



# The Effects of Nanofluids on The Energy Efficiency: Experimental Performance Investigation of Cooling Nanofluids in A Mini-Channel Shell and Tube Heat Exchanger

Murat ÜNVERDİ<sup>1,\*</sup>, Hasan KÜÇÜK<sup>2</sup>, Mehmet Senan YILMAZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Aydın Meslek Yüksekokulu, Efeler, 09010, Aydın, Türkiye

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Serdivan, 54050, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup> Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Gerde Meslek Yüksekokulu, Gerde, 14900, Bolu, Türkiye

## ARTICLE INFO

2024, vol. 44, no.2, pp. 259-279

©2024 TIBTD Online.

doi: 10.47480/isibted.1563032

### Research Article

Received: 09 April 2023

Accepted: 28 June 2024

\* Corresponding Author

e-mail: munverdi@adu.edu.tr

### Keywords:

Energy efficiency

Nanofluids

Shell and tube heat exchanger

Heat transfer

Pressure drop

### ORCID Numbers in author order:

0000-0002-7045-509X

0000-0002-8825-7315

0000-0001-5644-6675

## ABSTRACT

Energy efficiency in thermal systems used in industrial engineering applications is an important topic that affects operating costs. The thermophysical properties of working fluids and geometric, thermal, and hydrodynamic design variables affect the energy efficiency of thermal systems. Nanofluids are recommended instead of conventional working fluids in order to enhance convective heat transfer in thermal systems. However, researchers have not adequately discussed the effects of nanofluids on overall energy efficiency compared to conventional working fluids. This study experimentally investigated the effects of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids cooling on the tube side on energy efficiency in a lab-made shell and tube heat exchanger manufactured with mini-channel tubes. We evaluated the effects of nanofluids in three volumetric concentrations (0.2%, 0.4% and 0.8%) on energy efficiency compared to conventional working fluid water based on two metrics (Performance Evaluation Criterion-PEC and Efficiency Evaluation Criterion-EEC). In addition, we calculated PECs and EECs to compare the effects of conventional working fluids and nanofluids on energy efficiency with experimental data in the literature, in which nanofluids were used in plate heat exchangers and shell and tube heat exchangers. We compared the energy efficiency results based on the experimental data from the literature with our experimental energy efficiency results. The average PECs of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids with 0.2%, 0.4% and 0.8% volumetric concentrations in our study were -38%, -27.1% and -38.1% lower than conventional working fluid water, respectively, while the average EECs of these nanofluids were 0.62, 0.73 and 0.61, respectively. The PEC and EEC results showed that conventional working fluids were superior to nanofluids in terms of energy efficiency. It has been concluded that nanofluids are not suitable for thermal systems of industrial plants in terms of energy costs. However, they can be used in extraordinary thermal systems where low energy efficiency and other disadvantages are negligible and high heat flux is required, by taking into account all precautions and solutions.

# Nanoakışkanların Enerji Verimliliğine Etkileri: Mini Kanallı Gövde Borulu Isı Değiştiricide Soğuyan Nanoakışkanların Deneysel Performans İncelemesi

## MAKALE BİLGİSİ

### Anahtar Kelimeler:

Enerji verimliliği

Nanoakışkanlar

Gövde borulu ısı değiştirici

Isı geçişi

Basınç düşümü

## ÖZET

Endüstriyel mühendislik uygulamalarında kullanılan ısı sistemlerinde enerji verimliliği, işletme maliyetlerini etkileyen önemli konu başlıklarındandır. Isıl sistemlerin enerji verimliliğini; seçilen aracı akışkanların termo-fiziksel özellikleri ile sistemin geometrik, ısı ve hidrodinamik tasarım değişkenleri etkilemektedir. Nanoakışkanlar, ısı sistemlerinde taşınım ile ısı geçişinin iyileştirilmesi amacıyla konvansiyonel saf taşıyıcı sıvıların (KSTS) yerine önerilmektedir. Ancak, nanoakışkanların genel enerji verimliliğine etkileri, KSTSlerle karşılaştırılarak yeterince tartışılmamıştır. Bu çalışmada, mini kanallı borularla üretilen prototip gövde borulu bir ısı değiştiricide, boru tarafında soğuyan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarının enerji verimliliğine etkileri deneysel incelenmiştir. Üç farklı hacimsel oranda (%0.2, %0.4 ve %0.8) hazırlanan nanoakışkanların, KSTS suya göre enerji verimliliğine etkileri iki farklı ölçütü (Performans Değerlendirme Ölçütü-PDÖ ve Verimlilik Değerlendirme Ölçütü-VDÖ) değerlendirilmiştir. Ayrıca sunulan çalışmaya benzer şekilde; literatürde yayımlanan, levhalı ısı değiştiricilerde (LİD) ve gövde borulu ısı değiştiricilerde (GBİD) nanoakışkanların kullanıldığı deneysel çalışmaların verileriyle, PDÖ ve VDÖ hesaplanarak, KSTSlerin ve nanoakışkanların enerji verimliliğine etkileri karşılaştırılmıştır. Literatürdeki deneysel verilerle hesaplanan enerji verimliliği sonuçları, sunulan çalışmanın deneysel enerji verimliliği sonuçlarıyla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Sunulan çalışmadaki %0.2, %0.4 ve %0.8 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarının PDÖlerinin ortalaması KSTS suya göre sırasıyla -%38, -%27.1 ve -%38.1 daha düşük iken, VDÖlerinin ortalaması da sırasıyla 0.62, 0.73 ve 0.61'dir. PDÖ ve VDÖ sonuçları, KSTSlerin enerji verimliliği bakımından, nanoakışkanlara göre daha üstün olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak; nanoakışkanların enerji maliyetleri bakımından, endüstriyel tesislerin ısı sistemlerinde KSTSlerin yerine kullanılmasının uygun olmadığı elde edilmiştir. Ancak nanoakışkanlar, düşük enerji verimliliği ve diğer dezavantajlarının önemsiz olduğu, yüksek ısı akısı (taşınım katsayısı) istenen, özel amaçlı ısı sistemlerinde, gerekli tüm önlemler alınarak ve çözümler uygulanarak kullanılabilir.

## SEMBOLLER

$c_p$	özgül ısı (J/kgK)
$k$	ısı iletim katsayısı (W/mK)
$m$	kütle (kg)
$Pe$	Peclet sayısı, (=RePr)
$Pr$	Prandtl sayısı, ( $=\mu c_p/k$ )
$Q$	ısı gücü, ısı geçişi (W)
$Re$	Reynolds sayısı ( $=\rho uD/\mu$ )
$T$	sıcaklık ( $^{\circ}C$ , K)
$W_{pg}$	pompalama gücü (W)
$\Delta T$	sıcaklık farkı ( $^{\circ}C$ , K)
$\dot{V}$	hacimsel debi (l/sa, l/dk.)
$\Delta p$	basınç düşümü (Pa)

### Yunan Harfleri

$\mu$	dinamik viskozite (kg/ms)
$\rho$	yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
$\varphi$	hacimsel oran (-, %)

## GİRİŞ

Yüksek performanslı ısıtma ve soğutma sistemleri, farklı endüstriyel alanlardaki ileri teknoloji uygulamalarının en önemli ihtiyaçlarındandır. Yüksek performanslı ısıtmada ve soğutmada, en önemli sınırlamalardan biri de konvansiyonel ısı geçişi sıvılarının (aracı akışkanların) ısı iletim katsayılarının doğaları gereği düşük değerli olmasıdır. Enerji verimli ısı geçişi sıvılarının geliştirilmesinde asıl amaçlardan biri de ısı iletim katsayısının yükseltilmesidir. Nanometre boyutlarındaki metalik veya metalik olmayan parçacıklar, gelişmiş üretim yöntemleriyle üretebilmektedir. Nanomalzemeler; alışılmadık malzemelerden farklı olarak, kendine özgü; mekanik, optik, elektriksel, manyetik ve termodinamik özelliklere sahiptir (Chand, 2017).

Nanoakışkanlar (nanosıvılar: nanopartiküllü sıvı süspansiyonları); konvansiyonel saf ısı geçişi sıvılarından (su, yağ ve etilen glikol gibi) veya konvansiyonel parçacıklı-sıvı süspansiyonlarından daha üstün ısı özellikleri gösteren, nanoteknoloji tabanlı ısı geçişi sıvılarını tanımlamak amacıyla kullanılan bir kavramdır. Bir başka ifadeyle nanoakışkanlar; su, yağ ve etilen glikol gibi konvansiyonel saf ısı geçişi sıvılarına, çökmeden askıda kalabilecek (ortalama boyutları 100 nm'nin altında) nanopartiküllerin eklenmesi fikriyle ortaya çıkmıştır (Choi, 2009; Minkowycz vd., 2016). Çok az miktardaki nanopartiküller, mümkün olduğunca homojen bir şekilde konvansiyonel ısı geçişi sıvılarında dağıtılıp/karıştırılıp ve kararlı bir şekilde süspansiyon edildiklerinde, ısı geçişi sıvılarının bazı ısı özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlanabilmektedir. Nanoakışkan teknolojisi, 90'lı yılların ortasından itibaren bilinip uygulansa da nanoakışkanlar; nanobilim, nanoteknoloji ve ısı mühendisliğinin bulunduğu, disiplinler arası bir alandır ve son on yılda nanoakışkanlarla ilgili çalışmalar hızlanmıştır (Bianco vd., 2011; Gonçaves vd., 2021). Nanoakışkan tasarımlarında amaç; nanopartiküllerin mümkün olan en düşük konsantrasyonlarda (tercihen hacimce %1'den küçük), konvansiyonel ısı geçişi sıvılarına karıştırılarak, ısı özellikleri olabildiğince iyileştirilmiş aracı akışkanlar (homojen dağılımlı ve kararlı süspansiyonlar) elde etmektir (Choi, 2009).

### Kısaltmalar

GBID	gövde borulu ısı değiştirici
KSTS	konvansiyonel saf taşıyıcı sıvı
LID	levhalı ısı değiştirici
MK-GBID	mini kanallı gövde borulu ısı değiştirici
PDÖ	Performans Değerlendirme Ölçütü, ( $Q/W_{pg}$ )
TS	taşıyıcı sıvı
VDÖ	Verimlilik Değerlendirme Ölçütü, ( $Q_{na}/Q_{ts})/(W_{pg,na}/W_{pg,ts})$

### Alt İndisler

b	boru
ts	taşıyıcı sıvı
g	gövde
grş	giriş
na	nanoakışkan
çkş	çıkış
np	nanopartikül

Konvansiyonel saf ısı geçişi sıvılarının bazı ısı özellikleri, nanopartiküller eklenerek iyileştirilse de uygulamada nanoakışkanların bazı kritik dezavantajlarıyla da karşılaşmaktadır. Bunlar arasında; nanopartiküllerin kümelenmesi (ya da topaklaşması) ve çökmesi, aşındırıcılık, kısa süreli kararlılık (stabilite), daha yüksek viskozite (artan sürtünme basınç kaybı/pompalama gücü gereksinimi), daha düşük özgül ısı gibi sınırlamalar ve olumsuzluklar sayılabilir (Das vd., 2006, 2007; Ghadimi vd., 2011; Sekhar ve Sharma, 2015). Isıtma, soğutma, akıllı akışkanlar, otomotiv, elektronik, biyomedikal, enerji, mekanik, ısı sistemleri ve benzerleri, nanoakışkanların potansiyel uygulama alanları arasındadır (Minkowycz vd., 2016). Çalışmanın devamında, daha kısa olması nedeniyle konvansiyonel saf ısı geçişi sıvılarından, konvansiyonel saf taşıyıcı sıvı (KSTS) olarak bahsedilecektir.

Endüstriyel ısı sistemlerinde, en yaygın kullanılan pasif ısı geçişi iyileştirme yöntemleri; (1) ısı değiştirici cihazlarda ısı geçişi yüzey alanlarını arttırmak ve/veya (2) taşıyıcı sıvılara eklenen katı partikülleri mümkün olduğunca homojen dağıtmaktır (Webb ve Kim, 2005). Bu nedenle, her iki pasif ısı geçişi iyileştirme yönteminin, ısı sistemlerinde birlikte kullanılmasıyla, ısı geçişinin daha da iyileştirilebileceği düşüncesi, teorik olarak mantıklı bir yaklaşımdır.

Endüstriyel ısı süreçlerinde çok yaygın kullanılan, gövde borulu ısı değiştiricilerde (GBID) (Gupta vd., 2022) ve levhalı ısı değiştiricilerde (LID) (Zhang vd., 2019), yukarıda bahsedilen iki pasif ısı geçişi iyileştirme yönteminin uygulandığı deneysel araştırmalar oldukça fazladır. Bu çalışmalarda, GBIDlerde (makro borulu) ve LIDlerde, ya sadece farklı konsantrasyonlarda hazırlanan nanoakışkanlar doğrudan kullanılmıştır ya da LIDlerde yukarıda bahsedilen iki iyileştirme yöntemi, birleşik etkinin incelenmesi amacıyla bir arada kullanılmıştır. Ancak, LIDlerde olduğu gibi genişletilmiş yüzeyleri bulunmayan ve makro borularla üretilen GBIDlerde, farklı pasif iyileştirme yöntemleri ve nanoakışkanların birleştirilmiş etkileri deneysel araştırmalarla yeterince incelenmemiştir. Literatürde, her iki ısı değiştiricide, farklı nanopartiküllerle hazırlanan nanoakışkanlar kullanıldığında, genellikle KSTSlara göre ısı taşınım katsayısındaki iyileşmeden ve sürtünme faktörünün (basınç düşümünün) değişiminden bahsedilmektedir. Ayrıca,

bahsi geçen iki pasif ısı geçişi iyileştirme yönteminin, ısı sistemlerin ısı ve hidrodinamik performansına yani faydalı ısı güç ve pompalama gücü arasındaki dengeye etkilerinin incelendiği deneysel çalışmalar oldukça kısıtlıdır.

Bu nedenlerle, endüstriyel ısı sistemlerde yaygın kullanılan GBIDlerin, ısı geçişi yüzeyi alan yoğunluklarının, makro borular yerine mini kanallarla artırılmasıyla yetinilmeyip, KSTSların termo-fiziksel özellikleri, KSTSlara eklenen nanopartiküllerle (nanoakışkanlarla) değiştirilerek, ısı taşınım katsayılarındaki iyileşme daha da artırılabilir. Ayrıca mini kanallarla, GBIDlerde sağlanan kompaktlık (yüzey alanı/hacim oranı) artışının yanında, kullanılacak metal malzeme kütlesi ve aracı akışkan miktarları da azaltılabilecektir. Bu yönüyle mini kanallar, çevreye zararlı ve/veya pahalı aracı akışkanların kullanıldığı uygulamalarda, ilk yatırım, işletme ve çevresel maliyetleri de azaltacaktır. Dolayısıyla, mini kanallarla üretilen GBIDlerde, termo-fiziksel özellikleri değiştirilmiş ancak yüksek maliyetli aracı akışkanlar olan nanoakışkanların kullanılmasıyla, minimum maliyetlerle ısı performans artışı sağlanarak, enerji verimliliğinin artırılması beklenmektedir. Böylece yapılacak enerji tasarrufu; hem işletme maliyetleri içerisinde her geçen gün payı artan enerji maliyetlerini, hem de zararlı emisyonların azaltılmasıyla çevresel maliyetleri düşürecektir. Ancak bir arada kullanılan iki pasif yöntemin etkisiyle; ısı geçişinde sağlanan iyileşmeyle birlikte hem hidrolik çaptaki küçülme hem de nanoakışkanların KSTSlara göre değişen termo-fiziksel özelliklerinden, viskozitenin ve yoğunluğun artması nedenleriyle, akış kaynaklı basınç düşümlerindeki yükselmeler de dikkatle değerlendirilmelidir. Çünkü ısı geçişini iyileştirip, enerji tüketimini azaltmak amacıyla yapılan mini kanallı tasarım ve aracı akışkan değişiklikleriyle, pompalama gücündeki olası artışın düşük tutulması önemlidir.

Özetlemek gerekirse, ısı sistemlerde yüksek verimli ısı dönüşümü (faydalı ısı güç aktarımı), ısı taşıyıcı aracı akışkana etkin ısı geçişi ile tanımlanır. Fakat etkin ısı geçişi sağlanırken, ısı sistemlerde enerji kaynaklarının ne kadar verimli kullanıldığını gösteren, işletme maliyetlerinde etkili ve önemli parametrelerden olan aracı akışkanlar için gerekli pompalama gücünün de hesaba katılması önemlidir. Diğer bir ifadeyle, ısı sistemlerdeki yapısal tasarım değişiklikleri ve üstün özellikli yeni aracı akışkanların, ısı etkenlik bakımından sağlayacağı faydaların yanında, hidrodinamik bakımdan muhtemel olumsuz etkileri de göz önünde bulundurularak, genel bir enerji verimliliği değerlendirmesi yapılmalıdır.

## LİTERATÜR ARAŞTIRMASI VE ÇALIŞMANIN ÖZGÜN DEĞERİ

Literatürde  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $CuO$ ,  $TiO_2$ , karbon-nanotüp gibi nanopartiküller ve bunların karışımlarıyla (hibrit) hazırlanan nanoakışkanlarla çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır (Saidur vd., 2011; Sharma vd., 2016). Ancak  $Al_2O_3$  nanopartiküller, diğer nanopartiküllere göre daha düşük maliyetle ve daha kolay temin edildiğinden, literatürdeki deneysel çalışmalarda daha çok tercih edilmiştir (Sergis ve Hardalupas, 2011). Literatür bölümünün çok fazla uzamaması bakımından, çalışmamızın ana teması olan GBIDler ve  $Al_2O_3$  nanopartikülleriyle hazırlanan nanoakışkanlarla yapılan deneysel çalışmalardan, sadece GBIDlerde,  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarının kullanıldığı

çalışmalar seçilmiştir. Bu çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Barzegarian vd. (Barzegarian vd., 2017), GBIDde ( $D_i=5$  mm ve  $L/D\cong 40$ ), 15 nm ortalama çaplı,  $\gamma-Al_2O_3$  nanopartiküller ile üç farklı konsantrasyonda (hacimsel oranlar: %0.03, %0.14 ve %0.3) hazırlanan nanoakışkanlarla, laminer ( $Re=250-1200$  aralığında) ve zıt akış koşullarında, boru tarafındaki sıcak nanoakışkanlardan (soğuyan akışkan) ısı geçişini ve basınç düşümünü deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, KSTSlarla (su) karşılaştırıldığında; nanoakışkanlarla toplam ısı geçiş katsayısındaki en yüksek iyileşmenin; en yüksek  $Re$  sayısında ve %0.3 hacimsel oranda %19.1 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir. Bu koşullarda, %0.3 hacimsel oranlı nanoakışkanın basınç düşümünün de, KSTS suya göre ortalama %22 arttığını belirtmişlerdir. Ancak çalışmada, gövde tarafı ısı ve hidrodinamik koşulları ile boru tarafı ısı koşulları hakkında bilgi verilmemiştir.

Farajollahi vd. (Farajollahi vd., 2010), GBIDnin ( $D_i=4.1$  mm ve  $L/D\cong 160$ ) boru tarafındaki türbülanslı akışta ( $Pe=20,000-60,000$ ),  $\gamma-Al_2O_3$ -su (ortalama partikül çapı 25 nm) nanoakışkanlarına ısı geçişini, sabit gövde tarafı ısı taşınım katsayısında ve zıt akış koşullarında deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar; %0.3-%2 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanları, KSTSlarla (su) kıyaslandığında, toplam ısı geçiş katsayısında en yüksek iyileşmenin  $Pe=50,000$ 'de ve %0.5 hacimsel oranda, %20 olarak elde edildiğini bildirmişlerdir. Ancak çalışmada, gövde tarafı ısı ve hidrodinamik koşulları, boru tarafı ısı koşulları ve basınç düşümleri hakkında bilgi verilmemiştir.

Shahrul vd. (Shahrul vd., 2016), boru iç çapı 6.35 mm ve uzunluğu 1220 mm olan ( $L/D=192$ ) GBIDnin performansını, %0.5 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanıyla deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, sıcak akışkanın giriş sıcaklığını  $70^\circ C$ 'de ve nanoakışkanın giriş sıcaklığını da  $20^\circ C$ 'de sabit tuttukları deneyleri, farklı gövde tarafı ve boru tarafı debilerinde ( $2-8$  l/dk.), hem aynı hem de zıt yönlü akış koşullarında gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerden, boru tarafının  $4$  l/dk.'da ve gövde tarafının  $8$  l/dk.'da tutulduğu deneyde, toplam ısı geçiş katsayısında KSTSlarla (suya) göre %26 iyileşme olduğunu belirtmişlerdir. Ancak çalışmada, akış kaynaklı basınç düşümü sonuçları hakkında bilgiye yer verilmemiştir.

Kabeel ve Abdelgaied (Kabeel ve Abdelgaied, 2016), borularının iç çapı 6.5 mm ve uzunluğu 600 mm ( $L/D\cong 92$ ) olan GBIDde, giriş sıcaklığının  $60^\circ C$  sabit tutulduğu üç farklı hacimsel oranlı (%2, %4 ve %6) soğuyan  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarından ısı geçişinde, KSTSlarla (su) göre iyileşmeyi,  $Re=9500-56,000$  aralığında incelemişlerdir. Araştırmacılar, toplam ısı geçiş katsayısında, KSTS suya göre en yüksek iyileşmenin, %4 hacimsel oranda %29.8 olduğunu ve %4 hacimsel oranlı nanoakışkanla,  $Re\cong 56,000$ 'deki basınç düşümünün de KSTS suya göre %28 arttığını bildirmişlerdir. Ancak çalışmada, gövde tarafı ısı ve hidrodinamik koşulları hakkında bilgi verilmemiştir.

$Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarının, boruları 2.4 mm çaplı ve 248 mm uzunluğunda ( $L/D\cong 103$ ) olan yatay GBIDde, türbülanslı ( $Pe=5\times 10^5-15\times 10^5$ ) ve zıt akış koşullarındaki ısı ve hidrodinamik performansları, Albadr vd. (Albadr vd., 2013) tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar

deneylerde, ortalama çapı 30 nm olan  $Al_2O_3$  nanopartiküllerle, %0.3-%2 aralığındaki 5 farklı hacimsel oranda hazırladıkları nanoakışkanları kullanmışlardır. Toplam ısı geçiş katsayısında KSTSya (su) göre en yüksek iyileşmenin, %2 hacimsel oranda ve en yüksek debide, ~%75 olduğunu ve basınç düşümünün, nanoakışkanların artan viskozitesine rağmen çok az yükseldiğini bildirmişlerdir. Ancak çalışmada, gövde tarafı ısı ve hidrodinamik koşullarıyla, boru tarafı ısı koşulları hakkında bilgi verilmemiştir.

Kumar vd. (Kumar vd., 2018), tam gelişmiş laminer ve türbülanslı akışta,  $Re=1000-11,000$  aralığında, GBIDde ( $D_i=10.7$  mm ve  $L/D=56$ ) boru tarafında ısınan  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarıyla, taşınım ısı geçiş katsayısının değişimini deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar deneyleri, gövde tarafının ısı ve hidrodinamik koşullarını sabit tutarak ve zıt akış koşullarında, %0.01-%0.08 hacimsel oranlı nanoakışkanlarla gerçekleştirmişlerdir. En yüksek  $Re$  sayısında, %0.02, %0.04, %0.06 ve %0.08 hacimsel oranlarda; ısı taşınım katsayısındaki iyileşmelerin, sırasıyla %13, %18, %23 ve %28 olduğu, KSTS suya göre sürtünme faktöründeki oransal artışın, türbülanslı akışta laminer akıştan daha yüksek olduğu, nanopartiküllerin hacimsel oranı arttıkça, sürtünme faktöründe çok düşük bir artış olduğu, ancak nanoakışkanın debisindeki artıştan dolayı, tam gelişmiş türbülanslı akışta sürtünme faktörünün azaldığı belirtilmiştir.

Mansoury vd. (Mansoury vd., 2020), boruları 7.3 mm iç çaplı ve  $L/D=137$  olan GBIDde,  $Re=4200-14,000$  aralığında, %0.2, %0.5 ve %1 hacimsel oranlı, giriş sıcaklıkları  $45^\circ C$ 'de sabit tutulan (sıcak)  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarından ısı geçişini ve basınç düşümünü deneysel incelemişlerdir. Araştırmacılar, KSTS suya göre %0.2, %0.5 ve %1 hacimsel oranlarda; ısı geçişindeki ortalama iyileşmenin, sırasıyla %12, %20 ve %24 ve basınç düşümündeki artışın da sırasıyla %25, %75 ve %85 olduğunu belirtmişlerdir.

Çalışmamızın özgün yönü, GBIDlerde makro borular (hidrolik çapı 6 mm ve üzerinde) yerine mini kanallar (hidrolik çapı 200  $\mu m$ -3 mm aralığında) ve  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanları kullanmanın, ısı ve hidrodinamik performansa etkilerinin deneysel incelenmesidir. Makro borulara (8-60 mm hidrolik çaplı GBIDler için ortalama kompaktlık  $100 m^2/m^3$  (Wadekar, 2005)) göre daha küçük hidrolik çaplı boruların (çalışmamızdaki 2 mm hidrolik çaplı GBID için kompaktlık yaklaşık  $1100 m^2/m^3$ ) kullanılmasıyla, hem ısı değiştiricinin ısı geçişi alan yoğunluğu (birim hacimdeki ısı geçiş alanı yani kompaktlık) arttırılacak hem de artan kompaktlıkla ısı değiştiricide boyut küçülmesi (çalışmamızdaki MK-GBID toplam uzunluğu 440 mm), dolayısıyla malzeme ve maliyet tasarrufu sağlanacaktır. Bu durum şu örneklerle açıklanabilir: (1) GBIDlerde aynı ısı gücünde ve aynı boru uzunluklarında; 10 mm çaplı boruların yerine 1 mm çaplı boruların kullanılması, ısı değiştirici hacmini %95 küçültecektir (Kandlikar, 2007). (2) Isı değiştiricide mini kanal kullanılması, boyutları %30 ve maliyeti %40 azaltacaktır (Trang vd., 2017). (3) Aynı iç akış hacmindeki; 1 mm çaplı boru, 10 mm çaplı boruya göre 10 kat daha büyük yüzey alanı sağlayacaktır (Kandlikar, 2007). (4) Isı değiştiricide aynı akış kesit alanında kanal çapının %50 azaltılması, yerleştirebilecek kanal sayısını

4 kat artıracaktır. Böylece küçük kanalların toplam çevre uzunluğu, büyük kanalın çevre uzunluğunu 2 katına çıkaracaktır. Kanal uzunluklarının eşit olması durumunda, ısı geçişi yüzey alanı da 2 katına çıkacaktır (Van de Bor, 2014). (5) Aynı akış koşullarında hidrolik çap %50 azaltıldığında, ısı taşınım katsayısı hidrolik çapla ters orantılı artacaktır. Aynı hacimde hem ısı taşınım katsayısının hem de kompaktlığın, azaltılan hidrolik çapla ters orantılı artması nedeniyle, aktarılacak toplam ısı gücü, hidrolik çaptaki azalmanın karesiyle orantılı artacaktır (Kakaç vd., 2012). Kompaktlık artışının diğer önemli etkileri de gerekli aracı akışkan miktarlarındaki azalma (çalışmamızdaki MK-GBIDnin; boru tarafı hacmi  $9.8 cm^3$  ve gövde tarafı hacmi  $139.7 cm^3$ ) ve enerjinin daha verimli ve etkin kullanılmasıdır. Böylece, aracı akışkanların kullanım miktarı azaltılarak, ekonomik ve çevresel maliyetlerin azaltılması da hedeflenmiştir. Bu nedenle çalışmamızda, aracı akışkan olarak kullanılan nanoakışkanın maliyeti ve yüksek hacimde/miktarda hazırlama zorlukları göz önüne alındığında, önemli ölçüde tasarruf sağlanmıştır. Bu durum şu örneklerle açıklanabilir: (1) Aynı ısı güçlerinde; iç hacmi 8.4 l olan LID ile iç hacmi 2.9 l olan GBID (2 mm iç çaplı mini kanallı ve iç hacmi %65 daha az) karşılaştırıldığında, gerekli aracı akışkan şarjı %50 azalacaktır (Del Col vd., 2010). (2) 10 mm çaplı kanallar için  $400 m^2/m^3$  olan kompaktlık, 1 mm çaplı kanallar için  $4000 m^2/m^3$  ve 0.5 mm çaplı kanallar için  $8000 m^2/m^3$ 'tür (Kandlikar, 2007). Ancak hidrolik çapı küçültmenin ve nanoakışkan kullanmanın taşınım ısı geçişinde sağladığı iyileşme ve bahsedilen diğer faydalarının yanında, sürtünme basınç kayıplarını artırıcı olumsuz etkileri de çalışmamızda araştırılmıştır. Bu durum şu örnekle açıklanabilir: Aynı gövde iç çapı ve aynı boru demeti tasarım şartlarındaki GBIDde, aynı ısı gücü aktarmak için 5 mm çaplı borular 2 mm'lik borularla değiştirildiğinde, ısı geçişi alanı %30 artarken boru içi akış kesitinin alanı yaklaşık %53 azalacak, ortalama akış hızının %89 artmasıyla basınç kaybı da yükselecektir (Hejicik ve Jicha, 2014). Ayrıca literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, hidrolik çapın küçülmesine ve nanoakışkan kullanımına bağlı olarak ısı geçişindeki iyileşme ve basınç düşümündeki artış arasındaki dengede oluşan değişim de iki farklı termo-hidrodinamik performans ölçütüyle araştırılmıştır. Yani enerjinin daha verimli ve etkin kullanılıp kullanılmadığı, enerji verimliliği ölçütleriyle (ısı geçişi ve basınç düşümü arasındaki etkileşim birlikte değerlendirilerek) irdelenmiştir. Bir başka deyişle de hidrolik çapın küçültülmesinin ve nanoakışkanların kullanılmasının enerji verimliliği bakımından faydalı olup olmadığı gösterilmiştir.

Çalışmanın, literatüre katkısı bakımından önemli yönü; GBIDde (dairesel en-kesitli) mini kanalların ve soğuyan nanoakışkanların birlikte kullanıldığı, ısı ve hidrodinamik şartların çok iyi tanımlandığı, benzer bir deneysel araştırmanın bulunmamasıdır. Literatürdeki diğer mini kanal uygulamalarından farklı olarak bu çalışmada, sadece GBIDde mini kanal ve boru tarafında soğuyan nanoakışkan uygulamasının, ısı ve hidrodinamik performansa etkilerine yoğunlaşmış, deneysel sonuçlar; ısı geçişindeki iyileşme ve basınç düşümündeki artış arasındaki dengenin değişimi gözetilerek değerlendirilmiştir.

## PASİF ISI GEÇİŞİ İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİNİN UYGULANMASI, TASARIM VE YAKLAŞIM

Bu çalışmada MK-GBIDde, boru tarafında soğuyan nanoakışkanların kullanılmasının ısı geçişi ve basınç düşümüne etkileri deneysel incelenmiştir. Isı değiştiricide, aynı ısı ve hidrodinamik koşullarda, sudan-suya ve nanoakışkanlardan-suya ısı geçişi deneyleri yapılmıştır.

Çalışmamızın birinci aşamasında; Kandlikar ve Grande'nin (Kandlikar ve Grande, 2003) mini kanal yaklaşımı dikkate alınarak, Kern (Kern, 1950) yöntemine göre 1.5 kW'lık ortalama ısı güç için tasarlanan ve imalatı yapılan; E-tipi, tek gövdeli ve tek boru geçişli MK-GBIDde, deneysel ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliği, sıcak sudan-soğuk suya ısı geçişi ve basınç düşümü deneyleriyle kontrol edilmiştir. Boru tarafı doğrulama deneylerinin sonuçları, Ünverdi vd. (Ünverdi vd., 2019) ve gövde tarafı doğrulama deneylerinin sonuçları, Küçük vd. (Küçük vd., 2019) tarafından gerçekleştirilen daha önceki deneysel çalışmalarımızda verilmiştir.

İkinci aşamada, gövde tarafında ısınan akışkan koşullarında, boru tarafında ise soğuyan akışkanlar KSTS (su) ve üç farklı hacimsel oranda (%0.2, %0.4 ve %0.8) hazırlanan  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanları için MK-GBIDnin, ısı ve hidrodinamik performansı elde edilmiştir. Bir başka ifadeyle, MK-GBIDde; ısı güç ve pompalama gücü arasındaki ilişkiyi tanımlayan iki farklı termo-hidrodinamik performans ölçütüyle, boru tarafında soğuyan nanoakışkanların, ısı ve hidrodinamik performans bakımından genel enerji verimliliğine olumlu ve/veya olumsuz etkileri araştırılmış ve tartışılmıştır.

Çalışmamızın üçüncü ve son aşamasında; literatürde farklı araştırmacıların, farklı ısı değiştiricilerde, farklı KSTSlar ve farklı nanoakışkanlarla elde ettikleri deneysel ısı güçler ve basınç düşümü sonuçlarıyla, termo-hidrodinamik performans ölçütü sonuçları hesaplanmıştır. Literatürden alınan deneysel verilerle hesaplanan bu sonuçlarla, ısı geçişindeki iyileşmenin ve basınç düşümündeki artışın dengesi gözetilerek, farklı nanoakışkanların ısı sistemlerin enerji kullanma performanslarına etkileri değerlendirilmiş ve deneysel çalışmamızdan elde edilen genel enerji verimliliği sonuçlarının doğruluğu teyit edilmiştir.

### DENEY DÜZENEGİ

Şekil 1'de akış şeması ve test bölgesinin kesit resimleri verilen deney düzeneği; MK-GBID, üç santrifüj pompa, iki LID, iki şamandıralı debimetre (%4 bağıl hatalı), dijital fark basınçölçer (%0.8 bağıl hatalı), dört sıcaklıkölçer (%1 bağıl hatalı), veri toplama kartı, sıcak akışkan döngüsünün beslenmesini sağlayan termostatik tank (2 kW'lık elektrikli ısıtıcı), nanoakışkan tankı (mekanik karıştırıcı), soğuk akışkan döngüsünü besleyen tank, su soğutucusu (4 kW soğutma kapasiteli) ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Test bölgesinin dairesel kesitli mini kanallardan üretilen boru tarafı; iç çap/dış çap oranı 2 mm /3 mm ve uzunlukları 240 mm olan 13 bakır borunun, akışa dik doğrultuda 5 boru sırası oluşturacak şekilde ve 60° döndürülmüş üçgen düzende dizilmesiyle oluşturulan boru demetidir. Gövde tarafı E-tipi tek geçişlidir. İç çapı 30 mm olan gövdedeki akış, yatay-çapraz yönelimli ve %25 kesme oranlı dört şaşırtma levhasıyla düzenlenmiştir. Sıcak nanoakışkanlar, test

bölgesinin boru tarafına (60–500 l/sa. debi aralığında) 40°C sabit sıcaklıkta pompalanırken, soğuk musluk suyu, test bölgesinin gövde tarafına (sabit 375 l/sa.), boru tarafından 20°C daha düşük ve sabit sıcaklıkta pompalanmıştır. Deneyler süresince, her iki akışkanın test bölgesine girişteki sıcaklık değişimleri %2'den azdır. Test bölgesi ısı kaybı ve kazancına karşı iyi yalıtılmıştır.

Deneyler süresince boru tarafı devresinde ve atmosfere açık döngüde dolaştırılan nanoakışkanlar; termostatik tankta ısıtılan (elektrikli ısıtıcıyla) sıcak suyla, lehimli bir LIDde ısıtılmıştır. Gövde tarafı devresinde atmosfere açık döngüde dolaştırılan soğuk musluk suyu ise, diğer lehimli LIDde, su soğutucusundan gelen sabit sıcaklıktaki soğutma suyu ile soğutulmuştur. MK-GBID'nin üretimi ve deneysel çalışmalar, Gerede Meslek Yüksekokulu'ndaki atölyede gerçekleştirilmiştir.

Deneysel araştırmamızdaki; debimetrelerin ölçüm doğrulukları zaman ortalamalı ağırlıklı kap ölçme yöntemiyle, sıcaklıkölçerlerin ölçüm doğrulukları ise hem buzlu-su hem de her seri deneyden önce oda sıcaklığındaki su ile karşılaştırmalı olarak ve dijital fark basınçölçerinin ölçüm doğruluğu da cıvalı U-manometre ile kontrol edilmiştir. Rotametrelerden okunan debiler, veri toplama kartıyla aktarılan boru ve gövde tarafındaki giriş-çıkış sıcaklıkları ve boru tarafı basınç düşümleri, bilgisayarda kayıt altına alınmıştır.

### NANOAKIŞKANLARIN HAZIRLANMASI

Deneysel araştırmamızdaki su bazlı  $Al_2O_3$  nanoakışkanları, üç farklı hacimsel oranda (%0.2, %0.4 ve %0.8) hazırlanmıştır. Nanopartiküllerin kısa sürede çökmesini engellemek ve mümkün olduğunca homojen dağılımını sağlamak, kararlı süspansiyonlar hazırlamak ve aynı zamanda hazırlama maliyetlerini düşürmek amacıyla, nanoakışkanların hacimsel oranları %1'den küçük seçilmiştir. Deneysel araştırmamızda daha düşük maliyetli olması, kolay temin edilebilmesi ve diğer (kimyasal kararlılığı ve yüksek ısı iletim katsayısı gibi) üstünlükleri nedeniyle,  $Al_2O_3$  nanopartikülleri tercih edilmiştir. Kullanılan nanopartiküller, neredeyse küresel şekilli ve ortalama partikül çapı 40 nm'dir.  $Al_2O_3$  nanopartiküllerinin yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı sırasıyla; 3890 kg/m<sup>3</sup>, 880 J/kgK ve 35 W/mK'dir (Somiya, 1989; İnternet, 2023).

Araştırmamızdaki nanoakışkanların hazırlanmasında, iki aşamalı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, önceden hazırlanan nanopartiküller, doğrudan KSTSya eklenmektedir. Ancak iki aşamalı yöntemde nanopartiküller; yüksek yüzey alanı/hacim oranı, yüksek yüzey aktivitesi ve Van der Waals kuvvetleri gibi çekici-itici kuvvetlerin etkileriyle, kümelenmeye ve topaklanmaya yatkındır (Das vd., 2007; Hunter, 2002; Russel vd., 1989). Ayrıca topaklanma, nanoakışkanların termo-fiziksel özelliklerini (ısı iletim katsayısı ve viskozite) ve taşınımı ısı geçişi performansını olumsuz etkilemektedir (Anoop vd., 2009; Ghadimi vd., 2011; Prasher vd., 2006). Bu nedenle, endüstriyel ölçekte, kararlı nanoakışkanların hazırlanmasında karşılaşılan zorlukların aşılması amacıyla, bazı fiziksel ve/veya kimyasal teknikler (yüzey aktif maddesi, nanopartikül yüzey kimyasının ve dolayısıyla yüzey yükünün değiştirilmesi ve nanopartiküllerin topaklanmasını önlemek amacıyla nanoakışkana ultrasonik

enerji verilmesi gibi) uygulanmaktadır. Bu tekniklerin yalnızca biri kullanılabileceği gibi ikisi veya daha fazlası da birlikte kullanılarak, daha kararlı nanoakışkanlar üretilebilmektedir (Wang ve Mujumdar, 2007).

Literatürde genel olarak kararlı ve homojen nanoakışkanlar hazırlamak için üç saate kadar karıştırma süresinin yeterli olacağı ifade edilmiştir. Bu nedenle, deneysel araştırmamızda, endüstriyel ölçekteki (20 litre) nanoakışkanların hazırlanması ve yeterince homojen (kolloid) karışımlar elde edebilmek amacıyla, her bir farklı hacimsel oranlı nanoakışkan, ultrasonik titreşim banyosu (daha yaygın ve diğer yöntemlere göre uygulanması daha kolay) kullanılarak, üç saat boyunca karıştırılmıştır. Ayrıca, herhangi bir etken maddenin (katkı maddesinin) eklenmesi, nanoakışkanların özelliklerini değiştirebileceğinden, çalışmamızda seyreltici veya kararlılık artırıcı kimyasal maddeler kullanılmamıştır.

Nanoakışkanların hazırlanması, kullanılan  $Al_2O_3$  nanopartiküller ve nanoakışkanlar hakkındaki daha ayrıntılı bilgiler, Yılmaz vd. (Yılmaz vd., 2022) tarafından yapılan deneysel çalışmamızda verilmiştir.

## NANOAKIŞKANLARIN TERMO-FİZİKSEL ÖZELİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Deneysel çalışmamızda, nanopartiküllerin ve taşıyıcı sıvı suyun ağırlıkları ve hacmi, hassas ölçek ve terazi

kullanılarak belirlenmiştir. Seçilen hacimsel oranlardaki nanoakışkanların (1 litrelik nanoakışkan karışımı için) hazırlanmasında gerekli (taşıyıcı sıvıya eklenecek) nanopartiküllerin kütlesi, Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır.

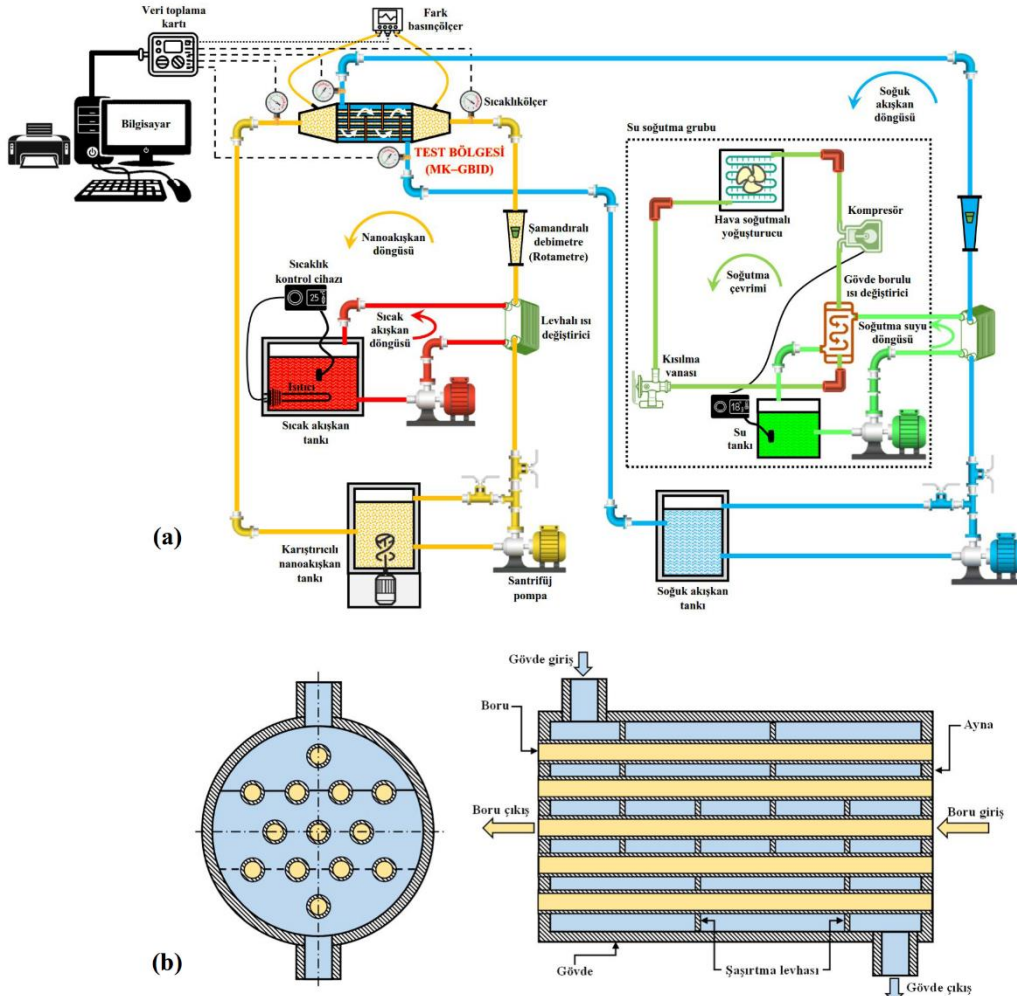
$$m_{np} = \varphi \times 10^{-3} (m^3) \times \rho_{np} \quad (1)$$

Burada,  $m_{np}$  (kg); karışıma eklenecek nanopartikül kütlesi,  $\varphi$  (-); karışımın hacimsel oranı,  $\rho_{np}$  (kg/m<sup>3</sup>); nanopartikülün yoğunluğudur. Nanoakışkanın yoğunluğu ve özgül ısı Eşitlik 2'den ve Eşitlik 3'ten hesaplanmıştır.

$$\rho_{na} = (1 - \varphi) \rho_{ts} + \varphi \rho_{np} \quad (2)$$

$$c_{p,na} = [(1 - \varphi) \rho_{ts} c_{p,ts} + \varphi \rho_{np} c_{p,np}] / \rho_{na} \quad (3)$$

Eşitlik 2'de ve Eşitlik 3'te  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) ve  $c_p$  (J/kgK) sırasıyla yoğunluğu ve özgül ısı, alt indis na, ts ve np sırasıyla nanoakışkanı, taşıyıcı sıvıyı ve nanopartikülü ifade etmektedir. Eşitlik 2'nin geçerliliği, Pak ve Cho (Pak ve Cho, 1998) ve Ho vd. (Ho vd., 2010) tarafından,  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanları için oda sıcaklığında yapılan deneysel çalışmalarla raporlanmıştır. Eşitlik 3'ün geçerliliği, Zhou ve Ni (Zhou ve Ni, 2008) tarafından,  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için oda sıcaklığında yapılan deneysel çalışmada raporlanmıştır. Taşıyıcı sıvı suyun sıcaklığa bağlı termo-fiziksel özelliklerinin hesaplanmasında, Unverdi ve Islamoğlu, (Unverdi ve Islamoğlu, 2017) tarafından önerilen polinomlar kullanılmıştır.



Şekil 1. Deneysel düzeneğin (a) akış şeması ve (b) test bölgesinin kesit resimleri.

## ISIL VE HİDRODİNAMİK PERFORMANSA DAYALI ENERJİ VERİMLİLİĞİ ÖLÇÜTLERİ

MK-GBIDde boru tarafından gövde tarafına ısı geçişi, sıcak akışkanın verdiği ve soğuk akışkanın aldığı ısı güçlerle hesaplanmıştır.

$$Q_b = \rho_b \dot{V}_b c_{p,b} (T_{b,grş} - T_{b,çkş}) \quad (4)$$

$$Q_g = \rho_g \dot{V}_g c_{p,g} (T_{g,çkş} - T_{g,grş}) \quad (5)$$

Burada, Q (W); ısı gücü,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>); yoğunluğa,  $\dot{V}$  (m<sup>3</sup>/s); hacimsel debiye,  $c_p$  (J/kgK); sabit basınçtaki özgül ısıya, T (K); sıcaklığa karşılık gelmektedir. Alt indisler b ve g, grş ve çkş sırasıyla; boru tarafını ve gövde tarafını, giriş ve çıkış koşullarına göstermektedir. Teorik olarak, adyabatik test bölgesi için bu iki ısı güç (sıcak ve soğuk akışkanlar) eşit olmalıdır. Ancak, deneysel çalışmamızdaki debi aralığında, taşıyıcı akışkan su, %0.2, %0.4 ve %0.8 hacimsel oranlı nanoakışkanlarla yapılan deneylerde, gövde (soğuk) ve boru (sıcak) tarafında hesaplanan deneysel ısı güçler arasındaki ortalama farklar, sırasıyla %8, %10.8, %7.4 ve %5.4'den daha azdır.

Isıl sistemlerde kullanılan yeni bir aracı akışkanın ya da bir pasif ısı geçişi iyileştirme yönteminin, genel (ısıl ve hidrodinamik) enerji verimliliği performansına etkilerini belirlemede, ısıl gücün ve pompalama gücünün birlikte dikkate alındığı, aşağıda tanımlanan PDÖ ve VDÖ kullanılmıştır (Ferrouillat vd., 2011; Ma vd., 2014).

### Performans Değerlendirme Ölçütü

PDÖ tanımından da görüleceği üzere; ısıl sistemlerde çok fazla akış enerjisi harcanması, akış enerjisinin verimli bir şekilde taşınması ısı geçişine dönüştürülemediğini göstermektedir. Birbirine alternatif olan aracı akışkanların, aynı ısıl ve hidrodinamik koşullarda, taşıdıkları ısıl güç ve pompalama gücü arasındaki oransal dengenin (enerji performanslarının) karşılaştırılmasında ve değerlendirmesinde kullanılan boyutsuz PDÖ'nün tanımı şu şekildedir:

$$PDÖ = Q / W_{pg} \quad (6)$$

Burada, PDÖ; performans değerlendirme ölçütünü göstermekte, Q (W); aktarılan (taşınan) ısıl gücü ve  $W_{pg}$  (W) ise akışın devamı için gerekli olan pompalama gücüne karşılık gelmektedir.

$$Q = \rho \dot{V} c_p \Delta T \quad (7)$$

$$W_{pg} = \dot{V} \Delta p \quad (8)$$

**Tablo 1.** Ölçüm cihazlarının ölçme hataları ve ortalama belirsizlikler.

Cihazlar	Tipi	Bağıl hata			
Sıcaklık (°C)	K tipi ısıl çift	%1			
Hacimsel debi (l/sa.)	Rotametre	%4			
Basınç düşümü (Pa)	DPC100 dijital fark basınçölçer	%0.8			
<b>Ortalama belirsizlikler (%)</b>					
<b>Akışkanlar</b>	<b>su</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su</b>			
<b>Nanoakışkanın hacimsel oranı</b>	<b>%0.0</b>	<b>%0.2</b>	<b>%0.4</b>	<b>%0.8</b>	
Gövde tarafı ısıl güç (W)*	10.49	15.38	12.98	14.57	
Boru tarafı ısıl güç (W)	2.50	3.52	3.14	3.56	
PDÖ	10.82	15.28	14.00	15.06	
VDÖ	–	18.75	17.71	18.57	

\* 375 l/sa. debi için hesaplanmıştır.

Burada,  $\Delta T$  (°C); aracı akışkanın test bölgesindeki sıcaklık farkına ve  $\Delta p$  (Pa); test bölgesindeki akış kaynaklı basınç düşümüne karşılık gelmektedir.

### Verimlilik Değerlendirme Ölçütü

VDÖ; ısıl sistemlerin, referans duruma (taşıyıcı sıvı) göre farklı alternatif durumlardaki (nanoakışkanlar), karşılaştırmalı genel performans değişimlerini, PDÖ'ye göre daha açık gösterir. Aynı ısıl ve hidrodinamik koşullarda (aynı giriş sıcaklıkları ve aynı hacimsel debilerde) ve aynı hidrolik çaptaki akış kanallarında, farklı aracı akışkanların genel performanslarını değerlendirmek amacıyla kullanılan boyutsuz VDÖ şu şekildedir:

$$VDÖ = (Q_{na} / Q_{ts}) / (W_{pg,na} / W_{pg,ts}) \quad (9)$$

Burada, VDÖ; verimlilik değerlendirme ölçütünü,  $Q_{na}/Q_{ts}$ ; nanoakışkanın ısıl gücünün, taşıyıcı sıvının (nanopartiküllerin kullanılmadığı) ısıl gücüne oranını,  $W_{pg,na}/W_{pg,ts}$  ise nanoakışkanın pompalama gücünün, taşıyıcı sıvının (nanopartiküllerin kullanılmadığı) pompalama gücüne oranını göstermektedir.

Tanımları verilen iki farklı enerji verimliliği performans ölçütünün temel dayanağı; MK-GBIDnin boru tarafındaki taşıyıcı akışkanın (suyun) ve farklı hacimsel oranlı nanoakışkanların, aynı giriş sıcaklıkları ve aynı debilerde, aktardıkları ısıl gücün, her biri için akışın devamında gerekli pompalama gücüne oranlanmasıdır.

### BELİRSİZLİK ANALİZİ

MK-GBID ile yapılan deneylerde kullanılan ölçüm cihazları, özellikleri ve bağıl hataları Tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca aynı Tabloda, Kline ve McClintock (Kline ve McClintock, 1953) tarafından tanımlanan yöntemle; deneysel çalışılan debi aralığında, gövde ve boru tarafında hesaplanan ısıl güçler ile performans ölçütleri PDÖ ve VDÖ için hesaplanan belirsizlikler de verilmiştir.

Farklı boru tarafı debilerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarımızda, gövde tarafı debisinin 375 l/sa.'te sabit tutulması nedeniyle gövde tarafı belirsizlikleri, boru tarafına göre daha yüksektir. Ayrıca deneysel çalışmalarımızda kullandığımız rotametrelerin ölçme belirsizliklerinin diğer ölçme cihazlarına göre daha yüksek olması ve nanoakışkanların basınç düşümünü ölçmede karşılaşılan zorluklar nedeniyle PDÖ'nün ve VDÖ'nün (hesaplamalarda hem ısıl güç hem de basınç düşümü birlikte kullanıldığından) belirsizlikleri yüksektir.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Isı değiştirici cihazların ısı performanslarını artırmak amacıyla uygulanan pasif iyileştirme yöntemleriyle birim hacimdeki ısı geçiş alanının (kompaktlık) artırılması hedeflenmektedir. Kompaktlık artışıyla; aracı akışkan miktarlarında azalma, cihaz boyutlarında küçülme ve ağırlıklarında azalma sağlanarak, yatırım ve işletme maliyetleri düşürülebilmektedir. Kompaktlık artışı sağlanan ısı değiştirici cihazlardaki aracı akışkanların termo-fiziksel özellikleri değiştirilerek/geliştirilerek (örneğin, sıvılar için katı katkı), ısı performans daha da iyileştirilebilir. Nanoakışkanlar, KSTSlara düşük konsantrasyonlarda nanopartiküllerin (katı) eklenmesiyle, ısı performansı iyileştirebileceği düşünülen ve son zamanlarda popüleritesi artan koloit sıvı-partikül süspansiyonlarıdır.

Literatürdeki nanoakışkan çalışmaları hızlıca gözden geçirildiğinde, araştırmacıların üzerinde birleştiği genel sonuçlar; nanoakışkanların ısı iletim katsayısını ve taşınımla ısı geçişini iyileştirdiği, ancak akışkanın akışa karşı direncini temsil eden viskozitenin artışından dolayı akış kaynaklı basınç düşümünü (sürtünme faktörünü) artırma potansiyellerinin yüksek olduğudur. Ayrıca nanoakışkanlarla, ısı iletim katsayısı ve viskoziteye ek olarak, özgül ısı ve yoğunluk da değişmektedir. Ancak literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğunda, nanoakışkanların ısı değiştiricilerin genel enerji performansına etkileri ya hiç tartışılmamıştır ya da nadiren tartışılmıştır.

Viskozitedeki artış, faydalı ısı güç (aracı akışkana aktarılan ısı güç) ile akışın devamı için gerekli pompalama gücü arasındaki dengeyi, pompalama gücünün artışı nedeniyle, olumsuz yönde değiştirecektir. Bir başka ifadeyle, ısı sistemlerde çok fazla akış enerjisinin harcanması, asıl amaç olan basınç düşümünün taşınımla ısı geçişine dönüştürülmesindeki verimsizliği de göstermektedir. Dolayısıyla, ısı sistemlerde aktif ve/veya pasif ısı geçişi iyileştirme yöntemleri değerlendirilirken ve en uygun aracı akışkan seçilirken, taşınımla ısı geçişindeki iyileşmenin yanında, sistemin genel enerji veriminde etkili, pompalama gücü gibi faktörleri de göz önünde bulunduran yaklaşım/yaklaşımlar izlenmelidir.

Sonuç olarak, nanoakışkanlarla KSTSlara göre taşınımla ısı geçişinde bir artış sağlansa da akışın devamı için gerekli pompalama gücü oransal olarak daha fazla artabilir.

Yukarıda özetlenen nedenlerle çalışmamızda, MK-GBIDde, boru tarafında soğuyan nanoakışkanlar kullanılmasının, ısı geçişine ve basınç düşümüne etkileri deneysel incelenmiştir. Çalışmamız üç temel aşamadan oluşmaktadır.

Çalışmamızın ilk aşamasında; GBIDlerin ısı performansını artırmak amacıyla pasif ısı geçişi iyileştirme yöntemi (hidrolik çapın küçültülmesi) uygulanarak tasarlanan, MK-GBIDden (deney düzeneğinin test bölgesi) elde edilen deneysel ölçümlerin doğruluğu ve güvenilirliği hem boru tarafında hem de gövde tarafında sıcak sudan-soğuk suya ısı geçişi ve basınç düşümü deneyleriyle değerlendirilerek, sonuçların literatürle uyumu referans aracı akışkan su için gösterilmiştir. Boru tarafı ve gövde tarafı deneysel ısı geçiş-basınç düşümü doğrulama sonuçları önceki çalışmalarımızda (Küçük vd., 2019; Ünverdi vd., 2019) ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çalışmamızın ikinci aşamasında; doğrulama deneylerinde olduğu gibi, MK-GBIDnin gövde tarafındaki soğuk akışkan (su) debisi 375 l/sa.'de ve giriş sıcaklığı 20°C'de sabit tutulmuştur. Boru tarafı devresinde dolaştırılan su ve üç farklı hacimsel oranda (%0.2, %0.4 ve %0.8) hazırlanan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarının, giriş sıcaklıkları ise gövde tarafından 20°C daha yüksek sıcaklıkta sabit tutulup, debileri de 60-500 l/sa. aralığında değiştirilmiştir. Bu işletme koşullarında, ısı değiştiricide hidrolik çapın küçültülmesinin ve aracı akışkanın termo-fiziksel özelliklerinin değiştirilmesinin/iyileştirilmesinin, ısı ve hidrodinamik performansa birleştirilmiş etkileri değerlendirilmiştir. Başka bir ifadeyle; MK-GBIDde, ısı güç ve pompalama gücü arasındaki dengeyi tanımlayan iki farklı termo-hidrodinamik performans ölçütüyle (enerji verimliliği ölçütleri PDÖ ve VDÖ ile), boru tarafında soğuyan nanoakışkanların ısı ve hidrodinamik performansa olumlu/olumsuz etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışmamızın üçüncü ve son aşamasında; hesaplanan deneysel PDÖ ve VDÖ sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği kontrol edilmiştir. Bu amaçla literatürden; farklı araştırmacıların, farklı ısı sistemlerde, farklı ısı ve hidrodinamik koşullarda, farklı KSTSlarla ve nanoakışkanlarla elde ettikleri, deneysel ısı güç ve basınç düşümü sonuçları kullanılarak, PDÖ ve VDÖ hesaplamaları yapılmıştır. Çalışmamızdan elde edilen verilerle ve literatürden alınan verilerle hesaplanan termo-hidrodinamik performans ölçütü sonuçları kullanılarak, nanoakışkanların ısı sistemlerin genel enerji verimliliğine etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın devamında daha kısa olması nedeniyle, geleneksel/bilinen/konvansiyonel saf taşıyıcı sıvılar (KSTS) taşıyıcı sıvı (TS) olarak adlandırılacaktır.

### Soğuyan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su Nanoakışkanlarının Deneysel Performans Sonuçları

Mühendislik sistemleri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılması önerilen nanoakışkanların, ısı ve hidrodinamik performans değerlendirilmesinde izlenecek gerçekçi bir yaklaşım, hedeflenen ısı güç için gerekli pompalama gücünü, aynı ısı ve hidrodinamik koşullarda, saf aracı akışkan olan TS ve ikame nanoakışkanlar için karşılaştırmaktır.

Günümüze kadar yapılan deneysel çalışmalarda, nanoakışkanların viskozitesinin ve yoğunluğunun, TSlara (su, yağ, etilen glikol gibi) göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, nanoakışkanlarla ve suyla elde edilen deneysel sonuçların, eşit (boyutsuz) Re sayılarında karşılaştırılması yanıltıcıdır. Çünkü Re sayısı, tanımı ( $Re = \rho u D_h / \mu$ ) gereği; akış kanalı geometrisinin, akışkanın termo-fiziksel özelliklerinin (yoğunluk ve viskozite) ve akışın hidrodinamik koşullarının (hız-debi) bir kombinasyonunu temsil eder. Aynı akış kanalında ve eşit Re sayılarında, nanoakışkanların ortalama akış hızları, bahsedilen nedenle (yüksek viskozite ve yoğunluk) TS'ninkinden daha yüksektir.

Dolayısıyla, eşit Re sayılarında yapılan değerlendirmeler, nanoakışkanlara yanıltıcı bir üstünlük sağlar. Açıklamak gerekirse; TS'nin ortalama akış hızı, nanoakışkanların eşit Re sayısındaki ortalama akış hızlarına çıkarılırsa, TS'nin ısı performansı da nanoakışkanlara yaklaşabilir ve/veya nanoakışkanları geçebilir. Ayrıca daha yüksek viskoziteli



nanoakışkanlar için aynı ortalama akış hızında, daha yüksek pompalama gücü gerekecektir. Pompalama gücü de ısı sistemlerde istenilen ısı geçişine (ısıl güce) ulaşmanın bedelini (enerji ve işletme maliyetini) temsil etmektedir.

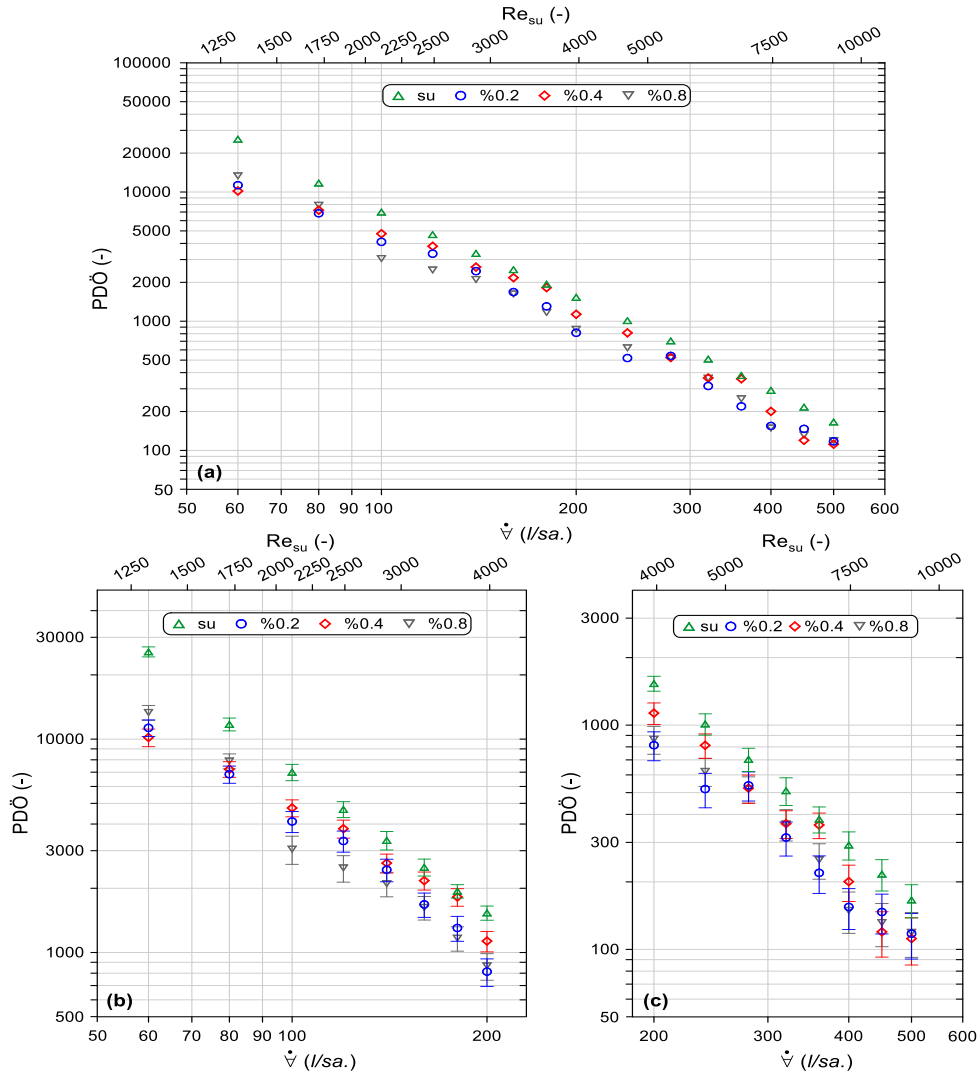
Özetlemek gerekirse, deneysel sonuçların eşit Re sayısında karşılaştırılması; yoğunluk, viskozite ve ortalama akış hızındaki farklılıklardan dolayı, nanoakışkanların ısı iyileştirme oranının, yanıltıcı bir şekilde, gerçekte olduğundan daha büyük gösterilmesine yol açacaktır. Dolayısıyla, nanoakışkanlara taşınımın ısı geçişinde, TS suya göre sağlanan iyileşmenin değerlendirilmesi de eşit ortalama akış hızında (aynı hacimsel debide) veya eşit pompalama gücünde yapılmalıdır. Çünkü eşit Re sayılı akışlarda, nanoakışkanlar lehine daha yüksek ortalama akış hızı (debi)

gerekeceğinden, TSLara göre ısı geçişindeki iyileşmenin daha yüksek elde edilmesi yanıltıcıdır.

Yukarıda bahsedilen nedenlerle, nanoakışkanların deneysel ısıl-hidrokinamik performanslarının bir arada değerlendirilmesinde, hacimsel debiye bağlı değişimleri kullanmak, daha akılcı ve gerçekçi bir yaklaşımdır. Ancak sonuçların değerlendirilmesinde genel hidrokinamik koşullar hakkında fikir vermesi amacıyla, TS suyun hacimsel debilerine karşılık gelen Re sayıları Şekil 2'deki ve Şekil 3'teki grafiklere eklenmiştir. Ayrıca bu şekillere deneysel belirsizliklerin gösterildiği grafikler de eklenmiştir. Bunun yanı sıra çalışmamızda kullandığımız üç farklı hacimsel oranlardaki nanoakışkanların, deneysel sıcaklık ve basınç farklarının ölçüm veri örnekleri, 60 l/sa. ve 100 l/sa. debiler için Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** 60 l/sa. ve 100 l/sa. debiler için örnek deneysel veriler.

	<i>Su</i>		%0.2 <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su</i>		%0.4 <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su</i>		%0.8 <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su</i>		
	$\dot{V}$ (l/sa.)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta p$ (Pa)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta p$ (Pa)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta p$ (Pa)	$\Delta T$ (°C)	$\Delta p$ (Pa)
Boru tarafı	60	6.59	1152	5.98	2198	5.67	2311	5.98	1862
Gövde tarafı	375	0.85	–	0.68	–	0.86	–	0.87	–
Boru tarafı	100	6.97	3982	4.82	4864	5.82	5077	4.32	5872
Gövde tarafı	375	1.66	–	1.22	–	1.44	–	1.06	–



**Şekil 2.** Taşıyıcı sıvı (su) ve  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarının (a) deneysel PDÖ sonuçlarının ve (b)-(c) deneysel belirsizliklerin hacimsel debiye bağlı değişimleri.

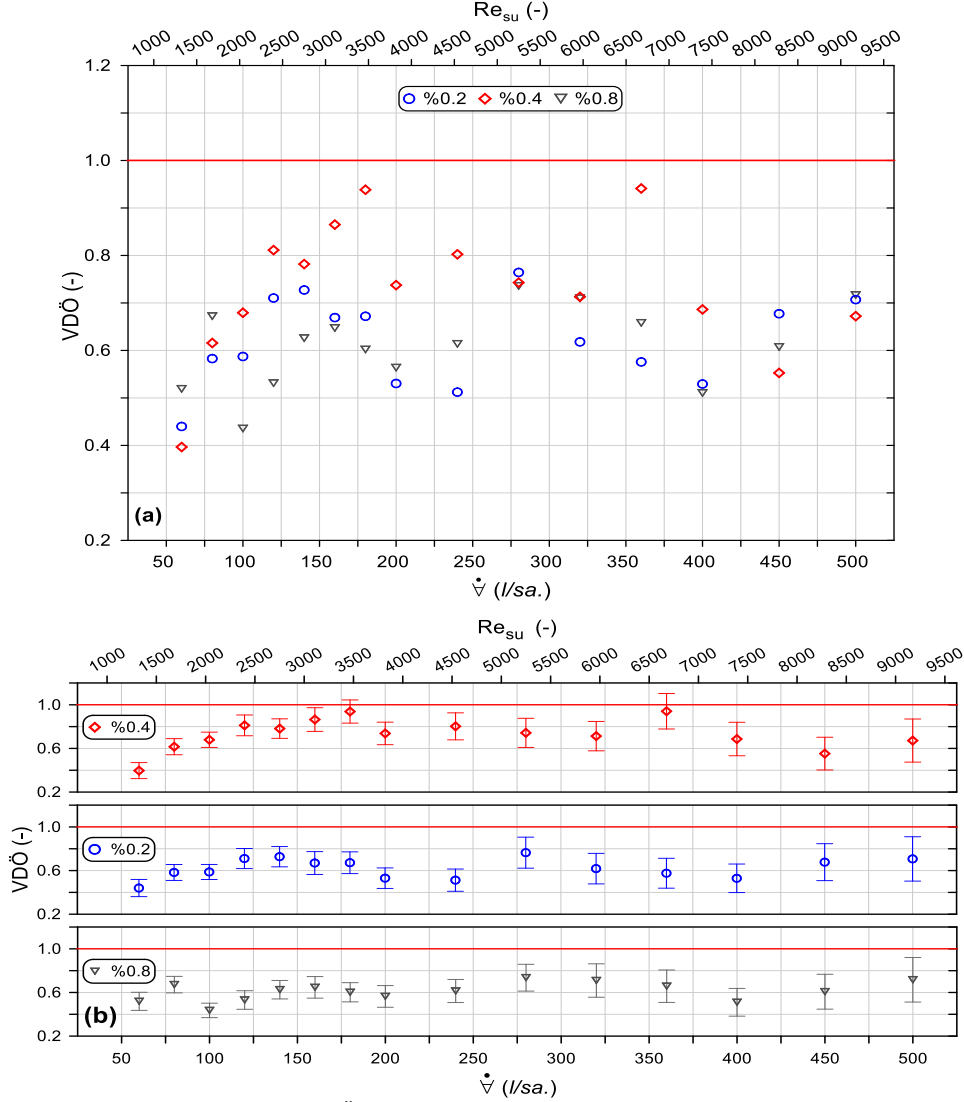
Şekil 2'de, deneysel çalışmadaki TS su ve farklı hacimsel oranlarda hazırlanan  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarıyla elde edilen deneysel verilerle hesaplanan PDÖ'nün, hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir.

Çalışılan debi aralığında, PDÖ sonuçları arasındaki farklar az olsa da TS'nin tüm nanoakışkanlardan daha yüksek performanslı olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre, aracı akışkan olarak TS su yerine nanoakışkanların kullanılması hem enerji ve hem de ilk yatırım maliyetleri bakımından

uygun değildir. PDÖ sonuçlarına göre, MK-GBIDnin boru tarafında soğuyan nanoakışkanların kullanılması anlamsızdır. Başka bir ifadeyle, PDÖ sonuçları; TS suya göre nanoakışkanlarla artan pompalama gücünün, aynı oranda taşınım ile ısı geçişine (ısı güç aktarımına) dönüştürülemediğini göstermektedir.

Şekil 3'te üç farklı hacimsel oranlı nanoakışkanların VDÖ'sünün, hacimsel debiye bağlı değişimleri verilmiştir. VDÖ'ye göre yapılan değerlendirmede, 1'in üzerindeki sonuçlar anlamlıdır.

Çünkü VDÖ'nün 1 ya da 1'e yakın olması, iki alternatif durumda ısı sistemin ısı güçler oranının ( $Q_{na}/Q_{ts}$ ) pompalama güçleri oranına ( $W_{pg,na}/W_{pg,ts}$ ) eşit olduğunu göstermektedir. Şekil 3'te VDÖ sonuçlarının debiye dalgalanarak değişmesinin nedeni, kısa borulardaki iç akışta debiye (ortalama akış hızına) bağlı olarak farklı akış rejimlerinin (laminer akış, geçiş akışı ve türbülanslı akış) baskın olarak görülmesidir. Bunun yanı sıra, nanoakışkanların hacimsel oranına bağlı olarak baskın akış rejimleri arasındaki geçişin görüldüğü debiler de değişmektedir.



**Şekil 3.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarının (a) deneysel VDÖ sonuçlarının ve (b) deneysel belirsizliklerin hacimsel debiye bağlı değişimleri.

Ayrıca nanoakışkanların basınç düşümünün ölçülmesinde karşılaşılan zorluklardan kaynaklanan yüksek belirsizlikler de VDÖ sonuçlarındaki saçılmada etkilidir.

TS su ile nanoakışkanların hacimsel oranına ve debiye bağlı olarak değişen farklı akış rejimlerinden ve nanoakışkanların basınç düşümünü ölçmede karşılaşılan zorluklardan, önceki çalışmalarımızda detaylı bahsedilmiştir (Ünverdi vd., 2019; Yılmaz vd., 2022).

Deneysel VDÖ sonuçlarımıza göre yapılacak genel değerlendirme, PDÖ sonuçlarımızla benzerdir ve MK-GBIDde nanoakışkanları kullanmak anlamlı değildir.

Hem PDÖ'ye hem de VDÖ'ye göre %0.2, %0.4 ve %0.8 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarıyla, artacak enerji maliyetleri ve ilave nanoakışkan hazırlama maliyetleri de

dikkate alınarak yapılan değerlendirmede, MK-GBIDde soğuyan nanoakışkanları kullanmak uygun değildir.

### Nanoakışkan Literatüründen, Deneysel Verilerin Enerji Verimliliği Performans Ölçütleriyle Değerlendirilmesi ve Karşılaştırılması

Çalışmamızdaki deneysel PDÖ ve VDÖ sonuçlarıyla yapılan değerlendirmeye benzer olarak, literatürden farklı araştırmacıların, farklı ısı değiştiricilerle, farklı nanopartikül türleriyle, farklı nanopartikül boyutları ve hacimsel oranlarıyla, farklı işletme koşullarında yaptıkları deneysel çalışmaların sonuçları kullanılarak, nanoakışkanların ısı ve hidrodinamik performans etkileri değerlendirilmiştir.

Tablo 3'te LIDlerde ve Tablo 4'te GBIDlerde, ısı güç ve hidrodinamik performansla ilgili yeterli veriye ulaşılabilen, literatürden; farklı nanoakışkanların kullanıldığı deneysel

çalışmalara ait test bölgelerinin geometrik boyutları ve özellikleri, nanopartikül özellikleri ve hacimsel/kütlesel oranları, ısı ve hidrodinamik koşullar ile elde edilen önemli sonuçlar özetlenmiştir.

DeneySEL çalışmamızda elde edilen PDÖ ve VDÖ sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemek amacıyla, literatürden seçilen deneySEL çalışmaların verileriyle hesaplanan PDÖ ve VDÖ sonuçları Şekil 4'te ve Şekil 5'te verilmiştir. Ayrıca literatürde yayımlanmış her bir deneySEL çalışma için TSLarın ve nanoakışkanların enerji verimliliği performans sonuçlarını ayrı ayrı grafiklerde göstermek yerine Şekil 4'te ve Şekil 5'te deneySEL çalışmaların TSLarı ve nanoakışkanları kendi içerisinde karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. PDÖ ve VDÖ sonuçlarının tanımı gereği her bir çalışmanın TSLarı ve nanoakışkanlarının kendi içerisinde birbirileriyle karşılaştırılması anlamlıdır. Bu nedenle Şekil 4'te ve Şekil 5'te grafiklerin anlaşılmasının kolaylaştırılması amacıyla her bir çalışmaya ait eksenlerde ve simgelerde farklı renkler kullanılmıştır.

Şekil 4a'da görülen PDÖ sonuçları incelendiğinde; LID-1'de hesaplanan PDÖ sonuçlarından, en yüksek performanslı nanoakışkanın (%0.6 hacimsel oranda) TS suya göre daha düşük (ortalama -%16) performanslı olduğu görülmektedir.

LID-2'de, deneylerde kullanılan nanoakışkanların (iki farklı nanopartikül malzemesiyle ve tümü %1 kütlesel oranlı hazırlanan), aynı Re sayılarındaki performanslarının, TS suya göre sırasıyla; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanında ortalama -%5.3 daha düşük, CuO-su nanoakışkanında neredeyse TS suyla aynı ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO-su hibrit nanoakışkanında ise ortalama +%4.8 daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak, LID-2'in kullanıldığı deneySEL çalışmada araştırmacılar, TS su ve nanoakışkanlar için basınç düşümlerini ölçmek yerine, literatürden bir bağıntıyla (Pandey ve Nema, 2012) basınç düşümlerini hesaplayarak ortalama sonuçları vermişlerdir. Nanoakışkanların TS suya göre daha düşük ya da neredeyse aynı olan performansları, eşit Re sayılarında yapılan karşılaştırmaların nanoakışkanlara yanıtıcı bir üstünlük sağladığı da (Soğuyan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su Nanoakışkanlarının DeneySEL Performans Sonuçları bölümü) hatırlanarak değerlendirilmelidir.

LID-3'te hesaplanan PDÖ sonuçlarında, en yüksek performanslı nanoakışkanın (%0.75 hacimsel oranda) TS suya göre daha düşük (ortalama -%10) performanslı olduğu görülmektedir ve bu sonuçlar LID-1 ile benzerdir.

Nanoakışkanların kullanılması yerine; TS suyla daha yüksek Re sayılarına (debilere) çıkılarak, aynı/yakın performans (ısıl güç) artışlarının elde edilebileceği açıktır. Aslında bu sonuçlar; nanoakışkanların tek fazlı ısı geçişi uygulamalarında kullanılmasıyla, TSya göre gerekli akış enerjisinde görülen artışın, yeterince ısıl güç artışına dönüştürülemediğini göstermektedir. Ayrıca bu sonuçlar, deneySEL çalışmamızdaki sonuçları desteklemekte ve TSLarın yerine nanoakışkanların kullanılmasının uygun olmadığını doğrulamaktadır.

Şekil 4b'de VDÖ ile yapılan değerlendirmelerde (TS suya göre); LID-1, LID-2 ve LID-3'ün sonuçlarının 1'e yakın ve çoğunlukla 1'in oldukça altında kaldığı açıkça görülmektedir. VDÖye göre en yüksek sonuçlar; LID-1'de %0.1 hacimsel oranlı Ni-su nanoakışkanında 1.01 (%1

iyileşme), LID-2'de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO-su hibrit nanoakışkanında 1.07 (%7 iyileşme) ve LID-3'te %0.5 hacimsel oranlı CeO<sub>2</sub>-su nanoakışkanında 1.03 (%3 iyileşme)'dür.

PDÖ sonuçlarına benzer olarak VDÖ sonuçları da nanoakışkanları LIDlerdeki tek fazlı ısı geçişi uygulamalarında kullanmanın uygun olmadığını ve nanoakışkanlar yerine, TS suyla daha yüksek Re sayılarına (debilerde) çıkılarak aynı/yakın performansların (ısıl güçlerin) elde edilebileceğini göstermektedir.

Enerji verimliliği performans ölçütleriyle LIDler için yapılan karşılaştırmaların benzeri, GBIDler için de yapılmıştır. Şekil 5a'da GBIDlerde PDÖ ile yapılan değerlendirmelerden; nanoakışkanların GBID-1'de (%1 hacimsel oranlı TDKNT-su için ortalama %32 daha düşük), GBID-2'de (%0.2 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su için ortalama %6 daha düşük) ve GBID-3'te (%0.25 hacimsel oranlı SiC-su için ortalama %7.7 daha düşük) TS suya göre daha düşük performanslı oldukları görülmektedir. Şekil 5b'de VDÖ ile yapılan değerlendirmelerde; GBID-1 ve GBID-3'ün tüm sonuçları 1'in altında iken, GBID-2'de ise en yüksek Re sayısında (%0.2 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su için) en fazla %9'luk (1.09) bir iyileşme olduğu görülmüştür.

Ancak "Soğuyan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su Nanoakışkanlarının DeneySEL Performans Sonuçları" bölümünde bahsedildiği gibi aynı Re sayılarında yapılan değerlendirmede, nanoakışkanların yanıtıcı üstünlüğü de göz önüne alınırsa, LID-1'de %1 kütlesel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO-su nanoakışkanını için yapılan değerlendirmeye benzer olarak, GBIDlerde de TS suyla daha yüksek Re sayılarında (debilerde) çalışılarak aynı/yakın performanslar elde edilebilir.

Çalışmamızdaki MK-GBIDde (Şekil 2'deki ve Şekil 3'teki) ve literatürden seçilen ısı değiştiricilerde (Şekil 4'teki ve Şekil 5'teki) TSLara göre en düşük ve en yüksek farkla PDÖ sonuçlarını veren hacimsel/kütlesel oranlı nanoakışkanların PDÖ sonuçlarının nicel karşılaştırması, Tablo 5'te ve Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca Tablo 5'te ve Tablo 6'da aynı nanoakışkanlar için hesaplanan VDÖ sonuçları da karşılaştırmalı verilmiştir. Bunun yanı sıra Tablo 7'de bu nanoakışkanlarla TSLara göre ısıl güçte ve pompalama gücünde oluşan değişimler ile pompalama gücündeki değişimlerin ısıl güçteki değişimlere oranları da karşılaştırmalı verilmiştir.

Şekil 4'te ve Şekil 5'te hacimsel debi arttıkça, nanoakışkanların basınç düşümü ve pompalama gücünde görülen artışlar, nanoakışkanların hacimsel/kütlesel oranları (nanopartiküllerin) arttıkça daha belirgin hale gelmiştir. Bu ise değerlendirmede kullanılan enerji verimliliği performans ölçütlerinin sonuçlarındaki düşmenin, hacimsel orana bağlı değişen nanoakışkanların viskozitelerinin ve yoğunluklarının, TSLara göre artmasından kaynaklandığını göstermektedir.

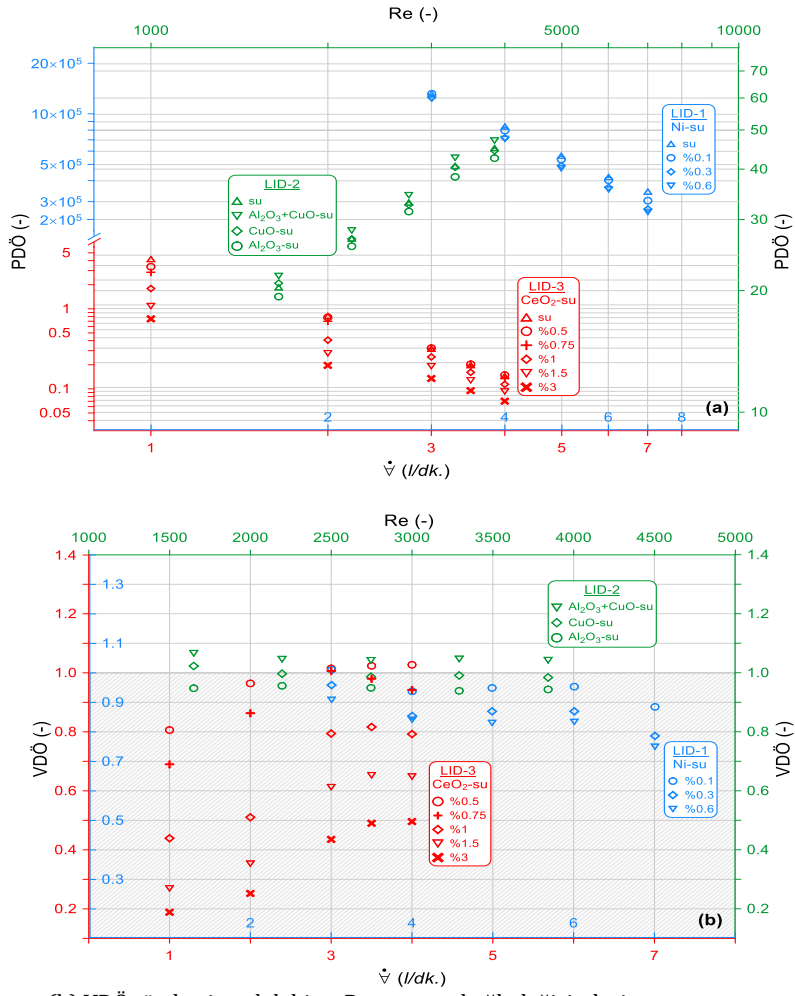
Ayrıca Tablo 5'te ve Tablo 6'da verilen sayısal sonuçlara göre MK-GBIDde TS suyla karşılaştırıldığında, %0.4 ve %0.8 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarının PDÖ sonuçları sırasıyla; en az -%5.9 ve -%26.4; en fazla -%60.3 ve -%56.5; ortalama -%27.1 ve -%39 daha düşük iken, bu hacimsel oranlı nanoakışkanların VDÖ sonuçları ise sırasıyla; en düşük 0.40 ve 0.44; en yüksek 0.94 ve 0.74; ortalama 0.73 ve 0.61'dir.

**Tablo 3.** Levhalı ısı değıştiricilerde nanoakışkanların kullanıldığı deneysel çalışmalar ve önemli sonuçları.

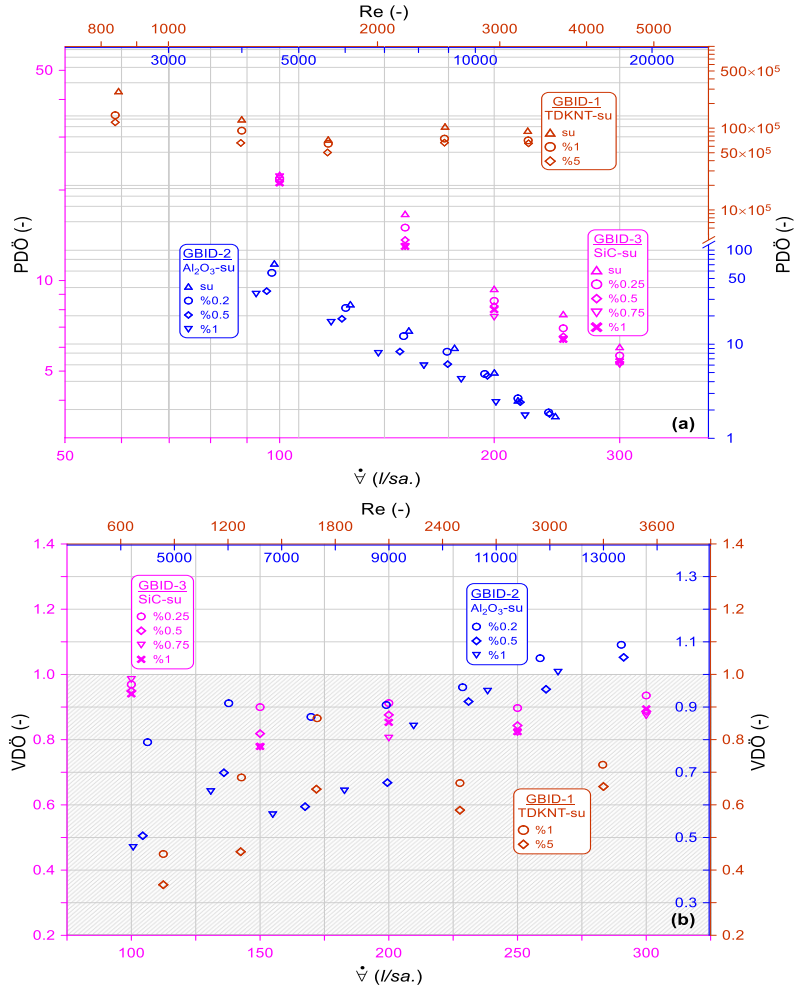
<i>Deney No</i>	<i>Test bölgesi ve önemli değışkenleri</i>	<i>Nanoakışkan (partikül boyutu) Hacimsel/kütlesel oran</i>	<i>İşletme koşulları</i>				<i>Basınç düşümü (Pa)</i>	<i>Önemli sonuçlar</i>
			<i>Isıl koşullar</i>	<i>Re sayısı</i>	<i>Debi</i>	<i>Isıl güç (W)</i>		
LID-1 (Saleh ve Sundar, 2021)	6 levhalı Balıksırtı açısı: 30° Levha uzunluğu: 480 mm Levha genişliği: 180 mm Levhalar arası mesafe: 2.4 mm	Ni-su (72 nm) Hacimsel: %0.1, %0.3, %0.6	80°C (Sıcak su) 30°C (Nanoakışkan)	300-1000	Sıcak su 3 l/dk. Soğuk su 3-7 l/dk.	3800-6200	İki fark basınçölçer kullanarak: 50-200	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sudan-suya deneysel sonuçlar bağıntılarla karşılaştırılmıştır.</li><li>• Suya göre; hacimsel oran artıkça ısı geçişi iyileşmiştir.</li><li>• Suya göre; artan hacimsel oran ve Re sayısı ile basınç düşümünün arttığı belirtilmiştir.</li></ul>
LID-2 (Gürbüz vd., 2020)	12 levhalı Balıksırtı açısı: 60° Levha uzunluğu: 208 mm Levha genişliği: 76 mm Levha kalınlığı: 0.4 mm Paslanmaz çelik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su (77 nm) CuO-su (78 nm) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +CuO-su (-) Kütlesel: %1 (50:50)	-	1500-4000	3-7 l/dk.	7102-19532	Deneysel ölçüm yapılmamış, bağıntılardan hesaplanmış: ~500-1700	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sudan-suya deneysel sonuçlar bağıntılarla karşılaştırılmamıştır.</li><li>• Suya göre; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su, CuO-su ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO-su için ısı geçişinde ortalama iyileşmeler sırasıyla; %4.6, %8.9 ve %9.5'dir.</li><li>• Suya göre; nanoakışkanların daha fazla basınç düşümüne neden olduğu ancak, su ve nanoakışkanların basınç düşümleri arasındaki farkın az olduğu belirtilmiştir.</li></ul>
LID-3 (Tiwari vd., 2013)	10 levhalı Balıksırtı açısı: 30° Levha uzunluğu: 355 mm Levha genişliği: 60 mm Levhalar arası mesafe: 2.4 mm Levha kalınlığı: 0.5 mm	CeO <sub>2</sub> -su (30 nm) Hacimsel: %0.5, %0.75, %1, %1.5, %3	70°C (Sıcak su) 25-30°C (Nanoakışkan)	-	Sıcak su 1-4 l/dk. Soğuk su 1-4 l/dk.	2250-4500	Basınçölçer kullanarak: 37-910	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sudan-suya deneysel sonuçlar bağıntılarla karşılaştırılmamıştır.</li><li>• Suya göre; ısı geçişinde en yüksek iyileşme %0.75 hacimsel konsantrasyonda %15'dir.</li><li>• Suya göre; artan konsantrasyonla ve debiyle, basınç düşümünün arttığı belirtilmiştir.</li></ul>

**Tablo 4.** Gövde borulu ısı değıştiricilerde nanoakışkanların kullanıldığı deneysel çalışmalar ve önemli sonuçları.

Deney No	Test bölgesi ve önemli değışkenleri	Nanoakışkan (partikül boyutu) Hacimsel/kütlesel oran	İşletme koşulları			Isıl güç (W)	Basınç düşümü (Pa)	Önemli sonuçlar
			Isıl koşullar	Re sayısı	Debi			
GBID-1 (Rostami vd., 2020)	Boru tarafı 21 kanatlı borulu (30° ve 45° açılı) Dış çapı: 10 mm Et kalınlığı: 1 mm Uzunluk: 400 mm Kare dizilmiş borular Bakır Gövde tarafı İç çap: 150 mm Et kalınlığı: 2 mm Uzunluk: 400 mm Şaşırtma levhasız Paslanmaz çelik	Tek duvarlı karbon nanotüp (TDKNT)-su Hacimsel: %1, %5	Gövde tarafı Soğuk (20°C) Boru tarafı Sıcak (80°C)	Gövde tarafı – Boru tarafı 850–3300	Gövde tarafı 2.5 l/dk. Boru tarafı 2.5–10 l/dk.	2250–30000	Deneysel ölçüm yapılmamış, bağıntılardan hesaplanmış: 3–43	• Sudan-suya deneysel sonuçlar bağıntılarla karşılaştırılmamıştır. • Suya göre; kütlesel oranın %1'den %5'e artırılmasının ısı geçişinde önemli bir iyileşmeye sağlamadığı, ancak basınç düşümünü arttırdığı belirtilmiştir.
GBID-2 (Mansoury vd., 2020)	Boru tarafı 15 borulu Dış çapı: 9.5 mm Et kalınlığı: 1.1 mm Uzunluk: 1000 mm Kare dizilmiş borular Paslanmaz çelik Gövde tarafı Dış çap: 114.3 mm Et kalınlığı: 3 mm %25 kesme oranlı şaşırtma levhası Boru eksenleri arası mesafe: 18 mm Paslanmaz çelik	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su (20 nm) Hacimsel: %0.2, %0.5, %1	Gövde tarafı Soğuk (–) Boru tarafı Sıcak (45°C)	Gövde tarafı – Boru tarafı 4200–14000	–	5600–8300	Fark basınçölçer kullanarak: 330– 6750	• Sudan-suya deneysel ısı geçişi bağıntılarla karşılaştırılmıştır. • Suya göre; hacimsel oran %0.2, %0.5 ve %1 için ısı geçişinde ortalama iyileşme sırasıyla %12, %3–%20 ve %4–%24'dür. • Suya göre; hacimsel oran %0.2, %0.5 ve %1 için basınç düşümündeki artış %25, %75 ve %85'dir.
GBID-3 (Karimi vd., 2020)	Boru tarafı 28 borulu Dış çapı: 6.25 mm Et kalınlığı: 0.508 mm Uzunluk: 354 mm Boru eksenleri arası mesafe: 8 mm Bakır Gövde tarafı İç çap: 78 mm Et kalınlığı: 3 mm Şaşırtma levhası kesme oranı: %25 Şaşırtma levhalar arası mesafe: 43.75 mm Paslanmaz çelik	SiC-su (50 nm) Hacimsel: %0.25–%1	Gövde tarafı Sıcak (35,45, 55°C) Boru tarafı Soğuk (35, 50°C)	Gövde tarafı – Boru tarafı 350–1100	Gövde tarafı 180 l/sa. Boru tarafı 100–300 l/sa.	250–750	Fark basınçölçer kullanarak: 440– 1620	• Sudan-suya deneysel sonuçlar teorik bağıntılarla karşılaştırılmıştır. • Gövde tarafı 55°C'de tutulduğunda suya göre; hacimsel oran %0.25, %0.5, %0.75 ve %1 için ısı geçişinde yaklaşık iyileşme sırasıyla %3.2, %6.7, %10.1 ve %19.8'dir. • Artan hacimsel oran ve Re sayısı ile basınç düşümünün de arttığı belirtilmiştir.



Şekil 4. LIDlerde (a) PDÖ'nün ve (b) VDÖ'nün hacimsel debi ve Re sayısına bağlı değişimleri.



Şekil 5. GBIDlerde (a) PDÖ'nün ve (b) VDÖ'nün hacimsel debi ve Re sayısına bağlı değişimleri.

**Tablo 5.** Mini kanallı gövde borulu ısı değiştirici ile literatürdeki levhali ısı değiştiricilerin PDÖ ve VDÖ sonuçlarının karşılaştırılması.

MK-GBID (Bu çalışma)						LID-1 (Saleh ve Sundar, 2021)						LID-2 (Gürbüz vd., 2020)						LID-3 (Tiwari vd., 2013)									
$\dot{V}$ (l/sa.)	PDÖ			VDÖ			$\dot{V}$ (l/dk.)	PDÖ			VDÖ			Re	PDÖ			VDÖ			$\dot{V}$ (l/dk.)	PDÖ			VDÖ		
	Su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	%0	Ni-su		Ni-su	Su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	CuO-su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	CuO-su		Su	CeO <sub>2</sub> -su	CeO <sub>2</sub> -su										
	%0	%0.4	%0.8	%0.4	%0.8	%0	%0.1	%0.6	%0.1	%0.6	%0	%1	%1	%1	%1	%0	%0.5	%3	%0.5	%3							
60	25666.06	10179.37	13317.46	0.40	0.52	3	1321260.8	1325428.1	1236802.0	1.01	0.91	1650	20.40	19.33	20.86	0.95	1.02	1	3.59	2.90	0.68	0.81	0.19				
		<b>(-%60.3)</b>	<b>(-%48.1)</b>					<b>(+%0.3)</b>	<b>(-%6.4)</b>					<b>(-%5.2)</b>	<b>(+%2.3)</b>				<b>(-%19.2)</b>	<b>(-%81.1)</b>							
80	11741.28	7229.00	7890.44	0.62	0.67	4	846363.3	798839.3	710974.6	0.94	0.84	2200	26.95	25.76	26.86	0.96	1.00	2	0.73	0.71	0.19	0.96	0.25				
		<b>(-%38.4)</b>	<b>(-%32.8)</b>					<b>(-%5.6)</b>	<b>(-%16.0)</b>					<b>(-%4.4)</b>	<b>(-%0.3)</b>				<b>(-%2.7)</b>	<b>(-%74.0)</b>							
100	7002.02	4756.89	3049.32	0.68	0.44	5	565293.8	536596.9	474332.3	0.95	0.83	2750	33.09	31.39	32.64	0.95	0.99	3	0.30	0.30	0.13	1.01	0.44				
		<b>(-%32.1)</b>	<b>(-%56.5)</b>					<b>(-%5.1)</b>	<b>(-%16.1)</b>					<b>(-%5.1)</b>	<b>(-%1.4)</b>				<b>(%0)</b>	<b>(-%56.7)</b>							
120	4688.87	3804.29	2489.56	0.81	0.53	6	422005.9	403300.3	354556.1	0.95	0.83	3290	40.77	38.27	40.39	0.94	0.99	3.5	0.19	0.19	0.09	1.02	0.49				
		<b>(-%18.9)</b>	<b>(-%46.9)</b>					<b>(-%4.4)</b>	<b>(-%16.0)</b>					<b>(-%6.1)</b>	<b>(-%0.9)</b>				<b>(%0)</b>	<b>(-%52.6)</b>							
140	3356.62	2624.42	2100.15	0.78	0.63	7	345283.7	304249.3	260132.7	0.88	0.75	3840	45.14	42.59	44.42	0.94	0.98	4	0.14	0.14	0.07	1.03	0.50				
		<b>(-%21.8)</b>	<b>(-%37.4)</b>					<b>(-%11.9)</b>	<b>(-%24.7)</b>					<b>(-%5.6)</b>	<b>(-%1.6)</b>				<b>(%0)</b>	<b>(-%50.0)</b>							
160	2511.25	2172.17	1624.75	0.86	0.65																						
		<b>(-%13.5)</b>	<b>(-%35.3)</b>																								
180	1939.25	1819.72	1167.21	0.94	0.60																						
		<b>(-%6.2)</b>	<b>(-%39.8)</b>																								
200	1534.00	1131.35	864.69	0.74	0.56																						
		<b>(-%26.2)</b>	<b>(-%43.6)</b>																								
240	1012.74	812.68	621.40	0.80	0.61																						
		<b>(-%19.8)</b>	<b>(-%38.6)</b>																								
280	704.83	523.62	518.42	0.74	0.74																						
		<b>(-%25.7)</b>	<b>(-%26.4)</b>																								
320	510.17	363.71	362.06	0.71	0.71																						
		<b>(-%28.7)</b>	<b>(-%29.0)</b>																								
360	381.00	358.54	250.62	0.94	0.66																						
		<b>(-%5.9)</b>	<b>(-%34.2)</b>																								
400	292.17	200.54	149.05	0.69	0.51																						
		<b>(-%31.4)</b>	<b>(-%49.0)</b>																								
450	216.67	119.75	131.53	0.55	0.61																						
		<b>(-%44.7)</b>	<b>(-%39.3)</b>																								
500	166.20	111.71	119.07	0.67	0.72																						
		<b>(-%32.8)</b>	<b>(-%28.4)</b>																								

**Not:** Parantez içerisindeki sonuçlar nanoakışkanların PDÖlerinin taşıyıcı sıvılara göre iyileşmelerini/kötüleşmelerini göstermektedir.

**Tablo 6.** Mini kanallı gövde borulu ısı değiştirici ile literatürdeki gövde borulu ısı değiştiricilerin PDÖ ve VDÖ sonuçlarının karşılaştırılması.

MK-GBID (Bu çalışma)						GBID-1 (Rostami vd., 2020)						GBID-2 (Mansoury vd., 2020)						GBID-3 (Karimi vd., 2020)					
PDÖ			VDÖ			PDÖ			VDÖ			PDÖ			VDÖ			PDÖ			VDÖ		
ÿ (l/sa.)	Su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	Re	Su	TDKNT-su	TDKNT-su	Re	Su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su	ÿ (l/sa.)	Su	SiC-su	SiC-su								
	%0	%0.4	%0.8		%0.4	%0.8	%0		%1	%5	%1		%5	%0	%0.2	%1	%0.2	%1	%0	%0.25	%1	%0.25	%1
60	25666.06	10179.37	13317.46	0.40	0.52	850	22798140.3	10242124.3	8091183.0	0.45	0.35	4545	72.5	57.4	34.06	0.79	0.47	100	22.46	21.77	21.13	0.97	0.94
		<b>(-%60.3)</b>	<b>(-%48.1)</b>					<b>(-%55.1)</b>	<b>(-%64.5)</b>					<b>(-%20.8)</b>	<b>(-%53.0)</b>					<b>(-%3.1)</b>	<b>(-%5.9)</b>		
80	11741.28	7229.00	7890.44	0.62	0.67	1275	8956140.2	6124806.0	4085005.1	0.68	0.46	6125	26.6	24.3	17.05	0.91	0.64	150	16.66	14.99	12.99	0.90	0.78
		<b>(-%38.4)</b>	<b>(-%32.8)</b>					<b>(-%31.6)</b>	<b>(-%54.4)</b>					<b>(-%8.6)</b>	<b>(-%35.9)</b>					<b>(-%10.0)</b>	<b>(-%22.0)</b>		
100	7002.02	4756.89	3049.32	0.68	0.44	1700	4590919.6	3973208.0	2974861.5	0.87	0.65	7700	14.0	12.1	7.96	0.87	0.57	200	9.38	8.56	8.01	0.91	0.85
		<b>(-%32.1)</b>	<b>(-%56.5)</b>					<b>(-%13.5)</b>	<b>(-%35.2)</b>					<b>(-%13.6)</b>	<b>(-%43.1)</b>					<b>(-%8.7)</b>	<b>(-%14.6)</b>		
120	4688.87	3804.29	2489.56	0.81	0.53	2500	7061295.5	4708879.4	4121233.5	0.67	0.58	9215	9.1	8.3	5.87	0.91	0.64	250	7.74	6.94	6.38	0.90	0.82
		<b>(-%18.9)</b>	<b>(-%46.9)</b>					<b>(-%33.3)</b>	<b>(-%41.6)</b>					<b>(-%8.8)</b>	<b>(-%35.5)</b>					<b>(-%10.3)</b>	<b>(-%17.6)</b>		
140	3356.62	2624.42	2100.15	0.78	0.63	3290	6142507.6	4440298.9	4029409.5	0.72	0.66	10775	5.0	4.8	4.20	0.96	0.84	300	6.02	5.63	5.38	0.94	0.89
		<b>(-%21.8)</b>	<b>(-%37.4)</b>					<b>(-%27.7)</b>	<b>(-%34.4)</b>					<b>(-%4.0)</b>	<b>(-%16.0)</b>					<b>(-%6.5)</b>	<b>(-%10.6)</b>		
160	2511.25	2172.17	1624.75	0.86	0.65							11820	2.5	2.6	2.38	1.05	0.95						
		<b>(-%13.5)</b>	<b>(-%35.3)</b>											<b>(+%4.0)</b>	<b>(-%4.8)</b>								
180	1939.25	1819.72	1167.21	0.94	0.60							13690	1.7	1.9	1.72	1.09	1.01						
		<b>(-%6.2)</b>	<b>(-%39.8)</b>											<b>(+%11.8)</b>	<b>(+%1.2)</b>								
200	1534.00	1131.35	864.69	0.74	0.56																		
		<b>(-%26.2)</b>	<b>(-%43.6)</b>																				
240	1012.74	812.68	621.40	0.80	0.61																		
		<b>(-%19.8)</b>	<b>(-%38.6)</b>																				
280	704.83	523.62	518.42	0.74	0.74																		
		<b>(-%25.7)</b>	<b>(-%26.4)</b>																				
320	510.17	363.71	362.06	0.71	0.71																		
		<b>(-%28.7)</b>	<b>(-%29.0)</b>																				
360	381.00	358.54	250.62	0.94	0.66																		
		<b>(-%5.9)</b>	<b>(-%34.2)</b>																				
400	292.17	200.54	149.05	0.69	0.51																		
		<b>(-%31.4)</b>	<b>(-%49.0)</b>																				
450	216.67	119.75	131.53	0.55	0.61																		
		<b>(-%44.7)</b>	<b>(-%39.3)</b>																				
500	166.20	111.71	119.07	0.67	0.72																		
		<b>(-%32.8)</b>	<b>(-%28.4)</b>																				

**Not:** Parantez içerisindeki sonuçlar nanoakışkanların PDÖlerinin taşıyıcı sıvılara göre iyileşmelerini/kötüleşmelerini göstermektedir.



**Tablo 7.** Mini kanallı gövde borulu ısı değiştirici ile literatürdeki ısı değiştiricilerin ısıl güçteki ve pompalama gücündeki değişimlerinin karşılaştırılması.

MK-GBID (Bu çalışma)							LID-1 (Saleh ve Sundar, 2021)						GBID-1 (Rostami vd., 2020)							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su							Ni-su						TDKNT-su							
ḡ (l/sa.)	%0.4			%0.8			ḡ (l/dk.)	%0.1			%0.6			Re	%1			%5		
	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ		ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ		ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ
60	-11.9	122.1	10.3	-11.6	91.3	7.9	3	4.8	4.5	0.9	18.1	26.1	1.4	850	176.1	514.6	2.9	138.4	571.8	4.1
80	-18.9	61.7	3.3	-24.0	51.7	2.2	4	3.5	9.6	2.7	13.6	35.3	2.6	1275	227.7	379.3	1.7	164.3	479.4	2.9
100	-7.7	35.9	4.7	-34.6	24.6	0.7	5	5.9	11.6	2.0	16.2	38.4	2.4	1700	248.5	302.7	1.2	173.1	321.5	1.9
120	-12.4	8.0	0.6	-27.1	14.2	0.5	6	4.9	9.8	2.0	20.5	43.4	2.1	2500	42.8	114.2	2.7	30.5	123.6	4.1
140	-11.2	13.6	1.2	-31.9	8.8	0.3	7	7.0	21.5	3.1	21.2	60.8	2.9	3290	23.2	70.5	3.0	16.6	77.7	4.7
160	-11.8	10.8	0.9	-26.2	14.1	0.5	Ortalama	5.2	11.4	2.1	17.9	40.8	2.3	Ortalama	143.7	276.3	2.3	104.6	314.8	3.5
180	-15.4	3.6	0.2	-25.9	23.1	0.9	LID-2 (Gürbüz vd., 2020)*						GBID-2 (Mansoury vd., 2020)							
200	-16.1	28.5	1.8	-28.1	20.9	0.7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su			CuO-su			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -su							
240	-16.1	12.2	0.8	-27.5	18.2	0.7	Re	%1			%1			Re	%0.2			%1		
280	-22.1	9.5	0.4	-24.5	15.3	0.6		ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ		ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ
320	-18.8	31.6	1.7	-24.1	7.0	0.3	1650	4.7	10.5	2.2	13.1	10.5	0.8	4545	9.9	38.7	3.9	23.1	162.0	7.0
360	-13.9	14.2	1.0	-26.8	16.5	0.6	2200	5.7	10.5	1.8	10.2	10.5	1.0	6125	9.5	20.1	2.1	23.8	93.1	3.9
400	-22.7	21.1	0.9	-26.4	44.3	1.7	2750	4.9	10.5	2.1	9.1	10.5	1.2	7700	7.4	23.5	3.2	3.5	81.6	23.3
450	-24.2	37.1	1.5	-25.5	22.7	0.9	3290	3.8	10.5	2.8	9.5	10.5	1.1	9215	2.0	12.6	6.3	4.1	61.8	15.1
500	-24.0	13.1	0.5	-25.4	4.1	0.2	3840	4.3	10.5	2.4	8.8	10.5	1.2	10775	0.1	4.1	41.0	1.6	20.7	12.9
Ortalama	-16.5	28.2	2.0	-26.0	25.1	1.25	Ortalama	4.7	10.5	2.3	10.1	10.5	1.1	11820	12.2	6.9	0.6	17.7	24.0	1.4
							LID-3 (Tiwari vd., 2013)						GBID-3 (Karimi vd., 2020)							
							CeO <sub>2</sub> -su						SiC-su							
							ḡ (l/dk.)	%0.5			%3			ḡ (l/sa.)	%0.25			%1		
								ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ		ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ	ΔQ (%)	ΔW <sub>pg</sub> (%)	ΔW <sub>pg</sub> /ΔQ
							1	3.9	28.9	7.4	2.2	442.0	200.9	100	2.0	5.2	2.6	10.8	17.8	1.6
							2	4.5	8.4	1.9	2.9	307.9	106.2	150	2.3	13.7	6.0	12.6	44.5	3.5
							3	9.4	7.8	0.8	7.3	146.6	20.1	200	2.4	12.3	5.1	19.3	39.9	2.1
							3.5	7.9	5.4	0.7	5.9	116.1	19.7	250	1.8	13.5	7.5	10.5	34.0	3.2
							4	7.9	5.1	0.6	5.4	112.5	20.8	300	2.9	10.1	3.5	16.4	30.2	1.8
							Ortalama	6.7	11.1	2.3	4.7	225.0	73.5	Ortalama	2.3	11.0	4.9	13.9	33.3	2.4

\* Basınç düşümleri deneysel ölçülmemiştir. Tüm nanoakışkanlar için bağıntıdan hesaplanan ortalama pompalama gücü kullanılmıştır.

$$\Delta Q = \frac{Q_{ni} - Q_{is}}{Q_{is}} \times 100, \Delta W_{pg} = \frac{W_{pg,ni} - W_{pg,is}}{W_{pg,is}} \times 100$$

Benzer şekilde, LID-1 için %0.1 ve %0.6 hacimsel oranlı Ni-su nanoakışkanlarının PDÖ sonuçları sırasıyla; en az %0.3 ve -%6.4; en fazla -%11.9 ve -%24.7; ortalama -%5.3 ve -%15.8 farklı/daha düşük iken, bu hacimsel oranlı nanoakışkanların VDÖ sonuçları ise sırasıyla; en düşük 0.88 ve 0.75; en yüksek 1.01 ve 0.91; ortalama 0.95 ve 0.83, LID-2 için %1 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su ve  $CuO$ -su nanoakışkanlarının PDÖ sonuçları sırasıyla; en az -%4.4 ve %2.3; en fazla -%6.1 ve -%1.6; ortalama -%5.3 ve -%0.4 farklı/daha düşük iken, bu nanoakışkanların VDÖ sonuçları ise sırasıyla; en düşük 0.94 ve 0.98; en yüksek 0.96 ve 1.02; ortalama 0.95 ve 1.00, LID-3 için %0.5 ve %3 hacimsel oranlı  $CeO_2$ -su nanoakışkanlarının PDÖ sonuçları sırasıyla; en az %0.0 ve -%50; en fazla -%19.2 ve -%81.1; ortalama -%4.4 ve -%62.9 farklı/daha düşük iken, bu hacimsel oranlı nanoakışkanların VDÖ sonuçları ise sırasıyla; en düşük 0.81 ve 0.19; en yüksek 1.03 ve 0.50; ortalama 0.97 ve 0.37'dir.

GBID-1 için %1 ve %5 hacimsel oranlı TDKNT-su nanoakışkanlarının PDÖ sonuçları sırasıyla; en az -%13.5 ve -%34.4; en fazla -%55.1 ve -%64.5; ortalama -%32.2 ve -%46.0 daha düşük iken, bu hacimsel oranlı nanoakışkanların VDÖ sonuçları ise sırasıyla; en düşük 0.45 ve 0.35; en yüksek 0.87 ve 0.66; ortalama 0.68 ve 0.54, GBID-2 için %0.2 ve %1 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarının PDÖ sonuçları sırasıyla; en az %11.8 ve %1.2; en fazla -%20.8 ve -%53; ortalama -%5.7 ve -%26.7 farklı/daha düşük iken, bu hacimsel oranlı nanoakışkanların VDÖ sonuçları ise sırasıyla; en düşük 0.79 ve 0.47; en yüksek 1.09 ve 1.01; ortalama 0.94 ve 0.73, GBID-3 için %0.25 ve %1 hacimsel oranlı SiC-su nanoakışkanlarının PDÖ sonuçları sırasıyla; en az -%3.1 ve -%5.9; en fazla -%10.3 ve -%22; ortalama -%7.7 ve -%14.2 daha düşük iken, bu hacimsel oranlı nanoakışkanların VDÖ sonuçları ise sırasıyla; en düşük 0.90 ve 0.78; en yüksek 0.97 ve 0.94; ortalama 0.92 ve 0.86'dır.

Tablo 7'deki sayısal sonuçlara göre de MK-GBIDde TS su ile karşılaştırıldığında  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarıyla ısıl güçteki değişimler ( $\Delta Q$ ), pompalama gücündeki değişimler ( $\Delta W_{pg}$ ) ve pompalama gücündeki değişimlerin ısıl güçteki değişimlere oranları ( $\Delta W_{pg}/\Delta Q$ ) sırasıyla; %0.4 hacimsel oranda en fazla -%24.2 ve en az -%7.7, en az %3.6 ve en fazla %122.1 ve en düşük 0.2 kat ve en yüksek 10.3 kat iken; %0.8 hacimsel oranda ise en fazla -%34.6 ve en az -%11.6, en az %4.1 ve en fazla %91.3 ve en düşük 0.2 kat ve en yüksek 7.9 kattır.

Benzer şekilde LID-1'de %0.1 hacimsel oranlı Ni-su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %7.0 ve en az %3.5, en az %4.5 ve en fazla %21.5 ve en düşük 0.9 kat ve en yüksek 3.1 kat iken; %0.6 hacimsel oranlı Ni-su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %21.2 ve en az %13.6, en az %26.1 ve en fazla %60.8 ve en düşük 1.4 kat ve en yüksek 2.9 kattır. LID-2'de %1 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %5.7 ve en az %3.8, ortalama %10.5 ve en düşük 1.8 kat ve en yüksek 2.8 kat iken; %1 hacimsel oranlı  $CuO$ -su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %13.1 ve en az %8.8, ortalama %10.5 ve en düşük 0.8 kat ve en yüksek 1.2 kattır. LID-3'te %0.5 hacimsel oranlı  $CeO_2$ -su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %9.4 ve en az %3.9, en az %5.1 ve en fazla %28.9 ve en düşük 0.6 kat ve en yüksek 7.4 kat iken; %3 hacimsel oranlı  $CeO_2$ -su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %7.3 ve en az %2.2, en az %112.5 ve en fazla %442 ve en düşük 19.7 kat ve en yüksek 200.9 kattır.

GBID-1'de %1 hacimsel oranlı TDKNT-su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %248.5 ve en az %23.2, en az %70.5 ve en

fazla %514.6 ve en düşük 1.2 kat ve en yüksek 3 kat iken; %5 hacimsel oranlı TDKNT-su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %173.1 ve en az %16.6, en az %77.7 ve en fazla %571.8 ve en düşük 1.9 kat ve en yüksek 4.7 kattır. GBID-2'de %0.2 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %12.2 ve en az %0.1, en az -%3 ve en fazla %38.7 ve en düşük 0.5 kat ve en yüksek 41 kat iken; %1 hacimsel oranlı  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %23.8 ve en az %1.6, en az %3.8 ve en fazla %162 ve en düşük 0.8 kat ve en yüksek 23.3 kattır. GBID-3'te %0.25 hacimsel oranlı SiC-su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %2.9 ve en az %1.8, en az %5.2 ve en fazla %13.7 ve en düşük 2.6 kat ve en yüksek 7.5 kat iken; %1 hacimsel oranlı SiC-su nanoakışkanı için sırasıyla; en fazla %19.3 ve en az %10.5, en az %17.8 ve en fazla %44.5 ve en düşük 1.6 kat ve en yüksek 3.5 kattır.

Tablo 5-7'de verilen ve yukarıda özetlenen sonuçlara göre nanopartikül oranı yüksek nanoakışkanların, PDÖ ve VDÖ sonuçları, düşük nanopartikül oranlı nanoakışkanların sonuçlarından daha kötüdür. Ayrıca nanoakışkanların nanopartikül oranı arttıkça, yoğunlukları da artmakla birlikte, nanoakışkanların özgül ısıları da azalmaktadır. Başka bir ifadeyle aynı hacimsel debide TS suya göre yüksek nanopartikül oranlı nanoakışkanların yoğunluğundaki artışla, kütleli debileri artarken, nanoakışkanların özgül ısısındaki azalma nedeniyle ısı taşıma kapasiteleri aynı oranda artmamaktadır. Yani nanopartikül oranındaki artış, TS suya göre nanoakışkanın ısı taşıma kapasitesi bakımından yoğunluğundaki artışla olumlu etki yaparken, özgül ısısındaki azalma bu olumlu etkiyi kısmen kötüleştirmektedir.

Çalışmamızdan elde ettiğimiz PDÖ ve VDÖ sonuçları (Şekil 2, Şekil 3, Tablo 5-7), Tablo 3'te ve Tablo 4'te verilen literatürdeki deneysel çalışmaların hesaplanan PDÖ ve VDÖ sonuçlarıyla (Şekil 4, Şekil 5, Tablo 5-7) uyumlu olarak, tek fazlı ısı geçişi uygulamalarında nanoakışkanları kullanmanın enerji verimliliği bakımından anlamlı olmadığını göstermektedir. Yani ısıl güç ve pompalama gücü, ilk yatırım ve işletme (enerji) maliyetleri bir arada dikkate alındığında, deneysel çalışmamızın sonuçları ve literatürdeki diğer deneysel çalışmaların sonuçları, mühendislik sistemleri olan endüstriyel uygulamalarda, nanoakışkanları kullanmanın uygun olmadığını söylemektedir. Bu nedenle, ısıl sistemlerde aracı akışkana aktarılan ısıl güç ve akışın devamı için gerekli pompalama gücü arasındaki ilişkiyi birlikte değerlendirmek, taşınım ısı geçişindeki iyileşmenin enerji maliyetlerine etkisini daha açık temsil edecektir. Bu sonuçlar, diğer dezavantajları (hazırlama maliyeti, birikme, çökme ve kanalların tıkanması gibi) da göz önüne alındığında, iddia edilen aksine, ısıl sistemlerde ve endüstriyel tek fazlı ısı geçişi uygulamalarında TSLarın yerine nanoakışkanların kullanılmaması gerektiğini göstermektedir.

## DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, MK-GBIDde, boru tarafındaki soğuyan  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanlarının ısı geçişi (ısıl güç) ve basınç düşümü (pompalama gücü) sonuçları deneysel incelenmiştir. Enerji verimliliği bakımından ısı geçişi ve pompalama gücü arasındaki ilişkiyi/dengeyi tanımlayan iki farklı termo-hidrokinamik performans ölçütüyle (PDÖ ve VDÖ), nanoakışkanların ısıl ve hidrokinamik bakımdan KSTSLara göre olumlu ve olumsuz etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca nanoakışkanlarla ilgili literatürden, ısıl güç ve hidrokinamik performansla ilgili yeterli deneysel veriye ulaşılabilen çalışmalar gözden geçirilerek, deneysel çalışmamızdaki

termo-hidrokinamik enerji verimliliği performans ölçütü sonuçları desteklenmiştir.

Çalışmamızdaki MK-GBIDde deneysel performansları incelenen %0.2, %0.4 ve %0.8 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanlarından TS suya en yakın performans sonuçlarını, %0.4 hacimsel oranlı nanoakışkan göstermiştir. TS suyla karşılaştırıldığında, %0.4 hacimsel oranlı nanoakışkanının PDÖ sonuçları en az -%5.9, en fazla -%60.3 ve ortalama -%27.1 farklıdır. Bu hacimsel oranlı nanoakışkanın VDÖ sonuçları ise en düşük 0.40, en yüksek 0.94 ve ortalama 0.73'tür.

Ayrıca %0.4 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanı TS suyla karşılaştırıldığında ısı güçteki ortalama değişim  $\Delta Q = -\%16.5$ , pompalama gücündeki ortalama değişim  $\Delta W_{pg} = +\%28.2$  ve pompalama gücündeki değişimin ısı güçteki değişime oranlarının ortalaması ise  $\Delta W_{pg}/\Delta Q = 2.0$ 'dir. Yani %0.4 hacimsel oranlı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanı için TS suya göre ısı güçlerin ortalaması %16.5 azalırken, pompalama güçlerinin ortalaması %28.2 artmaktadır. Dolayısıyla pompalama güçlerindeki artışların ısı güçlerdeki artışlara oranlarının ortalaması da TS suya göre 2 kat artmıştır.

Aynı hacimsel debide (ortalama akış hızında); nanoakışkanların KSTs'lara göre daha büyük pompalama gücü gereksinimleri, nanoakışkanların artan nanopartikül oranıyla, viskozitenin ve yoğunluğun artmasıyla ve özgül ısının azalmasıyla açıklanmıştır. Yani nanoakışkanlarla artan viskoziteye bağlı olarak, yükselen akış kaynaklı basınç düşümleri nedeniyle, aynı hacimsel debideki pompalama gücü gereksinimi KSTs'dan daha büyüktür. Tam tersine aynı hacimsel debide, yoğunluktaki artışa bağlı olarak nanoakışkanlarla artan kütsel debilere rağmen, özgül ısılarıdaki azalma nedeniyle nanoakışkanların ısı taşıma kapasiteleri aynı oranda artmamaktadır.

Hem deneysel çalışmamızdaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanları hem de literatürden seçilen diğer deneysel çalışmalardaki Ni-su, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su, CuO-su, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO-su, CeO<sub>2</sub>-su, TDKNT-su ve SiC-su nanoakışkanlarının ısı geçişi ve basınç düşümü verileri kullanılarak, aynı hacimsel debilerde/Re sayılarında hesaplanan PDÖ ve VDÖ sonuçları, nanoakışkanların performanslarının KSTs'lara göre daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, endüstriyel tesislerin enerji bütçesi bakımından, nanoakışkanların dezavantajlı olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla nanoakışkanların kullanılması, enerji verimliliği bakımından bu dezavantajlarının önemsiz olduğu özel uygulamalarda (enerji maliyetlerinin önemsiz, yüksek ısı akılarının öncelikli olduğu gibi) söz konusu olabilir.

Sonuç olarak, belirli bir ısı görevin yerine getirilmesinde, KSTs'ların yerine nanoakışkanların kullanılması amacıyla yapılacak değerlendirmelerde, her iki durumda akışın devamı için gerekli pompalama gücü göz önünde bulundurulmalıdır. Isıl sistemlerde kullanılacak nanoakışkanlar gibi yeni aracı akışkanlar ya da farklı iyileştirme yöntemleri değerlendirilirken, sistemin genel enerji veriminde etkili, pompalama gücü gibi faktörleri de göz önünde bulunduran bir yaklaşım izlenmelidir. Ayrıca, tüm ısı sistem ve borulama devresi dikkate alındığında (yani tüm borular, vanalar, ısı değiştiriciler gibi) bu etkinin daha da önem kazanacağına dikkat edilmelidir.

## BİLGİLENDİRME

Çalışmadaki deneysel veriler, yazarların yazılı onayı olmadan kullanılamaz.

## KAYNAKLAR

Albadr, J., Tayal, S., & Alasadi, M. (2013). Heat transfer through heat exchanger using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid at different concentrations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 1(1), 38–44.

Anoop, K. B., Kabelac, S., Sundararajan, T., & Das, S. K. (2009). Rheological and flow characteristics of nanofluids: Influence of electroviscous effects and particle agglomeration. *Journal of Applied Physics*, 106(3), 034909.

Barzegarian, R., Aloueyan, A., & Yousefi, T. (2017). Thermal performance augmentation using water based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gamma nanofluid in a horizontal shell and tube heat exchanger under forced circulation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 86, 52–59.

Bianco, V., Manca, O., & Nardini, S. (2011). Numerical investigation on nanofluids turbulent convection heat transfer inside a circular tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(3), 341–349.

Chand, R. (2017). *Nanofluid Technologies and Thermal Convection Techniques*. IGI Global, USA.

Choi, S. U. S. (2009). Nanofluids: From Vision to Reality Through Research. *Journal of Heat Transfer*, 131(3), 03310.

Das, S. K., Choi, S. U. S., & Patel, H. E. (2006). Heat Transfer in Nanofluids-A Review. *Heat Transfer Engineering*, 27(10), 3–19.

Das, S. K., Choi, S. U. S., Yu, W., & Pradeep, T. (2007). *Nanofluids*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

Del Col, D., Cavallini, A., Da Riva, E., Mancin, S., & Censi, G. (2010). Shell-and-tube minichannel condenser for low refrigerant charge. *Heat Transfer Engineering*, 31(6), 509–517.

Farajollahi, B., Etemad, S. G., & Hojjat, M. (2010). Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1–3), 12–17.

Ferrouillat, S., Bontemps, A., Ribeiro, J.-P., Gruss, J.-A., & Soriano, O. (2011). Hydraulic and heat transfer study of SiO<sub>2</sub>/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32(2), 424–439.

Ghadimi, A., Saidur, R., & Metselaar, H. S. C. (2011). A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17–18), 4051–4068.

Gonçalves, I., Souza, R., Coutinho, G., Miranda, J., Moita, A., Pereira, J. E., Moreira, A., & Lima, R. (2021). Thermal conductivity of nanofluids: A Review on prediction models, controversies and challenges. *Applied Sciences*, 11(6), 2525.

Gupta, S. K., Verma, H., & Yadav, N. (2022). A review on recent development of nanofluid utilization in shell & tube heat

- exchanger for saving of energy. *Materials Today: Proceedings*, 54, 579–589.
- Gürbüz, E. Y., Sözen, A., Variyenli, H. İ., Khanlari, A., & 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.
- Hejcik J., & Jicha M. (2014). Single phase heat transfer in minichannels. *EPJ Web of Conferences*, 67, 02034.
- Ho, C. J., Liu, W. K., Chang, Y. S., & Lin, C. C. (2010). Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(8), 1345–1353.
- Hunter, R. J. (2002). *Foundations of Colloid Science*, Oxford University Press, New York.
- Internet, (2023). Accuratus Corporation, Alumox, <https://www accuratus.com/pdf/995aluminaprops.pdf>.
- Kabeel, A. E., & Abdelgaied M. (2016). Overall heat transfer coefficient and pressure drop in a typical tubular exchanger employing alumina nano-fluid as the tube side hot fluid. *Heat and Mass Transfer*, 52(8), 1417–1424.
- Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design* (Third Ed.). CRC Press, New York.
- Kandlikar, S. G. (2007). A roadmap for implementing minichannels in refrigeration and air-conditioning systems-Current status and future directions. *Heat Transfer Engineering*, 28(12), 973–985.
- Kandlikar, S. G., & Grande, W. J. (2003). Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transfer Engineering*, 24(1), 3–17.
- Karimi, S., Heyhat, M. M., Isfahani, A. H. M., & 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.
- Kern, D. Q. (1950). *Process Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- Kline, S. J., & McClintock, F. A. (1953). Describing uncertainties in single sample experiments. *Mechanical Engineering*, 75(1), 3–8.
- Küçük, H., Ünverdi, M., & Senan, Yılmaz, M. (2019). Experimental investigation of shell side heat transfer and pressure drop in a mini-channel shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118493.
- Kumar, N., Sonawane, S. S., & Sonawane, S. H. (2018). Experimental study of thermal conductivity, heat transfer and friction factor of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 90, 1–10.
- Ma, L., Yang, J., Liu, W., & Zhang, X. (2014). Physical quantity synergy analysis and efficiency evaluation criterion of heat transfer enhancement. *International Journal of Thermal Sciences*, 80, 23–32.
- Mansoury, D., Doshmanziari, F. I., Kiani, A., Chamkha, A. J., & Sharifpur, M. (2020). Heat Transfer and Flow Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Nanofluid in Various Heat Exchangers: Experiments on Counter Flow. *Heat Transfer Engineering*, 41(3), 220–234.
- Minkowycz, W. J., Sparrow, E., & Abraham, J. P. (2013). *Nanoparticle Heat Transfer and Fluid Flow*. CRC Press, New York.
- Pak, B. C., & Cho Y. I. (1998). Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151–170.
- Pandey, S. D., & 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.
- Prasher, R., Phelan, P. E., & Bhattacharya, P. (2006). Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid). *Nano Letters*, 6(7), 1529–1534.
- Rostami, M. H., Najafi, G., Ghobadin, B., & Motevali, A. (2020). Thermal performance investigation of SWCNT and graphene quantum dots nanofluids in a shell and tube heat exchanger by using fin blade tubes. *Heat Transfer*, 49(8), 4783–4800.
- Russel, W. B., Saville, D. A., & Schowalter, W. R. (1989). *Colloidal Dispersions*. Cambridge University Press, New York.
- Saidur, R., Leong, K. Y., & Mohammed, H. A. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1646–1668.
- Saleh, B., & 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.
- Sekhar, Y. R., & Sharma, K. V. (2015). Study of viscosity and specific heat capacity characteristics of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids at low particle concentrations. *Journal of Experimental Nanoscience*, 10(2), 86–102.
- Sergis, A., & Hardalupas, Y. (2011). Anomalous heat transfer modes of nanofluids: a review based on statistical analysis. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 391.
- Shahrul, I. M., Mahbulul, I. M., Saidur, R., & Sabri, M. F. M. (2016). Experimental investigation on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-W, SiO<sub>2</sub>-W and ZnO-W nanofluids and their application in a shell and tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 97, 547–558.
- Sharma, A. K., Tiwari, A. K., & Dixit, A. R. (2016). Rheological behavior of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 779–791.

- Somiya, S. (1989). *Advanced Technical Ceramics*. Academic Press, California.
- Tiwari, A. K., Ghosh, P., & Sarkar, J. (2013). Heat transfer and pressure drop characteristics of CeO<sub>2</sub>/water nanofluid in plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 57(1–2), 24–32.
- Trang, N. V., Trung, D. T., & Dzung, D. V. (2017). Experimental Study of Alternative Minichannel Heat Exchanger for Scooter Radiator. *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*, 6(4), 46–50.
- Unverdi, M., & Islamoglu, Y. (2017). Characteristics of heat transfer and pressure drop in a chevron-type plate heat exchanger with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluids. *Thermal Science*, 21(6 Part A), 2379–2391.
- Unverdi, M., Küçük, H., & Yılmaz, M. S. (2019). Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a mini-channel shell and tube heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*, 55, 1271–1286.
- Van de Bor, D. M. (2014). *Mini-channel heat exchangers for industrial distillation processes*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Wadekar, V. V. (2005). Heat Exchangers in Process Industry and Mini- and Microscale Heat Transfer. *Proceedings of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology*, USA, 318–322.
- Wang, X.-Q., & Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1–19.
- Webb, R. L., & Kim, N. H. (2005). *Principles of Enhanced Heat Transfer* (2nd Ed.), Taylor and Francis, New York.
- Yılmaz, M. S., Ünverdi, M., Küçük, H., Akcakale, N., & 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.
- Zhang, J., Zhu, X., Mondejar, M. E., & Haglind F. (2019). A review of heat transfer enhancement techniques in plate heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 305–328.
- Zhou, S.-Q., & Ni, R. (2008). Measurement of the specific heat capacity of water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *Applied Physics Letters*, 92(9), 093123.