

Araștırma Makalesi

Research Article

ÜÇ KANALLI ISI DEĞİŞTİRİCİDE HİBRİT NANOAKIŞKANIN CEBRİ TAŞINIMA ETKİSİ

Gülenay Alevay KILIÇ^{1*} Imen MERIEM², Ziad SAGHIR³

¹ Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye
²Brothers Mentouri Constantine Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, Constantine, Cezayir
³Toronto Metropolitan Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, M5B 2K3, Toronto, Kanada

Anahtar Kelimeler	Öz
Hibrit Nanoakışkan,	Bilgisayar işlemcilerinin soğutulması, bilgisayarın stabil çalışması ve
Zorlanmış Isı Taşınımı,	performansının korunması için önemlidir. Yüksek sıcaklıklar işlemcinin
Laminer Akış,	performansını düşürmekte ya da zarar vermektedir. Bu nedenle, hava soğutma
Titanyum Dioksit,	sistemleri dışında sıvı soğutma sistemleri de kullanılmaktadır. Sıvı soğutma, ısıyı
Silikon Dioksit.	iletmek için akışkan kullanarak genellikle daha etkili ve sessiz çalışmaktadır. Hibrit
	nano akışkanlar (HNA) ise bir sistemde mümkün olan ısı transferini artırmak için
	kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bilgisayar işlemcilerinden Intel i7 vb için kullanılan
	üç kanallı bir ısı değiştirici aracılığıyla HNA'nın zorlanmış akış temelli sistemdeki
	termal etkileri deneysel olarak incelenmiştir. HNA olarak %0.5 titanyum dioksit
	(TiO ₂) + %0.5 silisyum dioksit (SiO ₂) kullanılmıştır. Model için yapılan düzenek,
	laminer akışta ve sabit ısı akısı sağlanacak şekilde şartlandırılmıştır. Deneylerde
	HNA'nın, ısı emici üzerindeki termal etkileri beş farklı akış hızı için
	senaryolaştırılmıştır. Bununla beraber HNA'nın ve modelin termal yeterliliğini
	gözlemlemek için Nusselt sayısından yararlanılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda
	HNA hızı 150 mm/s iken ısıl iletiminin %20 arttığı gözlemlenmiştir.

EFFECT OF HYBRID NANOFLUID ON FORCED CONVECTION IN THREE-CHANNEL HEAT EXCHANGER

Keywords	Abstract
Hybrid Nanofluid, Forced Convection, Laminar Flow, Titanium Dioxide, Silicon Dioxide.	The cooling of computer processors is vital for maintaining stability and performance. High temperatures can degrade the processor's performance or even cause damage. Therefore, liquid cooling systems are used in addition to air cooling systems. Liquid cooling, which uses a fluid to transmit heat, is generally more effective and quieter. Hybrid nano fluids (HNF) are used to enhance heat transfer in a system. In this study, the thermal effects of HNF in a forced flow-based system were experimentally investigated using a three-channel heat exchanger for computer processors such as Intel i7. A mixture of 0.5% titanium dioxide (TiO ₂) and 0.5% silicon dioxide (SiO ₂) was used as HNF. The setup for the model was conditioned for laminar flow and provided a constant heat flux. In the experiments, scenarios were formulated to assess the thermal effects of HNF on the heat absorber for five different flow rates. Additionally, the Nusselt number was utilized to observe the thermal efficiency of both HNF and the model. As a result of the obtained data, it has been observed that thermal conduction increases by 20% when the HNA velocity is 150 mm/s.

Alıntı	/ Cite
--------	--------

Kılıç, G.A., Meriem, I., Saghir, Z., (2025). Hibrit Nanoakışkanın Cebri Taşınım Performansının Üç Kanallı Isı Değiştiricide İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 155-164.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process		
G.A. Kılıç, 0000-0002-3513-8785	Başvuru Tarihi / Submission Date	15.03.2024	
I. Meriem 0000-0003-4254-0120	Revizyon Tarihi / Revision Date	16.12.2024	
Z. Saghir, 0000-0002-6199-0314	Kabul Tarihi / Accepted Date	25.12.2024	
-	Yayım Tarihi / Published Date	20.03.2025	

^{*} İlgili yazar / Corresponding author: gulenay.kilic@yalova.edu.tr, +90-226-817-7459

EFFECT OF HYBRID NANOFLUID ON FORCED CONVECTION IN THREE-CHANNEL HEAT EXCHANGER

Gulenay Alevay Kilic^{1†}, Imen Meriem², Ziad Saghir³

^{1*} Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye
 ²Brothers Mentouri Constantine Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, Constantine, Cezayir
 ³Toronto Metropolitan Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, M5B 2K3, Toronto, Kanada

Highlights

- HNF $(0.5\% \text{ TiO}_2 + 0.5\% \text{ SiO}_2)$ enhanced heat transfer by 23.10%.
- Thermal conductivity increased by 20% at 150 mm/s, with no significant gains beyond this velocity.
- High-conductivity, low-concentration materials are needed to minimize pressure drops; further research is required for different geometries.

Graphical Abstract



Purpose and Scope

This study aimed to observe the contribution of a hybrid nano fluid (HNF) to heat transfer in a three-channel heat exchanger under laminar flow and forced convection conditions for liquid cooling applications of microchips.

Design/methodology/approach

 TiO_2 and SiO_2 were identified as beneficial for microchip cooling. An experimental setup matching an Intel i7 processor's surface area was designed to analyze HNF performance in a three-channel heat exchanger under laminar flow and forced convection at different velocities.

Findings

Experiments showed that HNF (0.5% TiO₂ + 0.5% SiO₂) enhanced heat transfer by 23.10%. Thermal conductivity increased by 20% at 150 mm/s compared to 50 mm/s, while higher velocities (200-250 mm/s) had no significant effect.

Originality

In this study, a liquid-cooled microprocessor was designed, and the synthesis of TiO_2 and SiO_2 together, which has not been found in cooling applications in the literature, was carried out. The obtained data indicates a 20% advantage in heat transfer when the liquid coolant is at 150 mm/s, with a heat flux applied. However, it has been determined that higher flow rates of HNF are not necessary due to the lack of a significant increase in thermal effect at flow velocities exceeding 150 mm/s.

[†] Corresponding author: gulenay.kilic@yalova.edu.tr, +90-226-817-7459

1. Giriș (Introduction)

Hava soğutmalı ısı emiciler, çoğunlukla elektronik cihazların soğutulması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle ısınmış yüzeye; tek/çoklu kare, dikdörtgen veya dairesel modüller (çubuklar) gibi geniş yüzeyli ısı emiciler monte edilmektedir. Bunun dışında daha dar yüzeylerden oluşan soğutma amaçlı pasif ısı değiştiricileri de yerleştirilmektedir. Elektronik cihaz bileşenlerinden biri olan çiplerin ürettiği ısı, termal yayıcı ve termal ara yüz malzemesinden ısı emicisine ulaşarak burada cebri veya serbest konveksiyonla soğutulmaktadır.

Termal ara yüz son zamanlarda metal malzeme kullanılarak açık hücreli hafif gözenekli yapılardan üretilmektedir. Diğer bir deyişle bu metal köpük, elektronik soğutma gibi düşük sıcaklık uygulamalarından yüksek sıcaklık uygulamalarına kadar kullanılabilmektedir. Aynı zamanda belirli bir gözeneklilik, geçirgenlik ve farklı homojen yoğunluk dağılımlarına sahiptir (Plant vd., 2020; Bayomy ve Saghir, 2017).

Nano akışkanlar, sıvının uygulanmasında karşılaşılan maliyet ve akış sisteminin genel verimliliği gibi birkaç dezavantajın yanında termal gelişme sağlayabilen bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak bu alandaki çalışmalar, performans optimizasyonu gibi belirli zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Araştırmacılar nano akışkanların kullanımından kaynaklanan dezavantajları aşma ve performansı artırma gibi sorunlarla mücadele etmektedir. Bunlar arasında, nano akışkan kullanımının yarattığı yüksek basınç düşüşü ve buna bağlı olarak artan pompalama gücü gibi sorunlar bulunmaktadır. Bu sorun genellikle saf sıvıya kıyasla artan bir akışkan viskozitesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, bu endişeler yüksek konsantrasyonlu nano akışkanlar kullanılarak giderilebilmektedir. Dolayısıyla artan parçacık konsantrasyonu termal gelişmeye doğru bir eğilim göstermektedir (Kimura ve Lipeles, 2006; Bumataria vd., 2019).

Geleneksel akışkanlar yerine Grafen oksit (GO) bazlı nanoakışkanlar, yüksek ısıl iletkenlik özellikleri nedeniyle uygulama alanı bulmaktadırlar. Karabulut ve ark. (2020), grafen oksit (GO)-su nanoakışkanının laminer akış koşullarında ısı transferi performansını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, %0.02 GO konsantrasyonunda ısıl iletkenlikte %9.85'lik bir artış gözlemlemişlerdir. Ayrıca, 1.5 l/dk debi (Re=2023) ve 2536.62 W/m² ısı akısı koşullarında, ısı taşınım katsayısında %13.9'luk bir artış elde etmişlerdir. Araştırmacılar, GO-su nanoakışkanının özellikle yüksek ısı akılarında ve belirli Reynolds sayılarında geleneksel çalışma akışkanlarına alternatif olabileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, nanoakışkanların pratik uygulamalarda kullanımı için uzun süreli kararlılıklarının artırılması gerektiğini vurgulamışlardır. Uzun süreli kararlılık gösteren nanoakışkanlar arasında yer alan Al₂O₃ ise mikrokanallarda kullanılabilmektedir. Shi vd. (2018) tarafından yürütülen bir çalışmada, sulu Al₂O₃'in laminer akış halinde mikrokanalda kullanılması durumunda basınç düşüşü ve konvektif ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarında, bakır bir mikrokanalda durağan koşullar altında sabit ısı akısı uygulanmıştır. %1 ve %2 Alüminyum içeren nano akışkan ile saf suyun ısıl özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, saf suya kıyasla %1 Alüminyum ve %2 Alüminyum içeren nano akışkanların ısıl etkilerinde sırasıyla %5.86 ve %8.49 oranında artış olduğunu göstermektedir.

Hibrit nano akışkanlar (HNA) ise çoğunlukla farklı bileşenlerden oluşan birden fazla nano boyutlu malzemenin bir akışkan içinde dağılmasıyla oluşur. Hibrit nano akışkanlar, farklı malzemelerin birleşik özelliklerinden yararlanmak için kullanılmaktadır. Örneğin, metal nanopartiküller ve polimerik nanopartiküllerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir hibrit nano akışkan hem metalin iletkenliği hem de polimerin mekanik dayanıklılığı gibi özellikleri içermektedir. Saba vd. (2018), asimetrik duvarlara sahip genişleyen bir kanalda hibrit alümina/bakır nano akışkanların etkisini inceleyen sayısal bir araştırma yapmışlardır. Modelin diferansiyel denklemlerini çıkarmak için Runge-Kutta-Fehlberg algoritmasını uygulamışlardır. Kanallı, silindir ve levha yüzeyler modellenerek levha şeklinin daha yüksek ısı transferi sağlayabildiğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla HNA performansını artırmak için başka bir olası faktörün farklı geometrik yüzeylere bağlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Isi transferi performansını artırmak için yenilikçi yüzey tasarımları ve nanoakışkanların kullanımı üzerine yapılan araştırmalar arasında, çapraz akış ve çarpan jet akışının birlikte kullanıldığı sistemler bulunmaktadır. Karabulut (2023) tarafından farklı fin açıları ve uzunlukları kullanarak çapraz akış-çarpan jet akışı kanallarında ısı transferi ve akış yapıları incelenmiştir. Küp ve dairesel oyuk bakır yüzeyler için su ve %2 hacimsel konsantrasyonlu CuO-su nanoakışkanı kullanarak, fin açıları ve mesafelerinin Nusselt sayısı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlarda uygun fin konfigürasyonları ve çarpan jet akışının kombinasyonuyla ısı transferinde önemli artışlar sağlanabileceği belirtilmiştir. Tijani ve Sudirman (2018), bir otomobil radyatörüne dayalı düz tüp kanat modelini kullanmışlar ve sıvı ortam için seçilen malzemenin sistemin olası performansında önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Alüminyum ve bakır oksit nano akışkanı sıkıştırılamaz olarak ele almışlardır. Nano akışkanda termofiziksel değişiklikler olmadığını ve akışın türbülanslı olduğunu varsaymışlardır. Çalışmada Alüminyum nano akışkanın beklenenin aksine daha düşük bir Nusselt sayısına ulaşmışlardır. Nusselt sayısı, temel akışkan olan

etilenglikolün 164.29 iken bakır oksit nano akışkanında 208.71 olarak bulunmuştur. Veriler bakır oksit nano akışkanın daha iyi bir ısı transfer performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak, hibrit nano akışkanların geliştirmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Lahari vd. (2018), konsantrasyona bağlı nano akışkan performansını ve bir hibrit çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksit (TiO₂) performansını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Seramik elyaf ile kaplanmış çift borulu bir ısı değiştiriciyi boru boyunca eşit uygulanan bir ısı akısıyla birlikte incelemişlerdir. %2 TiO₂'nin saf suyun termal iletkenliğine göre %27.9'luk en iyi termal iletkenliği elde edebildiğini, %2 ZnO'nun ise %18.1 gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca %1.5 ZnO ve %1.5 TiO₂'nin hibrit karışımının, toplam termal iletkenlikte %40.9'luk bir artış sağladığını gözlemlemişlerdir. Ahmadlouydarab vd. (2020), TiO₂ nano akışkan kullanarak düzlemsel güneş kolektörü (DLG) üzerinde çalışmışlardır. Düzenekleri, kızılötesi bir ışık kaynağına sahip bir laboratuvar ölçekli düzlemsel güneş kollektörünü içermektedir. Termal enerji emilimini artırmaya yardımcı olmak için nano akışkanı DGK içine yerleştirmişlerdir. Ayrıca nano akışkana termal enerji emilimini teşvik etmek için koyu renkli bir boya ekleyerek %5 TiO₂ kullanarak sistem veriminde %49'luk bir artış elde etmişlerdir.

Khan vd. (2020), otomobil radyatörlerinde kullanılmak üzere bir ZnO/su/etilen glikol nano akışkan karışımı üzerinde çalışmışlardır. %0,01 hacimden %0,04 kadar değişen konsantrasyonları inceleyerek 4 ila 12 l/dk arasında değişen akış hızlarının termal karakteri incelenmiştir. Ayrıca, TiO₂ ve demir oksit (Fe₂O₃) içeren HNA ve bunların termal sistem performansına etkisi araştırılmıştır. Veriler sonucunda ısı transferinde %36'lık artış ve pompa gücünde %1'lik artış sağlandığını ortaya konmuştur. Babar ve Ali (2019), %0.01 Fe₂O₃ ve %0.01 TiO₂'den oluşan HNA üzerine çalışmışlardır. Sistemlerine HNA eklemenin Nusselt sayısını, Fe₂O₃ nano akışkan için %15,89 ve TiO₂ nano akışkan için ise %14,5 artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Karabulut vd. (2018), grafen oksit (GO)-su nanoakışkanının taşınım ısı transferi, üniform duvar ısı akı ile dairesel bir bakır boruda laminer akış koşullarında deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Nanoakışkanların yalnızca bir araştırma alanı olmaktan çıkarak elektronik soğutma sistemleri, ısı değiştiriciler, güneş kolektörleri ve nükleer reaktörler gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılabilmesi için öncelikle uzun süreli kararlılığının artırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, nanoparçacıkların sentezi ve nanoakışkan hazırlanması sırasında kullanılan kimyasal maddelerin, kararlılığı artırırken termofiziksel özelliklere zarar vermemesine özen gösterilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

HNA bünyesine mikrokapsüllü faz değişim malzemesinin (MFDM) dahil edilmesi, olası termal artış yöntemine etkisi de ayrıca araştırılmıştır. Ho vd. (2019), ani-pulsajlı ısı akısı koşullarına maruz kalan bir deneysel incelemede alüminyum-su içeren bir nano akışkanın karakterini incelemişlerdir. Çalışmada, dikdörtgen mikrokanallı yalıtımlı duvarlara sahip bir düzeneğin, nanopartiküllerle akışkan arasındaki ısı taşınımın katkısını araştırmışlardır. Nano akışkanın ısı transferinde hafif bir artışa neden olduğunu fakat nano akışkan kütle kesri artarsa ısı transferinde artış olduğunu belirtmişlerdir. Bununla beraber sayısal modelleme için bir sonlu haçım yöntemi kullanılmıştır. MFDM tabakası ile model arasındaki etkilesimin beklenenden daha düsük olduğunu belirtmislerdir. Mikro pin finler, ısı transferi uygulamalarında kullanılan, geniş yüzey alanı sağlayan, ince metal çubuklardır. Finler, genellikle bir plaka veya boru üzerine monte edilen, ince ve uzun metal parçalardır. Mikro boyutlarda olması daha yoğun bir yüzey alanı ile daha etkili ısı transferi sağlamaktadır. Genellikle, ısı transferini artırmak için ısı emici veya ısı verici vüzevlerin üzerine monte edilirler. Ambreen vd. (2019), calısmalarında bir mikro pin fin soğutucu icin iki fazlı Eulerian-Lagrangian modelini uygulamışlardır. Modelde, sabit bir ısı akısı durumunda, %0.25 hacimden %1'e kadar değişen bir küresel partikül içeren bir HNA incelenmiştir. Sabit bir ısı akısı uygulanarak ısı değiştiricinin uzunluğu boyunca 3000 Pa'dan az olan basınç düşüşü izlenmiştir. Sonuçlar, %1 nano akışkan içeren HNA için basınç düşüşünde iyileşme ve ortalama ısı transferinde %16'lık artış gözlendiği belirtilmiştir. Isı transferi sistemlerinde performans optimizasyonu için, ısı transferi artışı ve basınç düşüşü arasındaki dengenin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, üç periyodik minimal yüzeylerin (TPMS) ısı emici uygulamalarında kullanımını inceleyen bir çalışma, bu yapıların ısı transferi performansını artırırken basınç düşüşü üzerindeki etkilerini de ele almıştır. Saghir ve Kilic (2024), farklı akış hızları ve akışkan türleri için deneyler gerçekleştirerek, karmaşık sistem geometrilerinin basit geometrideki ısı emicilere kıyasla basınç düşüşü karakteristiklerini incelemiştir. Elde edilen bulgular arasında basınç düşüşünün yapı tasarımına bağlı olarak değisebileceği ve nanoakıskan kullanımının ısı transferini artırırken basınc düşüşünü de yükselttiği belirtilmektedir. Karabulut ve Alnak (2021) yaptıkları nümerik bir çalışmada ısı transferini artırmak için ayrılmış akış bölgesini azaltacak kanal tasarımları yapmak gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, daha fazla miktarda ısı transferi istenen uygulamalarda nanofluidler gibi yüksek ısı transfer katsayılarına sahip akışkanların seçimi son derece önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Literatürdeki bulgular ışığında, HNA'lar arasında TiO₂ ve SiO₂'in sentezlenmesi ile suyun termal iletkenliğine katkı sağlayabileceği anlaşılmaktadır. Böylelikle suyun, ısıyı daha etkin bir şekilde iletilmesine ve dağıtabilmesine yardımcı olmaktadır. Bununla beraber SiO₂, metal yüzeylerde korozif etkileri azaltarak ısı transfer ekipmanlarının ömrünü uzatmakta da pozitif katkı sağlamaktadır. Ayrıca bu HNA sentezi, suya karıştırıldığında homojen bir dağılım sağlayarak karışımın uzun süreli kararlı halde kalabileceğini göstermektedir. Diğer bir deyişle TiO₂ ve

SiO₂'nin birlikte kullanılması ile özellikle soğutma veya ısıtma sistemlerinde ısıl iletkenlikte avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, %0.5 TiO₂+%0.5 SiO₂'den oluşan hibrit nano akışkanın, üç kanallı bir ısı değiştirici için laminer akış ve zorlanmış taşınım altındaki termal performansı deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen veriler şekil ve grafiklerle sunulmuştur.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışmada ticari olarak bulunan bilgisayar işlemcileri (örneğin, Intel i7 gibi) ile aynı yüzey alanına sahip olan bir ünitenin deneysel tasarım gelişimi ele alınarak bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Düzenekte kullanılan ünite Şekil 1'de görüleceği üzere, üç kanallı bir 6061-T6 Alüminyum malzemeden yapılmış kare şeklinde bir plaka olup bir kenarı 37.5 mm ve yüksekliği 12.7 mm ölçülerindedir (Şekil 2a). Bu boyutlandırma, "Intel Core i7" işlemcinin boyutlarıyla uyumludur. Test bölgesi boyunca giriş/çıkış suyu sıcaklık sensörleri ve ısınmış bloğun üst yüzeyinin 1 mm altında A, B, C, D, E, F, G konumlarında 7 adet sıcaklık sensörü bulunmaktadır (Şekil 2b) birbirlerine olan mesafeleri ise sırasıyla; 0.5 cm, 0.9 cm, 1.4 cm, 1.9 cm, 2.3 cm, 2.8 cm ve 3.3 cm. Kanalın ısınmış blokla temas ettiği yerdeki plaka kalınlığı 0.3 cm'dir. Kullanılan ısı değiştiricinin altında konumlandırılmış sıcaklık sensörlerinden alınan veriler her bir saniye için kayıt altına alınmıştır. Değerlendirilen tüm senaryolarda sürtünme faktörü dikkate alınmamıştır.

Ünitenin kanallarından cebri sirkülasyonla dolaştırılan HNA, %0.5 TiO₂+%0.5 SiO₂ ve su karışımı olup üretici bir firma tarafından sentezlenmiştir. Nano partiküllerin askıda kalması ve homojen dağılımı için 50 nm'lik nanopartikül boyutu kullanılmıştır. Bu sıvı daha sonra damıtılmış su ile hedeflenen hacim konsantrasyonuna kadar seyreltilmiştir. HNA'nın damıtılmış suyun içinde askıya alınabilmesi için 40 dk manyetik bir karıştırıcı kullanılarak homojenizasyon sağlanmıştır. Deney setinde soğutma sıvısı olarak distile su kullanılmış olup yoğunluk (ρ), dinamik viskozite (μ), sabit basınçta özgül ısı (C_p), ısı transfer katsayısı (k) ve iletkenlik değeri (EC) ile HNA'nın termofiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Deneyde Kullanılan Ünite Modeli (The Unit Model Used in the test unit)

Tablo 1. Distile Suyun Ve HNA'nın Termofizi	iksel Özellikleri (Tilton Ve Taylo	or, 1922). (The Thermophysical Properties of
Distilled V	Nater and HNA (Tilton and Tay	lor, 1922)

MATERYAL	ρ kg/m³	μx10 ⁻⁴ kg/m.s	C _p J/kg.K	k W/m.K	EC μS/cm
Distile su	998.2	10.01	4128	0.631	0.055
HNA	1013,8	11.4	4109	0,62	-



Şekil 2. Ünitenin 3D katı modeli (a) izometrik görünüşü (b) yan görünüşü (3D solid model of the unit (a) isometric view (b) side view)



Şekil 3. Deney Seti (Experimental Setup)

Bilgisayar işlemcilerinin ürettiği ısıyı simüle etmek amacıyla, ünitenin altına Şekil 3'te belirtilen konumdan ısı akısı uygulanmıştır. Alüminyum plakaya (ünite), standart bir işlemcinin ürettiği ısı akısına eşdeğer olan 30000 W/m² uygulanmıştır. Bu ısı akısı, deney bölgesinin alanı üzerine uygulanan gücün voltmetre ve ampermetre ile ölçülmesi sonucu hesaplanmıştır. Üç kanallı blok ünite ile düzenek arasındaki ısıl temas direncini minimize etmek için termal macun kullanılmıştır.

Reynolds sayısı (*Re*), akışkanın hızı, yoğunluğu, viskozitesi ve karakteristik uzunluk gibi birçok faktörü tek bir boyutsuz sayıda birleştirmektedir. Bu, farklı akışkan sistemleri arasında doğrudan karşılaştırma yapılmasını kolaylaştırmaktadır. Deneylerde 5 farklı hız değeri için veriler kayıt altına alınmıştır. Hız değerleri sırasıyla 50 mm/s, 100 mm/s, 150 mm/s, 200 mm/s, 250 mm/s olacak şekilde senaryolaştırılmıştır. Sistemde dolaşan akışkanın termofiziksel özelliklerine bağlı Reynolds (*Re*) değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tüm deneylerde cebri sirkülasyonlu soğuk distile su banyosu başlangıç set sıcaklık değeri +4°C alınmıştır. Sirküle edilen distile su, istenen set sıcaklığına ulaşıncaya kadar sistemde dolaştırılmıştır. Alüminyum ünite kanalları içinden geçirilen HNA'nın hacimsel debisi, hızı, giriş ve çıkış sıcaklıkları ve kanal boyunca her saniye alınan sıcaklık değerleri, veri toplama istasyonu (DAQ) aracılığıyla kayıt altına alınmıştır. Deneyler, dış ortam sıcaklığı 22°C olan laboratuvar şartları altında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Sistemde Dolaşan Akışkanın Termofiziksel Özelliklerine Bağlı Reynolds (*Re*) Değerleri (Reynolds (Re) Values

HIZ	50 mm/s	100 mm/s	150 mm/s	200 mm/s	250 mm/s
Re	460,49	921,73	1382,22	1846,42	2303,95

Sınır tabaka etkisi, bir akışkanın bir katı yüzeye yakın bölgelerdeki akış davranışını tanımlamaktadır. Bu etki, akışkanın yüzeye yakın bölgelerdeki hız, basınç ve sıcaklık gibi özellikleri katettiği mesafe boyunca önemli ölçüde farklılık gösterip ince bir tabaka oluşturmaktadır. Oluşan bu ince tabaka sayesinde, akış hızında ve sıcaklık gradyanında artış gözlemlenmektedir. Bu sayede ince tabakada deneyimlenen ısı transferinin artmasını sağlamaktadır. Bu tabakanın kalınlığı, tamamen gelişmiş bölgede sabit bir kalınlığa kadar yol aldığı uzunlukla doğru orantılı artmaktadır. Diğer yandan Yerel Nusselt sayısı, sınır tabaka kalınlığı ile de ters orantılıdır (Bayomy, 2017). Yerel Nusselt sayısı, akışkandaki muhtemel ısı artışını değerlendirmenin yaygın bir yolu olup kontrol hacmindeki ısı artışının değerlendirilmesi için sayısal ya da deneysel incelemeler sonucu yapılmaktadır. Denklem 1(a), Nusselt sayısın, Denklem 1(b) ısı konveksiyon katsayısı (*h*) [W/m²°C], Denklem (1c) ise Reynolds sayısının (*Re*) formüllerini göstermektedir. Burada *D*_e, kanalın hidrolik çapı (m); k_{nf} , HNA'nın termal iletkenliğini (W/m°C); q["], ısı akışının kinematik viskozitesini (m²/s) temsil etmektedir. Bu çalışmadaki *D*_e 0.01897m olarak alınmıştır.

$$Nu = \frac{h.D_e}{k_{nf}} \tag{1a}$$

$$h = \frac{q}{(T_x - T_{in})} = \frac{q}{\Delta T_x}$$
(1b)

$$Re = \frac{U.D_e}{\vartheta_f} \tag{1c}$$

2.1. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Reynolds sayısı, sürtünme faktörü ve yerel/ortalama Nusselt sayısı (Denklem 2) gibi boyutsuz sayıların ölçümü ve belirsizliğinin kontrolü deneysel çalışmalar için hayati öneme sahiptir. Bu çalışmada karşılaşılan belirsizlik, yerel Nusselt sayısından kaynaklanan hata yayılımından gelmekte ve aşağıda gösterilen Taylor belirsizlik yaklaşımı kullanılarak hesaplanmaktadır (Taylor ve Thompson, 1982).

$$\delta N u_x = \sqrt{a \left(\frac{\partial N u_x}{\partial x} \delta x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial N u_x}{\partial y} \delta y\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial N u_x}{\partial z} \delta z\right)^2}$$
(2)

Burada Nu_x , deney verileriyle hesaplanan yerel Nusselt sayısıdır. x, y ve z terimleri yönlendirilmiş koordinat sistemidir ve ∂ , terimin bağlı olduğu boyutun kısmi türevidir. Bu durumda, x, y ve z boyutları, sıcaklık, basınç farkı ve debi gibi ölçülen miktarlar olarak alınır, her terimin değerleri ∂x , ∂y ve ∂z olarak ifade edilebilecek belirsizliklere sahip olur ki bu da yerel Nusselt sayısı gibi parametrelerin belirsizliğini hesaplamak için kullanılır (Taylor ve Thompson, 1982; Welsford vd., 2020). Kullanılan T-tipi termokuplun bilinen bir belirsizliği %0.75, debimetre %0.44 belirsizliğe sahiptir. Elde edilen sonuçlar, kabul edilen ortalama sınır değerler arasında olduğunu göstermektedir.

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Bu çalışmanın amacı, sabit ısı akısı altında, değişen akış koşulları ve su içinde askıya alınmış %0.5 TiO₂+%0.5 SiO₂ içeren yüksek konsantrasyonlu HNA'nın alüminyum malzemeden yapılmış bir ısı değiştiriciden ısıyı uzaklaştırma etkinliği incelenmiştir. Alüminyumdan yapılan ünite üç kanallı olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada HNA üzerinde beş farklı devir-daim akış hızı için deneyler yapılarak ısı değiştiricinin ulaşacağı stabil sıcaklık değerleri gözlemlenerek kayıt altına alınmıştır. Alüminyum ısı değiştiricinin duvarlarındaki termal yüklerin kalkması için deneyler 12 saat arayla yapılmıştır. Bununla birlikte, her deney üç kez gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın termal dengeye ulaştığı esnada sıcaklık dağılımlarının taşınım ve iletime olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada deneysel veriler, bir HNA konsantrasyonuna uygun optimum akış hızını önermektedir.

HNA'nın farklı hızlardaki zamana bağlı sıcaklık dağılımları Şekil 4'te gösterilmiştir. Ortalama 20 dakikada sıcaklık artış eğiliminin azaldığı 40 dakika içinde stabil sıcaklık değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. HNA'nın hızı 50 mm/s, 100 mm/s ve 150 mm/s olarak kademeli şekilde artırıldığında, ısı değiştiricideki sıcaklıkların her bir hız artışında 5'er derece azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, artan akışkan hızının ısı transferini iyileştirdiğini göstermektedir. Yüksek hızlarda akışkan, ısıyı daha etkili bir şekilde uzaklaştırabilmekte ve böylece sistem sıcaklığını düşürmektedir. HNA hızı 150 mm/s'ye çıkarıldığında, 50 mm/s hıza kıyasla termal iletkenlikte %20'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu önemli artış, yüksek hızlarda akışkanın ısıyı daha etkili bir şekilde taşıdığını ve sistemin genel termal performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Artan hız, sınır tabaka kalınlığını azaltarak ısı transferini

kolaylaştırmakta ve böylece termal iletkenliği artırmaktadır. İlginç bir şekilde, akışkan hızının 200 mm/s veya 250 mm/s'ye çıkarılması, 150 mm/s hıza göre ısı aktarımında anlamlı bir değişime neden olmamıştır. Bu gözlem, ısı transferi açısından bir "optimum hız" olduğunu ve bu hızın ötesinde ek faydaların sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, muhtemelen arta<u>n türbülans ve sürtünme kayıpları gibi faktörlerden kayn</u>aklanmaktadır.



Şekil 4. HNA'nın Farklı Hızlarda Zamana Bağlı Sıcaklık Dağılımı (Time-Dependent Temperature Distribution of HNF at Different Velocities)

Şekil 5' de görüldüğü üzere HNA'nın ısıl dengeye ulaştığı sıcaklık dağılımı verilmiştir. Akış hızı arttıkça, soğutma kapasitesi de artmaktadır fakat akış hızının 150 mm/s'nin üstüne çıkarılmasının ısı transferine bir katkısının olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6'da, HNA'nın gelişmiş sıcaklık davranışının ünite boyunca mesafeye bağlı termal dengedeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Akışkan giriş hızı arttıkça sıcaklık dağılımı azalmıştır. Üç kanallı sıcaklık dağılımlarında en düşük akış hızında ısı emiliminin daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu, termal direnç tabakasının başlangıç ısı akısı temel alınarak belirlenmesi, bu nedenle ısı akısı arttıkça iki değer arasındaki sapmanın arttığı anlamına gelmektedir. Üç kanallı sıcaklık dağılımında, genel olarak sıcaklığın kanal ortasına doğru pozitif yönde azaldığı görülmektedir. HNA davranısı minimum ve maksimum hızlar arasında karşılaştırıldığında ısı değiştirici boyunca ortalama %23.1 sıcaklık dağılımında iyileşme görülmektedir. Böylelikle daha fazla ısı su dolaşımına salınarak ünitenin soğumasını sağlanmaktadır. Isı değiştirici kanalına HNA ilk girdiğinde sıcaklığın hafifçe azaldığı ve ardından düz bir değişim sergiledikten sonra eğimin yükseldiği tespit edilmiştir. Girişte geniş diğer bir ifadeyle şabit şeyreden bir şıcaklık gradyanı, şınır tabakadaki gelişimin pozitif yönlü göstergesidir. Tamamen gelişmiş akış olduğunda sıcaklık eğimi sıfıra yaklaşmaktadır. Ayrıca, daha yüksek bir akış hızı ile daha düşük sıcaklıklar elde edilmektedir. Sıcaklık profili içinde zayıf bir parabolik şekilde gözlemlenebilir; bu parabolik şekil, sınır tabaka etkisinin kanalların giriş ve çıkış bölgelerinde ısıyı salma eğiliminin daha belirgin olduğunu göstermektedir.



Şekil 5. Termal Dengedeki Sıcaklık Dağılımı (Temperature Distribution in Thermal Equilibrium)



Şekil 6. HNA'nın Isı Değiştirici Boyunca Mesafeye Bağlı Termal Dengedeki Sıcaklık Dağılımı (Temperature Distribution in Thermal Equilibrium Along the Length of the Heat Exchanger for HNF)

Değerlendirilen tüm senaryolar için sürtünme faktörü ve ısı kayıpları dikkate alınmamıştır. Deney seti, izolasyon malzemesi olan Delrin'den yapılmıştır, ancak düzenek üst kısmı test bölümünü görmek için plexiglass'tan yapılmıştır. Ayrıca 1.5 mm çaplı iki adet sensör kablosunun geçebilmesi için dolaşım suyu boru hattında delik açılmasından ötürü bu durum sistemde olası termal kayıplar olduğu anlamına gelmektedir. Bu delikler, veri ölçümüne izin vermek için eklenmiş olup, termal kayıpları azaltmaya yardımcı olması için taşyünü ile doldurulmuştur. Ancak, bu farklılıklar göz önüne alındığında, veriler hala kabul edilebilir ve HNA davranış karakteri hakkında önemli bilgiler vermektedir.



Şekil 7. Konuma Bağlı Olarak Yerel Nusselt Sayısının Dağılımı (Local Nusselt Number Distribution Depending on Location)

Nusselt sayısı, HNA içindeki ısı emiliminin bir sonucu olarak Şekil 7'de görüldüğü üzere uzunluk boyunca azalmaktadır. Isı transferinde kullanılan hibrit nano akışkanlarda, kanalların kullanımı, sistem için gereken pompa gücünü artırarak giriş bölgesinde basıncın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca ısı değiştirici de akış hızını korumak için kanal sayısını artırılması yerel Nusselt sayısını da artırmaktadır. Bu çalışmadaki modelin deney sonuçları Nusselt sayısında artış olmadığını, kanal sayısı ve mesafenin yeterli olduğu sonucunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, mikroişlemcilerin soğutulmasında sıvı soğutma yöntemi kullanılırken, ısı değiştiricide kullanılan akışkana HNA eklenmesi halinde ısıl etkiler deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar:

- i. %0.5 hacimli TiO₂ ve %0.5 hacimli SiO₂'den oluşan HNA'nın, standart bir işlemcinin ürettiği ısı akısı olan 30000 W/m² uygulandığında ısı transferine maksimum katkısı %23.10 bulunmuştur.
- ii. HNA hızının, 50 mm/s ve 150 mm/s karşılaştırıldığında termal iletkenliğin %20 arttığı gözlemlenmiştir.
- iii. Isı aktarımında HNA akış hızının 200 m/s veya 250 mm/s olmasının 150 mm/s'ye göre anlamlı bir değişime neden olmadığı görülmüştür.
- iv. Sistemdeki basınç düşüşünün önüne geçilmesi için hibritleşme için kullanılan malzemelerin, yüksek

ısı iletim kapasitesine sahip fakat daha düşük konsantrasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

v. Bu çalışma hibrit nano akışkanların incelenmesine yönelik olmasına rağmen, farklı geometrilere sahip modeller için ek çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Ahmadlouydarab, M., Edadolahzadeh, M., Ali, H.M. 2020. Effects of utilizing nanofluid as working fluid in lab-scale designed DLGK to improve thermal absorption and efficiency. Phys. A Stat. Mech. Appl. 540, 123109. https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123109.
- Ambreen, T., Saleem, A. and Park, C.W. 2019. Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow characteristics of a nanofluidcooled micro pin-fin heat sink using the Eulerian-Lagrangian approach. Powder Technol. 345, 509–520. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.042.
- Babar, H., Ali, H.M. 2019. Air foil shaped pin fin heatsink: potential evaluation of ferricoxide and titania nanofluids. Energy Convers. Manag., 202, 112-194.https://doi.org/10.1007/s10973-019-08320-7.
- Bayomy, A.M., Saghir, M.Z., 2017. Experimental study of using Al₂O₃-water nano fluid flow through aluminum foam heat sink: comparison with numerical approach. Int. Journal of Heat Mass Transf. 107, 181–203, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.037.
- Bayomy, AM., 2017. Electronic cooling using ERG aluminum foam subjected to steady/ pulsating water and g-Al₂O₃-water nanofluid flows: experimental and numerical approach. PhD Thesis.
- Bumataria, R.K., Chavda, N., Panchal, H. Current research aspects in mono and hybrid nanofluid based heat pipe technologies. Heliyon 5, 01627, 2019. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01627.
- Ho, C.J., Chiou, Y., Yan, W., 2019. Ghalambaz, M. Transient cooling characteristics of Al₂O₃- water nanofluid in a micro channel subject to a sudden-pulsed heat flux. Int. J. Mech. Sci. 151, 95–105. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.017.
- Karabulut, K., Buyruk, E., & Kılınç, F. (2018). Grafen Oksit Nanoparçacıkları İçeren Nanoakışkanın Taşınım Isı Transferi ve Basınç Düşüşü Artışı Üzerindeki Etkisinin Düz Bir Boruda Deneysel Olarak Araştırılması. *Mühendis ve Makina, 59*(690), 45-67.
- Karabulut, K., Alnak, D. E. (2021). Investigation of graphene oxide-distilled water nanofluids with consideration of heat transfer and flow structure for backward-facing step flow. *Journal of Engineering Thermophysics*, 30(2), 300-316. https://doi.org/10.1134/S1810232821020119.
- Karabulut, K., 2023. Heat transfer increment study taking into consideration fin lengths for CuO-water nanofluid in cross flowimpinging jet flow channels, Thermal Science, 6A, 4345-4360. https://doi.org/10.2298/TSCI221203035K.
- Karabulut, K., Buyruk, E., Kilinc, F., 2020. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a circular copper tube using graphene oxide nanofluid. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 42, 230. https://doi.org/10.1007/s40430-020-02319-0. https://doi.org/10.1007/s40430-020-02319-0.
- Kahn, A., Ali, H.M., Nazir, R., Ali, R., Munir, A., Ahmad, B., Ahmad, Z., 2020. Experimental investigation of enhanced heat transfer of a car radiator using ZnO nanoparticles in H₂O ethylene glycolmixture. J. Therm. Anal. Calorim. 137, 3007–3021.
- Saghir Z. and Kilic G.A., 2024. Experimental Forced Convection Study Using a Triply Periodic Minimal Surface Porous Structure with a Nanofluid: Comparison with Numerical Modeling. Applied Sciences, *14*(17), 7594. https://doi.org/10.3390/app14177594.
- Kimura K., Lipeles, 2006. A. Fuzzy Controller Component. U. S. Patent 14, 860, 040, 14 December 2006.
- Lahari, M.L.R.C., Sesha, P.H.V., Talpa, S., Swamy, K.S.N., Krishnamurthy, N., Sharma, K., 2018. Investigation on heat transfer properties of waterbased TiO₂-ZnO nanofluids. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 455, 12092. https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012092.
- Plant, R.D., Hodgson, G.K., Impellizzeri S., Saghir, M.Z., 2020. Experimental and numerical investigation of heat enhancemen tusing a hybrid nanofluid of copperoxide/aluminium nanoparticles in water. J. Therm. Anal. Calorim. 141, 1951–1968. https://doi.org/10.1007/s10973-020-09639-2.
- Saba, F., Ahmed, N., Khan, U., Waheed, A., Rafiq, M., Mohyud-Din, S., 2018. Thermophysical analysis of water based (CuAl₂O₃) hybrid nanofluid in an asymmetric channel with dilating/squeezing walls considering different shapes of nanoparticles. Appl. Sci. 8, 1549–1612. https://doi.org/10.3390/app8091549.
- Shi, X., Li, S., Wei, Y., Gao, J., 2018. Numerical Investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water based Al₂O₃ nanofluids in a microchannel. Int. Commun. Heat Mass Transf. 90, 111–120. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.11.007.
- Taylor, J. R. And Thompson, W., 1982. An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. Vol. 2, içinde (s. 193-200). Mill Valley, CA: University science books.
- Tijani, A.S., Sudirman, A.S.B., 2018. Thermos-physical properties and heat transfer characteristics of water/anti-freezing and Al₂O₃/CuO based nanofluid as a coolant for car radiator. Int. Journal of Heat Mass Transf. 118, 48–57. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.083
- Tilton, L. W. and Taylor, J. K., 1922. Accurate representation of the refractivity and density of distilled water as a function of temperature. *Phys. Rev*, *2*(20), 249.
- Welsford, C. A., Delisle, C. S., Plant, R. D. And Saghir, M. Z., 2020. Effects of nanofluid concentration and channeling on the thermal effectiveness of highly porous open-cell foam metals: A numerical and experimental study. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 140, 1507-1517. https://doi.org/10.1007/s10973-019-09166-9.