ilgili hesaplamalar yapılmıştır.

Çizelge 6.1’de verilen koşullarda gerçekleştirilen deneylerden ölçülen ısı değiştirici sıcak ve soğuk akışkan çıkış sıcaklıklarının debiye, Reynolds sayısına ve sıcak akışkan hızına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Her iki akışkan debisinin de çıkış sıcaklıklarına etkisini değerlendirebilmek için sıcak akışkan debisinin soğuk akışkan debisine oranı ($\dot{m}_h/\dot{m}_c$), aynı şekilde Re sayısının etkisini incelemek için ise Re sayıları oranı (Re_h/Re_c) hesaplanmıştır. Şekil 6.3’te sıcak

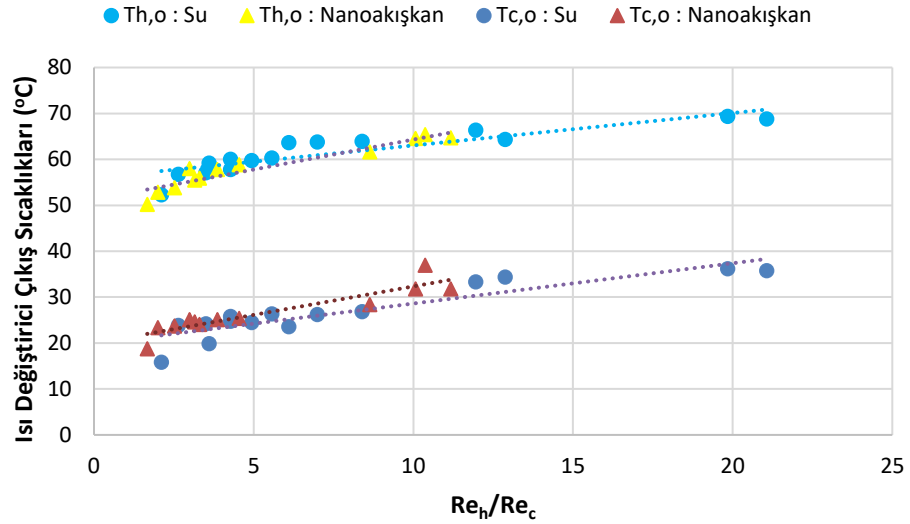
akışkan olarak deiyonize su ve bakıroksit nanoakışkanın kullanıldığı deneylerde ölçülen ısı değiştirici çıkış sıcaklıklarının debiler oranına bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Isı değiştirici çıkış sıcaklıklarının debiler oranına bağlı değişimi

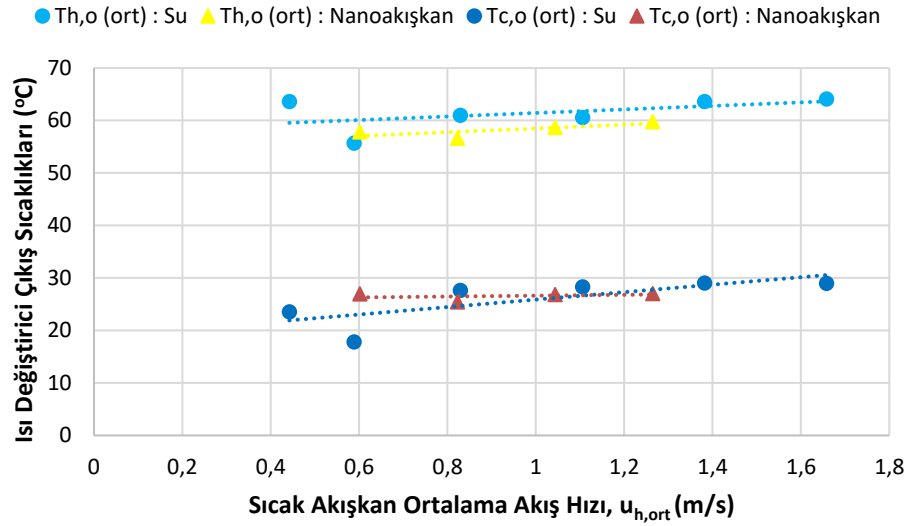
Her iki akışkan için de artan debiler oranıyla ısı değiştirici sıcak ve soğuk akışkan çıkış sıcaklıklarının benzer eğimle yaklaşık lineer olarak arttığı gözlenmektedir. Doğrusal regresyonla elde edilmiş doğruların eğimleri karşılaştırıldığında, bakıroksit nanoakışkan kullanımı halinde su kullanımına nazaran sıcak akışkan tarafında %27 artış, soğuk akışkan tarafında ise %3,6 azalma olduğu anlaşılmaktadır.

Isı değiştiricide ölçülen çıkış sıcaklıklarının sıcak ve soğuk akışkanların Re sayılarına oranına göre değişimi Şekil 6.4'te verilmiştir. Debiler oranındaki duruma benzer şekilde, Reynolds sayıları oranı arttıkça sıcak ve soğuk akışkan çıkış sıcaklıklarının da yine yaklaşık lineer şekilde arttığı görülmektedir. Burada doğrusal regrasyon sonucu elde edilen doğrunun eğimine dikkat edilirse, Şekil 6.3'teki durumdan farklı olarak, bakıroksit nanoakışkan çıkış sıcaklıklarının artan Reynolds sayısı oranından deiyonize suya göre yaklaşık sıcak akışkan tarafında %85 soğuk akışkan tarafında %41 daha fazla etkilendiği gözlenmektedir.



Şekil 6.4. Isı değiştirici çıkış sıcaklıklarının Re sayıları oranına bağlı değişimi

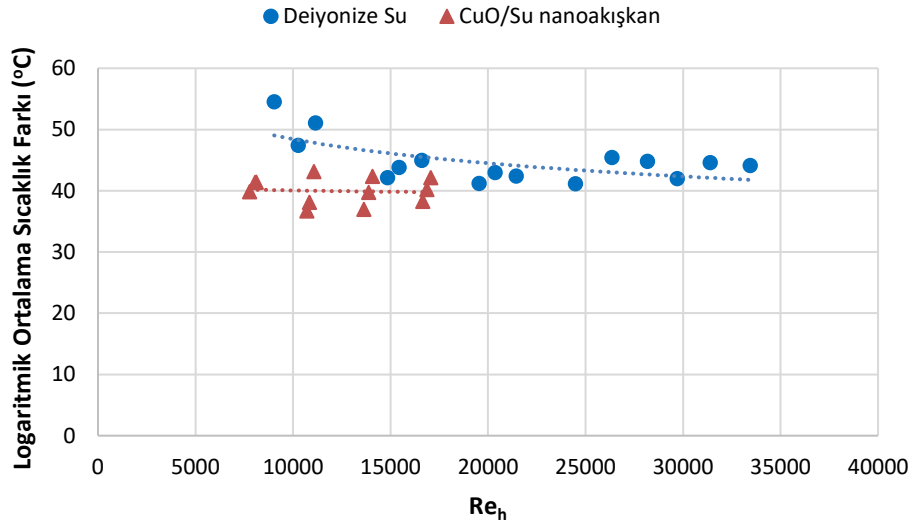
Şekil 6.5'te ise, sıcak akışkan hızının aynı olduğu ancak farklı soğuk akışkan debilerindeki deney şartlarında ölçülen ısı değiştirici çıkış sıcaklıklarının ortalamaları, sıcak akışkanın ortalama akış hızındaki değişime bağlı olarak çizilmiştir.



Şekil 6.5. Isı değiştirici çıkış sıcaklıklarının sıcak akışkanın akış hızına bağlı değişimi

Sıcak akışkanın akış hızındaki artış, ısı değiştiricinin her iki çıkışındaki sıcaklıkların da artışına sebep olmaktadır. Nanoakışkan kullanılması halinde suya göre akış hızı arttıkça sıcak akışkan çıkış sıcaklığı artış eğiliminde yaklaşık %6 civarında bir iyileşmenin olduğu görülmektedir.

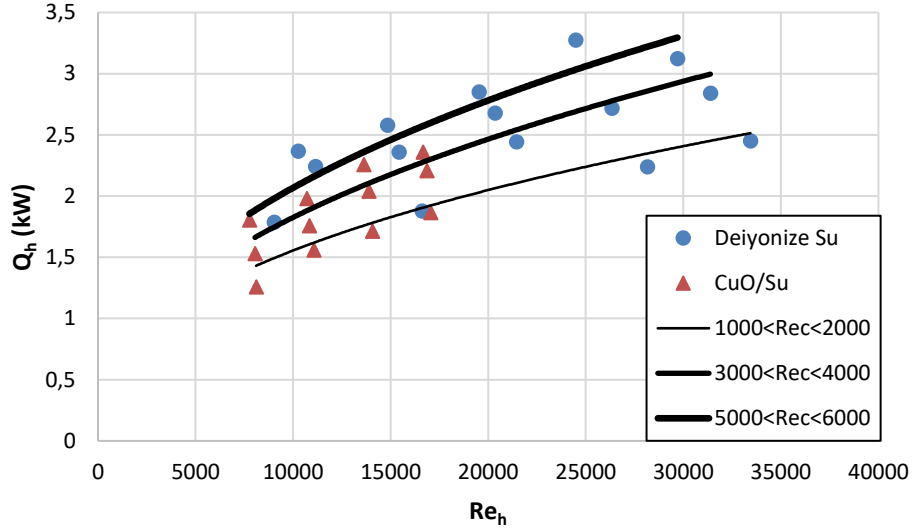
Isı değıştirici uzunluğu boyunca akışkan sıcaklıkları değışiklik gösterdiğinden, logaritmik ortalama sıcaklık farkı (ΔT_{lm}), özellikle ısı değıştiricilerde gerçekleşen ısı transferinin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan parametrelerden birisidir. Şekil 6.6’da logaritmik ortalama sıcaklık farkının sıcak akışkanın Re sayısına bağlı olarak değışimi gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Su ve nanoakışkan kullanımında oluşan logaritmik ortalama sıcaklık farkının sıcak akışkanın Reynolds sayısına göre değışimi

Logaritmik ortalama sıcaklık farkı, yüksek Reynolds sayılarında nanoakışkan ve su için aynı değërlere yaklaşımaktadır fakat düşük Reynolds sayılarında aradaki farkın önemli miktarda açıldığı da görölmektedir. Nanoakışkanın logaritmik ortalama sıcaklık farkının suya göre daha düşük olması, düşük Reynolds sayılarında nanoakışkan kullanımının suya göre daha yüksek toplam ısı transfer katsayısına sahip olacağını göstermektedir.

Türbölanslı akışın ısı geçişini hızlandırma konusunda olumlu etki sağladığı bilinen bir gerçektir. Türbölansın şiddeti Re sayısı ile ilişkilidir. Reynolds sayısının artması transfer edilen ısı miktarını önemli miktarda artırmaktadır. Bu çalışmada, deiyonize su ve bakıroksit nanoakışkanla yapılan deney sonuçları da bu bilgiyi teyit etmektedir (Şekil 6.7).

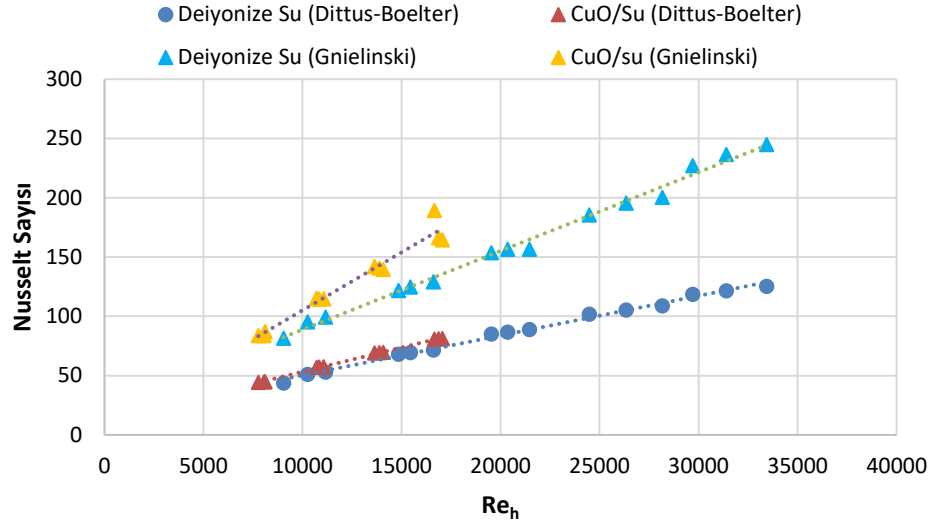


Şekil 6.7. Su ve nanoakışkan kullanımında transfer edilen ısı miktarının Reynolds sayısına göre değişimi

Bu şekilde ısı değiştiricideki sıcak akışkandan soğuk akışkana transfer edilen ısı miktarının sıcak ve soğuk akışkanların Re sayılarına göre değişimi gösterilmiştir.

Burada, ısı değiştiricinin soğuk akışkan tarafındaki akış şeklinin de transfer edilen ısı miktarı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Örneğin, sıcak akışkanın Re sayısının 30000 olduğu durumda, soğuk akışkanın Re sayısını 2000'den 6000'e çıkartarak, transfer edilen ısı miktarında %35'in üzerinde bir artışın sağlanabileceği anlaşılmaktadır.

Nusselt sayısı, taşınım ısı transfer katsayısının iletim ısı transfer katsayısına oranı şeklinde tanımlanan ve taşınım ısı geçişinin ölçüsünü gösteren boyutsuz bir sayıdır. Aynı geometrik koşullar altında Nu sayısındaki artış, akıştaki çalkantıların etkisiyle taşınım katsayısındaki artış ya da akışkanın iletim özelliklerinin iyileşmesi sebebiyle gerçekleşir. Pürüzsüz dairesel borularda hidrodinamik ve ısı olarak tam gelişmiş türbülanslı akış için yerel Nusselt sayısını veren bağıntılardan en yaygın olarak kullanılan iki bağıntı (Dittus-Boelter ve Gnielinski eşitlikleri) bu çalışmada kullanılmıştır. Her iki yaklaşıma göre deiyonize su ve bakıroksit nanoakışkan için hesaplanmış Nusselt sayısının Re_h sayısına göre değişimi Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

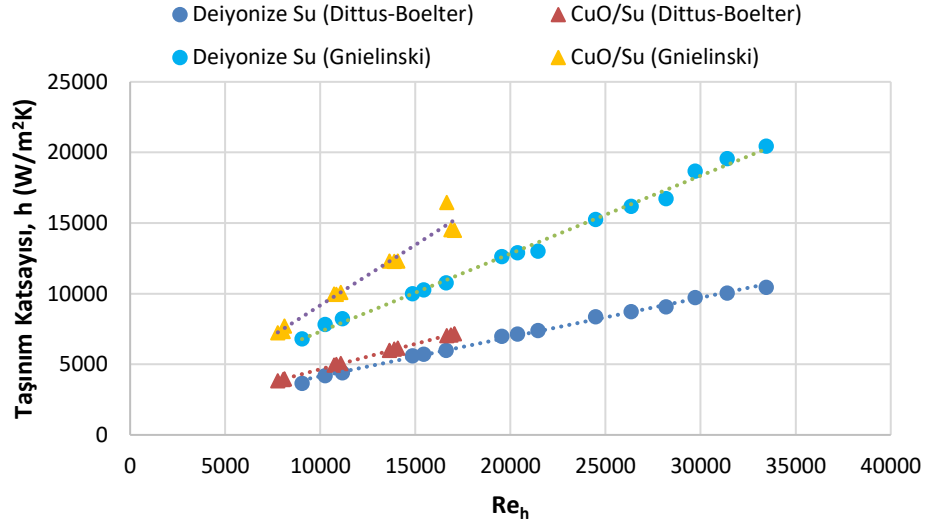


Şekil 6.8. İki farklı yaklaşıma göre Nusselt sayısının sıcak akışkanın Reynolds sayısına bağlı değişimi

Hangi yaklaşımla hesaplandığından bağımsız olarak, Nu sayısının artan Re_h sayısı ile arttığı ve nanoakışkanın gelişmiş termal özelliklerinden kaynaklı, suya nazaran aynı türbülans koşullarında daha yüksek Nusselt değerlerine ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

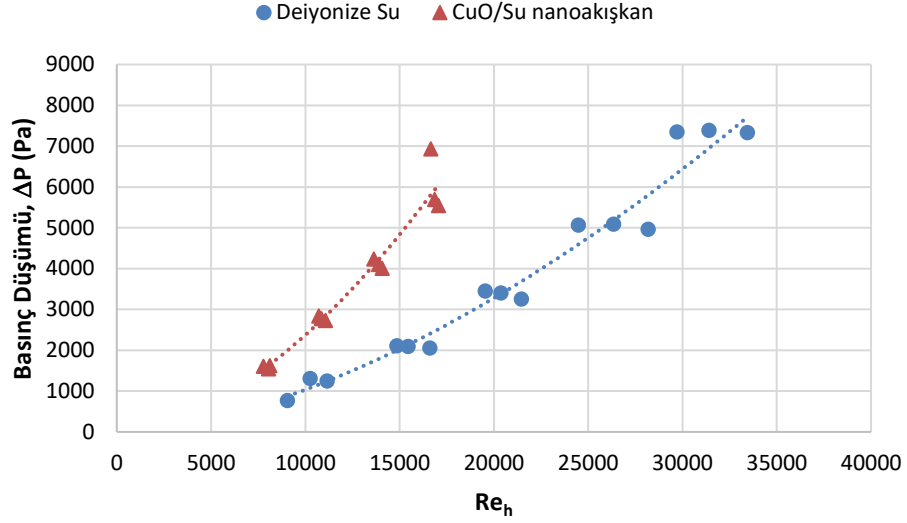
Şekil 6.8'de su ve nanoakışkan verilerine uygulanan doğrusal korelasyonların eğimlerinde su yerine bakıroksit nanoakışkan kullanımı halinde, Gnielinski yaklaşımına göre yaklaşık %53, Dittus-Boelter yaklaşımına göre yaklaşık %24'lük bir artış yani taşınım ile transfer edilen ısı miktarında iyileşme tespit edilmiştir.

Dittus-Boelter ve Gnielinski yaklaşımlarına göre deiyonize su ve bakıroksit nanoakışkan için hesaplanmış Nusselt sayısı kullanılarak bulunmuş ısı taşınım katsayısının, sıcak akışkanın Re sayısına göre değişimi Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Isı taşınım katsayısının da gerek büyüklük gerekse eğilim açısından Nusselt sayısındaki değişime benzerlik gösterdiği ve bu benzerliğin Nusselt sayısından kaynaklandığı öngörülmektedir.

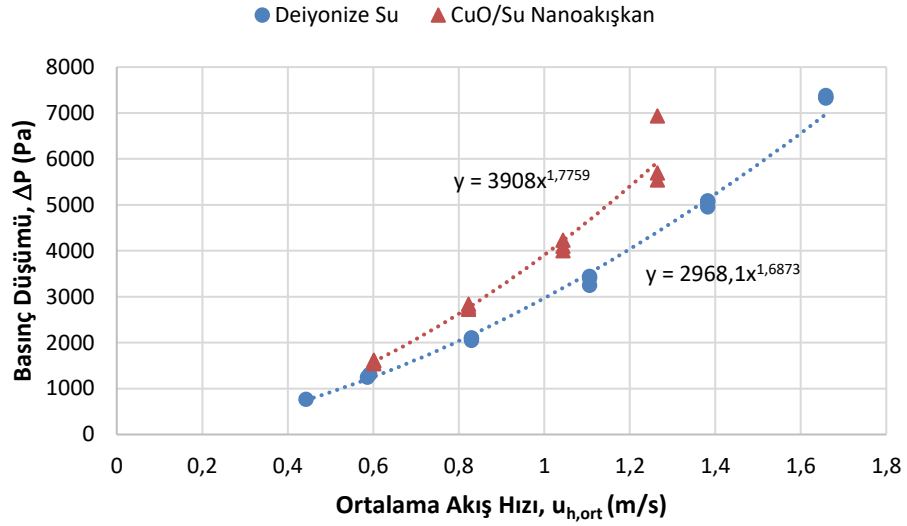


Şekil 6.9. Su ve nanoakışkan kullanımında, taşınım katsayısının Reynolds sayısına göre değişimi

Basınç düşümü, ihtiyaç duyulan pompa gücünü belirlediğinden, akış sürekliliği açısından bilinmesi gereken önemli bir parametredir. Bu çalışmada ısı değiştiricinin sıcak hattındaki basınç düşümü ölçülmüş ve Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 6.10'da, sıcak akışkanın ortalama akış hızına bağlı değişimi ise Şekil 6.11'de verilmiştir. Her iki akışkanın basınç düşümü, Reynolds sayısının artmasıyla artış göstermektedir. Bakıroksit nanoakışkanın daha yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip olması nedeniyle suya göre daha yüksek basınç kaybının gerçekleştiği görülmektedir. Bakıroksit nanoakışkan kullanımı halinde Reynolds sayısının 10000 olduğu durumda suya göre yaklaşık 1.15 kPa ve Reynolds sayısının 15000 olduğu durum için yaklaşık 2.4 kPa daha yüksek basınç kaybı olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.11'de basınç düşümünün, hızın 1,75'inci kuvvetiyle artıyor olması bulunan sonuçların literatürdeki korelasyonlarla iyi bir uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.



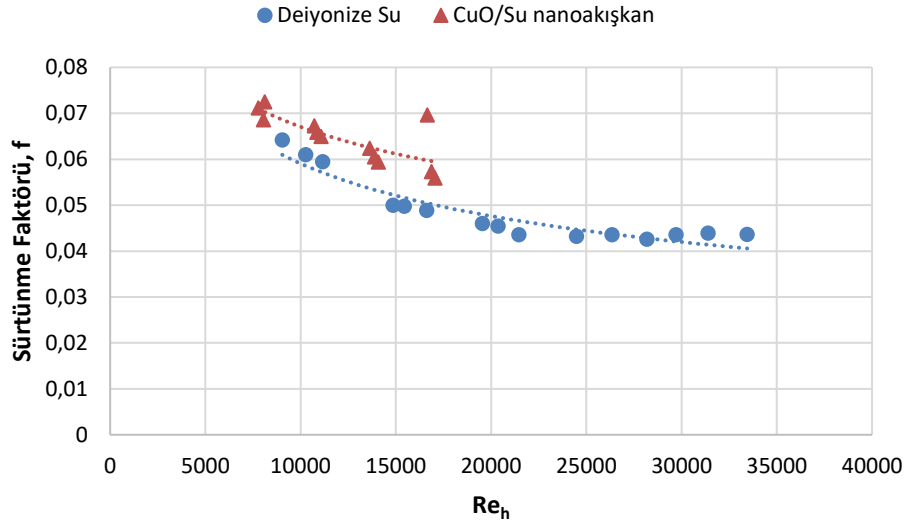
Şekil 6.10. Su ve nanoakışkan kullanımında gerçekleşen basınç düşümünün Reynolds sayısına göre değişimi



Şekil 6.11. Su ve nanoakışkan kullanımında gerçekleşen basınç düşümünün ortalama akış hızına bağlı değişimi

Sürtünme faktörünün Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Reynolds sayısı arttıkça hem su hem de bakıroksit nanoakışkanın sürtünme faktörü üssel olarak azalmaktadır. Nanoakışkan kullanımı halinde aynı şartlar altında daha yüksek sürtünme faktörü değeri ölçülmüştür. Bu fark örneğin Reynolds sayısının 10000 olduğu durum için %21 daha fazladır. Bu durum, sistemde su yerine bakıroksit nanoakışkan kullanılması halinde, artan sürtünme

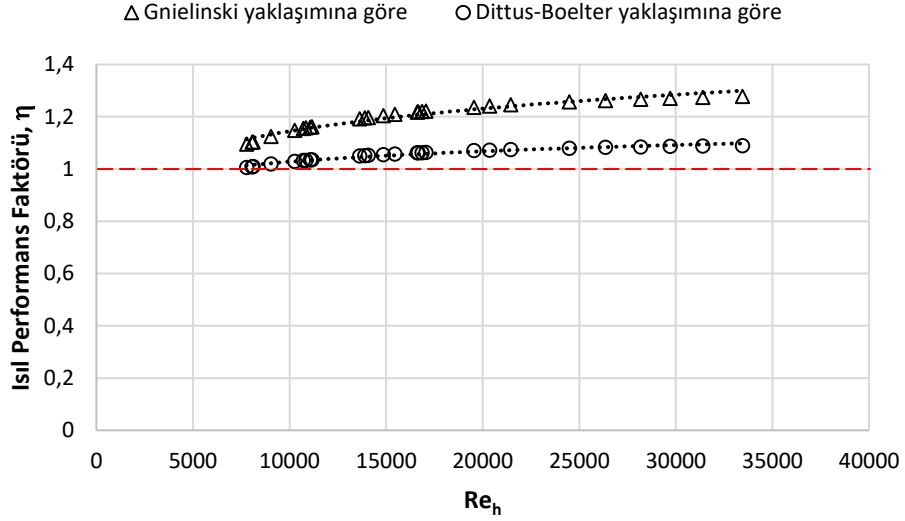
faktörü nedeniyle aynı akış koşulları altında daha yüksek pompalama gücüne ihtiyaç duyulacağını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.12. Su ve nanoakışkan için sürtünme faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi

Bir sistemde nanoakışkan kullanımı, avantajlarının yanında dezavantajlarını da beraberinde getirmektedir. Termal performansın artması, çok yüksek basınç kayıplarına sebep olduğu takdirde nanoakışkan kullanımı yanlış olacaktır. Isıl performans ve hidrodinamik parametrelerin birlikte değerlendirilip, kar-zarar dengesinin kurulması gerekir. Isıl performans faktörü tamda bu noktada önemli bir parametredir. Şekil 6.13'te Nusselt sayısının hesaplanmasında kullanılan iki farklı yaklaşıma göre Re_n sayısının fonksiyonu olarak ısıl performans faktörünün değişimi gösterilmiştir. Nanoakışkanların endüstriyel uygulamalarda kullanılmasına yönelik kabul edilebilir koşulların oluşması için ısıl performans faktörünün bir değerinin üzerinde olması gerekir.

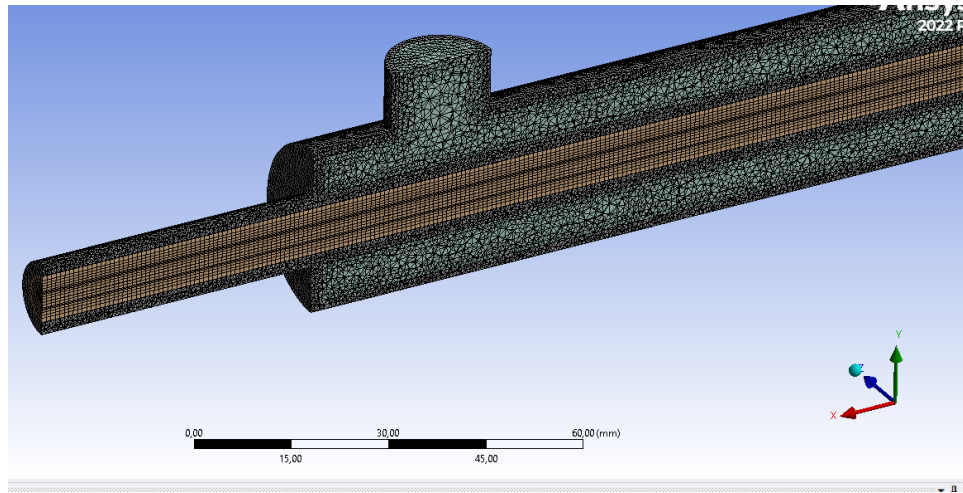
Dikkate alınan her iki yaklaşıma göre de η 'nın birin üzerinde ve artan Re sayısı ile arttığı, Gnielinski'ye göre 1,27 değerine kadar çıktığı görülmektedir. Uygulamalarda su yerine CuO/su nanoakışkanı kullanımı halinde, ısı transferindeki iyileşme etkisiyle basınç düşüşündeki artış etkisinin bastırılabilceği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.13. Isıl performans faktörünün Reynolds sayısına göre değişimi

6.2. Sayısal Analiz Sonuçları

Çalışmada ANSYS-Fluent ticari yazılımı ile sayısal çözümler yapılmıştır. Bu aşamada sadece su ile yapılan deneylerin sayısal modellemesi yapılarak, elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır. İlk aşamada deneylerde kullanılan ısı değiştiricinin 1:1 ölçeğinde katı modellemesi yapılmıştır. Fluent çözümü için gerekli olan mesh yapısı 5826236 element ile Şekil 6.14 'de verildiği gibi oluşturulmuştur.

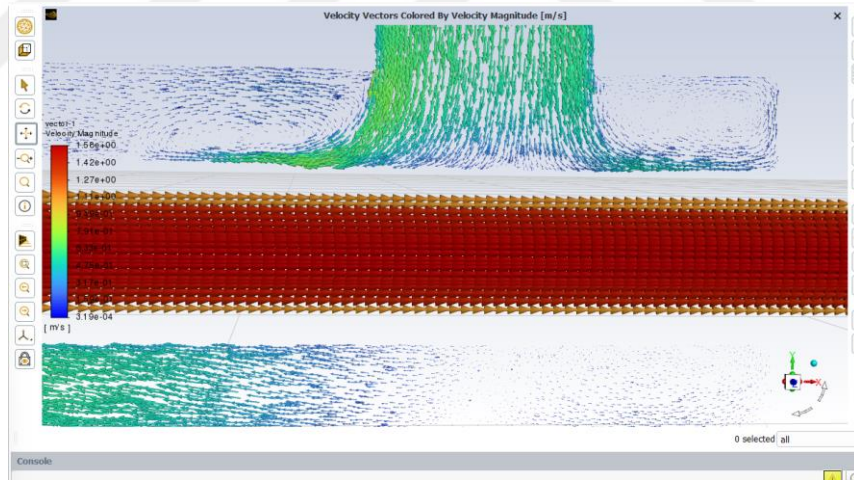


Şekil 6.14. Isı değiştiriciye ait mesh yapısı ve kesit görünümü

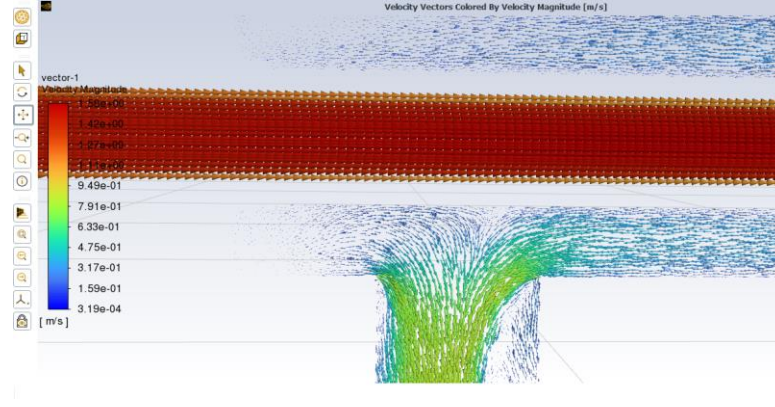
Maksimum skewness değerinin, 0.8 değerini aşmaması ile elde edilen sonuçlar, deneysel verilere en yakın halini almış ve bu mesh yapısı ile çözümlerler sürdürölmüştür.

Sistemde gerçekteşen akış rejimini modellemek üzere k-ε realizable modeli üzerinden çözümlerler sürdürölmüş, Çizelge 6.2’de tanımlanan akış debileri ve sınır şartları için çözümlerler gerçekteştirilmiştir. Isı değiştiricinin dış katmanını adyabatik kabul edilmiştir.

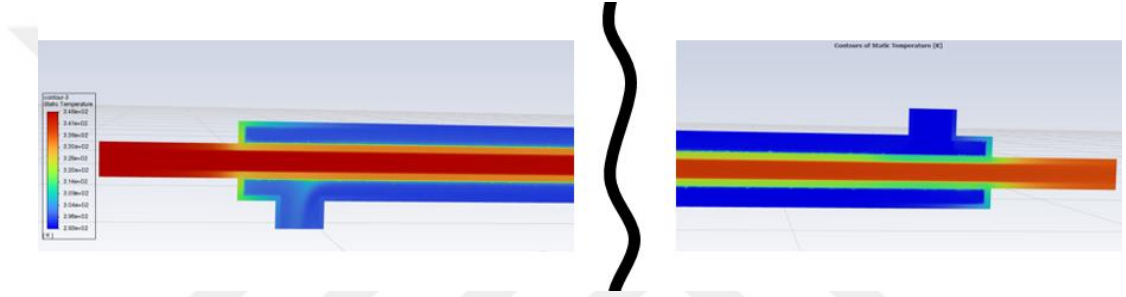
Yapılan analizlerden alınan sonuçlara örnek olarak, 0,067956 kg/s sıcak akışkan ve 0,103201 kg/s soğuk akışkan debileri ile yapılan deneye ait sayısal çözümlerlerden elde edilen, soğuk akışkanın giriş ve çıkış noktalarındaki hız vektörleri sırasıyla şekil 6.15 ve şekil 6.16’da verilmiştir. Aynı çözümlerlemeye ait ısı değiştirici giriş ve çıkış bölgelerine ait sıcaklık kontürleri ise şekil 6.17’de gösterilmiştir.



şekil 6.15. Isı değiştiricideki soğuk akışkan giriş bölgeli hız vektörleri (Deney koşulları: $\dot{m}_h$: 0,067956 kg/s, $\dot{m}_c$: 0,103201 kg/s, T_{hi} : 73,3 °C, T_{ci} : 19,9 °C)



Şekil 6.16. Isı değiştiricideki soğuk akışkan çıkış bölgesi hız vektörleri (Deney koşulları: $\dot{m}_h : 0,067956 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_c : 0,103201 \text{ kg/s}$, $T_{hi} : 73,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ci} : 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$)

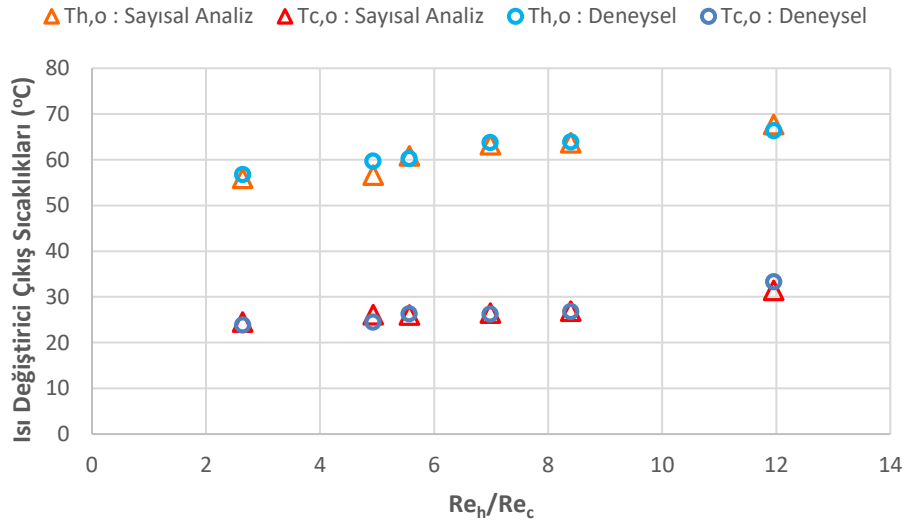


Şekil 6.17. Isı değiştirici giriş ve çıkış bölgelerine ait sıcaklık kontürleri (Deney koşulları: $\dot{m}_h : 0,067956 \text{ kg/s}$, $\dot{m}_c : 0,103201 \text{ kg/s}$, $T_{hi} : 73,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{ci} : 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$)

Isı değiştiricinin giriş ve çıkış bölgelerindeki soğuk devre hız vektörlerine dikkat edilecek olursa, özellikle dirsek bölgesinde akış hızının oldukça düşük, doğrultularının ise düzensiz olması, çıkışa yakın bölgelerde sıcaklık dağılımının homojenliğini düzensiz hale getirebilmektedir. Ancak bu bölgelerin ısı değiştiricinin boyutuna kıyasla çok küçük boyutta olması nedeniyle, bu bölgelerdeki sıcaklık dağılımının akışkanın ortalama sıcaklığı üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmayacağı öngörülmüştür. Analiz sonucunda elde edilen sıcaklık kontürleri, deney düzeneğinde kullanılan ısıl çiftlerle yapılan sıcaklık ölçümlerinin, sıcaklık dağılımının homojen olduğu noktalardan alınmış olduğunu da teyit etmiştir.

Yapılan sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle ısı değiştirici çıkış sıcaklıkları açısından karşılaştırılmış, sıcak ve soğuk akışkanların Re sayılarına oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 6.18’de gösterilmiştir. Su için

sayısal analizlerden bulunan sıcaklık değerlerinin, deneysel çalışma esnasında ölçülen sıcaklık değerleri ile oldukça yakın bir uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç aynı zamanda, dikkatlice yapılmış bir deneysel çalışma ile doğru modellenmiş bir sayısal analizin iyi bir şekilde eşleşebileceğini de göstermiştir.



Şekil 6.18. Su için ısı değiştirici çıkış sıcaklıklarının deneysel ölçüm ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması

6.3. Nanoakışkan Kararlılığı Hakkında Değerlendirme

Tek adımlı yöntemle üretilen CuO/H_2O nanoakışkanın stabilitesinin, literatürde sıklıkla kullanılan iki adımlı yöntemle üretilmiş nanoakışkanlara kıyasla daha kararlı bir yapıda olması, çalışmanın motivasyon kaynağıdır. Fakat ilk deneyde yaklaşık 45 °C sıcaklıklara ulaşıldığında nanoakışkanda Şekil 6.19'da görüldüğü üzere köpürmelerin meydana geldiği gözlenmiştir.



Şekil 6.19. CuO/H₂O deneylerinde oluşan köpürmeler

Deneyler köpürmelere rağmen devam ettirilmiş ve bir süre sonra bu köpürmelerin azalarak yok olduğu gözlenmiştir. Bu durum nanoakışkanın stabilitesini sağlamak üzere kullanılan yüzey ajanlarının buharlaşması ile oluştuğu fikrini güçlendirmiştir.

Deneyler son bulduğunda ise numune alınarak bir süre bekletilmiştir. Bekleme süreci sonunda gerçekleşen görüntü Şekil 6.20’de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.20. CuO/H₂O deneyleri sonrası alınan numune örneği

Oluşan bu görüntü, nanoakışkan üretiminde kullanılan materyallerin, sıcaklık ve akış rejimi gibi parametreler ile birlikte değerlendirilerek seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Olumsuzluklara ve erken köpürme durumuna rağmen 76 °C'ye varan sıcaklıklarda çalışan nanoakışkan, dolaşımında homojen bir görüntü sergilemiştir. Bu ise kullanılan yöntemin doğru, fakat üretim de kullanılan materyaller konusunda ilave çalışma yapılması gerektiği fikrini doğurmuştur. Çalışılan sıcaklık ve akış rejimlerine karşı stabilitesi bozulmayan bir nanoakışkan üretiminin, ısı transfer uygulamalarında avantajlı olacağı düşünülmektedir.

Bir diğer problem ise bakır oksit-su nanoakışkana alümina nanopartiküllerin ilavesiyle oluşturulan hibrit nanoakışkanla yapılan deneyler sırasında ortaya çıkmıştır. Sistemde bulunan nanoakışkana, alümina nanopartiküller eklenmiş, ultrasonik karıştırma yardımıyla homojenize edilerek tekrar sisteme dahil edilmiştir. Deneyler esnasında sıcaklıkla birlikte artan pompa sesi, nanoakışkanın topaklandığı yönünde şüphe oluşturmuş ve sistemden Şekil 5.19'da verilen numune alınmıştır. Numunede topaklaşma ve çökelmelerin yoğun miktarda olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle hibrit nanoakışkan ile planlanan deneyler tamamlanmış, ancak sağlıklı sonuç vermeyeceği kanaati ile analizleri yapılmamıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tek adım yöntemiyle sentezlenmiş bakır oksit/su nanoakışkanının hidrodinamik ve ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak incelenmiş ve benzer koşullarda test edilen deiyonize suyun parametreleriyle karşılaştırılmıştır. Nanoakışkanın ve deiyonize suyun hidrodinamik ve ısı transfer karakteristikleri ters akışlı iç içe borulu bir ısı değiştirici kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca tasarlanan ısı değiştirici için sayısal modelleme yapılarak deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

Tek adım yöntemine göre sentezlenmiş CuO/H₂O nanoakışkana ilk ısı uygulandığında (yaklaşık 45 °C sıcaklıktan sonra) nanoakışkanda köpürmeler gözlenmiş bir süre sonra bu köpürmeler kaybolmuştur. Daha sonraki deneylerde böyle bir olay tekrar gözlenmemiştir. Bu durumun kullanılan yüzey ajanlarının buharlaşmasından kaynaklanabileceği öngörülmüştür. Erken köpürme durumuna rağmen nispeten yüksek sıcaklıklarda çalışan nanoakışkanın stabilitesini genel olarak muhafaza ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Hidrodinamik açıdan bakır oksit/su nano akışkanın deiyonize suya nazaran daha fazla basınç düşümü ve daha yüksek sürtünme faktörüne (Örneğin, Re_h=10000'de yaklaşık %13,5; 15000'de yaklaşık %17) sahip olduğu gözlenmiştir. Bu fark, su yerine nanoakışkan kullanımı halinde ihtiyaç duyulacak pompa gücünün artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Isı transfer karakteristikleri açısından, bakır oksit/su nano akışkanın ısı taşınım katsayısında akışın türbülans seviyesine göre değişmekle birlikte baz akışkana kıyasla en az %12'lik (Re=10000'de) bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde Nu sayısının artan Re_h sayısı ile arttığı ve nanoakışkanın gelişmiş termal özelliklerinden kaynaklı, suya nazaran aynı türbülans koşullarında daha yüksek Nusselt değerlerine ulaşıldığı gözlenmiştir.

Bakır oksit/su nano akışkanın ısı performans faktörünün Reynolds sayısının 30000 değerinde 1,27'ye kadar çıktığı hesaplanmıştır. Endüstriyel

uygulamalarda su yerine CuO/su nanoakışkanı kullanımı halinde, ısı transferindeki iyileşme etkisiyle basınç düşüşündeki artış etkisinin bastırılabilceğı anlaşılmaktadır.

Su için yapılan sayısal analizlerden bulunan sıcaklık değerklerinin, deneysel çalışma esnasında ölçülen sıcaklık değerkleri ile oldukça yakın bir uyum içerisinde olduğı tespit edilmiştir.

Tek adım yöntemiyle sentezlenmiş bakır oksit/su nano akışkanının suya göre daha iyi bir ısı transfer akışkanı olabileceğı kanaati oluşmasına rağmen, farklı konsantrasyona sahip ve farklı metotlarla sentezlenmiş bakır oksit/su nanoakışkanları kullanılarak, daha fazla sayıda benzer deneylerin yapılması oluşan kanaatin pekiştirilmesine, bu konuda yapılacak sayısal modelleme çalışmalarına ve aynı zamanda literatüre de katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aberoumand, S., Jafarimoghaddam, A., 2017. Experimental Study on Synthesis, Stability, Thermal Conductivity and Viscosity of Cu-Engine Oil Nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 315-322.
- Asadi, M., Asadi, A., Aberoumand, S., 2018. An Experimental and Theoretical Investigation on the Effects of Adding Hybrid Nanoparticles on Heat Transfer Efficiency and Pumping Power of an Oil-Based Nanofluid as a Coolant Fluid. *International Journal of Refrigeration*, 89, 83-92.
- Behabadi, M.A.A., Shahidi, M., Aligoodarz, M.R., 2015. An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop of MWCNT-Water Nano-Fluid Inside Horizontal Coiled Wire Inserted Tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 63, 62-72.
- Canan, C., 2012. Titanya (TiO₂) Metal Oksit Nano Malzemeler. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 180s, Edirne.
- Choi SUS. In: Singer DA, Wang HP, editors. Development and application of non-Newtonian flows, vol. FED 231. New York: ASME; 1995. p. 99-105.
- Choi, S.U.S., Eastman, J.A., 1995. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition.
- Çakır, M.T., 2015. Alimüna İçeren Nanoakışkan Kullanılarak Isı Borularının Performanslarının İyileştirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(4), 547-556.
- Çengel, Y.A., 2011. Isı ve Kütle Transferi: Pratik bir yaklaşım. Güven Kitabevi, 879, İzmir.
- Çifci, H., 2014. Küresel Yüzeylerde Nano Akışkanlarda Kaynama Isı Transferinin Deneyisel Olarak İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 59s, Erzurum.
- Darzi, A.A.R., Farhadi, M., Sedighi, K., 2013. Heat Transfer and Flow Characteristics Of Al₂O₃-Water Nanofluid in a Double Tube Heat Exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47, 105-112.
- Demirpolat, A.B., 2018. Etilen Glikol Bazlı Nanoakışkanların Üretilmesi, Viskozite Ve Termal Özelliklerinin Deneyisel İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 116s, Elazığ.
- Dhale, L.P., Wadhawe, P.B., Kanade, D.V., Sable, Y.S., 2015. Effect of Nanofluid on Cooling System of Engine. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(10).

- Dirlik, A., 2018. Nanoakışkanlarda Doğal Taşınım İle Isı Transferinin Sayısal Olarak İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, İstanbul.
- Elcock D. Potential Impacts of Nanotechnology on Energy Transmission Applications and Needs. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory; November 2007.
- Erkut, T.Z., 2012. Nanoakışkan Kullanarak Elektrikli Radyatörlerin Isıl Veriminin İyileştirilmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 84s, Samsun.
- Erol, E., 2018. Borulu Tip Isı Değiştiricilerde Titanyumdioksit (TiO_2) Nanoakışkanı Kullanılarak Isıl İletkenliğin Arttırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 63s, Ankara.
- Escher, W., Brunschweiler, T., Shalkevich, N., Shalkevich, A., Burgi, T., Michel, B., Poulikakos, D., 2011. On the Cooling of Electronics With Nanofluids. Journal of Heat Transfer, 133.
- Esfe, M.H., Afrand, M., Karimipour, A., Yan, W.M., Sina, N., 2015. An Experimental Study on Thermal Conductivity of MgO Nanoparticles Suspended in a Binary Mixture Of Water and Ethylene Glycol. International Communications in Heat and Mass Transfer, 67, 173-175.
- Ghazvini, M., Behabadi, M.A.A., Rasouli, E., Raseei, M., 2012. Heat Transfer Properties of Nanodiamond-Engine Oil Nanofluid in Laminar Flow. Heat Transfer Engineering, 33(6), 525-532.
- Heris, S.Z., Etemad, S.G., Esfahany, M.N., 2009. Convective Heat Transfer Of a Cu/Water Nanofluid Flowing Through a Circular Tube. Experimental Heat Transfer, 22, 217-227.
- Heyhat, M.M., Kowsary, F., Rashidi, A.M., Esfahani, S.A.V., Amrollahi, A., 2012. Experimental Investigation of Turbulent Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Alumina Water Nanofluids in Fully Developed Flow Regime. International Communications in Heat and Mass Transfer, 39, 1272-1278.
- Hwang, Y., Par, H.S.K., Lee, J.K., Jung, W.H., 2006. Thermal Conductivity and Lubrication Characteristics of Nanofluids. Current Applied Physics, 69-71.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, 997, ABD.
- Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2004. Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids. Applied Physics Letters, 84(21), 4316-4318.

- Jang, S.P., Choi, S.U.S., 2006. Cooling Performance of A Microchannel Heat Sink With Nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 26, 2457-2463.
- Jiang, H., Xu, Q., Huang, C., Shi, L., 2015. Effect of Temperature On The Effective Thermal Conductivity of N-Tetradecane-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles. *Particuology*, 22, 95-99.
- Jiang, H., Zhang, Q., Shi, L., 2015. Effective Thermal Conductivity of Carbon Nanotube-Based Nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 55, 76-81.
- Kahveci, M., 2021. Isı Eşanjörlerinde Nanoakışkan Olarak Grafen Oksit Kullanımının Isıl Performansa Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 52s, Malatya.
- Kakaç, S., Liu, H., Pramuanjaroenkij, A., 2012. Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design. CRC Press Taylor & Francis Group, 607s, ABD.
- Karaca, E., Altun, Ö., 2022. Eş Merkezli İç İç Borulu Isı Değiştiricisinde Isı Transferi İyileştirme Yöntemlerinin Sayısal Analizi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 96-105.
- Keyvani, M., Afrand, M., Toghraie, D., Reiszadeh, M., 2018., An Experimental Study On The Thermal Conductivity of Cerium Oxide/ Ethylene Glycol Nanofluid: Developing A New Correlation. *Journal of Molecular Liquids*, 266, 211-217.
- Kılınç, F., 2015. Oto Radyatörlerde Nanoakışkan Kullanılarak Isı Aktarım Performansının Arttırılması. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 122s, Sivas.
- Kole, M., Dey, T.K., 2010. Viscosity of Alumina Nanoparticles Dispersed in Car Engine Coolant. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 677-683.
- Leong, K.Y., Saidur, R., Kazi, S.N., Mamun, A.H., 2010. Performance Investigation of an Automotive Car Radiator Operated With Nanofluid-Based Coolants (Nanofluid as a Coolant In a Radiator). *Applied Thermal Engineering*, 30, 2685-2692.
- Maradiya, C., Vadher, J., Agarwal, R., 2018. The Heat Transfer Enhancement Techniques and their Thermal Performance Factor. *Beni- Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7, 1-21.
- Mohammed, H.A., Al-aswadi, A.A., Shuaib, N.H., Saidur, R., 2011. Convective Heat Transfer and Fluid Flow Study Over a Step Using Nanofluids: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2921-2939.
- Mohammed, H.A., Bhaskaran, G., Shuaib, N.H., Saidur, R., 2011. Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Microchannels Heat Exchanger Using

Nanofluids: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1502-1512.

Mohammed, H.A., Hasan, H.A., Wahid, M.A., 2013. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids in a Double Pipe Heat Exchanger with Louvered Strip Inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 40, 36-46.

Parsa, S.M., Yazdani, A., Aberoumand, H., Farhadi, Y., Ansari, A., Aberoumand, S., Karimi, N., Afrand, M., Cheraghian G., Ali, H.M., 2022. A Critical Analysis on the Energy and Exergy Performance of Photovoltaic/ Thermal (PV/T) System: The Role of Nanofluids Stability and Synthesizing Method. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51.

Peng, L., Jiang, H., Chen, X., Liu, D., Feng, H., Zhang, L., 2019. A Review on The Advanced Design Techniques and Methods of Vibrating Screen for Coal Preparation. *Powder Technology*, 347, 136-147.

Pordanjani, A.H., Aghakhani, S., Afrand, M., Sharifpur, M., Meyer, J.P., Xu, H., Ali, H.M., Karimi, N., Cheraghian, G., 2021. Nanofluids: Physical phenomena, applications in thermal systems and the environment effects- a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128573.

Pukšec, T., Foley, A., Markovska, N., Duić, N., Life Cycle to Pinch Analysis and 100% Renewable Energy Systems in a Circular Economy at Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 2017. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108, 572-577.

Qi, C., Hu, J., Liu, M., Guo, L., Rao, Z., 2017. Experimental Study on Thermo-Hydraulic Performances of CPU Cooled by Nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 153, 557-565.

Saidur, R., Kazi, S.N., Hossain, M.S., Rahman, M.M., Mohammed, H.A., 2011. A Review on the Performance of Nanoparticles Suspended with Refrigerants and Lubricating Oils in Refrigeration Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 310-323.

Saidur, R., Leong, K.Y., Mohammed, H.A., 2011. A Review on Applications and Challenges of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1646-1668.

Shokouhmand, H., Ghazvini, M., Shabanian, J., 2008. Performance Analysis of Using Nanofluids in Microchannel Heat Sink in Different Flow Regimes and Its Simulation Using Artificial Neural Network. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 3.

Singh, K., Sharma, S.K., Gupta, S.M., 2021. An experimental investigation of Hydrodynamic and Heat Transfer Characteristics of Surfactant-Water Solution and CNT Nanofluid in a Helical Coil-Based Heat Exchanger. *Materials Today: Proceedings*, 43, 3896-3903.

- Sonawane, S.S., Khedkar, R.S., Wasewar, K.L., 2015. Effect of Sonication Time On Enhancement of Effective Thermal Conductivity of Nano TiO₂-Water, Ethylene Glycol, and Paraffin Oil Nanofluids and Models Comparisons. *Journal of Experimental Nanoscience*, 10(4), 310-322.
- Soylu, S.K., 2018. Otomobil Radyatöründe TiO₂ Esaslı Nanoakışkan Kullanımının Isı Transfer Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 136s, Antalya.
- Suganthi, K.S., Rajan, K.S., 2017. Metal Oxide Nanofluids: Review of Formulation, Thermo-Physical Properties, Mechanisms, and Heat Transfer Performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 226-255.
- Tian, H., Guo, Z., Zhan, R., Pan, J., Zhu, D., Yang, C., Pan, L., 2021. Effective and Economical Treatment of Low-Grade Nickel Laterite by a Duplex Process of Direct Reduction-Magnetic Separation & Rotary Kiln Electric Furnace and Its Industrial Application. *Powder Technology*, 394, 120-132.
- Tuğan, V., 2019. Radyatörlerde Nanoakışkan Kullanımının Isıl Performansa Etkisinin Sayısal Ve Deneysel Analizi. Munzur Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Tunceli.
- Tzeng, S.C., Lin, C.W., Huang, K.D., 2005. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids in Rotary Blade Coupling of Four-Wheel-Drive Vehicles. *Acta Mechanica*, 179, 11-23.
- Wang, X.Q., Mujumdar, A.S., 2007. Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 1-19.
- Wang, X.Q., Mujumdar, A.S., 2007. Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46, 1-19.
- Warrier, P., Teja, A., 2011. Effect of Particle Size On The Thermal Conductivity of Nanofluids Containing Metallic Nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 6, 247-252.
- Wu, H., Al-Rashed, A.A.A.A., Barzinjy, A.A., Shahsavar, A., Karimi, A., Talebizadehsardari, P., 2019. Curve-Fitting on Experimental Thermal Conductivity of Motor Oil Under Influence of Hybrid Nano Additives Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes and Zinc Oxide. *Physica A*, 535.
- Xiao, G., Wang, X., Zhang, J., Ni, M., Gao, X., Luo, Z., Cen, K., 2013. Granular Bed Filter: A Promising Technology for Hot Gas Clean-Up. *Powder Technology*, 244, 93-99.
- Xie, H., Chen, L., 2009. Adjustable Thermal Conductivity in Carbon Nanotube Nanofluids. *Physics Letters A*, 373, 1861-1864.

- Xuan, Y., Li, Q., 2000. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21, 58-64.
- Yarmanda, H., Zulkifli, N.W.B.M., Gharehkhani, S., Shirazic, S.F.S., Alrashed, A.A.A.A., Ali, M.A.B., Dahari M., Kazi S.N., 2017. Convective Heat Transfer Enhancement With Graphene Nanoplatelet/ Platinum Hybrid Nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 120-125.
- Yoo, D.H., Hong, K.S., Yang, H.S., 2007. Study of Thermal Conductivity of Nanofluids for The Application of Heat Transfer Fluids. *Thermochimica Acta*, 455, 66-69.
- Yu, W., France, D.M., Choi, S.U.S., Routbort, J.L., 2007. Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications. Energy Systems Division.
- Yu, W., Wang, T., Park, A.H.A., Fang, M., 2019. Review of Liquid Nano-Absorbents for Enhanced CO₂ Capture. *Nanoscale*, 11, 17137-17156.