



## Termosifon ısı borusu performansının iş akışkanına hibrit nano parçacık katkısıyla değişiminin incelenmesi

### Investigation of the change of thermosyphon heat pipe performance with hybrid nano particle addition to the work fluid

Erman Çelik<sup>1,\*</sup> , Filiz Özgen<sup>2</sup> , Umut Deniz<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ, Türkiye

#### Öz

Nano parçacık katkısının ısı sistemlerin ısı verimini artırmada önemli etkileri olduğu bilinmektedir. Bu çalışmanın amacı, imalat maliyeti en düşük ısı borusu tiplerinden biri olan termosifon ısı borularının (TIB) ısı performansını iş akışkanına hibrit nano parçacık katkısı yapılarak ele alınması ve hibrit nano parçacık eklentisinin etkilerinin araştırılmasıdır. Doldurma oranı ve konsantrasyonun ısı performans üzerindeki etkileri incelenmiştir.  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  hibrit nano akışkanının tekil nano akışkanlardan birinin sahip olduğu yüksek stabilite özelliği ile diğerinin sahip olduğu yüksek ısı iletkenlik özelliklerini bir araya getirebildiği görülmüştür. Hibrit nano akışkanla dolu sistemde en yüksek ısı veriminin %65 doldurma oranında elde edildiği görülmüştür. Doldurma oranının nano akışkan konsantrasyonu ile birlikte ele alınarak iki parametrenin bileşik etkisi dikkate alındığında maksimum performansın elde edildiği koşulun %65 doldurma oranı ve %0.5 nano akışkan konsantrasyonu olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Termosifon ısı borusu, Hibrit nano parçacık, Isı transferi

#### 1 Giriş

Dünyadaki artan nüfus, enerji kaynaklarının sınırlı olması ve enerji kaynağı sürekliliği olmayan yerlerdeki teknolojik uygulamaların sayılarının artması; enerjiyi günümüzün en değerli ögesi haline getirmiştir. Bu nedenle cihazların enerji verimlilik düzeylerinin yüksek olması daha az enerji ile işlev görebilmeleri açısından önem kazanmıştır. Farklı teknolojiler ve yöntemler arasında ısı borusu, ısı enerjinin transfer edilmesinde talebe bağlı olarak uyarlanabilen basit bir yapıya sahip, uygun maliyetli seçeneklerden biridir. Gelişen teknoloji ile birlikte hayatımıza giren elektronik sistemlerin sayısı artmış durumdadır. Elektronik sistemlerin enerji verimliliklerinin yüksek olmasının yanında ömürlerinin uzunluğu açısından soğutulmaları da önemli bir gereksinimdir. Bu noktada elektronik sistemlerin soğutulması için; haricen enerji tüketmeyen pasif soğutma çözümleri geliştirilmesi ve bu sistemlerin verimliliklerinin artırılması önem kazanmıştır.

Isı transferi performansını geliştirmek amacıyla ısı sistemlerde nanoakışkan kullanımı son yıllarda önem

#### Abstract

It is known that nanoparticle additives have significant effects on increasing the thermal efficiency of thermal systems. The aim of this study is to examine the thermal performance of thermosyphon heat pipes (THP), one of the heat pipe types with the lowest manufacturing costs, by adding hybrid nanoparticles to the working fluid and to investigate the effects of hybrid nanoparticle addition. The effects of filling ratio and concentration on thermal performance were examined. It has been observed that the  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  hybrid nanofluid can combine the high stability feature of one of the individual nanofluids with the high thermal conductivity feature of the other. It has been observed that the highest thermal efficiency in the hybrid nanofluid-filled system was achieved at 65% filling rate. Considering the combined effect of the two parameters by considering the filling rate together with the nanofluid concentration, it was seen that the condition where maximum performance was achieved was 65% filling rate and 0.5% nanofluid concentration.

**Keywords:** Thermosyphon heat pipe, Hybrid nano particles, Heat transfer

kazanan bir araştırma alanı olmuştur. Nanoakışkanlar en genel tanımıyla; nanometrik boyuttaki (1-100 nm) katı partiküllerin bir temel akışkan içerisinde dağıtılması ile oluşturulan akışkanlardır. Nanoakışkanlar genel olarak milimetrenin on binde birinden daha küçük (100 nm) boyuttaki nano partiküllerle nispeten daha düşük ısı iletme sahip çalışma akışkanlarının karıştırılması sonucu oluşan süspansiyonların genel adıdır. Kullanılan nano malzemeler arasında metal, metal oksitler, elmas, karbon nanotüpler ve diğer birkaç malzeme daha önem arz edip araştırılmıştır. Akışkanlara karıştırılan nano partiküllerin sıvının ısı iletkenliğini artırmasının yanında kaynama ile ısı transferini geliştirdiği bilinmektedir. Bir ısı borusu kullanımının diğer yöntemlere göre avantajı, büyük miktarlarda ısının küçük bir kesit alanından, sisteme ek bir güç girişi olmaksızın uzun bir mesafe boyunca taşınabilmesidir. Öte yandan tasarım ve üretimlerinin kolay olması, uçlar arasındaki sıcaklık farklarının düşük olmasına karşın çok farklı sıcaklık seviyelerinde yüksek oranda ısı geçişi sağlayabilmeleri ısı borularını kullanışlı sistemler haline getirmiştir. Son on

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ecelik@firat.edu.tr (E. Çelik)

Geliş / Received: 13.12.2023 Kabul / Accepted: 13.05.2024 Yayınlanma / Published: xx.xx.20xx

doi: 10.28948/ngumuh.1404537

yılda, elektronik sistemler ve enerji sistemlerinde ihtiyaç duyulan soğutma gereksiniminin artması ısı borusu teknolojisi ve uygulamalarının oldukça gelişmesine neden olmuştur. [1-7].

Isı boruları iç içe geçmiş iki borunun içinde yer alan akışkanın sıcaklık etkisiyle buharlaşması yoğunlaşması prensibiyle çalışır. Isı boruları yoğunlaştırıcı, buharlaştırıcı ve yalıtımlı bölge adlı üç temel bölümden meydana gelmektedir. Buharlaştırıcı bölümüne dış ortamdan geçiş yapan ısı sayesinde iş akışkanı buhar fazına geçerek yoğunlaştırıcı bölümüne doğru yükselir. Yoğunlaştırıcı bölümünde buhar fazında bulan akışkandan dış ortama ısı geçişi meydana gelir ve akışkan yoğunlaşarak sıvı fazına geçer. Yoğunlaştırıcı bölümünde sıvı hale geçen akışkan yer çekimi ivmesi yönündeki buharlaştırıcı bölümüne geri döner. Buharlaştırıcı bölümünün yer çekimi ivmesi yönünde olmadığı sistemlerde yoğunlaşan akışkanın buharlaştırıcı bölümüne taşınmasını sağlamak için kohezyon ve adezyon kuvvetlerinin etkili olduğu gözenekli fitillerin kullandığı sistemler mevcuttur. Bu döngü sıcaklık farkı devam ettiği sürece sürekli olarak tekrar eder. Isı borularında düşük sıcaklıkta faz değiştiren akışkanların kullanılması ve nano akışkan kullanımı ile iş akışkanının ısıl iletkenliğinin artırılması gibi metotların ısı borusu performansını geliştirdiği görülmüştür. Yapılan çalışmada Titanyum oksit ve Alüminyum oksit nano parçacıklarının eklenmesi ısıl iletkenliğin artmasına ve performansının iyileşmesine katkı sağladığı için kullanılması uygundur.

Son yıllarda literatürde bulunan nano akışkanların ısı borularında kullanılması ile ilgili çalışmaların sayısının arttığı görülmüştür. Ghorabee vd. [8], yaptıkları çalışmada kullanılan nano akışkanların ısı borularının ısıl verimliliğini artırabileceğini incelemişlerdir. Çalışmada ısı girdisinin, farklı tiplerde nano akışkan kullanımının, PH seviyesinin ve yüzey aktifleştiricilerin ısıl performans üzerine etkileri ele alınmıştır. Termosifon ısı borusunda ısıl direncin azaltılıp ısıl verimliliğin artırılması genel performans artışı sağlamıştır. Martin vd. [9], tarafından yapılan çalışmada ısıl sistem içinde %2 konsantrasyonunda Fe ve CuO nano parçacıkları içeren sulu bir hibrit nanoakışkan süspansiyon kullanımının, performans üzerine etkileri ele alınmıştır. Çalışmada yüzey aktifleştirici madde olarak Triton X-100 kullanılmıştır. Hibrit nanoakışkanların duvar sıcaklığını azalttığı ısıl verimliliği ise artırdığı gözlenmiştir.

Çiftçi vd. [10], boksit nanoakışkan ile çalışan bir termosifon ısı borusunun ısıl performansına nanopartikül konsantrasyonunun ve sürfaktan tipinin etkileri üzerinde çalışmışlardır. Farklı nanoparçacık konsantrasyonları (%1, %2 ve %4) ve yüzey aktif madde türleri (Triton X-100 ve Sodyum Dodesil) için ısı borusu performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Hem buharlaştırıcı hem de yoğunlaştırıcı bölümleri üzerindeki sıcaklık dağılımları 8 farklı K tipi ısıl çift ile kaydedilmiştir. Termosifon ısı borusu verimliliğinin, %2 (kütle) konsantrasyonunda boksit nanoakışkan ve bir anyonik yüzey aktif madde kullanımı ile %20.9'a kadar arttığını göstermişlerdir. Hoseinzadeh vd. [11], tarafından nanoakışkanlar kullanılarak termosifon ısı borularının ısı transfer özellikleri üzerine sayısal çalışmalar yapılmıştır. İş akışkanı olarak su ve nanoakışkanlar kullanılarak termosifon

ısı borusunun ısı transferini araştırmak için üç boyutlu bir analiz modeli kullanılmıştır.

Safaraz vd. [12], Zirkonya-aseton nanoakışkanları kullanan bir termosifon ısı borusunun ısıl performansının değerlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Zirkonya-aseton nanoakışkan ile doldurulmuş bir termosifon ısı borusunun ısı transfer katsayısını, ısıl direncini ve ısıl performansını ölçmek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Isı borusunun ısıl performansı için bir indeks olarak Kutateladze sayısını tahmin etmek için boyutsuz bir analiz kullanılarak bir korelasyon da geliştirmişlerdir. Reji vd. [13], tarafından yapılan çalışmada bir bakır termosifon ısı borusunda eğim açısının etkileri iş akışkanı olarak %1 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano partikül içeren distile suyun kullanıldığı sistemde incelenmiştir. Isı borularının çalışma limitleri hesaplanmış ve kuruma limiti 233W olarak belirlenmiştir. Buharlaştırıcı ucunda 40W ile 200W arasında farklı ısı girdi değerleri verilmiştir. Eğim açısı 60°'ye ulaşana kadar performans artışı devam etmiş, ancak açının daha da artmasıyla performans artışı tersine dönmüştür. Daha yüksek eğim açılarında ve daha yüksek ısı girdisi değerinde, nanoakışkanlı ısı borusunun verimliliği, distile su ile çalışan ısı borusuna kıyasla %41 oranında artmıştır. Gürü vd. [14], tarafından yapılan çalışmada TIB içinde iş akışkanı olarak bentonit içeren nanoakışkan kullanımı deneysel olarak ele alınmıştır. Ek olarak, nanoparçacık konsantrasyonunun ısı borusu performansı üzerindeki etkileri de sunulmuştur. Çalışma akışkanı olarak bentonit içeren nanoakışkan ve deiyonize su kullanıldığında, ısı borusu duvarı boyunca sıcaklık dağılımları, ısıl direnç ve ısı borusunun verim değerleri belirlenmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Sadeghinezhad vd. [15], tarafından yapılan çalışmada son derece kararlı bir grafen nanoplatelet (GNP) nanoakışkanı hazırlamak için sistematik bir araştırma çalışması yapılmış ve ardından ısı borusu sistemlerinde çalışan bir akışkan olarak kapasitesinin analizi yapılmıştır. Isı borusunun ortalama ısı transfer katsayısı, çekirdekli kaynama ısı transfer mekanizmasının değişmesi nedeniyle 50°'lik eğim açısında maksimuma ulaşmıştır.

Jouhara vd. [16], yaptığı çalışmada Isı Borusu Esaslı Değiştirici' de (IBEID) havadan suya ısı geçiş performansının üzerinde analizler yapmışlardır. Kullanılan parametreler arasında çeşitli Reynolds sayıları göz önüne alınmıştır. Çalışmada sıcaklıkları tahmin etmek için Logaritmik Ortalama Sıcaklık Farkı modeli kullanılmıştır. IBEID etkinliği beş geçişli bir geometri ile elde edilmiş ve ısı transfer hızı 424 W'tan 456 W'a yükselmiştir. Fikri vd. [17], çalışmalarında etkili kullanım için ısı borusu kullanan doğrudan-dolaylı evaporatif soğutucular tasarlayarak ısı ve kütle transferi performanslarını incelenmişlerdir. Sistemde bir ısı borusu ile birçok kademeli ve doğrudan buharlaştırıcı soğutucu kullanılmıştır. Soğutucuda 45° C'lik bir giriş sıcaklığı ve 0.8 m/s'lik bir hava hızı ele alınmıştır. Evaporatif soğutucu ve çok kademeli doğrudan evaporatif soğutuculu sisteme göre ön soğutucu olarak ısı borusu kullanıldığında daha yüksek kapasite elde edilmiştir. Zhao vd. [1], yaptıkları çalışmada, ısı borusu entegre edilmiş faz değiştiren malzemeli bir daldırma tipi pil ısı yönetim ünitesini ele almışlardır. Yüksek güç ve enerji sürekliliği beklenen

pillerin ısı yönetiminde ısı borusu entegre edilmiş faz değiştiren malzemeli daldırma tipi bir sistemin gereksinimleri karşılayabileceği anlaşılmıştır. Öte yandan böyle bir sistemin beklenen ısı yönetimini çok düşük enerji tüketimleri ile gerçekleştirirken daldırmalı bir sistem olması nedeni ile pilin alev alma riskini ve karmaşık akış alanı ihtiyacını azaltan bir sistem olduğu anlaşılmıştır.

Yapılan bu çalışmada termosifon ısı borusunun etkinliği iki farklı tekil nano parçacık ile elde edilen tekli nano akışkanlar ve bu parçacıkların karışımı ile elde edilen bir hibrit nano akışkan için araştırılmıştır. Her bir nano parçacık kombinasyonunun üç farklı derişimi ele alınmış ve iş akışkanı olarak düşük maliyetli olması nedeni ile TiO<sub>2</sub> nano parçacıkları ve yüksek ısıl iletkenliğe sahip çubuk formulu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano parçacıkları ile hazırlanmış nano akışkanlar kullanılmıştır. Hibrit nano akışkanın ısıl performansı distile su ile çalışmak için tasarlanmış bir termosifon ısı borusunda test edilmiştir. TiO<sub>2</sub> nanoakışkanın Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile karıştırılması ile elde edilen hibrit nanoakışkanın TIB'in ısıl direnci ve ısıl verimliliği üzerindeki etkileri, farklı nanopartikül konsantrasyonlarında ve sıvı dolum oranında incelenmiştir. Literatürde çeşitli konsantrasyon değerleri ve doldurma oranlarını içeren çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde konsantrasyon değerleri ve doldurma oranları ayrı parametreler olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada ideal doldurma oranının belirlenmesinin ardından konsantrasyon değerinin ideal doldurma oranı özelinde belirlenmiş olması doldurma oranının ve konsantrasyon verilerinin bileşik etkisinin anlaşılabilmesine olanak tanımıştır.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Deneysel ölçümler ve hesaplama metodu

Isıl iletkenlik değerinin, ısı transferi verimliliği ve hızlarının yüksek olmasının yanında; imalatlarının teknik güçlük barındırmaması, bakım gerektirmemesi ve düşük imalat maliyetlerine sahip olmaları nedeni ile TIB' lara pratik uygulamalarda oldukça sık rastlanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada deneyler TIB sistemi üzerinden gerçekleştirilecektir. Ancak yine de TIB performansını artırmak üzere konstrüksiyon parametreleri dışında TIB içinde kullanılan akışkanların tipleri üzerinde de çalışmalar yapılması gerekmektedir. İş akışkanı olarak nano akışkan ve hibrit nano akışkan kullanımı günümüzde dikkat çeken çalışmalardandır. Bu çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve TiO<sub>2</sub> nano parçacıklarının distile suda dağıtılması ile elde edilen nano akışkanlar kullanılmıştır. Bu malzemelerin kullanılmasının sebebi hem fiziksel hem de kimyasal stabiliteye sahip olmakla beraber düşük maliyet ve bulunabilirlik özelliklerine sahip olmalarıdır. Bu çalışmada TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O tekil ve TiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O hibrit nano akışkanların performansları farklı konsantrasyonlar ve doldurma oranları için 90° eğim açısı ve 300W ısı akısında araştırılmıştır. Deney parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Toplamda 20 farklı durum için testler gerçekleştirilmiştir.

TIB ısı girişi doğrudan buharlaştırıcıya uygulanan elektriksel güç ile belirlenir. Isıl gücün hesaplama formülasyonu Denklem (1)'de verilmiştir. Denklem (1)'de v elektrik potansiyeli olup i akımdır.

Tablo 1. Test matrisi

%60 Doldurma Oranı İçin Nano Akışkan Konsantrasyonu		%0.5 Konsantrasyon İçin Nano Akışkan Doldurma Oranları	
TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub> %
0.1	0.1	35	35
0.2	0.2	45	45
0.3	0.3	55	55
0.4	0.4	65	65
0.5	0.5	75	75

$$Q_{gir\ TIB} = v \cdot i \quad (1)$$

TIB' den çıkış yapan ısı, soğutma suyu girişi ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkı, hacimsel debi, soğutma suyu ortalama sıcaklığındaki sabit basınç özgül ısısı ve bu sıcaklıktaki suyun özgül ağırlığı değerlerine bağlı olarak Denklem (2)'de verildiği gibi hesaplanır. Denklem (2)'de Q sistemden çıkan ısı akısı, q hacimsel debi, c<sub>p</sub> soğutma suyunun sabit basınç özgül ısısı ρ ortalama sıcaklıktaki soğutucu akışkanın özgül ağırlığıdır.

$$Q_{çık\ TIB} = q \cdot c_p \cdot \rho \cdot (T_{su\ çık} - T_{su\ gir}) \quad (2)$$

Isıl verim Denklem (3)'de verildiği gibi sisteme giren ve sistemden çıkan ısı miktarlarına göre belirlenir.

$$\eta = \frac{Q_{çık\ TIB}}{Q_{gir\ TIB}} \quad (3)$$

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu sıcaklığı, Denklem (4) ve Denklem (5)'teki gibi, her bölümde üç noktadan ölçülen sıcaklık değerlerinin ortalaması olarak hesaplanır.

$$T_B = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (4)$$

$$T_Y = \frac{T_7 + T_8 + T_9}{3} \quad (5)$$

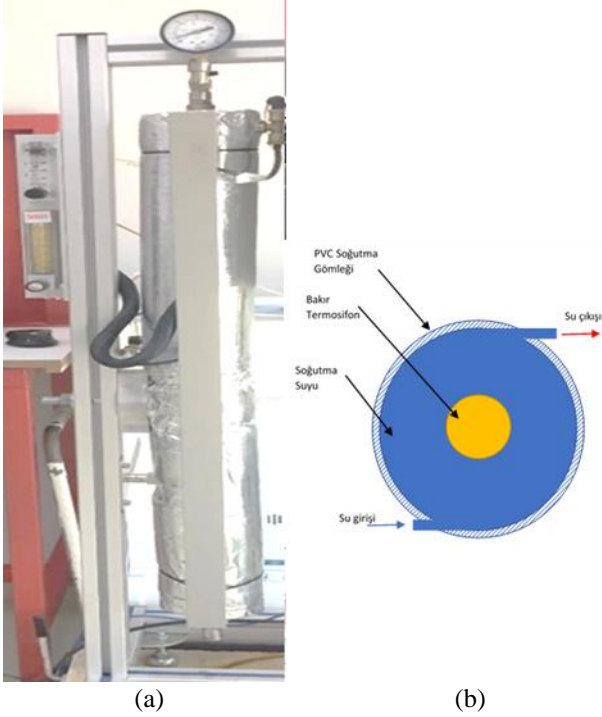
TIB performansını değerlendirmek için önemli bir gösterge olarak ısıl direnç, Denklem (6)'da gösterildiği gibi, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu ortalama sıcaklığı ile giriş gücü arasındaki farkın oranı olarak tanımlanır. Isıl direnç ne kadar yüksek olursa, TIB' in ısıl performansı o kadar düşük olur.

$$R = \frac{\Delta T}{Q_{gir\ TIB}} = \frac{T_B - T_Y}{Q_{gir\ TIB}} \quad (6)$$

### 2.2 Deney düzeneği

Deney düzeneği temel olarak ısıtma sistemi, bir adet su soğutmalı TIB sistemi ve sıcaklık izleme sisteminden oluşur. Deney için kullanılan TIB malzemesi bakır olup; iç çapı 16 mm ve et kalınlığı 2 mm ölçülerindedir. Toplam uzunluğu 1000 mm olan TIB' in buharlaştırıcı uzunluğu 300 mm adyabatik bölüm uzunluğu 400 mm yoğuşturucu bölümü 300 mm'dir. Dış yüzeyi yalıtılmış ve bu çalışmada kullanılan TIB Şekil 1a'da verilmiştir. Yoğuşturucu bölümü alt ucunda

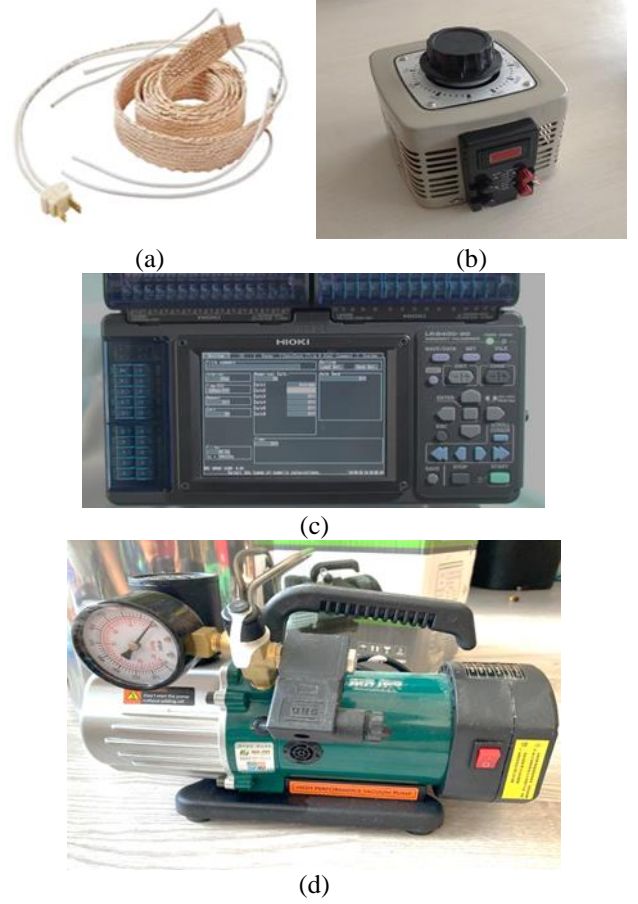
teğetsel soğuk su girişi ve üst ucunda teğetsel olarak su çıkışı barındıran iç çapı 50 mm olan PVC malzemeden imal edilmiş silindirik bir su gömleği ile soğutulmaktadır. Su gömleği ve TIB şematik gösterimi Şekil 1b’de verilmiştir.



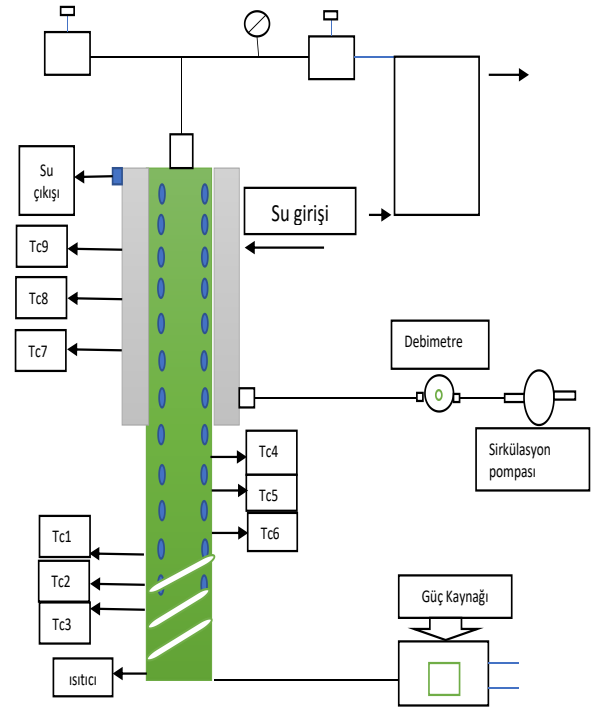
Şekil 1. (a) Deney düzeneğindeki yalıtılmış TIB fotoğrafı, (b) Su gömleği kesitinin şematik gösterimi

Buharlaştırıcının dış duvarında ihtiyaç duyulan ısı akısını oluşturmak için Şekil 2a’da verilen Fisher Brand Scientific marka cam elyaf bez yalıtımlı bir ısıtma bandı kullanılmıştır. İstenen ısınma gücünün stabil bir şekilde sağlanabilmesi için Şekil 2b’deki ayarlanabilir özellikte Walfront marka voltaj regülatörü kullanılmıştır. yoğuşturucudan gelen ısı, soğutma suyu tarafından taşındığı için suyun giriş ve çıkış sıcaklığını ölçmek için Omega marka K tipi zırhlı ısı çift pozisyonun ve veri toplamak için Şekil 2c’deki Hioki LR8400-20 model 30 kanal veri toplama cihazı, Şekil 2d’de görülen vakum pompası (FUJ-PCV) kullanılmıştır. TIB’ da ki basıncın 1Pa olduğundan emin olmak için iç basınç bir vakum ölçer ile izlenmiştir.

Veri işleme için bilgisayar kullanılmıştır. Ayrıca deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3’de verilmiştir. TIB’ in hava geçirmez olmasını sağlamak için hazırlanan iş akışkanı, bir şırınga kullanılarak TIB yan valfinden TIB’ e enjekte edilmiştir. Soğutma suyu debisinin ölçümü için bir su rotametri kullanılmıştır. Rotametre ile soğutma ceketine akışın 0.4 L/dk debi ile girmesi sağlanmıştır. Bu debi değeri sabit kalabildiği bir giriş ve çıkış arasında okunabilir belirgin sıcaklık farkının gözlenebildiği debi değeridir. Isıtma telinin çıkış akımı ve voltajı, voltaj regülatörü tarafından ayarlansa da deney için gereken 300 W ısı akısını doğru bir şekilde elde edebilmek için ısıtıcı girişinden hemen önce voltaj ve akım değerleri kontrol amaçlı olarak bir multimetreden (tip GM86) okunmuştur.



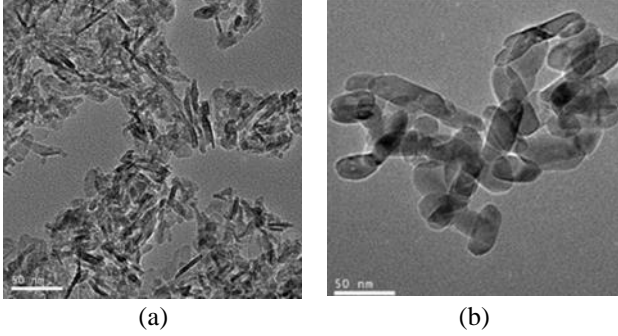
Şekil 2. (a) Deney düzeneğinde kullanılan cam yünü yalıtımlı ısıtıcı bant, (b) Voltaj regülatörü, (c) Veri toplama cihazı, (d) Vakum pompası



Şekil 3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

### 2.3 Kullanılan nano akışkanlar ve özellikleri

$Al_2O_3-H_2O$  ve  $TiO_2-H_2O$  nanoakışkanları istenen konsantrasyon ve miktarlarda EGE Nano tek firmasından dispersiyon olarak temin edilmiştir. İlgili nano malzemelerin Geçirimli Elektron Mikroskobu (GEM) görüntüleri Şekil 4 (a) ve (b)'de sırayla  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  için verilmiştir. Buradan  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  nano malzemelerinin kümelenme halinde oldukları ve sırasıyla küresel ve çubuk formunda olduğu görülmektedir. Nano partiküllerin boyutu ve yoğunluğu Tablo 2'de listelenmiştir.



Şekil 4. (a)  $Al_2O_3$  ve (b)  $TiO_2$  nanoparçacık GEM görüntüleri

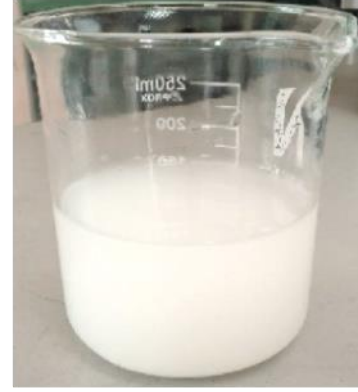
Tablo 2.  $Al_2O_3$  ve  $TiO_2$  nano parçacıkların fiziksel özellikleri

Tür	Parçacık Boyutu (nm)	Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	Isıl İletkenlik (W/m.K)
$Al_2O_3$	20	3.7	36
$TiO_2$	20	4.23	10

Nano sıvıda iyi bir stabilite elde etmek için sterik dirençli ve stabilizeye sahip yüzey aktifleştiriciler baz sıvı ve nanomalzemenin türüne göre kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan nanoakışkanlar hazırlanırken sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS), sodyum dodesil sülfonat (SDS) ve polietilen piroolidon (PVP) kullanılmıştır. Potansiyometre tarafından sağlanan tam potansiyel değerine göre, üç nanoakışkanın spesifik potansiyel değerleri Tablo 3'te listelenmiştir. Zeta potansiyel değeri  $TiO_2-H_2O$  nano akışkanında en yüksek iken  $Al_2O_3-H_2O$  en düşüktür.  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  hibrit nanoakışkanın stabilitesi,  $TiO_2-H_2O$ 'dan daha düşük ancak  $Al_2O_3-H_2O$ 'dan daha güçlüdür. Bu durum hibrit nano akışkanın stabilite açısından kendini oluşturan alt bileşenlerin olumlu özelliklerini kendi içinde barındırabildiği anlamına gelmektedir.  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  nano akışkanının çıplak gözle tanımlanan görünümü beyaz yarı opak likit şeklinde olup Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 3. Nano akışkanların beta potansiyel değerleri ve kararlılık ölçekleri

Nano Akışkan	Potansiyel Değeri (mV)	Stabilite ölçeği
$TiO_2-H_2O$	42.2	(<40 mV) iyi
$Al_2O_3-H_2O$	40.1	(<40 mV) iyi
$Al_2O_3+TiO_2-H_2O$	41.6	(<40 mV) iyi



Şekil 5.  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  nanoakışkan

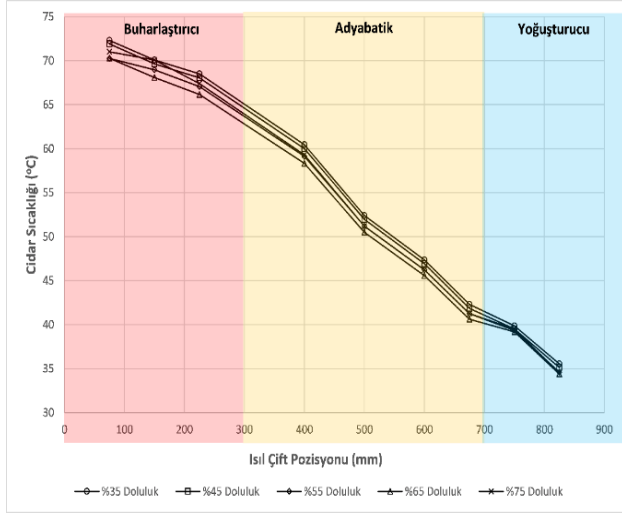
### 3 Bulgular ve tartışma

$Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  nanoakışkan stabilitesinin, ortogonal test sonuçlarına göre  $Al_2O_3-H_2O$  nanoakışkanından daha iyi olduğu bilinmektedir.  $Al_2O_3-H_2O$  nano akışkanının  $TiO_2-H_2O$  nanoakışkanı ile birleştirilmesi sonucu elde edilen hibrit nanoakışkanın yüksek stabilite ve iyi reolojik özellikler gibi avantajlarının yanında ısıl performansının da test edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle hibrit nanoakışkanın ısıl performansı bir TIB içinde farklı konsantrasyon ve farklı doldurma oranları altında test edilmiştir.

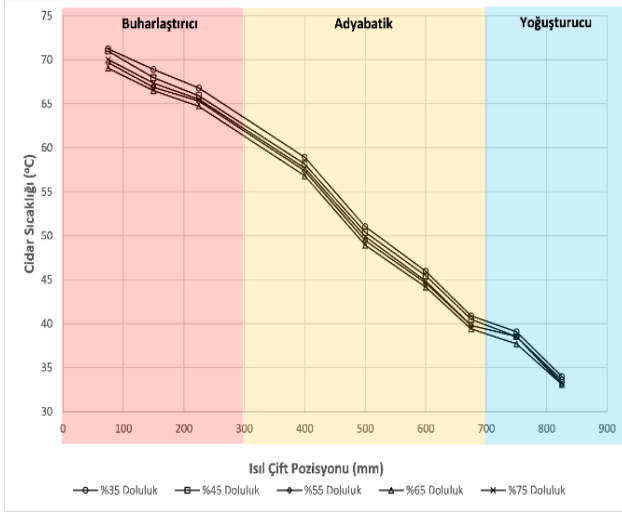
#### 3.1 Doldurma oranının ısıl performans üzerine etkileri

Şekil 6a ve b, farklı doldurma oranlarında  $TiO_2-H_2O$  ve  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  nanoakışkanları ile doldurulmuş TIB' in doldurma oranına göre duvar sıcaklığındaki değişimlerin verildiği diyagramlarıdır. TIB doldurma oranı %35-75 arasında değişirken  $TiO_2-H_2O$  nanoakışkanı ile doldurulmuş sistemde ortalama buharlaştırıcı bölgesi sıcaklığı ve yoğunlaştırıcı bölgesi sıcaklığı arasındaki farklar sırayla 31.6-31.03-30.36-30.1 ve 31.08 °C iken;  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  ile doldurulan sistemde ise 31.0-30.8-30-29.9 ve 30.5 °C'dir. Doldurma oranı %35-%65 aralığında olduğunda her iki çalışma sıvısına karşılık gelen sıcaklık farkının azaldığı ve hibrit nanoakışkanın sıcaklık farkının her doldurma oranında tek nano akışkanından daha küçük olduğu gözlemlenebilir. Çünkü yüksek ısıl iletkenliğe sahip  $Al_2O_3$  nanoparçacıklarının eklenmesi,  $TiO_2-H_2O$  nano akışkana dayalı TIB' in ısıl performansını daha da artırır. Aynı zamanda akışkan doluluk oranı %65'e ulaştığında iki çalışma akışkanı arasındaki sıcaklık farkının en düşük değere ulaştığı ve toplam cidar sıcaklığının bu sırada en düşük olduğu görülmektedir. Doluluk oranı %75'e ulaştığında sıcaklık farkı tekrar artar, bu da akışkanın doluluk oranı %65 olduğunda TIB' in ısı emme oranının nispeten yüksek olduğunu gösterir. Bunun nedeni, çalışma akışkanının kapladığı yüzey alanının doldurma oranı %65 olduğunda %75 olduğu duruma göre daha küçük olmasıdır. Doldurma oranı %65 olduğunda gaz-sıvı akışı için daha büyük bir akış uzunluğu, tam gaz-sıvı teması ve daha iyi ısı transferi için daha fazla alan vardır. Aynı zamanda, TIB içinde küçük hacimli nanoakışkan bulunduğu hızla buharlaşma nedeniyle ısı TIB yoğunlaştırıcısına daha hızlı taşınarak TIB' in daha iyi ısıl

performans gösterdiği tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu da görülmüştür [18-23].



(a)

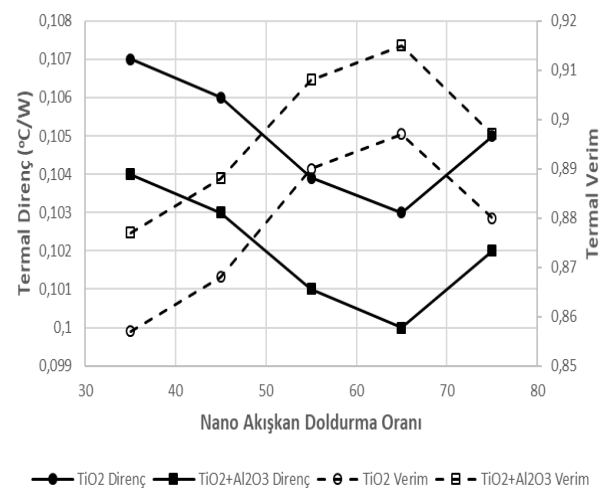


(b)

**Şekil 6.** Cidar sıcaklığının doldurma oranına göre değişimi (a)  $TiO_2$  için, (b)  $Al_2O_3+TiO_2$  hibrit nano akışkanı için

Şekil 7 farklı doldurma oranlarında iki çalışma sıvısının ısı direncinin ve ısı verimliliğinin karşılaştırmalı analiz diyagramını göstermektedir. Şekilde akışkanın doluluk oranı arttıkça ısı direncin önce azaldığını ve sonra arttığı ısı veriminin ise önce arttığını ve sonra azaldığını görülmektedir. Doldurma oranının %65 olduğu deney koşulunda ısı performansın en yüksek gözlemlendiği durumdur.  $TiO_2-H_2O$  ve  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  nanoakışkanları ile işletilen TIB için ısı direnci değerleri sırasıyla 0.103K/W ve 0.1K/W ve ısı verim değerleri sırasıyla %89.7 ve %91.5 dir. Bunun nedeni, aynı ısı girişi için sıvı doldurma oranı düşüldükçe iş akışkanının buharlaşma hızının o kadar hızlı artmasıdır. Bu koşullar altında buharlaştırıcı daha çok buhar üreten buharın yoğunlaşma hızının buharlaşma hızından düşük olması sonucu bahsi geçen koşullarda iş akışkanının ısı emme kapasitesi daha düşmektedir. Bu nedenle buharlaştırıcının ortalama sıcaklığı yükseldiği için şiddetli vakalarda ısı

direnç artar ve kuruma sınırı aşılır. TIB' in doldurma oranı çok yüksekse, buharlaşma işlemi sırasında sıvı kolayca yoğuşturucuya girebilir, bu da yoğuşturucuda bir sıvı filminin birikmesine neden olur ve TIB' in normal çalışmasını etkiler.

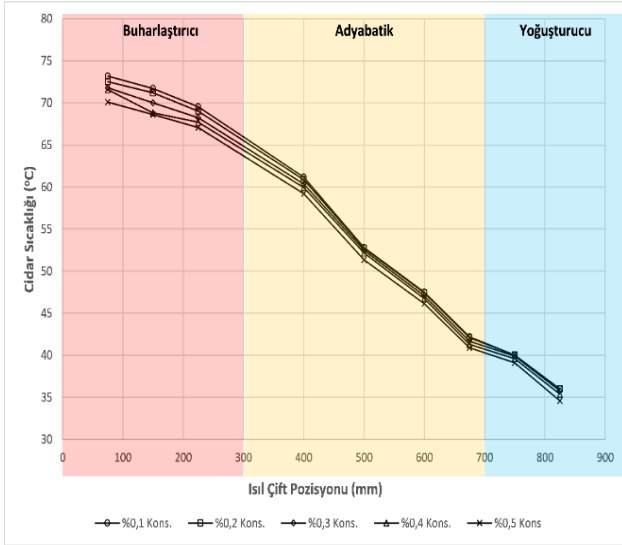


**Şekil 7.** Isıl direnç ve verimin doldurma oranına ve nano akışkan türüne göre karşılaştırmalı değişimi

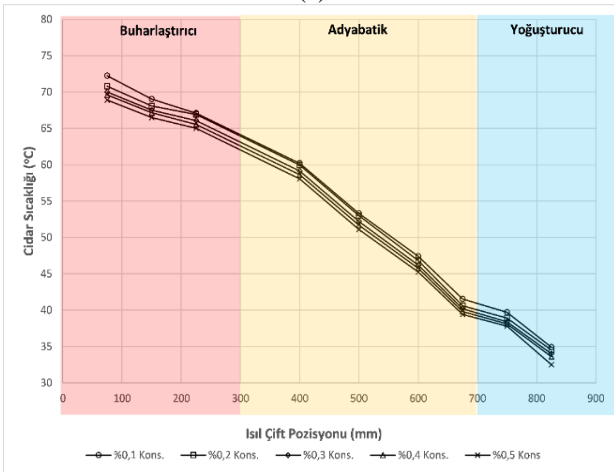
### 3.2 Konsantrasyonun ısı performans üzerine etkileri

Deneyler sırasında ısıtma gücü 300W, sıvı doluluk oranı %65 olan ısı borusu yatay düzlemlerle  $90^\circ$  açı yapacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 8a ve b'de sırayla TIB' in buharlaştırıcıdan yoğuşturucuya doğru farklı konumlarında  $TiO_2-H_2O$  ve  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  nanoakışkanlarının farklı hacim konsantrasyonlarının cidar sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere buharlaştırıcıdan yoğuşturucuya doğru ilerledikçe her iki çalışma akışkanının cidar sıcaklığının sürekli olarak düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni, buharlaştırıcının sabit bir ısı akısına maruz bırakılması, yoğuşturucunun ise ısıtma alanından uzakta olması ve ısının sürekli olarak soğutma suyu tarafından sistemden uzaklaştırılmasıdır, dolayısıyla sıcaklık buharlaştırıcınınkinden daha düşüktür. Çalışma sıvısı olarak farklı konsantrasyonlarda  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$  kullanıldığında, TIB' in her iki ucundaki sıcaklık farkı  $TiO_2-H_2O$ 'dan daha düşüktür. %0.1- %0.5 konsantrasyon aralığında  $TiO_2-H_2O$  buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasındaki ortalama sıcaklık farkı sırasıyla 32.07-31.55-30.9- 30.61 ve 30.41  $^\circ C$ ' dir.  $Al_2O_3+TiO_2-H_2O$ 'nun ortalama sıcaklık farkı sırasıyla 30.75- 30.59- 30.33- 30.27 ve 30.23  $^\circ C$ ' dir. Ayrıca TIB buharlaştırıcısının ortalama cidar sıcaklığı ve her iki ucundaki sıcaklık farkının yüksek konsantrasyonda daha düşük olduğu görülmektedir. Nanoparçacıkların konsantrasyonu yükseldikçe, akışkan içinde birim hacimdeki parçacık sayısının daha fazla olduğu ve bu sayede çalışma sıvısının ısı iletkenliğinin arttığı görülmektedir. Bu sayede duvar yüzeyinin ısı emme oranı artarak buharlaştırıcı cidar sıcaklığının düşmesini sağlar. Aynı zamanda buharlaştırıcının ısı emme oranının yüksek olması nedeniyle buharlaşma oranı daha hızlı olmakta ve buharın yoğuşturucuya aktardığı ısı miktarı artmaktadır.

Yoğuşturucuya aktarılan ısı miktarı arttığı için yoğuşturucuda bir sıcaklık artışı gözlenir. Yoğuşturucu ortalama sıcaklığının artması sayesinde her iki uçtaki cidarlar arasındaki sıcaklık farkı daha küçük olur. Öte yandan, nanopartiküllerin konsantrasyonu ne kadar yükselirse daha çok sayıda nanopartikül yoğun kaynama koşulları altında yüksek hızda hareket eder. Bu durum buharlaştırıcı çalışma ortamının daha güçlü bir şekilde penetre edilmesine imkan tanıyarak taşınımı ısı transferini iyileştirir. Taşınımı ısı transferinin iyileşmesi buharlaştırıcı cidar sıcaklığını düşürür.



(a)

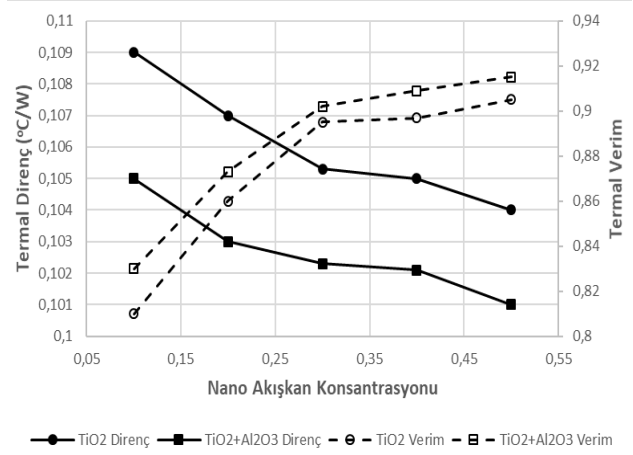


(b)

Şekil 8. Cidar sıcaklığının konsantrasyona göre değişimi, (a) TiO<sub>2</sub> için, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub> hibrit nano akışkanı için

Şekil 9'da farklı nanoparçacık konsantrasyonlarında ısı direnç ve ısı verimliliğinin karşılaştırmalı analiz diyagramını göstermektedir. Şekilden, her iki nano akışkan çalışma ortamı içi de TIB' in ısı direncinin, nano partiküllerin konsantrasyonu arttıkça azaldığı ve ısı veriminin kademeli olarak arttığı görülebilir. Nanopartiküllerin konsantrasyonu %0.1'den %0.5'e kademeli olarak yükseldiğinde TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O'nun kullanıldığı TIB'lerde ısı direnç sırasıyla %4.59 ve %3.81 oranında azalırken; ısı verimleri

sırasıyla %11.33 ve %10.34 artmıştır. Nano parçacık konsantrasyonunun TIB' in ısı performansı üzerindeki etkisinin, tek bir nanoakışkanda hibrit bir nanoakışkana göre daha belirgin olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Isı direnç ve verimin konsantrasyonlara ve nanoakışkan türüne göre karşılaştırmalı değişimi

Konsantrasyon yükseldikçe TIB' in ısı direncinin düşmesinin nedeni, nano akışkan buharlaştırıcıda şiddetli bir şekilde kaynadığında, katı-sıvı temas açısını küçülterek çalışma sıvısının yüzeyi ıslatabilirliğini değiştiren bazı parçacıkların TIB cidarına birikmesidir. Bu sayede kaynama süreci teşvik edilmiş olur. Konsantrasyon %0.1 ile %0.5 arasında artarken, kaynama performansındaki artış konsantrasyon artışına paralel olarak daha fazla olur. Şekilden, hibrit nanoakışkan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O'nun TIB' in ısı transfer özelliklerini hem ısı direnç hem de ısı verimliliği açısından tekli nanoakışkan TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O'dan daha fazla iyileştirdiği görülebilir. Sonuçlar literatürle uyumlu olmakla birlikte, farklı TIB çalışma koşulları, nanopartikül karışım oranı ve yüzey aktifleştirici içeriğine bağlı olarak bazı farklılıklar görülmesi mümkün olacaktır. Nanopartiküllerin konsantrasyonu %0.5 olduğunda, TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nanoakışkanlarının ısı verimi sırasıyla %90.4 ve %91.8'dir. Bunun nedeni hibrit nanoakışkanın, daha gelişmiş bir ısı transfer performansı elde edilmesini sağlayan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün güçlü ısı iletkenliği avantajlarını da içermesidir. Ayrıca küresel parçacık yapısına sahip Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçacıklarının çubuk parçacık yapısına sahip TiO<sub>2</sub> parçacıklar arasındaki boşlukları doldurulmasıyla özel bir ısı transfer ağı oluşur. Bu durum daha yoğun bir katı-sıvı ara yüzeyinin ortaya çıkmasını sağlayarak ısı transfer yolunu kısaltır ve ara yüzün ısı direncini azaltır. %0.3'ün üzerindeki konsantrasyonlarda, ısı direnç ve ısı verim, konsantrasyon azaldıkça veya arttıkça düz olma eğilimindedir. Nanopartiküllerin konsantrasyonunun artması tüm çalışma akışkanlarının ısı iletkenliğinin artmasını sağlayarak TIB performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olsa da; nanopartiküllerin bir kısmı TIB cidarında birikecektir. Cidarda az miktarda birikme, kaynama çekirdeklenme bölgelerini arttıracaktır, ancak cidarda biriken parçacık miktarının çok artması nanoakışkanın ısı iletkenliğini azaltmakla kalmayıp etkili çekirdeklenme bölgelerinin

orijinal cidar yapısını tahrip ederek performans kaybı yaratabilir. Bu nedenle TIB' in ısıl etkinliğindeki hızlı artan ısıl verimin eğilimi belli bir konsantrasyon değerinden sonra yavaşlamıştır. Bu durumda konsantrasyon miktarının bir optimizasyon parametresi olduğu anlaşılmaktadır.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada, iyi reolojik özelliklere sahip küresel TiO<sub>2</sub> nano parçacıklar ve yüksek ısıl iletkenliğe sahip çubuk formulu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano parçacıklar kullanılarak hazırlanmış hibrit nano akışkanın ısıl performansı distile su ile çalışmak için tasarlanmış bir termosifon ısı borusunda test edilmiştir. TiO<sub>2</sub> nanoakışkanın Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile karıştırılması ile elde edilen hibrit nanoakışkanın TIB 'in ısıl direnci ve ısıl verimliliği üzerindeki etkileri, farklı nanopartikül konsantrasyonlarında ve sıvı dolun oranında incelenmiştir. Ana sonuçlar aşağıdaki gibidir:

1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O hibrit nanoakışkanının kararlılığının Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- H<sub>2</sub>O 'kinden daha yüksek olduğu saptanmıştır.
2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O hibrit nanoakışkanın TIB ısı borusuna uygulanması halinde ısıl performans verilerinin TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nano akışkanı yüklenmiş sistemden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
3. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O konsantrasyonunun %0.5 olduğu durumda, TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nanoakışkana kıyasla TIB ısıl direncinin %2.96 azaldığı ve ısıl verimin %1.54 arttığı görülmüştür. Bu durum hibrit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nanoakışkanın, TiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O nanoakışkanına kıyasla TIB ısıl performansını daha da iyileştirebileceğini göstermektedir.
4. Nano partikül konsantrasyonunun %0.1 ile %0.5 aralığında olduğu durumda, nano partiküllerin konsantrasyonunun artması ile birlikte ısıl verimin sürekli arttığı görülmüştür.
5. Akışkan doluluk oranının artması ile ısıl verimin önce arttığı sonra azaldığı görülmüştür. En yüksek ısıl verimin %65 doldurma oranında elde edildiği gözlemlenmiştir.
6. Bu çalışmada TIB' in ısıl performansının optimum kombinasyonun %0.5 nanopartikül konsantrasyonu ve %65 sıvı dolun oranı koşulları tespit edilmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %3

#### Kaynaklar

- [1] H. Zhou, C. Dai, Y. Liu, X. Fu, and Y. Du, Experimental investigation of battery thermal management and safety with heat pipe and immersion phase change liquid, *Journal of Power Sources*, 473228545, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228545>.
- [2] N. Watanabe, N. Phan, Y. Saito, S. Hayashi, N. Katayama, and H. Nagano, Operating characteristics of an anti-gravity loop heat pipe with a flat evaporator that has the capability of a loop thermosyphon, *Energy Conversion and Management*, 205112431, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112431>.
- [3] Y. Zhao, X. Yang, L. Yan, Y. Bai, S. Li, P. Sorokin,

- and L. Shao, Biomimetic nanoparticle-engineered superwetable membranes for efficient oil/water separation, *Journal of Membrane Science*, 618118525, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118525>.
- [4] C. Shen, Y. Zhang, Z. Wang, D. Zhang, and Z. Liu, Experimental investigation on the heat transfer performance of a flat parallel flow heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168120856, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120856>.
- [5] Z. Zhang, R. Zhao, Z. Liu, and W. Liu, Application of biporous wick in flat-plate loop heat pipe with long heat transfer distance, *Applied Thermal Engineering*, 184116283, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116283>.
- [6] D. Karimi, Md S. Hosen, H. Behi, S. Khaleghi, M. Akbarzadeh, J. V. Mierlo, and M. Berecibar, A hybrid thermal management system for high power lithium-ion capacitors combining heat pipe with phase change materials, *Heliyon*, 7, (8), e07773, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07773>.
- [7] Z. Zhou, Y. Lv, J. Qu, Q. Sun, and D. Grachev, Performance evaluation of hybrid oscillating heat pipe with carbon nanotube nanofluids for electric vehicle battery cooling, *Applied Thermal Engineering*, 196117300, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117300>.
- [8] H. Ghorabae, M. R. S. Emami, F. Moosakazemi, N. Karimi, G. Cheraghian, and M. Afrand, The use of nanofluids in thermosyphon heat pipe: A comprehensive review, *Powder Technology*, 394250–269, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.045>.
- [9] K. Martin, A. Sözen, E. Çiftçi, and H. M. Ali, An experimental investigation on aqueous Fe–CuO hybrid nanofluid usage in a plain heat pipe, *International Journal of Thermophysics*, 411–21, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02716-6>.
- [10] D. Yılmaz Aydın, E. Çiftçi, M. Gürü, and A. Sözen, The Impacts of Nanoparticle Concentration and Surfactant Type on Thermal Performance of A Thermosyphon Heat Pipe Working With Bauxite Nanofluid, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43, (12), 1524–1548, 2021. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1800141>.
- [11] S. Hoseinzadeh, S. A. R. Sahebi, R. Ghasemiasl, and A. R. Majidian, Experimental analysis to improving thermosyphon (TPCT) thermal efficiency using nanoparticles/based fluids (water), *The european physical journal plus*, 1321–8, 2017. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2017-11455-3>
- [12] M. M. Sarafraz, O. Pourmehran, B. Yang, and M. Arjomandi, Assessment of the thermal performance of a thermosyphon heat pipe using zirconia-acetone nanofluids, *Renewable Energy*, 136884–895, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.035>.
- [13] A. K. Reji, G. Kumaresan, A. Sarathi, A. G. P.



- Saiganesh, R. Suriya Kumar, and M. M. Shelton, Performance analysis of thermosyphon heat pipe using aluminum oxide nanofluid under various angles of inclination, *Materials Today: Proceedings*, 451211–1216, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.247>.
- [14] M. Gürü, A. Sözen, U. Karakaya, and E. Çiftçi, Influences of bentonite-deionized water nanofluid utilization at different concentrations on heat pipe performance: An experimental study, *Applied Thermal Engineering*, 148632–640, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.024>.
- [15] E. Sadeghinezhad, A. R. Akhiani, H. S. C. Metselaar, S. Tahan Latibari, M. Mehrali, and M. Mehrali, Parametric study on the thermal performance enhancement of a thermosyphon heat pipe using covalent functionalized graphene nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, 175115385, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115385>.
- [16] H. Jouhara, S. Almahmoud, D. Brough, V. Guichet, B. Delpech, A. Chauhan, L. Ahmad, and N. Serey, Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchanger, *Energy*, 219119624, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119624>.
- [17] B. Fikri, E. Sofia, and N. Putra, Experimental analysis of a multistage direct-indirect evaporative cooler using a straight heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, 171115133, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115133>.
- [18] A. Shafieian, M. Khiadani, and A. Nosrati, A review of latest developments, progress, and applications of heat pipe solar collectors, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95273–304, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.014>
- [19] R. Ramachandran, K. Ganesan, M. R. Rajkumar, L. G. Asirvatham, and S. Wongwises, Comparative study of the effect of hybrid nanoparticle on the thermal performance of cylindrical screen mesh heat pipe, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 76294–300, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.030>.
- [20] J. Qu, H. Wu, and P. Cheng, Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, (2), 111–115, 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.10.001>.
- [21] M. Keshavarz Moraveji and S. Razvarz, Experimental investigation of aluminum oxide nanofluid on heat pipe thermal performance, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, (9), 1444–1448, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.024>.
- [22] A. B. Solomon, K. Ramachandran, and B. C. Pillai, Thermal performance of a heat pipe with nanoparticles coated wick, *Applied Thermal Engineering*, 36106–112, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.004>.
- [23] T. Tharayil, L. G. Asirvatham, V. Ravindran, and S. Wongwises, Thermal performance of miniature loop heat pipe with graphene–water nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93957–968, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.011>.

