

Dairesel bir Mikrokanalda SiO₂ Nanoakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerinin İncelenmesi

Bayram ŞAHİN¹, Hourieh BAYRAMIAN², Emre MANDEV^{1*}, Eyüphan MANAY¹

ÖZET: Endüstriyel uygulamalarda ısı transferinin artırılması sıkça karşılaşılan ve sürekli geliştirme ihtiyacı duyulan bir mühendislik problemidir. Son yıllarda ısı transferi iyileştirmesinde sıklıkla kullanılan bir yöntem de nanoakışkan kullanımıdır. İş yapan akışkan içerisine nanometre boyutlarında partiküllerin eklenmesi, akışkanın ısı transferi performansını artıran bir uygulamadır. Bu çalışmada, sabit ısı akısı sınır şartlarında, 700 µm çapında dairesel bir mikrokanalda SiO₂-saf su nanoakışkanlarının ısı performansları ve basınç düşümleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2 hacimsel orandaki nanoakışkanlar, saf suya 15 nm partikül çapında SiO₂ nanopartikülleri ilave edilerek hazırlanmıştır. Sıcaklık, debi ve basınç ölçümleriyle ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı, basınç düşümü ve sürtünme faktörü değerleri belirlenmiştir. Ayrıca ısı performans ve basınç düşümü analizleri için gerekli olan ısı iletkenlik ve viskozite özellikleri deneysel olarak saptanmıştır. Çalışma sonucunda Nusselt sayısının Reynolds sayısı ve partikülün hacimsel oranındaki artışla arttığı gözlenmiştir. Nanoakışkan kullanımıyla maksimum ısı transferi artışı Re = 2160 civarında ve %1.2 hacimsel oranda saf suya göre yaklaşık % 20 civarında olmuştur. Yüksek Reynolds sayılarında tüm akışkanların sürtünme faktörü değerleri birbirine çok yakın iken, Reynolds sayısı azaldıkça hacimsel partikül oranının sürtünme faktörün üzerindeki etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların sürtünme faktörü değerinin saf su sürtünme faktörü değerinden yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Nanoakışkan, SiO₂, mikrokanal, ısı transferi, basınç düşümü

Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of SiO₂ Nanofluids in a Circular Microchannel

ABSTRACT: Increasing the heat transfer in industrial applications is a frequently encountered engineering problem that requires continuous improvement. In recent years, a commonly used method of heat transfer enhancement is the using nanofluids. Adding nanometer-sized particles into the working fluid is an application that improves the heat transfer performance of the fluid. In this work, thermal performance and pressure drops of SiO₂-pure water nanofluids in a circular microchannel with a diameter of 700 µm were investigated experimentally under constant heat flow boundary conditions. In the study, volumetric ratios of nanofluids were 0.2%, 0.4%, 0.8% and 1.2%. These nanofluids were prepared by adding SiO₂ nanoparticles of 15 nm particle diameter to purified water. The values of heat transfer coefficient, Nusselt number, pressure drop and friction factor were determined with temperature, flow rate and pressure measurements. In addition, the thermal conductivity and viscosity properties required for thermal performance and pressure drop analysis have been experimentally determined. As a result, it was observed that Nusselt number increased with increasing Reynolds number and volumetric ratio of particle. With the use of nanofluid, the maximum heat transfer enhancement was about 20% at Re = 2160 and 1.2% particle volume fraction compared to pure water. While the friction factor values of all fluids were very close to each other in the high Reynolds numbers, the effect of the volumetric particle ratio on the friction factor became more clear as the Reynolds number decreased. At all volume ratios it was determined that the friction factor value of the nanofluids is higher than the pure water friction factor value.

Keywords: Nanoparticle, SiO₂, microchannel, heat transfer, pressure drop

¹ Bayram ŞAHİN (Orcid ID: 0000-0002-7016-644X), Emre MANDEV (Orcid ID: 0000-0002-6791-4136), Eyüphan MANAY (Orcid ID: 0000-0002-5456-8756), Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

² Hourieh BAYRAMIAN (Orcid ID: 0000-0002-8424-9182), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu yazar/Corresponding Author: Emre Mandev, emre.mandev@erzurum.edu.tr

GİRİŞ

Enerji tüketimindeki artış, kaynaklarının hızla tüketilmesine neden olmakta ve insanları alternatif enerji kaynakları arayışına yönlendirmektedir. Bu alternatif enerji kaynakları yalnızca yenilenebilir veya nükleer enerji kaynakları olarak düşünülmemelidir. Enerji tasarrufu, enerji kayıplarının önlenmesi, enerji atıklarının değerlendirilmesi, enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması, vb. eylemler artık alternatif enerji kaynakları olarak gösterilmektedir.

Alternatif enerji kaynağı olarak görülen enerjinin verimli şekilde kullanımı konusunda, önemli çalışma alanlarından biri ısı transferi iyileştirme çalışmalarıdır. Isı transferi iyileştirmesi birçok teknik halen araştırılmakta ve tartışılmaktadır (Laohalertdecha ve ark., 2007; Sheikholeslami ve ark., 2018; Maradiya ve ark., 2018). Bu tekniklerden biri de klasik iş akışkanlarının yerine yüksek ısıl performanslı nanoakışkanların kullanımınıdır. Nanoakışkanlar, klasik iş akışkanları içerisinde içerisine nanometre boyutlarında yüksek ısıl iletkenlikte katı parçacıkların katılması ve uygun yöntemlerle dağıtılmasıyla elde edilir. (Daungthongsuk ve Wongwises, 2007; Li ve ark., 2009). Son yıllarda yeni nesil ısı transfer akışkanı olarak kullanılan nanoakışkanlar yüksek ısıl iletkenlikleri sebebiyle ısı transferinde büyük oranda iyileştirme sağlayabilirler.

Nanoakışkanlar ısıl performans artışının yayında, klasik iş akışkanlarına göre ek malzeme ve hazırlama maliyeti barındırır. Bu durum sebebiyle bu akışkanların makro sistemlerde kullanımı halen ekonomik görülmemektedir. Az miktarlarda iş akışkanı ile çalışabilmeleri ve yüksek ısı akıları sağlamaları nedeniyle nanoakışkan kullanımına en uygun sistemler mikrokanallar ve mikrokanallı ısı değiştiricilerdir. Mikrokanallarda ısı transferi üzerine çalışmalar Tuckerman ve Pease

tarafından başlatılmıştır ve daha sonra ısı transferini artırma konusunda önemli bir alternatif olarak görüldüğünden bu sistemler araştırmacıların ilgisini çekmeye devam etmiştir (Tuckerman ve Pease, 1981). Son yıllarda cihaz tasarımlarındaki minyatürleşme eğiliminin artması da mikrokanallar ve mikrokanallı ısı değiştiricilerine olan ilgiyi artırmaktadır. Mikrokanallarda nanoakışkanların kullanımı ısı transferi iyileştirmesi ve dolayısı ile enerji verimliliği açısından önemli bir çözüm olacaktır.

Bu konuda öncü deneysel çalışmalardan biri Chein ve Chuang tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada farklı hacimsel oranlarda CuO-Su nanoakışkanının mikrokanallı bir ısı değiştiricide ısı transferi ve basınç düşümü incelenmiştir. Çalışma sonucunda hacimsel oran ile basınç düşümü ve ısı transfer artışı arasında ilişki kurulmuştur (Chein ve Chuang, 2007). Wu vd. ise farklı hacimsel oranlarda Al₂O₃-Su nanoakışkanları ile trapez kesitli mikrokanallarda ısı transferi ve basınç düşümünü incelemiştir. Çalışma sonucunda yüksek hacimsel oranlarda nanoakışkan kullanımının ilave bir basınç düşümüne neden olmadan ısı transfer katsayısında artışa sebebiyet verdiği belirlenmiştir (Wu ve ark., 2009).

Konu ile ilgili diğer bir deneysel çalışma Ijam vd. tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada dikdörtgen kesitli bakır mikrokanallı ısı değiştiricide, laminer akış rejiminde farklı hacimsel oranlarda Al₂O₃-Su ve TiO₂-Su nanoakışkanları kullanılmıştır. Nanoakışkan kullanımının ısı transferinde %18'e kadar iyileştirme sağlamanın yanında pompa güç tüketiminde de artışa sebebiyet verdiği rapor edilmiştir (Ijam ve ark., 2012). Literatür incelendiğinde, mikrokanallarda nanoakışkanların ısı transferinin ve meydana getirdikleri ek basınç düşümünün anlaşılmasına yönelik dikkate değer bir ilgi olduğu açıktır. Fakat dairesel kesitli mikrokanallar ihmal

edilmiştir. Ayrıca bu çalışmaya konu olan SiO₂-saf su nanoakışkanı yüksek kararlılıkta bir nanoakışkandır ve geniş hacimsel partikül oranı aralığında incelenmesi de literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada, sabit ısı akısı sınır şartlarında, 700 µm çapında dairesel bir mikrokanalda SiO₂-Saf su nanoakışkanlarının ısı performansları ve basınç düşümleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2 hacimsel oranda nanoakışkanlar saf suya 15 nm partikül çapında SiO₂ nanopartikülleri ilave edilerek hazırlanmıştır. Sıcaklık, debi ve basınç ölçümleriyle ısı taşınım katsayısı, Nusselt sayısı, basınç düşümü ve sürtünme faktörü değerleri belirlenmiştir. Ayrıca Isıl performans ve basınç düşümü analizleri için gerekli olan ısı iletkenlik ve viskozite özellikleri de deneysel olarak saptanmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Nanoakışkanların Hazırlanması ve Termofiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

$$\frac{k_e}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + (k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} \quad (6)$$

$$k_e = \frac{1}{4} \left[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_f \right] + \frac{k_f}{4} \sqrt{\Delta} \quad (7)$$

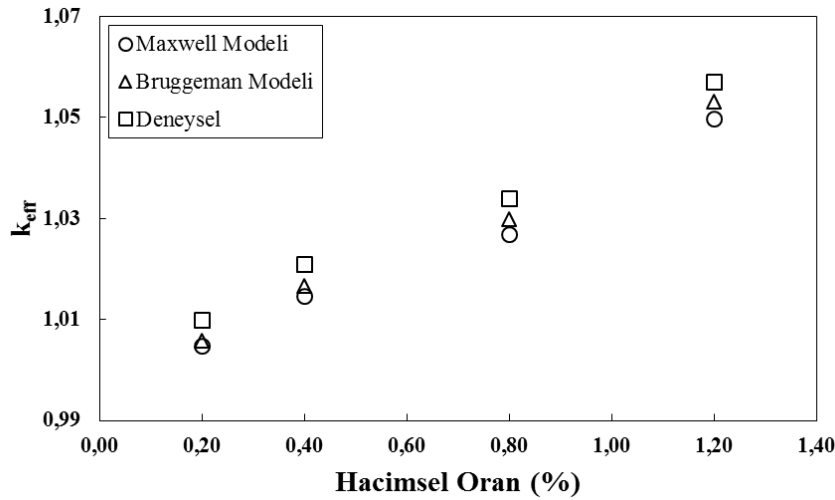
$$\Delta = \left[(3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_p}{k_f} \right) \right] \quad (8)$$

Isıl iletkenlik verilerinin literatürle karşılaştırılması Şekil 1.'de sunulmuştur. Grafikte deney verileri ile literatür modelleri arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Şekil 1.'de kullanılan veriler akışkanların

Nanoakışkanların hazırlanmasında iki adım metodu kullanılmıştır. Bu metodun ilk aşaması nanopartiküllerin üretimi, ikinci aşaması ise bu partiküllerin çeşitli yöntemler ile akışkan içerisine dağıtılmasıdır (Drzazga ve ark., 2012). Nanoakışkanlar için hacimsel partikül oranları %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2 olarak belirlenmiştir. Her bir hacimsel partikül oranı için hazırlanan karışım 8 saat süre ile Hielscher marka UP400S model ultrasonik homojenizatörde dağıtma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen nanoakışkanlarda herhangi bir stabilizasyon problemi gözlenmemiştir (çökme, topaklanma, vb.).

Nanoakışkanların ve saf suyun ısı iletkenlikleri Linseis marka THB-100 model ısı iletkenlik ölçüm cihazıyla sıcaklığa bağlı olarak belirlenmiştir. Ölçümler 20-60°C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar literatürde sıklıkla kullanılan Maxwell ve Bruggeman ısı iletkenlik modelleri ile karşılaştırılmıştır. Maxwell modeli, Eşitlik 6.'da ve Bruggeman modeli, Eşitlik 7.'de verilmiştir (Angayarkanni ve Philip, 2015).

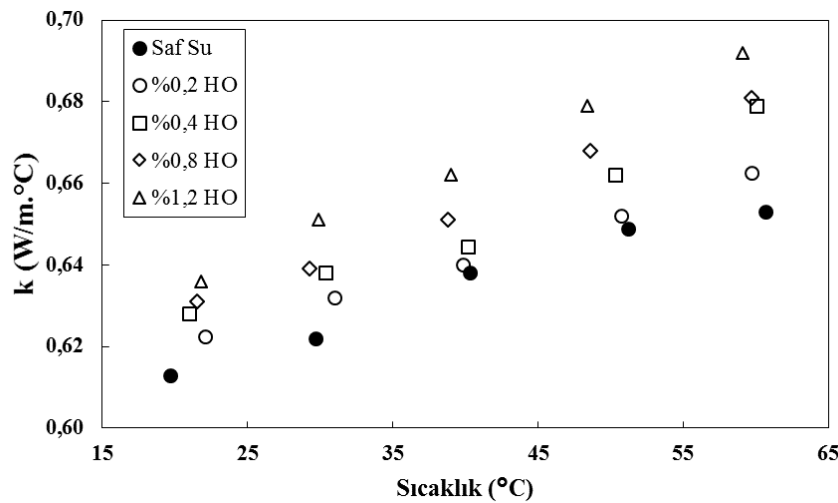
20°C'deki ısı iletkenlik özelliklerini içermektedir. Deneysel verilerin modellerden sapma oranların Maxwell eşitliğine göre %0.4-0.76 aralığındayken Bruggeman eşitliğinde bu oranlar %0.1-1.3 aralığında olmuştur.



Şekil 1. Isıl iletkenlik verilerinin literatürle karşılaştırılması

Farklı hacimsel oranlar için nanoakışkanların ısı iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, hacimsel partikül oranı arttıkça, nanoakışkanın ısı iletkenliği artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda bu artış daha az miktarda iken yüksek sıcaklıklarda hacimsel oran arttıkça, ısı

iletkenlik artışı daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca sıcaklık arttıkça, ısı iletkenlikte artış görülmektedir. Saf suya göre minimum artış %1.6 oranında olmuş ve %0.2 hacimsel partikül oranında gözlenmiştir. Maksimum artış ise %1.2 hacimsel partikül oranında %6 civarında olmuştur.



Şekil 2. Farklı hacimsel oranlarda ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi

Tüm akışkanların viskozite ölçümleri ise A&D marka SV-10 model viskozimetre ile gerçekleştirilmiştir. Isıl iletkenliğe benzer şekilde viskozite özellikleri de sıcaklığa bağlı

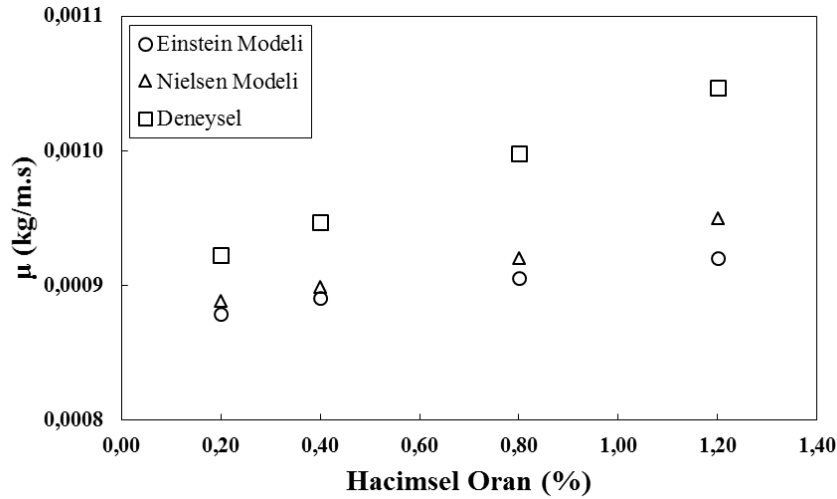
olarak belirlenmiştir (20-60°C). Viskozite verileri Eşitlik 9.’da verilen Einstein ve Eşitlik 10.’da verilen Nielsen modelleriyle karşılaştırılmıştır (Azmi ve ark., 2012).

$$\mu_n = \mu_f (1 \pm 2.5\phi) \quad (9)$$

$$\mu_n = \mu_f (1 + 1.5\phi) e^{\phi(1-\phi_m)} \quad (10)$$

Deneyel viskozite değerlerinin farklı hacimsel oranlarda viskozite modelleri ile karşılaştırılması Şekil 3’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde düşük hacimsel partikül oranlarında deneyel viskozite değerlerinin model tahminleri ile uyumlu olduğu

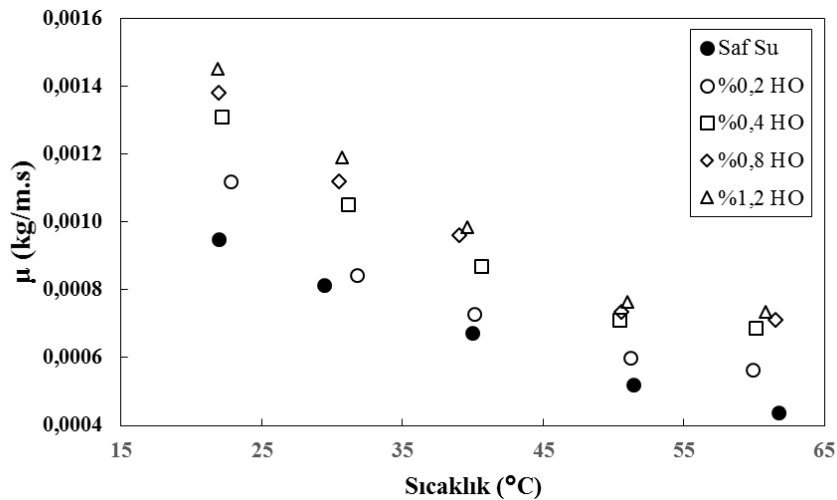
görülmektedir. Fakat hacimsel partikül oranının artmasıyla deneyel verilerle modeller arasındaki fark belirgin şekilde artmıştır Einstein ve Nielsen modelleri düşük hacimsel partikül düşük hacimsel partikül oranları için önerildiğinden bu durum normaldir. (Mandev, 2017).



Şekil 3. Viskozite verilerinin literatürle karşılaştırılması

Nanoakışkan ve saf su viskozitelerinin farklı hacimsel oranlarda sıcaklıkla değişimleri Şekil 4’de sunulmuştur. Grafikte görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça, nanoakışkanın viskozitesi azalmaktadır. Nanoakışkan hacimsel partikül oranının artması ise viskozite değerlerinde artışa sebep olmuştur. Saf suya göre nanoakışkan

viskozitelerindeki artış minimum %29.5 oranında %0.2 hacimsel oranda ve maksimum artış %52.6 oranında %1.2 hacimsel oranda elde edilmiştir. Tüm hacimsel partikül oranları için viskozite değerlerinin sıcaklıkla değişimi benzer bir eğilim göstermiştir.

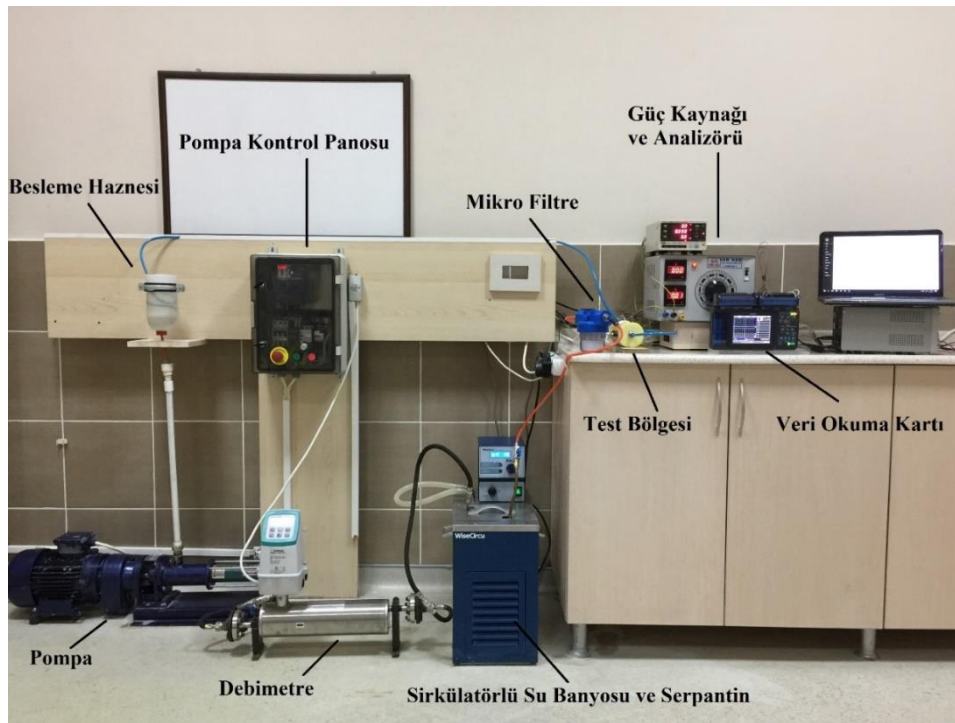


Şekil 4. Farklı hacimsel oranlarda viskozitenin sıcaklıkla değişimi

Deney Sistemi ve Test Bölgesi

Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin görseli Şekil 5.'de sunulmuştur. Düzenek elemanları sırasıyla akışkan besleme haznesi, pompa ve pompa kontrol panosu, debimetre, sirkülatörlü su banyosu ve serpantin, mikro filtre, güç kaynağı ve analizörü ve de veri kartıdır. Test bölgesinde basınç trasndüzeriyle fark basınç ölçümleri ve termokupllarla giriş, çıkış ve mikrokanal yüzey sıcaklıkları ölçülmektedir. Veriler eşzamanlı olarak bilgisayara kaydedilmektedir.

Test bölgesinin merkezinde iç çapı 700 µm ve dış çapı 760 µm olan 5 cm uzunluğunda bir kanal bulunmaktadır. Bu mikrokanal kestamit bloklar arasına yerleştirilmiştir ve kanal üzerine güç kaynağından beslenen şerit ısıtıcı tel sarılmıştır. Ayrıca test bölgesinde, kanal yüzeyi boyunca yerleştirilmiş termokupllarla altı noktadan yüzey sıcaklıkları ölçülmektedir. Meydana gelecek ısı kaybının ihmal edilebilir düzeyde tutulması için kanal ve ısıtıcının etrafı yalıtım malzemesiyle doldurulmuştur.



Şekil 5. Deney düzeneği ve elemanları

Verilerin İşlenmesi

Deney düzeneğinde, test bölgesine güç kaynağı kullanılarak aktarılan ısının tamamının taşınım mekanizması ile test bölgesinden akışkana transfer edildiği kabul edilmiştir. Bu sebeple ısı kayıpları ihmal edilerek iş akışkanına olan ısı transferi Eşitlik 11. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Q = VI \quad (11)$$

Eşitlik 11.de verilen taşınım ile ısı transferi ifadesinin açık yazılması ve taşınım katsayısının yalnız bırakılmasıyla Eşitlik 12. elde edilmiştir.

$$h = \frac{VI}{A_s(T_s - (T_g + T_c)/2)} \quad (12)$$

Buradan elde edilen deneysel ortalama taşınım katsayısı (h) Eşitlik 13.'de yerine yazılarak ortalama Nusselt sayısı hesaplanmıştır.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (13)$$

Ayrıca ortalama akışkan hızı (U) kullanılarak akışın Reynolds sayısı Eşitlik 14.'de verildiği haliyle belirlenmiştir.

$$Re = \frac{\rho DU}{\mu} \quad (14)$$

Sürtünme katsayısı Eşitlik 15.'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{2\Delta P D}{\rho U^2 L} \quad (15)$$

Test bölgesinde ölçülen fark basınç değerleri, yalnızca kanal içerisinde oluşan basınç düşümünü ifade etmemektedir. Okunan bu değer mikrokanalın giriş ve çıkışlarındaki ani genişleme ve daralma, bağlantı elemanları

kaynaklı basınç düşümleri vb. yükleri de içermektedir. Bu sebeple aynı deney şartlarında mevcut mikrokanaldan daha kısa bir mikrokanalla basınç deneyleri tekrarlanmıştır. Ardından elde edilen kısa kanal ve uzun kanal verilerinden faydalanılarak yalnızca kanalda meydana gelecek basınç düşümü Eşitlik 16. kullanılarak hesaplanmıştır (Avcı, 2008).

$$\Delta P = \Delta P_{uk} - \Delta P_{kk} \quad (16)$$

Deneysel bulguları doğru değerlendirmek için elde edilen verilerin belirsizlik düzeyini bilmek oldukça önemlidir. Çalışma kapsamında kullanılan verilerin belirsizlik düzeylerini içeren tablo Çizelge 1.'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Parametrelerin belirsizlik değerleri

Belirsizlik	D	L	A	T	ΔP	Q	Re
$\pm\%$	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07	1.00	1.00

BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel bulguların güvenilirliğinin saptanması amacıyla saf su ısı transferi ve sürtünme faktörü verileri, literatürde önerilen modeller ile kıyaslanmıştır. Burada ısı transferi verileri için Eşitlik 17.'de verilen Hausen modeli

$$Nu = 3.66 + \frac{0.19(Re Pr D / L)^{0.8}}{1 + 0.0117(Re Pr D / L)^{0.467}} \quad (17)$$

$$Nu = 1.86(Re Pr D / L)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (18)$$

$$f = (22.03 / Re) \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^{0.58} \quad (19)$$

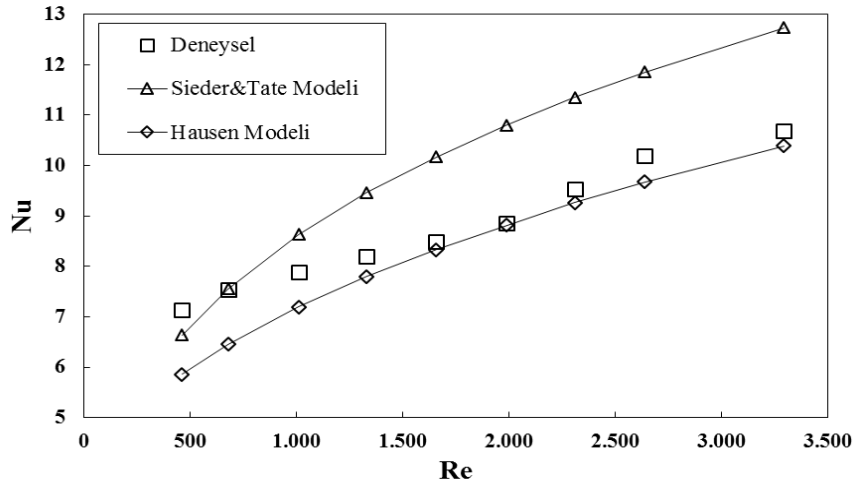
Saf suyun ısı transferi sonuçlarının literatürle karşılaştırılması Şekil 7'de verilmiştir. Şekilde artan Reynolds sayısı ile Nusselt

(Hausen, 1959) ve Eşitlik 18.'de verilen Sieder&Tate modeli kullanılırken, sürtünme faktörü için ise Eşitlik 19.'da verilen Shah&London modelinden faydalanılmıştır (Incropera ve DeWitt, 1996).

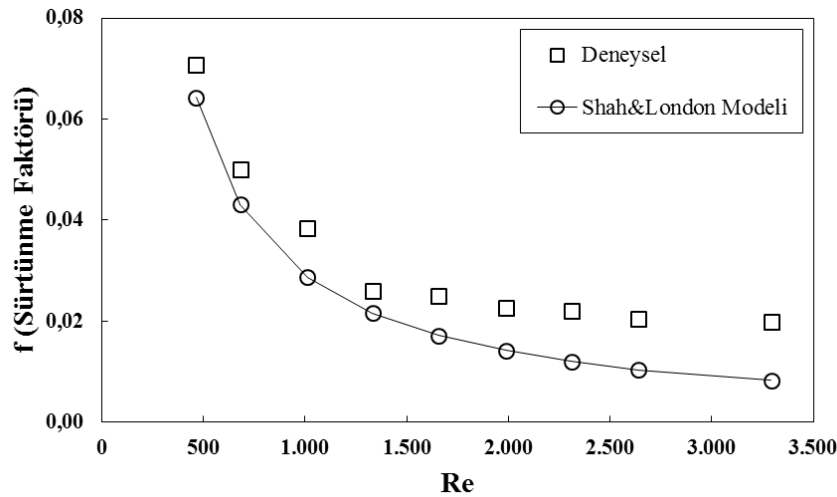
sayısında hem modeller hem de deneysel sonuçlar için artış gözlenmektedir. Deneysel verilerin modellerle iyi bir uyum içinde olduğu

belirlenmiştir. Saf suyun sürtünme faktörü değerlerinin literatürle karşılaştırılması ise Şekil 8'de sunulmuştur. Burada düşük Reynolds sayıları için model tahminleri ile deneysel veriler

arasında iyi bir uyum gözlenmekteyken, 2000 Re değerinden sonra bu uyumun bir miktar bozulduğu görülmektedir.



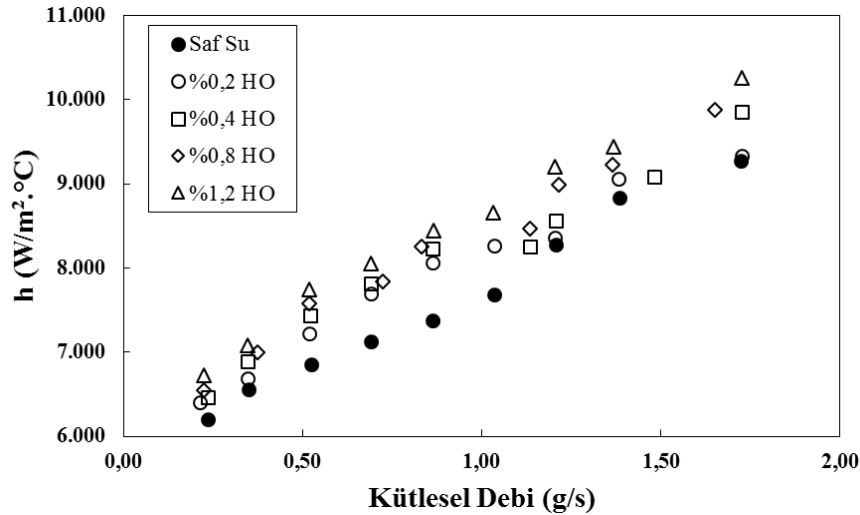
Şekil 7. Saf su ortalama Nusselt sayısı değerlerinin literatürle karşılaştırılması



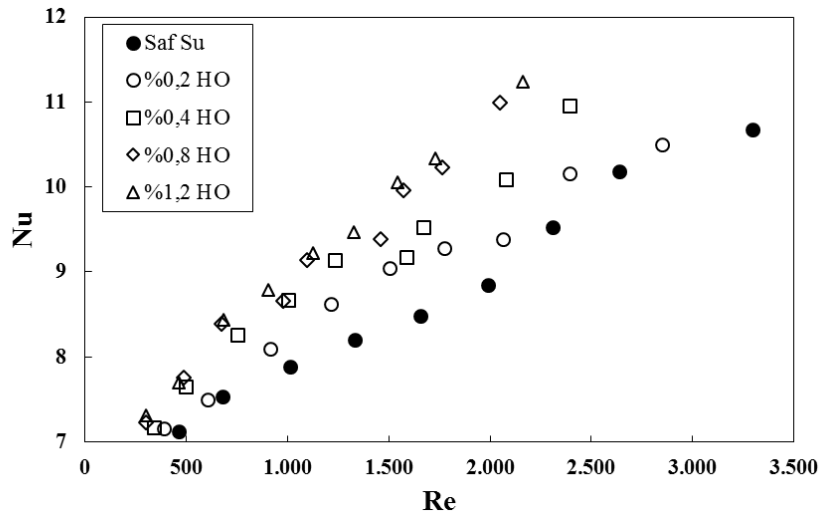
Şekil 8. Saf su sürtünme faktörü değerlerinin literatürle karşılaştırılması

Şekil 9'da saf su ve farklı hacimsel partikül oranlarında nanoakışkanların ısı taşınım katsayılarının debi ile değişimleri sunulmuştur. Beklenildiği gibi debinin artışı bütün akışkanlar için taşınım katsayısını artmasına sebebiyet vermiştir. Bu durum debiyle birlikte artan akışkan hızlarının bir sonucudur. Bilindiği üzere akış alanında hızın artması momentum ve ısı

transferi etkileşimlerini kuvvetli biçimde artırır. Ayrıca saf suya nanopartikül ilavesi ısı taşınım katsayısında belirgin bir artışa neden olmuştur. Isı taşınım katsayısında saf suya göre minimum %3.1 oranında artış %0.2'lik nanoakışkanında elde edilmişken maksimum %10.6 oranında artış %1.2'lik nanoakışkanında gözlenmiştir.



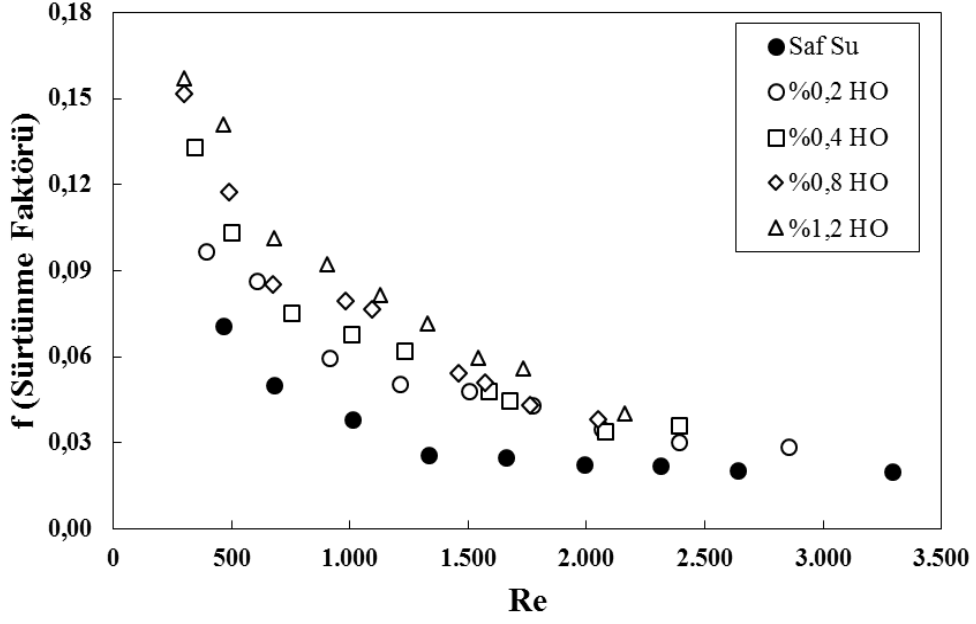
Şekil 9. Farklı hacimsel oranlar için taşınım katsayısının kütleli debi ile değişimi



Şekil 10. Farklı hacimsel oranlar için Nusselt sayısının Reynolds sayısı ile değişimi

Deneyisel ortalama Nusselt sayısının farklı akışkanlar için Reynolds sayısı ile ilişkisini içeren grafik ise Şekil 10'da verilmiştir. Hacimsel partikül oranlarındaki artış tüm Reynolds sayıları için Nusselt sayısında artışa neden olmuştur. Ayrıca artan Reynolds sayısı ile hacimsel partikül oranının Nusselt sayısı üzerindeki etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Nanoakışkan kullanımının sebep olduğu bu ısı transferi iyileşmesinin muhtemel sebepleri Brownian hareketi, nanopartiküllerin kümelenmesi, sıvı katmanlaşması ve yakın alan radyasyonu gibi mekanizmalardır. Bunun yanında üstün nanoakışkan termofiziksel özellikleri de bu iyileştirmeyi desteklemektedir.

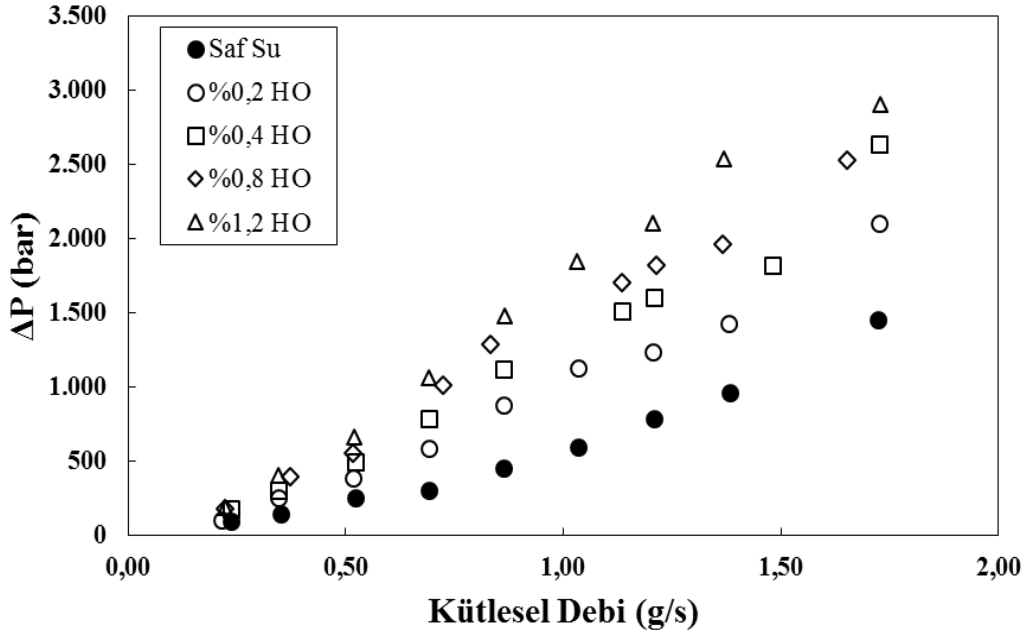
Nanoakışkanlar ve saf su için sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi Şekil 11'de sunulmuştur. Burada Reynolds sayısının artmasıyla sürtünme faktörü değeri azalmaktadır. Ayrıca tüm akışkanlar için sürtünme faktörü değeri partikül konsantrasyonunun artması ile artmaktadır. Düşük Reynolds sayılarında hacimsel partikül oranının sürtünme faktörü üzerindeki etkisi daha belirgin iken, Reynolds sayısının artmasıyla bu etki giderek önemsizleşmektedir. Beklenildiği gibi bütün hacimsel oranlarda nanoakışkanların sürtünme faktörü değerleri saf suyunkinden yüksektir.



Şekil 11. Farklı hacimsel oranlar için sürtünme faktörünün Reynolds sayısı ile değişimi

Şekil 12’de farklı hacimsel oranlarda nanoakışkanlar ve saf su için deneysel basınç düşümü-kütleli debi grafiği sunulmuştur. Saf su

için elde edilen en yüksek basınç düşümü 1453 Pa iken %1,2’lik SiO₂ nanoakışkanı için bu değer 2902 Pa olarak belirlenmiştir.



Şekil 12. Farklı hacimsel oranlar için basınç düşümünün kütleli debi ile değişimi

SONUÇ

Bu çalışmada, dairesel mikrokanalda saf su bazlı SiO₂ nanoakışkanının zorlanmış taşınımına ısı transferi ve basınç düşümü karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Partikülün hacimsel oranı %0.2, %0.4, %0.8 ve %1.2 olarak belirlenmiş ve Reynolds sayısı değeri 300-3300 aralığında tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- 20-60°C sıcaklık aralığında yapılan ısı iletkenlik ve viskozite karakterizasyonları literatürde kabul gören modellerle karşılaştırılmıştır. Deneysel ısı iletkenlik verilerinin modellerden sapma oranı Maxwell eşitliğine göre %0.4-0.76 aralığındayken Bruggeman eşitliğinde bu oran %0.1-1.3 aralığında olmuştur. Viskozite verilerinin ise düşük hacimsel partikül oranları için modeller ile iyi bir uyum içinde olduğu saptanmıştır.

- Hacimsel partikül oranı ile akışkanın hem ısı iletkenlik hem de viskozite özellikleri arasında kuvvetli bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Saf suya göre ısı iletkenlikte minimum artış %1.6 oranında olmuştur. Maksimum artış ise %1.2 hacimsel partikül oranında %6 olarak ölçülmüştür. Saf suya göre nanoakışkan viskozitelerindeki minimum artış %29.5 oranında %0.2 hacimsel partikül konsantrasyonunda ve maksimum artış %52.6 oranında %1.2 hacimsel partikül konsantrasyonunda gözlenmiştir.

- Isı transferi ve basınç düşümü sonuçları literatürde kabul görmüş modellerle karşılaştırılmış, kullanılan modellerle deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Farklı hacimsel oranlarda nanopartikül içeren saf su süspansiyonlarının saf suya göre ısı transferinde önemli miktarda artışa sebebiyet verdiği gözlenmiştir. Saf suya göre ısı taşınım katsayısında minimum %3.1 oranında artış %0.2 hacimsel partikül oranında elde edilirken maksimum %10.6 oranında artış %1.2 hacimsel partikül oranında gözlenmiştir.

Deneysel ortalama Nusselt sayısında ise artış oranları minimum %0.5 iken maksimum %20 civarında olmuştur.

- Hacimsel partikül oranının artmasıyla akışkanların sürtünme faktörü değerinin ve dolayısıyla mikrokanalda gerçekleşen basınç düşümünün de bir miktar arttığı belirlenmiştir. Saf su için elde edilen en yüksek basınç düşümü 1453 Pa iken %1,2'lik SiO₂ nanoakışkanı için bu değer 2902 Pa olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Angayarkanni SA, Philip J, 2015. Review on Thermal Properties of Nanofluids: Recent Developments. *Advances in Colloid and Interface Science*, 225: 146-176.
- Avcı M, 2008. Mikrokanallarda akış ve ısı transferi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış).
- Azmi WH, Sharma KV, Mamat R, Alias ABS, Izwan MI, 2012. Correlations for Thermal Conductivity and Viscosity of Water Based Nanofluids. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 5-7 December 2011, Pahang, Malaysia, 36: 1-6.
- Chein R, Chuang J, 2007. Experimental Microchannel Heat Sink Performance Studies Using Nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 46: 57-66.
- Daungthongsuk W, Wongwises S, 2007. A Critical Review of Convective Heat Transfer of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11: 797-817.
- Drzazga M, Lemanowicz M, Dzido G, Gierczyk A, 2012. Preparation of Metal Oxide-Water Nanofluids by Two-Step Method. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 51(5): 213-215.
- Hausen H, 1959. New Equations for Heat Transfer in Free or Forced Flow. *Allg. Warmetechnik*, 9(4/5): 75-79.

- Ijam A, Saidur R, Ganesan P, 2012. Cooling of Minichannel Heat Sink Using Nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39: 1188-94.
- Incropera FP, DeWitt DP, 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons Publications 4th Edition, pp. 424-445, NewYork-USA.
- Laohalertdecha S, Naphon P, Wongwises S, 2007. A Review of Electrohydrodynamic Enhancement of Heat Transfer. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5): 858-876.
- Li Y, Zhou J, Tung S, Schneider E, Xi S, 2009. A Review on Development of Nanofluid Preparation and Characterization. *Powder Technology*, 196: 89-101.
- Mandev E, 2017. Mikrokanallarda Nanoakışkanların Karma Taşınımıyla Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- 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): 1-21.
- Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji DD, 2015. Review of Heat Transfer Enhancement Methods: Focus on Passive Methods Using Swirl Flow Devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 444-469.
- Tuckerman DB, Pease RFW, 1981. High-Performance Heat Sinking for VLSI. *Electron Device Letters*, 2(5): 126-129.
- Wu X, Wu H, Cheng P, 2009. Pressure Drop and Heat Transfer of Al₂O₃-H₂O Nanofluids Through Silicon Microchannels. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(10).