

GRAFİT İÇEREN NANOAKIŞKAN KULLANILARAK ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNİN PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Yağız ÇOTUR, Tarkan KOCA^{2*}

¹İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malatya, 044100, Türkiye

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya, 044100, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 30.10.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 26.12.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1196731

ÖZET

Bu çalışmada iç borusu helisel tip olan bir eş merkezli ve iç içe borulu ısı değiştiricide paralel akış şartlarında ısı transferini iyileştirmek amacıyla nanoakışkan kullanımının ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Çalışmanın amacı grafit-saf su nanoakışkanı kullanarak ısı değiştiricide ısı verimliliğinin artırılmasıdır. Deney setinde saf suyun içerisine %0,25 hacimsel oranda grafit süspansiyonu edilmiş ve nanoakışkan kullanımının saf suya göre ısı transferine ve etkinlik katsayısına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sıcak akışkan olarak grafit-saf su nanoakışkanı, soğuk akışkan olarak da saf su kullanılmıştır. Çalışmada sıcak su debisi 3 l/dk, giriş sıcaklığı 55 °C değerinde sabit alınmıştır. Sıcak akışkanın soğuk akışkana debi oranlarının 1, 0.75, 0.5 ve 0.25 olması için, soğuk akışkan debisi 3, 4, 6 ve 12 l/dk olmak üzere dört farklı değerde alınmıştır. Saf su ve nanoakışkan ile yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu ısı değiştiricide grafit-saf su nanoakışkanın kullanılmasının ısı verimliliği artırdığı gözlemlenmiştir. Sistem kararlı hale geldikten sonra alınan verilerde grafit-saf su nanoakışkanın saf suya göre paralel akışta 3 l/dk debide %13,23 iyileştirme oranına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı değiştiricisi, Nanoakışkan, Grafit, Saf su, Etkinlik, Helisel boru, Nano partikül.

IMPROVING THE PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGERS USING GRAPHITE CONTAINING NANOFLUID

ABSTRACT

In this study, the effect of nanofluid usage on heat transfer was investigated in order to improve heat transfer by using a spiral tube in a double tube type heat exchanger. When nanofluid and pure water are used in the study, the effect of heat transfer and efficiency coefficient and comparison of these two were experimentally investigated. The hot water flow rate was kept constant at 3 l/min and the temperature at 55°C. The ratios of hot and cold fluid flow are taken as 1, 0.75, 0.5 and 0.25. In other words, the cold fluid flow rate was given to the system as 3,4,6,12 l/min and observations were made. As a result of the results obtained, it was observed that nanofluid is efficient in this type of heat exchanger. In the data obtained after the system stabilizes. In the data obtained after the system became stable, it was observed that it had an improvement rate of 13.23% at a flow rate of 3 l/min in parallel flow compared to graphite water.

Keywords: Heat exchanger, Nanofluid, Graphite, Pure water, Effectiveness, Spiral Tube, Nanoparticle

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin gelişmesine bağlı olarak endüstride duyulan ihtiyaçlar önemli oranda değişmeye başlamıştır. Özellikle son dönemlerde artan enerji ihtiyacı ile birlikte enerjinin daha verimli kullanımı için yapılan çalışmalar artmıştır. İklimlendirme, ısıtma ve soğutma sistemleri çalışma yapılan alanların başında gelmektedir. Isı transferi çalışmalarında farklı akışkanlar kullanılmaya başlanılmıştır.

¹ e-posta: yagizcotur@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9429-0074>

^{2*} e-posta: tarkan.koca@inonu.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6881-4153> (Sorumlu Yazar)

Son yıllarda nano boyutlardaki parçaların üretimi ve sıvılara süspansiyon edilmesi ile oluşan nanoakışkanlar oldukça dikkat çekmektedir. Nanopartiküllerin ısı iletkenlik katsayılarının yüksekliği nedeniyle bu materyaller geleneksel sıvılardan daha iyi ısı iletkenliğe sahiptir. Sıvılara süspansiyon edilen bu nano parçalar saf metaller, alaşımlar ve oksit bileşenlerden oluşmaktadır. Nanoakışkan oluşturulurken su, yağ, etilen ve glikol gibi sıvılar tercih edilmektedir. Isıl performansa etki eden başlıca parametrelerden olan ısı iletim katsayısı ve yüzey alanı, nanoakışkanlar tarafından artırıldığı için verimli sistemler elde edilmektedir. Fakat nanoakışkanlar oluşturulurken tam homojen bir karışım elde edilemediği için başta çökeltme, basınç düşüşü olmakta ayrıca sistemlerde aşınmalar olabilmektedir. Isıl performanslarının yüksek olması göz önüne alındığında bu gibi olumsuzlukları gidermek için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu tür avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurarak birçok deney ve çalışma da deney akışkanı olarak nanoakışkanlar kullanılmaktadır.

Xuan ve ark. [1] çalışmalarında; nanopartiküllerin eklenmesi ile iş yapan akışkanın ısı transferi performansının önemli derecede iyileşmesine neden olan temel fiziksel olayları incelemişlerdir. Netice olarak akışkan içerisine süspansiyon edilen partiküllerin akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini büyüttüğünü, nanopartiküllerin akışkan efektif ısı kapasitesini artırdığını, akışkanın çalkantılarının ve türbülans şiddetinin arttığını, partiküller arasındaki etkileşim ve çarpışmaların akışkanın yüzey alanının artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Chein ve Chuang [2] yaptıkları çalışmada, CuO-su akışkanının soğutma performansını gözlemlemişlerdir. Akışkan tarafından tutulan ısı direnç, enerji ve basınç kayıpları bir yana, optik mikroskopla gözlemlenen nano parçacıkların çöküntü görüntülerini ortaya çıkarmışlardır. Sistemde nanoakışkan geçen mikro kanalların, su geçen mikro kanallara göre daha fazla ısı tuttuğunu ve daha düşük duvar sıcaklıklarına ulaştığını tespit etmişlerdir. Sundar ve ark. [3] yaptıkları çalışmada, sabit ısı akısında dairesel boruda akan MWCNT-Fe₃O₄/su hibrid nanoakışkanlarının, türbülanslı akış için ısı transfer katsayısı ile sürtünme faktörünü incelemişlerdir. Bu çalışma %0,3'lük bir partikül oranında 22000 Reynolds sayısında, Nusselt sayısında %31,1 artış ve %18'lik basınç düşüşü olduğunu göstermiştir. Khedkar ve ark. [4] eş merkez borulu ısı değiştiricisinde TiO₂-su nanoakışkanı ile ısı transferini incelemişlerdir. Aynı Reynolds sayısı aralığında nano partikül eklenmesi, baz akışkandaki ısı performansı arttırmış ve baz akışkana göre daha yüksek ısı transfer katsayısı elde edilmiştir. Noghabai ve Rashid [5] yaptıkları çalışmada sabit ısıda ve dairesel tüpte nanoakışkanların ısı performansını gözlemlemişlerdir. Saf su ile karşılaştırma yapıldığında nanoakışkan %0,9 hacim konsantrasyonunda Reynolds sayısının 2070 olduğu değerde ortalama ısı transferinin %16,8 arttığı görülmüştür. Kılınç ve ark. [6] araç radyatöründeki ısı transferini artırmak için saf su, grafit oksit ve grafit nano ribon nanoakışkanlarını kullanarak deneysel çalışma yapmışlardır. Farklı debi ve farklı sıcaklıklarda deneyler yaptıktan sonra, ısı transfer katsayısındaki en yüksek artışı %0,01 su tabanlı grafit oksit için %8,7 ve %0,01 su tabanlı grafit nano ribon için %18,9 bulmuşlardır.

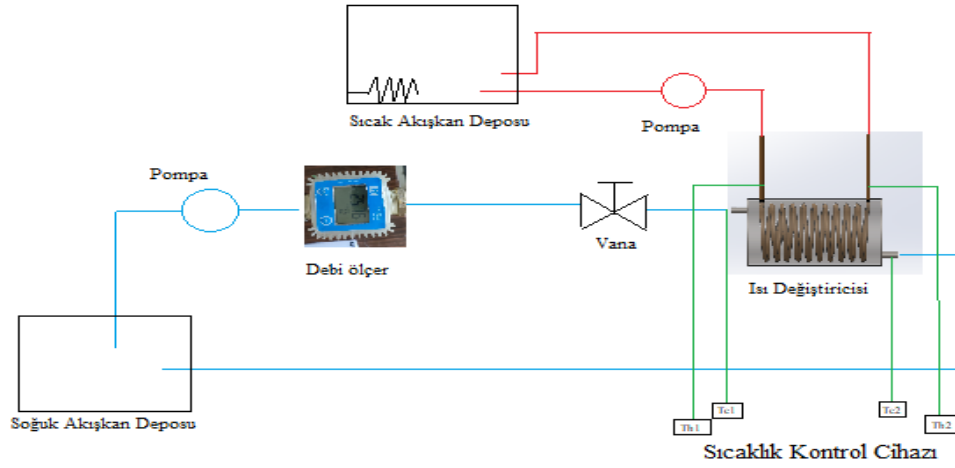
Bu çalışmada iç borusu helisel boru olan çift borulu ısı değiştiricisinde nanoakışkanın ısı performansına etkisini ölçmek için saf su ile nanoakışkan kıyaslanarak deneyler yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Hazırlanan sistemde sıcak akışkan sıcaklığı (55°C) sabit tutulmuştur. Soğuk akışkan 4 farklı debide (3 l/dk, 4 l/dk, 6 l/dk ve 12 l/dk) olmak üzere paralel akış şartları için ayrı ayrı deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ile Reynolds sayısındaki değişim, Nusselt sayısındaki değişim, ısı transfer hızındaki değişim ve ısı etkinliği değerleri hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Deneysel Sistem

Deney seti İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarına kurulmuş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney için grafit nano partikülleri saf su içerisine hacimce %0,25 oranında eklenerek Reynolds sayısı, Nusselt sayısı, ısı transfer hızı ve ısı etkinliği incelenmiştir. Deney setinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Deney seti çift borulu ısı değiştirici, sirkülasyon pompası, ısıtıcı depo, debi ölçer ve sıcaklık kontrol cihazlarından oluşmaktadır. Akışkan Debinin sabit

tutulması için sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Kullanılan pompanın debisi 3 l/dk'dır. Isıtma sisteminin sabit ısı şartlarına göre ayarlanabilmesi için elektrikli ayarlı rezistans kullanılmıştır. Soğuk akışkanın debisini kontrol edebilmek ve bu akışı doğrulamak için debi ölçer ve ayarlı vandan faydalanılmıştır. Deney setinde sistemdeki akışkanların sıcaklıklarını kontrol altına tutmak ve doğru veri almak için sıcak ve soğuk akışkan giriş ve çıkışlarına birer adet olmak üzere toplam 4 adet Tekon marka K tipi termokupl eklenmiştir. Bu termokupllardan alınan veriler Elimko marka E-58 modelindeki sıcaklık kontrol cihazı ile kaydedilmiştir.



Şekil 1. Deney setinin şematik gösterimi

Deney setinin farklı açılardan fotoğrafı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Deney setinin farklı açılardan görünümü

2.2. Nano Partikül, Saf Suyun Özellikleri ve Nanoakışkanın Hazırlanması

Yapılan deneyde grafit nano partikülleri ve saf su ile oluşturulan nanoakışkan kullanılmıştır. Grafit ve saf suya ait teknik ve termodinamik özellikler Çizelge 1’de gösterilmiştir. Ultrasonifikatör ve homojenizatör kullanılarak hacimce %0,25 konsantrasyonda nanoakışkan oluşturmak için 8 litre saf suya 46 gr grafit parçacıkları eklenmiştir. Ultrasonifikatör cihazı ultrasonik titreşimler sağlayarak nanoakışkanda nano partiküllerin çökmesini engellemek için kullanılmıştır. Nanoakışkanın kararlı hale gelebilmesi için 5 saat süresince kullanılan Hiel Sher Up 400 ST ultrasonifikatör cihazı 400 watt güce ve 63 Hz’lik frekansa sahiptir. Nanoakışkan İnönü Üniversitesi Gıda Mühendisliği Laboratuvarında hazırlanmıştır. Nanoakışkanların hazırlanma sürecine ait homojenizatör ve ultrasonifikatör cihazlarının görünümü Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Homojenizatör ve ultrasonifikatör

Çizelge 1. Grafit ve saf suyun termodinamik özellikleri

	Grafit	Saf Su
ρ (kg/m ³)	2300	992
C_p (J/kgK)	711	4182
k (W/mk)	168	0,618
μ (mPa.s)	-	0,62

2.3. Teorik Analiz

2.3.1. Hesaplama Yöntemi

-Kesit alanı (m²)

$$A = \frac{\pi \cdot d_{ic}^2}{4} \quad (2.1)$$

-Yüzey alanı (m²)

$$A_{yüzey} = \pi \cdot d_{ic} \cdot L \quad (2.2)$$

-Sıcak suyun hızı (m/sn)

$$v_h = \frac{\dot{m}_n}{\rho \cdot A} \quad (2.3)$$

-Sıcak akışkanın birim zamanda verdiği ısı (W)

$$\dot{Q}_h = \dot{m} \cdot c_{p,h} \cdot (T_{h_1} - T_{h_2}) \quad (2.4)$$

Burada nanoakışkanın özgül ısısı (Cp) Xuan ve Roetzel modeli kullanılarak hesaplanmaktadır [7].

$$c_{p,nf} = \frac{\phi \cdot (\rho_n \cdot c_{p,n}) + (1-\phi) \cdot (\rho_f \cdot c_{p,f})}{\rho_{nf}} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'deki yoğunluk, saf su için soğuk su tablolarından okunmaktadır, nanoakışkan yoğunluğu ise Pak ve Choi modeli ile 2.6 nolu denklem ile tahmin edilmektedir [8]. Burada ρ yoğunluğu, n nano partikülleri, f temel sıvıyı ve nf nano sıvıyı temsil etmektedir. ϕ ise nano partikülün hacimsel oranını simgelemektedir.

$$\rho_{nf} = \phi \cdot \rho_n + (1 - \phi) \cdot \rho_f \quad (2.6)$$

-Ortalama logaritmik sıcaklık farkı (K)

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{h_1} - T_{y_1}) - (T_{h_2} - T_{y_2})}{\ln \left(\frac{T_{h_1} - T_{y_1}}{T_{h_2} - T_{y_2}} \right)} \quad (2.7)$$

-Isı Taşınım Katsayısı (W/m²K)

$$Q_h = U \cdot A_s \cdot \Delta T_{log} \quad (2.8)$$

$$UA = \frac{1}{\frac{1}{h_i \cdot A} + \frac{1}{k \cdot A} + \frac{1}{h_o \cdot A}} \quad (2.9)$$

Boru et kalınlığı çok düşük olduğu için ihmal edilirse;

$$U = h_i \quad (2.10)$$

Elde edilir ve

$$Q_h = h \cdot A_y \cdot \Delta_{log} \quad (W) \quad (2.11)$$

Buradan;

$$h = \frac{Q_h}{A_y \cdot \Delta T_{log}} \quad (2.12)$$

-Nusselt Sayısı

$$d_{es} = d_{iç} \quad (2.13)$$

$$Nu = \frac{h \cdot d_{es}}{k} \quad (2.14)$$

Nusselt sayısı hesabında ısı iletkenlik saf su için yine tablolardan okunmuştur. Nanoakışkan için ise Maxwell-Garnet modeli ile denklem 2.12 kullanılarak hesaplanmıştır [9].

$$k_{nf} = k_f \cdot \frac{k_n + 2k_f - 2\phi(k_f - k_n)}{k_n + 2k_f + \phi(k_f - k_n)} \quad (2.15)$$

Burada geçen ϕ nano partiküllerin hacimsel oranını vermektedir ve denklem 2.16 ile hesaplanmaktadır. m_n ve m_f partiküllerin ve kullanılan temel sıvının kütesidir.

$$\phi = \frac{\frac{m_n}{\rho_n}}{\frac{m_n}{\rho_1} + \frac{m_f}{\rho_f}} \quad (2.16)$$

-Reynolds Sayısı

$$Re = \frac{\rho \cdot V_h \cdot d_{e_s}}{\mu_h} \quad (2.17)$$

-Etkinlik Değeri [10]

$$\varepsilon = \frac{Q_{gerçek}}{Q_{max}} \quad (2.18)$$

$$Q_{gerçek} = \dot{m}_h \cdot c_{P_h} \cdot (T_{h_2} - T_{h_1}) \quad (2.19)$$

$$Q_{max} = \dot{m}_c \cdot c_{P_c} \cdot (T_{h_1} - T_{c_1}) \quad (2.20)$$

-İyileştirme Oranı

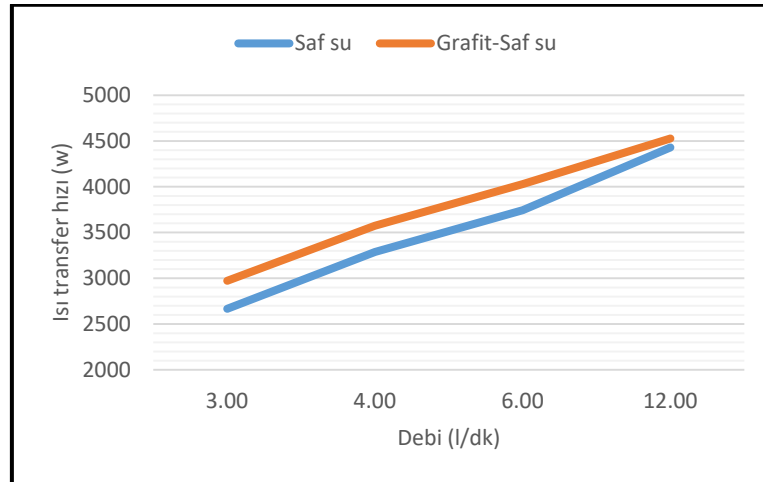
$$\frac{\varepsilon_{grafit} - \varepsilon_{su}}{\varepsilon_{su}} \quad (2.21)$$

ile hesaplanmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

Yapılan bu çalışmada paralel akış şartlarında ısı verimlilik gözlemlenmiştir. Deney setinde paralel akış şartlarında sıcak akışkan (saf su ve nanoakışkan) sabit sıcaklıkta ve debide, soğuk akışkan (saf su) 3,4,6 ve 12 l/dk hacimsel debide iken ısı transfer değişimi incelenmiştir.

Deney akışkanı olarak grafit-saf su nanoakışkanı kullanımının ısı verimliliği artırdığı gözlemlenmiştir. Paralel akışta bu iki sıvının ısı transfer hızının karşılaştırılması Şekil 4’de verilmiştir.

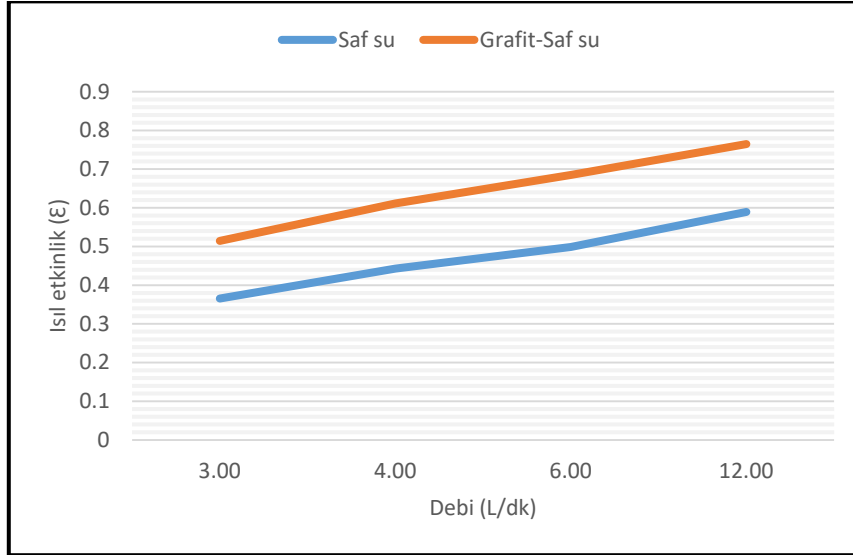


Şekil 4. Isı transfer hızının debideki değişimi

Temel sıvıya katılan nano partiküller ısı transfer hızını olumlu yönde etkilemektedirler [11-12]. Grafit-saf su nanoakışkanı, saf suya göre 3 l/dk debide %11,51, 4 l/dk debide %8,69, 6 l/dk debide

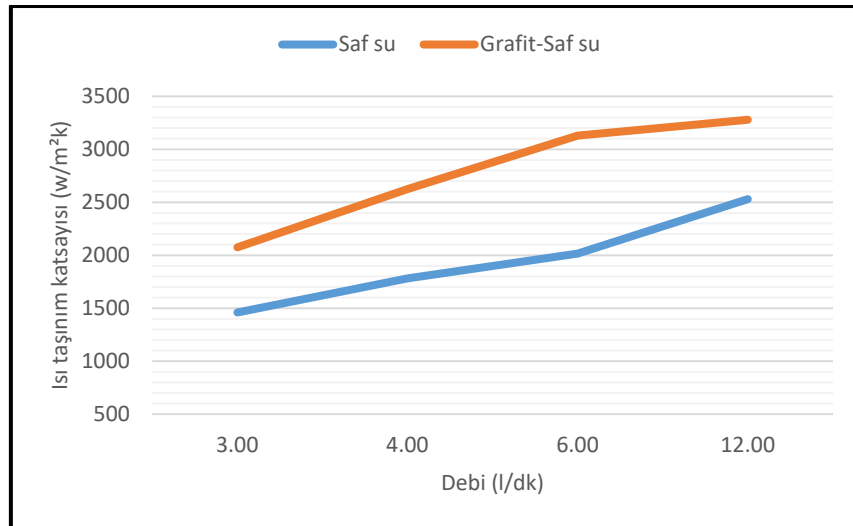
%7,62 ve 12 l/dk debide %2.21 daha yüksek ısı transfer hızına sahiptir. Isı transfer hızında artış farkı, düşük debilerde daha belirgindir.

Akışkanların ısıl etkinliği denklem 2.18 ile hesaplanmış olup nanoakışkanın ısıl etkinliğe olan etkisi gözlemlenmiştir. Akışkanlar arasındaki ısıl etkinlik farkı Şekil 5’de gösterilmektedir. Isıl etkinlik katsayısında 3 l/dk debide %40,83, 4 l/dk debide %38, 6 l/dk debide %37,3 ve 12 l/dk debide %29,71 oranında grafit- saf su nanoakışkanının kullanımının daha iyi olduğu görülmüştür.



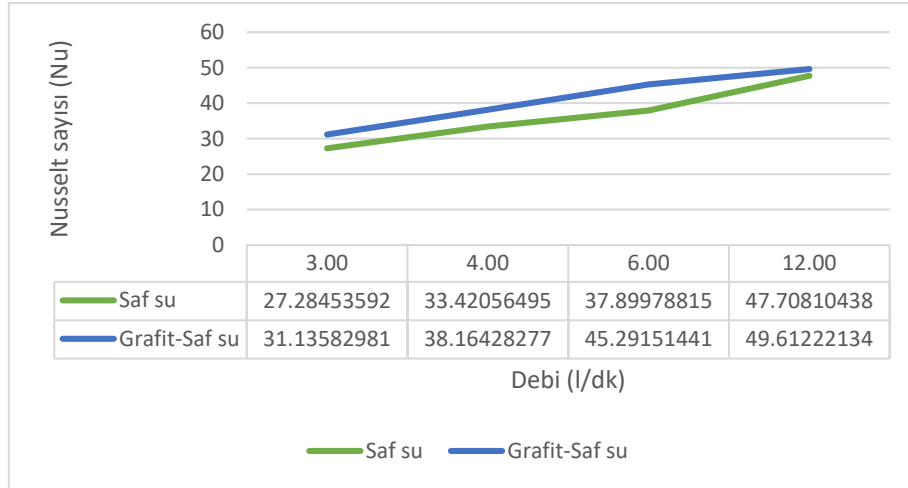
Şekil 5. Isıl etkinlik farkı

Grafit nano partiküllerin termofiziksel özellikleri nedeniyle, akışkana süspansiyon edildiğinde yüzey alanını arttırdığından ısı transfer hızını etkilemesi beklenmektedir. Şekil 6’da deney akışkanı olarak kullanılan grafit-saf su nanoakışkanı ve saf su arasındaki ısı taşınım farkı görülmektedir.



Şekil 6. Isı taşınım katsayısının değişimi

Isı taşınım katsayısının ısı iletim katsayısına oranı olan Nusselt sayısı denklem 2.14 ile hesaplanabilir. Yapılan çalışmada Nusselt sayısının debiye göre değişimi gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir. Grafit-saf su nanoakışkanının kullanıldığı deneyde saf su ile yapılan deneylere göre Nusselt sayısındaki artışlar 3 ve 4 l/dk debilerde %14,1, 6 l/dk debide %19,7 ve 12 l/dk debide %3,99 oranında olmuştur.



Şekil 7. Nusselt sayısındaki değişim

4. Sonuç

Yapılan deneyde içinde sıcak akışkan olarak saf su bulunan çift boru tipli ısı değiştiricinin içeriğini değiştirip suya grafit nano partiküllerinin süspansedilmesi ile ısı transferinin, etkinlik katsayısının ve iyileştirme oranlarının farklı debilerde etkileri incelenmiştir.

Çalışmada grafit/saf su bazlı nanoakışkan kullanılarak, ısı transfer hızı, toplam ısı transferi ve Nusselt sayısı gibi termal performans değerlerinde saf suya göre iyileştirmeler yapılmıştır. Deneyde elde edilen verilere göre sıcak akışkana nano partikül olarak grafit eklenmesi ısı transferini artırmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla benzerlik göstermiştir.

Grafit-saf su nanoakışkanının kullanıldığı deneyde ısı performansın saf su ile yapılan deneye göre daha iyi olduğu görülmüştür. Aynı zamanda Nusselt sayısının daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Grafit-saf su nanoakışkanının ısı transfer katsayısının suya göre yüksek olması deney sonuçlarında belirgin olarak görülmüştür. Grafit-saf su nanoakışkanının saf suya göre ısı taşınım katsayısının daha iyi olduğu deneysel çalışma ile de sağlanmıştır. Grafit- saf su nanoakışkanı ve saf su arasındaki ısı performans farkı ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmada iyileştirme oranı sonuçları % cinsinden Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Grafit saf su nanoakışkanı ile saf su arasındaki iyileştirme oranı

Debi (l/dk)	İyileştirme oranı (%)
3	13,23
4	10,96
6	12,17
12	4,35

Sonuç olarak bu çalışmada grafit/saf su bazlı nanoakışkan kullanılarak, ısı transfer hızı, toplam ısı transferi ve Nusselt sayısı gibi termal performans değerlerinde saf suya göre iyileştirmeler yapılmıştır. Bu çalışmada paralel akış şartlarında alınan sonuçlar farklı tipteki literatür çalışmaları ile uyum sağlamıştır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan farklı tip bir ısı değiştiricisi ile elde edilen sonuçların literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Nanoakışkanları oluşturan nanoparçacıkların türbülanslı bir akışta ısı verimliliği yüksek miktarda artırması oldukça önemlidir. Nanoakışkanların ısı değiştiricilerinde kullanılmasının verimliliğe etkisini tespit edebilmek için daha çok çalışma yapılmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Xuan Y., Li Q. Heat transfer enhancement fo nanofluids, *Int J Heat Fluid Flow* 2000, 21, 58-64.
- [2] Chein R., Chuang J. Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 2007, 46(1) 57-66.
- [3] Sundar S., Singh M., Antonio CMS. Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT–Fe₃O₄/water hybrid nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2014, 52, 73–83.
- [4] Khedkar RS., Sonawane SS., Wasewar KL. Heat transfer study on concentric tube heat exchanger TiO₂–water-based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2014, 57, 163-169.
- [5] Noghrehabadi A., Rashid P. Experimental investigation of forced convective heat transfer enhancement of γ -Al₂O₃/water nanofluid in a tube. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2016, 30 (2), 943-952.
- [6] Kılınç F., Buyruk E., Karabulut K. Araç radyatörünün ısı transferi performansının su tabanlı nanoakışkanlar kullanılarak deneysel olarak araştırılması. *Tesisat Mühendisliği* 2019, 27, 37-46.
- [7] Xuan Y., Roetzel, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2000, 43(19), 3701-3707.
- [8] Pak B.C., Choi Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submiron metallic oxide particle. *Experimental Heat Transfer and Internation Journal* 1998, 11 (2), 151-170.
- [9] Mawell J.C., Garnett J.C. Colours in metal glasses and in metallic films. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engeneering Sciences* 1904, 203, 385-420.
- [10] Selbaş R., Sencan AM., Kılıç, B. Alternative approach in thermal analysis of plate heat exchanger. *Heat and Mass Transfer* 2009, 45, 323-329.
- [11] Koca T. The effect of using Al₂O₃/water-based nanofluid on heat transfer in heat exchangers with rotating straight inner tube. *Heat Transfer Research* 2021, 52(2), 29-43.
- [12] Akçay S. İçerisinde bölmeler bulunan zigzag bir kanalda nanoakışkanların termo-hidrolik performansının incelenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2021, 8(15), 525-535.