

Atf İçin: Ünverdi, M., Küçük, H. ve Yılmaz, M.S. (2023). Nanoakışkanların Isıl Sistemlerde Enerji Verimliliğine Etkisi: Deneysel Verilerin Isıl ve Hidrodinamik Performans Ölçütleri ile Değerlendirilmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 2892-2904.

To Cite: Ünverdi, M., Küçük, H. & Yılmaz, M.S. (2023). The Effect of Nanofluids on Energy Efficiency in Thermal Systems: The Evaluation of the Experimental Data with Thermal and Hydrodynamic Performance Criteria. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(4), 2892-2904.

Nanoakışkanların Isıl Sistemlerde Enerji Verimliliğine Etkisi: Deneysel Verilerin Isıl ve Hidrodinamik Performans Ölçütleri ile Değerlendirilmesi

Murat ÜNVERDİ^{1*}, Hasan KÜÇÜK², M. Senan YILMAZ³

Öne Çıkanlar:

- Nanoakışkanların ısı değiştiricilerdeki deneysel verileriyle PDÖ ve VDÖ hesaplanmıştır.
- Geleneksel aracı akışkanların ve nanoakışkanların enerji verimliliği karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler:

- Isı değiştirici
- Nanoakışkan
- Isı geçişi
- Pompalama gücü
- Performans ölçütü
- Enerji verimliliği

ÖZET:

Sürekli artan enerji maliyetleri nedeniyle, endüstriyel uygulamalarda, ısı değiştiricilerin enerji verimliliği önem kazanmıştır. Bu nedenle, günümüze kadar ısı geçişini iyileştirmek ve süreci hızlandırmak (süreyi kısaltmak), ısı değiştiricilerin boyutunu küçültmek ve enerji (yakıt) verimliliğini artırmak amacıyla çeşitli yöntemler denenmiştir. Son yıllarda, geleneksel aracı sıvıların yerine, bu sıvılara nanometre büyüklüğündeki (en az bir boyutta 100 nm’den küçük) parçacıkların eklenmesiyle elde edilen, nanoakışkan süspansiyonlarının, enerji verimliliğini iyileştirmede kullanılması önerilmektedir. Bu çalışmada nanoakışkanların ısı değiştiricilerde aktarılan ısı güce ve gerekli pompalama gücüne etkileri, kaynaklardaki deneysel araştırmaların sonuçları kullanılarak incelenmiştir. Aktarılan ısı gücü ve pompalama gücü arasındaki ilişki, iki farklı değerlendirme ölçütü (Performans Değerlendirme Ölçütü-PDÖ ve Verimlilik Değerlendirme Ölçütü-VDÖ) ile tanımlanmıştır. Böylece, ısı sistemlerde kullanılan geleneksel aracı sıvıların yerine önerilen nanoakışkanların, enerji verimliliğine (enerji tüketimine) etkileri daha gerçekçi bir bakış açısıyla irdelenmiştir. Yapılan değerlendirmelerle, endüstriyel uygulamalarda nanoakışkan kullanmanın, enerji bütçesi bakımından, geleneksel aracı sıvılara göre dezavantajlı olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla nanoakışkanların, bu dezavantajlarının önemsiz olduğu özel uygulamalarda kullanılabileceği sonucu elde edilmiştir.

The Effect of Nanofluids on Energy Efficiency in Thermal Systems: The Evaluation of the Experimental Data with Thermal and Hydrodynamic Performance Criteria

Highlights:

- PEC and EEC were calculated with the experimental data of nanofluids in heat exchangers.
- The energy efficiency of conventional working fluids and nanofluids has been compared.

Keywords:

- Heat exchanger
- Nanofluid
- Heat transfer
- Pumping power
- Performance criteria
- Energy efficiency

ABSTRACT:

The energy efficiency of heat exchangers has become crucial in industrial applications due to ever-increasing energy costs. Therefore, various methods have been developed to enhance heat transfer and accelerate the process (shortening the time), reduce the size of heat exchangers, and increase energy (fuel) efficiency. In recent years, researchers have recommended nanofluid suspensions in place of common heat transfer fluids to improve energy efficiency. Nanofluid suspensions are obtained by adding nanometer-sized particles (less than 100 nm in at least one dimension) to heat transfer fluids. This study focused on experimental data in the literature to investigate the effects of nanofluids on transferred thermal power and required pumping power in heat exchangers. The relationship between the transferred thermal power and the pumping power was defined by two different performance criteria (Performance Evaluation Criterion-PEC and Energy Efficiency Criterion-EEC), allowing us to scrutinize the effects of nanofluids in thermal systems on energy efficiency (energy consumption) from a more realistic perspective. The results show that nanofluids are more disadvantageous than conventional heat transfer fluids in terms of the energy budget in industrial applications. It is concluded that nanofluids can be used in special applications where those disadvantages are insignificant.

¹ Murat ÜNVERDİ (Orcid ID: 0000-0002-7045-509X), Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Aydın, Türkiye

² Hasan KÜÇÜK (Orcid ID: 0000-0002-8825-7315), Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

³ M. Senan YILMAZ (Orcid ID: 0000-0001-5644-6675), Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Gerede Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bolu, Türkiye

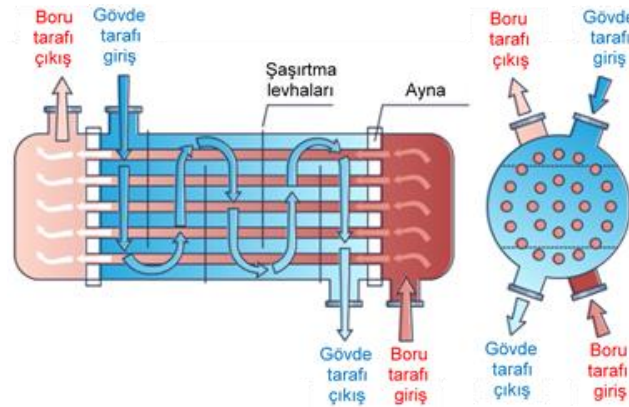
*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Murat ÜNVERDİ, e-mail: munverdi@adu.edu.tr

GİRİŞ

Isı enerjisi ve ısı sistemler, endüstriyel tesislerde yaygın kullanılmaktadır. Gövde borulu ve levhalı ısı değiştiriciler, bu sistemlerde karşılaşılan cihazların en yaygın örneklerindedir. Isı değiştiricilerin ana işlevi; farklı ısı kaynaklarından sağlanan ancak doğrudan kullanılması mümkün olmayan ısı enerjisinin, daha düşük sıcaklıkta ve kullanım şekline/yerine uygun bir aracı akışkana aktararak, istenilen sıcaklık ve/veya yoğunlukta (ısı akısında) kullanılmasını sağlamaktır. Dolayısıyla ısı değiştiriciler, güç üretim tesislerinde, gıda endüstrisinde, petrol ve kimya endüstrilerinde, atık ısının geri kazanılmasında, soğutma ve ısıtmanın yapıldığı uygulamaların tamamında yaygın kullanılmaktadır (Genceli, 1999; Kakaç ve ark., 2012).

Gövde borulu ısı değiştiriciler, bir gövde (kovan) ve içerisine yerleştirilen, farklı düzenlemelerle (kare, üçgen gibi) bir araya getirilen çok sayıda borudan oluşan, boru demetinden ibarettir (Şekil 1). Gövde ile boru demetinin bağlantısı, üzerinde boruların giriş-çıkış deliklerinin bulunduğu, aynalarla sağlanır. Boru demetindeki borular, aynı zamanda gövde tarafındaki (boruların dış tarafındaki) akışı yönlendiren, akışın ortalama hızını ve türbülans yoğunluğunu dolayısıyla ısı geçişini arttıran, farklı sayıdaki şaşırtma levhaları (perde) ile desteklenir. Boru demetindeki boruların sayısı ve uzunlukları ise istenen ısı güce ve varsa ısı değiştiricinin boyutlarıyla ilgili diğer kısıtlara (imalat, nakliye ve kullanım yeri gibi) göre değişebilir. Sıcak ve soğuk akışanlar; uygulamanın türüne, akışkanların basınçlarına ve debilerine, izin verilen basınç kayıplarına, aracı akışkanların faz değiştirip değiştirmemelerine ve kirlilik durumlarına (periyodik bakım ve temizlik ihtiyacı) göre, gövde veya boru tarafından geçirilebilir (Serth, 2014; Klaren Tech., 2022).

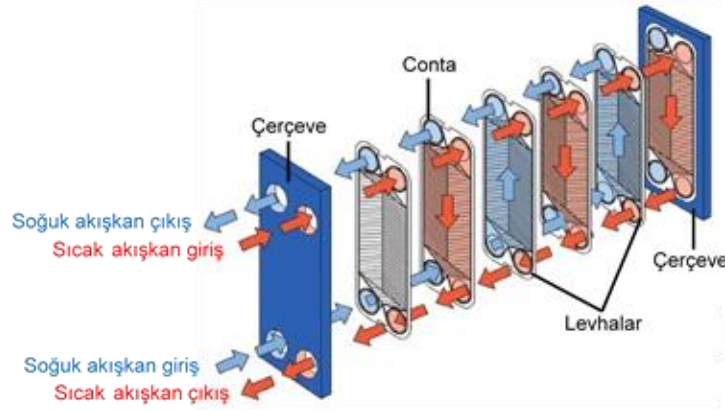
Levhalı ısı değiştiriciler, genellikle art arda dizilen ve her köşesinde bağlantı (akışkan giriş-çıkış) delikleri bulunan, dalga yüzeyli ince metal levhalardan oluşur (Şekil 2). Metal levhaların kenarları, sızdırmazlığı sağlamak amacıyla araya yerleştirilen contalarla çevrilidir ya da küçük boyutlarda ve kapasitelerde lehimle kapatılır. Metal levhalar, her iki taraftaki sabit çerçevelerin arasına dizilip, kılavuz çubuklarıyla sıkıştırılarak sabitlenmektedir. Böylece sıcak ve soğuk akışkanların akış kanalları yan yana (ardışık) dizilmiştir. Başka bir ifadeyle, metal levhaların her birinin bir tarafından sıcak ve diğer tarafından ise soğuk akışkan akmaktadır. Levhaların boyutları ve birbiri ardına dizilen levhaların sayısı, aktarılabilecek ısı güce göre seçilir. Levhaların dalga yüzeyli olması, her iki taraftaki akışın türbülans şiddetini/yoğunluğunu artırır ve akış yollarını uzatır dolayısıyla ısı taşınım katsayısını artırır ve ısı geçişini iyileştirir (Genceli, 1999; Hesselgreaves ve ark., 2016; Alfa Laval, 2022).



Şekil 1. Gövde borulu ısı değiştirici (Klaren Tech., 2022)

Taşınım ile ısı geçişi olan tüm ısı sistemlerin ve ısı değiştiricilerin performansını etkileyebilecek en önemli değişkenler, ısı geçişi yüzeyinin yapısal ve geometrik özellikleri (akışın türü ve özellikleri) ile aracı akışkanların termodinamik özellikleridir. Taşınım ile ısı geçişini iyileştirmek amacıyla günümüze

kadar birçok yöntem denenmiştir ve bunlardan bazıları da farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden, aktif olarak nitelendirilenler (elektromanyetik etkiler, yüzeyin ve/veya akışkanın titreştirilmesi gibi) dış güç gerektirirken, pasif yöntemler (genişletilmiş yüzeyler, artırılmış yüzey pürüzlülüğü ve aracı akışkanlar için katı katkı maddeleri gibi) ise dış güç gerektirmezler (Webb ve Kim, 2005).



Şekil 2. Levhalı ısı değiştirici (Alfa Laval, 2022)

Son yıllarda, pasif iyileştirme yöntemlerinden olan nanoakışkanların (aracı akışkan ve nano boyuttaki tozların-katı parçacıkların karışımından oluşan kolloid çözelti) taşınımı ısı geçişine etkilerinin incelendiği araştırmalar, artarak devam etmektedir (Şekil 3). Bazı dezavantajlarına (katı partiküllerin kümelenmesi, çökmeleri, uzun süre stabil/kararlı kalamamaları gibi) rağmen su, etilen glikol, yağ gibi aracı akışkanlara, farklı konsantrasyonlardaki nano boyutlu tozların-katı parçacıkların eklenmesiyle hazırlanan nanoakışkanlarla, geleneksel aracı akışkanın termofiziksel özellikleri (yoğunluk, ısı iletim katsayısı, özgül ısı ve viskozite gibi) değiştirilmektedir. Başka bir ifadeyle, termofiziksel özellikleri değiştirilmiş aracı akışkanlar olan nanoakışkanlardan, ısı sistemlerde ve ısı değiştiricilerde taşınımı ısı geçişinin iyileştirilmesi beklenmektedir (Zhang, 2013; Bianco ve ark., 2015).



Şekil 3. Nanoakışkanların hazırlanması (Yang ve ark., 2022)

Isı enerjisinin dönüştürüldüğü sistemlerde, birçok araştırmacının üzerinde çalıştığı en önemli konularından biri de yüksek verimli ısı geçişidir. Aracı akışkanlar arasındaki ısıl potansiyel (sıcaklık) farkının ne kadar iyi kullanılabilirdiği, etkin (verimli) ısı geçişi ile tanımlanır. Ancak, akış kaynaklı basınç kayıplarını yenmek amacıyla harcanan pompalama gücünün büyüklüğü de taşınımı ısı geçişinde enerjinin ne kadar verimli kullanıldığını gösterir ve mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, termofiziksel özellikleri değiştirilmiş aracı akışkanlar olan nanoakışkanların, taşınımı ısı geçişinin etkinliği bakımından sağlayacağı faydalarla birlikte, sistemin hidrodinamik performansına muhtemel olumsuz etkileri de kesinlikle değerlendirilmelidir. Başka bir ifadeyle, nanoakışkanların, endüstriyel

tesislerin işletme maliyetleri bakımından son derece önemli olan ısı sistemlerinin enerji verimliliğine etkileri, en doğru şekilde aktarılan ısı güç ve harcanan pompalama güçleri birlikte ele alınarak değerlendirilebilir. Bu nedenle nanoakışkanlarla ilgili kaynaklar arasından, çalışmamızın amacına uygun olarak, ısı güç ve pompalama gücü sonuçlarının birlikte yayımlandığı, ısı değiştiricilerle yapılan dört farklı deneysel çalışma seçilmiştir. Aşağıda kısaca özetlenen bu çalışmalardan ikisinde gövde borulu ısı değiştiriciler, diğer ikisinde ise levhalı ısı değiştiriciler kullanılmıştır.

Araştırmacılar, 28 borusu (6.25 mm dış çaplı, cidar/çeper kalınlığı 0.508 mm ve uzunluğu 354 mm) olan gövde borulu ısı değiştiricide, SiC-su (ortalama çapı 50 nm olan SiC) nanoakışkanlarının (hacimce %0.25, %0.5, %0.75 ve %1 konsantrasyonlu) ısı geçişi ve basınç düşümü performanslarını deneysel incelemiştir. Nanoakışkanların hazırlanmasında; çözeltilere yüzey aktif maddesi ($\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$) ekleyerek, mekanik karıştırma ve yüksek frekanslı titreşim uygulamışlardır. Araştırmacılar, gövde tarafı debisini 180 l/sa.'de sabit tutup, boru tarafındaki nanoakışkan debisini beş farklı (100, 150, 200, 250 ve 300 l/sa.) değere ayarladıkları deneylerde, basınç düşümlerini de ölçmüşlerdir. Tüm nanoakışkanlara aktarılan ısı güçlerinin ve akış kaynaklı basınç düşümlerinin suya göre arttığını ve %1 hacimsel konsantrasyonda en yüksek sonuçların elde edildiğini bildirmişlerdir (Karimi ve ark., 2020).

Araştırmacılar, Kern yöntemi ile tasarlayıp, 2 mm iç çaplı ve 240 mm uzunluğundaki 13 bakır boru ile ürettikleri mini kanallı gövde borulu ısı değiştiricide, Al_2O_3 -su (ortalama çapı 40 nm olan Al_2O_3) nanoakışkanlarının (hacimce %0.2, %0.4 ve %0.8 konsantrasyonlu) ısı geçişi ve basınç düşümü performanslarını deneysel incelemiştir. Nanoakışkanların hazırlanmasında, kimyasal katkı maddesinin kullanılmadığını ve yüksek frekanslı titreşim uygulandığını bildirmişlerdir. Çalışmada, gövde tarafı debisini 180 l/sa.'de ve giriş sıcaklığını 40°C 'de sabit tuttuklarını, boru tarafındaki nanoakışkanların debisini ise 125-600 l/sa. aralığında 16 farklı değere ayarladıklarını ve giriş sıcaklığını 20°C 'de sabit tuttuklarını ifade etmişlerdir. Nanoakışkanların geçirildiği boru tarafındaki basınç düşümünün de ölçüldüğü çalışmada; en yüksek ısı taşınım katsayısının elde edildiği nanoakışkan hacimsel konsantrasyonunun %0.4 ve nanoakışkanların enerji kullanım performanslarının da suya yakın hatta suyun altında olduğunu bildirmişlerdir (Yılmaz ve ark., 2022).

Araştırmacılar, levha sayıları farklı (8, 12 ve 16 levhalı), dalga yüzeyli (60° balıksırtı açılı) levhalı ısı değiştiricilerle; tek bileşenli Al_2O_3 -su (77 nm Al_2O_3) ve CuO-su (78 nm CuO) nanoakışkanları ile Al_2O_3 +CuO-su hibrit nanoakışkanın taşınımıyla ısı geçişi ve basınç düşümü performanslarını deneysel incelemiştir. Tek bileşenli ve hibrit nanoakışkanların her ikisini de ağırlıkça %1 konsantrasyonda hazırlamışlardır. Kararlı nanoakışkanların hazırlanmasında; nanopartiküllerin çökmesini ve kümelenmesini engellemek amacıyla, yüzey aktif maddesi (Triton X-100) kullanmışlar ve yüksek frekanslı titreşim (ultrasonikasyon) uygulamışlardır. Araştırmacılar deneyleri, 3-7 l/dk. aralığında beş farklı hacimsel debide gerçekleştirmişlerdir. Deneysel basınç düşümünün ölçülmediği çalışmada araştırmacılar, ısı değiştiricilerde gerekli ortalama pompalama güçlerini, Pandey ve Nema'nın (Pandey ve Nema, 2012) önerdiği deneysel sürtünme faktörü bağıntısından yararlanarak hesaplamışlardır. Nanoakışkanlarla yapılan deneyler, suyla yapılan deneylerle karşılaştırıldığında; ısı değiştiricilerin ısı güçlerinin Reynolds sayısı ile arttığını ve hibrit Al_2O_3 +CuO-su nanoakışkanıyla diğer tek bileşenli nanoakışkanlara göre daha yüksek ısı güçlerinin aktarılabilirliğini ve nanoakışkanlar için gerekli ortalama pompalama güçlerinin suya göre daha büyük olduğunu elde etmişlerdir (Gürbüz ve ark., 2020).

Araştırmacılar, altı levhalı (balıksırtı açısı 30°), ortalama kanal yüksekliği 2.8 mm ve ısı geçiş alanı 0.3 m^2 olan levhalı ısı değiştiricide, Ni-su (72 nm Ni) nanoakışkanlarının (hacimce %0.1, %0.3 ve %0.6 konsantrasyonlarda) taşınımıyla ısı geçişi ve basınç düşümü performanslarını deneysel incelemiştir.

Kararlı nanoakışkanların hazırlanmasında; karışımın pH ölçümü, mekanik karıştırma ve yüzey aktif maddesi ekleme yöntemlerinin kullanıldığını bildirmişlerdir. Basınç düşümlerinin de ölçüldüğü araştırmada, nanoakışkanların performanslarını; sıcak taraf debisini ve giriş sıcaklığını sırasıyla 3 l/dk.'da ve 80°C'de sabit tutarak, soğuk taraftaki debiyi ise beş farklı değere (3, 4, 5, 6 ve 7 l/dk.) ayarlayarak ve giriş sıcaklığını 30°C'de sabit tutarak incelemişlerdir. Tüm nanoakışkanların ısı güçlerinin ve pompalama güçlerinin suya göre daha yüksek belirlendiği çalışmada, %0.6 hacimsel konsantrasyonda en yüksek değerlerin elde edildiği bildirilmiştir. Araştırmacılar, nanoakışkanlarla aktarılan ısı güçlerinin ve pompalama güçlerinin, artan konsantrasyon ve debiyle yükseldiğini, nanoakışkanların enerjii etkin kullanma performansının suya yakın hatta suyun altında olduğunu elde etmişlerdir (Saleh ve Sundar, 2021).

Bu çalışmanın günümüz endüstri ve mühendislik uygulamalarına katkısı, nanoakışkanların kullanıldığı ısı sistemlerin enerji performansına etkilerinin, ısı güç ve pompalama gücü birlikte dikkate alınarak araştırılmasıdır. Isıl sistemlerde nanoakışkanların kullanıldığı kaynaklar hızlı bir şekilde gözden geçirilirse, deneysel performans araştırmalarında genellikle; ısı taşınım katsayısı-toplam ısı geçiş katsayısı ve/veya basınç düşümü-sürtünme faktörüne bağlı değerlendirmelerin yapıldığı görülecektir. Ancak deneysel performans araştırmalarında, ısı güçleri ve pompalama güçleri arasındaki ilişkiye dayanan değerlendirmeler ya hiç yapılmamıştır ya da nadiren yapılmıştır. Diğer bir deyişle çalışmamızda, nanoakışkanların geleneksel aracı akışkanlara göre ısı güçte sağladığı iyileşmenin yanında, akışın sürdürülmesinde gerekli pompalama gücünü artırıcı etkileri birlikte değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, çalışmamızın amacına uygun kaynaklar arasından; farklı araştırmacıların, farklı ısı ve hidrodinamik koşullarda ve farklı nanoakışkanlarla gerçekleştirdiği, ısı güçlerinin, pompalama güçlerinin, gerekli diğer verilerin sunulduğu ve en güncel (son üç yılda yayımlanan) deneysel çalışmalar seçilmiştir. Seçilen deneysel çalışmaların ısı güç ve pompalama gücü verileri kullanılarak, nanoakışkanların geleneksel aracı akışkanlara göre enerji verimliliği bakımından genel bir değerlendirilmesi, performans değerlendirme ölçütleriyle yapılmıştır. Bir başka ifadeyle nanoakışkanların ısı sistemlerdeki performansı; seçilen deneysel çalışmalarda yayımlanan sonuçlar, çoğunlukla tercih edilen klasik yaklaşımlardan farklı olarak, endüstriyel mühendislik uygulamaları bakımından daha evrensel ve temel yaklaşımlarla incelenmiştir.

Bu çalışmada, kaynaklar arasından seçilen, gövde borulu ve levhalı ısı değiştiricilerle yapılan, deneysel araştırmalarda elde edilen ısı güç ve pompalama gücü sonuçları kullanılarak, nanoakışkanların ısı sistemlerin enerji verimliliğine etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede, ısı güç ve pompalama gücü ilişkisinin iki farklı tanımlamayla karşılaştırıldığı; performans değerlendirme ölçütü-PDÖ ve verimlilik değerlendirme ölçütü-VDÖ kullanılmıştır. Başka bir ifadeyle, nanoakışkanların ısı sistemlerin enerji verimliliğine olumlu/olumsuz etkileri, ısı gücün ve pompalama gücünün birlikte dikkate alındığı, iki farklı ısı-hidrodinamik performans ölçütüyle irdelenerek araştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Çalışmamızın bu bölümünde, nanoakışkanların kullanıldığı ısı sistemlerin, enerji verimliliğine dayalı performans değerlendirme ölçütlerinden bahsedilmiştir.

Enerji Verimliliği Ölçütleri

Isıl sistemlerde; aracı akışkanlarla aktarılan ısı güç ve gerekli pompalama gücünün birlikte ele alındığı, başka bir ifadeyle; sistemin yapısal özellikleri, aracı akışkanın termofiziksel özellikleri ve akışın hidrodinamik yapısının genel enerji verimliliğine etkilerinin bir arada değerlendirilmesinde evrensel bir yaklaşım olan ve aşağıda tanım eşitlikleri verilen PDÖ ve VDÖ kullanılmıştır.

Performans değerlendirme ölçütü (Ferrouillat ve ark., 2011):

$$PDÖ = \dot{Q}/\dot{W}_{pp} \quad (1)$$

Burada, PDÖ; performans değerlendirme ölçütüne, $\dot{Q}(W)$; akışkana aktarılan ısı güce ve $\dot{W}_{pp}(W)$; akış için gerekli pompalama gücüne karşılık gelmektedir. Isıl güç ve pompalama gücü sırasıyla:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (2)$$

$$\dot{W}_{pp} = \dot{V}\Delta p \quad (3)$$

şeklinindedir. Burada, \dot{m} (kg/s); kütleli debiye, c_p (J/kgK); sabit basınçtaki özgül ısıya, ΔT (K); sıcaklık farkına, \dot{V} (m³/s); hacimsel debiye ve Δp (Pa); basınç düşümüne karşılık gelmektedir. Verimlilik değerlendirme ölçütü (Ma ve ark., 2014):

$$VDÖ = (\dot{Q}_{nf}/\dot{Q}_{bf})/(\dot{W}_{pp,nf}/\dot{W}_{pp,bf}) \quad (4)$$

Burada, VDÖ; verimlilik değerlendirme ölçütünü, $\dot{Q}_{nf}/\dot{Q}_{bf}$; nanoakışkana aktarılan ısı gücün, geleneksel aracı akışkana (nano tozların-katı parçacıkların kullanılmadığı akışkan) aktarılan ısı güce oranını ve $\dot{W}_{pp,nf}/\dot{W}_{pp,bf}$; nanoakışkana gerekli pompalama gücünün, geleneksel aracı akışkana gerekli pompalama gücüne oranını, alt indisler nf ve bf sırasıyla nanoakışkanı ve geleneksel aracı akışkanı belirtmektedir.

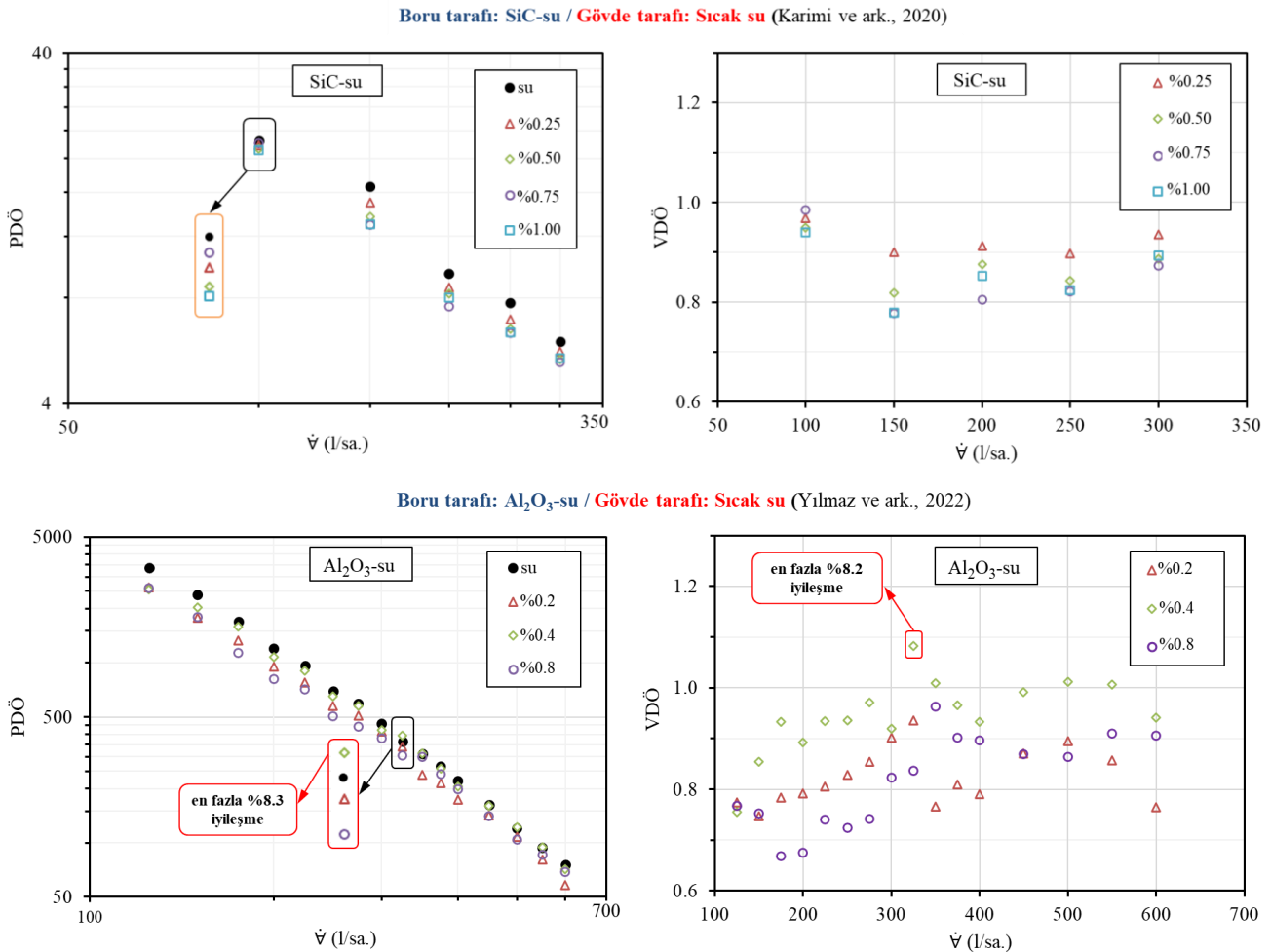
BULGULAR VE TARTIŞMA

Nanoakışkanlarla ilgili kaynaklar hızlı bir şekilde gözden geçirildiğinde, genellikle taşınım ısı geçişinin iyileştiği ve değerlendirmelerin çoğunda nanoakışkanların ısı taşınım katsayısını artırma potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, üstün özellikli yeni aracı akışkan adayları olarak önerilen nanoakışkanların, ısı sistemlerin genel enerji performansına olası etkileri nadiren tartışılmıştır. Saf geleneksel aracı akışkana nano tozların-katı parçacıkların eklenmesi, beklendiği gibi taşınım ısı geçişini iyileştiren ısı iletim katsayısı gibi termofiziksel özellikleri iyileştirmesinin yanında, akışkanın akışa direncini temsil eden viskozitesini de artırmaktadır. Dinamik viskozitedeki artışın, kayma gerilmelerini ve dolayısıyla akış kaynaklı sürtünme basınç kayıplarını da artıracak açıktır. Nano tozlar-katı parçacıklar, geleneksel aracı akışkanın ısı iletim katsayısına ve viskozitesine benzer şekilde, özgül ısını ve yoğunluğunu da değiştirmektedir. Isıl sistemlere en uygun aracı akışkanın seçiminde, tüm bu değişimler dikkate alınmalıdır. Viskozitedeki artışla birlikte, aracı akışkana aktarılan ısı güç ile akışın sürdürülebilmesi için gerekli pompalama gücü arasındaki denge, basınç kayıplarının artması nedeniyle olumsuz yönde değişecektir. Dolayısıyla, ısı sistemlerde nanoakışkanlar gibi yeni aracı akışkanlar ya da farklı iyileştirme yöntemleri değerlendirilirken, taşınım ısı geçişindeki iyileşmenin yanında, sistemin genel enerji veriminde etkili, pompalama gücü gibi faktörleri de göz önünde bulunduran bir yaklaşım izlenmelidir. Sonuç olarak, nanoakışkanlarla saf geleneksel aracı akışkana göre taşınım ısı geçişinde bir artış sağlansa da akışın sürdürülmesi için gerekli pompalama gücü oransal olarak daha fazla artabilir.

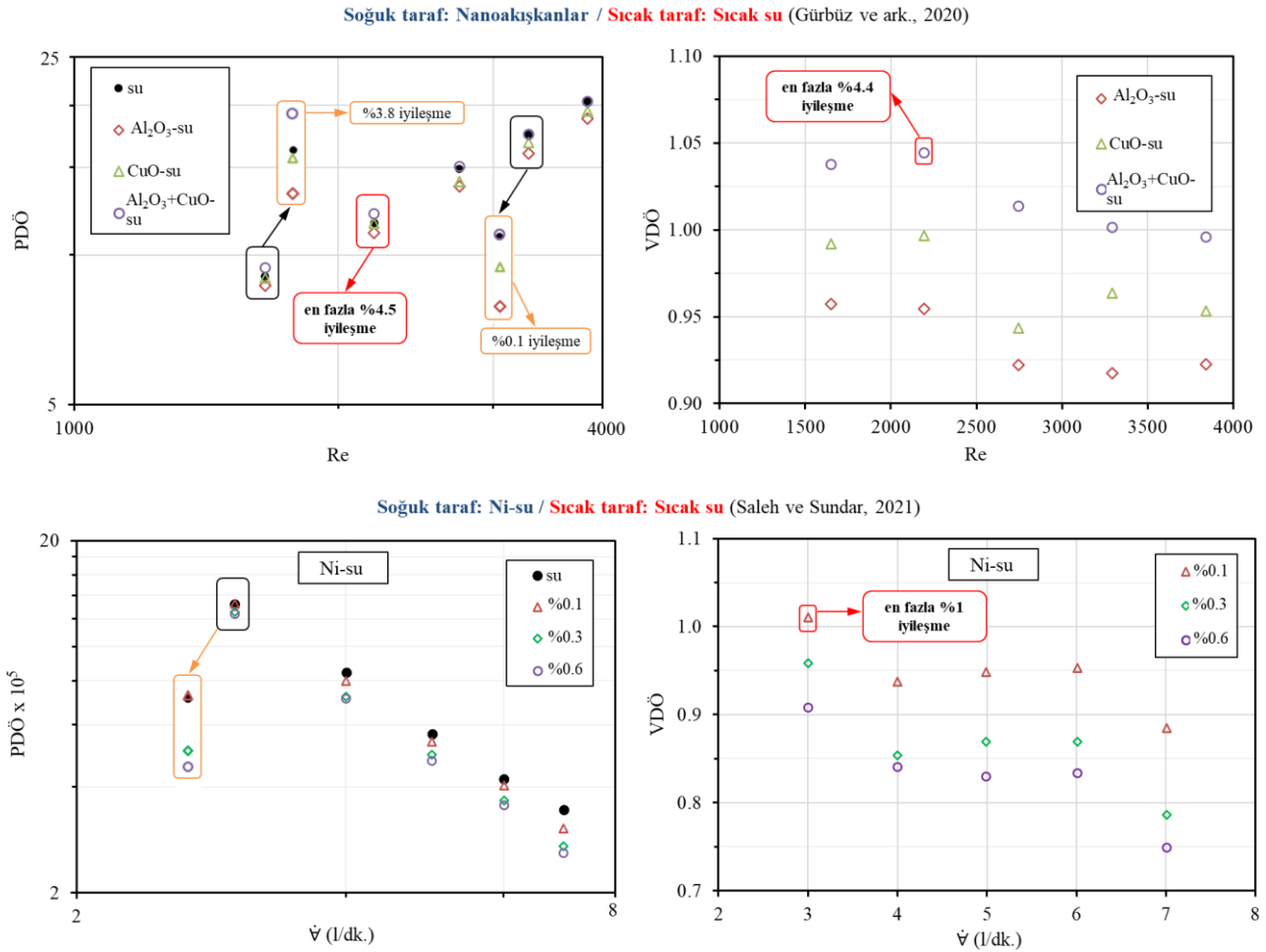
Belirli bir ısı gücün aktarılmasında, yaygın kullanılan saf geleneksel aracı akışkanların yerine nanoakışkanların kullanılmasıyla ilgili değerlendirmelerde, her iki durumda akışın devamında gerekli pompalama güçleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Nanoakışkanlarla ilgili kaynaklardan,

nanoakışkan hazırlamada kullanılan geleneksel aracı akışkanların (su, yağ gibi) hidrodinamik performansı ile ilgili yeterli veriye ulaşılabilen çalışmalar gözden geçirildiğinde; saf geleneksel aracı akışkanlarla belirli bir ısı yükü aktarmak için gerekli pompalama gücünün, tüm nanoakışkanlar için gerekli pompalama güçlerinden daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Diğer bir deyişle, belirli bir ısı gücün taşınması için nanoakışkanlarda kullanılan nano toz-katı parçacık konsantrasyonundaki artış, daha fazla pompalama gücü gerektirmektedir. Ayrıca, tüm ısı sistem ve pompalama devresi (yani tüm borular ve yerel kayıp elemanları; vanalar ve ısı değiştiriciler gibi) dikkate alındığında, bu artışın etkisinin daha da belirginleşeceği açıktır. Diğer bir anlatımla, belirli bir ısı gücünde hem saf geleneksel aracı akışkanın hem de bu akışkana nano tozların-katı parçacıkların ilavesiyle hazırlanan nanoakışkanın, gerekli hacimsel debilerinin eşit olduğu durumda, nanoakışkana gerekli pompalama gücü, saf geleneksel aracı akışkana gerekli pompalama gücünden daha büyüktür.

Kaynaklar arasından farklı araştırmacıların, farklı ısı ve hidrodinamik koşullarda ve farklı nanoakışkanlarla gerçekleştirdiği ve yayımlanan, deneysel ısı geçişi ve basınç düşümü sonuçları kullanılarak hesaplanan, PDÖ ve VDÖ'nün Reynolds sayısına ve hacimsel debiye bağlı değişimleri Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Gövde borulu ısı değiştiricilerde nanoakışkanların kullanıldığı deneysel PDÖ ve VDÖ sonuçları



Şekil 5. Levhalı ısı değiştiricilerde nanoakışkanların kullanıldığı deneysel PDÖ ve VDÖ sonuçları

Çalışmada kullanılan PDÖde ve VDÖde, aracı akışkanlara ısı geçişi ve gerekli pompalama gücü birlikte değerlendirilmektedir. Başka bir ifadeyle bu ölçütlerde, belirli bir ısı güç aktarılırken aynı zamanda akış kaynaklı kayıp hidrodinamik gücün büyüklüğü de dikkate alındığından, taşınım ile ısı geçişi kanallarında harcanan akış enerjisinin ne kadar etkin kullanıldığı görülebilmektedir. Dolayısıyla, nanoakışkanların PDÖ'sü, saf geleneksel aracı akışkanın PDÖ'süne yakın ve hatta altındadır. Bu sonuçlar ise nanoakışkanların, basınç düşümünü (akış enerjisini) taşınım ile ısı geçişine dönüştürme performanslarının, saf geleneksel aracı akışkanlara eşdeğer ve hatta altında olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, saf geleneksel aracı akışkan ve nanoakışkanlara ait deneysel verilerle hesaplanan VDÖ'nün 1'e yakın ve 1'in altında olması, PDÖye benzer şekilde nanoakışkanların performansının, saf geleneksel aracı akışkana eşit ve altında olduğunu göstermektedir.

PDÖ ve VDÖ sonuçlarına göre genel olarak eşdeğer ısı güçte, gerekli nanoakışkan debisinin artmasıyla artan basınç düşümünden dolayı, nanoakışkanların performansı saf geleneksel aracı akışkanın performansına yaklaşmış ve hatta altına düşmüştür. Başka bir ifadeyle, Şekil 4 ve 5'ten görüldüğü gibi termodinamik özelliklere ve nano toz-katı parçacık konsantrasyonuna bağlı olarak gerekli nanoakışkan debisinin ve viskozitesinin artmasıyla, saf geleneksel aracı akışkana göre daha fazla artan basınç düşümü ve pompalama gücünün etkisiyle, PDÖ ve VDÖ azalmıştır.

Kaynaklar arasından seçilerek ele alınan deneysel çalışmalardan, Karimi ve ark., 2020, Yılmaz ve ark., 2022, Gürbüz ve ark., 2020 ve Saleh ve Sundar, 2021 için Şekil 4 ve 5'te verilen nanoakışkanların tüm PDÖ sonuçları, geleneksel aracı akışkanlara göre sırasıyla; ortalama %12.3, %13.8, %2.6 ve %11.5

daha düşüktür. Benzer şekilde ortalama VDÖ sonuçları; Karimi ve ark., 2020 için 0.88, Yılmaz ve ark., 2022 için 0.86, Gürbüz ve ark., 2020 için 0.97 ve Saleh ve Sundar, 2021 için 0.88'dir.

Çizelge 1, 2, 3 ve 4'te kaynaklar arasından seçilerek ele alınan deneysel çalışmaların sonuçları, detaylı olarak verilmiştir. Bu çizelgelerde, parantez içerisindeki sayısal değerler, ısı değiştiricilerde kullanılan farklı konsantrasyonlardaki nanoakışkanların saf geleneksel aracı akışkanlara göre yüzde performans değişimlerini göstermektedir. Çizelgelerdeki PDÖ ve VDÖ sonuçlarının neredeyse tamamı, belirli bir pompalama gücünde, saf geleneksel aracı akışkanların yerine nanoakışkanları kullanmanın, harcanan akış enerjisinin, aynı oranda ısı güç aktarımına dönüştürülemediğini göstermektedir. Bir başka deyişle, deneysel sonuçlar kullanılarak hesaplanan PDÖ ve VDÖ sonuçları, belirli bir ısı gücünü (ısı geçişi) aktarılması için nanoakışkanlarla daha fazla akış enerjisi harcamanın/tüketmenin (basınç kaybının taşınımıyla ısı geçişine dönüşümü) verimsiz bir enerji dönüşümü olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1. Karimi ve ark., 2020 için PDÖ ve VDÖ sonuçları

PDÖ					
Ḃ (l/sa.)	Su	SiC-su			
	%0	%0.25	%0.50	%0.75	%1.00
100	22.46	21.77 (-%3.1)	21.32 (-%5.1)	22.12 (-%1.5)	21.13 (-%6.0)
150	16.66	14.99 (-%10.0)	13.64 (-%18.2)	12.95 (-%22.3)	12.99 (-%22.1)
200	9.38	8.56 (-%8.8)	8.22 (-%12.4)	7.55 (-%19.5)	8.01 (-%14.7)
250	7.74	6.94 (-%10.3)	6.53 (-%15.7)	6.36 (-%17.9)	6.38 (-%17.5)
300	6.02	5.63 (-%6.5)	5.34 (-%11.3)	5.26 (-%12.7)	5.38 (-%10.6)
Ortalama	12.45	11.58 (-%7.7)	11.01 (-%12.5)	10.85 (-%14.8)	10.78 (-%14.2)
VDÖ					
Ḃ (l/sa.)	Su	SiC-su			
	%0	%0.25	%0.50	%0.75	%1.00
100	-	0.97	0.95	0.98	0.94
150	-	0.90	0.82	0.78	0.78
200	-	0.91	0.88	0.80	0.85
250	-	0.90	0.84	0.82	0.82
300	-	0.94	0.89	0.87	0.89
Ortalama	-	0.92	0.87	0.85	0.86

Nanoakışkanların PDÖ sonuçlarının saf geleneksel aracı akışkanlara göre değişimi; Karimi ve ark., 2020 için en az -%22.3 iken en fazla -%1.5'dir. Yılmaz ve ark., 2022 için en az -%33.1 iken en fazla +%8.3, Gürbüz ve ark., 2020 için en az -%8.2 iken en fazla +%4.4 ve Saleh ve Sundar, 2021 için en az ve en fazla sırasıyla -%24.7 ve +%0.3'dür. VDÖ sonuçları ise; Karimi ve ark., 2020 için 0.78-0.98 aralığında, Yılmaz ve ark., 2022 için 0.67-1.08 aralığında, Gürbüz ve ark., 2020 için 0.92-1.04 aralığında ve Saleh ve Sundar, 2021 için 0.75-1.01 aralığında değişmektedir.

Isı değiştiricilerde saf geleneksel aracı akışkanlara göre ısı güçteki (ısı geçişindeki iyileşme) ve pompalama gücündeki (basınç kaybındaki) artışlar sırasıyla; Karimi ve ark., 2020 için %1.8-%19.3 ve %5.2-%44.5, Yılmaz ve ark., 2022, için %3.9-%18.2 ve %2.6-%62.6, Gürbüz ve ark., 2020 için %2.9-%17.1 ve ortalama %12.1 ve Saleh ve Sundar, 2021 için %3.5-%21.2 ve %4.5-%60.8 aralığındadır. Bu sonuçlara göre, pompalama güçlerindeki yüzde artışların ısı güçlerindeki yüzde artışlara oranlarının ortalaması sırasıyla; Karimi ve ark., 2020 için 3.9 kat, Yılmaz ve ark., 2022, için 3.1 kat, Gürbüz ve ark., 2020 için 1.8 kat ve Saleh ve Sundar, 2021 için 2.3 kat daha fazladır.

Dolayısıyla ilk bakışta, geleneksel saf aracı akışkanlar yerine nanoakışkanların kullanılmasıyla ısı güçte artış (ısı geçişinde iyileşme) sağlanıyor gibi görünse de geleneksel saf aracı akışkanlarla karşılaştırıldığında, nanoakışkanların pompalama gücündeki (basınç kaybındaki) artışlar daha fazladır. Bu nedenle geleneksel saf aracı akışkanlarla karşılaştırıldığında nanoakışkanlar, enerji verimliliği bakımından ısı güç ve pompalama gücü arasındaki dengeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Enerji

verimliliğindeki bu olumsuz değişim; kaynaklarda SiO₂-su nanoakışkanı için Ferrouillat ve ark., 2011, Al₂O₃-su nanoakışkanı için Roy ve ark., 2012 ve propilen glikol(%20)/su(%80) içerisine B₄C, TiB₂ ve B₄C/TiB₂ nano tozları-katı parçacıkları ilave edilerek hazırlanan nanoakışkanlar için Vallejo ve ark., 2023 tarafından verilen sonuçlarla da benzerdir.

Çizelge 2. Yılmaz ve ark., 2022 için PDÖ ve VDÖ sonuçları

PDÖ				
Ṡ (l/sa.)	Su	Al ₂ O ₃ -su		
	%0	%0.2	%0.4	%0.8
125	3377.74	2613.55 (-%22.6)	2549.14 (-%24.5)	2591.94 (-%23.3)
150	2382.74	1780.33 (-%25.3)	2036.62 (-%14.5)	1792.98 (-%24.8)
175	1692.69	1326.31 (-%21.6)	1578.87 (-%6.7)	1132.40 (-%33.1)
200	1201.02	950.48 (-%20.9)	1072.36 (-%10.7)	811.50 (-%32.4)
225	961.60	773.99 (-%19.5)	898.62 (-%6.5)	711.67 (-%26.0)
250	697.58	577.82 (-%17.2)	653.22 (-%6.4)	505.56 (-%27.5)
275	594.31	507.71 (-%14.6)	576.98 (-%2.9)	441.09 (-%25.8)
300	461.70	416.33 (-%9.8)	424.32 (-%8.1)	380.00 (-%17.7)
325	364.39	340.86 (-%6.5)	394.63 (+%8.3)	305.01 (-%16.3)
350	311.07	238.47 (-%23.3)	313.94 (+%0.9)	299.74 (-%3.6)
375	266.28	215.50 (-%19.1)	257.17 (-%3.4)	240.12 (-%9.8)
400	220.54	174.36 (-%20.9)	205.66 (-%6.8)	197.79 (-%10.3)
450	162.29	141.34 (-%12.9)	160.97 (-%0.8)	141.12 (-%13.0)
500	120.38	107.74 (-%10.5)	121.81 (+%1.2)	103.99 (-%13.6)
550	94.27	80.73 (-%14.4)	94.92 (+%0.7)	85.77 (-%9.0)
600	75.88	58.06 (-%23.5)	71.44 (-%5.9)	68.77 (-%9.4)
Ortalama	811.53	643.97 (-%17.7)	713.17 (-%5.4)	613.09 (-%18.5)
VDÖ				
Ṡ (l/sa.)	Su	Al ₂ O ₃ -su		
	%0	%0.2	%0.4	%0.8
125	-	0.77	0.75	0.77
150	-	0.75	0.85	0.75
175	-	0.78	0.93	0.67
200	-	0.79	0.89	0.68
225	-	0.80	0.93	0.74
250	-	0.83	0.94	0.72
275	-	0.85	0.97	0.74
300	-	0.90	0.92	0.82
325	-	0.94	1.08	0.84
350	-	0.77	1.01	0.96
375	-	0.81	0.97	0.90
400	-	0.79	0.93	0.90
450	-	0.87	0.99	0.87
500	-	0.89	1.01	0.86
550	-	0.86	1.01	0.91
600	-	0.77	0.94	0.91
Ortalama	-	0.82	0.95	0.81

Nanoakışkanların aynı hacimsel debide (ortalama akış hızında) saf geleneksel aracı akışkana göre daha büyük pompalama gücü gereksinimleri, viskozitenin artmasıyla açıklanabilir. Yani, viskozitesi yüksek nanoakışkanların, artan akış kaynaklı basınç düşümleri nedeniyle, aynı debideki pompalama gücü ihtiyaçları saf geleneksel aracı akışkandan daha büyüktür. Bu da nanoakışkanların PDÖ ve VDÖ sonuçlarını olumsuz etkilemiştir.

Hacimsel debi arttıkça, nanoakışkanların basınç düşümü ve pompalama gücünde görülen artış, nanoakışkanların konsantrasyonu (nano tozların-katı parçacıkların) arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Bu sonuç, performans ölçütlerindeki düşmenin, nanoakışkanların viskozitelerinin saf geleneksel aracı akışkana göre yükselmesinden kaynaklandığını göstermektedir. Nitekim

konsantrasyonu yüksek nanoakışkanların PDÖ ve VDÖ sonuçları, konsantrasyonu düşük nanoakışkanların sonuçlarına göre daha düşüktür. Ayrıca nanoakışkanların konsantrasyonu arttıkça, nanoakışkanların yoğunlukları artmakla birlikte, özgül ısıları azalmaktadır. Başka bir ifadeyle, aynı hacimsel debide nanoakışkanların yükselen konsantrasyona bağlı olarak kütsel debileri artarken, ısı kapasiteleri aynı oranda artmamaktadır.

Çizelge 3. Gürbüz ve ark., 2020 için PDÖ ve VDÖ sonuçları

PDÖ				
Re	Su	Al ₂ O ₃ -su	CuO-su	Al ₂ O ₃ +CuO-su
1650	9.07	8.68 (-%4.27)	9.00 (-%0.81)	9.41 (+%3.77)
2200	11.61	11.08 (-%4.53)	11.57 (-%0.33)	12.13 (+%4.45)
2750	14.89	13.73 (-%7.77)	14.04 (-%5.66)	15.09 (+%1.35)
3290	17.46	16.02 (-%8.24)	16.82 (-%3.65)	17.49 (+%0.13)
3840	20.42	18.84 (-%7.74)	19.47 (-%4.67)	20.34 (-%0.42)
Ortalama	14.69	13.67 (-%6.51)	14.18 (-%3.03)	14.89 (+%1.86)
VDÖ				
Re	Su	Al ₂ O ₃ -su	CuO-su	Al ₂ O ₃ +CuO-su
1650	-	0.96	0.99	1.04
2200	-	0.95	1.00	1.04
2750	-	0.92	0.94	1.01
3290	-	0.92	0.96	1.00
3840	-	0.92	0.95	1.00
Ortalama	-	0.93	0.97	1.02

Çizelge 4. Saleh ve Sundar, 2021 için PDÖ ve VDÖ sonuçları

PDÖ				
ṽ (l/dk.)	Su	Ni-su	%0.3	%0.6
	%0	%0.1		
3	13.21	13.25 (%0.32)	12.56 (-%4.92)	12.37 (-%6.39)
4	8.46	7.99 (-%5.62)	7.23 (-%14.60)	7.11 (-%16.00)
5	5.65	5.37 (-%5.08)	4.93 (-%12.77)	4.74 (-%16.09)
6	4.22	4.03 (-%4.43)	3.65 (-%13.44)	3.55 (-%15.98)
7	3.45	3.04 (-%11.88)	2.72 (-%21.33)	2.60 (-%24.66)
Ortalama	7.00	6.74 (-%5.34)	6.22 (-%13.41)	6.07 (-%15.82)
VDÖ				
ṽ (l/dk.)	Su	Ni-su	%0.3	%0.6
	%0	%0.1		
3	-	1.01	0.96	0.91
4	-	0.94	0.85	0.84
5	-	0.95	0.87	0.83
6	-	0.95	0.87	0.83
7	-	0.88	0.79	0.75
Ortalama	-	0.95	0.87	0.83

Bahsedilen nedenlerle; aynı hacimsel debilerdeki nanoakışkanlara ve saf geleneksel aracı akışkanlara ait deneysel ısı geçişi ve basınç düşümü sonuçları birlikte değerlendirilerek elde edilen PDÖ ve VDÖ sonuçları, saf geleneksel aracı akışkanların, akış enerjisini taşınımıyla ısı geçişine dönüştürmede, nanoakışkanlara göre daha başarılı olduklarını göstermektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda, endüstriyel tesislerin enerji bütçesi bakımından, nanoakışkanların dezavantajlı olduğunu da göstermektedir. Dolayısıyla nanoakışkanların kullanılması, enerji verimliliği bakımından bu dezavantajlarının önemsiz (yüksek ısı akılarının enerji maliyetlerinden daha öncelikli) olduğu çok özel uygulamalarda tercih edilebilir.

SONUÇ

Isı geçişini iyileştirmek amacıyla hazırlanan nanoakışkanların, endüstriyel ısı değiştiricilerin ısı ve hidrodinamik performanslarına etkileri, açık kaynaklarda yayımlanmış deneysel araştırmaların

sonuçları kullanılarak değerlendirilmiştir. Başka bir ifadeyle, nanoakışkanların ısı sistemlerinin enerji verimliliğine etkileri gösterilmiştir. Yayınlanmış deneysel veriler kullanılarak yapılan değerlendirmeler ve karşılaştırmalarda, aracı akışkanlara aktarılan ısı gücünün ve akış için gerekli pompalama gücünün birlikte ele alındığı iki farklı değerlendirme ölçütü (PDÖ ve VDÖ) kullanılmıştır.

Yapılan değerlendirmelerde, yaygın kullanılan geleneksel aracı sıvılara aktarılan ısı gücü ve akış için gerekli pompalama gücü arasındaki dengenin, nanoakışkanlarla yapılan deneylerde pompalama gücündeki artış nedeniyle, olumsuz yönde değiştiği gösterilmiştir. Diğer bir deyişle, nanoakışkanlarla, geleneksel aracı sıvılara göre ısı geçişinde iyileşme sağlansa da akış için gerekli pompalama gücü oransal olarak daha fazla artmıştır. Dolayısıyla, nanoakışkanlar gibi yeni aracı akışkanların ya da farklı iyileştirme yöntemlerinin ısı sistemlerine etkileri değerlendirilirken, ısı geçişindeki iyileşmenin yanında, pompalama gücü gibi sistemin genel enerji veriminde etkili diğer faktörleri de göz önünde bulunduran yaklaşımlar izlenmelidir.

Sonuç olarak kaynaklar arasından seçilerek ele alınan, yayınlanmış deneysel araştırmaların verileri kullanılarak hesaplanan PDÖ ve VDÖ sonuçları ile yapılan karşılaştırmalara göre; gövde borulu ve levhali ısı değiştiricilerde yaygın kullanılan geleneksel aracı sıvıları, nanoakışkanlarla değiştirmenin genel enerji verimliliği bakımından uygun olmadığı gösterilmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Alfa Laval. (2022, November 21). Erişim adresi: <https://www.alfalaval.my/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/heat-exchanger/how-plate-heat-exchanger-work/>. Erişim adresi: 21 11, 2022).
- Bianco, V., Manca, O., Nardini, S. ve Vafai, K. (2015). *Heat Transfer Enhancement with Nanofluids*. Boca Raton: CRC Press.
- Ferrouillat, S., Bontemps, A., Ribeiro, J.-P., Gruss, J.-A., ve Soriano, O. (2011). Hydraulic and heat transfer study of SiO₂/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(2), 424–439. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.01.003
- Genceli, O. F. (1999). *Isı Değiştiricileri*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Gürbüz, E. Y., Sözen, A., Variyenli, H. İ., Khanlari, A., ve Tuncer, A. D. (2020). A comparative study on utilizing hybrid-type nanofluid in plate heat exchangers with different number of plates. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(10), 524. doi:10.1007/s40430-020-02601-1
- Hesselgreaves, J.E., Richard, L., ve Reay, D.A. (2016). *Compact Heat Exchangers Selection, Design and Operation (Second)*. United Kingdom: Butterworth-Heinemann.
- Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat Exchangers Selection, Rating, and Thermal Design (Third)*. New York: CRC Press.
- Karimi, S., Heyhat, M. M., Isfahani, A. H. M., ve Hosseinian, A. (2020). Experimental investigation of convective heat transfer and pressure drop of SiC/water nanofluid in a shell and tube heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 56(8), 2325–2331. doi:10.1007/s00231-020-02844-7

- Klaren Tech. (2022, November 21). Erişim adresi: <https://klarenbv.com/heat-exchanger-basics/>.(Erişim adresi: 21 11, 2022).
- Ma, L., Yang, J., Liu, W., ve Zhang, X. (2014). Physical quantity synergy analysis and efficiency evaluation criterion of heat transfer enhancement. *International Journal of Thermal Sciences*, 80, 23–32. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.01.021
- Pandey, S. D., ve Nema, V. K. (2012). Experimental analysis of heat transfer and friction factor of nanofluid as a coolant in a corrugated plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38, 248–256. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.12.013
- Roy, G., Gherasim, I., Nadeau, F., Poitras, G., ve Nguyen, C. T. (2012). Heat transfer performance and hydrodynamic behavior of turbulent nanofluid radial flows. *International Journal of Thermal Sciences*, 58, 120-129. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.03.009
- Saleh, B., ve Sundar, L. S. (2021). Experimental study on heat transfer, friction factor, entropy and exergy efficiency analyses of a corrugated plate heat exchanger using Ni/water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 165, 106935. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.106935
- Serth, R. W. (2014). *Process Heat Transfer*. Elsevier. doi:10.1016/C2011-0-07242-3
- Vallejo, J. P., Ansia, L., Calviño, U., Marcos, M. A., Fernández-Seara, J., ve Lugo, L. (2023). Convection behaviour of mono and hybrid nanofluids containing B₄C and TiB₂ nanoparticles. *International Journal of Thermal Sciences*, 189, 108268. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108268
- Webb, R. L. ve Kim, N. H. (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer (2nd Ed.)*. New York: Taylor and Francis.
- Yang, J., Yang, X., Wang, J., Chin, H. H., ve Sundén, B. (2022). Review on Thermal Performance of Nanofluids With and Without Magnetic Fields in Heat Exchange Devices. *Frontiers in Energy Research*, 10. doi:10.3389/fenrg.2022.822776
- Yılmaz, M. S., Ünverdi, M., Küçük, H., Akcakale, N., ve Halıcı, F. (2022). Enhancement of heat transfer in shell and tube heat exchanger using mini-channels and nanofluids: An experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, 179, 107664. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107664
- Zhang, Y. (2013). *Nanofluids Research, Development and Applications*. Columbia: Nova Publishers.