

Experimental Investigation of the Influences of AlN/Deionized Water Nanofluid on Heat Pipe Performance Parameters

Erdem ÇİFTÇİ* 

Gazi University Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Teknikokullar-Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 23/08/2020

Revision: 28/09/2020

Accepted: 09/10/2020

Highlights

- Nanofluid.
- Heat pipe.
- Heat transfer enhancement.

Keywords

Aluminum Nitride
Thermal Resistance
Efficiency

An aqueous nanofluid solution containing aluminum nitride (AlN) nanoparticles was prepared and tested in a plain heat pipe under different operating conditions. The thermal resistance and efficiency of the heat pipe, both of which are the performance indicators for heat pipes, were comparatively studied, and the alterations in temperature of the heat pipe wall were monitored.

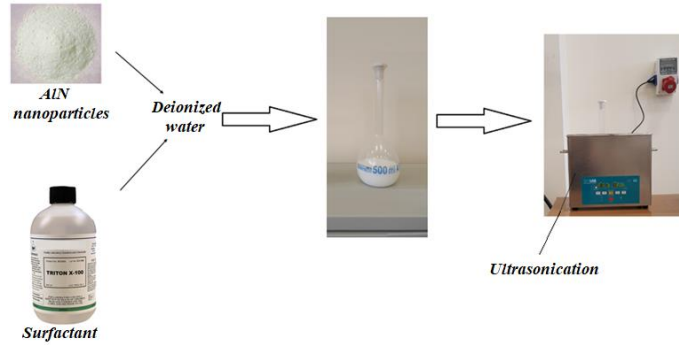


Figure A. The nanofluid preparation process

Purpose: The aim of this study is to improve the heat transfer performance of a heat pipe via AlN/deionized water nanofluid. Initially, a nanofluid suspension consisting of AlN nanoparticles (60-70 nm) and Triton X-100 surfactant was prepared at the final volumetric concentration of 1.3%, and then tested in a heat pipe.

Theory and Methods: The circular heat pipe used in the experiments was made of copper material with a wall thickness of 1 mm, an inner diameter of 13 mm and a length of 1000 mm. In order to observe the effects of nanoparticles, experiments were initially carried out for deionized water and then for nanofluid solution. In the experiments, the thermal resistance and efficiency of the heat pipe, both of which are the performance indicators for heat pipes, were comparatively studied, and the alterations in temperature of the heat pipe wall were monitored. The experiments were run under 150 W, 300 W, and 400 W heating power, and 3 g/s, 6 g/s, and 9 g/s cooling water mass flow rate conditions.

Results: With the use of nanofluid containing aluminum nitride nanoparticles instead of deionized water as the working fluid, the maximum enhancements in thermal resistance and efficiency were recorded as 10.9% and 45.6%, respectively.

Conclusion: Heat pipe wall temperatures and boiling point were reduced significantly by using nanofluid as a working fluid. When AlN nanofluid was used instead of deionized water, a decrease of up to 10.9% was achieved in the thermal resistance of the heat pipe. A maximum increase of 45.6% was obtained in the efficiency of the heat pipe with the usage of nanofluid. The benefits of using AlN nanofluid in the heat pipe were also been demonstrated.

GU J Sci, Part C, 8(4): 858-871 (2020)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

AIN/Saf Su Nanoakışkanının Isı Borusu Performans Parametreleri Üzerindeki Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması

Erdem ÇİFTÇİ*

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar-Yenimahalle/ANKARA

Öz

Sağlamış oldukları birçok fayda nedeniyle ısı sistemlerde geleneksel iş akışkanları yerine nanoakışkan çözeltilerinin kullanımı son yılların en popüler konularından biri olmuştur. Bu deneysel çalışmada alüminyum nitrür (AIN) nanoparçacıkları içeren sulu nanoakışkan çözeltisi hazırlanmış ve farklı çalışma koşulları altında çalışan düz bir ısı borusunda test edilmiştir. Deneylerde kullanılan dairesel kesitli ısı borusu et kalınlığı 1 mm, iç çapı 13 mm ve uzunluğu 1000 mm olacak şekilde bakır malzemeden imal edilmiştir. Nanoparçacıkların sağlamış olduğu etkileri gözlemleyebilmek amacıyla deneyler önce saf su ardından nanoakışkan çözeltisi için gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ısı boruları için performans göstergesi olan ısı borusunun ısıl direnci ve verimi karşılaştırmalı olarak ele alınmış, ısı borusu duvar sıcaklığındaki değişimler incelenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu veriminin iyileştirilebileceğini ortaya koymuştur. Saf su yerine alüminyum nitrür nanoparçacıkları içeren nanoakışkanın iş akışkanı olarak kullanımıyla ısıl direnç ve verimdeki en yüksek artışlar sırasıyla %10,9 ve %45,6 olmuştur.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23/08/2020
Düzeltilme: 28/09/2020
Kabul: 09/10/2020

Anahtar Kelimeler

Alüminyum Nitrür
Isıl Direnç
Verim

Keywords

Aluminum Nitride
Thermal Resistance
Efficiency

Experimental Investigation of the Influences of AIN/Deionized Water Nanofluid on Heat Pipe Performance Parameters

Abstract

Utilization of nanofluidic solutions instead of conventional working fluids in thermal systems has become one of the most popular topics in recent years due to the many benefits they provide. In this experimental study, an aqueous nanofluid solution containing aluminum nitride (AIN) nanoparticles was prepared and tested in a plain heat pipe under different operating conditions. The circular heat pipe used in the experiments was made of copper material with a wall thickness of 1 mm, an inner diameter of 13 mm and a length of 1000 mm. In order to observe the effects of nanoparticles, experiments were initially carried out for deionized water and then for nanofluid solution. In the experiments, the thermal resistance and efficiency of the heat pipe, both of which are the performance indicators for heat pipes, were comparatively studied, and the alterations in temperature of the heat pipe wall were monitored. The data obtained from the experiments revealed that the heat pipe efficiency can be improved by employing nanofluid instead of deionized water. With the use of nanofluid containing aluminum nitride nanoparticles instead of deionized water as the working fluid, the maximum enhancements in thermal resistance and efficiency were recorded as 10.9% and 45.6%, respectively.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir sıcaklık farkının var olmasıyla vuku bulan, ısı enerjisinin bir ortamdan başka bir ortama aktarılması işlemi, büyük miktarda enerji dönüşümünün söz konusu olduğu süreçlerden biridir. Genellikle ısı değiştiricisi olarak adlandırılan cihazlar aracılığıyla gerçekleştirilen ısı transferi, enerji verimliliğinin önem kazandığı günümüz uygulamalarında büyük ölçüde yarar sağlanabilecek bir konumdur. Bu amaçla bilinen performans artırma yöntemlerinin daha da geliştirilmesi (örneğin mevcut yalıtım malzemelerinin ısıl ve/veya mekanik işlemlerle belirli özelliklerinin iyileştirilmesi) bilim insanlarının odak noktası haline gelmiştir. Bu eğilimin bir benzeri de ısı transferi uygulamalarında geleneksel iş akışkanı yerine içerisinde nano boyutta parçacıklar içeren akışkanların-bu tür akışkanlara nanoakışkan denilmektedir- kullanımı şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Nanoakışkanların kullanıldıkları sistemin ısı transfer performansını

arttırması, esasen temel iş akışkanının termofiziksel özelliklerinin (özgül ısı, yoğunluk, ısıl iletkenlik ve viskozite) iyileştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Sözen vd. tarafından yapılan çalışmalar neticesinde nanoakışkanların ısı transferini iyileştirmesinin başlıca sebepleri şu şekilde açıklanmıştır [1]:

- Akışkan içerisine katılan nanoparçacıkların kullanım esnasında birbirleriyle olan etkileşimleri/çarpışmaları karışım içindeki türbülansın şiddetini arttırmaktadır.
- Nanoparçacıkların akışkan içerisinde oluşturduğu ekstra alanlar etkin ısı transfer alanının artmasını ve buna bağlı olarak da ısı transferinin iyileşmesini sağlamaktadır.
- Katıların sıvılara kıyasla ısı iletim katsayılarının daha büyük olmasının bir sonucu olarak, temel akışkan içerisine katılan, büyük ölçüde yüksek ısıl iletkenliğe sahip katı nanoparçacıklar akışkanın ısı iletim katsayısını arttırır.
- Akışkanın özgül ısı, içerisine nanoparçacıkların katılmasıyla artar.

Nanoakışkanlar genellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin nano boyuta indirgenmesi ve sıvı bir akışkanla belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilirler. Bilindiği üzere metaller yüksek ısıl iletkenliğe sahiptirler ve bu nedenle nanoakışkan hazırlamada en çok tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Benzer şekilde, metal oksit bileşikleri (alümina, titanyum dioksit vb.) de nanoakışkan hazırlamak için uygun malzemelerdendir. Temel akışkan içerisine katılan nano boyuttaki parçacıklar akışkanın ısı iletim katsayısını, özgül ısını, yoğunluğunu ve viskozitesini arttırmakta, diğer bir deyişle termofiziksel özelliklerini iyileştirmekte, bu da nanoakışkanın kullanıldığı sistemin performansında artış olarak karşımıza çıkmaktadır. Buna ek olarak, nanoparçacıkların şekil, büyüklük gibi fiziksel özellikleri, hacimsel/kütlesel derişim oranı, temel akışkan türü (su, etilen glikol, vb.) ve çalışma sıcaklığı da nanoakışkan çözeltisinin termofiziksel özellikleri üzerinde etkiye sahiptir.

Nanoakışkan hazırlanması sürecinde dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar vardır. Hazırlanan çözeltinin kimyasal olarak kararlı bir yapıda olması, nanoparçacıkların temel akışkan içerisinde dağılımının homojen olması, katı parçacıkların birleşerek daha büyük parçacıklar oluşturmaması ve çökelmenin önlenmesi, eğer kullanılacaksa hem yüzey aktif maddenin hem de nanoparçacıkların temel akışkanın kimyasal yapısını bozması gerekmektedir [2].

Isı boruları bilinen en basit ısı değıştiricilerindedir. Hem imalatının kolay olması hem de istenilen boyutlarda üretilebilmesi bu cihazların çok geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır. Isı boruları içerisine konulan akışkanın faz değışiminden faydalanarak ısının ortamlar arasında transferini sağlarlar. İçerisindeki akışkanın hareketinde yer çekiminden yararlanma durumuna göre düz bir yapıda imal edilebileceği gibi-bu tip ısı borularına termosifon tipi ısı borusu denilmektedir-, yer çekiminin etkin olmadığı durumlar için fitilli ya da ağ yapılı olacak şekilde de üretilebilirler. Nanoakışkanların ısı borusunda kullanımıyla ilgili birçok araştırmacı tarafından hem deneysel hem de teorik çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar nanoakışkan kullanımıyla ısı borularında performans artışı elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Örneğin, Chen vd. bakır malzemenin imal ettikleri termosifon tipi bir ısı borusunun performansını belirlemek amacıyla yaptıkları deneysel çalışmada su, etanol ve u ile CuO nanoparçacıkları içeren nanoakışkanları iş akışkanı olarak kullanmışlar ve ısı borusunun performans parametrelerini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda nanoakışkan kullanımının sistemin performansını arttırdığını gözlemlemişlerdir [3]. Sadeghinezhad vd. iç bölümü sinterlenmiş ısı borusunun performans parametrelerini hem saf su hem de nanoakışkan kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Grafen-su nanoakışkanı ve saf su kullanarak yaptıkları deneylerde, eğim açısının etkisini belirlemek amacıyla, yatayla 0° ve 60° açı yapacak şekilde tuttıkları ısı borusunda 4 farklı ısıtıcı gücü ve 4 farklı derişim oranı (ağırlıkça %0,025, %0,05, %0,075 ve %0,01) için performans parametrelerini ve bunların değışimini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda grafen-su nanoakışkanı kullanımıyla saf su ile yapılan deneylere kıyasla ısı borusunun direncinde %48,4'e varan oranlarda bir azalma elde ettiklerini bildirmişlerdir. Benzer şekilde ısı iletim katsayısındaki artış oranının ise %37,2 olduğunu ve bu sonuca 60° eğim açısı ile 60 W ısıtıcı gücü koşullarında elde ettiklerini ifade etmişlerdir [4]. Gürü vd. bentonit nanoparçacıkları içeren 3 farklı derişimde (ağırlıkça %0,5, %2 ve %4) sulu nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlar ve bunları termosifon tipi bir ısı borusunda kullanarak, farklı ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debisi koşulları altında ısı borusu performans parametrelerini incelemişlerdir. Hem saf su hem de ağırlıkça %0,5 oranında yüzey aktif madde kullanarak hazırladıkları nanoakışkan çözeltileri ile yaptıkları deneylerde ısı borusu verimini, evaporatör

ve kondenser bölgesi duvar sıcaklıklarını ve ısı borusunun direncindeki değişimleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu performansının önemli ölçüde iyileştirilebileceğini ortaya koymuşlardır. Isıl verimde en büyük artış oranının %37 olduğunu ve bu değeri 200 W ısıtıcı gücü ile 5 g/s soğutma suyu debisinde yapılan deneylerden elde ettiklerini bildirmişlerdir [5]. Sarafraz vd. biyonanoakışkan hazırlamışlar ve yaptıkları deneylerle yeni nesil bu akışkanın düz bir ısı borusundaki (termosifon) performansını araştırmışlardır. Deneylerinde kullanmış oldukları bakır malzemeden yapılmış ısı borusu 10,7 mm iç çapa, 12 mm dış çapa ve 280 mm uzunluğa sahip olup, evaporatör bölgesinden sabit ısı akışı uygulayarak kondenser bölgesinde yer alan soğutma ceketine olan ısı transferini incelemişlerdir. Akışkan dolun oranının, eğim açısının ve derişim oranının termosifon performans parametrelerine olan etkilerini belirlemişlerdir. Nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu direncinin azaltılabileceğini ve buna bağlı olarak da ısı performansını artırılabilirliğini ortaya koymuşlardır [6]. Qu vd. titreşimli bir ısı borusunda sulu alümina nanoakışkan kullanımının deneysel olarak incelendiği bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullandıkları bakır malzemeden imal edilmiş, iç çapı 2 mm ve dış çapı 3 mm olan ısı borusunda hem saf su hem de nanoakışkan için deneyler yaparak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri verilere dayanarak nanoakışkanların ısı borusunda iş akışkanı olarak kullanılabilirliğini gösteren araştırmacılar, ısıl dirençte %32'ye varan oranlarda azalma gözlemlediklerini belirtmişlerdir [7]. Xu vd. farklı derişimlerde hazırlamış oldukları etanol-su (hacimce %20, %30, %40, %50 ve %75), ve grafen-su nanoakışkanları (0,1 mg/ml, 0,3 mg/ml, 0,5 mg/ml, 0,75 mg/ml ve 1,0 mg/ml) ile titreşimli ısı borusunda deneyler yapmışlar ve her bir akışkan türünün ısı borusu performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Yüzey aktif madde türünün de etkilerini belirledikleri bu çalışmada etanol-su karışımı için ısıl performanstaki en iyi sonucun hacimce %30 oranındaki karışım oranında elde edildiğini, grafen nanoakışkanının ise ısıl direnci %25'e varan oranlarda düşürdüğünü bildirmişlerdir. Isıl performans açısından en uygun yüzey aktif maddenin Triton X-100 olduğunu gözlemlenmiştir [8]. Bu çalışmalara ek olarak titanyum dioksit [9, 10], boksit [11], magnezyum oksit [12, 13] ve çinko oksit [14] gibi materyallerle de nanoakışkan çözeltileri hazırlanmış ve bunların ısı borularında kullanımıyla performansta önemli artışlar elde edildiği görülmektedir.

Bu çalışmada alüminyum nitrür (AlN) nanoakışkanının hazırlanması ve bu akışkanın ısı borusunda iş akışkanı olarak kullanımının farklı çalışma koşulları altında ısıl performansta sağlayacağı etkiler deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla bir ısı borusu test düzeneği kurularak hem saf su hem de nanoakışkan çözeltisi için 3 farklı ısıtıcı gücü (150 W, 300 W ve 450 W) ve 3 farklı derişim oranında deneyler yapılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Alüminyum nitrür nanoakışkanının daha önceden hazırlanmamış ve farklı çalışma koşulları altında ısı borusundaki kullanımının etkilerinin incelenmemiş olması bu çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL & METHOD)

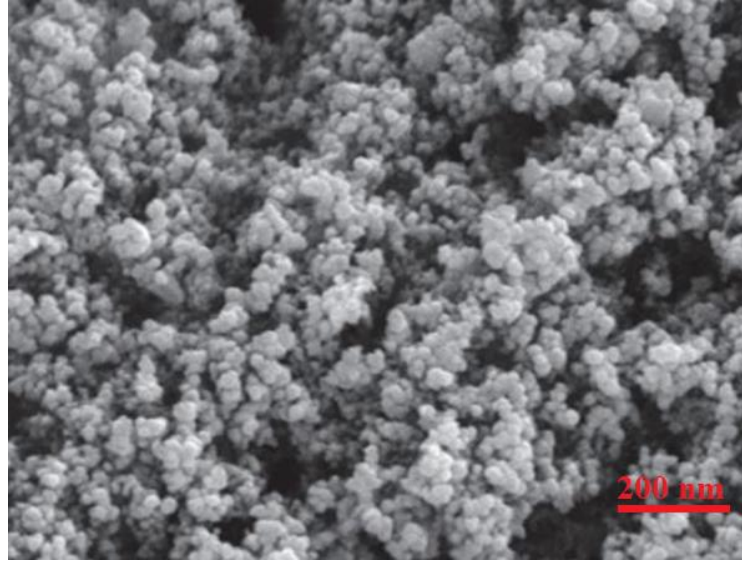
2.1. Nanoakışkanın Hazırlanması (Preparation of Nanofluid)

Çalışmada kullanılan AlN nanoparçacıkları Nanografi Nanoteknoloji adlı firmadan temin edilmiştir. Firma tarafından sunulan analiz sonuçlarına göre malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan AlN nanoparçacıkları ortalama 60-70 nm boyutlarında olup, malzemeye ait SEM görüntüsü ise Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AlN nanoparçacıklarının kimyasal bileşimi

Bileşen	N	O	C	Fe	Si
%	33,0	0,5	0,04	0,01	0,045

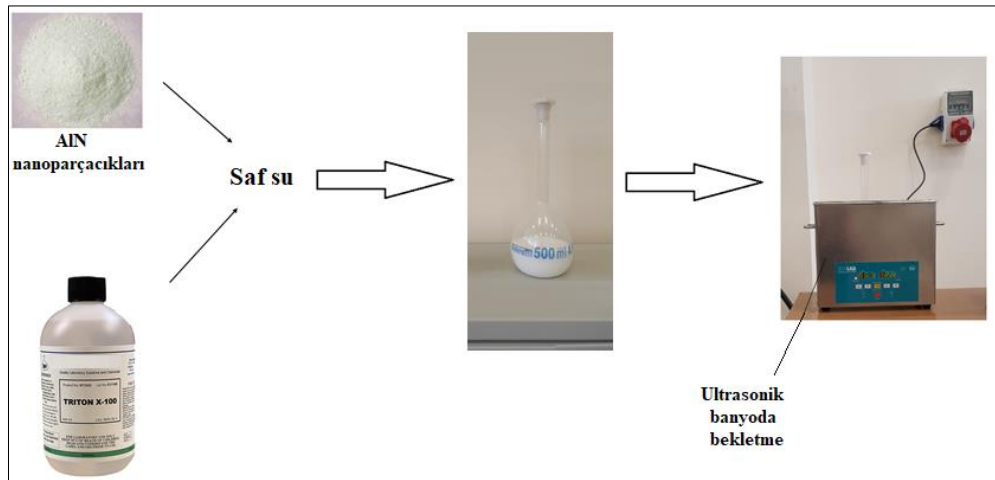
AlN yüksek ısıl iletkenliğe (320 W/mK) sahip bir malzeme olmasına karşın, düşük ısıl genişlemenin yanı sıra korozyon ve aşınmaya karşı da oldukça dayanıklı bir malzemedir. Yoğunluğu 3,26 g/cm³tür ve erime noktası yüksektir. Özellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması alüminyum nitrürün nanoakışkan hazırlamak amacıyla kullanılabilirliğini akla getirmiştir.



Şekil 1. AlN nanoparçacıklarına ait SEM görüntüsü.

Nanoakışkan süspansiyonlarının hazırlanmasında nanoparçacıkların temel akışkan içerisinde üretildiği tek aşamalı yöntem (single-step method) ile malzeme boyutunun bir dış ortamda nano boyuta düşürülerek bu parçacıkların temel akışkan içerisine eklenmesi ilkesine dayanan iki aşamalı yöntem (two-step method) olarak ifade edilen yöntemlerden birisi kullanılır. İki aşamalı yöntemde nanoparçacıkların temel akışkan içerisinde homojen bir şekilde dağılması kontrol edilebildiğinden bu yöntemle elde edilen nanoakışkan çözeltilerinin daha kararlı ve homojen olduklarını söylemek mümkündür [2]. Bu sebeple nanoakışkan hazırlanmasında iki aşamalı yöntem tercih edilmiştir. Nanoakışkan hazırlamak amacıyla temel akışkan olarak saf su kullanılmış ve içerisine ağırlıkça %1,3 oranında derişime sahip olacak şekilde AlN nanoparçacıkları eklenmiştir. Hem nanoparçacıkların çökeltme süresini uzatmak hem de kararlı yapıda bir nanoakışkan süspansiyonu hazırlamak amacıyla karışım içerisine ağırlıkça %0,2 oranında yüzey aktif madde (Triton X-100) eklenmiştir. Hazırlanan nanoakışkan süspansiyonun homojen olmasını sağlamak amacıyla yaklaşık 3 saat ultrasonik banyoda bekletilmiştir (Şekil 2).

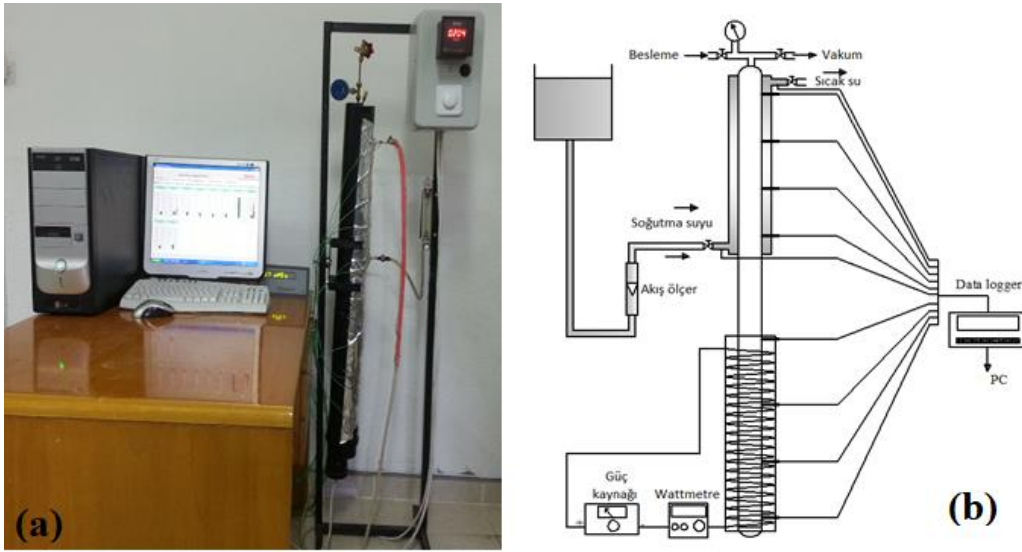
Nanoakışkanın hazırlanmasında kullanılan Triton X-100 yüzey aktif maddesi iyonik olmayan bir yüzey aktif maddedir. Bu tür yüzey aktif maddelerin içindeki iyonlar, sıvı akışkan içerisinde dağılmamaktadır. Yüzey aktif maddenin çözünürlüğünün anyonik, katyonik ve amfoterik tip yüzey aktif maddeler için sıcaklıktaki herhangi bir artışa paralel olarak artmasına karşılık, iyonik olmayan bir yüzey aktif madde için çözünürlük sıcaklık değişse dahi sabit kalmaktadır. Bu nedenle yüzey aktif madde olarak Triton X-100 kullanılmıştır.



Şekil 2. AlN/saf su nanoakışkanının hazırlanması ve ultrasonik banyoda bekletilmesi süreçleri.

2.2. Deney Düzenine Ait Bilgiler (Details of the Test Rig)

Deneylerde 1 mm et kalınlığına sahip bakır malzemeden yapılmış, uzunluğu 1 m ve iç çapı 13 mm olan düz bir boru kullanılmıştır (Şekil 3). Kullanılan ısı borusu alttan ve üstten 400 mm'lik kısımları sırasıyla evaporatör ve kondenser bölgelerini, ortada kalan 200 mm'lik bölümü ise adyabatik bölgeyi oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Evaporatör bölgesine uygulanan ısı girdisi ortalama 1,5 kW gücünde bir ısıtıcı vasıtasıyla sağlanmış ve güç girdisi bir wattmetre (Fluke-43b analizör) üzerinden gözlemlenmiştir. Kondenser bölümüne taşınan ısı miktarını belirlemek amacıyla bu bölüm, içerisinde su dolaşan bir soğutma ceketini ile sarılmıştır. Soğutma suyunun debisi bir debimetre aracılığıyla ayarlanmış ve ölçülmüştür. Isı borusunun tamamı ısı kayıplarını en düşük seviyede tutmak amacıyla yalıtılmıştır. Yalıtım işlemi için 0,040 W/mK ısı iletkenliğine sahip cam yünü malzeme kullanılmıştır. Teorik analizler için sıcaklık ölçümleri yapılmış, ölçümler için dörder adet evaporatör ve kondenser bölgelerine, birer adet soğutma suyu giriş ve çıkış bölgelerine yerleştirilmiş toplam 10 adet K tipi termokupl kullanılmıştır (Şekil 4). Bir datalogger aracılığıyla tüm sıcaklık ölçüm verileri anlık olarak izlenmiş ve kayıt altında tutulmuştur. Isı borusu içerisine şarj edilen akışkan miktarı akışkanın türüne bakılmaksızın toplam ısı borusu hacminin üçte birine (yaklaşık 44,2 ml) tekabül edecek şekilde ayarlanmıştır. Akışkan şarj edilmeden önce ısı borusu bir vakum pompası aracılığıyla vakumlanarak deneylerin vakum basıncında yapılması sağlanmıştır. Evaporatör bölgesine 150 W, 300 W ve 450 W güçlerinde ısı güç girdisi sağlanarak ısı borusu içindeki akışkanın buharlaşması sağlanmış, buharlaşarak yükselen akışkanın sahip olduğu ısıyı çekmek amacıyla da kondenser bölgesindeki su ceketini içerisinde 3 g/s, 6 g/s ve 9 g/s kütleli debilerde soğutma suyu dolaştırılmıştır. Tekrarlanabilirlik ve deneysel sonuçların doğruluğu açısından her bir akışkan türü için 3 defa deney yapılmış ve bunların ortalaması teorik analizlerde kullanılmıştır.

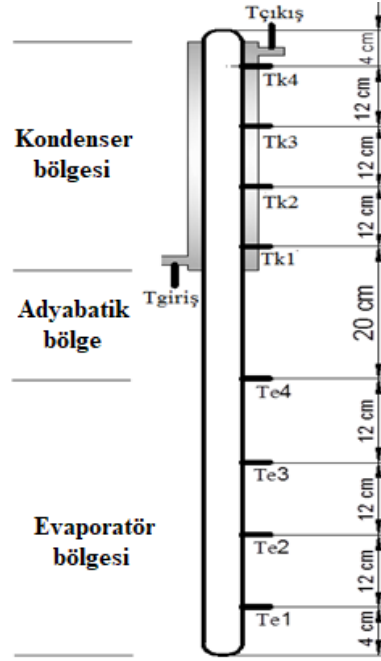


Şekil 3. Deney düzenine (a) genel görünümü ve (b) şematik diyagramı.

2.3. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Deneyel bir çalışmada kullanılan ölçüm aletlerinin kalibrasyonu ve bağlantı noktaları, veri okuma ve deney koşulları (ortam sıcaklığı, nemi vb.) deney sonuçlarını etkileyen, diğer bir deyişle hata ve belirsizlik oluşuma neden olan parametrelerdir. Deneyel standartları yakalayabilmek için belirsizlik analizi yapılarak elde edilen sonuçların hassasiyetinin ortaya konulması gereklidir. Bu amaçla yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin belirsizliği Holman tarafından önerilen yöntem kullanılarak hesaplanmıştır [15]. Kullanılan termokuplların hassasiyeti ($w_{\text{termokupl}}$), termokupl bağlantıları ($w_{\text{termokupl, bağlantı}}$) ve okuma hatalarından ($w_{\text{okuma, sıcaklık}}$) kaynaklanan sıcaklık ölçümündeki toplam belirsizlik (W_S):

$$W_S = \left[(w_{\text{termokupl}})^2 + (w_{\text{termokupl, bağlantı}})^2 + (w_{\text{okuma, sıcaklık}})^2 \right]^{1/2} \quad 1$$



Şekil 4. Termokuplların ısı borusu üzerindeki yerleşimi.

$$W_S = [(0,5)^2 + (1)^2 + (0,5)^2]^{1/2} = 1,224 \quad 2$$

Kondenser bölgesindeki ısıyı çekmek için tasarlanan soğutma ceketinde dolaşan suyun kütleli debisinin ölçümündeki toplam belirsizlik (W_D), debimetrenin hassasiyeti ($w_{debimetre}$) ve okuma hatalarından ($w_{okuma, debi}$) kaynaklanmaktadır:

$$W_D = [(w_{debimetre})^2 + (w_{okuma, debi})^2]^{1/2} \quad 3$$

$$W_D = [(0,01)^2 + (0,01)^2]^{1/2} = 0,0141 \quad 4$$

Benzer şekilde, evaporatör bölgesinden uygulanan ve wattmetre aracılığıyla kontrol edilen elektrik gücünün ölçümündeki toplam belirsizlik (W_G), wattmetrenin hassasiyeti ($w_{wattmetre}$) ve okuma hatalarından ($w_{okuma, wattmetre}$) kaynaklanmaktadır. Bu durumda elektriksel güç ölçümündeki belirsizlik:

$$W_G = [(w_{wattmetre})^2 + (w_{okuma, wattmetre})^2]^{1/2} \quad 5$$

$$W_G = [(0,9)^2 + (1)^2]^{1/2} = 1,3453 \quad 6$$

Yapılan işlemler sonucunda her bir ölçüm için hesaplanan belirsizlik miktarı Tablo'2 de verilmiştir.

Tablo 2. Ölçüm aletlerinin hesaplanan belirsizlikleri

Ölçüm Aleti / Ölçüm Türü	Teknik Özellikler	Hassasiyet	Hesaplanan Belirsizlik
Termokupl & Data logger / Sıcaklık ölçümü	K tipi; ölçüm aralığı - 200°C - +1200°C	± % 0,5 °C	± % 1,224 °C
Debimetre / Debi ölçümü	Ölçüm aralığı 0-12 g/s	± 0,01 g/s	± 0,0141 g/s
Wattmetre / Elektriksel güç ölçümü	Fluke-43b analizör	± 1 W	± 1,3453 W

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

Kondenser bölgesindeki soğutma ceketinde dolaşan suya olan ısı transferi Eş. (7) kullanılarak hesaplanmıştır. Burada \dot{m} soğutma suyunun debisini (3 g/s, 6 g/s veya 9 g/s), c_p akışkanın sabit basınçtaki

özgül ısısını, $T_{çıkış,su}$ soğutma suyu çıkış sıcaklığını ve $T_{giriş,su}$ ise soğutma suyu giriş sıcaklığını temsil etmektedir.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{çıkış,su} - T_{giriş,su}) \quad 7$$

Hazırlanan nanoakışkan çözeltisinin özgül ısı değeri Maxwell bağıntısı olarak bilinen ve yaygın olarak kullanılan aşağıdaki bağıntı aracılığıyla yaklaşık olarak hesaplanmıştır [16].

$$c_{p,na} = (1 - \phi)c_{p,ta} + \phi c_{p,np} \quad 8$$

Eş. (8)'de yer alan $c_{p,na}$ nanoakışkanın özgül ısı değerini, ϕ derişim oranını, $c_{p,ta}$ temel akışkanın özgül ısı değerini ve $c_{p,np}$ ise nanoparçacığın özgül ısı değerini göstermektedir.

Isı borusunun verimi kondenser bölgesinden atılan ısı miktarının evaporatör bölgesine sağlanan ısı miktarına oranlanmasıyla hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_e} \quad 9$$

Diğer bir deyişle, Eş. (9)'daki \dot{Q}_e , buharlaşma bölgesinden verilen ısıtıcı gücünü temsil etmektedir.

Isı borusunun ısıl direnci, evaporatör bölgesi ortalama sıcaklığı ile kondenser bölgesi ortalama sıcaklığı arasındaki farkın sağlanan ısıtıcı gücüne oranıdır (Eş. (10)).

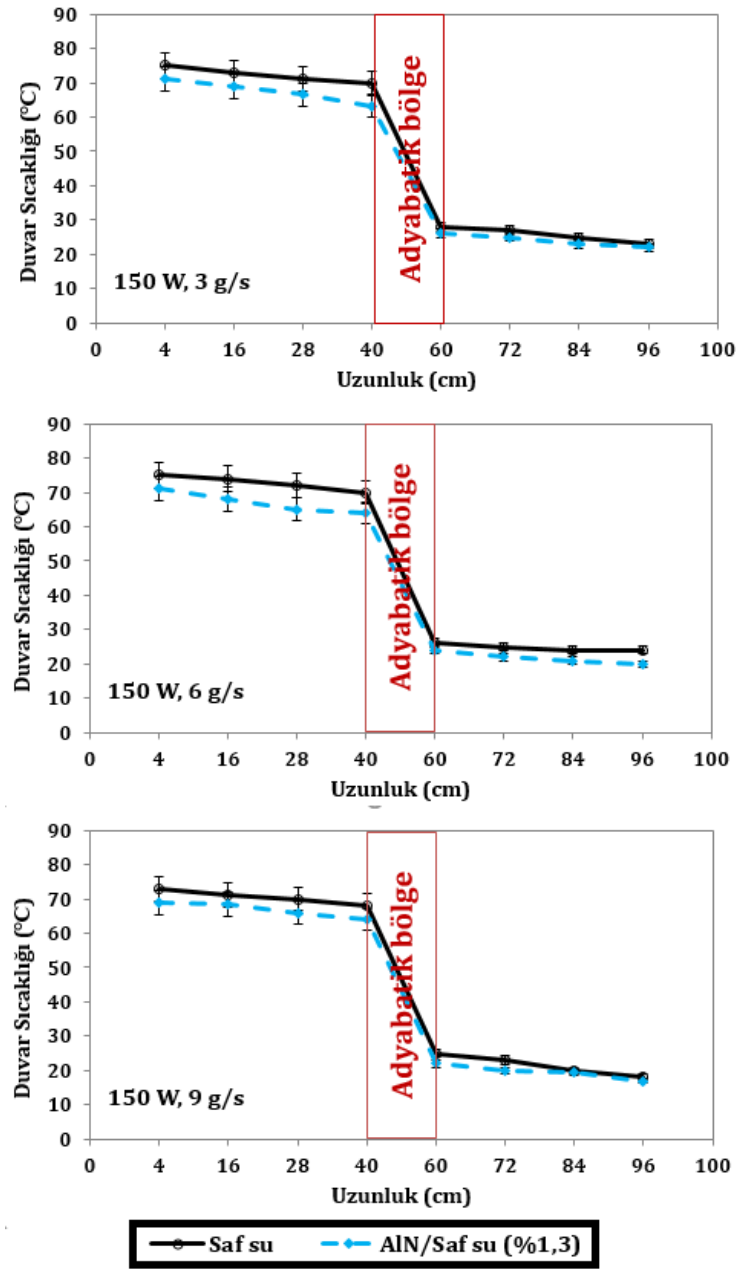
$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_{giriş}} \quad 10$$

Eş. (10)'da yer alan ortalama sıcaklık farkı (ΔT), Eş. (11)'de sunulan bağıntı ile hesaplanmıştır.

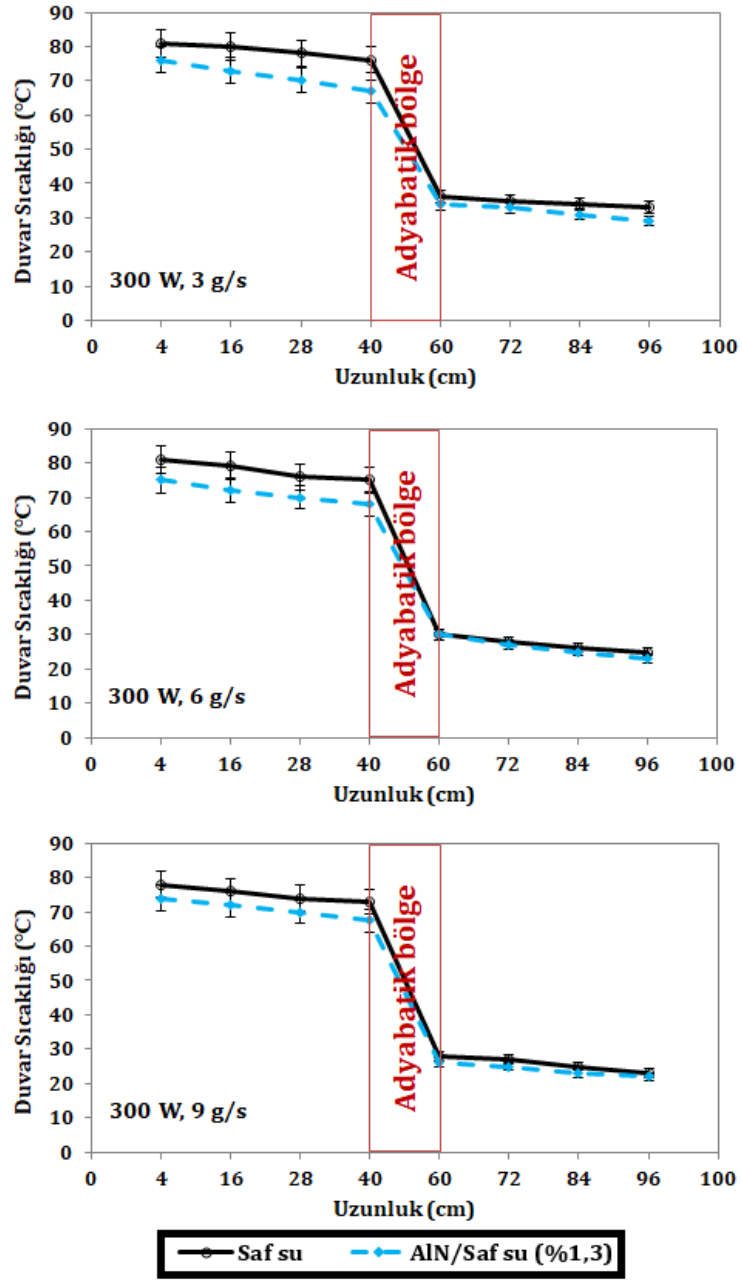
$$\Delta T = \left(\frac{T_{e1} + T_{e2} + T_{e3} + T_{e4}}{4} \right) - \left(\frac{T_{k1} + T_{k2} + T_{k3} + T_{k4}}{4} \right) \quad 11$$

Isı borusunun performans parametrelerindeki değişimleri incelemek amacıyla deneyler önce saf su ardından nanoakışkan çözeltisi ile sırasıyla 150 W, 300 W ve 450 W ısıtıcı güçleri ve 3 g/s, 6 g/s ve 9 g/s soğutma suyu debisi koşullarında yapılmıştır. Evaporatör bölgesinden uygulanan 150 W ısıl güce karşılık ısı borusu duvarlarındaki sıcaklık değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu duvar sıcaklığında azalmalar görülmüştür. Ayrıca bu grafik nanoakışkanın daha düşük sıcaklıkta kaynamaya başladığını göstermektedir. Düşük ve yüksek soğutma suyu debilerinde kondenser bölgesinde oluşan sıcaklık farkının ortalama debi değerinde (6 g/s) oluşan farka göre daha az olduğu saptanmıştır. Benzer şekilde 300 W ve 450 W ısıl güçlerde saf su ve AlN nanoakışkan için elde edilen duvar sıcaklıkları sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

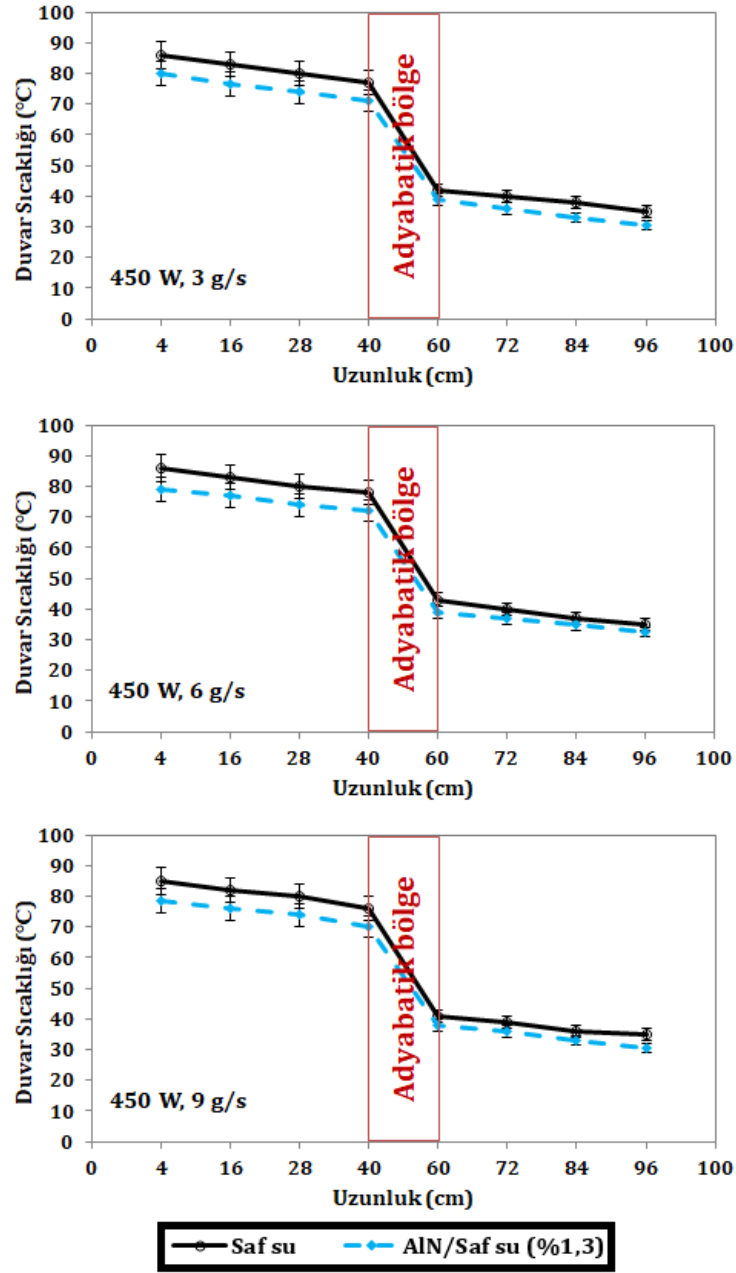
300 W ve 450 W ısıtıcı güçleri için elde edilen duvar sıcaklık dağılımları incelendiğinde iş akışkanı olarak saf su yerine AlN nanoakışkan kullanılması sonucu ısı borusu duvar sıcaklıklarında düşüş sağlandığı gözlemlenmiştir. Nanoakışkan içerisindeki katı parçacıkların akışkan içerisindeki ısı transfer alanlarını artırması sonucu ısı transfer hızında da büyük ölçüde iyileşme olduğu saptanmıştır. 450 W ısıtıcı gücü ve 6 g/s soğutma suyu debisi çalışma koşullarında saf su ve AlN nanoakışkan için kaynama sıcaklıklarının 79°C ve 86°C olarak ölçülmesi bu hususa verilebilecek en belirgin örneklerdir.



Şekil 5. 150 W ısıtıcı gücünde elde edilen duvar sıcaklıkları.

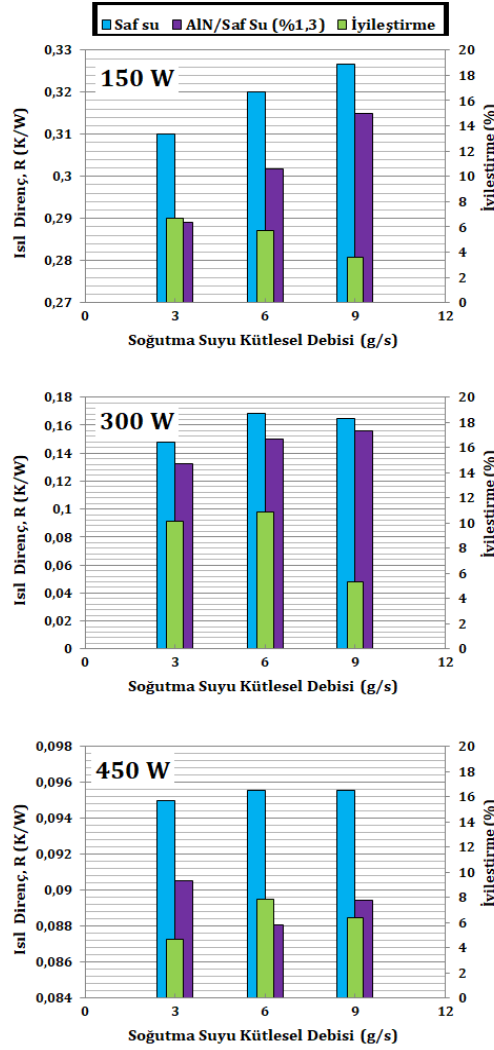


Şekil 6. 300 W ısıtıcı gücünde elde edilen duvar sıcaklıkları.



Şekil 7. 450 W ısıtıcı gücünde elde edilen duvar sıcaklıkları.

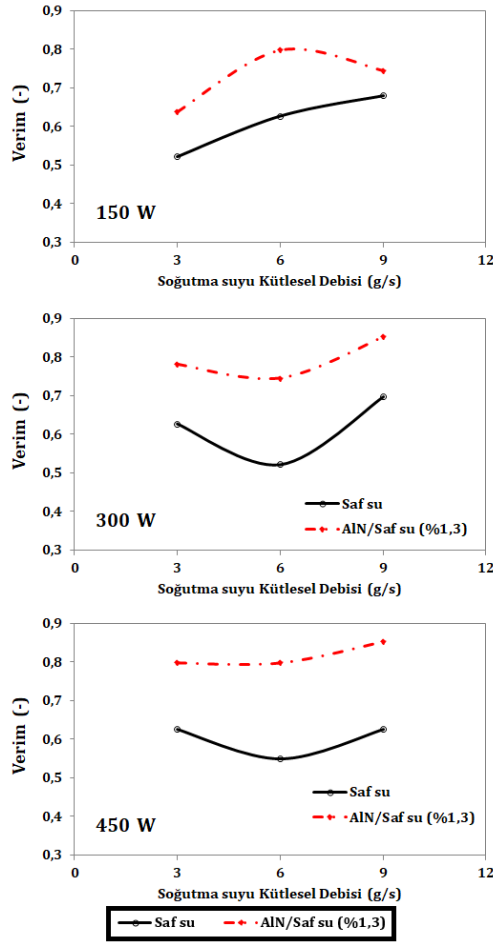
Isı boruları için ısı direnç kavramı, bu cihazların kullanımını sınırlandıran bir parametre olduğundan büyük öneme sahiptir. Isı borusunun direnci ne kadar küçük olursa sistemin evaporatör bölgesinden çekeceği ve kondenser bölgesinden atacağı ısı miktarı o derece büyük olacaktır. Bu nedenle ısı borularının yüksek ısı iletkenliğe ve düşük ısı dirence sahip olması arzu edilmektedir. Saf su ve nanoakışkan kullanılarak yapılan deneyler sonucunda ısı borusunun ısı direncine ait elde edilen veriler Şekil 8’de gösterilmektedir. Şekil 8’de görüldüğü gibi, ısı borusunun direnci tüm koşullar altında saf suya kıyasla nanoakışkan çözeltisi için daha düşük değerlerde olmuştur. Duvar sıcaklıklarından da anlaşılacağı üzere, bu durum sabit bir ısı girdisinde evaporatör ve kondenser bölgelerinin ortalama sıcaklıklarının nanoakışkan kullanıldığında daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. 300 W ısı güç ve 6 g/s soğutma suyu debisinde yapılan testler neticesinde en yüksek iyileştirme oranı gözlemlenmiş olup, saf su yerine nanoakışkan kullanımıyla ısı borusunun ısı direnci 0,168 K/W değerinden 0,15 K/W değerine düşürülmüş, böylece ısı dirençte %10,9 oranında iyileştirme sağlanmıştır. Buna karşın en düşük iyileştirme oranı ise %3,57 olarak 150 W ısı güç ve 9 g/s soğutma suyu debisinde elde edilmiştir.



Şekil 8. Isı borusunun ısı direncindeki değişim ve iyileştirme oranları.

Isı borusunun verimindeki değişimler incelendiğinde ise saf su yerine AlN/saf su nanoakışkanı kullanıldığında verimde büyük ölçüde artış sağlanabileceği gözlemlenmiştir. Isıtıcı gücünün artmasıyla verimdeki artış oranının daha büyük olduğu, yüksek ısıtıcı güçleri ve ortalama soğutma suyu debisi koşullarında ise nispeten daha küçük verim değerleri elde edildiği saptanmıştır. 450 W ve 6 g/s çalışma koşullarında yapılan deneylerde maksimum verim artış oranının en büyük değere ulaştığı (%45,6) gözlemlenmiştir (Şekil 9). Bunun bir sonucu olarak maksimum verim eldesi için ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debisi optimizasyonu gerçekleştirilebilir.

Elde edilen bu bulgular literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların mantıklı ve birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Örneğin, Martin vd. hazırlamış oldukları sulu Fe-CuO hibrit nanoakışkanı ile düz bir ısı borusunda yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda ısı borusunun veriminde %72,63 oranında artma, ısı direncinde ise %16,91 oranında azalma elde ettiklerini bildirmişlerdir. Ayrıca, bu çalışmanın da benzer bir sonucu olarak, artan ısıtıcı gücüne paralel olarak her bir akışkan için genellikle ısı direnci değerlerinde bir azalma olduğunu belirtmişlerdir [17]. Benzer şekilde, Sarafraz vd. termosifon tipi bir ısı borusunda biyolojik olarak ürettikleri gümüş-saf su nanoakışkanı kullanarak yaptıkları deneyler sonucunda iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığında, evaporatör bölümünden kondenser bölümüne doğru sıcaklık dağılımının azaldığını ve nanoparçacık derişiminin optimum derişim değerini aştığında ısı performansta daha iyi sonuçlar elde edildiğini bildirmişlerdir [6]. Humnic vd. demir nanoparçacıkları içeren ve farklı derişimlerde hazırlanmış nanoakışkan çözeltileri ile termosifon tipi ısı borusunda yapmış oldukları çalışma sonucunda, %2 ve %5,3 derişim oranları için ısı borusu veriminde sırasıyla %39 ve %42 oranlarında artış sağlandığını belirtmişlerdir. Ayrıca, nanoparçacık derişim oranının artmasıyla ısı direncin de azaldığını gözlemlenmiştir [18].



Şekil 9. Saf su ve AlN/saf su nanoakışkanı için ısı borusunun verimi.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada düz bir ısı borusunda iş akışkanı olarak saf su yerine içerisinde AlN nanoparçacıkları içeren sulu nanoakışkan çözeltisi kullanımının ısı borusu performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Ortalama 60-70 nm boyutlara sahip AlN nanoparçacıkları ile ağırlıkça %0,2 oranında Triton X-100 yüzey aktif maddesi içeren, ağırlıkça toplam derişimi %1,3 olan AlN/saf su nanoakışkanı hazırlanmış ve çeşitli ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debilerinde deneyler yapılmıştır. Deneysel veriler ışığında hem saf su hem de hazırlanan nanoakışkan çözeltisi için ısı borusu duvar sıcaklıklarındaki değişimler incelenmiş, ısı borusunun ısıl direnci ve verimindeki değişimler belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- İş akışkanı olarak nanoakışkan kullanımıyla ısı borusu duvar sıcaklıklarının ve kaynama noktasının önemli ölçüde düşürüldüğü gözlemlenmiştir.
- Saf su yerine AlN nanoakışkanı kullanıldığında ısı borusunun ısıl direncinde %10,9'a varan oranlarda düşüş sağlanmıştır.
- Isı borusunun veriminde nanoakışkan kullanımıyla maksimum %45,6 oranında bir artış elde edilmiştir.
- AlN nanoakışkanının ısı borusunda kullanımının sağlayacağı faydalar ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sözen A., Variyenli Hİ., Özdemir MB., Gürü M. Upgrading the thermal performance of parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers using MgO nanofluid. *Heat Transfer Research*, 48(419–434), (2017).

- [2] Çiftçi, E. (2020). *Nanoakışkanların Kaynama-Yoğuşma Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 41-42.
- [3] Chen YJ., Wang PY., Liu ZH., Li, YY. Heat transfer characteristics of a new type of copper wire-bonded flat heat pipe using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67(548-559), (2013).
- [4] Sadeghinezhad E., Mehrali M., Rosen MA., Akhiani AR., Latibari ST., Mehrali, M., Metselaar, HSC. Experimental investigation of the effect of graphene nanofluids on heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 100(775-787), (2016).
- [5] Gürü M., Sözen A., Karakaya U., Çiftçi E. Influences of bentonite-deionized water nanofluid utilization at different concentrations on heat pipe performance: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 148(632-640), (2019).
- [6] Sarafraz MM., Hormozi F., Peyghambarzadeh SM. Thermal performance and efficiency of a thermosyphon heat pipe working with a biologically ecofriendly nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57(297-303), (2014).
- [7] Qu J., Wu HY., Cheng P. Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al₂O₃ water nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(111-115), (2010).
- [8] Xu Y., Xue Y., Qi H., Cai W. Experimental study on heat transfer performance of pulsating heat pipes with hybrid working fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 157(119727), (2020).
- [9] Utomo AT., Poth H., Robbins PT., Pacek AW. Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(7772-7781), (2012).
- [10] Akbari A., Saidi MH. Experimental investigation of nanofluid stability on thermal performance and flow regimes in pulsating heat pipe. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(1835-1847), (2019).
- [11] Y. Aydın D., Gürü M., Sözen A. Preparation of bauxite/deionized water nanofluid and experimental investigation of its thermophysical properties. *Politeknik Dergisi*, (basımda).
- [12] Dehaj MS., Mohiabadi MZ. Experimental investigation of heat pipe solar collector using MgO nanofluids. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191(91-99), (2019).
- [13] Pandiaraj P., Gnanavelbabu A., Saravanan P. Experimental and statistical analysis of MgO nanofluids for thermal enhancement in a novel flat plate heat pipes. *International Journal of Nanoscience*, 17(1760018), (2018).
- [14] Aytaç İ., CuO/su ve ZnO/su nanoakışkanların ısı borusu performansına etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, (basımda).
- [15] Holman, J. P. (2001). *Experimental methods for engineers* (7th edition). New York: McGraw-Hill.
- [16] Bianco, V., Manca, O., Nardini, S. and Vafai K., (2015). *Heat transfer enhancement with nanofluids*. New York: CRC Press, 150.
- [17] Martin K., Sözen A., Çiftçi E. and Ali HM. An experimental investigation on aqueous Fe–CuO hybrid nanofluid usage in a plain heat pipe. *International Journal of Thermophysics*, 41(135), (2020).
- [18] Humenic G., Humenic A., Morjan I. and Dumitrache F. Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(656-661), (2011).