



**ISI BORULARININ PERFORMANSININ
NANOAKIŞKANLAR İLE İYİLEŞTİRİLMESİNİN
TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Perihan İlknur IRGATOĞLU AL

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Termodinamik Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ADIGÜZEL
2020
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ISI BORULARININ PERFORMANSININ NANOAKIŞKANLAR İLE
İYİLEŞTİRİLMESİNİN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Perihan İlknur IRGATOĞLU AL

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Termodinamik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2020**

Her Hakkı Saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**ISI BORULARININ ISIL PERFORMANSININ NANOAKIŞKANLAR İLE
İYİLEŞTİRİLMESİNİN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ADIGÜZEL danışmanlığında, Perihan İlknur IRGATOĞLU AL tarafından hazırlanan bu çalışma 01/06/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı - Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Faraz AFSHARİ	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ADIGÜZEL	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../2020 tarih ve/..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ISI BORULARININ PERFORMANSININ NANOAKIŞKANLAR İLE İYİLEŞTİRİLMESİNİN TEORİK OLARAK İNCELENMESİ

Perihan İlknur IRGATOĞLU AL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Termodinamik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nesrin ADIGÜZEL

Isı transferi birçok endüstriyel ve tüketici sisteminde önemli bir yere sahiptir. Isı borusu, ısı transferinde kullanılan, yüksek ısıl iletkenliğe sahip bir cihazdır. Isı borusu; ısıyı çalışma akışkanına aktaran buharlaştırıcı bölümü, ısı taşınması için kullanılan adyabatik bölüm ve çalışma akışkanını soğutan yoğunlaştırıcı bölümü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Isı borusunun çalışmasının temel prensibi, içerisinde bulunan çalışma sıvısının fazını değiştirmektir. Isı borusu, buharlaştırıcıdan ısıyı emmekte, adyabatik bölümden yoğunlaştırıcıya taşımakta ve ısınıyı çevreye aktarmaktadır yani bir bölgeden başka bir bölgeye buharlaşma ve yoğunlaşma faz değişimini kullanarak ısıyı transfer etmektedir.

Isı borusunda kullanılan geleneksel çalışma sıvılarının zayıf olan ısıl iletkenliği ısı transferinin etkinliğini ve uygulamalarını sınırlamaktadır. Bu nedenle geleneksel çalışma sıvısını, yüksek ısı transfer performansına sahip bir çalışma sıvısı ile değiştirme fikri oluşmuştur. Bilim adamları ve mühendisler, nano boyutlu parçacıkları sıvıların içerisine dağıtarak bu temel sorunun üstesinden gelmek için büyük çaba sarf etmişlerdir. Nanopartiküller ile birleştirilen sıvıyı tanımlayan nanoakışkan terminolojisi, ilk olarak Choi tarafından geliştirilmiştir ve nanoakışkanın ısı transferinin ve ısıl performansının saf baz sıvısından daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Nanoakışkan, nanopartiküllerin geleneksel çalışma sıvısı ile karıştırılmasıyla oluşturulan kararlı bir katı-sıvı süspansiyonudur.

Bu tez çalışmasında, ısı borularında kullanılan nanoakışkanlar üzerine yapılan deneysel ve sayısal araştırmalar incelenmiştir. Isı borusunun ısıl performansı ve ısıl direncinin birçok deneysel koşula bağlı olduğu görülmüştür. Bu koşullar, ısı borusu türleri, nanoakışkan özellikleri, ısı borularının tasarımı ve çalışma koşulları gibi farklı parametreleri içermektedir.

2020, 301 sayfa

Anahtar Kelimeler: Isı borusu, ısı transferi, nanoakışkan

ABSTRACT

Master's Thesis

THEORETICAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF HEAT PIPES WITH NANOFLUIDS

Perihan İlknur IRGATOĞLU AL

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Thermodynamics

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Nesrin ADIGÜZEL

Heat transfer has an important role in many industrial and consumer systems. Heat pipe is a device with high thermal conductivity, used in heat transfer. The heat pipe is made of three parts; evaporator section which is a heat absorber part and transfers heat to working fluid, the adiabatic section used for heat transportation and the condenser section that cools the working fluid. The basic principle of the heat pipe operation is to change the base fluid's phase. The heat pipe absorbs heat from the evaporator, transports it from the adiabatic section to the condenser and transfers its heat to the surround, that is, it transfers heat from one region to another using evaporation and condensation phase change.

The low thermal conductivity of conventional working fluids used in the heat pipe limits the efficiency and applications of heat transfer. Therefore, the idea of replacing the conventional working fluid with a working fluid with high heat transfer performance has occurred. Scientists and engineers have made great efforts to overcome this fundamental problem by dispersing nanoparticles into liquids. The nanofluid terminology, which describes the liquid combined with the nanoparticles, was first developed by Choi, and it was found that the heat transfer and thermal performance of the nanofluid was better than pure base fluid. Nanofluid is a stable solid-liquid suspension created by mixing nanoparticles with conventional working fluid.

In this thesis, experimental and numerical researches on nanofluids used in heat pipes are investigated. It is found that thermal performance and thermal resistance of the heat pipe have depend on many experimental conditions. These conditions include different parameters such as heat pipe types, nanofluid properties, heat pipe design and operating states.

2020, 301 pages

Keywords: Heat pipe, heat transfer, nanofluid

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi birikimi ve deneyimi ile bana yol gösteren değerli danışman hocam Doktor Öğretim Üyesi Nesrin ADIGÜZEL'e, desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Recep SADELER'e sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım.

Ayrıca hayatım boyunca bana her konuda destek olup yanımda yer alan aileme, tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesiyle yardımını esirgemeyen sevgili eşim Prof. Dr. Ragıp Atakan AL'a sabır ve fedakârlıkları için teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte moral ve motivasyonlu çalışmamı sağlayarak yanımda yer alan çalışma arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Perihan İlknur IRGATOĞLU AL

Mayıs, 2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Nanoakışkanlar	3
2.1.1. Nanoakışkan türleri	7
2.1.1.a. Tek malzeme nanoakışkanlar	7
2.1.1.b. Hibrid nanoakışkanlar	7
2.1.2. Nanoakışkanların hazırlanması	8
2.1.2.a. Tek adım yöntemi	8
2.1.2.b. İki adım yöntemi	9
2.1.3. Nanoakışkanların kararlılığı ve kararlılık artırma yöntemleri.....	10
2.1.3.a. Nanoakışkanların kararlılığını ölçme yöntemleri	11
2.1.3.b. Nanoakışkan kararlılığını artırma yöntemleri	15
2.1.4. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri	18
2.1.5. Nanoakışkanların uygulama alanları	23
2.2. Isı Boruları.....	25
2.2.1. Isı borularının tarihçesi.....	25
2.2.2. Isı borularının çalışma prensibi	27
2.2.3. Isı borularının özellikleri	28
2.2.4. Isı borularında kullanılan çalışma akışkanları.....	29
2.2.5. Isı borusu uygulamaları	30
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	33
3.1. Nanoakışkanların Isı Borularındaki Isı Transfer Özellikleri Üzerine Yapılan DeneySEL Çalışmalar.....	33

3.1.1. Mikro oluklu ısı boruları	34
3.1.2. Örgü fitil ısı boruları.....	61
3.1.3. Sinterlenmiş fitil ısı boruları.....	144
3.1.4. Termosifon ısı borusu.....	168
3.1.5. Salınlı/titreşimli ısı boruları	225
3.2. Sayısal Çalışmalar	264
4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR.....	278
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	291
KAYNAKÇA.....	294
ÖZGEÇMİŞ	302

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

CFD	Hesaplamalı Akışkan Dinamiği
CHF	Kritik Isı Akısı
CNT	Karbon nanotüp
CPC	Birleşik Parabolik Yoğunlaştırıcı
CVD	Kimyasal Buhar Birikimi
DEG	Dietilen Glikol
DI	Deiyonize
DLS	Doğrudan Işık Saçılımı
EG	Etilen Glikol
FEM	Sonlu Elemanlar Metodu
HLB	Hidrofilik/Lipofilik Denge
HRTEM	Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu
HTC	Ortalama Isı Transfer Katsayısı
LHP	Döngülü Isı Borusu
MHF	Maksimum Isı Akısı
MWCNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
NCG	Yoğuşmayan Gaz
NDG	Sulu Azot Katkılı Grafen
NTU	Aktarım Birimi Sayısı
OHP	Salınımlı Isı Borusu
OHP	Salınımlı Isı Borusu
OLPHP	Açık Döngülü Titreşimli Isı Borusu
OLPHP	Açık döngülü titreşimli ısı borusu
PDMS	Polidimetilsiloksandan
PHP	Titreşimli ısı borusu
PVP	Polivinilprolidon

RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes
SAED	Seçilen Alan Elektron Kırınımı
SANSS	Tozaltı Nanoparacak Sentez Yöntemi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TCB	Termostatik Sirkülasyon Banyosu
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
THP	Titreşimli Isı Borusu
THW	Geçici Sıcak Tel Yöntemi
VEROS	Vakum Buharlaştırma Yöntemi
XRD	X Işını Kırınım Yöntemi

Simgeler

Ag	Gümüş
AgNO ₃	Gümüş nitrat
Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
AlN	Alüminyum nitrür
B ₄ C	Bor karbür
C	Özgöl ısı
C ₂ H ₆ O ₂	Etilen glikol
CO ₂	Karbondioksit
Cu	Bakır
Cu ₂ O	Bakır (II) oksit
CuO	Bakır (I) oksit
Fe	Demir
Fe ₂ O ₃	Demir oksit
g	Yerçekimi ivmesi
H ₂ O	Su
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
HAUCl ₄	Sulu hidrojen tetraklorat

h_c	Yoğunlaştırıcı ısı transfer katsayısı
HCl	Hidroklorik asit
h_e	Buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı
HNO ₃	Nitrik asit
I	Giriş akımı
k	Isıl iletkenlik
L_e	Buharlaştırıcı uzunluğu
m	Kütle
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum oksit
NiFe ₂ O ₄	Nikel ferriti
Q	Giriş ısısı
q_e	Buharlaştırıcı ısı akısı
R	Isıl direnç
r	Yarıçap
r_0	Dış çap
Si	Silikon
SiC	Silisyum karbür
SiN	Silisyum nitrür
SiO	Silisyum oksit
SiO ₂	Silikon dioksit
T_a	Ortalama adyabatik bölüm sıcaklığı
T_c	Ortalama yoğunlaştırıcı sıcaklığı
T_e	Ortalama buharlaştırıcı sıcaklığı
Ti	Titanyum
TiN	Titanyum nitrür
TiO ₂	Titanyum dioksit
V	Hacim
V	Giriş voltajı
w	Ağırlık
Zn	Çinko

ZnFe_2O_4	Çinko ferriti
ZnO	Çinko oksit
ZrC	Zirkonyum karbür
μ	Viskozite
λ	Isıl iletkenlik
π	Pi sayısı
φ	Hacimsel oran
α	Etkin ısı yayılım
ρ	Yoğunluk

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Nanoakışkan başlığı ile elde edilen dokümanların sayısı.....	8
Şekil 2.2. Nanoakışkanların hazırlanmasında tek adım yöntemi.....	9
Şekil 2.3. Nanoakışkanların hazırlanmasında iki adım yöntemi.....	10
Şekil 2.4. İtme mekanizmaları: (a) sterik itme ve (b) elektrostatik itme	11
Şekil 2.5. Bir nanopartikülün kayma düzlemi ve sert tabakası arasındaki Zeta potansiyeli	12
Şekil 2.6. Nanoakışkanlarda sedimentasyon davranışı türleri, burada t zamanı göstermektedir ve $t_0 < t_1 < t_2 < t_f$	13
Şekil 2.7. Cu nanopartiküllerinin elektron mikrofotografisi a) TEM, b) SEM.....	15
Şekil 2.8. Prob tipi ve banyo tipi ultrasonik karıştırıcı.	17
Şekil 2.9. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri.....	18
Şekil 2.10. Nanoakışkanların ısı iletkenliğinin bağlı olduğu parametreler.....	21
Şekil 2.11. Perkins hermetik boru kazanı	26
Şekil 2.12. Gaugler'in ısı borusu kesit resmi.....	27
Şekil 2.13. Isı borusunun çalışma prensibi, bölgeleri ve bileşenleri.....	28
Şekil 2.14. Isı borusunun yapı elemanları.....	29
Şekil 2.15. Uçak kanadında ısı borusu uygulaması	32
Şekil 3.1. Nanoakışkanın ısı iletkenliğinin suyun ısı iletkenliğine oranı	35
Şekil 3.2. Nanoakışkanın viskozitesinin suyun viskozitesine oranı.....	35
Şekil 3.3. Deney düzeneği	36
Şekil 3.4. Deney düzeneği şeması.....	37
Şekil 3.5. Nanoakışkanın baz sıvıya viskozite oranı.....	39
Şekil 3.6. Nanoakışkanın baz sıvıya ısı iletkenlik oranı	40
Şekil 3.7. Deney düzeneği	41
Şekil 3.8. Termokupulların şematik gösterimi.....	42
Şekil 3.9. Dikdörtgen oluklu fitilli düz ısı borusunun şematik gösterimi a)toplam ölçüler b)düz ısı borusunun kesit boyutları	43
Şekil 3.10. Isı borusunun ısı iletkenlik performansını değerlendirmek için oluşturulan deney düzeneğinin şeması.....	45

Şekil 3.11. Oluklu ısı borusunun kesit görünümü	45
Şekil 3.12. Deneysel test bölümünün kesiti ve termokuplların ısı borusu üzerindeki yeri.....	45
Şekil 3.13. Isı borusunun ısı performansını nanoakışkan ile ölçmek için kurulan deney düzeneğinin şematik görünümü	47
Şekil 3.14. Saf su ve farklı konsantrasyonlarda nanoakışkan ile hazırlanan ısı borusunun ısı direncinin ölçülen değerleri	47
Şekil 3.15. (a) deney düzeneği (b) ısı borusundaki termokupulların dağılımı.....	49
Şekil 3.16. CuO nanopartikül süspansiyonunun TEM fotoğrafı a) %0.5 konsantrasyon b) %1 konsantrasyon	51
Şekil 3.17. Deney düzeneğinin şematik görünümü	52
Şekil 3.18. Buharlaştırıcının şematik gösterimi	53
Şekil 3.19. Mikro olukların şematik gösterim	54
Şekil 3.20. Farklı basınçlarda CHF üzerinde nanoakışkan konsantrasyonun etkisi	55
Şekil 3.21. %1 konsantrasyondaki nanoakışkan için ısı transferi üzerinde basıncın etkisi	55
Şekil 3.22. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	56
Şekil 3.23. Deney bölümü (birim nm)	57
Şekil 3.24. Farklı sıcaklıklarda nanoakışkanların suya karşı iletkenlik oranları	58
Şekil 3.25. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	60
Şekil 3.26. a) Deney kesiti b) Mikro oluklu borunun geometrik kesiti	60
Şekil 3.27. Cu nanopartiküllerinin TEM resmi.....	62
Şekil 3.28. (a) Deney aparatının şematik diyagramı. (b) Termokuplların yerleşim şematik diyagramı. (c) Deney düzeneğinin fotoğrafı.....	63
Şekil 3.29. 100 W giriş gücünde nanoakışkanlı ve sulu ısı borusunun duvar sıcaklıkları dağılım	65
Şekil 3.30. %0.5 Cu nanoakışkanlı ısı borusunun farklı açılardaki ısı performansı.....	66
Şekil 3.31. DI suda dağılmış Al_2O_3 nanopartiküllerinin TEM mikrofrafisi.....	67
Şekil 3.32. Sedimentasyon testi	67
Şekil 3.33. Deney aparatı	69
Şekil 3.34. Termokuplların dağılımı	69

Şekil 3.35. (a) DI su, (b) %1.0 konsantrasyonlu Al_2O_3 nanoakışkanı ve (c) %3.0 konsantrasyonlu Al_2O_3 nanoakışkanları için sıcaklık dağılımları.....	71
Şekil 3.36. Al_2O_3 – su ve TiO_2 – su nanoakışkanlarının ısı iletkenlikleri	73
Şekil 3.37. Al_2O_3 -etilen glikol, TiO_2 -etilen glikol ve ZnO – etilen glikol nanoakışkanların ısı iletkenlikleri	73
Şekil 3.38. Al_2O_3 nanoakışkanının sedimantasyon testleri.....	74
Şekil 3.39. Deney düzeneği	75
Şekil 3.40. Termokupl pozisyonları.....	75
Şekil 3.41. Su ve su bazlı %5 hacimli Al_2O_3 nanoakışkanın, farklı güç girişlerinde ısı direnci.....	76
Şekil 3.42. Farklı konsantrasyonlarda su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanı ile buharlaştırıcının ısı transfer katsayıları	78
Şekil 3.43. Farklı nanoakışkanlar ile buharlaştırıcının ısı transfer katsayıları	79
Şekil 3.44. Deney düzeneği	81
Şekil 3.45. Termokuplların şematik gösterimi.....	81
Şekil 3.46. Nanopartiküllerin fitil yüzeyi üzerindeki farklı büyütmelerdeki birikimleri (Solomon <i>et al.</i> 2012)(a) 120x, (b) 550x, (c) 1500x ve (d) 7000x.....	84
Şekil 3.47. Buharlaştırıcıdaki ısı direnci.....	85
Şekil 3.48. (a)Farklı ısı girişlerinde buharlaştırıcı ısı direnci Re , (b)farklı ısı girişlerinde yoğunlaştırıcı ısı girişi Re	88
Şekil 3.49. Isı borusu toplam direnci	89
Şekil 3.50. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	90
Şekil 3.51. %0.009 konsantrasyondaki gümüş nanopartiküllerinin SEM görüntüsü	91
Şekil 3.52. Gümüş nanopartiküllerin yoğunluğuna göre boyut dağılımı	92
Şekil 3.53. Farklı ısı girişlerinde ısı direncin değişimi	95
Şekil 3.54. Farklı ısı yüklerinde ısı borusunun etkin ısı iletkenliği	96
Şekil 3.55. Isı borusunun termal performansı için deney düzeneğinin şeması	98
Şekil 3.56. Etilen glikol içinde dağılmış ZnO için ağırlık fraksiyonunun bir fonksiyonu olarak ısı iletkenliğin bağlı değeri.....	99
Şekil 3.57. Etilen glikol içinde dağılmış 200°C'lik bir kurutma sıcaklığı ile sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin farklı ağırlık fraksiyonları için ortalama ısı borusu sıcaklık dağılımları	100

Şekil 3.58. Etilen glikol içinde dağılmış 600°C'lik bir kurutma sıcaklığı ile sentezlenen ZnO nanoparçacıklarının farklı ağırlık fraksiyonları için ortalama ısı borusu sıcaklık dağılımları	101
Şekil 3.59. Şekil 3.57 ve 3.58’de gösterilen ısı borularının ısı dirençleri	102
Şekil 3.60. Ağırlıkça %1’lik CuO nanopartiküllerinin nanoakışkan içindeki TEM fotoğrafı	103
Şekil 3.61. Deney aparatının şematik gösterimi	104
Şekil 3.62. Duvar sıcaklıklarının nanoakışkanlı ve nanoakışkansız ısı borusunda dağılımı.....	107
Şekil 3.63. Nanopartiküllerin ısı borusunun ısı direnci üzerindeki etkisi.....	108
Şekil 3.64. Deney düzeneği	109
Şekil 3.65. Isı borusundaki termokupl yerleşimi	110
Şekil 3.66. 30 W ısı girişinde farklı eğim açılarında ısı borusu verimliliğinin değişimi	111
Şekil 3.67. 30 °lik eğim açısında ısı borusunun ısı direnci	112
Şekil 3.68. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	114
Şekil 3.69. Termokuplların ısı borusu üzerinde yerleşimi	114
Şekil 3.70. Isı borusu tepki süresi	115
Şekil 3.71. Isı borusunun kararlı durum ısı direnci.....	116
Şekil 3.72. Al ₂ O ₃ TEM görüntüsü	117
Şekil 3.73. Farklı konsantrasyonlardaki Al ₂ O ₃ nanoakışkanının ısı iletkenliği.....	118
Şekil 3.74. Farklı konsantrasyonlardaki Al ₂ O ₃ nanoakışkanının viskozitesi.....	118
Şekil 3.75. Deney düzeneği	119
Şekil 3.76. Nanoakışkan ve su arasındaki buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı oranları	120
Şekil 3.77. Nanoakışkan ile ısı borusunun ısı performansını ölçmek için sistemin şematik görünüşü.....	122
Şekil 3.78. Farklı koşullara göre hazırlanan nanoakışkan ile ısı borusunun ısı direncinin ölçülen değerleri.....	123
Şekil 3.79. Ultrasonik banyo.....	125
Şekil 3.80. Deney düzeneğinin fotoğrafı	126
Şekil 3.81. Deney düzeneğinin şematik gösterimi	126

Şekil 3.82. Su kullanan ısı borusu için eğim açısı ve verimliliğin etkisi	128
Şekil 3.83. Al_2O_3 nanoakışkanı kullanan ısı borusu için eğim açısı ve verimliliğin etkisi	128
Şekil 3.84. %25 konsantrasyonda eğim açısı ile ısıl direncin değişimi	129
Şekil 3.85. %25 konsantrasyonda eğim açısı ile ısıl direncin değişimi	129
Şekil 3.86. %25 konsantrasyonda eğim açısı ile ısıl ile ısıl direncin değişimi	129
Şekil 3.87. %100 konsantrasyonda eğim açısı ısıl direncin değişimi	129
Şekil 3.88. a) partikül boyut dağılımı b) CuO Su nanoakışkanın zeta potansiyel analizi	131
Şekil 3.89. Dijital kamera tarafından yakalanan sinterlenmiş ve örgü fitil ısı borularının kesit görünüşü (a) Önden görünüş ve (b) Yan görünüş.....	132
Şekil 3.90. (a) Isı borusu test bölümünün yerleşimi ve (b) Deney düzeneği	133
Şekil 3.91. SiC nanopartikülleri SEM görüntüsü	135
Şekil 3.92. Isı borusu test bölümünün şematik gösterimi	136
Şekil 3.93. Deneyde kullanılan termokuplların yerleşimi	136
Şekil 3.94. Isı borusu ve ekran tel örgü görüntüleri.....	137
Şekil 3.95. Buharlaştırma bölümündeki ısıl direnç	138
Şekil 3.96. Yoğunlaştırıcı bölümündeki ısıl direnç	138
Şekil 3.97. Giriş ısılarına göre ısı transfer katsayıları.....	139
Şekil 3.98. Deneyden sonra buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümlerinin fitil yapılarının (soldan sağa) SEM görüntüleri.....	140
Şekil 3.99. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	142
Şekil 3.100. Ag nanoakışkan ve su ile ısı borusunun ısıl dirençleri arasındaki oran....	143
Şekil 3.101. Nanopartikül konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ısı borusunun ısıl direncinin azalması.....	143
Şekil 3.102. Ag nanopartiküllerinin 10 nm (sol) ve 35 nm (sağ) TEM görüntüleri	145
Şekil 3.103. (a) Deney düzeneğinin şeması ve (b) test edilen ısı borusu üzerindeki termokupl dağılımları	145
Şekil 3.104. Partikül konsantrasyonunun çeşitli giriş gücü altında ısı borusunun sıcaklık farkı üzerine etkisi	147
Şekil 3.105. Partikül büyüklüğünün çeşitli giriş gücü altında ısı borusunun sıcaklık farkı üzerine etkisi	148

Şekil 3.106. Deneyin şematik görünümü.....	150
Şekil 3.107. Nanopartikül konsantrasyonunun, farklı giriş güçleri altında, ısı borusunun sıcaklık farkı üzerine etkisi.....	152
Şekil 3.108. Farklı nanopartikül konsantrasyonları ve giriş güçlerinin ısı borusu ısıl direnci üzerindeki etkisi	152
Şekil 3.109. CuO nanopartiküllerinin X ışını kırınım analizi.....	153
Şekil 3.110. Deiyonize suda dağılmış CuO nanopartiküllerinin Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu görünümü.....	154
Şekil 3.111. Ağırlıkça %0.5, 1.0 ve %1.5 CuO / DI su nanoakışkanı için sedimentasyon testi	154
Şekil 3.112. Şematik yerleşimi a) deney düzeneğinin kesit görünümü ve termokuplların şematik yerleşimi b) Deney düzeneği.....	155
Şekil 3.113. Sinterlenmiş fitil ısı borusunun bir dijital kamera ile kesit görünüşü (a) üstten görünüm ve (b) yandan görünüm	156
Şekil 3.114. CuO nanoakışkanının farklı ağırlık fraksiyonları için ısı borusunun ısıl iletkenliği (ısı girişi - 120 W).....	157
Şekil 3.115. 120 W ısı girişinde farklı ağırlık ve eğim açısı için ısı borusunun ısıl verimliliği	158
Şekil 3.116. Isı borusu ısıl performansını test etmek için deney düzeneği.....	160
Şekil 3.117. (a) Deneysel test bölümünün kesiti, (b) Deneyde kullanılan ısı borusu örneği.....	160
Şekil 3.118. Sıcaklık ve konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak grafen nanoakışkanın ısıl iletkenlik oran.....	161
Şekil 3.119. Çeşitli konsantrasyonlar için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafen nanoakışkan viskozitesi.....	162
Şekil 3.120. 60° eğim açısında, 80W giriş gücünde grafen konsantrasyonunun ısı borularının duvar sıcaklığı dağılımına etkisi.....	162
Şekil 3.121. CuO ve Al ₂ O ₃ XRD Analizi	164
Şekil 3.122. Farklı konsantrasyonlarda a)CuO b)Al ₂ O ₃ HRTEM(Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu) görüntüleri.....	164
Şekil 3.123. Al ₂ O ₃ /su ve CuO/su nanoakışkanları zeta potansiyel ve sedimentasyon testleri	165

Şekil 3.124. Deney düzeneğinin fotoğraf	167
Şekil 3.125. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	170
Şekil 3.126. Termokuplların yerleşimi	170
Şekil 3.127. Isı borusunun farklı giriş güçleri için ortalama buharlaştırıcı sıcaklığına karşı verimliliği	171
Şekil 3.128. Deney düzeneği	173
Şekil 3.129. Farklı konsantrasyon seviyeleri ve 90 ° lik eğim açısı için ısı aktarım hızı dağılımları	174
Şekil 3.130. Farklı nanopartikül konsantrasyon seviyelerinin termosifon ısı borusu ısıl direnci üzerindeki etkisi	175
Şekil 3.131. Farklı nanopartikül konsantrasyon düzeylerinin ısıl direncin azaltılması üzerindeki etkisi	175
Şekil 3.132. Deney aparatının şematik görünüşü	177
Şekil 3.133. Deney aparatının fotoğrafı.....	177
Şekil 3.134. CuO nanopartiküllerinin SEM görünüşü	178
Şekil 3.135. Açık termosifon ve eş merkezli boru yapıları.....	180
Şekil 3.136. %0.05 konsantrasyonda su içinde dağıtılmış (a) Alümina ve (b) TiSiO ₄ nanopartiküllerinin TEM görüntüleri	181
Şekil 3.137. Deney düzeneğinin şematik görünümü	182
Şekil 3.138. Termokuplların yerleşimi	183
Şekil 3.139. (a) Al ₂ O ₃ ve (b) TiSiO ₄ nanopartiküllerinin farklı konsantrasyonları için farklı giriş güçlerinde termosifonun genel ısıl direnci	184
Şekil 3.140. Farklı konsantrasyonlar (TiSiO ₄ / su) için giriş gücüne göre buharlaşma ısı transfer katsayısı	185
Şekil 3.141. Farklı konsantrasyonlar (Al ₂ O ₃ / su) için giriş gücüne göre buharlaşma ısı transfer katsayısı.....	185
Şekil 3.142. Nanopartiküllerin TEM görüntüsü	186
Şekil 3.143. Nanopartiküllerin çap dağılımı	187
Şekil 3.144. Buharlaştırıcı bölmenin şematik görünümü	188
Şekil 3.145. Nanoakışkanın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi.....	190
Şekil 3.146. Basıncın ısı transfer katsayısı artışı üzerine etkisi (ağırlıkça %1.0 kütle konsantrasyonunda).....	191

Şekil 3.147. Deneyin şematik görünümü.....	192
Şekil 3.148. Isı borusunun geometri özellikleri ve termokuplların yeri	193
Şekil 3.149. (a) %5 konsantrasyonda alümina-su / DEG için nanoakışkanların stabilizasyon işlemi, kümeleme ve sedimantasyon oluşumu sonuçları (b). Alümina nanopartiküllerinin taramalı elektron mikroskopisi görüntüsü. (c). EG / su bazlı sıvı içinde dağılmış alümina nanopartiküllerinin transmisyon elektron mikroskobu görüntüsü (d) Alümina nanopartikülleri için partikül boyutu sayım deneyinin sonuçları. (e). Alümina nanopartiküllerinin XRD test sonuçları.....	195
Şekil 3.150. Nanopartiküllerin su / EG ve su / DEG baz sıvılarının ısı iletkenliğine etkisi	196
Şekil 3.151. Çalışma akışkanının %yükü değeri, 20 kW / m ² . ısı akışında su / DEG bazlı nanoakışkan için ısı borusunun ısı verimliliği üzerindeki etkisi	197
Şekil 3.152. Çalışma akışkanının %yükü değeri, 20 kW / m ² . ısı akışında su / EG bazlı nanoakışkan için ısı borusunun ısı verimliliği üzerindeki etkisi	197
Şekil 3.153. Eğim açısının, optimum %şarj değeri için su / EG ile doldurulmuş ısı borusunun termal verimliliği üzerindeki etkisi	198
Şekil 3.154. Eğim açısının, optimum %şarj değeri için su / DEG ile doldurulmuş ısı borusunun termal verimliliği üzerindeki etkisi	198
Şekil 3.155. Deney düzeneğinin şematik görünümü	199
Şekil 3.156. Buharlaştırıcı bölümünün şematik görünümü	200
Şekil 3.157. İşlevselleştirilmiş ve geleneksel nanoakışkan resimleri	201
Şekil 3.158. Saf su ve Al ₂ O ₃ / su nanoakışkanı için 60W giriş ısı gücü altında termosifonun elektrik alan kuvvetine karşı ısı verimliliği	203
Şekil 3.159. Saf su ve CuO/ su nanoakışkanı için 60W giriş ısı gücü altında termosifonun elektrik alan kuvvetine karşı ısı verimliliği	204
Şekil 3.160. Saf su ve farklı konsantrasyonlarda Al ₂ O ₃ / su nanoakışkanı için 60W giriş gücü altında elektrik alan gücüne karşı termosifon ısı borusunun Nusselt sayı oranı	204

Şekil 3.161. %2 Al_2O_3 /su hacim konsantrasyonunda nanoakışkan için, 60, 80, 100 ve 120 W giriş güçlerinde nusselt sayısının elektrik alan kuvvetine göre değişimi	205
Şekil 3.162. %2.5 hacim oranında nanopartiküller ekleyerek, 20 kV elektrik alanı uygulanarak ısı performans artışı	206
Şekil 3.163. Deney düzeneğinin şematik görünümü	208
Şekil 3.164. Deney düzeneğinin fotoğrafı	208
Şekil 3.165. Isı borusu boyunca termokuplların yerleşimi	209
Şekil 3.166. a) 200 W, (b) 300 W ve (c) 400 W ısı yüklerinde yoğunlaştırıcıda değişen soğutma sıvısı akış hızları için ısı borusunun toplam ısı direnci.....	210
Şekil 3.167. a) 200 W, (b) 300 W ve (c) 400 W ısı yüklerinde yoğunlaştırıcıda değişen soğutma sıvısı akış hızları için ısı borusunun verimliliği	211
Şekil 3.168. (a) Üretilen Ag nanopartiküllerinin taramalı elektron mikroskopisi. (b) Ağırlıkça %= 0.1'deki Ag / su nanopartiküllerinin TEM görüntüsü	212
Şekil 3.169. Deney düzeneğinin şematik görünümü	214
Şekil 3.170. (A). Nanoakışkan konsantrasyonunun ısı borusunun sıcaklık dağılım profiline etkisi. (B). Nanoakışkan konsantrasyonunun ısı borusunun termal direncine etkisi	215
Şekil 3.171. %= 0.4 konsantrasyonda, doldurma oranı ve eğiminin ısı borusunun termal performansı üzerindeki etkisi.....	215
Şekil 3.172. Isı akısının ısı borusunun ısı verimi ve ısı aktarım katsayısına etkisi	216
Şekil 3.173. Deney düzeneğinin şematik görünümü	218
Şekil 3.174. Deney düzeneğinin görünümü	218
Şekil 3.175. Isı borusu üzerinde yer alan termokuplların genel dağılımı	219
Şekil 3.176. Farklı soğutma suyu debileri ve ısıtıcı güçlerinde ısı borusu veriminin değişimi	220
Şekil 3.177. Isı borusundaki ısı direncin değişimi ve elde edilen iyileştirme miktarları	221
Şekil 3.178. Deney düzeneğinin şematik resmi	222
Şekil 3.179. Isı borusunun deney düzeneğinin görünümü	223
Şekil 3.180. Termokuplların yerleşimi	223

Şekil 3.181. 45° lik ısı borusu açısıyla elde edilen ısı direnç grafiği.....	224
Şekil 3.182. 45° lik ısı borusu açısıyla elde edilen ısı direnç grafiği.....	224
Şekil 3.183. 45° ve 75° yapılan deneylerde; Nanoakışkan verimlerinin saf su verimlerine göre karşılaştırılması.....	225
Şekil 3.184. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	226
Şekil 3.185. Nanopartikül konsantrasyonunun, kendini ısılatan nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerine etkisi	227
Şekil 3.186. Alüminyum ısı borusu kalıbının ölçüleri ve resmi	228
Şekil 3.187. PDMS Salımlı ısı borusu resmi	228
Şekil 3.188. Alümina nanopartiküllerinin TEM görüntüsü	229
Şekil 3.189. Deney düzeneğinin şematik görünümü	230
Şekil 3.190. Isıl direnç karşılaştırması.....	231
Şekil 3.191. Ortalama çapları (a) 20 lm, (b) 2,2 lm, (c) 80 nm ve (d) 50 nm olan Al ₂ O ₃ partiküllerinin SME görüntüsü.....	232
Şekil 3.192. Isıl direnç üzerinde doldurma oranının etkisi	233
Şekil 3.193. (a) sıcaklık farkı ve (b) ısı direnç (tanecik oranı: %50) üzerinde partikül boyutu etkisi	234
Şekil 3.194. Deney seti	236
Şekil 3.195. SiO ₂ / su nanoakışkanları ile yüklü farklı kütle konsantrasyonlarında OHP'nin ısı performansı: (a) ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığı; (b) toplam ısı direnç	237
Şekil 3.196. SiO ₂ / su nanoakışkanları ile yüklü farklı kütle konsantrasyonlarında OHP'nin ısı performansı: (a) ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığı; (b) toplam ısı direnç	238
Şekil 3.197. OHP'nin ısı direnç modeli.....	238
Şekil 3.198. Salımlı ısı borusu deney düzeneği	240
Şekil 3.199. Su ve alümina nanoakışkanlarla doldurulmuş OHP için %70 doluluk oranlarında termal direnç karşılaştırması	241
Şekil 3.200. (a) saf suda kaynatılmış temiz bir altkatman, (b) yoğunlaştırıcıda nanopartiküllere maruz kalan bir altkatman ve (c) buharlaştırıcıda nanopartikülle biriken bir alt katman	243
Şekil 3.201. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	244

Şekil 3.202. Deney düzeneği)	247
Şekil 3.203. Baz sıvıdaki ferro-akışkan nanopartiküllerin (I) 1 saat sonra (II) 1 gün sonra (III) 10 gün sonra tortu fotoğraf sonuçları (Goshayeshi <i>et al.</i> 2015)248	
Şekil 3.204. %50 doluluk oranında baz sıvı (kerosen) ve manyetik alanlı-manyetik alan olamadan nanoakışkanlar arasındaki ısı dirençlerin karşılaştırılması	248
Şekil 3.205. %2'si için Fe_2O_3 nanoakışkan yüklü ısı borusu için buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri arasındaki buhar sıcaklığı farkı.....	249
Şekil 3.206. Açık döngülü titreşimli ısı borusu deney düzeneği	251
Şekil 3.207. Deney düzeneğinin şematik görünümü	256
Şekil 3.208. SiO_2 nanopartiküllerinin fotoğrafı	256
Şekil 3.209. Simülasyon modeli	257
Şekil 3.210. Deney düzeneğinin şematik diyagramı.....	259
Şekil 3.211. Deneyler sırasında mıknatısların farklı yerleri	261
Şekil 3.212. NCG'lerin ferro-akışkan yüklü OLPHP'lerin yatay ısıtma modunda termal performansı üzerindeki etkisi.....	262
Şekil 3.213. Yatay ısıtma modunda farklı çalışma sıvıları için ısı direnci ve ısı girişi.....	263
Şekil 3.214. 5 g / L konsantrasyonda ferro-akışkan için farklı mıknatısların yerlerinde termal direnç ve ısı girişi.....	263
Şekil 3.215. Buharlaştırıcıdaki manyetik alanın varlığında ferroakışkan OLPHP'ler için termal direnç ve eğim açısı	264
Şekil 3.216. Demir oksit numunesi için HRTEM görüntüleri	265
Şekil 3.217. Termosifon Isı Borusunun Şematik Görünümü.....	266
Şekil 3.218. Demir oksit nanopartiküllerinin buharlaşma ısı transfer katsayısı üzerine etkisi	270
Şekil 3.119. Demir oksit nanopartiküllerinin yoğunlaşma ısı transfer katsayısı üzerine etkisi	271
Şekil 3.220. Demir oksit nanopartiküllerinin termosifon ısı borusunun toplam ısıl s<direncine etkisi	271
Şekil 3.221. Dikdörtgen veya disk şekilli ısı borusu kesitinin basit şeması	272

Şekil 3.222. Nanopartikül konsantrasyon seviyeleri ve fitil kalınlığı açısından disk şekilli ısı borusunun maksimum ısı giderme kapasitesinin üç boyutlu gösterimi (a) CuO, (b) Al ₂ O ₃ ve (c) TiO ₂	273
Şekil 3.223. Nanoakışkan ve saf su için Nusselt sayısı sonuçları.....	274
Şekil 3.224. Çeşitli nanoakışkanların termal iletkenliği için mevcut sınırların karşılaştırılması	276
Şekil 3.225. Silindirik ısı borusunun şeması.....	277
Şekil 4.1. Nanoakışkan konsantrasyona göre ısı borusu veriminin değişimi	289
Şekil 4.2. Nanoakışkan konsantrasyona göre ısı borusu ısıl direncinin değişimi.....	290

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan nanopartiküllerin ısı iletkenlikleri.....	20
Çizelge 2.2. Yaygın olarak kullanılan baz sıvıların ısı iletkenlikleri.....	20
Çizelge 2.3. Nanoakışkanlar için ısı iletkenlik modelleri	22
Çizelge 2.4. Nanoakışkanlar için viskozite modelleri	23
Çizelge 3.1. Isı borusu özellikleri	112
Çizelge 3.2. Farklı koşullarda hazırlanan malzemelerin konsantrasyonu.....	122
Çizelge 3.3. Farklı sentez koşullarındaki ölçülen $R_{\text{buharlaştırıcı}}$ ve $R_{\text{yoğunlaştırıcı}}$	124
Çizelge 3.4. Deney şartları.....	137
Çizelge 3.5. CuO / DI su ve Al ₂ O ₃ / DI su nanoakışkanlarının farklı konsantrasyonlarda termal iletkenliği ve dinamik viskozitesi.....	166
Çizelge 3.6. Çalışmada kullanılan Al ₂ O ₃ nanopartiküllerinin fiziksel özellikleri	169
Çizelge 3.7. Isı borusu özellikleri	173
Çizelge 3.8. Açık termosifon ve eş merkezli borunun ölçüleri.....	180
Çizelge 3.9. Ultrasonik banyonun teknik özellikleri	217
Çizelge 3.10. %2 derişimindeki alümina nanoakışkanının termal özellikleri	222
Çizelge 3.11. Isı borusu özellikleri	246
Çizelge 3.12. Demiroksit nanopartikül özellikleri.....	247
Çizelge 3.13. Döngülü ısı borusu özellikleri	254
Çizelge 4.1. Mikro oluklu ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti	278
Çizelge 4.2. Örgü fitil ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti	280
Çizelge 4.3. Sinterlenmiş fitil ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti	282
Çizelge 4.5. Salınımlı/Titreşimli ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti	285
Çizelge 4.6. Nanoakışkan kullanan ısı boruları üzerine teorik çalışmaların özeti.....	287

Çizelge 4.7. Araştırmacılar tarafından nanoakışkanlar kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı borularının termal performansındaki değişiklikten sorumlu mekanizmaların / nedenlerin özeti	288
--	-----



1. GİRİŞ

Sınırlı enerji kaynakları ve bu kaynakların yüksek maliyetlerinden dolayı endüstriyel alanda enerji verimliliğinin gelişmesine olanak sağlamak için çalışmalar yapılmaktadır. Isı transferi, endüstride üzerinde durulması gereken önemli bir çalışma konusudur. Bundan dolayı ısı transferinde oluşacak iyileşme enerji verimliliğini artırmakla beraber endüstriyel uygulamalarda çalışma sürelerini azaltarak malzemelerin kullanım ömürlerini artıracaktır (Babita *et al.* 2016). Isı transferini iyileştirmek için yapılan çalışmalar sıklıkla “aktif”, “pasif” ve “karma” yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif yöntemlerde dış güç kullanılamasına gerek kalmamaktadır. Pasif yöntemlere dönmeli akış cihazları, pürüzlü yüzeyler, borunun içerisine koyulan iyileştirme elemanları vs. örnek olarak verilebilir. Aktif yöntemlerde dış güç kaynağının kullanılması gerekmektedir. Akışkan titreşimi, mekanik karıştırıcılar, elektrostatik alanlar, yüzey titreşimi gibi yöntemler bu sınıftan sayılabilir. Karma yöntemler aktif ve pasif yöntemlerin iki veya daha fazlasının birlikte kullanıldığı yöntemlerdir (Bergles 1998).

Pasif yöntemler kullanıldığında ısı transferinde büyük ölçüde iyileşme gözlenirken, akışkanı pompalamak için gerekli enerji miktarında, meydana gelen basınç düşümüne bağlı büyük artış meydana gelir. Pasif yöntemlerde ayrıca çözümlenmesi gereken farklı sistem problemleri de ortaya çıkmaktadır. Örneğin nükleer reaktörlerde boru içerisine türbülötörler yerleştirilmekte ve bu, borularda yorulmalara ve rezonans durumunda sistemde çatlama ve kırılmalara yol açabilen, akış kaynaklı titreşimlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Kimyasal proseslerde ise seçilen akışkanın türüne bağlı olarak, bir süre sonra ısı transferini olumsuz etkileyen, çökelme, kirlenme gibi sorunlar meydana gelmektedir.

Isı borularında geleneksel olarak su, motor yağı ve etilen glikol ısı transferi akışkan olarak kullanılmaktadır. Ancak bu geleneksel iyileştirme yöntemlerinin ısı transferi performanslarının düşük olması nedeniyle iyileşmede istenilen verim elde edilememekte ve ısı değiştiricinin küçük hacim ve geometride olmasını sınırlandırılmaktadır.

Katı partiküllerin ısı değiştiricide kullanılan temel akışkan içerisine çözelti şeklinde konulması ısı transferini iyileştirmenin pasif yöntemlerinden biridir. Bu yöntem akışkanın ısı iletkenliğini artırır ve ısı transferi kapasitesini iyileştirir. Bir temel akışkan içerisine süspansiyon olarak katılan ince katı metaller, ısı iletkenlikleri temel akışkanın iletkenliğinden yüksek olduğu için, temel akışkanın ısı iletkenliğini artırmaktadır.

Akışkanın ısı iletkenliğinin milimetre yada mikrometre boyutlarındaki katı partiküllerin içerisine süspanse edilmesi yoluyla artırılması uzun zamandan beri bilinen bir yöntemdir (Lee *et al.* 1999). Fakat endüstriyel işlemlerde boru içerisindeki çökelme, tortulaşma, aşınma ve büyük basınç dūřmeleri gibi sorunlardan dolayı bu yöntemler cazip bulunmamıştır. Ayrıca bu boyuttaki partiküllerle hazırlanan süspansiyonlar mikro kanallarda daha az kararlı bir yapı gösterdiklerinden tıkanmalara neden olmaktadır. Malzeme bilimindeki son yıllardaki gelişmelere paralel olarak nanometre boyutlarında partiküllerin üretilmesiyle bu sorunların giderilme imkânı doğmuştur. Isı iletkenlikleri yüksek ve nanometre boyutlardaki altın, gümüş, bakır ve alüminyum, gibi katı partiküller geleneksel ısı transferi akışkanlarına katılarak yeni bir ısı transfer akışkan tipi üretilmiştir. Nanometre boyutlardaki katı partiküllerin katıldığı bu yeni ısı transferi akışkanlarına “nanoakışkan” denilmektedir (Wen and Ding 2004).

Isı boruları nanoakışkanların kullanıldığı ısı taşıyan çok sayıda sistemden biridir. Isı boruları büyük miktarlarda ısının çok küçük kesit alanları ile taşınmasına imkân vermekte ve bu süreçte ek bir güce ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu özellikleri, diğer geleneksel ısı taşıma sistemlerinden en önemli üstünlükleridir. Bunun yanısıra tasarım ve üretiminin kolay olması, ısı verici ve alıcı arasında çok küçük sıcaklık farkının yeterli olması ve farklı sıcaklık aralıklarında çalıştırılabilmesi gibi üstünlükleri de vardır (Hızal *et al.* 2011).

2. KURAMSAL TEMELLER

En önemli teknoloji alanlarından biri olan nanoteknolojinin temel uygulama alanlarından biri de nanoakışkanlardır. Son yıllarda ısı transferini geliştirme çalışmaları sonucunda nanoakışkanlar, ısı transferi akışkanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Nanoakışkan fikri ilk olarak Choi tarafından geliştirildikten sonra fiziksel ve ısı özelliklerinin belirlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Temel akışkana nano boyutta katı parçacıklar eklenerek oluşturulan nanoakışkanlar ısı transferi uygulamalarında sıkça kullanılmaya başlanmıştır.

Isı boruları son yıllarda verimli uygulamaları ile yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Isıl iletkenliğinin yüksek olmasının yanı sıra; üretim ve bakım maliyetinin düşük olması, her boyutta imal edilebilmesi de bu cihazların kullanımının artmasına olanak sağlamıştır. Isı borusu, içerisinde yer alan çalışma sıvısının sıcaklık etkisiyle buharlaşması-yoğunlaşması prensibi ile çalışan bir cihazdır. Son yıllarda ısı borularında çalışma sıvısı olarak nanoakışkan kullanılmaktadır. Bu bölümde nanoakışkanlar ve ısı boruları ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

2.1. Nanoakışkanlar

Farklı tipteki sıvılar genellikle ısı transfer uygulamalarında ısı taşıyıcıları olarak kullanılmaktadır. Isı transfer sıvılarının önemli bir rol oynadığı uygulamalar, elektrik santrallerinde ısı değişim sistemleri, binalardaki soğutma ve ısıtma sistemleri, taşımalardaki araç klima (AC) sistemleri ve işleme tesislerinin çoğunun soğutma sistemleridir. Yukarıda belirtilen tüm uygulamalarda, ısı transfer sıvılarının ısı iletkenliği, ısı transfer sürecinin verimliliği ve bununla birlikte sistemin genel etkinliği üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu nedenle araştırmacılar, geleneksel olarak kullanılan akışkanlardan önemli ölçüde daha yüksek ısı iletkenliğe sahip gelişmiş ısı transfer sıvılarını geliştirmek için sürekli çalışmışlardır (Choi and Eastman 1995).

Şimdiye kadar geometrik modifikasyon yoluyla ısı transferinin artırılması konusunda dikkate değer eforlar yapılmıştır (Hashemian *et al.* 2017), fakat bunların hepsi kullanılan ısı transfer sıvılarının düşük ısıl iletkenliği ile kısıtlanmıştır. Bununla birlikte, 1995 yılında Choi (1995), ortalama 100 nm'den küçük partikül büyüklüğüne sahip metalik kökenli nano ölçekli parçacıkların geleneksel ısı transfer sıvılarına süspansiyon haline getirilmesine dayanan yeni yenilikçi bir ısı transfer sıvısı sınıfı geliştirmiş ve bu tür sıvılara “nanoakışkan” terimi verilmiştir. Başka bir deyişle, nanoakışkan terimi, ortalama büyüklüğü 100 nm'den küçük olan nano ölçekli partikülleri içeren ve içinde barındırdığı partikülleri çözmeyen herhangi bir baz sıvı ile karışımı tarif etmek için kullanılmaktadır (Ali *et al.* 2018).

Katıları akışkan içerisine dağıtma fikri, 120 yıldan daha uzun bir süre önce teorik çalışmaları yoluyla Maxwell tarafından önerilmiştir. Daha sonra 1975 yılında Ahuja, 1988 de Liu ve diğerleri, 1992'de Argone Ulusal Laboratuvarındaki araştırmacılar tarafından mm ve / veya μm boyutlu partiküller akışkanlara dağıtmak için kullanılmıştır. Tüm bu çalışmalar, metallerin akışkanlara kıyasla oda sıcaklığında yüksek ısıl iletkenliği sahip olması temeline dayanmaktaydı. Örneğin, oda sıcaklığında bakır, bir motor yağı ve suyunkinden sırasıyla 3000 ve 700 kat daha büyük bir ısıl iletkenliğe sahiptir. Metalik sıvılar metalik olmayanlara göre çok daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğundan, sıvılar arasındaki ısıl iletkenlik gruplarında aynı farklılık vardı (Ali *et al.* 2018).

Boyut olarak μm parçacıklar içeren nanoakışkanların kullanılmasından kaynaklanan sorunlardan biri, katı parçacıkların büyük topaklaşmasından kaynaklanan küçük kanalların tıkanmasıdır, bu nedenle küçük kanallarla döşenmiş ısı transfer ekipmanında kullanılmasını zorlaştırmaktadır. Nanoakışkanlar, bu tür kanallardan düzgün bir şekilde geçebilen yeterince küçük parçacık boyutu içerdiğinden bu engeli aşmaktadır. Nanopartikül kullanmanın bir diğer avantajı, partikül ve çevresi arasındaki ısı transfer mekanizmasının yer aldığı son derece geniş bir yüzey alanına sahip olmalarıdır. Bu nedenle, parçacıkların boyutunun mm ve μm 'den nm'ye düşürülmesi, yüzey alanını aşırı derecede büyütür, ısı transferindeki artış sağlar. 2000 yılında, Xuan ve Li (2000) nanoakışkan terimini kanserojen olmayan bir baz sıvı ile karıştırılmış nano-ölçekli

metalik, ametalik ve polimerik kökenli parçacıkları içerecek şekilde yeniden tanımlamışlardır. Ayrıca etkili (efektif) ısı iletkenliğın, baz sıvıya hacimce %1-5 kadar düşük nanopartikül konsantrasyonu eklenerek %20'den fazla artırılabilceğini ve artışın partiküllerin şekli, partikül boyutları, baz sıvıya eklenen hacim fraksiyonları ve partiküllerin termofiziksel özelliklerinden güçlü bir şekilde etkilenebileceğini belirtmişlerdir. “Efektif” terimi, nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini tanımlamak ve baz sıvının kendisinin termofiziksel özelliklerini ayırmak, baz sıvı ve onun dağılmış nanopartiküllerinden oluşan yeni akışkan arasında ayırım yapmak için kullanılmıştır (Eggers and Kabelac 2016).

Isı transferi uygulamaları için nanoakışkan hazırlanması aşamasında nanomalzemler seçilirken dikkat edilmesi gereken faktörler (i) kimyasal kararlılık, (ii) termofiziksel özellikler, (iii) toksisite, (iv) bulunabilirlik, (v) baz sıvı ile uyumluluk ve (vi) maliyettir. Nanoakışkan formülasyonu için en yaygın olarak kullanılan nanopartiküller alüminyum (Al), bakır (Cu), gümüş (Ag), demir (Fe), titanyum (Ti), silikon (Si), çinko (Zn), magnezyum (Mg), karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen, grafen oksit ve elmadır. Nanoakışkan formülasyon için yaygın olarak kullanılan baz sıvılar ise su, etilen glikol (EG), EG - H₂O karışımları ve yağlardır (Suganthi and Rajan 2017).

Partiküller uygun şekilde dağıldığında, nanoakışkanların aşağıdaki faydaları sağlaması beklenir:

Yüksek ısı iletimi

Nanopartiküllerin geniş yüzey alanı daha fazla ısı transferine izin verir. 20 nm'den daha küçük parçacıklar, atomlarının %20'sini yüzeylerinde taşıyarak onları termal etkileşim için anında kullanılabilir hale getirirler. Diğer bir avantaj, sıvının mikro konveksiyonunu ve dolayısıyla artan ısı transferini sağlayabilen küçük boyuta atfedilebilen parçacıkların hareketliliğidir. Mikro konveksiyon ve artan ısı transferi sıvı içindeki ısı dağılımını daha hızlı bir şekilde artırabilir.

Kararlılık

Partiküller küçük olduğu için daha hafiftirler ve çökelme şansları daha azdır. Bu azalan çökelme, süspansiyonların en büyük dezavantajlarından biri olan partiküllerin çökmesinin üstesinden gelebilir ve nanoakışkanları daha kararlı hale getirir.

Tıkanma Olmadan Mikrokanalların Soğutulması

Nanoakışkanlar sadece genel olarak ısı transferi için daha iyi bir ortam olmakla kalmayacak, aynı zamanda yüksek ısı yükleriyle karşılaşılacak mikrokanal uygulamaları için de ideal olacaktır. Mikrokanallar ve nanoakışkanların kombinasyonu hem yüksek iletkenliğe sahip akışkanlar hem de geniş bir ısı transfer alanı sağlayacaktır. Mikro veya makro boyutlu partiküller mikrokanalları tıkadıkları için bu özellikler mikro kanallarda sağlanamaz. Sadece birkaç yüz veya binlerce atom olan nanopartiküller, mikrokanallardan daha küçük büyüklük düzeyindedirler.

Aşınmanın Azalması

Nanopartiküller çok küçüktür ve sağlam bir duvara verebilecekleri momentum çok daha küçüktür. Bu azaltılmış momentum, ısı eşanjörleri, boru hatları ve pompalar gibi bileşenlerin aşınma olasılığını azaltır

Pompalama Gücünde Azalma

Geleneksel sıvının ısı transferini iki kat arttırmak için, pompalama gücü genellikle on kat artırılmalıdır. Sıvı viskozitesinde keskin bir artış olmadıkça, pompalama gücünde orta düzeyde bir artış olacaktır. Böylece, partiküllerin küçük hacimli bir kısmı ile büyük bir ısı iletkenlik artışı sağlanabilirse, pompalama gücünden çok büyük bir tasarruf elde edilebilecektir (Das *et al.* 2006).

2.1.1. Nanoakışkan türleri

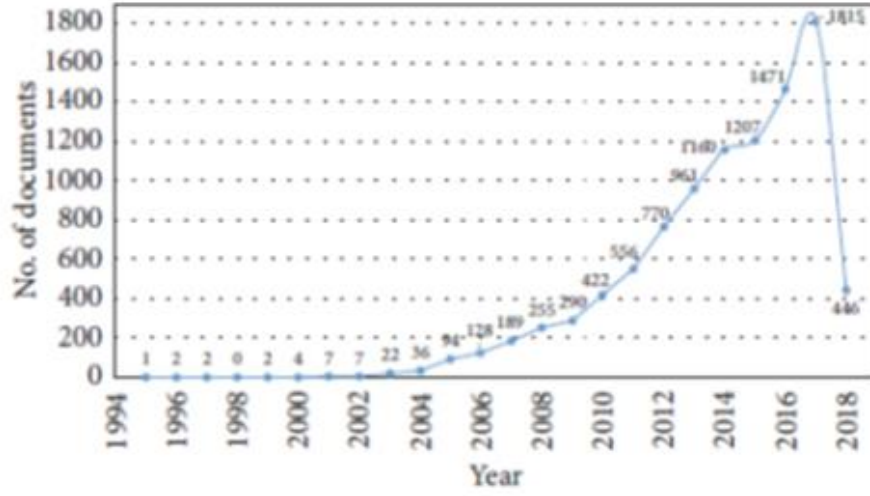
Nanoakışkan, nano ölçekli dağılmış partiküller içeren sıvıları tanımlamak için kullanılmaktadır ve tek elementli nanopartiküller (örn. Cu, Fe ve Ag), tek elementli oksit (örn. CuO, Cu₂O, Al₂O₃ ve TiO₂,), alaşımlar (örn., Cu-Zn, Fe-Ni ve Ag-Cu), çok elementli oksitler (örn., CuZnFe₄O₄, NiFe₂O₄ ve ZnFe₂O₄), metal karbürler (örn., SiC, B₄C ve ZrC), metal nitürler (örn. , SiN, TiN ve AlN) ve su, etanol, EG, yağ ve soğutucu akışkanlar içinde süspansiyon haline getirilmiş karbon malzemeler (örn., Grafit, karbon nanotüpler ve elmas) şeklinde sınıflandırılabilir. İki ana gruba ayrılırlar: tek malzeme nanoakışkanlar ve hibrid nanoakışkanlar.

2.1.1.a. Tek malzeme nanoakışkanlar

Bu nano-akışkan kategorisi ilk olarak 1995 yılında Choi (1995) tarafından önerilmiştir ve kullanılan nanoakışkanların geleneksel formu olarak kabul edilir, burada farklı hazırlama yöntemleri ile süspansiyonu üretmek için tek bir nanopartikül türü kullanılır. Birçok yazar tarafından, bu kategorideki nanoakışkanların, baz sıvılardan daha uygun termodinamik özelliklere sahip olmaları nedeniyle performans açısından üstün olduğu bildirilmiştir (Tawfik 2017).

2.1.1.b. Hibrid nanoakışkanlar

Hibrid nanoakışkanlar, baz sıvı içinde süspansiyon haline getirilmiş birden fazla tip nanopartikülün kombinasyonundan oluşan gelişmiş bir nanoakışkan kategorisidir. Bu tür sıvılar ilk önce 2007 yılında Jana ve arkadaşları tarafından, geleneksel tek malzeme tipi nanoakışkanınkinden daha fazla ısı iletkenliği arttırmak için deneysel olarak incelenmiştir (Jana *et al.* 2007). Çalışmalarında suda dağılmış Cu nanopartiküller, karbon nanotüpler (CNT'ler) ve Au nanopartiküller ile hibritleri (CNT-Cu / H₂O ve CNT – Au / H₂O) incelemiştir. Sonuçlar, Cu / H₂O nanoakışkanının ısı iletkenliğinin test edilen numuneler arasında en yüksek olduğunu ve partikül konsantrasyonunun artmasıyla doğrusal olarak arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, CNT-Cu / H₂O nanoakışkanının kararlılığı, diğer nanoakışkan tiplerinden daha uzun çökelme süresi sağlamıştır.



Şekil 2.1. Nanoakışkan başlığı ile elde edilen dokümanların sayısı (Ali *et al.* 2018)

2.1.2. Nanoakışkanların hazırlanması

Nanoakışkanların hazırlanması için iki yöntem vardır: birincisi tek adım yöntemi, ikincisi iki adım yöntemidir.

2.1.2.a. Tek adım yöntemi

Tek adım yönteminde nanoakışkanlar, nanopartiküllerin eş zamanlı olarak temel akışkan ile sentezlenmesi sonucu tek bir işlemle elde edilir. Bu yöntem için kimyasal ıslatma yöntemi (wet-chemical method), vakum buharlaştırma yöntemi (Vacuum Evaporation onto a Running Oil Substrate, VEROS), lazer ablasyon yöntemi ve tozaltı nanoparçacık sentez yöntemi (Submerged Arc Nanoparticle Synthesis System, SANSS) yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek adım yönteminde genel olarak ısı iletim katsayısı yüksek ve hızlı oksitlenme özelliklerine sahip bakır, gümüş ve altın gibi metal malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemde metal nanopartiküller akışkan ile birlikte sentezlenerek havayla teması engellenmiş olur. Bu nedenle, tek adım yöntemi metal nanopartikül içeren nanoakışkanları üretebilmek için daha uygun bir yöntemdir. Ayrıca, akışkan içerisinde üretilen nanopartiküller sayesinde yüksek homojenlik sağlanarak nanoakışkanlardan istenilen süspansiyon durumu elde edilmiş olur (Şahin and Namli 2018).

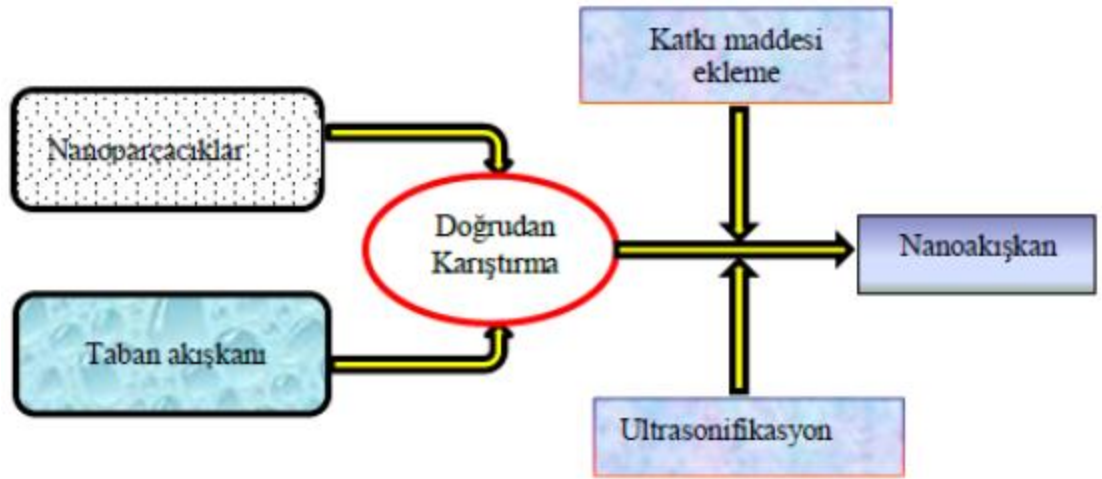


Şekil 2.2. Nanoakışkanların hazırlanmasında tek adım yöntemi (Mukherjee and Paria 2013)

2.1.2.b. İki adım yöntemi

İki adım yöntemi en yaygın kullanılan nanoakışkan hazırlama yöntemidir ve bu yöntem ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Choi *et al.* 2008, Chopkar *et al.* 2008, Özerinç *et al.* 2009, Albadr *et al.* 2013). Nanopartiküllerin fiziksel veya kimyasal yollarla kuru toz halinde üretilmesi ilk aşamasını oluştururken, ikinci aşama üretilen nanopartiküllerin akışkana karıştırılması kısmını oluşturmaktadır. Nano boyutlarda üretilen nanopartiküller topaklanma eğilimleri gösterirler ve bu istenilmeyen bir durumdur. Topaklanmış nanopartiküllerin tekrar ayrıştırılması ve parçalanması gerekmektedir. Bu yöntemin ikinci aşaması olan akışkan içerisinde partiküllerin ayrıştırılması ve dağıtılması ile ilgili bazı yöntemler uygulanabilmektedir. Bu işlemler Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, ultrasonik dağıtıcılar ile yapılan fiziksel müdahaleler ve dağıtıcı kullanılarak yapılan veya nanopartiküllere uygulanan yüzey modifikasyonları gibi kimyasal müdahaleler olarak sıralanabilir. Yapılan fiziksel veya kimyasal işlemlerden birisi kullanılabileceği gibi iki işlem birlikte de uygulanabilir. İki adım yönteminde uygulanan fiziksel veya kimyasal işlemlerde ultrasonik karıştırma süresi ve kimyasal eklentilerin miktarı kararlılığı etkileyen önemli faktörlerdir. Literatüre bakıldığında, araştırmacıların sadece uygun sürede ultrasonik karıştırma işlemi yaparak uzun süreler nanoakışkan kararlılığı sağladığı çalışmaların yanı sıra, ultrasonik karıştırma ve yüzey aktifleştirici madde eklentisi ile yapılan uzun süreli kararlılığın sağlandığı çalışmalar da görülmektedir. Yüzey

aktifleştirici madde ile yapılan kararlılık çalışmalarında eklenen kimyasalın nanoakışkanın morfolojik özelliklerini doğrudan etkilemesi bu yöntemi kısıtlamaktadır. Bu kısıtlamalar, oluşan kimyasal etki ile nanoakışkanın ısı transfer özelliklerinin kötüleşmesidir. Ayrıca nanoakışkanın sıcaklık artışına karşı duyarlılığını artırarak kullanım aralığını sınırlandırmaktadır. İki adım yöntemi, tek adım yöntemine göre partiküllerin akışkan içerisindeki süspansiyon durumları ve kararlılığı bakımından daha zayıf bir yöntemdir (Özerinç *et al.* 2009). Ancak, iki adım yöntemi, tek adım yöntemine göre çok daha ekonomiktir. Ayrıca bu yöntemin çok daha büyük miktarlarda nanoakışkan üretilme imkânı olmakla birlikte ticarileşme potansiyeli daha yüksektir (Şahin and Namli 2018).



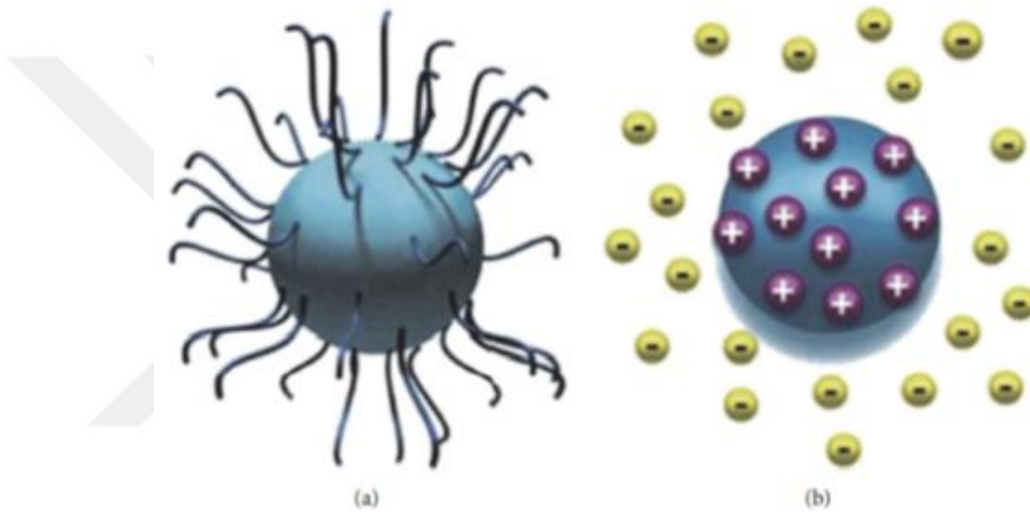
Şekil 2.3. Nanoakışkanların hazırlanmasında iki adım yöntemi (Mukherjee and Paria 2013)

2.1.3. Nanoakışkanların kararlılığı ve kararlılık artırma yöntemleri

Nanoakışkanların ticarileştirilmesinde karşılaşılan zorluk zayıf kararlılıklardır bunun sebebi partiküllerin kendileri ile ve partiküllerin çevresindeki sıvı ile arasındaki etkileşimleridir. Bu tür davranışların sebebi iki karşıt kuvvettir: 1) partikülleri birbirine çekerek topaklaşma oluşturan ve baz sıvıdan ayıran ve yerçekimi kuvveti ile dibe çöktüren, partiküllerin yüzeyindeki etkili van der Waals kuvvetleri, 2) sterik ve

elektrostatik itme mekanizmaları yoluyla birbirinden ayırma eğilimi gösteren elektriksel çift katmanlı itme kuvveti (Arthur and Karim 2016; Bushehri *et al.* 2016).

Şekil 2.4, sterik ve elektrostatik itme mekanizmalarını göstermektedir. Kararlılık, termofiziksel özelliklerini korurken ürünün raf ömrünü uzattığı için nanoakışkanların ticarileştirilmesinde çok önemli bir unsurdur. Kararlı bir nanoakışkan elde etmek için, elektriksel çift katmanlı itme kuvveti Van derWaals çekici kuvvetlerini aşmalıdır.



Şekil 2.4. İtme mekanizmaları: (a) sterik itme ve (b) elektrostatik itme (Yu and Xie 2012)

2.1.3.a. Nanoakışkanların kararlılığını ölçme yöntemleri

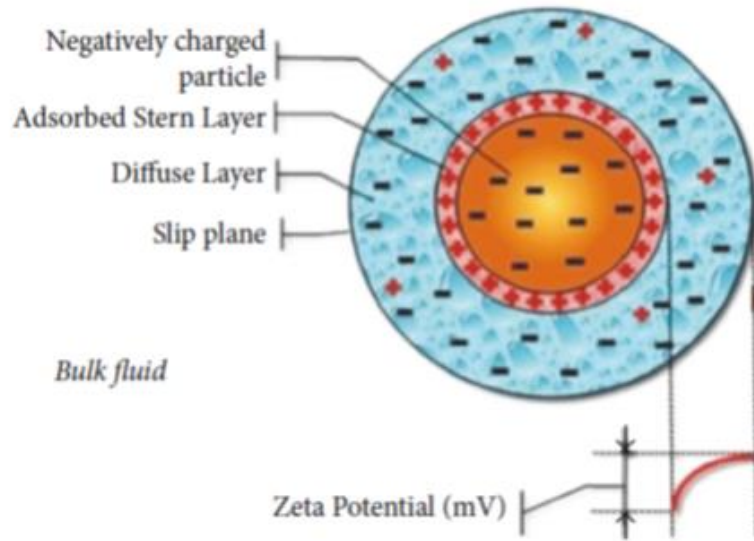
Nanoakışkanların kararlılığı, raf ömrünün uzatılmasında ve sıvının termofiziksel özelliklerinin korunmasında hayati bir role sahiptir. Nanoakışkanların kararlılığı için farklı değerlendirme yöntemleri farklı araştırmacılar tarafından tartışılmıştır (Setia *et al.* 2013; Wu and Zhao 2013). Bu teknikler aşağıdaki gibidir.

1. Zeta potansiyel analizi

Zeta potansiyel analizi, sıvının elektroforetik davranışını gözlemleyerek nanoakışkanların stabilitesini değerlendirir. Bu durum sert tabaka olarak bilinen yüklü

iyon tabakasının oluşmasına neden olan baz sıvıdaki serbest yüklerin dağılmış parçacıklar yüzeyindeki zıt yüklerden etkilenmesinden dolayıdır. Bireysel yükleri olan ve daha dağınık olan dağınık katman olarak tanımlanan oluşturulmuş sert katmanı çevreleyen ek bir katman vardır. Zeta potansiyeli, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi dağınık parçacıklarla temas halinde olan baz sıvı ve sert tabaka arasındaki potansiyel fark olarak tanımlanabilir ve milivolt cinsinden ölçülür.

Nanoakışkanlarda zeta potansiyeli düşük ph değerlerinde pozitiften yüksek ph değerlerinde negatife değişmektedir. Nanoakışkanlar kararlılık açısından, zeta potansiyel değeri $> \pm 60\text{mV}$ mükemmel kararlılığa sahiptir, $\pm (40 \text{ ila } 60) \text{ mV}$ iyi kararlılığa sahiptir, $\pm (30 \text{ ila } 40) \text{ mV}$ kararlı kabul edilir ve $< \pm 30\text{mV}$ yüksek ise aglomeratiftir (Setia *et al.* 2013). Nanoakışkandaki zeta potansiyel değeri bir Zeta potansiyel ölçüm cihazı kullanılarak ölçülebilir (Chang *et al.* 2006).

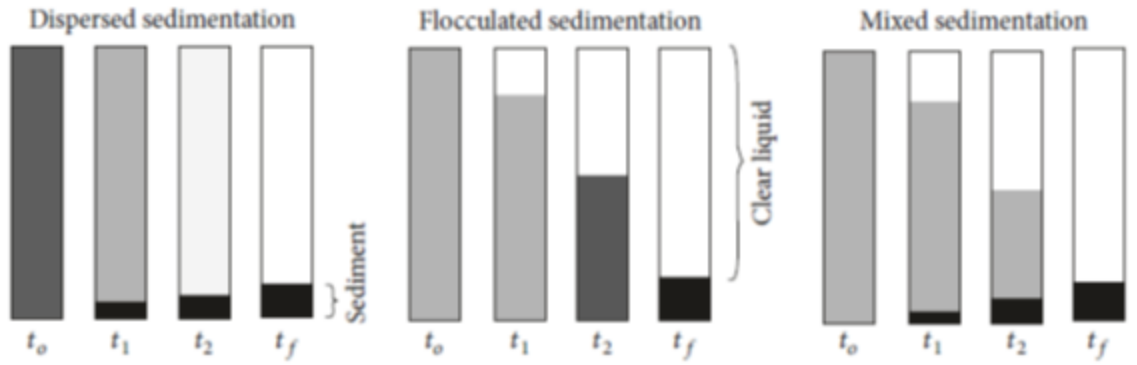


Şekil 2.5. Bir nanopartikülün kayma düzlemi ve sert tabakası arasındaki Zeta potansiyeli (Mukherjee and Paria 2013)

2. Sedimentasyon yöntemi

Bu yöntemin nanoakışkanların kararlılığını ölçmek için en basit yaklaşımlardan biri olduğu düşünülmektedir (Li *et al.* 2007; Wei and Wang 2010) Bu yaklaşımda, bir

nanoakışkan içindeki aglomere nanopartiküllerin hacmi, harici bir kuvvet altında izlenir. Bu, hazırlanan nanoakışkanın bir örneğini şeffaf bir cam şişeye yerleştirerek yapılır; daha sonra, bir kamera kullanılarak nanoakışkanın fotoğraflarını eşit zaman aralıklarında yakalayarak tortu oluşumu gözlenir (Wei and Wang 2010). Yakalanan görüntüler daha sonra nanoakışkanın kararlılığını analiz etmek için birbirleriyle karşılaştırılır. Bu nedenle, karakterize edilen nanoakışkanın, partikül boyutu ve dağılımı zamanla sabit kaldığında kararlı olduğu düşünülür, yani sedimentasyon meydana gelmez. Herhangi bir kararsız nanoakışkanda üç sedimentasyon davranışı gözlenebilir: (1) çözelti netleştikçe tortu yüksekliğinin alttan kademeli olarak arttırıldığı dağınık sedimentasyon; (2) tortu yüksekliğinin zamana göre azaldığı topaklaşmış sedimentasyon; ve (3) önceki her iki fenomenin bir nanoakışkanda aynı anda meydana geldiği karışık sedimentasyon (Ilyas *et al.* 2014). Şekil 2.6 üç sedimentasyon davranışını göstermektedir.



Şekil 2.6. Nanoakışkanlarda sedimentasyon davranışları türleri, burada t zamanı göstermektedir ve $t_0 < t_1 < t_2 < t_f$ (Ilyas *et al.* 2013).

3. Santrifüjleme yöntemi

Nanoakışkan santrifüjleme, hazırlanan sıvının kararlılığını belirlemek için sedimentasyon fotoğrafı yakalama yaklaşımına kıyasla çok daha hızlı bir yöntemdir. Nanoakışkan sedimentasyonun görsel bir incelemesinin bir dispersiyon analizörü santrifüjü kullanılarak yapıldığı çeşitli stabilite çalışmalarında kullanılmıştır (Ali *et al.* 2018).

Singh ve Raykar 30-60 nm partikül büyüklüğü ve hacim olarak %0.0112-0.0114 olarak hazırlanan gümüş / etanol nanoakışkanların kararlılığını, polivinilpirolidon yüzey aktifleştirici ilave edilmesi ve numunelerin 10 saat boyunca 3000 rpm'de santrifüjlenmesi ile doğruladılar (Singh and Raykar 2008).

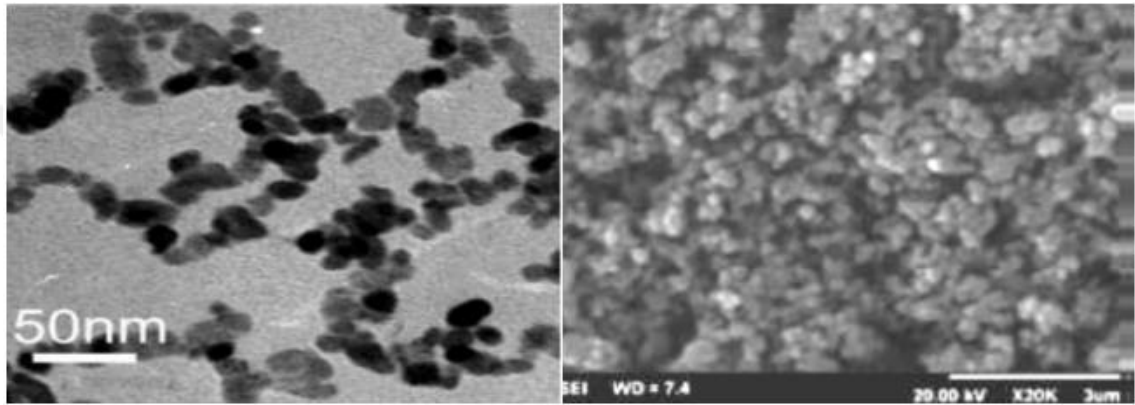
4. Spektral analiz yöntemi

Bu yöntem ilk olarak 2003 yılında Jiang *et al.* (2003) tarafından 190 ila 1100 nm arasında bir emilimi olan dağılmış nanopartiküllere uygulanabilmiştir (Yu and Xie 2012). Nanoakışkandaki nanopartikül boyutu dağılımı, partiküllerin morfolojilerine (yani, şekil ve boyut) bağlı olan optik özelliklerinden dolayı emilen spektrum ile karakterize edilir. Böyle bir işlemde nanoakışkanın emilimini ölçen yüzeydeki partikül konsantrasyonu ile sedimentasyon süresindeki değişimi belirlemek için bir UV spektral analizörü kullanılabilir. Bu yöntemin ana avantajı, nanoakışkanın analiz edilmesinden nicel bir konsantrasyon sunabilmesidir (Ali *et al.* 2018).

5. Elektron mikroskobu ölçme yöntemi

Partikül boyutu dağılımı, bir transmisyon elektron mikroskobu (TEM) veya taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazları kullanılarak nanoakışkan kararlılığını belirlemek için ölçülür. Bu çok yüksek çözünürlüklü mikroskoplar, elektron mikrofrafisi olarak bilinen, yaklaşık 0.1 nm büyüklüğündeki dijital görüntüyü yakalama eğilimindedir (Mukherjee and Paria 2013). Elde edilen görüntülerde nanopartikül kümeleri bulunursa, sedimentasyon mekanizmasının meydana gelme olasılığı daha yüksektir (yani, nanoakışkanın kararsız olduğu düşünülür). Bir TEM cihazı kullanarak numune kararlılığını incelemek için bildirilen genel uygulama, karbon kaplı bakır bir ızgara üzerine hazırlanan nanoakışkandan bir damla yerleştirilmesi ve daha sonra baz sıvı tamamen buharlaştığında nanopartiküllerin bakır ızgara üzerindeki dağılımının izlenmesidir (Dey *et al.* 2017, Kong *et al.* 2017). Baz sıvının tamamen buharlaşması her zaman nanopartiküllerin birikmesine neden olur. Bu nedenle TEM karakterizasyon yaklaşımı sadece düşük partikül konsantrasyonuna sahip nanoakışkanlar için geçerlidir.

Öte yandan, numunenin SEM incelemesi, numune tutucunun üstüne sabitlenen, daha sonra vakumlu bir fırında ısıtılan ve doğal olarak hava ile kurutulan bir yapışkan bant üzerine bir nanoakışkan damlası yerleştirilerek gerçekleştirilir. Son olarak, kurutulmuş numune partikül görüntülerini yakalamak için SEM vakum odasına yerleştirilir (Dey *et al.* 2017). Şekil 2.7 (a) ve (b), sırasıyla TEM ve SEM tarafından alınan CuO nanopartikül görüntülerini gösterir.



Şekil 2.7. Cu nanopartiküllerinin elektron mikrofasi a) TEM, b) SEM (Nallusamy 2016)

2.1.3.b. Nanoakışkan kararlılığını artırma yöntemleri

1. Yüzey aktifleştirici madde eklenmesi

Nanoakışkanlarda kullanılan yüzey aktifleştirici maddelere dağıtıcılar da denir. İki fazlı sistemlere yüzey aktifleştirici madde eklenmesi, nanoakışkanların kararlılığını arttırmak için kolay ve ekonomik bir yöntemdir. Dağıtıcılar, bir sistemin yüzey özelliklerini az miktarda etkileyebilir. Dağıtıcılar bir hidrofobik kuyruk kısmı, genellikle uzun zincirli bir hidrokarbon ve bir hidrofilik kutup başı grubundan oluşur. Dağıtıcılar, bazen ıslanabilirlik olarak bilinen iki malzemenin temasını arttırmak için kullanılır. İki fazlı bir sistemde, bir dağıtıcı, iki fazın arayüzünde yerleşme eğilimindedir, burada nanopartiküller ve sıvılar arasında bir dereceye kadar süreklilik sağlar. Kafanın bileşimine göre, yüzey aktifleştirici maddeler dört sınıfa ayrılır: kafasında yük grupları olmayan iyonik olmayan yüzey

aktifleştirici maddeler, (polietilen oksit, alkoller ve diğer polar grupları içerir), negatif yüklü kafa gruplarına sahip anyonik yüzey aktifleştirici maddeler (anyonik kafa grupları şunları içerir: zincir yağ asitleri, sülfosüksinatlar, alkil sülfatlar, fosfatlar ve sülfonatlar), pozitif yüklü kafa gruplarına sahip katyonik yüzey aktifleştirici maddeler ve katyonik yüzey aktifleştirici maddeler. Uygun dağıtıcıların nasıl seçileceği kilit bir konudur. Genel olarak, nanoakışkanların baz sıvısı polar çözücü olduğunda, suda çözünür yüzey aktifleştirici maddeler seçilmelidir; aksi takdirde yağda çözünenler seçilmelidir. Noniyonik dağıtıcılar için çözünürlüğü hidrofilik / lipofilik denge (HLB) değeri ile değerlendirilebilir. HLB sayısı ne kadar düşük olursa, yüzey aktifleştirici maddeler o kadar fazla yağda çözünür ve buna karşılık HLB sayısı ne kadar yüksekse, yüzey aktifleştirici maddeler o kadar fazla suda çözünür. HLB değeri birçok el kitabı ile kolayca elde edilebilir. Her ne kadar dağıtıcı ilavesi nanopartiküllerin dağılıbilirliğini arttırmanın etkili bir yolu olsa da, dağıtıcılar çeşitli sorunlara neden olabilir (Chen *et al.* 2008). Örneğin, yüzey aktifleştirici maddelerin eklenmesi ısı transfer ortamını kirletebilir. Ayrıca, nanopartiküllerin yüzeylerine tutturulan yüzey aktifleştirici madde molekülleri, nanopartikül ve baz sıvı arasındaki ısı direnci artırabilir, bu da etkili ısı iletkenliğinin arttırılmasını sınırlayabilir (Yu and Xie 2012).

2. Yüzey modifikasyon teknikleri

Yüzey aktifleştirici maddelere ihtiyaç duymadan nanoakışkanların uzun süreli kararlılığını elde etmek için kullanılan yöntemlerden biri, nanopartikül yüzeyini işlevselleştirme yoluyla modifiye etmektir. Bu, kendi kendini stabilize eden bir nanoakışkan elde etmek için baz sıvıya fonksiyonelleştirilmiş nanopartiküllerin sokulmasıyla yapılır. Genellikle, uygun fonksiyonel organik gruplar atom yüzeyine yapışmaya eğilimli oldukları için seçilirler, bu da nanopartiküllerin kendi kendini düzenlemelerini ve topaklaşmayı önleyebilmelerini sağlar (Neouze and Schubert 2008).

3. Ultrasonik karıştırıcı kullanımı

Sıvı yoluyla ultrasonik dalgaların kullanılmasına bağlı olan fiziksel bir yöntem olan ultrasonik karıştırıcı ile, çökeltiler içindeki nanopartiküller çekme kuvvetini parçalayarak nanoakışkanın kararlılığını arttırmak için kullanılabilir (Mahbubul *et al.* 2017). Prob tipi ve banyo tipi olmak üzere iki tip ultrasonik karıştırıcı vardır. Her iki tip de Şekil 2.8'de görülebilir.



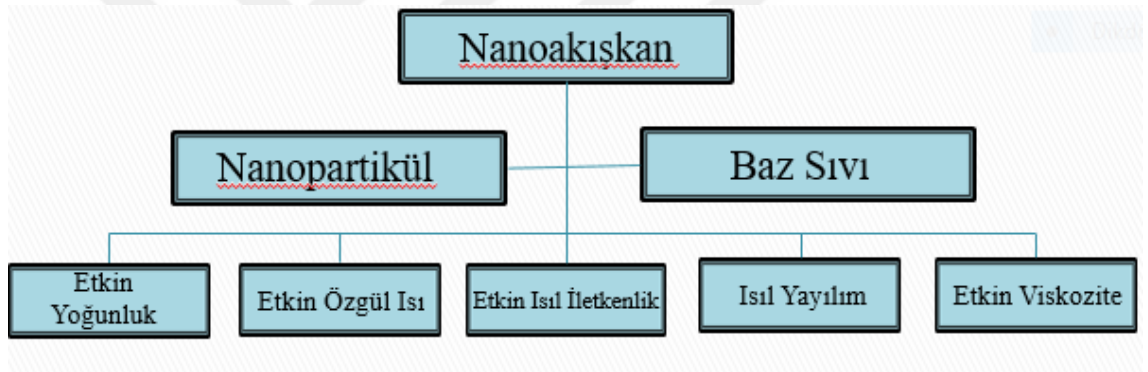
Şekil 2.8. Prob tipi ve banyo tipi ultrasonik karıştırıcı (Anonymous 2017a, Anonymous 2017b).

4. Nanoakışkanların pH kontrolü

Nanoakışkanların pH değerini değiştirmek nanopartiküllerin yüzeyini değiştirir ve dağılık nanopartiküllerin kararlılığını güçlü bir şekilde artırabilir (Peng *et al.* 2007; Choudhary *et al.* 2017). Bunun nedeni bir nanoakışkanın kararlılığının doğrudan elektrokinetik özellikleriyle ilgili olmasıdır. Bu nedenle, zeta potansiyeli, nanoakışkanın pH değeri değiştirilerek artırılabilir / azaltılabilir ve daha önce belirtildiği gibi, zeta potansiyelinin + 30mV'nin üstünde veya -30mV'nin altında yüklü nanopartiküller arasındaki yüksek itici güç nedeniyle daha kararlı olduğu düşünülür. Bir nanoakışkanın pH değeri, reaktif olmayan alkalın veya asidik çözelti eklenerek artırılabilir veya azaltılabilir (Azizian *et al.* 2016).

2.1.4. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

Nanoakışkanlar baz sıvılardan üstün kabul edilir, çünkü yoğunluk, özgül ısı kapasitesi, ısı iletkenlik, konvektif ısı transferi, ısı yayılma ve viskozite gibi tamamen farklı termofiziksel özelliklere sahip yeni bir sıvı türü oluşturulmuştur (Eggers and Kabelac 2016). "Etkin" kelimesi yaygın olarak nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini (örneğin, etkin viskozite ve etkin yoğunluk) tanımlamak için kullanılır. Bu, baz sıvının termofiziksel özellikleri ile yeni oluşturulan nanoakışkan arasındaki farklılığı göstermek için yapılır. Şekil 2.9, aşağıda daha ayrıntılı olarak anlatılan nanoakışkanların termofiziksel özelliklerini göstermektedir (Ali *et al.* 2018)



Şekil 2.9. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

1.Etkin yoğunluk

Bir nanoakışkanın etkin yoğunluğu, hem baz sıvının hem de nanopartiküllerin karışık özelliği olduğu varsayıldığından teorik olarak hem baz akışkan yoğunluğu (ρ_{bf}) hem de nanopartikül yoğunluğu (ρ_{np}) ile hesaplanır (Eggers and Kabelac 2016). Nanoakışkanın etkin yoğunluğunu (ρ_{nf}) belirlemek için, karma teorisi (1) ve (2) kullanılır.

$$f_V = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_{bf}} \approx \frac{V_{np}}{V_{bf}} \quad (2.1)$$

$$\rho_{nf} = f_V \cdot \rho_{np} + (1 - f_V) \cdot \rho_{bf} \quad (2.2)$$

burada V_{np} , V_{bf} ve f_V , nanopartikül hacmi, baz sıvının hacmi ve partikül hacimsel fraksiyonudur (Pak and Cho 1998).

2.Etkin özgül ısı

Bir nanoakışkanın (C_{pnf}) etkin özgül ısısı, bir gram nanoakışkanın sıcaklığını bir santigrat derece arttırmak için gereken ısı miktarıdır. Bir nanoakışkanın ısı transfer oranını etkileyen çok önemli bir özelliktir. Nanoakışkanların etkin özgül ısısını hesaplamak için önerilen iki ana etkin özgül ısı modeli vardır. İlk model, nanopartiküllerin hacim konsantrasyonuna ve sıvı parçacık karışım formülüne dayanarak Pak ve Cho (Pak and Cho 1998) tarafından önerilmiştir.

$$C_{pnf} = f_V \cdot (C_p)_{np} + (1 - f_V) \cdot (C_p)_{bf} \quad (2.3)$$

İkinci model, Xuan ve Roetzel tarafından sunulan yaygın olarak kabul edilen korelasyondur (Yimin Xuan 2000).

$$C_{pnf} = \frac{(1 - f_V) \cdot (\rho C_p)_{bf} + f_V \cdot (\rho C_p)_{np}}{f_V \cdot \rho_{np} + (1 - f_V) \cdot \rho_{bf}} \quad (2.4)$$

burada C_{pbf} ve C_{pnp} , sırasıyla baz sıvının özgül ısı kapasitesi ve nanopartiküllerin özgül ısı kapasitesidir.

3.Etkin ısıl iletkenlik

Nanoakışkan kavramının gelişmesindeki ana nedenlerden biri, ısı transferi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olan geleneksel sıvılara kıyasla ısıl iletkenliğin artırılmasıdır. Geleneksel sıvıya nanopartiküllerin eklenmesi, ilave edilen nanopartiküllerin baz sıvıdan

daha yüksek bir ısı iletkenliğe sahip olması durumunda ısı iletkenliği artırır. Yaygın olarak kullanılan nanopartiküllerin ve baz sıvıların ısı iletkenlikleri, sırasıyla Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2'de gösterilmektedir (Ali *et al.* 2018).

Çizelge 2.1. Yaygın olarak kullanılan nanopartiküllerin ısı iletkenlikleri (Tawfik 2017)

Material	Thermal conductivity (W/mK)
Al ₂ O ₃	40
CuO	76.5
Fe ₂ O ₃	6
MgO	54.9
SiO ₂	1.34–1.38
TiO ₂	8.4
ZnO	29
Ag	429
Al	238–273
Au	310
Cu	401
Fe	75–80
MWCNTs	2000–3000

Çizelge 2.2. Yaygın olarak kullanılan baz sıvıların ısı iletkenlikleri (Tawfik 2017)

Fluid	Thermal conductivity (W/mK)
EG	40
Ethylene oxide	76.5
Ethanol	6
Glycerol	54.9
Kerosene	1.34–1.38
Toluene	8.4
Water	29

Nanoakışkanların ısı iletkenliklerindeki değişiklikleri araştırmak için birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. 1881 yılında geliştirilen Maxwell modeli, hem nanopartiküllerin (K_{np}) hem de baz sıvının (K_{bf}) ısı iletkenliklerini kullanarak katı-sıvı dispersiyonunun etkin ısı iletkenliğini (K_{nf}) tahmin etmek için kullanılan ilk korelasyondur (Nan *et al.* 1997)

$$K_{nf} = K_{bf} \cdot \frac{K_{np} + 2 \cdot K_{bf} + 2 \cdot (K_{np} - K_{bf}) \cdot f_V}{K_{np} + 2 \cdot K_{bf} - (K_{np} - K_{bf}) \cdot f_V} \quad (2.5)$$

Bu model, nanoakışkanın iki fazını (katı ve sıvı) dikkate alır ve eklenen partiküller küresel şekle, düşük hacime % ve süspansiyon ortam şartlarında ise nanoakışkanların etkin ısıl iletkenliğini tatmin edici bir şekilde tahmin eder. Bruggeman (Mirko Dinulović 2009) daha sonra, 1935'te, rasgele dağıtılmış partiküller arasındaki etkileşimleri analiz edebilen etkin ısıl iletkenliğin örtülü bir modelini önermiştir.

$$\left[\left(\frac{K_{np} - K_{nf}}{K_{np} + 2K_{nf}} \right) \cdot f_V + (1 - f_V) \left(\frac{K_{bf} - 2K_{nf}}{K_{bf} + 2K_{nf}} \right) \right] = 0. \quad (2.6)$$



Şekil 2.10. Nanoakışkanların ısıl iletkenliğinin bağlı olduğu parametreler (Tawfik 2017)

4. Isıl yayılım

Yayınlanmış çok az sayıda makale nanoakışkanların (α_{nf}) (Eggers and Kabelac 2016) etkin ısıl yayılımını dikkate almıştır; bu teorik olarak aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{\rho_{nf} \cdot C_{p_{nf}}} \quad (2.7)$$

Çizelge 2.3. Nanoakışkanlar için ısı iletkenlik modelleri (Demirpolat 2018)

Modeller	İfadeler	Açıklamalar
Maxwell	$\frac{k_e}{k_i} = \frac{k_p + 2k_1 + 2(k_p - k_1)\phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)\phi}$	Küresel partiküller için geçerlidir.
Hamilton-Crosser	$\frac{k_e}{k_i} = \frac{k_p + (n-1)k_1 - (n-1)(k_1 - k_p)\phi}{k_p + (n-1)k_1 + (k_1 - k_p)\phi}$	Küresel ve küresel olmayan partiküller dikkate alınmıştır; küresel partiküller için n=3, silindirik partiküller için n= 6
Wasp	$\frac{k_e}{k_i} = \frac{k_p + 2k_1 - 2(k_1 - k_p)\phi}{k_p + 2k_1 + (k_1 - k_p)\phi}$	Katı-sıvı karışımların ısı iletkenliğini hesaplamak için önerilmiştir.
Yu - Choi	$\frac{k_e}{k_i} = \frac{k_p + 2k_1 + (k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi}{k_p + 2k_1 - (k_p - k_1)(1 + \beta)^3 \phi}$	İki fazlı karışımların etkili ısı iletkenliğini hesaplamak için alternatif bir teoridir.
Bruggeman	$k_e = \frac{1}{4} \left[(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_i \right] + \frac{k_i}{4} \sqrt{\Delta}$ $\Delta = \left[(3\phi - 1)^2 (k_p/k_i)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2)(k_p/k_i) \right]$	Homojen küresel partiküller içeren iki fazlı karışımlar için önerilmiştir.
Jeffrey	$\frac{k_e}{k_i} = 1 + 3\beta\phi + (3\beta^2 + \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3}{16} \frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + \frac{3\beta^4}{2^6} + \dots)\phi^2$	Yüksek dereceli terimler rastgele dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir.
Davis	$\frac{k_e}{k_i} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\phi} \left[\phi + f(\alpha)\phi^2 + 0(\phi^3) \right]$	Yüksek dereceli terimler rastgele dağılmış olan küreciklerin etkileşimlerini ifade etmektedir. f(10)=2.5 f(∞)= 0.5
Lu-Lin	$\frac{k_e}{k_i} = 1 + \alpha\phi + b\phi^2$	Küresel ve küresel olmayan partiküller için geçerlidir. Küresel partiküllerde α=10 için, a=2.25, b=2.27; α=∞ için a=3.00, b=4.51 Yakın ve uzak alan çiftlerin etkileşimleri dikkate alınır.

k_e : nanoakışkanın etkin ısı iletkenliği

k_b : baz sıvının ısı iletkenliği

k_{np} : nanopartikül ısı iletkenliği

ϕ : nanoakışkanların hacimsel derişimi

$$\Phi = \frac{V_{np}}{V_b} \quad (2.8)$$

V_{np} : Nanopartikül hacmi

V_b : Baz sıvının hacmi

5.Etkin viskozite

Nanoakışkan viskozitesi, süspansiyonun akışa direnme eğiliminin bir ölçüsüdür. Ayrıca kayma gerilmesinin kayma oranına oranı olarak da tanımlanabilir. Nanoakışkanların ısı artışıyla elde edilen fayda, baz sıvıdaki eklenen nanopartiküllerden kaynaklanan etkin viskozitedeki artışla dengelenir. Viskozitedeki bu artış daha yüksek basınç kayıplarına yol açar ve böylece pompalama gücü taleplerini yükseltir. Etkin viskoziteyi etkileyen ana

parametreler, baz akışkan viskozitesi, nanopartikül konsantrasyonu, partikül şekli, partikül çapı, partikül tipi, sıcaklık, basınç, pH değeri ve kesme hızıdır (Eggers and Kabelac 2016). Fenomenolojik hidrodinamik denklemler, Einstein (1906, 1956) tarafından, küresel katıların süspansiyonlarının etkili viskozitesini hesaplamak için kullanılan ilk denemelerdir. Araştırmacılar tarafından geliştirilen modeller Çizelge 2.4'te verilmiştir (Demirpolat 2018).

Çizelge 2.4. Nanoakışkanlar için viskozite modelleri (Demirpolat 2018)

Modeller	İfadeler	Açıklamalar
Einstein	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 2.5\phi$	Küresel partiküllerin çok düşük hacimsel oranlarda ($\phi < 0.02$)
Krieger and Dougherty	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left[1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right]^{-2.5\phi_m}$	Değişken paketleme fraksiyonlu rastgele tek dağılımlı ve sert küreler için
Neilson	$\mu_{nf} = (1 + 1.5\phi)e^{\frac{\phi}{(1-\phi_m)}} \mu_f$	Parçacık hacim oranı en fazla 0.02 için güç kanunu modeli geçerli
Mooney	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = e^{\left(\frac{k\phi}{1-k\phi}\right)}$	Self-crowding faktörü ($1.35 < k < 1.91$) ve geçme parametresi 2.5
Batchelor	$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2) \mu_f$	Brown hareketi dikkate alınarak Einstein modeli uzatma
Lundgren	$\mu_{nf} = \left[1 + 2.5\phi + \frac{25}{4}\phi^2 + f(\phi^3)\right] \mu_f$	ϕ Taylor genişleme serisinden formüle edilen Einstein modelinin azaltılması
Brinkman	$\mu_{nf} = (1 - \phi)^{2.5} \mu_f$	Einstein modelinden formüle edilmiştir. 4% 'den az partikül konsantrasyonlarda sürekli bir ortam için geçerlidir
Chen et al.	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left(1 - \frac{\phi_a}{\phi_m}\right)^{-2.5\phi_m}$	Krieger-Dougherty denkleminin modifiye edilmiştir. Parçacıkların kümelenmesi düşünülerek

2.1.5. Nanoakışkanların uygulama alanları

Nanoakışkanlar, geleneksel ısı transfer akışkanlarına kıyasla gelişmiş termofiziksel özellikleri ve ısı transfer performansları ile birçok farklı ısı transfer uygulamasında kullanılmak üzere araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Bu uygulamalardan bazıları

nanoakışkanların ilgili kullanım alanına özgü sağlayabilecekleri faydalar ile beraber aşağıda örneklenmeye çalışılmıştır (Atmaca *et al.* 2019).

1. Güneş enerjisi uygulamaları

Güneş enerjisinin ısı uygulamalarında nanoakışkan kullanımı, fosil yakıt kullanımına bağlı yaşanan problemler dolayısı ile alternatif enerji kaynaklarına yönelimin bir sonucu olarak ortaya çıkan yöntemlerden biridir. Nanoakışkanlar güneş enerjisinin ısı uygulamalarında çoğunlukla güneş kolektörlerinde ve güneş enerjili sıcak su sistemlerinde tercih edilmiştir. Bunun haricinde birkaç enerji depolama ve güneş pili uygulaması da literatürde mevcuttur. Güneş kolektörleri ile yapılan uygulamalarda nanoakışkan kullanımının ısı performansı arttırdığı tespit edilmiştir. Ekonomik ve çevresel bakış açısı ile değerlendirildiğinde bu uygulamanın CO₂ emisyonlarını düşürmeye yardımcı olduğu, yıllık elektrik ve yakıt tasarruflarını arttırdığı görülmüştür.

2. Elektronik soğutma

Elektronik uygulamalarda soğutma sisteminin performansını artırırken bunun için gerekli yüzey alanını azaltmak önemli bir zorluktur. Bu ihtiyaç, işlemci güçlerinin sürekli olarak artması ancak elektronik cihazların buna karşın küçültülmeye çalışılmasından doğmaktadır. Bu kısıtlı koşullar altında nanoakışkanlar, yüksek ısı iletim özellikleri sayesinde önemli bir alternatif sunmaktadır. Ancak elektronik soğutmada kullanmak üzere nanoakışkan seçimi yapılırken bazı noktalara dikkat edilmelidir. Seçilecek akışkan kararlı olmalı, soğutma sistemi üzerinde korozif bir etkisi olmamalı, daha iyi ısı iletkenliğe sahip olmalı ve ekonomik olarak kullanılabilir olmalıdır.

3. Uzay ve savunma sanayi

Yüksek teknoloji uygulamaların olduğu bu alanda nanoteknolojiye sıklıkla rastlanmaktadır. Büyük oranda soğutma ihtiyacına sahip bazı güç elektronikleri, enerji silahları ve askeri cihazlar bu gruba girer. Nanoakışkanlar bu ihtiyacın giderilmesi

konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Bazı durumlarda savunma sanayi uygulamalarında nanoakışkan kullanımı, birden fazla fonksiyonu yerine getirmek üzere tasarlanmıştır. Örneğin bilinen özelliklerinin yanında enerji depolama veya kimyasal reaksiyonlar sırasında enerji toplama gibi uygulamalar söylenebilir.

4. Kameralar, mikro cihazlar ve ekranlar

Yeni yapılan çalışmalarda nanoakışkanların elektrik alanlara maruz kaldıklarında daha yüksek performans ve kararlılık gösterdikleri görülmüştür. Bu özelliğin, yeni tip minyatür kamera lenslerinin, cep telefonu ekranlarının ve diğer bazı küçük ölçekli sıvı yapıdaki cihazların geliştirilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmalar, nanoakışkanların mikro veya nano boyuttaki cihazların tahrik düzeneklerinde kullanılabilme imkânını ortaya koymuştur.

5. Talaşlı imalat

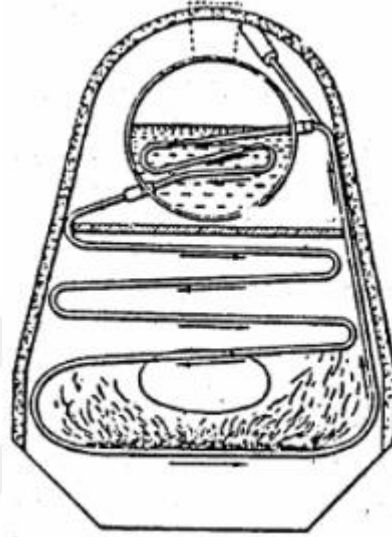
Talaşlı imalat esnasında açığa çıkan ısı ve sürtünme, kullanılan takımların ömrü açısından her zaman önemli bir problem olmuştur. Kesme sıvıları bu sorunu çözmek için kullanılan geleneksel yöntemlerdir. Ancak bu sıvıların çevreye verdikleri zararlar kullanımlarının sınırlandırılmasına neden olmuştur. Bu noktada nanoakışkanlar, ısı transfer karakteristikleri ve yağlama özellikleri ile bu problemin çözümünde alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır.

Burada bahsedilen uygulama alanlarının dışında, farklı ısı değiştiricilerinin kullanıldığı ısıtma ve soğutma uygulamalarında da geleneksel ısı transfer akışkanlarının yerine nanoakışkanların kullanılması mümkündür (Atmaca *et al.* 2019).

2.2. Isı Boruları

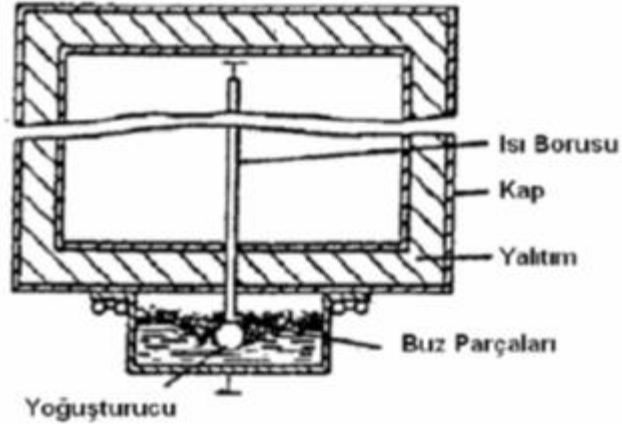
2.2.1. Isı borularının tarihçesi

1831 yılında Angier March Perkins tarafından tasarımı yapılan hermetik boru kazanı, ilk ısı borusu uygulaması olarak kabul edilir. Şekil 2.11’de gösterilen bu sistemde kızgın su buharı tek fazda ve yüksek basınçta dolaştırılmaktaydı (Reay *et al.* 2014).



Şekil 2.11. Perkins hermetik boru kazanı (Reay *et al.* 2014)

Isı borusu fikri daha sonra 1944'te Gaugler (1944) tarafından ve 1962'de Trefethen (1962) tarafından sunulmuştur. Gaugler çok hafif bir ısı transfer cihazını patentlemesine rağmen, bu aslında ısı borusunun çok temel bir sunumu olarak kalmıştır. Bu süre zarfında teknoloji, bu kadar sofistike, basit iki fazlı ve pasif ısı transfer cihazına ihtiyaç duymadığından buna çok fazla dikkat edilmemiştir. İlk olarak Trefethen (1962) tarafından 1962'de önerilmiş ve daha sonra 1963'te Wyatt (1963) tarafından ısı borusunun patent başvurusu yapılmıştır. Grove *et al.* (1964) Los Alamos Ulusal Laboratuvarı'ndaki mevcut uzay programı ve uygulaması için aynı konsepti bağımsız olarak yeniden icat ettikleri 1964 yılına kadar yaygın olarak düşünülmemiş ve yayınlanmamıştır. Grove, en tatmin edici ve basit ısı iletim cihazını “ısı borusu” olarak adlandıran ve uygulamalarını geliştiren kişidir.

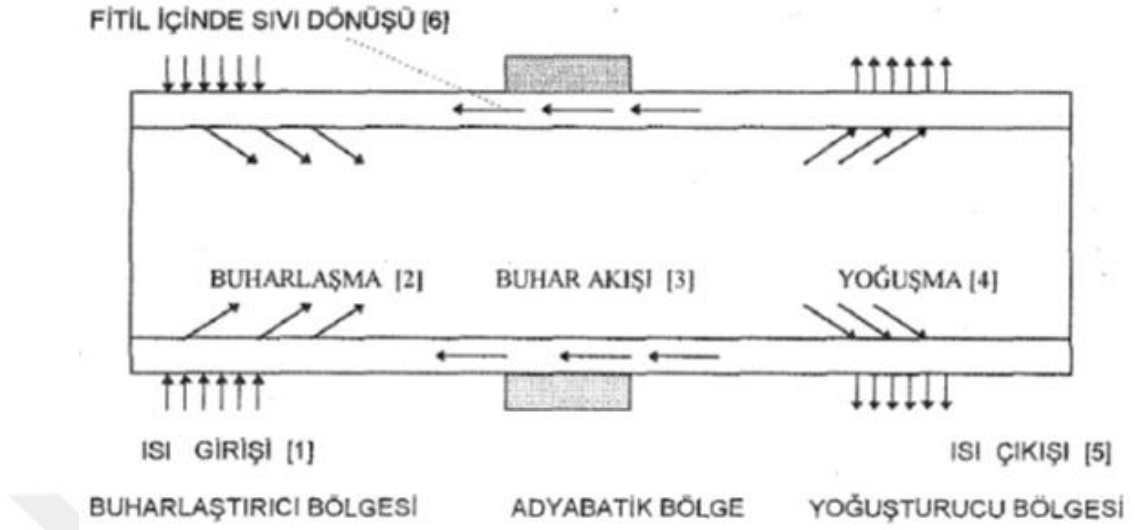


Şekil 2.12. Gaugler'in ısı borusu kesit resmi (Reay *et al.* 2014)

2.2.2. Isı borularının çalışma prensibi

Isı borusu, vakum prosesi uygulanmış kapalı bir hacim olup, genellikle boru şeklinde (silindirik, iç yüzeylerine fitil kaplanmış (yerleştirilmiş veya oluşturulmuş) ve tüm fitil yüzeyleri ve kaplar kanalları çalışma (çevrim) akışkanı ile doldurulmuş bir yapıdır. Tek bir ısı borusunun çalışma prensibini açıklamak için çizilen şematik yapı Şekil 2.13' te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ısı borusu genelde üç kısımdan oluşmuştur (Güngür 1995).

- a-) Evaporatör (Buharlaştırıcı) bölgesi,
- b-) Adyabatik (Isı kayıpsız ara) bölge,
- c-) Kondenser (Yoğuşturucu) bölgesi,



Şekil 2.13. Isı borusunun çalışma prensibi, bölgeleri ve bileşenleri (Güngür 1995)

Bir ısı borusunun buharlaştırıcı bölgesine ısı uygulandığında (1), çalışma akışkanının bir kısmı buharlaşır (2) ve hemen sonra hacmin içindeki kesiti dolduran bu buhar akışı (3) yoğunlaştırıcı bölgesinde ısı çıkışı (5) sonucunda yüzeylerde yoğunlaşma (4) oluşur ve bu yoğunlaşan sıvı fitil içinde kapılar ve varsa yerçekimi etkileriyle buharlaştırıcı bölgesine geri döner (6) ve çevrim ısı alışverişi boyunca sürekliir. Böylece bu çevrimsel işlemde "Buharlaşma ısısı" dediğimiz ısı buharlaştırıcı bölgesindeki ısı kaynağından çekilerek, yoğunlaştırıcı bölgesindeki soğuk kaynağına aktarılmış olmaktadır (Güngür 1995).

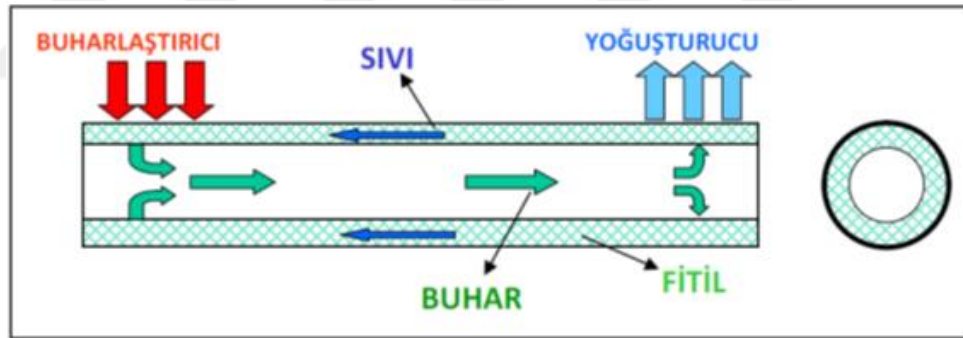
2.2.3. Isı borularının özellikleri

Isı borusunu oluşturan yapı elemanlarından iyi bir düzeyde verim almak için çeşitli özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. İyi bir ısı borusunda bulunması gerekli özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- En az et kalınlığında maksimum basınca dayanıklı olmalı,
- Isı iletim özelliğı fazla olmalı, çabuk ısınabilmeli,
- Akışkana (ve fitile) uyumlu olmalı,
- İyi vakumlanmış olmalı,
- Sıcaklık değişimlerinden etkilenmemeli,

- f. İçerisindeki sıvıyla kimyasal reaksiyona girmemeli,
- g. Sıcaklık boru boyunca homojen kalmalı,
- h. Çalışma ve reaksiyon zamanı kısa olmalı,
- i. Mümkün olduğunca estetik olmalı,
- j. Boru iç yüzeyi (fitilli olmayan tiplerde) mümkün olduğunca kanallı ve pürüzsüz olmalı,
- k. Yoğuşan akışkanlar yerçekimi etkisi ile buharlaştırıcı bölgesine taşımaya elverişli olmalı,
- l. Aynı çaptaki bakır boru çubuğunun boyu doğrultusunda nakledebildiği ısıнын bin mislini aynı yönde nakledebilmektedir.

Isı borusu üç temel yapıdan oluşur. Bunlar; akışkan, kılcal yapı, boru ve kapaklardan oluşan dış muhafazadır. Isı borusunu oluşturan yapı elemanları Şekil 4'te görülmektedir (Alt 2010).



Şekil 2.14. Isı borusunun yapı elemanları (Alt 2010)

2.2.4. Isı borularında kullanılan çalışma akışkanları

Isı borusunun çalışma prensibinin temeli, çalışma akışkanının buharlaşmasına ve yoğuşmasına dayanmaktadır. Bu bakımdan çalışma akışkanının uygun seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Çalışma akışkanının seçimi belirli kriterler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Bunlar çalışma sıcaklık aralığı, buhar basıncı, ısı iletkenlik, fitil ve boru malzemesiyle uyumlu çalışabilme, zehirli ve yanıcı olmama, kimyasal

yapısında sıcaklıktan dolayı herhangi bir değişim olmaması ve uzun dönemli çalışabilmesidir (Çaylıoğlu and Akdemir 2011).

Isı borusu uygulamaları çalışma sıcaklığı aralığına göre sınıflandırılır. Buna göre; ısı borusu uygulamaları kriyojenik, düşük sıcaklık, orta sıcaklık ve yüksek sıcaklık olarak dörde ayrılır.

Kriyojenik ısı boruları, 0 K (-273.14°C) ile 200 K (-73°C) arasında çalışacak şekilde tasarlanır. Çoğunlukla kullanılan akışkanlar ise helyum, argon, krypton, azot, oksijen, freon ve etandır.

Düşük sıcaklık ısı boruları ise 200 K (-73°C) ile 500 K (227°C) arasında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan akışkanlar ise, Freon, amonyak, alkol, aseton, su ve bazı organik bileşiklerdir.

Orta sıcaklık ısı boruları ise 500 K (227°C) ile 700 K (427°C) arasında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan akışkanlar ise sülfür, civa, alkali metaller (sezyum, rubidyum) dur.

Yüksek sıcaklık ısı boruları ise 700 K (427°C) ve üzeri sıcaklıklarda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Potasyum, sodyum, lityum, kurşun, gümüş, indiyum gibi ağır metaller kullanılmaktadır (Arslan 2007).

2.2.5. Isı borusu uygulamaları

a) Kalıp İmalatı ve Plastik Enjeksiyon

Ergimiş olarak kalıba doldurulan plastik veya metal alaşımlar çok kısa bir sürede katılaştırılarak istenilen şekli alması sağlanır. Soğutma süresi kısaltılarak seri üretim

hızlandırılmış olur. Bu nedenle ısının kalıptan çekilmesi çok önemlidir ve bu işlem ısı boruları ile gerçekleştirilir.

b) Elektronik Parçaların Soğutulması

Elektronik parçaların soğutulmasında en önemli sorun soğutma için kullanılan cihazın boyutudur. Isı borusu, küçük kesit alanından yüksek miktarda ısı geçiş kabiliyetine sahip olduğu için elektronik parçaların soğutulmasında en çok tercih edilen cihazdır. Isınan elektronik parçalara doğrudan monte edilerek aşırı ısınmanı önüne geçilir. Herhangi bir mekanik parça içermemesi ısı borusunun bozulmadan uzun süre çalışmasını sağlamaktadır. Boru içindeki akışkanın dışarı akması elektronik parçalar için tehlike arz ettiği düşünülebilir ise de boru çapının çok küçük olmasından ötürü kullanılan akışkan hacminin 1 cc. den daha az olması bu tehlikeyi ortadan kaldırmaktadır.

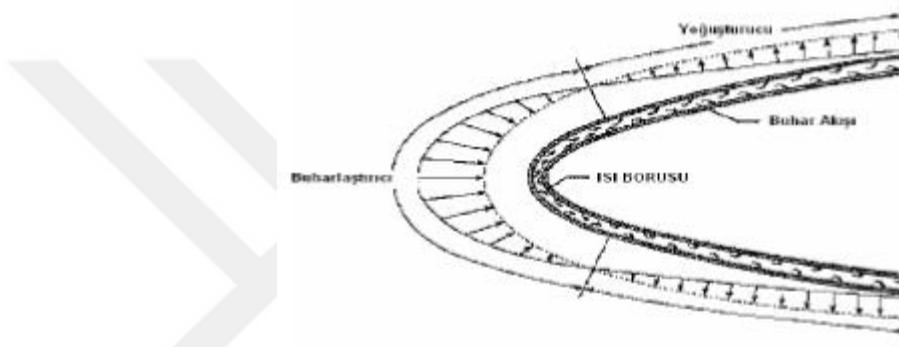
c) Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Sistemleri

İklimlendirme sistemlerinde kullanılan ısı borularında soğutucu akışkan kullanılır. Bu tür sistemlerde geri dönen sıcak hava ile ısı borusunun buharlaştırıcı kısmı temas ettirilerek boru içindeki akışkan buharlaştırılır. Buharlaştıran akışkan borunun diğer ucuna, yoğunlaştırıcı kısmına hareket eder ve burada sistem içinde soğutulan hava ile soğutulur. Yoğuşan akışkan tekrar buharlaştırıcı kısma girerek çevrime devam eder. Bu sayede iklimlendirme konfor şartları iyileştirilir, havadaki nem miktarı azaltılır ve hava kalitesi arttırılır. Klima sistemlerinde ısı borusunun kullanılması ile yıllık yaklaşık 1000 \$ gibi bir kazanç elde edilmekte ve sistemden yaklaşık %15 oranında enerji tasarrufu sağlanmaktadır

d) Uzay ve Havacılık

Uzaya gönderilen uyduların güneş ışığına maruz kalan kısımları diğer taraflara oranla aşırı ısınır ve bu da çok büyük sıcaklık farklarına sebep olur. Uydu yüzeyinde eş sıcaklık dağılımı elde edebilmek için bu yüzeylere ısı boruları yerleştirilir. Havacılık

uygulamalarında, kanatların keskin uçları ve uçağın burun kısmı uçak hızı Mach sayısına yaklaştıkça 1500 K (1227°C) gibi sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Bu durum uçakta kullanılan malzeme ve uçuş güvenliği açısından tehlike arz etmektedir. Bu problemin çözümünde Şekil 2.7’de görüldüğü gibi ısı boruları kullanılmıştır. Kanadın sivri uçlu kısımları buharlaştırıcı görevi görürken, düz olan kısımları daha az ısındığı için yoğuşturucu görevi görür. Ayrıca gaz türbin kanatçıklarının soğutulması da mikro ölçekli, minyatür ısı boruları ile yapılmaktadır (Arslan 2007).



Şekil 2.15. Uçak kanadında ısı borusu uygulaması (Arslan 2007)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Günümüzde, endüstrinin ve teknolojinin ilerlemesi, yüksek hassasiyetli cihazların üretilmesi için soğutma ve verimlilik artışı giderek daha fazla araştırmacının dikkatini çekmektedir. Basit tasarımları, yüksek ısı transferi sağlamaları, düşük maliyetleri ve ağırlıkları gibi diğer avantajları ile ısı boruları soğutma sistemlerinde çekici bir seçim haline gelmiştir. Isı borusunun çalışma prensibi, buharlaştırıcıdan ısıyı emmek, adyabatik bölümden yoğunlaştırucuya taşımak ve ısınıyı çevreye boşaltmaktır. Isı borularında kullanılan en popüler birincil baz sıvıları saf su ve alkol türüdür. Çalışma akışkanının seçimi, çalışma akışkanının ısı değişiminde faz değişimini kullanması nedeniyle termal performansın optimizasyonu için kritik öneme sahiptir. Sıvıların tipik olarak katılardan daha düşük termal iletkenliğe sahip oldukları bilinmektedir. Ancak son yıllarda, daha fazla ısı transferi ve termal verimliliği karşılamak için, araştırmacılar baz sıvıda nanopartiküller kullanmaya başlamışlardır. Nanoakışkanlar katıların sıvılara göre daha yüksek ısı iletkenliği sayesinde ısı transfer performansının iyileştirilmesi için ısı borularında çalışma sıvısı olarak başarıyla uygulanmaktadır. Nanoakışkanların ısı borusunun ısıl performansı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla birçok deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar araştırılarak sonuçları değerlendirilmiştir.

3.1. Nanoakışkanların Isı Borularındaki Isı Transfer Özellikleri Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar

Isı borularındaki nanoakışkanların ısıl iletkenliği, ısıl direnci ve ısıl performansı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Fourier Kanunu (Isı İletim Kanunu) ve sıcaklık verileri ile ısıl iletkenlik hesaplanmıştır. Yoğunlaştırıcı bölümündeki suyun soğutma kapasitesi oranı ve buharlaştırıcı bölümünden sağlanan güç ile ısı borusu ısıl verimi hesaplanır. Yapılan tüm deneysel çalışmalar göstermiştir ki küçük bir miktar nanopartikül içeren nanoakışkanların kullanılan diğer sıvılardan ısıl iletkenliği fazladır ve ısı borusunun ısıl veriminde artış sağlarlar.

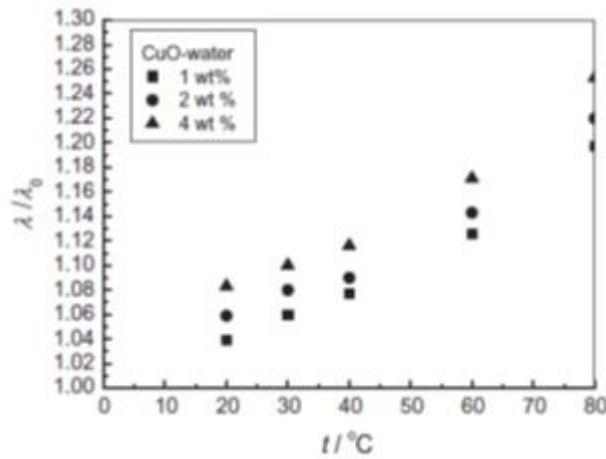
3.1.1. Mikro oluklu ısı boruları

Mikro oluklu ısı boruları farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ısı borularının iç yüzeyinde, yoğunlaştırılmış çalışma akışkanının kılcal kuvvet yoluyla buharlaştırıcı bölümüne geri dönmesini kolaylaştırmak için oluklar vardır. Çalışma akışkanının buharlaşma hızı, buharlaştırıcı ısıtmasında göre değişir. Benzer şekilde, soğutucu sıvı sıcaklığı, kütle akış hızı, özgül ısı, vb. çalışma akışkanının yoğunlaşma oranını kontrol eder. Buharlaşma hızı, yoğunlaşma hızı ve yoğunlaşma akış hızı (yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcı bölümüne) ısı borusunun verimli çalışması için uyum içinde olmalıdır. Buharlaşma hızı, yoğunlaşma hızından yüksekse, kuruma durumu olacaktır. Daha düşük buharlaşma oranı daha düşük verime yol açacaktır. Kurutma durumundan kaçınmak için, yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcıya doğru kondens akışı gereklidir. Bu nedenle oluklar veya fitiller, farklı çalışma parametreleri altında buharlaştırıcı kısmına gerekli kondensatın oluşması için yeterli kılcal kuvveti üretebilmelidir. Araştırmacılar mikro oluklu ısı borularında farklı nanoakışkanlar kullanarak, ısı performansta önemli bir artış olduğu sonucuna varmışlardır.

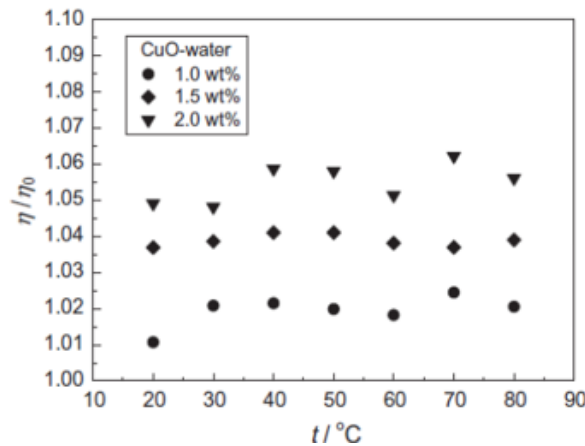
Wang *et al.* (2010) çalışma sıvısı olarak sulu CuO nanoakışkan yüklü ısı borusunun ısı performansını incelemişlerdir. Bu çalışmada, çalışma sıvısı olarak sulu CuO nanoakışkan kullanılmıştır. Deiyonize su baz sıvıdır ve eklenen CuO nanopartikülleri gaz yoğunlaştırma yöntemi ile yapılan ticari ürünlerdir. Üretici tarafından bildirilen CuO nanopartiküllerinin ortalama çapı 50 nm dir. Nanoakışkan, CuO nanopartiküllerinin deiyonize suya doğrudan dağıtılmasıyla hazırlanmıştır. Daha sonra 25-40 kHz çalışma frekansına sahip bir ultrasonik su banyosunda yaklaşık 10 saat boyunca çalkalanmıştır.

Nanopartiküllerin baz sıvıya kütle oranı olan w , nanopartikül konsantrasyonunu tarif etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada, nanoakışkan kütle konsantrasyonu ağırlıkça %0.5 ila ağırlıkça %2.0 arasında değişmiştir (karşılık gelen hacim oranı %0.078 ila %0.31 arasında değişmiştir) Baz sıvıya herhangi bir yüzey aktifleştirici madde eklenmemiştir.

Nanoakışkanın etkili ısı iletkenliği geçici sıcak tel yöntemi ile ölçülmüştür ve ölçüm verileri nanoakışkanın etkili ısı iletkenliğinin saf suyun etkili ısı iletkenliğine oranı, Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Nanoakışkanın ısı iletkenliği, hem nanopartikül kötü konsantrasyonunun hem de sıcaklığın artmasıyla artmıştır. Konsantrasyon ağırlıkça %2.0 olduğunda, oda sıcaklığında iyonu giderilmiş su ile karşılaştırıldığında %8 artmıştır. Nanoakışkanın viskozitesi, bir kılcal viskozimetre (Fungilab, İspanya) kullanılarak ölçülmüştür ve ölçülen veriler, nanoakışkanın viskozitesinin deiyonize suya oranının bir biçimi ile Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Nanoakışkanın yüzey gerilimi, deiyonize su ile karşılaştırıldığında yaklaşık %15 azalmıştır ve test edilen aralıktaki nanopartikül kötü konsantrasyonu ile hemen hemen hiçbir ilgisi yoktur.

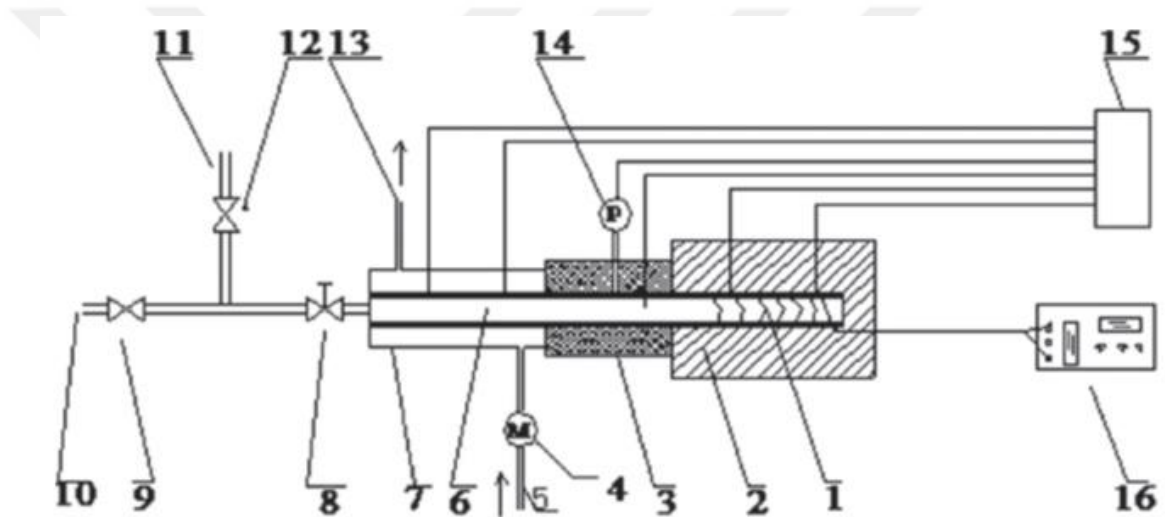


Şekil 3.1. Nanoakışkanın ısı iletkenliğinin suyun ısı iletkenliğine oranı (Wang *et al.* 2010)



Şekil 3.2. Nanoakışkanın viskozitesinin suyun viskozitesine oranı (Wang *et al.* 2010)

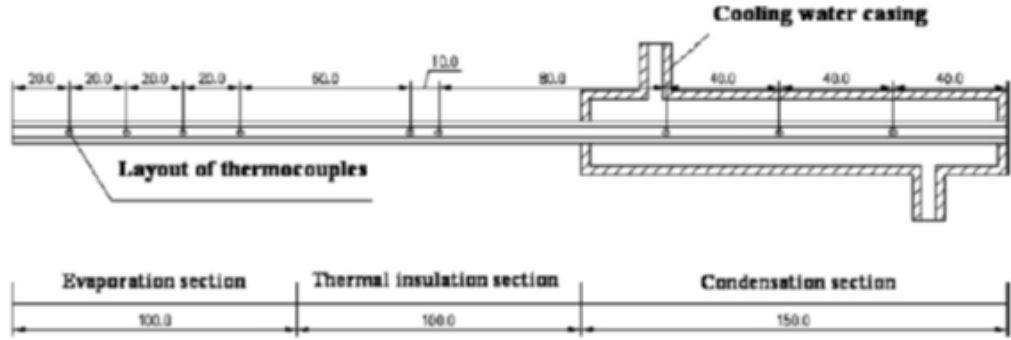
Deney sisteminin şematik bir görünüşü Şekil 3.3'te gösterilmektedir. İçinde imal edilmiş 70 spiral trapez mikro oluklu bir bakır borudan yapılmıştır. Isı borusunun uzunluğu, dış çapı ve et kalınlığı sırasıyla 350 mm, 8 mm ve 0.6 mm dir.. Her bir trapez oluğunun yüksekliği, alt genişliği ve üst genişliği sırasıyla 0.14 mm, 0.16 mm ve 0.20 mm'dir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölümü ve yoğunlaştırıcı bölümü sırasıyla 100 mm, 100 mm ve 150 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümü, çevresini çevreleyen bir elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Yoğunlaştırıcı bölümü, sabit sıcaklıkta bir termal banyoda dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur.



Şekil 3.3. Deney düzeneği (Wang *et al.* 2010)

1- elektrikli ısıtıcı 2, 3izolasyon tabakası 4-akış ölçer. 5-soğutma girişi 6-ısı borusu. 7- soğutma ceket. 8, 9-vakum valfi. 10-sıvı doldurma girişi. 11-vakum pompalama girişi. 12-vakum valfi. 13-soğutma suyu çıkışı 14-basınç dönüştürücü 15-veri toplama sistemi. 16-doğrultucu (Wang *et al.* 2010)

Termokuplların ısı borusu üzerindeki dağılımı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Isı grubunun üst ve bir tarafına aksenal doğrultuda iki grup T tipi termokupl kaynaklanmıştır. Her grupta, buharlaştırıcı bölümünde dört, yoğunlaştırıcı bölümünde üç ve adyabatik bölümde iki olmak üzere dokuz termokupl vardır. Adyabatik bölümün merkezi konumuna yerleştirilen bir basınç dönüştürücü, ısı borusundaki buharın doyma basıncını, yani çalışma basıncını ölçmek için kullanılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama duvar sıcaklıkları, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama ısı transfer katsayılarını (HTC) hesaplamak için kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Deney düzeneği şeması (Wang *et al.* 2010)

Isı akısı ve HTC'nin deneysel belirsizliği sırasıyla aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\frac{\Delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_{loss}}{Q_{loss}}\right)^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{\Delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2} \quad (3.2)$$

Bu deney nanopartikül kütle konsantrasyonunun ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Halen, ağırlıkça %1.0'lık bir optimal kütle konsantrasyonunun olduğu bulunmuştur; bu nedenle, bu makale nanopartikül kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0 olan deneysel sonuçlarını sunmuştur

Ortalama buharlaşma HTC, h_e aşağıdaki formül ile bulunur:

$$h_e = \frac{q_e}{(\bar{T}_e - T_s)} \quad (3.3)$$

$$q_e = \frac{Q}{\pi d L_e} \quad (3.4)$$

Nanoakışkanın hem buharlaşma HTC hem de maksimum ısı akısı (MHF) deiyonize suyunkinden çok daha büyüktür. Nanoakışkanın buharlaşma HTC deiyonize sudan iki katına kadar artabilir ve MHF, aynı soğutma koşulundaki suyunkine kıyasla %27-40 oranında artabilir. Ek olarak, soğutma suyunun hacim oranındaki artış, çalışma sıcaklığını ve aynı girişteki çalışma basıncını düşürmesi nedeniyle MHF'yi artırabilir.

Toplam ısı direnci R aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$R = (\bar{T}_e - \bar{T}_c)/Q \quad (3.5)$$

Kararsız durumda, çalışma sıvısı olarak sulu CuO nanoakışkan kullanıldığında başlatma süresi azalmıştır. Çalışma sıvısı olarak su yerine nanoakışkan kullanıldığında ısı transferi %40 artmıştır, ısı direnci %50 azalmıştır.

Liu ve diğerleri (2010), eğim açısı ve çalışma basıncının, çalışma sıvısı olarak su bazlı CuO nanoakışkan kullanarak eğimli minyatür oluklu ısı borusunun ısı verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, su bazlı CuO nanoakışkan çalışma sıvısı olarak kullanılmıştır. CuO nanopartikülleri, gaz yoğunlaştırma yöntemi ile yapılan ticari ürünlerdir. Üretici tarafından rapor edilen ortalama ortalama çap 50 nm dir.

Nanoakışkan, CuO nanopartiküllerinin deiyonize suya doğrudan dağıtılmasıyla hazırlanmıştır. Daha sonra çalışma frekansı 25-40 kHz olan bir ultrasonik su banyosunda yaklaşık on saat salınmıştır. Yukarıdaki salınım süresi ortalama bir süredir ve tam bir dispersiyon sağlayabilir. Nanopartiküllerin baz sıvıya kütle oranı olan w kütle konsantrasyonu, nanopartikül konsantrasyonunu tanımlamak için kullanılmıştır. Bu çalışmada, nanoakışkanın kütle konsantrasyonu ağırlıkça %0.5 ila ağırlıkça %2.0 arasında değişmiştir (karşılık gelen hacim oranı %0.078 ila %0.31 arasında değişmiştir) ve testlerin çoğu ağırlıkça%1.0 kütle konsantrasyonunda gerçekleştirilmiştir.

Nanoakışkanın yoğunluğu ve özgül ısısı, baz sıvı ve nanopartiküllerden ve nanopartikül kütle konsantrasyonundan hesaplanır:

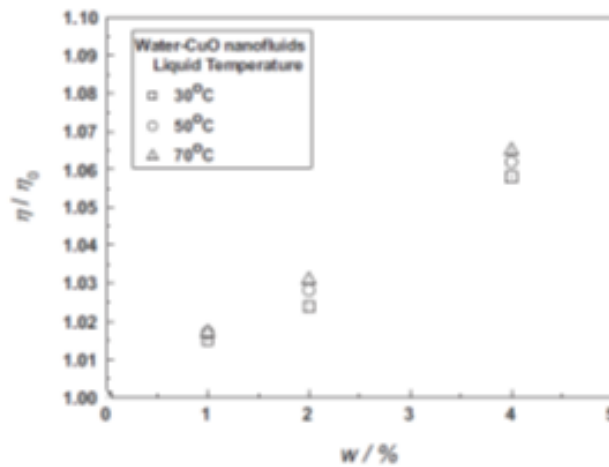
$$\rho = \left(\frac{1-w}{\rho_0} + \frac{w}{\rho_p} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

$$c = c_p \cdot w + c_0 \cdot (1 - w) \quad (3.7)$$

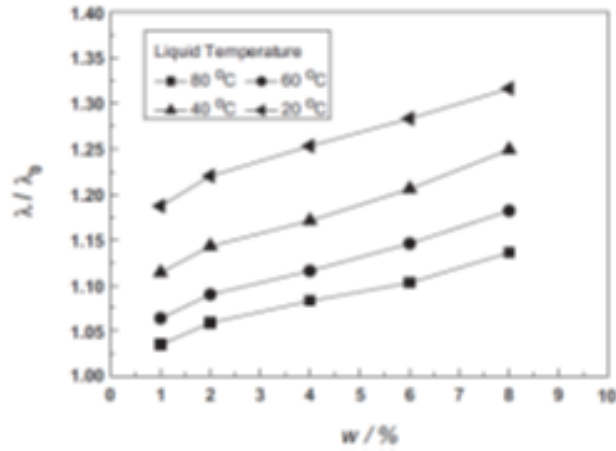
ρ ve c , sırasıyla nanoakışkanın yoğunluğunu ve özgül ısısını gösterir, c_p ve c_0 , sırasıyla nanopartikül ve baz sıvının özgül ısısıdır.

Nanoakışkanın ısıl iletkenliği, geçici sıcak tel yöntemi (THW) kullanılarak ölçülmüştür.

Şekil 3.5 ve 3.6, sırasıyla nanoakışkanın ölçülen viskozitesini ve ısıl iletkenliğini göstermektedir. Burada η / η_0 ve λ / λ_0 , nanoakışkanın suya viskozite oranını ve nanoakışkanın suya ısıl iletkenlik oranını gösterir. Nanoakışkanda hiçbir yüzey aktifleştirici madde bulunmadığından, nanoakışkanın viskozitesi baz sıvınınkinden sadece biraz daha yüksektir. Ek olarak, CuO nanopartiküllerinin ısıl iletkenliği metalinkinden daha düşük olduğundan nanoakışkanın baz sıvıya ısıl iletkenlik oranı mevcut test aralığında sadece 1.03'den 1.35'e değişir.

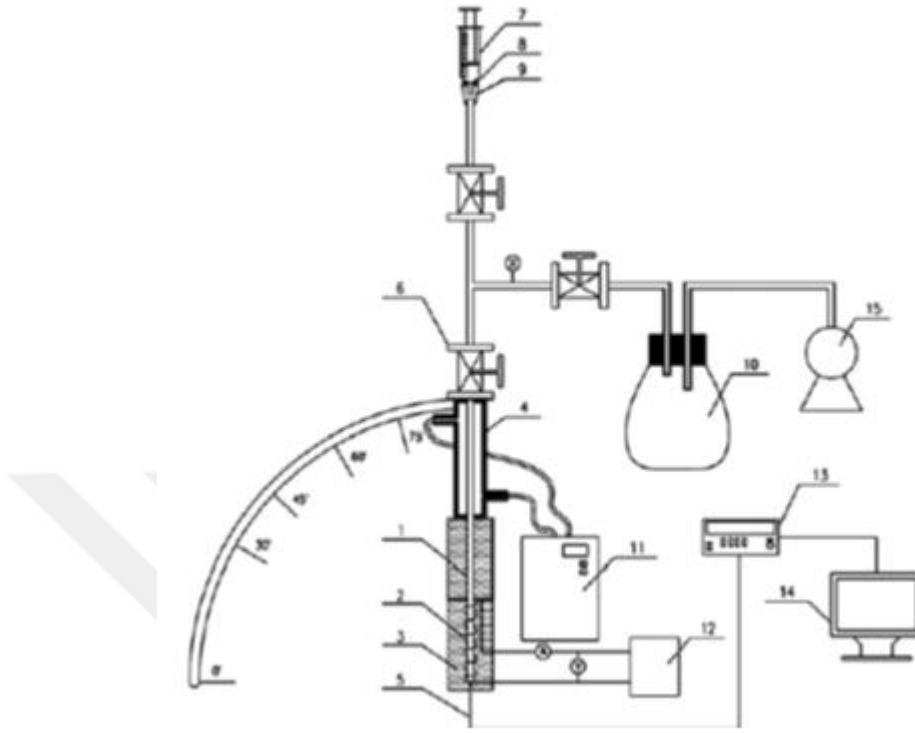


Şekil 3.5. Nanoakışkanın baz sıvıya viskozite oranı (Liu *et al.* 2010)



Şekil 3.6. Nanoakışkanın baz sıvıya ısı iletkenlik oranı (Liu *et al.* 2010)

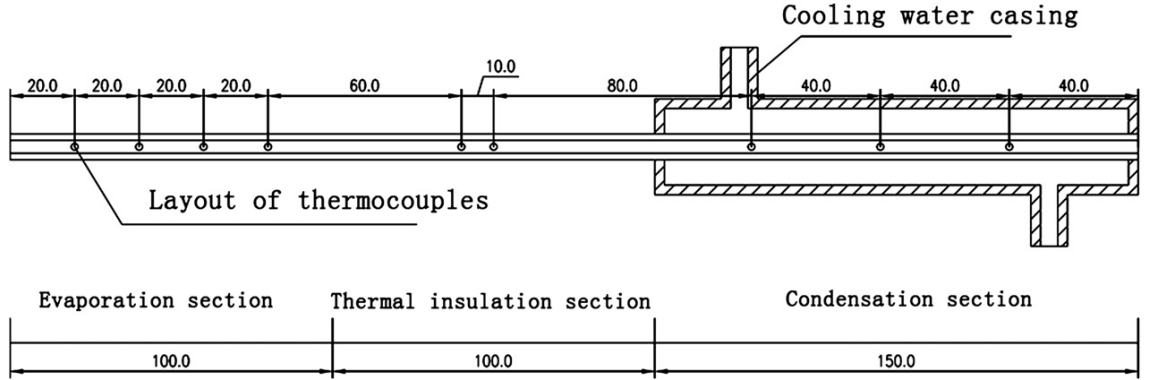
Deney sisteminin şematik bir görünüşü Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Test ısı boruları, Harbin Dawn Happy Heat Pipe Technology Co. Ltd, Çin'in ticari bir ürünüdür. İçinde imal edilmiş 60 spiral şeklinde dikdörtgen mikro oluklu bir bakır borudan yapılmıştır. Isı borusunun uzunluğu, dış çapı ve et kalınlığı sırasıyla 350 mm, 8 mm ve 0.6 mm dir.. Her dikdörtgen oluğun yüksekliği ve genişliği sırasıyla 0.25 mm ve 0.20 mm'dir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölümü ve yoğunlaştırıcı bölümü sırasıyla 100 mm, 100 mm ve 150 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümü, çevresini çevreleyen bir elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Yoğunlaştırıcı bölümü, sabit sıcaklıktaki bir su banyosunda dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Soğutma suyunun sıcaklığı ve hızı, çeşitli ısı akışları için test edilen ısı borusundaki buhar basıncını sabit bir değerde tutmak için dikkatlice kontrol edilmiştir.



Şekil 3.7. Deney düzeneği (Liu *et al.* 2010)

1-Mikro oluklu ısı borusu 2-elektrikli ısıtma teli 3-izolasyon tabakası 4-soğutma ceketi 5-termokupl 6-vakum valfleri 7-şırınga 8- vakum çamuru 9-yumuşak kauçuk fiş 10-regulatör kutusu 11-sabit sıcaklık su banyosu 12-ayarlanabilir AC güç sağlayıcı 13-veri edinme cihazı 14-deneyisel bilgisayar 15- vakum pompası

Termokuplların dağılımları Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Test edilen ısı borusunun üstüne ve bir tarafına aksel doğrultuda iki grup T tipi termokupl yerleştirilmiştir. Her grupta, buharlaştırıcı bölümünde dört, ısı yoğunlaştırıcı bölümünde üç ve adyabatik bölümde iki termokupl olmak üzere dokuz termokupl bulunmaktadır. Adyabatik bölümün merkezi konumuna yerleştirilmiş bir basınç dönüştürücü, ısı borusundaki buharın doyma basıncını, yani çalışma basıncını ölçmek için kullanılmıştır. Adyabatik bölüm merkezindeki termokupldan ölçülen sıcaklık değeri ve ölçülen doygunluk basıncına karşılık gelen hesaplanan değer birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle, adyabatik kesit merkezindeki termokupldan ölçülen sıcaklık, doymuş buhar sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama duvar sıcaklıkları, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama HTC'sini hesaplamak için kullanılmıştır.



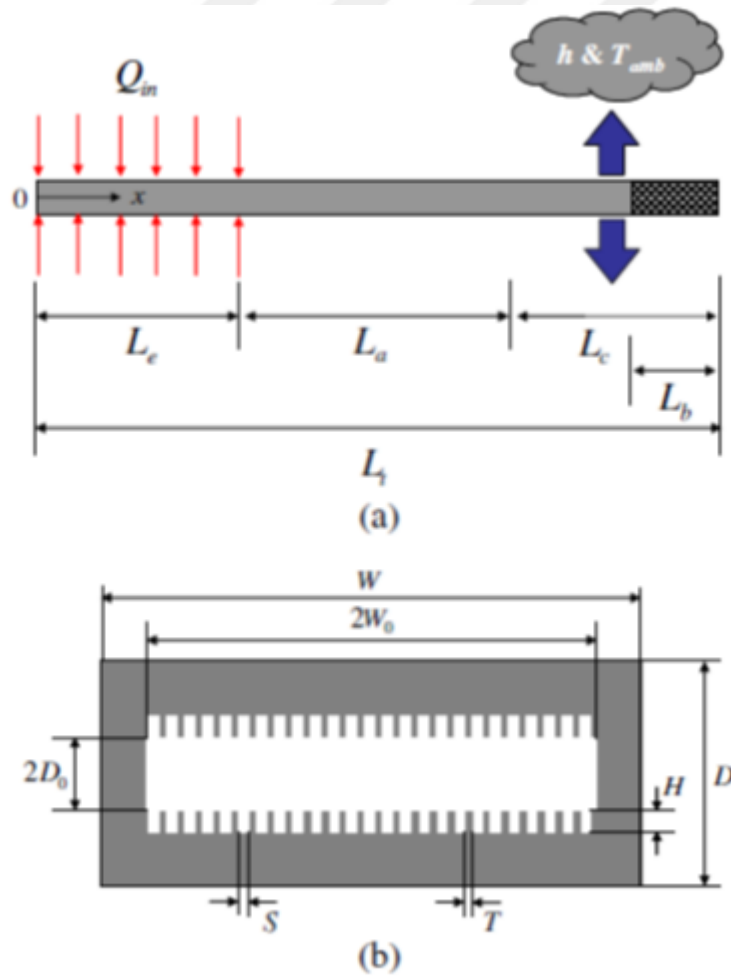
Şekil 3.8. Termokupulların şematik gösterimi (Liu *et al.* 2010)

Elde edilen sonuçlar:

- Eğim açısı, su kullanılan ısı borusunun ısı transfer özelliklerini etkiler. Eğim açısının artmasıyla hem buharlaştırıcının hem de yoğunlaştırıcı bölümü HTC kademeli olarak artar ve 75° eğim açısıyla maksimum seviyeye ulaşır. Eğimli ısı borularının buharlaşma HTC ve yoğunlaşma HTC, yatay ısı borusununkine kıyasla sırasıyla yaklaşık %60-80 ve yaklaşık 2 kattan 8 kata artar. Bununla birlikte, eğimli ısı borularının maksimum ısı akışları, yatay ısı borusununkine göre çok az değişiklik gösterir.
- Eğim açısı ayrıca nanoakışkan kullanılan ısı borusunun ısı transfer özelliklerini de etkiler. Eğim açısının artmasıyla, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerinin HTC kademeli olarak artar ve 75° eğim açısıyla maksimum seviyeye ulaşır. Nanoakışkan kullanılan ısı borusunun buharlaşma HTC ve yoğunlaşma HTC, nano-akışkan kullanan yatay ısı borusununkine kıyasla yaklaşık %60-100 ve yaklaşık 2-8 kat artar. Bununla birlikte, eğimli ısı borusu için maksimum ısı akısı iki kat artabilir ve eğim açısının kendisinin maksimum ısı akısı üzerinde sadece zayıf etkisi vardır.
- Su yerine ağırlıkça %1,0 su bazlı CuO nanoakışkan kullanılıncı hem HTC hem de ısı borusunun maksimum ısı akısı büyük ölçüde artar. Eğimli ısı borusunun ısı transferi artışı daha açıktır. Nanoakışkan kullanan ısı borusunun toplam ısı direnci, su kullanılan ısı borusununkinin yaklaşık yarısına düşürülebilirken, maksimum güç neredeyse iki katına çıkarılabilir.

- Çalışma basıncı, hem maksimum ısı akısının geliştirme oranları hem de HTC üzerinde nano-akışkan kullanan ısı borusu için belirgin bir etkiye sahiptir. Basıncın artmasıyla iki geliştirme oranı da artar.

Do *et al.* (2010b), çalışma sıvısı olarak su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanların, dikdörtgen oluklu fitilli düz bir mikro oluklu ısı borusunun ısıl performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Dikkate alınan sistem, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanları kullanan dikdörtgen oluklu fitili olan düz bir mikro oluklu ısı borusudur.

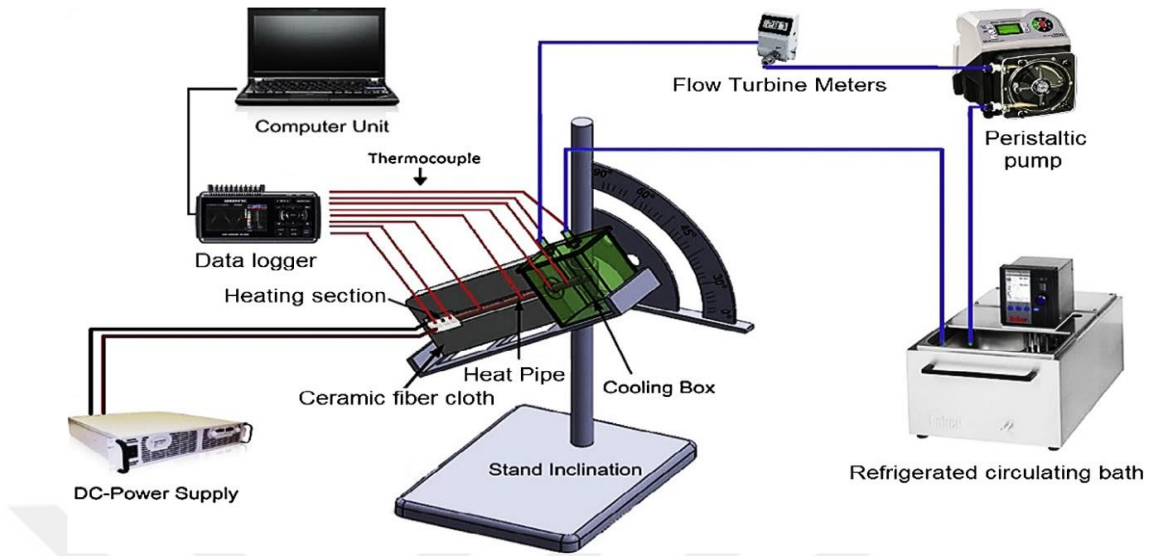


Şekil 3.9. Dikdörtgen oluklu fitilli düz ısı borusunun şematik gösterimi a) toplam ölçüler b) düz ısı borusunun kesit boyutları (Do and Jang 2010b)

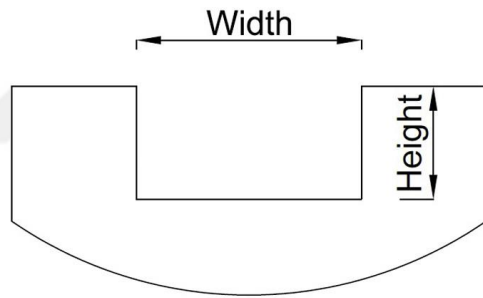
Dikdörtgen oluklu fitil ısı borusunun, su bazlı bir Al_2O_3 nanoakışkan ısı performansını nicel olarak değerlendirmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Özellikle, nanoakışkanların termofiziksel özellikleri ve nanopartiküllerin oluşturduğu ince gözenekli bir kaplama gibi yüzey özellikleri göz önünde bulundurulur. Hem deiyonize su hem de nanoakışkanlar kullanılarak yapılan ısı performans karşılaştırılmasından, nanoakışkanlar içinde süspansiyon haline getirilen nano-partiküllerin oluşturduğu ince gözenekli kaplama tabakasının, ısı borusunun ısı transferi artışında önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur. Ayrıca, hacim fraksiyonunun ve nanopartiküllerin büyüklüğünün, nanoakışkan ısı borularının ısı direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Model tahmin sonuçları, aşağıdaki iki sebeple nanopartiküllerin optimum hacim fraksiyonunun mevcut olduğunu göstermiştir: biri, ince gözenekli kaplama tabakasının oluşumu ile yüksek ısı transfer performansına sahip buharlaşma yüzeyinin uzamasıdır, diğeri ise buharlaşan ısı aktarım hızının, hacim fraksiyonunu artırarak tabakadaki daha yüksek basınç düşüşüyle azaltılmasıdır. Optimum koşullarda, nano-akışkan ısı borusu için ısı performans, baz akışkana sadece hacimce %1.0'dan daha az miktarda nanopartikül ilave edildiğinde, önemli ölçüde yaklaşık %100 artmıştır. Nano-akışkan ısı borusunun ısı direnci, nanopartikül büyüklüğünün artmasıyla azalma eğilimi göstermiştir.

Mehrali *et al.* (2016), sulu azot katkılı grafen (NDG) nanoakışkan kullanarak oluklu bir ısı borusunun ısı performansını incelemişlerdir. Şekil 3.10, bir ısı borusunun ısı performansını değerlendirmek için kullanılan deney düzeneğini göstermektedir. Kurulum bir test bölümü, ısıtma ve soğutma üniteleri, veri toplama sistemi, bir ölçüm sistemi ve değiştirilebilir eğim açılı bir montaj platformundan oluşmaktadır.

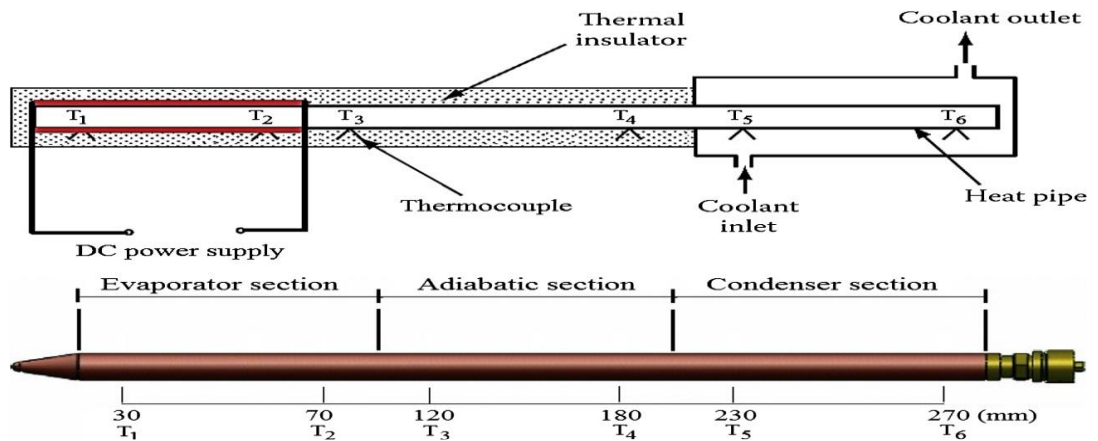
Isı borusu, 10 mm dış çapa, 0.5 mm et kalınlığına, içerisinde 300 mm 75 mm ölçülerinde düz dikdörtgen oluğa sahip bakır borudan yapılmıştır. Her dikdörtgen oluğun yüksekliği ve genişliği sırasıyla 0.3 mm ve 0.25 mm'dir (Şekil 3.11). Genel olarak, bu deneysel çalışmada, her biri aynı miktarda DI-su, sulu Triton X-100 ile ve dört konsantrasyonda NDG nanoakışkan ile doldurulmuş altı ısı borusu kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Isı borusunun ısıl termal performansını değerlendirmek için oluşturulan deney düzeneğinin şeması (Mehrali *et al.* 2016)



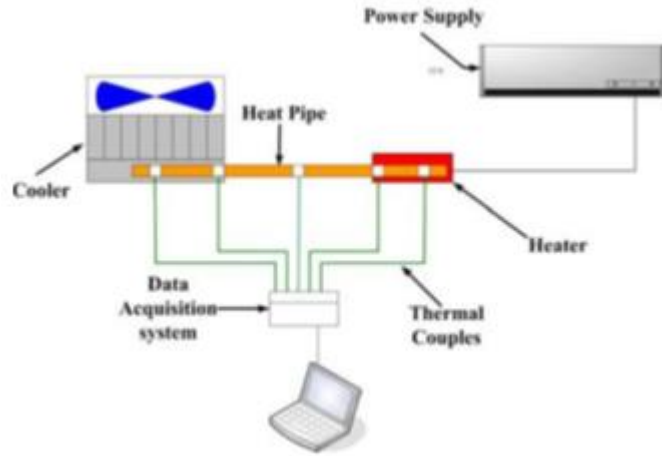
Şekil 3.11. Oluklu ısı borusunun kesit görünümü (Mehrali *et al.* 2016)



Şekil 3.12. Deneysel test bölümünün kesiti ve termokuplların ısı borusu üzerindeki yeri (Mehrali *et al.* 2016)

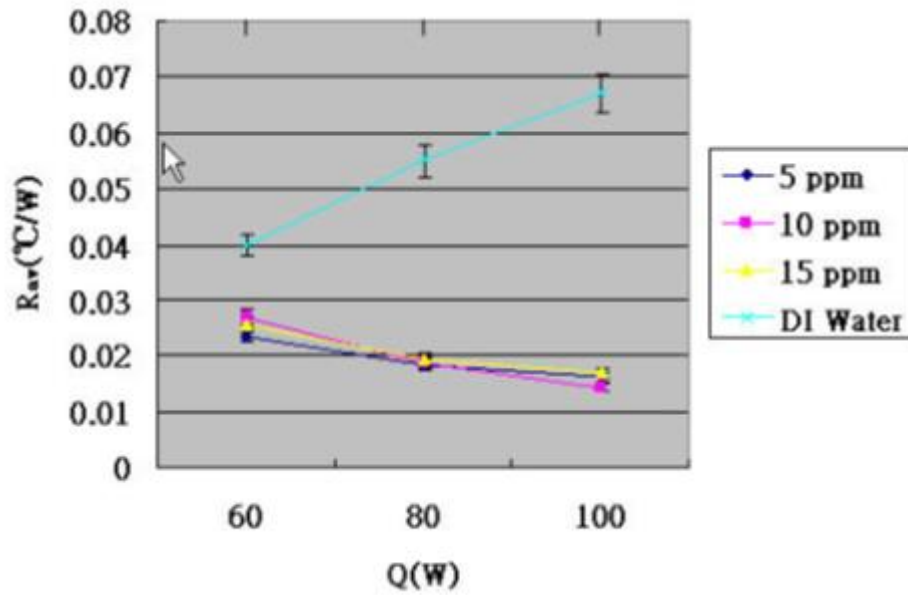
Bu çalışmada oluklu ısı borusunun ısı transferi ve ısıl performansı, çeşitli çalışma sıvıları (DI-W, ağırlıkça %0.025 sulu Triron X-100 ve NDG nanoakışkanları), giriş ısıtma güçleri ve ısı borusu eğim açıları için deneysel olarak araştırılmış ve karşılaştırılmıştır. Sistematik deneyler yoluyla yüzey sıcaklığı, termal direnç, etkili termal iletkenlik, termal performans ve ısı borusu için ısı transfer katsayısı ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, eğim açısı ve çalışma sıvısındaki NDG nanopartikül konsantrasyonunun ısı borusunun ısı transfer performansını güçlü bir şekilde etkilediğini göstermiştir. $\Theta=90$ eğim açısı, tüm durumlarda en iyi toplam ısıl performansı sağlayarak yerçekiminin önemini vurgular. NDG nanoakışkan kullanılması durumunda düşük ısı girişlerinde nanopartikül performansı arttırdığı için yüksek ısıl iletkenlik sağlanır. Daha yüksek giriş ısı güçlerinde, buharlaşma sırasında NDG nano tabakalarının buharlaştırma yüzeyi üzerinde birikmesinin, ısı transfer katsayısında ve genel performansta bir artışa yol açabilen gözenekli bir hidrofilik tabaka oluşturduğu varsayılmaktadır.

Wei *et al.* 2005, iç çapı ve uzunluğu sırasıyla 6 mm ve 200 mm olan silindirik bir mikro oluklu ısı borusu kullanmışlardır. Kullanılan nanopartikül, 10 nm büyüklüğünde gümüş parçacıklarıdır. Kullanılan baz çalışma sıvısı saf sudur. Test nanoakışkanı, nanopartiküllerin saf suda dağıtılmasıyla elde edilmiştir. Araştırmada 5 mg / l, 10 mg / l ve 15 mg / l (ppm) konsantrasyonlarında nanoakışkan kullanılmıştır. Deneyde kullanılan ısı borusunun dış çapı ve uzunluğu sırasıyla 6 mm ve 180 cm'dir. Isı borusu 200 μ m genişliğinde oluklar içermektedir. Dairesel ısı borularının ısıl direncini ölçmek için bir deney sistemi oluşturulmuştur (Şekil 3.13). Isı borusundaki yerel sıcaklık, izole edilmiş beş tip T termokupl ile ölçülmüştür. Buharlaştırıcıya iki termokupl, adyabatik kısma bir termokupl ve diğerleri yoğunlaştırıcı kısmına tutturulmuştur. Tüm termokupllar bir kuvars termometreye karşı kalibre edilmiştir.



Şekil 3.13. Isı borusunun ısıl performansını nanoakışkan ile ölçmek için kurulan deney düzeneğinin şematik görünümü (Wei *et al.* 2005)

Şekil 3.14, nano-sıvı konsantrasyonunun oluklu ısı borusunun ısıl performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Saf su içeren ısı borusunun ısıl direnci nano-sıvı çözeltili ısı borularının ısıl direncinden daha yüksektir. Sonuç olarak, nanoakışkanın yüksek termal performansları, oluklu ısı borusundaki geleneksel saf suyun yerine potansiyelini kanıtlamıştır.

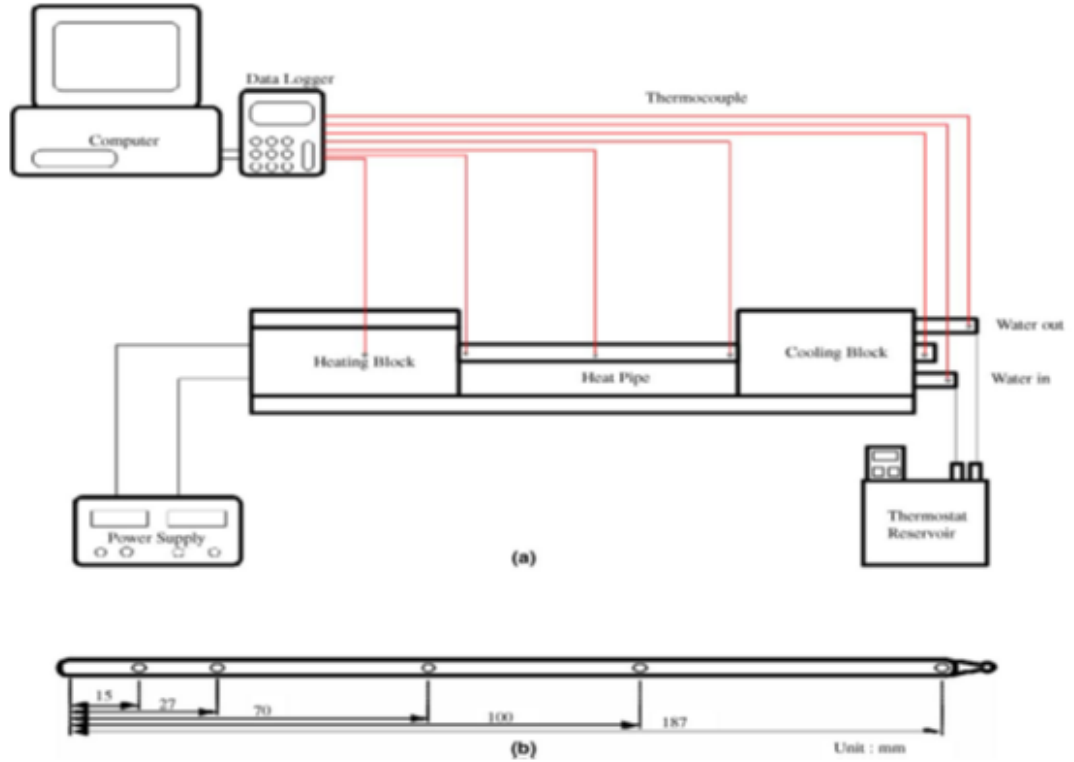


Şekil 3.14. Saf su ve farklı konsantrasyonlarda nanoakışkan ile hazırlanan ısı borusunun ısıl direncinin ölçülen değerleri (Wei *et al.* 2005)

Kang *et al.* (2006), gümüş nanopartiküller ve saf sudan oluşan nanoakışkan kullanarak deney gerçekleştirmişlerdir. Bu deneyde kullanılan nanopartiküller, 35 nm büyüklüğünde gümüş partiküllerdir. Baz çalışma sıvısı olarak saf su kullanılmıştır. Gümüş (Ag) nanoakışkan iki aşamalı yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Önce Ag nano partikülleri hazırlanmıştır. Daha sonra gümüş nano partiküller saf suya ilave edilmiştir. Ag-nano-sıvı süspansiyonlarında hiçbir yüzey aktifleştirici madde kullanılmamıştır. Karışım bir ultrasonik homojenizatör kullanılarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada 1 mg / l, 10 mg / l, 50 mg / l ve 100 mg / l (ppm) nano sıvı konsantrasyonları kullanılmıştır.

Dairesel ısı borularının ısıl direncini ölçmek için bir deney sistemi oluşturulmuştur (Şekil 3.15). Bu deneylerde kullanılan ısı borularının dış çapı ve uzunluğu sırasıyla 6 mm ve 200 mm'dir. Isı borusu 211 lm genişliğinde · 217 lm derinliğinde oluklar içermektedir.

Deney sistemi bir soğutma sistemi, bir test bölümü, ± 0.5 'lik bir belirsizlik ile bir güç kaynağı (CT605D), bir ölçüm sistemi ve bir veri toplama sisteminden (Spartan-L) oluşmaktadır. Deneysel verileri izlemek, kayıt altına almak ve işlemek için bir PC kullanılmıştır. Soğutma sistemi, sabit sıcaklıkta bir termal banyo ve bir soğutma bölmesi içermektedir. Yassı ısı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü, soğutma odasına yatay olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 3.15. (a) deney düzeneği (b) ısı borusundaki termokupulların dağılımı (Kang *et al.* 2006)

211 lm genişliğinde, 217 lm derin oluklu dairesel ısı borusu içinde 10 nm ve 35 nm gümüş parçacıkları ile seyreltilmiş DI-su deneysel olarak test edilmiştir. Performans testinin sonuçları aşağıdaki gibidir:

- Çalışma sıvısında dağılmış daha büyük gümüş nanopartiküller ile, ısı borusu duvar sıcaklığındaki artış, çeşitli ısı yükleri altında saf su dolu bir ısı borusundaki artıştan daha küçüktür.
- İki nanopartikül boyutunda nanoakışkan ve saf su kullanılarak yapılan deneylerde ısıl direnç değeri ile karşılaştırıldığında, maksimum azalma sırasıyla %50 (10 nm) ve %80 (35 nm) olarak ölçülmüştür. Bu nedenle, oluklu ısı borusunun ısıl direnci nanopartiküllerin boyutuna bağlı olarak değişmektedir.

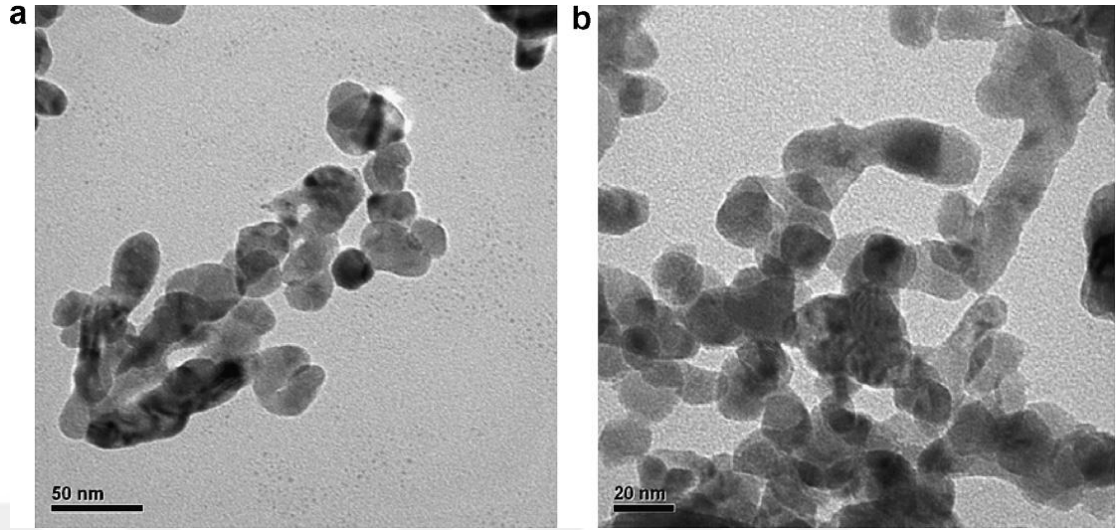
Isı borusunun ısıl iyileşmesinin nedeni şu şekilde açıklanabilir. Mevcut ısı borusu ve nanoakışkan teorilerini, özellikle de kaynama sınırıyla ilgili olanları kullanarak,

nanopartiküller, akışkanın enine sıcaklık gradyanını düzleştirebilir ve ısı borularındaki artan sıvı iletkenliği nedeniyle kaynama sınırını azaltabilirler. Böylece bir ısı borusunun ısı direnci aynı nedenden dolayı azalır.

Sonuç olarak, nanoakışkanların daha yüksek ısı performansları, oluklu ısı borularındaki geleneksel saf suyun yerini nano-sıvı potansiyeli almaktadır. Bu bulgu, nanoakışkanları yüksek enerji yoğunluğuna sahip cihazlar için bir soğutma sıvısı olarak daha çekici hale getirmektedir.

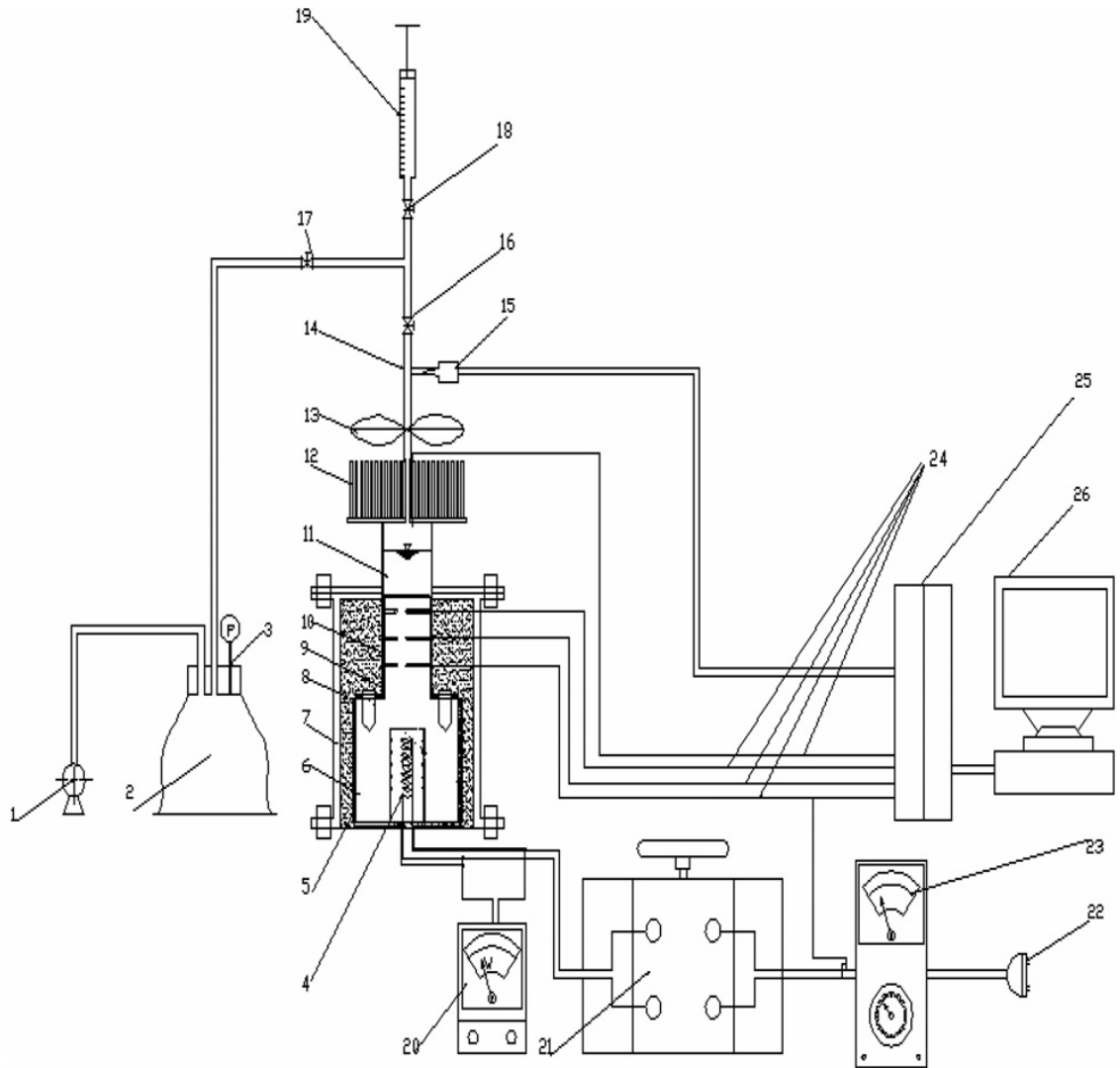
Liu *et al.* (2007), farklı işletme basınçlarında ve farklı nanopartikül kütle konsantrasyonlarında su-CuO nanoakışkanlar kullanarak ısı transferini anlamak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Bu deneyde, deiyonize su baz sıvı olarak kullanılmıştır. CuO nanopartikülleri Çin'de Anhui Endüstri Üniversitesi Nano Çevresi Enstitüsü tarafından yapılan ticari ürünlerdir. Bu deneyde kullanılan CuO nanopartiküllerinin ortalama çapı 30 nm dir. CuO nanopartikülleri ve su, bir süper-sonik su banyosuna konularak kararlı bir süspansiyon oluşturmak üzere yaklaşık 12 saat boyunca çalkalanmıştır. Nanopartiküllerin oluşturduğu ısı transfer yüzeyi üzerinde sorpsiyon tabakalarının oluşumunu önlemek için süspansiyonlara hiçbir yüzey aktifleştirici madde ilave edilmemiştir. Şekil 3.16 (a) ve (b), ağırlıkça %0.5 ve ağırlıkça %1.0 kütle konsantrasyonları ile CuO nanopartikül süspansiyonlarının TEM fotoğraflarını göstermektedir. Deneysel sonuçlar nanopartikül süspansiyonlarının stabilitesinin ve homojenliğinin birkaç gün sonra zayıf olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, test çalışması sırasında nanopartikül süspansiyonları, kabarcıkların çalkalama etkisi nedeniyle iyi bir homojenlik sağlayabilir.



Şekil 3.16. CuO nanopartikül süspansiyonunun TEM fotoğrafı a) %0.5 konsantrasyon b) %1 konsantrasyon(Liu 2007)

Şekil 3.17, deney aparatının şematik diyagramını göstermektedir. Cihaz esas olarak paslanmaz çelikten yapılmış bir test kutusu, bakır bloğun üstünde yatay bir mikro oluklu ısı transfer yüzeyine sahip minyatür bir düz ısı borusu buharlaştırıcısı, yoğuşma sistemi, veri toplama sistemi, güç kaynağı, vakum pompalama ünitesi ve bir sıvı doldurma cihazından oluşmaktadır.

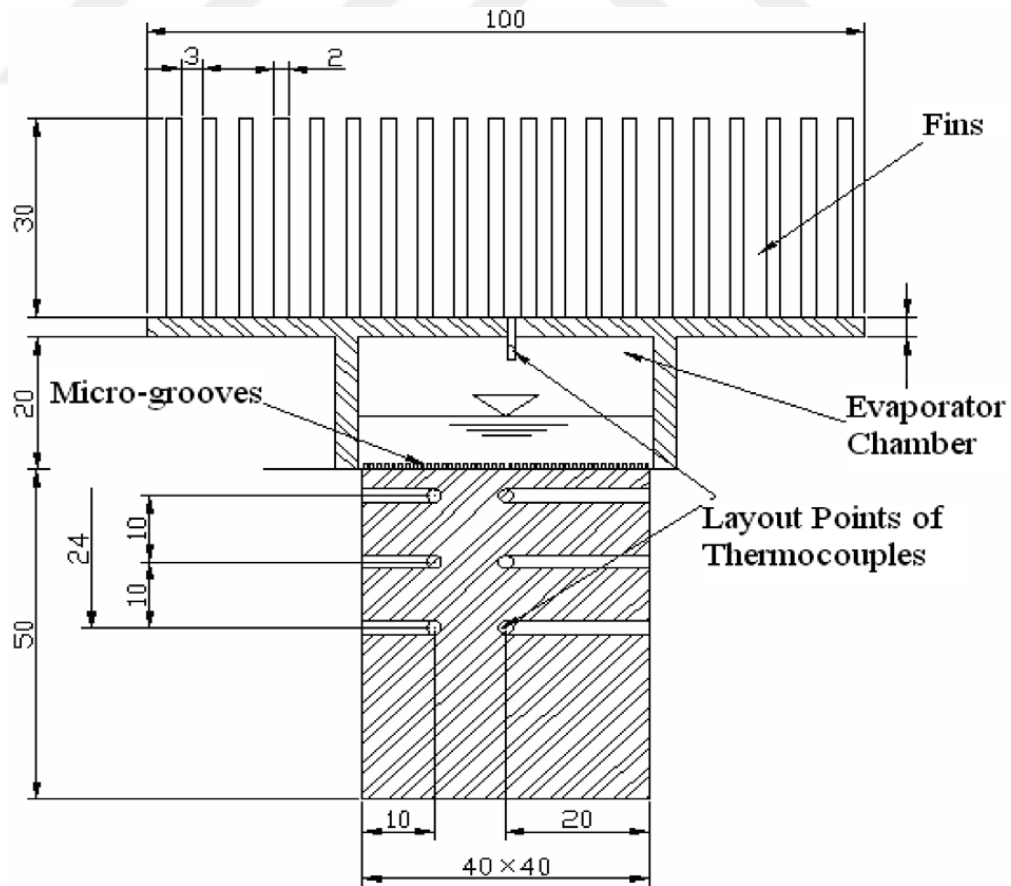


Şekil 3.17. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Liu 2007)

Bakır bloğun altından ana ısıtıcı olarak bakır bloğa bir kartuş elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiştir. Bakır blok bir mika film tabakası ile sarılmış ve daha sonra mika film yardımcı ısıtıcı olarak bir elektrikli ısıtma halkası ile sarılmıştır. Bakır blok ile test kutusu arasındaki boşluk, yalıtım için asbest ile doldurulmuştur. Isı transfer yüzeyi ve bakır bölme, silikon film ile kaplanmıştır. Çapı 1 mm olan altı termokupl, Şekil 3.18'te gösterildiği gibi bakır bloğun üst kısmındaki sıcaklık gradyanını ve ısı akışını ölçmek için yatay blok boyunca bakır bloğa yerleştirilmiştir. Üst termokupl ile ısı arasındaki dikey mesafe transfer yüzeyi 4.0 mm ve termokupllar arasındaki dikey mesafeler 10.0 mm dir. Bakır çubuğunun altına yerleştirilen bir alarm termokupl, çalışma alarmı için bir sıcaklık

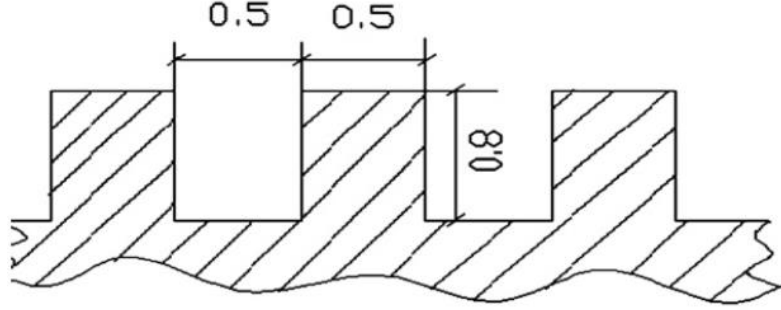
kontrolörüne bağlanmıştır. Buharlaştırıcı bölmesinin üstünde, buharın doymuş sıcaklığını ve basıncını ölçmek için buharlaştıracıya bir termokupl ve bir basınç transdüseri probu yerleştirilmiştir.

Şekil 3.18, buharlaştıracının şematik konfigürasyonunu göstermektedir. 0.1 mm çapa sahip altı termokupl, yatay doğrultu boyunca bakır bloğa yerleştirilmiştir. Üst termokupl ile mikro oluklu yüzey arasındaki dikey mesafe 4.0 mm ve termokupllar arasındaki dikey mesafeler 10.0 mm dir. Boyut detayları Şekil 3.18'te gösterilmektedir. Bakır çubuğunun altına yerleştirilen bir alarm termokupl, çalışma alarmı için bir sıcaklık kontrolörüne bağlanmıştır. Ayrıca, doymuş sıcaklığı ve buhar basıncını ölçmek için buharlaştıracıya bir termokupl ve bir basınç transdüseri yerleştirilmiştir. Deneysel sonuç, ölçülen doymuş buhar sıcaklığı ile ölçülen buharlaştıracı basıncına karşılık gelen hesaplanan sıcaklık arasındaki farkın tüm çalışmalarda 0.2 K'dan az olduğunu göstermiştir.



Şekil 3.18. Buharlaştırıcının şematik gösterimi (Liu 2007)

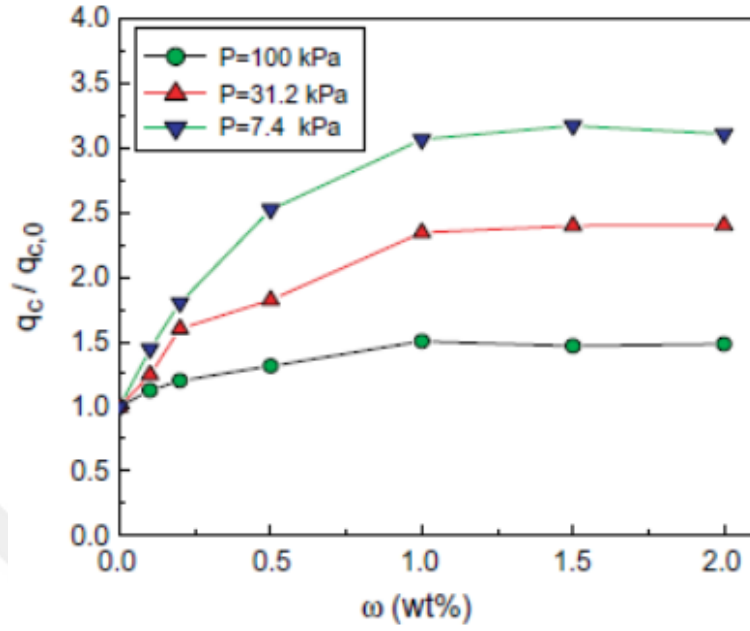
Olukların detayları Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Mikro olukların şematik gösterimi (Liu 2007)

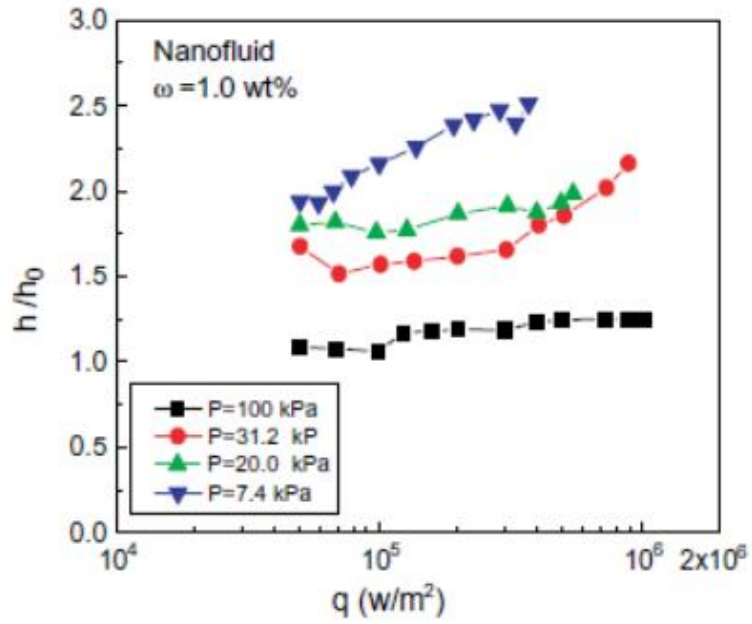
Deneyden şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Atmosferik basınçta, mikro oluklu ısı transfer yüzeyi, suyun pürüzsüz yüzeydekine kıyasla kaynama ısı transfer özelliklerini artırabilir. Bununla birlikte, düşük basınçta, oluklu yüzeyin ısı transferi artırıcı etkisi neredeyse kaybolur.
- Nanoakışkanların kütle konsantrasyonu, hem kaynama ısı transfer katsayısı hem de kritik ısı akısı (CHF) üzerinde dikkate değer bir etkiye sahiptir. Kütle konsantrasyonu %1'den az olduğunda, ısı transfer katsayısı ve CHF konsantrasyonun artmasıyla artar. Bununla birlikte, konsantrasyon ağırlıkça %1'in üzerinde olduğunda, CHF temel olarak sabit bir değere yakındır ve ısı transferi yavaş yavaş bozulur. Maksimum ısı transferi artışına karşılık gelen nanoakışkanlar için optimum kütle konsantrasyonu vardır ve bu optimum kütle konsantrasyonu tüm test basınçlarında %1'dir. Bu durum Şekil 3.20’de görülmektedir.



Şekil 3.20. Farklı basınçlarda CHF üzerinde nanoakışkan konsantrasyonunun etkisi (Liu 2007)

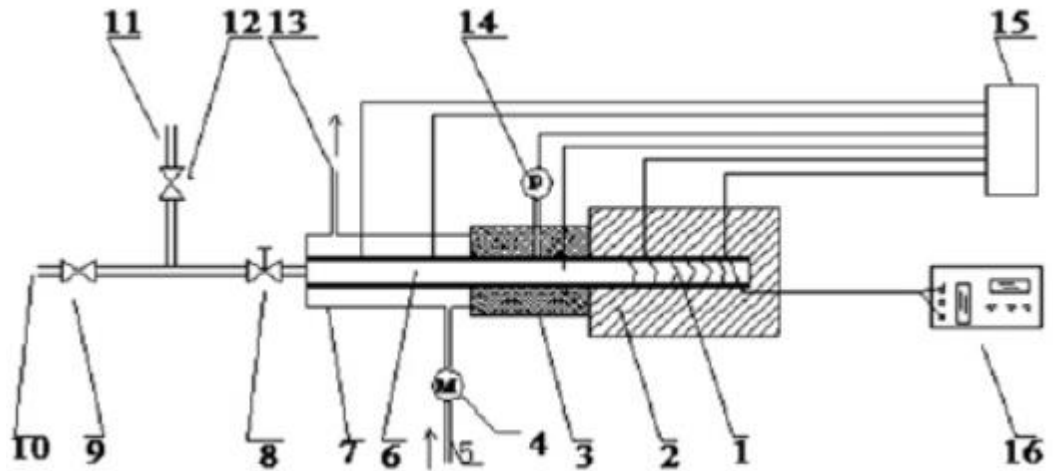
- Basıncın nanoakışkanların kaynama ısı transferi ve kritik ısı akısı üzerinde etkisi vardır, çalışma basıncının düşmesiyle ısı transfer katsayısı ve CHF artar (Şekil 3.21)



Şekil 3.21. %1 konsantrasyondaki nanoakışkan için ısı transferi üzerinde basıncın etkisi (Liu 2007)

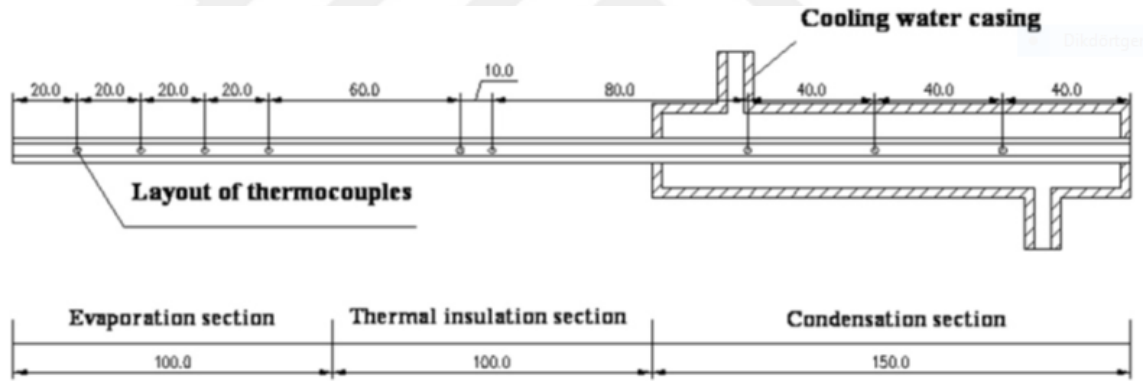
Liu *et al.* (2011), çalışma sıvıları olarak sulu nanoakışkanlar kullanarak silindirik mikro oluklu ısı borusunun ısı transfer performansını incelemek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Baz sıvı olarak damıtılmış su kullanılırken, ortalama çapı 40 nm ve 20 nm olan Cu, çapı 50 nm ve 20 nm olan CuO ve ortalama çapı 30 nm olan SiO olmak üzere beş çeşit nanoakışkan kullanılmıştır. Deneyler, sırasıyla 7.45 kPa, 12.38 kPa ve 19.97 kPa'lık üç sabit çalışma basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Nanopartikül tipi, nanopartikül büyüklüğü, nanopartikül kütle konsantrasyonu ve çalışma basıncının buharlaşma ve yoğuşma ısı transfer katsayıları, ısı borusunun maksimum ısı akısı ve toplam ısı direncine etkileri araştırılmış, karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

Şekil 3.22'de deneysel sistem şematik olarak gösterilmiştir. İçinde trapez mikro oluk olan bakır borudan yapılmıştır. Test bölümü yatay olarak yerleştirilmiştir. Isı borusunun uzunluğu, dış çapı ve et kalınlığı sırasıyla 350 mm, 8 mm ve 0.6 mm dir. Her bir trapez oluşunun yüksekliği, taban genişliği ve üst genişliği sırasıyla 0.14 mm, 0.16 mm ve 0.20 mm'dir. Kanalların toplam sayısı 70'tir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölümü ve yoğlaştırıcı bölümü sırasıyla 100 mm, 100 mm ve 150 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümü, çevresini çevreleyen bir elektrikli ısıtıcı tarafından ısıtılmıştır. Yoğlaştırıcı bölümü, sabit sıcaklıkta bir termal banyoda dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Değişen ısı akışları için çalışma basıncını sabit bir değerde tutmak için soğutma suyunun sıcaklığı ve akış hızı doğru bir şekilde kontrol edilmiştir.



Şekil 3.22. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Liu 2011)

Termokuplların test edilen ısı borusu üzerindeki dağılımı Şekil 3.23'de gösterilmiştir. Test bölümünün dış yüzeyine, buharlaştırıcı bölümünde dört, yoğunlaştırıcı bölümünde üç ve diğer ikisi adyabatik bölümde olmak üzere dokuz termokupl yerleştirilmiştir. Isı borusundaki çalışma basıncını ölçmek için adyabatik bölümün merkezine yerleştirilmiş bir basınç transdüseri kullanılmıştır. Ölçülen tüm termokupl verileri, bunları ortalama duvar sıcaklıklarına dönüştürmek için bir toplama cihazına girilmiştir. Adyabatik kesit merkezindeki termokupldan ölçülen sıcaklık, doymuş buhar sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama duvar sıcaklıkları, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama ısı transfer katsayısı HTC'sini hesaplamak için kullanılmıştır. Sabit tutulan çalışma basınçları, sırasıyla 40°C, 50°C ve 60°C'lik buhar doyma sıcaklıklarına karşılık gelen 7.45 kPa, 12.38 kPa ve 19.97 kPa değerlerindedir.



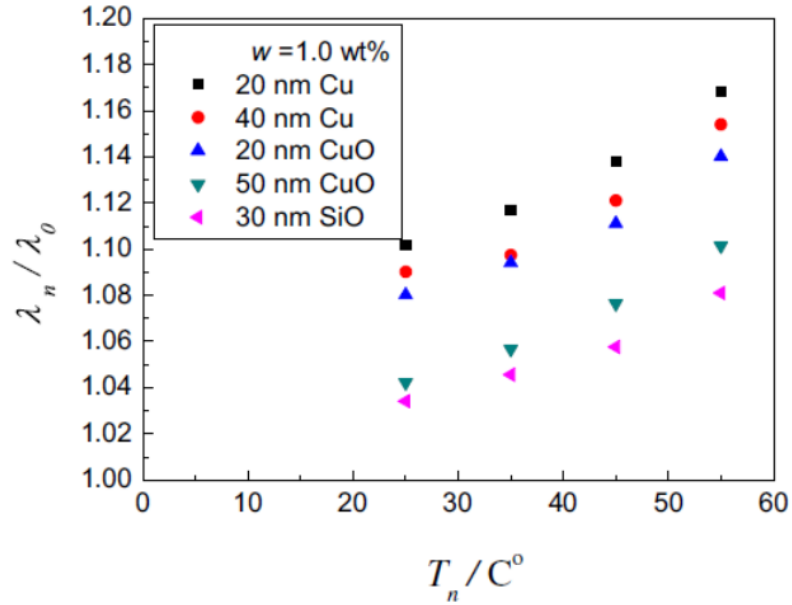
Şekil 3.23. Deney bölümü (birim nm) (Liu 2011)

Doldurma hacmi, tüm durumlar için buharlaştırıcı hacminin %50'sine (ısı borusunun toplam hacminin %14.85'i) sabitlenmiştir. Bu doldurma oranı, bu çalışmada maksimum ısı çıkarma kapasitesine ve minimum toplam ısı direncine karşılık gelmektedir.

Deneyden şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Test edilen beş çeşit nanoakışkan arasında Cu ve CuO nanoakışkanları ısı borusunun termal performansını artırmıştır. Bununla birlikte, SiO nanoakışkanı ısı borusunun

termal performansını bozmuştur. Bu durum, ısıtılmış yüzeyde nanopartiküllerin oluşturduğu kaplama katmanlarının farklı yüzey yapılarından kaynaklanabilir (Şekil 3.24).



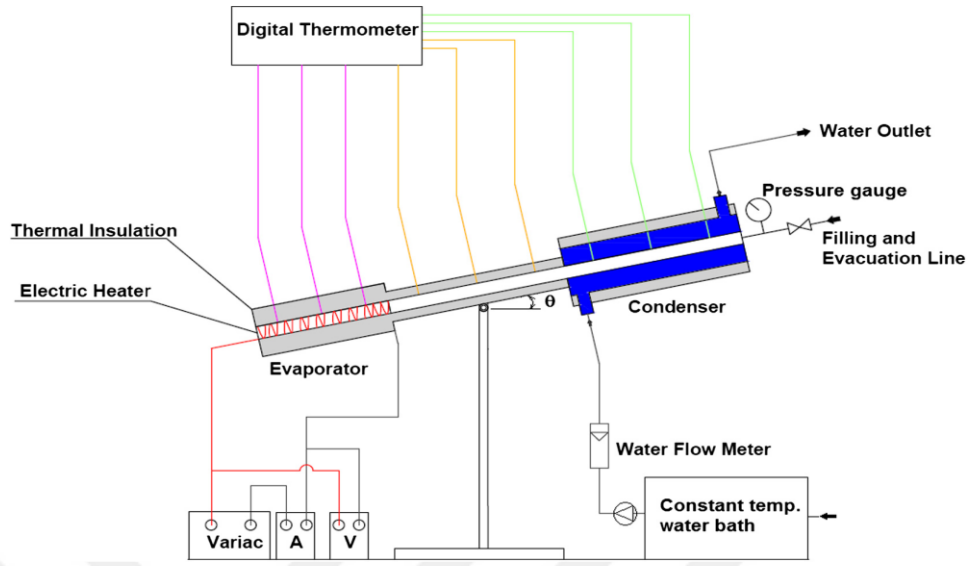
Şekil 3.24. Farklı sıcaklıklarda nanoakışkanların suya karşı iletkenlik oranları (Liu 2011)

- Cu ve CuO nanopartikülleri arasında, Cu nanopartikülleri CuO nanopartiküllerine göre daha iyi ısı transfer artırıcı etkiye sahiptir. Aynı nanopartikül malzemesi için, daha küçük nanopartiküller büyük nanopartiküllere göre daha iyi ısı transferi geliştirme özelliğine sahiptir.
- Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerinin ortalama ısı transfer katsayıları, kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'dan az olduğunda nanopartikül kütle konsantrasyonunun artmasıyla birlikte artar. Daha sonra, kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'ın üzerinde olduğunda yavaş yavaş azalır. Her çeşit Cu ve CuO nanoakışkanları için, en iyi ısı transferi artışına karşılık gelen aynı optimal kütle konsantrasyonu vardır ve bu optimal değer ağırlıkça %1.0'dır.
- Çalışma basıncı, ısı transfer katsayısı (HTC)'nin geliştirme oranı üzerinde belirgin bir etkiye sahipken, test edilen her türlü nanoakışkan için maksimum ısı akısı (MHF)'nin geliştirme oranı üzerinde az bir etkiye sahiptir.

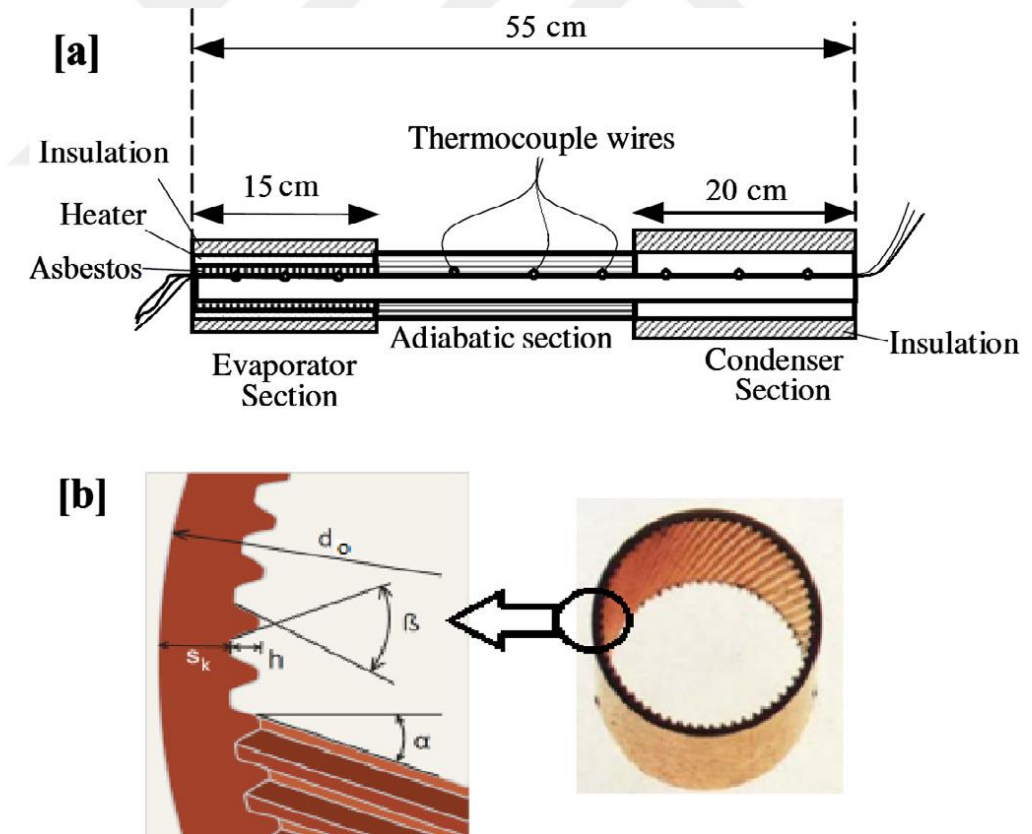
Aly *et al.* (2017), su bazlı alümina nanoakışkan kullanarak mikro oluklu bir ısı borusunun termal performansını araştırmışlardır. %3 hacim konsantrasyonlu Al_2O_3 nanoakışkanı ve damıtılmış su kullanarak eğim açısı (0° , 30° , 60° ve 90°), doldurma oranı (%20, 40, 60 ve 80) ve ısı girdisinin (45:65 W) ısı borusunun ısı transfer özellikleri üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.

Bu çalışmada, çalışma sıvıları olarak su ve su bazlı Al_2O_3 nanoakışkan kullanılmıştır. Kullanılan Al_2O_3 nanopartikülleri, ortalama partikül büyüklüğü 20 nm ve saflığı %99.97 olan ticari bir üründür. Nanoakışkan, herhangi bir yüzey aktifleştirici madde kullanılmadan gerekli miktarda nanopartiküllerin su içerisine dağıtılmasıyla hazırlanmıştır. İlk olarak karışım, yaklaşık 14 saat boyunca manyetik bir karıştırıcıya, daha sonra partiküllerin baz sıvı içinde tam olarak dağılmasını sağlamak için bir ultrasonik vibratör içine konulmuştur. Ultrason, 42 kHz çalışma frekansı altında 12 saat tutulmuştur. Hacim konsantrasyonu, nanopartikül konsantrasyonunu tanımlamaktadır ve nanopartiküllerin hacminin, baz sıvı hacmine oranıdır. Bu çalışmada kullanılan hacim oranı sabittir ve %3'e eşittir.

Isı transfer deneyleri için kullanılan deney düzeneğinin detayları şematik olarak Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Kullanılan ısı borusu test bölümü, toplam 550 mm uzunluğa ve 15.87 mm dış çapa sahip Wieland-cuprofin tüplerinin bir ürünü olan, Şekil 3.26 (a) 'da gösterildiği gibi dahili bir mikro sarmalla yivli bakır borudur. Borunun geometrik konfigürasyonları Şekil 3.26 (b) de gösterilmektedir. Isı borusu uzunluğu sırasıyla 200, 200, 150 mm olan buharlaştırıcı bölümü, yoğunlaştırıcı bölümü ve adyabatik bölüm olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır.



Şekil 3.25. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Aly *et al.* 2017)



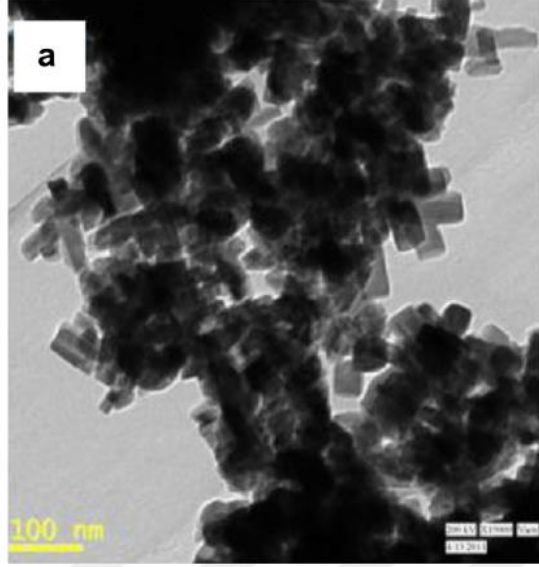
Şekil 3.26. a) Deney kesiti b) Mikro oluklu borunun geometrik kesiti (Aly *et al.* 2017)

Isı borusunun termal performansı, damıtılmış suya kıyasla nanoakışkan ile artmıştır. Damıtılmış su yerine nanoakışkan kullanıldığında, buharlaşma ve yoğuşma ısı transfer katsayılarında maksimum artış ve termal dirençteki maksimum azalma sırasıyla %30.4, %11.1 ve %18.2 olarak elde edilmiştir. Hem eğim açısı hem de doldurma oranı ısı borusunun termal performansını önemli ölçüde etkilemiştir. Buharlaşma ve yoğuşma ısı transfer katsayıları dolum oranında artışla artmış, ancak toplam ısı direnç dolum oranı arttıkça azalmıştır. Optimum eğim açısı 60° olarak bulunmuştur ve bu açıda damıtılmış su ve nanoakışkan kullanırken en iyi termal performansı göstermiştir.

3.1.2. Örgü fitil ısı boruları

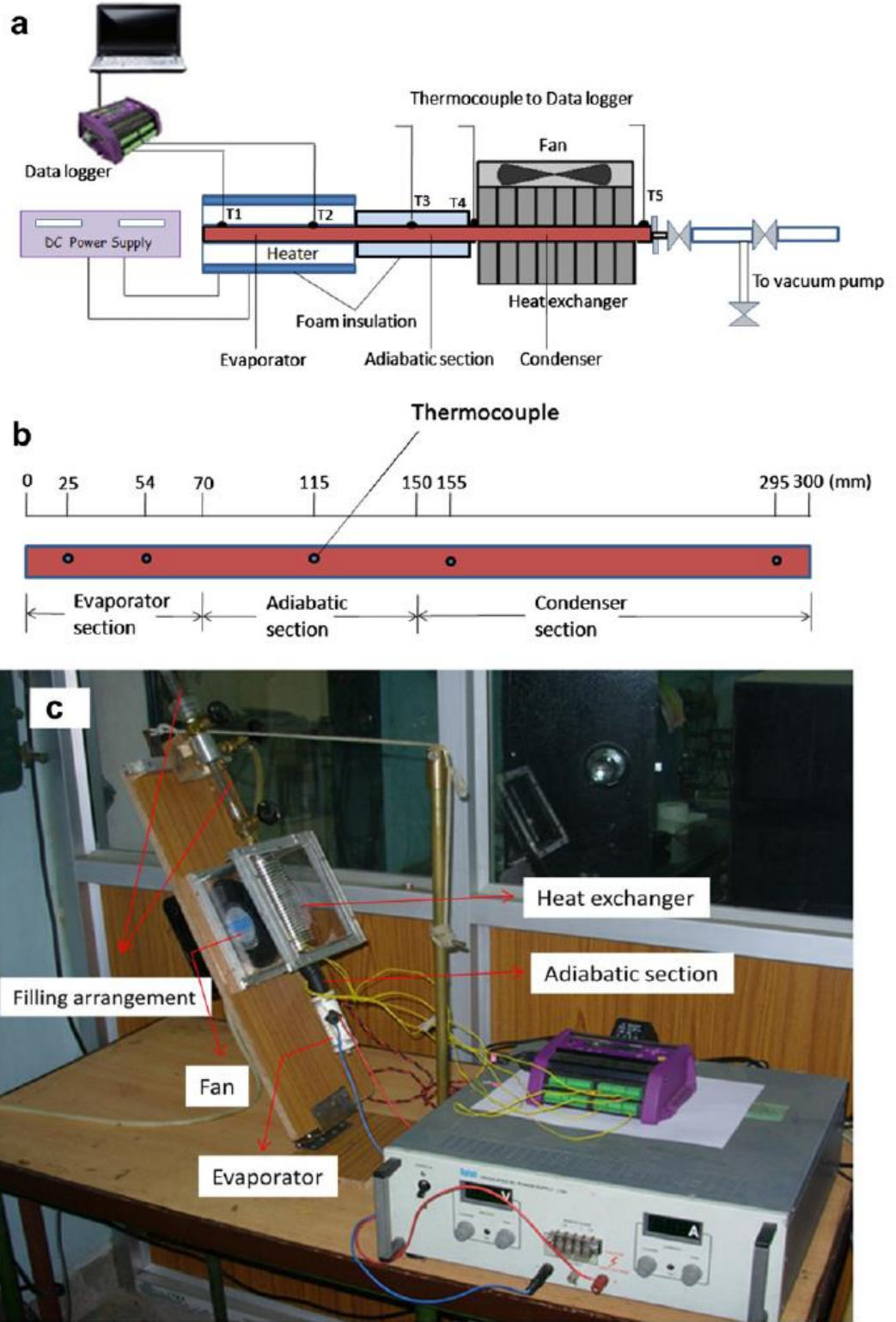
Örgü fitil ısı boruları farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden araştırmacılar örgü fitili ısı borularında nanoakışkanlar kullanarak, bazı önemli sonuçlar bulmaya çalışmışlardır.

Kole *et al.* (2013), çalışma sıvısı olarak Cu-su nanoakışkan kullanıldığında örgü fitil ısı borusunun ısı performansının nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan bakır nanopartiküller (yoğunluk: 8.94 g / cc) Bayan Sigmae Aldrich (ABD) tarafından tedarik edilmiştir ve kullanılan baz sıvı damıtılmış sudur. Cu nanopartiküllerinin boyutu ve morfolojisi transmisyon elektron mikroskopisi kullanılarak incelenmiştir. Cu nanopartiküllerinin TEM resmi, Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Nanopartiküllerin kuvvetli bir şekilde toplandığı ve nominal çapının 40 nm olduğu görülmektedir. Farklı konsantrasyonlarda Cu nanopartiküllerinin (yani ağırlıkça %0.0005, ağırlıkça %0.005, ağırlıkça %0.05 ve ağırlıkça %0.5) yüzey aktifleştirici madde kullanılmadan, ölçülen miktarda distile su içinde ilave edilerek nanoakışkan hazırlanır. Cu nanopartiküllerinin damıtılmış suda homojen bir şekilde dağılması, bir 200 W Ultrasonikatör (model UP200S, Bayan Hielscher GmbH) kullanılarak 10 saat boyunca yoğun ultrasonikleştirme ve daha sonra manyetik bir karıştırıcı kullanılarak 10 saat daha homojenleştirme yoluyla yapılır.



Şekil 3.27. Cu nanopartiküllerinin TEM resmi (Kole and Dey 2013)

Mevcut araştırma için kullanılan deney düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 3.28 (a)'da gösterilmektedir. Deney sistemi temel olarak çevresini üç kat paslanmaz çelik örgü fitil saran ısı borusu, bir dc güç kaynağı (Aplab, model: H3010), bir veri toplama sisteminden (DT 80 datalogger, Ms. DataTaker, ABD) oluşmaktadır. Burada kullanılan ısı borusu (uzunluk 300mm), dış çapı ve duvar kalınlığı sırasıyla 10 mm ve 0.6 mm olan bakır borudan yapılmıştır. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölüm ve yoğunlaştırıcı bölümü sırasıyla 70, 80 ve 150 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümü, çevresini çevreleyen bir tel sargılı elektrikli ısıtıcı ile ısıtılır. Isıtıcıya stabilize bir güç kaynağından sağlanan giriş gücü (Q_{in}) ısıtıcıdaki akım ve voltajın ölçülmesi ile hesaplanır. Alüminyum plakalı kanatlı bir ısı eşanjörü, yoğunlaştırıcı kısmına sıkıca monte edilmiştir. Yoğunlaştırıcı bölümü, yüksek hızlı bir fan kullanılıp hava üflenerek 24°C'de (oda sıcaklığı) sabit tutulur. Buharlaştırıcı ve adyabatik bölümlerden ısı kaybı, bölümlerin yüksek kaliteli köpük ile termal olarak yalıtılmasıyla en aza indirilir. Temas ısıl direncini azaltmak için, ısı borusunun tüm temas yüzeylerinde termal gres kullanılır. Isı borusunun çeşitli yerlerindeki sıcaklıkların ölçümü için termokuplların dağılımları Şekil 3.28 (b)'de gösterilmektedir. Toplam beş K tipi termokupl (M / S, OMEGA Engineering, Inc.) ısı borusunun dış yüzeyinde tanımlanan yerlere lehimlenir. İki termokupl (T1, T2) buharlaştırıcı kısmına, bir termokupl adyabatik bölümün orta noktasına ve geri kalan iki termokupl (T4, T5) yoğunlaştırıcı kısmına sabitlenmiştir.



Şekil 3.28. (a) Deney aparatının şematik diyagramı. (b) Termokuplların yerleşim şematik diyagramı. (c) Deney düzeneğinin fotoğrafı (Kole and Dey 2013)

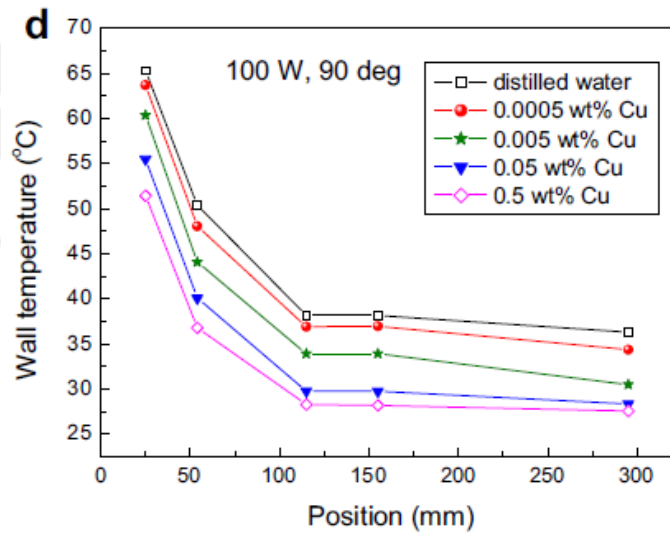
Isı borusunun çeşitli eğimleri ile deneyler yapmak için, ısı borusu eğim açısını değiştirme imkanına sahip bir platform üzerine monte edilmiştir. Deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.28 (c) 'de gösterilmektedir.

Testler, çalışma sıvıları olarak su ve farklı nanoakışkanlar içeren ısı boruları ile yatay olarak üç farklı açıda (yani 45° , 60° ve 90°) eğimli olarak yapılır. Optimum olduğu bulunan şarj hacmi, buharlaştırıcının toplam hacminin %40'ı kadardır. Isı borusu, ölçümler gerçekleştirilmeden önce sızdırmaz hale getirilir ve birkaç saat boyunca dikey konumda tutulur. Isıtıcıyı etkinleştirmeden önce, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı ucundaki fan açılır ve deneyin sonuna kadar çalışır. Buharlaştırıcı bölümündeki giriş gücü (Q_{in}) daha sonra bir adımda 10 W'lık artışla 10 W'dan 100 W'a yükseltilir. Tüm termokuplların sıcaklıkları, kararlı durum koşulu olduğunda, her giriş gücünde en az birkaç dakika boyunca kaydedilir. Buharlaştırıcı bölümünün (T_e) ve yoğunlaştırıcı bölümünün (T_c) ortalama sıcaklıkları hesaplandıktan sonra buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümü arasındaki ısı direnç hesaplanır.

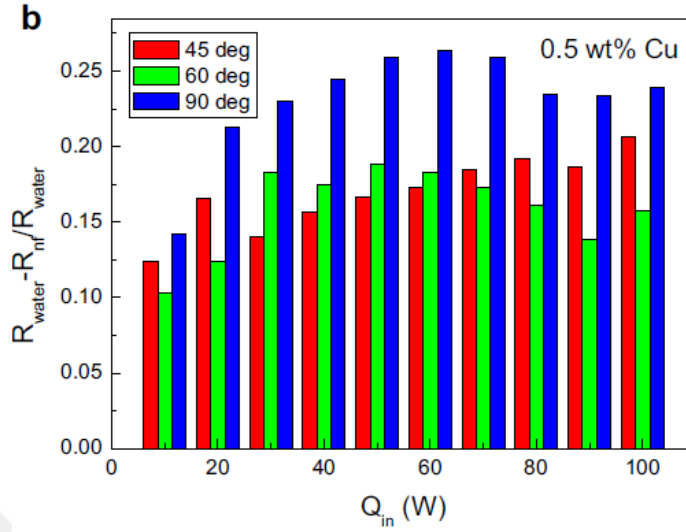
Isıl iletkenlik, oda sıcaklığında ağırlıkça %0,5 bakır nanopartikül yüklemesi ile %15'lik bir artış göstermiştir. Paslanmaz çelik örgü fitili içeren ısı borusunun ısı performansı yukarıdaki nanoakışkanlar ile farklı eğimlerde (45° , 60° ve 90°) araştırılmış ve su kullanan ısı borusu ile karşılaştırılmıştır. Farklı ısı güç girişlerinde ısı borularının duvar sıcaklığı buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya doğru düşer. Nanoakışkanlı ısı borularının ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklıkları, su kullanan ısı borularınınkinden düşüktür. 100 W giriş gücünde ısı borusunun duvar sıcaklığı T_1 , su kullanıldığında 65°C iken %0,5 konsantrasyonlu nanoakışkanla 55°C ye ve 90° derece eğim açısında buharlaştırıcının ortalama duvar sıcaklığı 14°C düşmektedir (Şekil 3.29). Bu durum göstermektedir ki ısı borusunun ısı performansı nanoakışkan kullanarak artmaktadır. Aynı zamanda, nanoakışkanlardaki nanopartiküllerin hacim fraksiyonunun, buharlaştırıcı bölümündeki duvar sıcaklığının düşürülmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıktır.

Hem su hem de nanoakışkanlı ısı borularının ısı dirençleri düşük ısı giriş güçlerinde yüksektir, ancak ısı yükü arttıkça hızla en aza indirilir. Buharlaştırıcı giriş gücünün bir

fonksiyonu olarak ısı direncin bu özelliği, ısı borusunun tipik bir özelliğidir. Düşük ısı yükleri için gözlenen yüksek ısı direnç, buharlaştırıcı bölümünde katı bir sıvı filmin oluşumundan kaynaklanmaktadır. Öte yandan, yüksek ısı yüklerinde daha önemli olan nükleas kaynatma, ısı direncinde hızlı bir düşüşe neden olmaktadır. Toplam ısı direnç hem nanoakışkanda artan Cu konsantrasyonu ile hem de giriş gücünde artış ile azaldığı belirtilebilir. Dikey olarak konumlandırılmış ısı borularının eğimli konumlara göre üstün performans sağladığı da görülmektedir. Şekil 3.30, damıtılmış suda ağırlıkça %0,5 Cu nanopartiküllü ısı borusunun performansını farklı eğimlerde gösterir ve 90 derecelik eğimde buharlaştırıcı yoğunlaştırıcı bölümünde ısı direncin %27 oranında azaldığını doğrular.

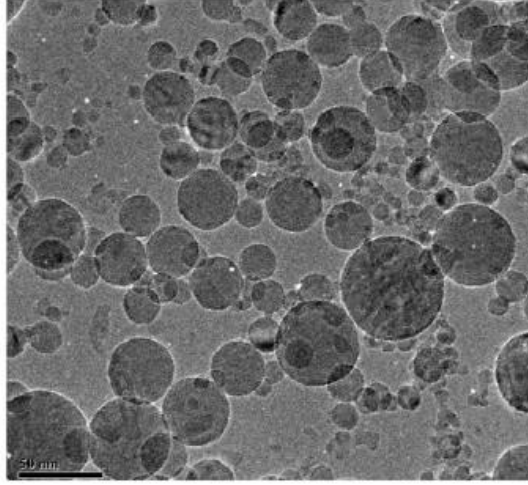


Şekil 3.29. 100 W giriş gücünde nanoakışkanlı ve sulu ısı borusunun duvar sıcaklıkları dağılımı (Kole and Dey 2013)



Şekil 3.30. %0.5 Cu nanoakışkanlı ısı borusunun farklı açılardaki ısı performansını (Kole and Dey 2013)

Do *et al.* (2010a) nanoakışkanların ısı borularının ısı performansına etkileri %1,0 ve %3,0 hacim payında su bazlı Al_2O_3 nanoakışkan kullanılarak dairesel elek örgü ısı borularıyla deneysel olarak incelemişlerdir. Bu deneylerde kullanılan nanopartiküller, Nanotechnologies Inc tarafından üretilen ve tedarik edilen Al_2O_3 nanopartikülleridir. Herhangi bir yüzey aktifleştirici madde kullanılmadan %1.0 ve %3.0 hacim oranında su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanları üretmek için iki aşamalı yöntem kullanılmıştır. Homojen olarak dağılmış ve kararlı şekilde süspansiyon haline getirilmiş nanoakışkanları elde etmek için, nanoakışkanlar 30-40 kHz ses frekanslarında ultrasonik bir homojenleştiricide salınmıştır. Al_2O_3 nanopartikülleri ayrıca bir transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile karakterize edilmiştir ve Şekil 3.31 'deki bir TEM mikrografı, Al_2O_3 nanopartiküllerinin çoğunun 30 ± 5 nm'den daha küçük olduğunu ve az aglomere edilmiş Al_2O_3 nanopartiküllerinin olduğunu gösterir. Şekil 3.32, nanopartiküller ve su arasındaki ayırma çizgisini göstermektedir ve 20 gün içinde meydana gelmemektedir. Bununla birlikte, 20 gün sonra, su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanlarında ayırma çizgisi gözlenmiştir.



Şekil 3.31. DI suda dağılmış Al_2O_3 nanopartiküllerinin TEM mikrografisi (Do *et al.* 2010a)



Şekil 3.32. Sedimentasyon Testi (Do *et al.* 2010a)

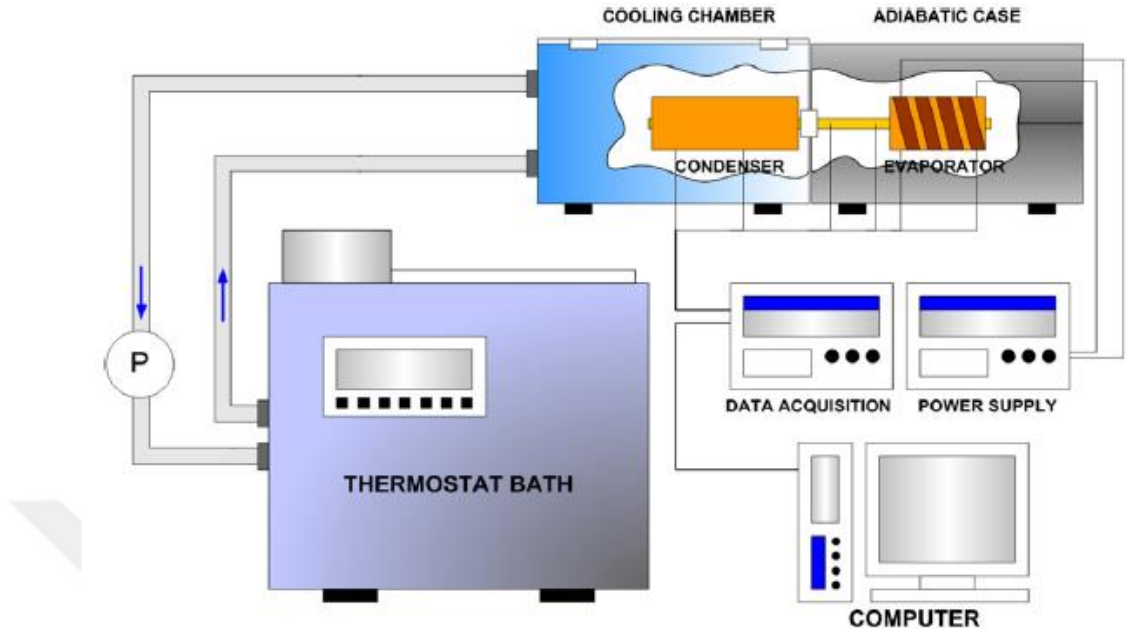
Su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanının etkili ısı iletkenliği yarı kararlı durum yöntemi ile ölçülmüştür. Genel olarak, sıvıların ısı iletkenliklerinin ölçülmesi geçici sıcak tel yöntemi ve yarı kararlı durum yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda, geçici sıcak tel yöntemi nanoakışkanların ısı iletkenliğini ölçmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geçici sıcak tel yöntemi ile elde edilen verilerden ısı iletkenliği hesaplamak için kullanılan doğrusal bölgeyi belirlemek zordur. Bu nedenle, bu çalışmada, ısı iletkenliği ölçmek için yarı-kararlı durum yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.32'de gösterildiği gibi, bu yöntem aşağıdaki gibi açıklanabilir: iki paralel plaka arasındaki boşluk sıvı ile doldurulur ve daha sonra üst plakalara ısı uygulanır. Isı, soğutma

sıvısı kullanılarak soğutulan üst plakadan alt plakaya tek boyutlu olarak iletilirse, sıvının ısı iletkenliği aşağıdaki gibi kolayca ölçülebilir:

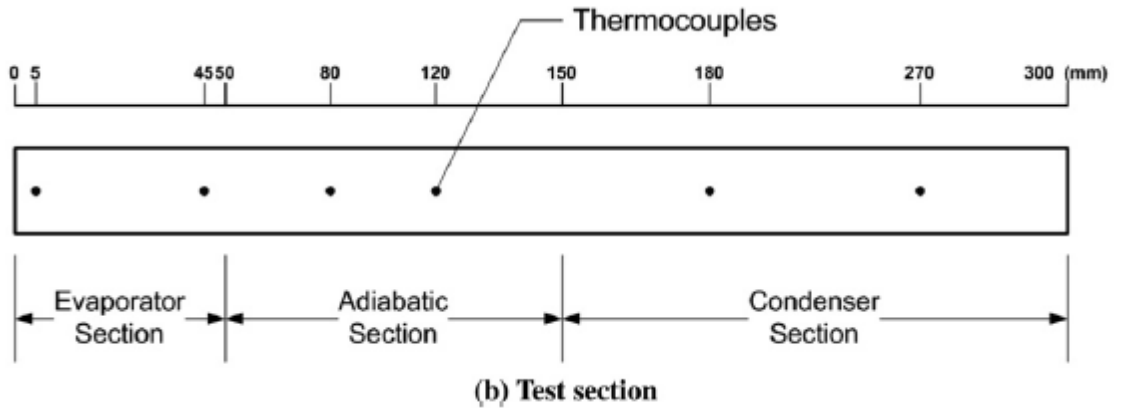
$$k = \frac{q''L}{\Delta T} \quad (3.8)$$

burada k, L, q'' ve ΔT ısı iletkenlik, üst plaka ve alt plaka arasındaki mesafe, ısı akısı ve üst plaka ile alt plaka arasındaki sıcaklık farkıdır.

Şekil 3.33 'de gösterildiği gibi, deney sistemi soğutma sistemi, test bölümü, güç kaynağı, veri toplama sisteminden oluşur. Bu deneylerde kullanılan ısı borularının dış çapı, iç çapı ve uzunluğu sırasıyla 4, 3 ve 300 mm'dir. Bakırdan yapılan her ısı borusu, tel çapı 50 lm ve metre başına 7874 iplikçik olmak üzere iki kat tel örgü içerir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölümü ve yoğunlaştırıcı bölümü sırasıyla 50, 100 ve 150 mm'dir. Buharlaştırıcı bölümünde, bir elektrikli ısıtıcı, ısı borusuna bağlı üst ve alt bakır ısıtma bloklarına eşit ısı akısı sağlar. Temas termal direncini azaltmak için, ısı borusunun tüm temas yüzeylerinde termal gres kullanılmıştır. Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü soğutma odasına yatay olarak yerleştirilmiştir. Soğutma sıvısı, ısının yoğunlaştırıcı bölümünden ve daha sonra sabit sıcaklıklı bir banyoya aktarıldığı soğutma odasında sirküle edilir. Sabit sıcaklık banyosu gereken sıcaklığa ayarlanır ve testlerle $9 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ sabit sıcaklıkta tutulur. Buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler ısı kaybını en aza indirmek için cam elyaf yünü (0.075 W / mK) ile yalıtılmıştır. Altı J tipi termokupl test bölümünün dış yüzeyine lehimlenmiştir. Termokuplların dağılımı Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



Şekil 3.33. Deney aparatı (Do *et al.* 2010a)



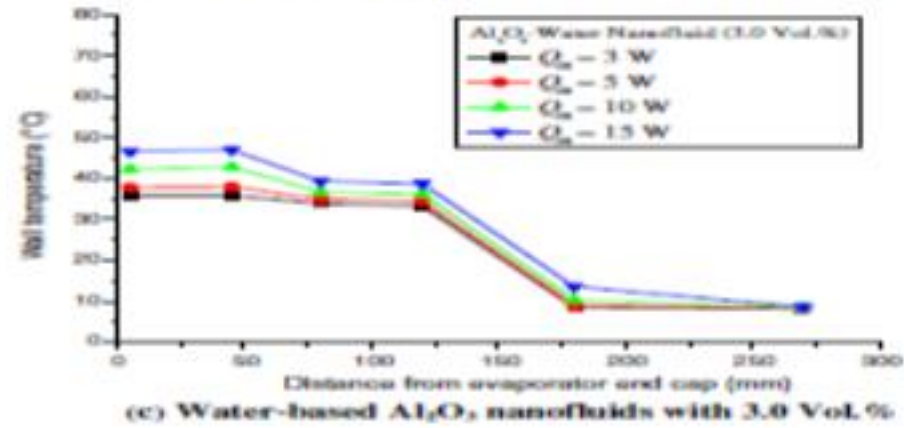
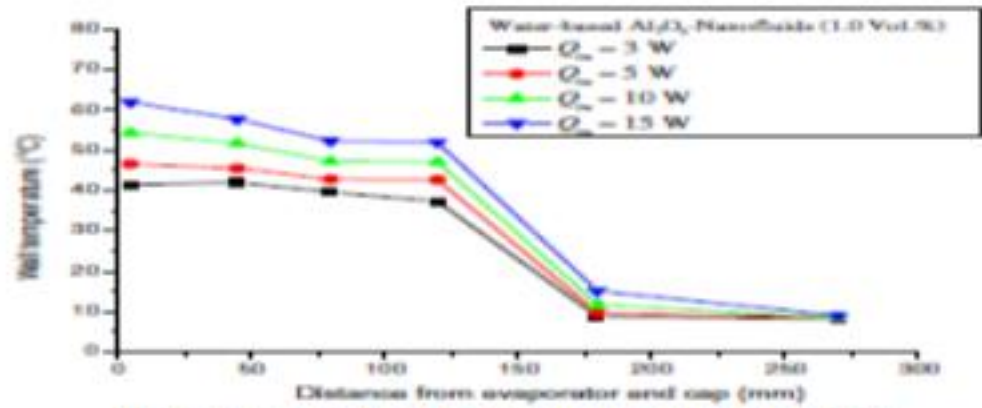
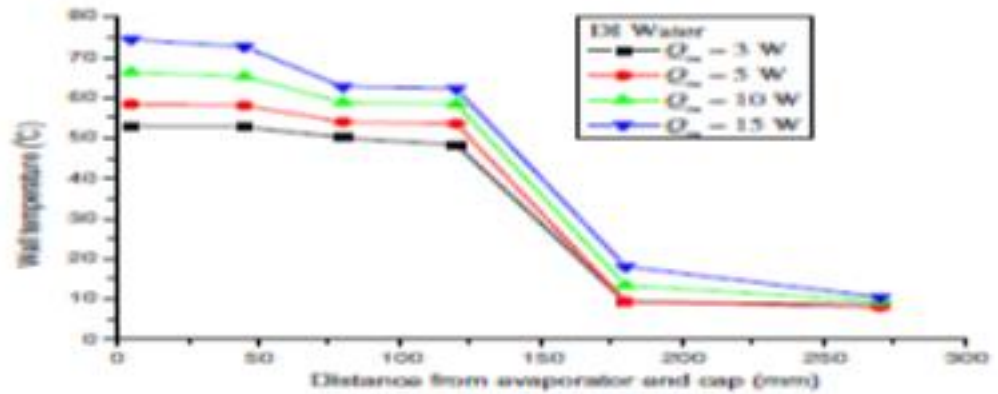
Şekil 3.34. Termokuplların dağılımı (Do *et al.* 2010a)

Deneyle ısı borusu ile yatay doğrultuda yapılmıştır. Buharlaştırıcıya ısı girişi 2-5W'lık adımlarla artırılırken, soğutma odasının sıcaklığı sabit tutulmuştur. Isı borusu boyunca sıcaklık dağılımı ölçülerek ve duvar sıcaklığı varyasyonunun 2 dakika boyunca 0,1°C'den düşük olduğunu gösteren kararlı durum koşulunda kaydedilmiştir. Sıcaklık ölçüm sonuçlarına dayanarak, buharlaştırıcı bölümü ile adyabatik bölüm arasındaki ısı direnci dikkate alınarak ve şu şekilde tanımlanmıştır:

$$R_{e-a} = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_a}{Q_{in}} \quad (3.9)$$

T_e ; T_a ve Q_{in} , sırasıyla buharlaştırıcı bölümünde ve adyabatik bölümde ortalama duvar sıcaklıkları ve giriş gücüdür.

Şekil 3.35, sırasıyla DI suyu ve su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanları kullanan ısı boruları için duvar sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Isı borularının duvar sıcaklıkları, test bölümü boyunca buharlaştırıcı bölümünden yoğunlaştırıcı bölümüne doğru düşer ve giriş gücü ile artar. Şekil 3.35 (b) ve (c) 'de gösterildiği gibi, %1.0 ve %3.0 konsantrasyonlu su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanları kullanan ısı borusu için buharlaştırıcı bölümündeki duvar sıcaklıkları, sabit giriş gücü altında DI suyu için olanlardan daha düşüktür. Al_2O_3 nanopartiküllerinin hacim fraksiyonu arttıkça buharlaştırıcıdaki ortalama duvar sıcaklığı, Şekil 3.35 (c) 'de gösterildiği gibi DI su ısı borusu için olana kıyasla yaklaşık $26.8^\circ C$ azalır. Bu deneysel sonuçlar, su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanının bir çalışma sıvısı olarak kullanımının termal performansı arttırdığını göstermektedir.



Şekil 3.35. (a) DI su, (b) %1.0 konsantrasyonlu Al_2O_3 nanoakışkanı ve (c) %3.0 konsantrasyonlu Al_2O_3 nanoakışkanları için sıcaklık dağılımları (Do *et al.* 2010a)

Nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonu buharlaştırıcı bölümündeki duvar sıcaklığının azalmasında önemli bir etkiye sahiptir.

Hem sıvı hem de nanoakışkan kullanan ısı borularındaki ısı direnç, düşük ısı yüklerinde buharlaştırıcı bölümünde yüksektir. Ancak uygulanan ısı yükü arttıkça bu ısı dirençler hızla minimum değerine düşer. Su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanları kullanan ısı borularının ısı direnci, DI suyu kullanan ısı borusu ile karşılaştırıldığında azalır. %3 konsantrasyonlu Al_2O_3 nanoakışkanlı ısı borusunun ısı performansı DI su bazlı ısı borusununkine kıyasla maksimum %65 artmıştır.

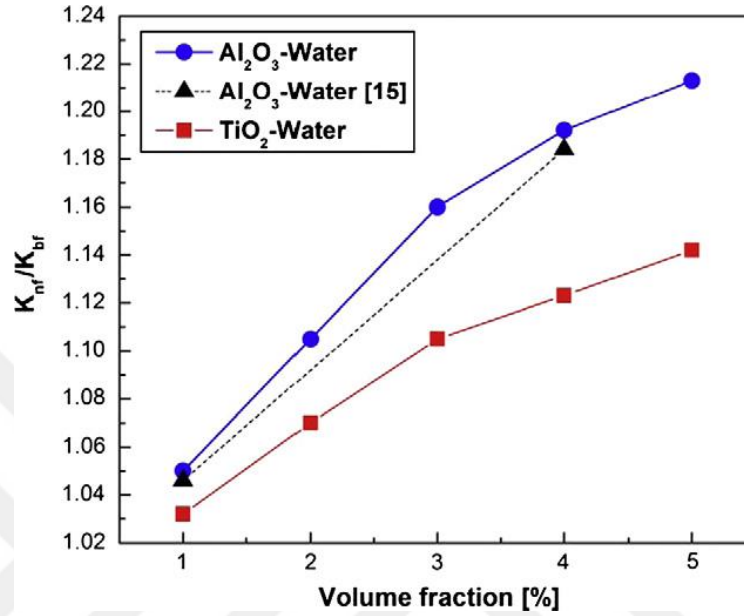
Isı borusunun ısı performansının iyileştirilmesi ile ilgili birincil mekanizma buharlaştırıcı bölümünde nanopartiküller tarafından oluşturulan kaplama tabakasıdır çünkü bu tabaka sadece yüksek ısı transfer performansı ile buharlaştırıcı yüzeyini genişletmez, aynı zamanda yüzey ıslanabilirliğini ve kılcal fitil performansını iyileştirir.

Putra *et al.* (2012), örgü fitil ısı borularının ısı performansını en iyi şekilde artırabilecek nanoakışkanların konsantrasyonlarını ve türlerini belirlemek ve çalışma akışkanı olarak nanoakışkan kullandıktan sonra kaplamaların örgü fitil yapısı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum oksit (TiO_2) ve çinko oksit (ZnO) gibi çeşitli nano partiküller ve ana sıvı olarak damıtılmış su (H_2O) ve etilen glikol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$) kullanılmıştır. Nanoakışkanı hazırlamak için iki adımlı metod kullanılmıştır. İlk olarak, ticari nanopartiküller, kararlı ve homojen bir nanoakışkan çözeltisi elde etmek için 60 dakika ultrasonikleştirilerek baz sıvı içerisine dağıtılmıştır. Daha sonra, nano-akışkanlar 25°C 'lik sabit bir sıcaklıkta bir termostatik sirkülasyon banyosuna yerleştirilmiş ve nanoakışkanların ısı iletkenliği bir KD2 Decagon ısı analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Bu deneyde nanopartikül hacim fraksiyonunun etkilerini değerlendirmek için nano partikülün hacim fraksiyonuna göre konsantrasyonlar aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır.

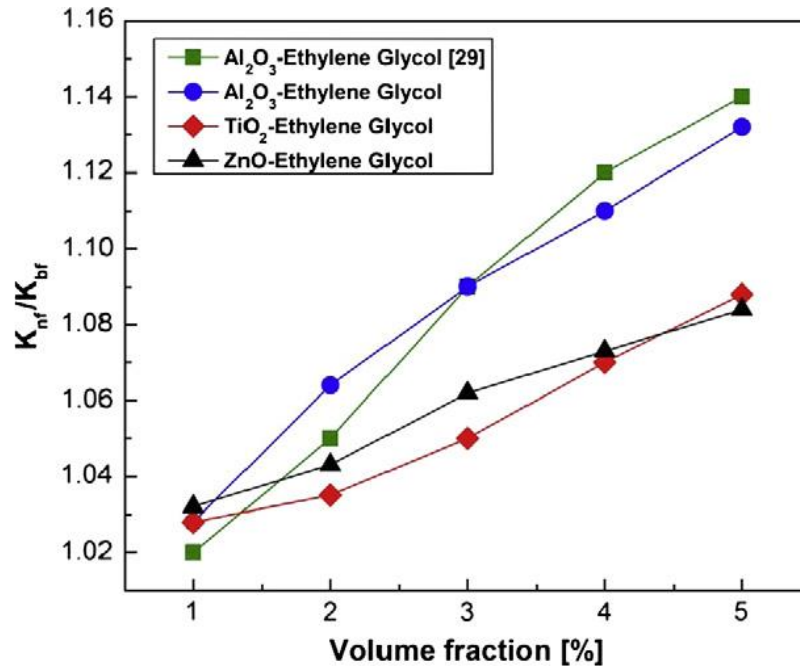
$$\% \text{ volume fraction} = \frac{\frac{W_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{W_{np}}{\rho_{np}} + \frac{W_{bf}}{\rho_{bf}}} \quad (3.10)$$

W_{np} , Q_{np} , W_{bf} , Q_{bf} sırasıyla nanopartiküllerin ağırlığı, yoğunluğu ve baz sıvının ağırlığı ve baz sıvının yoğunluğudur. Isı iletkenlik ölçümlerinin sonuçları, nanoakışkanın baz sıvıya

ısı iletkenlik oranı k_{nf} / k_{bf} olarak kaydedilmiştir. Sonuçlar aşağıdaki şekillerde yer almaktadır.

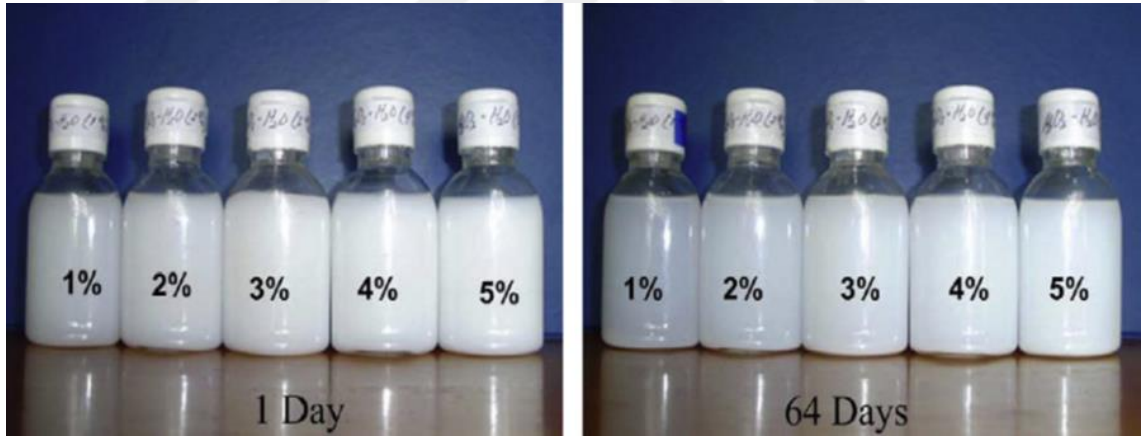


Şekil 3.36. Al_2O_3 – su ve TiO_2 – su nanoakışkanlarının ısı iletkenlikleri (Putra *et al.* 2012)



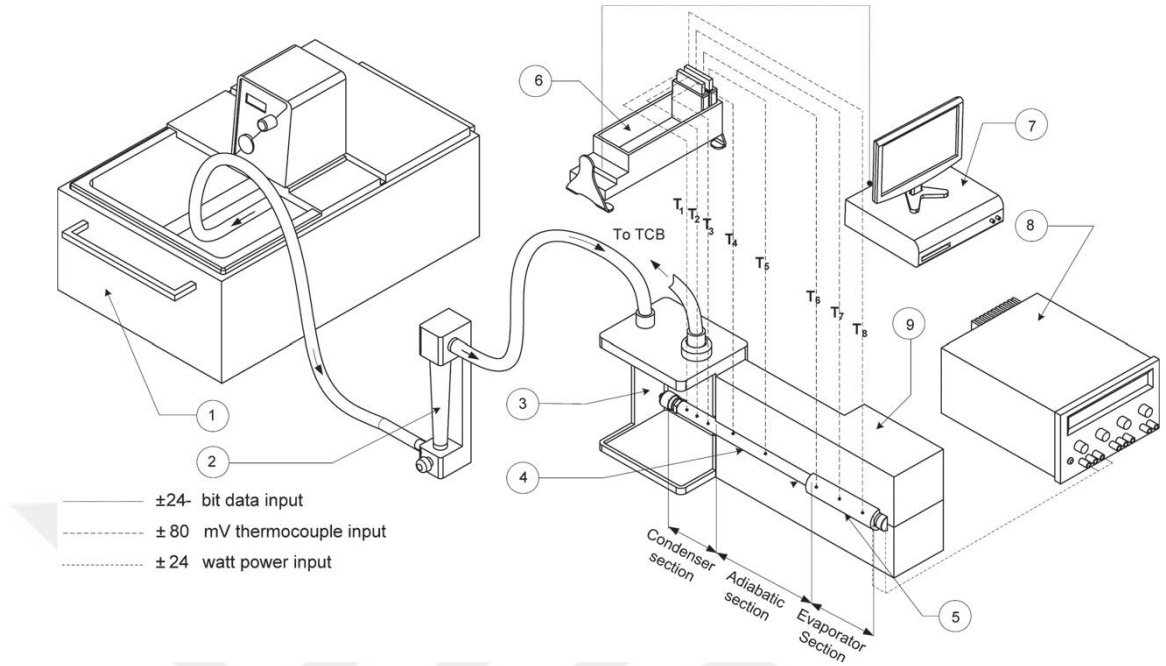
Şekil 3.37. Al_2O_3 -etilen glikol, TiO_2 -etilen glikol ve ZnO – etilen glikol nanoakışkanlarının ısı iletkenlikleri (Putra *et al.* 2012)

Deiyonize sudaki Al_2O_3 ve TiO_2 nanopartiküllerinin farklı hacim fraksiyonları (0.01-0.05) ile ısı iletkenliğı ölçölmüş ve deiyonize sudaki Al_2O_3 ve TiO_2 'nin ısı iletkenliklerinin, partiköllerin hacim fraksiyonu ile arttığı gösterilmiştir (Şekil 3.36). Şekil 3.37, farklı hacim fraksiyonlarına (0.01-0.05) sahip etilen glikol bazlı akışkanlarda Al_2O_3 , TiO_2 ve ZnO nanopartiköllerinin ısı iletkenliklerini göstermektedir. Şekil 3.37, Al_2O_3 nanoakışkanı için ısı iletkenliğinin, %5'lik bir hacim oranı ile en fazla yaklaşık %13 oranında arttığını göstermektedir. Su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanları için dispersiyon özellikleri, Şekil 3.38'de gösterilen sedimantasyon testleri ile incelenmiştir. 64 gün içinde sedimantasyon gözlenmemiştir ancak ayırma çizgisi, su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanlarda 64 gün sonra gözlenmiştir. Bu deneydeki diğer nanoakışkan tipleri için, bir süre sonra sedimantasyon meydana gelmiştir: Al_2O_3 -etilen glikol karıştırıldıktan 67 gün sonra, TiO_2 -su 53 gün, TiO_2 -etilen glikol 55 gün ve ZnO nanoakışkanının sedimantasyonu 32 gün sürmüştür.



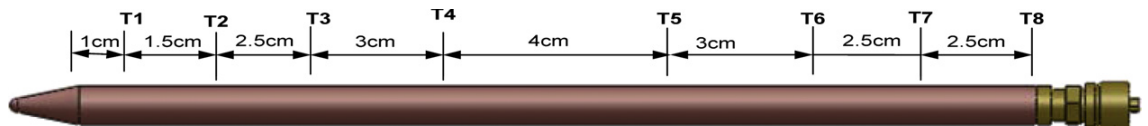
Şekil 3.38. Al_2O_3 nanoakışkanının sedimantasyon testleri (Putra *et al.* 2012)

Deneyde kullanılan ısı boruları, dış çapı 8 mm, iç çapı 7.44 mm ve uzunluğu 200 mm olan düz bakır borulardan imal edilmiştir. Isı borusunun fitili örgü ağından yapılmıştır.



Şekil 3.39. Deney düzeneği (Putra *et al.* 2012)

DC güç kaynağına bağlı 60 mm uzunluğunda, esnek elektrikli ısıtıcı buharlaştırıcıya takılmıştır. Buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler cam yünü ile sarılmış ve ısı kaybını en aza indirmek için poliüretan kullanılarak yalıtılmıştır. Isı borusunun yoğunlaştırıcı alanı yatay olarak soğutma odasına daldırılmıştır. Soğutma sıvısı olarak kullanılan su, yoğunlaştırıcı bölümünden ısıyı uzaklaştırmak için soğutma odasından sirküle edilir. Termostatik sirkülasyon banyosu (TCB), soğutma suyunu yoğunlaştırıcıda 25°C'de tutmak ve korumak için kullanılmıştır. Isı borularının yüzey sıcaklıkları sekiz K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Buharlaştırıcının yüzeyine üç termokupl, adyabatik bölümün yüzeyine iki, termokupl geri kalanı kondenser bölümünün yüzeyine yerleştirilmiştir. Her bir termokuplun ısı borusu üzerindeki konumu Şekil 3.40'ta görülebilir.



Şekil 3.40. Termokupl pozisyonları (Putra *et al.* 2012)

Isı yükündeki değişimler, çalışma sıvısı su ve nanoakışkan Al_2O_3 – su olduğunda da uygulanmıştır. İyi yalıtımdan dolayı ısı borusundan hiç ısı kaybı olmadığı varsayılarak, ısı yükü aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$Q=VI \quad (3.11)$$

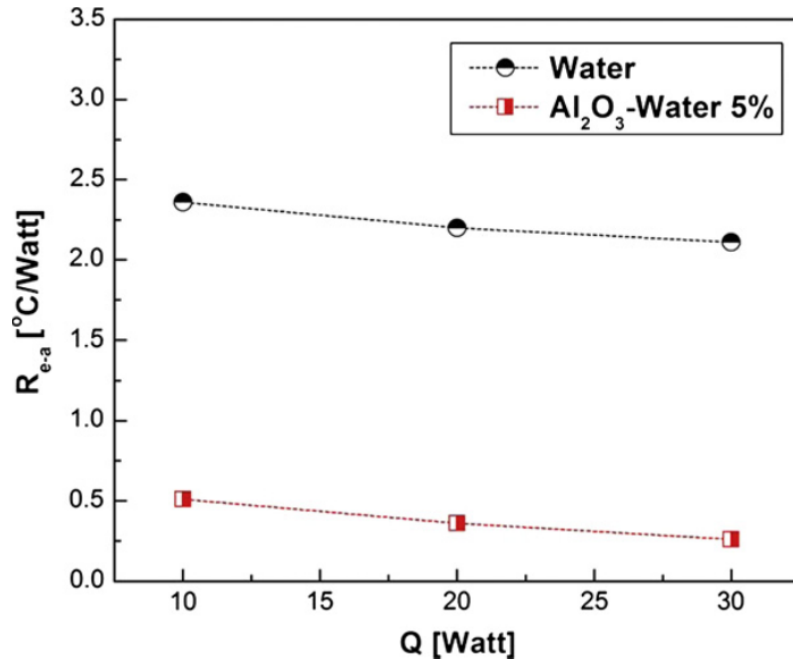
V: Giriş voltajı

I: Giriş akımı

Isı borusunun ısıl direnci (R), sıcaklık farkının belirli bir ısı yüküne oranı olarak tanımlanan ısıl performansının bir ölçüsüdür:

$$R = \frac{T_e - T_a}{Q} \quad (3.12)$$

T_e ve T_a buharlaştırıcı ve adyabatik bölgelerdeki duvar sıcaklığıdır.



Şekil 3.41. Su ve su bazlı %5 hacimli Al_2O_3 nanoakışkanın, farklı güç girişlerinde ısıl direnci (Putra *et al.* 2012)

Şekil 3.41, örgü fitil ısı borusunun farklı ısı yükünde su ve %5 hacim konsantrasyonunda Al_2O_3 -su nanoakışkan ile ısı direncini göstermektedir. Görüldüğü gibi ısı borusunun ısı direnci ısı yükü ile azalmıştır. %5 Al_2O_3 – su ile doldurulmuş ısı borusunun, çalışma sıvısı olarak su kullanmaktan daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

Ayrıca, Al_2O_3 – etilen glikol, TiO_2 -su, TiO_2 -etilen glikol ve ZnO -etilen glikol nanoakışkanlar kullanıldığında ısı dağılımı da iyileşmiştir.

Buharlaştırıcı bölümün ısı transfer katsayısı h_e aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

$$h_e = \frac{q_e}{\Delta T} \quad (3.13)$$

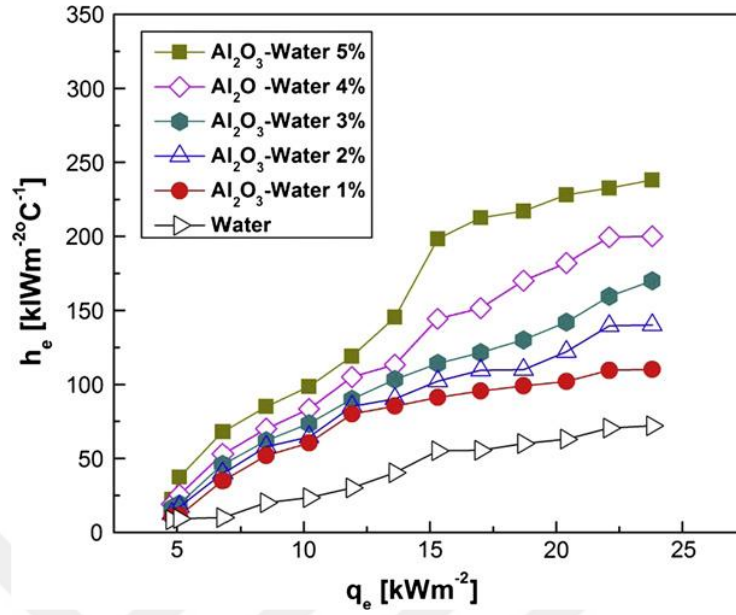
q_e : buharlaştırıcı bölümündeki ısı akısıdır ve aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$q_e = Q / (2\pi r_0 L_e) \quad (3.14)$$

Burada; Q ısı yükü , r_0 dış çap, L_e buharlaştırıcı uzunluğudur.

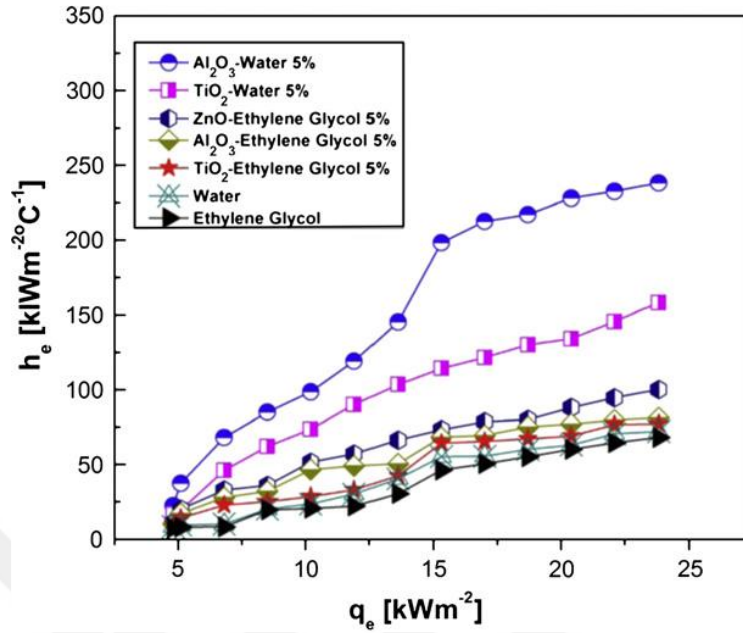
ΔT , ortalama iç duvar sıcaklığı ile buhar doygunluk sıcaklığı arasındaki fark olan ortalama duvar kızdırıcısıdır.

Şekil 3.42, deiyonize su ve değişen hacim konsantrasyonuna sahip (%1-5) Al_2O_3 -su nanoakışkanı kullanarak ısı borusunun buharlaşma ısı transfer katsayısını gösterir. Şekil 3.42'de gösterildiği gibi, nanoakışkanın buharlaşma ısı transfer katsayıları baz sıvınıninkinden çok daha yüksektir. %5 hacim konsantrasyonuna sahip Al_2O_3 – su nanoakışkanı en yüksek ısı transfer katsayısına sahiptir. Başlangıçta, düşük ısı akışlarında hızla arttığı ve daha sonra orta ve yüksek ısı akışlarında yavaş yavaş azaldığı görülmektedir. Ayrıca, buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı, hacim konsantrasyonunun artmasıyla artar ve hacim artışı %0 ila %5 arasında değiştiğinde bu artış oldukça açıktır.



Şekil 3.42. Farklı konsantrasyonlarda su bazlı Al₂O₃ nanoakışkanı ile buharlaştırıcının ısı transfer katsayıları (Putra *et al.* 2012)

Şekil 3.43, nanoakışkanlar ve baz sıvı ile ısı borusunun buharlaşma ısı transfer katsayısını göstermektedir. Eğriden, ısı transfer katsayısı artışının Şekil 3.37'de yer alan çalışma akışkanının ısı iletkenlik artışına benzer olduğu görülebilir. Bu, ısı borusundaki çalışma akışkanının etkili ısı iletkenlik artışının ısı borusunun ısı transfer katsayısı ile ilişkili olduğunu gösterir.



Şekil 3.43. Farklı nanoakışkanlar ile buharlaştırıcının ısı transfer katsayıları (Putra *et al.* 2012)

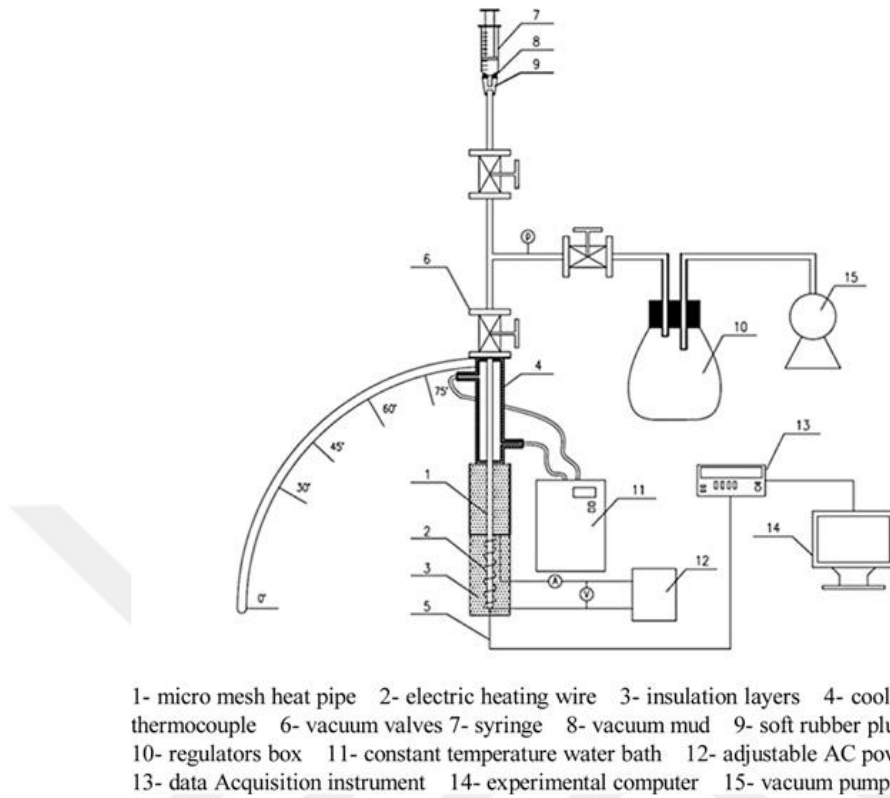
Wang *et al.* (2012), çalışma sıvısı olarak su bazlı CuO nanoakışkan kullanarak eğimli bir minyatür örgü fitil ısı borusunun ısı performansını araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, çalışma sıvısı olarak su bazlı CuO nanoakışkan kullanılmıştır. CuO nanopartikülleri, gaz yoğunlaştırma yöntemi ile yapılan ticari ürünlerdir. Üretici tarafından rapor edilen ortalama çap 50 nm dir. Nanoakışkan, CuO nanopartiküllerinin deiyonize suya doğrudan dağıtılmasıyla hazırlanmıştır. Daha sonra bir ultrasonik su banyosunda yaklaşık 10 saat salınmıştır. Nanopartiküllerin baz sıvıya kütle oranı olan w kütle konsantrasyonu, nanopartikül konsantrasyonunu tanımlamak için kullanılmıştır. Baz sıvıya herhangi bir sürfaktan eklenmemiştir. Bu çalışmada, nanoakışkanın kütle konsantrasyonu ağırlıkça %0,5 ile ağırlıkça %2,0 arasında değişmiştir (karşılık gelen hacim oranı %0,078 ile %0,31 arasında değişmiştir) ve testlerin çoğu ağırlıkça %1,0 kütle konsantrasyonunda gerçekleştirilmiştir.

Nanoakışkanın viskozitesi, baz sıvı ile hemen hemen aynı olarak ölçülmüştür. Nanoakışkanın yüzey gerilimi yaklaşık %15 azalmıştır ve nanopartikül konsantrasyonu ile hemen hemen hiçbir ilgisinin olmadığı görülmüştür. Nanoakışkanın ısı iletkenliği,

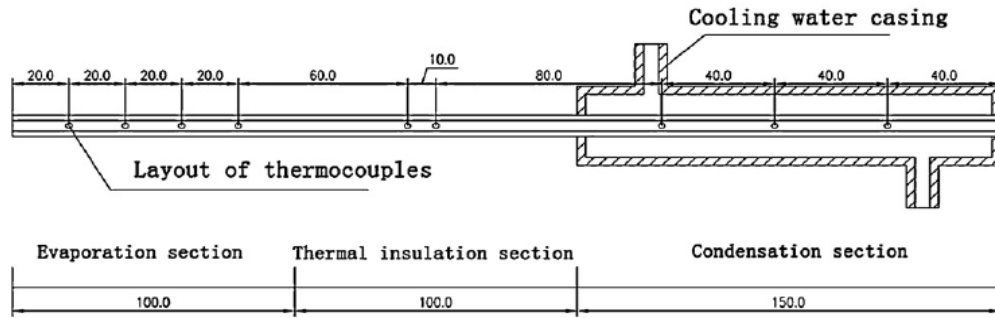
nanopartikül konsantrasyonunun artmasıyla artmıştır. Konsantrasyon ağırlıkça %2.0 olduğunda %8 artmıştır.

Deney sisteminin şematik bir görünüşü Şekil 3.44'te gösterilmektedir. Düzgün bakır bir borudan yapılmıştır. Tüpün içinde iki kat bakır kafes (kafes numarası 160) vardır. Ağların iç gerilimi nedeniyle, ağlar ve iç duvar arasında yakın temas garanti edilebilir. Isı borusunun uzunluğu, dış çapı ve et kalınlığı sırasıyla 350 mm, 8 mm ve 0.6 mm dir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölümü ve yoğunlaştırıcı bölümü sırasıyla 100 mm, 100 mm ve 150 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümü, çevresini çevreleyen bir elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmıştır.

Yoğunlaştırıcı bölümü, sabit sıcaklıkta bir termal banyoda dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Soğutma suyunun sıcaklığı ve hızı, çeşitli ısı akıları için test edilen ısı borusundaki buhar basıncını sabit bir değerde tutmak için dikkatlice kontrol edilmiştir. Termokuplların dağılımları Şekil 3.45'te gösterilmiştir. Test edilen ısı borusunun üst ve bir tarafına eksenel doğrultuda iki grup T tipi termokupl kaynaklanmıştır. Her grupta, buharlaştırıcı bölümünde dört, ısı yoğunlaştırıcı bölümünde üç ve adyabatik bölümde iki termokupl olmak üzere dokuz termokupl vardır. Adyabatik bölümün merkezi konumuna yerleştirilen bir basınç transdüseri, ısı borusundaki buharın doyma basıncını, yani çalışma basıncını ölçmek için kullanılmıştır. Adyabatik bölüm merkezindeki termokupldan ölçülen sıcaklık, doymuş buhar sıcaklığı, yani çalışma sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama duvar sıcaklıkları, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama HTC'sini hesaplamak için kullanılmıştır.



Şekil 3.44. Deney düzeneği (Wang *et al.* 2012)



Şekil 3.45. Termokuplların şematik gösterimi (Wang *et al.* 2012)

CuO nanoakışkan, test edilen ısı borusuna bir şırınga vasıtasıyla doldurulmuştur. Doldurma hacmi, buharlaştırıcı bölüm hacminin %50'sine sabitlenmiştir. Her testten önce, ısı borusunda ve çalışma sıvısında çözünen gazları uzaklaştırmak için vakum pompalama ve sıvı ön ısıtma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deney, sırasıyla 7.45 kPa, 12.38 kPa ve 19.97 kPa çalışma basınçlarına karşılık gelen üç sabit çalışma sıcaklığı olan 40°C, 50°C ve 60°C'de gerçekleştirilmiştir. Deney aparatını çalışma işlemi sırasında aşırı sıcaklıktan korumak için güç devresine bir termal kesme cihazı monte edilmiştir.

Her çalışmada ısıtma gücü monoton olarak artırıldı. Buharlaştırıcı duvar sıcaklığı aniden arttığında ve ısı borusunda meydana gelen bir kurumayı gösteren sabit bir durumu koruyamadığında, elektrik güç kaynağı anında kapatılmıştır. Daha sonra, çalışma yeniden başlatılmış ve ısıtma gücü, önceki giriş gücünün %1'lik bir artışıyla arttırılmıştır. Duvar sıcaklığı aniden tekrar arttığında ve sabit bir durumda tutamadığında, elektrik güç kaynağı anında kapatılmış ve test sonlandırılmıştır. Kararlı durumdaki son giriş gücü, ısı borusunun maksimum gücü olarak tanımlanmıştır.

$$q = \frac{VI - Q_{hl}}{A} \quad (3.15)$$

Burada q , V , I , Q_{hl} ve A sırasıyla ısı akısı, voltaj, akım, giriş gücü ısı kaybı ve ısıtma alanıdır. Isı transfer katsayısı (HTC), h , şu şekilde hesaplanır:

$$h = \frac{q}{\Delta T} \quad (3.16)$$

Burada h ve ΔT sırasıyla ısı iletim katsayısı ve aşırı ısınmadır.

Toplam ısı direnç R aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{Q} \quad (3.17)$$

T_e ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığı, T_c ortalama yoğunlaştırıcı duvar sıcaklığı ve Q giriş ısı gücüdür.

Kütle konsantrasyonu ağırlıkça %0'dan ağırlıkça %1.0'a değiştiğinde, toplam ısı direnci artan nanopartikül kütle konsantrasyonu ile artar. Daha sonra, kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'ı aştıktan sonra azalmaya başlar. Bu nedenle, minimum ısı direncine karşılık gelen optimal bir kütle konsantrasyonu vardır ve bu optimal değer hem yatay hem de dikey borular için ağırlıkça %1.0'a eşittir.

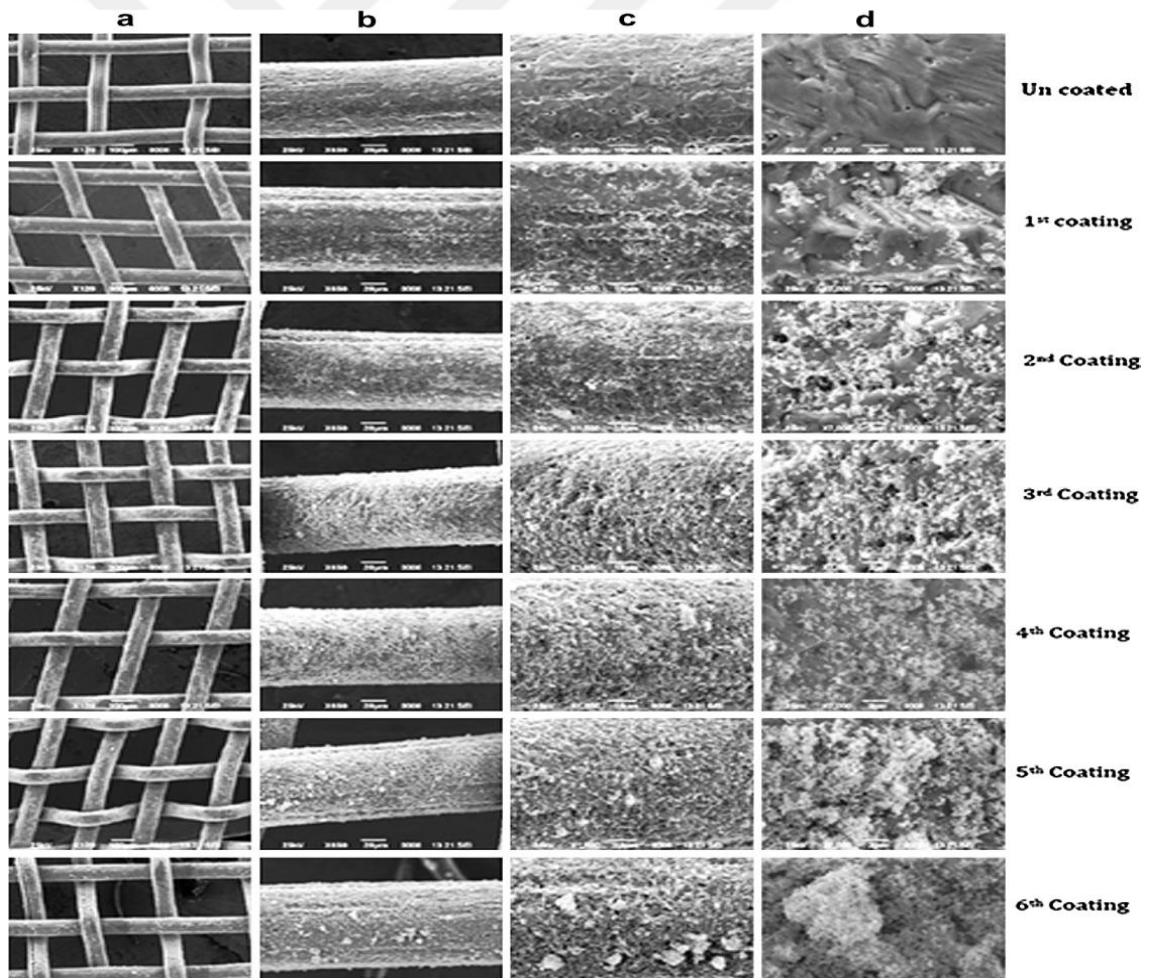
Ağırlıkça %1.0 CuO kütle konsantrasyonu ile su bazlı nanoakışkan kullanılmasıyla, buharlaşma ve yoğunlaşma HTC'leri ve maksimum ısı giderme kapasitesi önemli ölçüde artırılmıştır. Aynı çalışma sıcaklığı ve aynı eğim açısı koşulları altında, nanoakışkan ısı borusunun toplam ısı direnci, su ısı borusununkinin yaklaşık yarısına düşürülebilirken, maksimum ısı çıkarma kapasitesi %40 oranında artmıştır.

Eğim açısının buharlaşma ısı transferi üzerinde büyük bir etkisi vardır; bununla birlikte, örgü ısı borusunun hem su hem de nanoakışkan kullanıldığında yoğunlaşma ısı transferi üzerinde neredeyse hiç etkisi yoktur. Eğim açılarının etkileyen tüm özellikleri, hem su hem de nanoakışkanları kullanan ısı boruları için aynıdır. Eğim açısı 45°'ye eşit olduğunda, ortalama buharlaşma HTC ve yoğunlaşma HTC, yatay borununkine göre sırasıyla yaklaşık %22 ve %5 oranında artmıştır. Bununla birlikte, maksimum ısı akısı, eğim açısının artmasıyla kademeli olarak artar ve eğim açısı 0°'den 90°'ye değiştiğinde yaklaşık %30 artmıştır.

Çalışma sıcaklığı, su yerine nanoakışkan kullanıldığında ısı borusunun ısı transferi iyileştirme verimliliği üzerinde bariz bir etkiye sahiptir. Çalışma sıcaklığının düşmesi ile hem buharlaştırıcının hem de yoğunlaştırıcının HTC iyileştirme verimlilikleri artmış ve maksimum ısı akısı iyileştirme verimliliği biraz azalmıştır. Bunun sebebi, mevcut çalışmada henüz nicel olarak açıklanamamıştır.

Solomon *et al.* 2012 nanopartikül kaplı fitil ile çalıştırılan bir ısı borusunun ısı performansını incelemek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. 400 mm uzunluğunda ve 19.5 mm çapında bir ısı borusu üretilmiştir. Bu çalışmada nanopartikül birikimi olan ve olmayan örgü fitiller kullanılmıştır. Fitil yapısı 100 mesh / inç boyutunda 4 kat bakır ekran örgüsünden oluşur. Bir nanoakışkan, 1 g bakır nanopartiküllerin 1 L deiyonize su ile karıştırılmasıyla hazırlanır. Nanopartikülün deiyonize su ile karıştırılması, 30 dakika boyunca ultrasonik vibratör kullanılarak gerçekleştirilir. Nanopartikülleri çöktirmek için fitil, 5 dakika boyunca nanoakışkan içinde tutulur ve daha sonra nanopartikül kaplı fitil kuruyana kadar sıcak havaya (80°C'de) maruz bırakılır. Fitil üzerinde gözenekli bir yüzey elde etmek için, bu prosedür 6 defaya kadar tekrarlanır. Her seferinde fitil yapısı, taramalı

elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Kaplama tabakası basit daldırma yöntemiyle oluşturulmuş olmasına rağmen, biriken nanopartiküller normal su ile yıkamadan fitilden ayrılmamaktadır. Şekil 3.46, her bir kaplamanın tamamlanmasından sonra nanopartiküllerin fitil yüzeyi üzerinde farklı büyütmelerde birikmesini göstermektedir. Şekil 3.46 (a)'dan ilk kaplamanın sonunda fitil yüzeyi üzerinde çok az partikül biriktiği ve kaplama sayısı arttıkça partikül birikiminin fitil yüzeyinde de arttığı gözlenmektedir. Altıncı kaplamadan sonra fitil yüzeyi üzerindeki aglomere(küçük parçacıkların biraraya gelip yapıştırılması) nanopartiküller nedeniyle gözenekli bir yapı görülür. Ortalama 3-5 mm gözenek boyutu 6. kaplamadan sonra SEM mikrograflarında görülür Şekil 3.46 (c)



Şekil 3.46. Nanopartiküllerin fitil yüzeyi üzerindeki farklı büyütmelerdeki birikimleri (Solomon *et al.* 2012)(a) 120x, (b) 550x, (c) 1500x ve (d) 7000x

Fitel içindeki kaplamanın ısı borusunun performansı üzerindeki etkisini göstermek için, buharlaştırıcıdaki ısı direnç, kaplanmış ve kaplanmamış fitiller için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$R_e = \frac{\ln(d_{o,w}/d_{i,w})}{2\pi l_e k_{wall}} + \frac{\ln(d_{o,w}/d_{i,w})}{2\pi l_e k_{wick}} \quad (3.8)$$

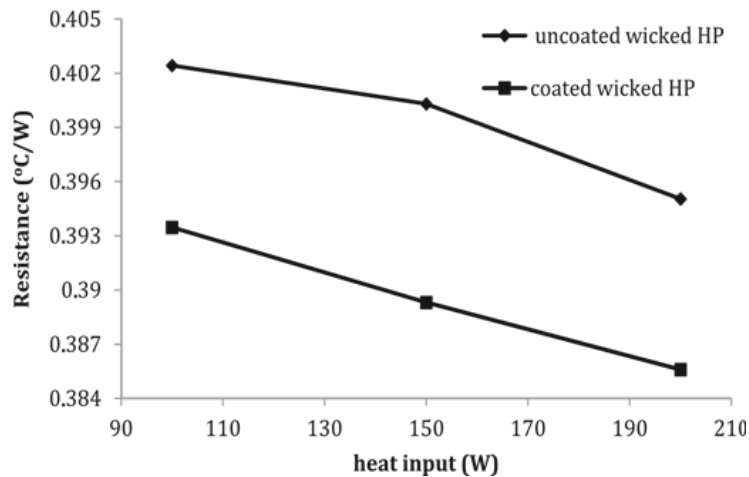
Sıvı fitil kombinasyonunun etkin ısı iletkenliği şu şekilde hesaplanır:

$$k_{wick} = \frac{k_1[(k_1 + k_s) - (1 - \varphi)(k_1 - k_s)]}{[(k_1 + k_s) + (1 - \varphi)(k_1 - k_s)]} \quad (3.19)$$

Örgü fitil tabakasının göznekliliği aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$\varphi = 1 - \frac{n\delta_1(1 - \varphi_1)}{\delta_n} \quad (3.20)$$

Farklı ısı girişlerinde kaplamalı ve kaplamasız fitiller için ısı borusunun buharlaştırıcı bölümünde hesaplanan ısı termal direnç şekil b de gösterilmektedir. Kaplanmış fitili olan ısı borusunun buharlaştırıcı kısmındaki direncin kaplanmamış fitili olan ısı borusunun buharlaştırıcı kısmındaki dirençten daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.47. Buharlaştırıcıdaki ısı direnç (Solomon *et al.* 2012)

Duvar sıcaklığının hem kaplamalı hem de kaplamasız fitillerle çalıştırılan ısı borusundaki ısı girişinin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Kaplamalı fitil ile çalıştırılan ısı borusunun buharlaştırıcı kısmındaki duvar sıcaklığı, kaplanmamış fitil ile çalıştırılan ısı borusundan daha düşüktür. Biriken nanopartiküller fitilin yüzey alanlarını iyileştirdiğinden, buharlaştırıcının duvarından çalışma akışkanına ısı transferi artar. Böylece ısı borusunun buharlaştırıcı bölümündeki sıcaklık düşer. Buharlaştırıcı bölümündeki gözlemlere benzer şekilde, kaplamalı fitil ile çalıştırılan ısı borusunun yoğunlaştırıcı kısmındaki duvar sıcaklığı kaplanmamış fitil ile çalıştırılan ısı borusundan daha düşüktür. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerindeki sıcaklık değişimlerinden farklı olarak, adiyabatik bölümdeki duvar sıcaklığı kaplı fitil ile çalıştırılan ısı borusunda daha yüksektir. Kaplama nedeniyle fitilin kalınlığının artması, dışarıya ısı transferini artıracaktır ve bu nedenle adiyabatik bölümün yüzey sıcaklığı artacaktır.

Isı borusunun ısı performansını hesaplamak için ısı borusundan çıkan ısı, buharlaştırıcının ısı direnci R_e , yoğunlaştırıcının ısı direnci ve ısı borusunun toplam direnci hesaplanır.

Isı borusundan çıkan ısı miktarı şu şekilde hesaplanır:

$$Q_{out} = \dot{m}_l c_{p,l} (T_{out} - T_{in}) \quad (3.12)$$

Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı kısmındaki ısı dirençler aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$R_e = \frac{\Delta T_e}{\dot{Q}_{in}} \quad (3.22)$$

$$R_c = \frac{\Delta T_c}{Q_{out}} \quad (3.23)$$

Isı borusunun toplam direnci aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$R_T = \frac{\Delta T}{Q_{out}} \quad (3.24)$$

Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdaki ısı transfer katsayıları aşağıdaki eşitliklerle hesaplanır:

$$h_e = \frac{q_e}{T_{e,i} - T_{sat}} \quad (3.25)$$

$$q_e = \frac{Q_{in}}{\pi d l_e} \quad (3.26)$$

$$h_c = \frac{q_c}{T_{sat} - T_{c,i}} \quad (3.27)$$

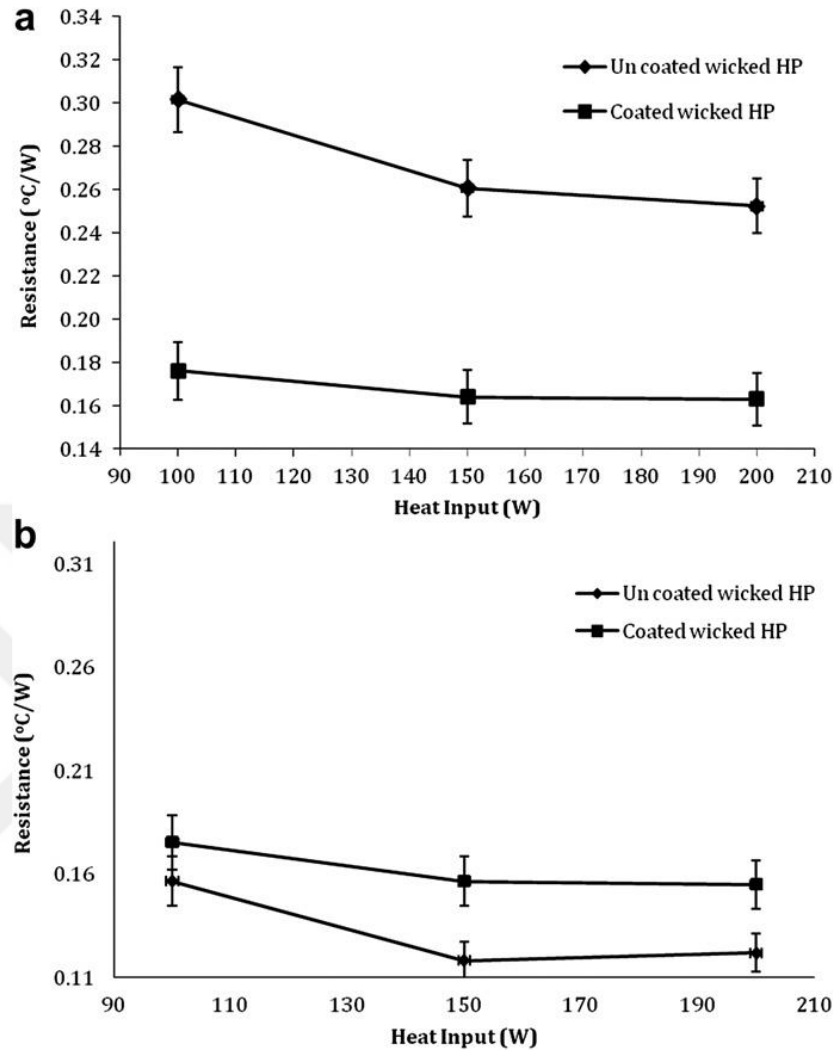
$$q_c = \frac{Q_{out}}{\pi d l_c} \quad (3.28)$$

Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdaki iç duvar sıcaklıkları

$$T_i = T_e + \frac{q r_o}{k} \ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right) \quad (3.29)$$

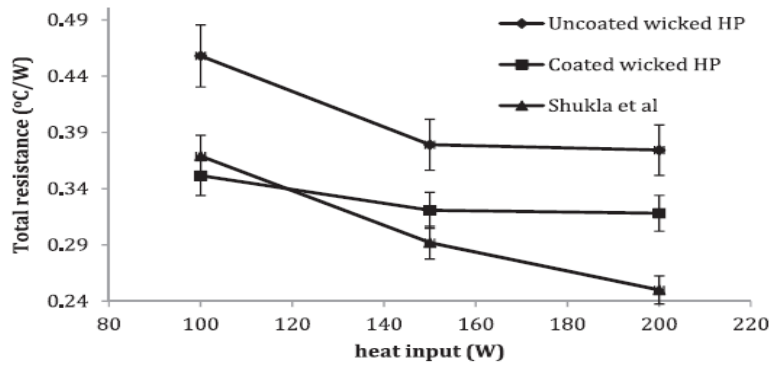
$$T_i = T_c + \frac{q r_o}{k} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (3.30)$$

Şekil 3.48 (a), farklı ısı girişlerinde buharlaştıracıdaki ısıl direnci gösterir. Isıl direnç (Re), kaplanmamış fitil ile çalıştırılan ısı borusundaki ısı girişinin artmasıyla azalırken, ısı girişinin kaplamalı fitil ile çalıştırılan ısı borusunun termal direnci (Re) üzerindeki etkisi önemsizdir



Şekil 3.48. (a)Farklı ısı girişlerinde buharlaştırıcı ısıl direnci R_e , (b)farklı ısı girişlerinde yoğunlaştırıcı ısı girişi R_c (Solomon *et al.* 2012)

Şekil 3.48 (b), farklı ısı girişiindeki yoğunlaştırıcı bölümündeki ısıl direnci gösterir. Kaplamalı fitil ile çalıştırılan ısı borusunun yoğunlaştırıcı kısmındaki ısıl, geleneksel ısı borusundan daha yüksektir. Kaplanmış fitil ile çalıştırılan ısı borusunun yoğunlaştırıcı kısmındaki direnç geleneksel olandan daha yüksek olmasına rağmen, buharlaştırıcıdaki ısıl dirençte daha büyük azalma olduğu için Şekil 3.49'da gösterildiği gibi toplam direnç azalır.



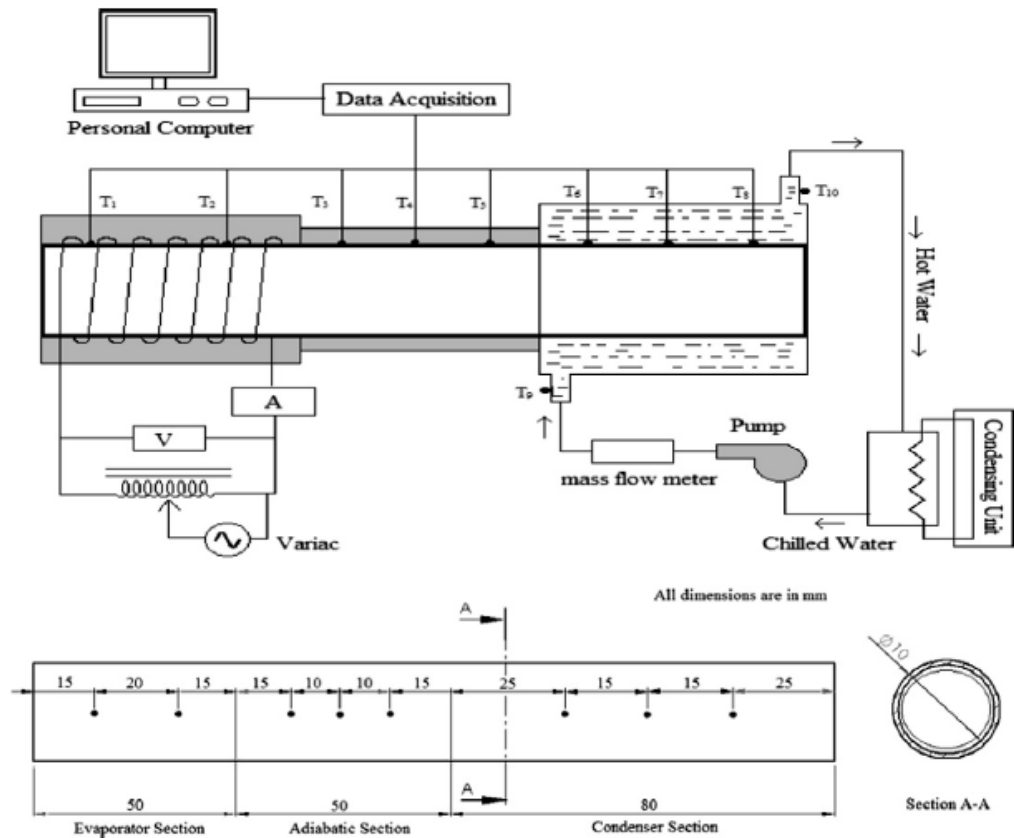
Şekil 3.49. Isı borusu toplam direnci (Solomon *et al.* 2012)

Buharlaştırıcıdaki ve ısı borusundaki ısı direncindeki düşüş, buharlaştırıcıdaki ısı transfer katsayısındaki artış açıkça göstermektedir ki fitildeki nanopartiküller ısı borusunun ısı performansını arttırmaktadır.

Asirvatham *et al.* 2013), Ag / su nanoakışkanı kullanarak örgü fitil ısı borusunun ısı performansındaki artışı fark etmişlerdir.

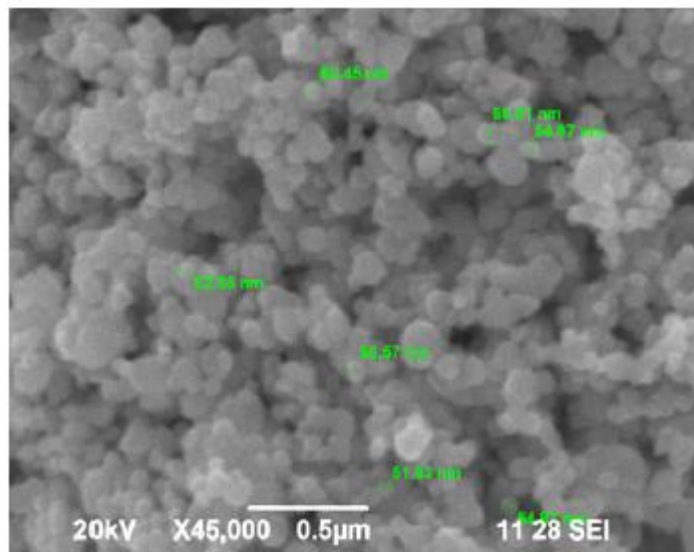
Nanopartikül konsantrasyonunun ısı borusunun performansı üzerindeki etkisini ölçmek için yapılan deneyi şematik yerleşimi Şekil 3.50'de gösterilmektedir. Test bölümü, sırasıyla 10 ve 180 mm dış çapa ve uzunluğa sahip bakırdan yapılmıştır. Duvar kalınlığı, buharlaştırıcı bölümünün uzunlukları, adyabatik bölüm ve ısı borularının yoğunlaştırıcı bölümü sırasıyla 0.5, 50, 50 ve 80 mm'dir. Tel çapı 0.105 mm ve ağ numarası 100 / inç olan iki kat bakır örgü ısı borusunun içine sarılmıştır. Isı borusunun toplam hacminin %30'u örgüyü tamamen doyurmak için çalışma sıvısı ile doldurulur. Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü, akrilik malzemeden yapılmış soğutma odasına yatay olarak yerleştirilmiştir. Test düzeneği ayrıca, soğutma suyunu yoğunlaştırıcı bölümü boyunca dakikada 260 ml sabit akış hızında sirküle etmek için bir pompa ve akış ölçerden (± 10 ml'lik bir belirsizlikle) oluşmaktadır. Performans doğruluğunu elde etmek için çeşitli ısı yüklerindeki tüm test bölümleri için sirkülasyonlu soğutma suyunun giriş sıcaklığını 24°C'de tutmak için sabit sıcaklıkta soğutulmuş su banyosu kullanılır. Yoğunlaştırıcı bölümü içinde dolaşan soğutma suyunun sıcaklığı, yoğunlaştırıcının giriş ve çıkışına

sabitlenmiş iki T tipi termokupl kullanılarak kaydedilmiştir. Test bölümü boyunca T tipi belirsizlik $\pm 0.5^\circ\text{C}$ olan, sırasıyla buharlaştırıcıda üç, adyabatik bölümde üç ve yoğunlaştırıcı bölümünde üç tane olmak üzere toplam sekiz termo kupl vardır. Bu termokupllar, ısı borusunun merkez göbeğinden buharlaştırıcı bölümünden yoğunlaştırıcı bölümüne geçen buhar sıcaklığını doğrudan ölçmektedir. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı yüzey sıcaklıkları, her bir bölüme iki adet T tipi termokupl sabitlenerek ölçülmüştür. Isı borusuna ısı girişi, buharlaştırıcı bölümüne sarılmış elektrikli ısıtıcıya bağlı bir dijital wattmetre ($\pm 0,5$ W'lık bir belirsizlikle) kullanılarak uygulanmıştır. Isıtıcıya enerji vermek için 220 V A.C besleme kullanılır. Isı borusunun buharlaştırıcı ve adyabatik bölümleri, ısı kaybını en aza indirmek için cam yünü kullanılarak tamamen yalıtılmıştır. Tüm veri toplama sistemi bir P.C. kullanılarak izlenerek kontrol edilmiştir.

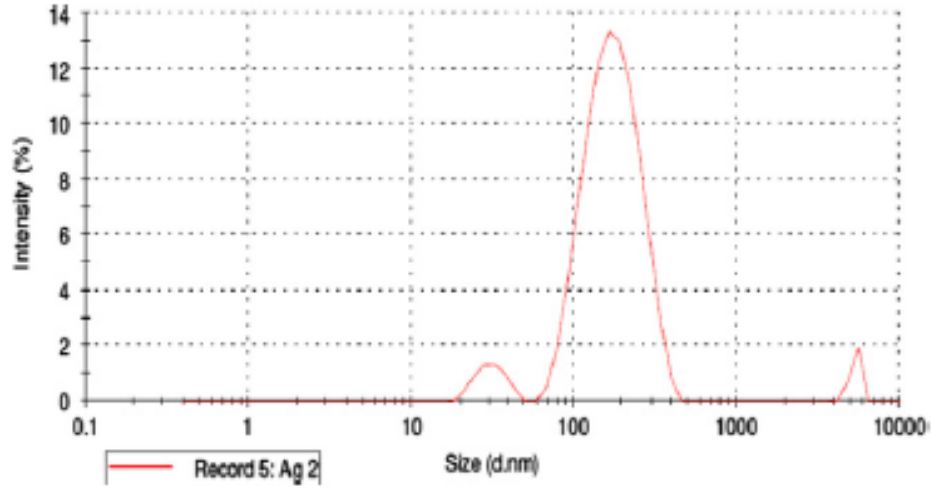


Şekil 3.50. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Asirvatham *et al.* 2013)

Bu çalışmada gümüş nanopartiküller kullanılmıştır. Gümüş-su nanoakışkanı hazırlamak için iki aşamalı yöntem kullanılmıştır. Nanopartiküller, herhangi bir yüzey aktifleştirici kullanılmadan doğrudan iyonu giderilmiş suyla karıştırılmıştır. Nanoakışkanlar, nanopartiküllerin baz akışkan içinde homojen ve kararlı bir şekilde dağılmasını sağlamak için 50-60 kHz ses frekanslarında bir ultrasonik te yaklaşık 1 saat iyi bir şekilde salınmıştır. Gümüş nanopartiküller ayrıca boyut dağılımı ve morfolojisini incelemek için tarama elektron mikroskobu (SEM) ve partikül boyutu analizörü kullanılarak karakterize edilmiştir. Şekil 3.51, x45.000 büyütmede alınan hacimce %0.009 gümüş nanopartikül konsantrasyonunun SEM görüntüsünü gösterir. Nanopartiküllerin boyutu SEM görüntüsünde işaretlenmiştir. Gümüş nanopartiküllerin boyutunun bazı yerlerde 51 nm ile 67 nm arasında değiştiği bulunmuştur. Nanopartiküllerin belirli seviyede aglomerasyon ile iyi dağıldığı açıkça görülmektedir. Toplanmış nanopartiküllerin boyutunun bazı yerlerde 100 nm'yi aştığı da gözlenmiştir. Bu nedenle, topaklanmış nanopartiküller, baz sıvıya eklenmeden önce bir bilyalı öğütücüde ince öğütülmüştür. Benzer şekilde, gümüş nanopartiküllerin boyutu, partikül boyutu analizörü kullanılarak ölçülmüş ve Şekil 3.52'de gösterilmiştir. Şekilden açıkça görülmektedir ki; nanopartiküllerin büyük çoğunluğu %13 yoğunluklu 110-120 nm boyutunda, %10 u %1.5 yoğunlukta 40 ve 60 nm arası değişen boyutlardadır.



Şekil 3.51. %0.009 konsantrasyondaki gümüş nanopartiküllerinin SEM görüntüsü (Asirvatham *et al.* 2013)



Şekil 3.52. Gümüş nanopartiküllerin yoğunluğuna göre boyut dağılımı (Asirvatham *et al.* 2013)

Deneyler, bahsedilen boyutlara göre imal edilen yatay doğrultuda dört özdeş ısı borusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isı borularından biri de-iyonize su ile geri kalan üç ısı borusu üç farklı konsantrasyonda gümüş-su nanoakışkan ile doldurulmuştur. Dört ısı borusunun tümü üzerinde yapılan testler, yoğunlaştırıcı bölümü boyunca dolaşan soğutma suyunun sabit akış hızı ve giriş sıcaklığı gibi aynı çalışma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Güç kaynağı açılarak, ısıtıcıya 20 W'lık bir ısı yükü ile enerji verilmiştir. Kararlı durum buhar sıcaklığı ve yüzey sıcaklığı veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Giriş ısı yükü, kuruma koşulu sağlanana kadar 20W'dan 100W'a kadar eşit adımlarla kademeli olarak arttırılmıştır. Kurutma koşulunun gözlendiği ısı girdisi, ısı borusunun maksimum ısı taşıma kapasitesi olarak kabul edilmiştir. Bu durumda buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasındaki buhar sıcaklığı farkı aniden artmaya başlamıştır.

Gümüş su nanoakışkanının termo-fiziksel özellikleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_w \quad (3.31)$$

ρ yoğunluk

$$(\rho C_p)_{nf} = \varphi(\rho C_p)_p + (1 - \varphi)(\rho C_p)_w \quad (3.32)$$

sırasıyla nanoakışkanın ısı kapasitesi, nanopartikülün ısı kapasitesi ve baz akışkanın ısı kapasitesidir.

Viskozite ve ısıl iletkenlik aşağıdaki denklemler kullanılarak ölçülmüştür:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_w} = (1.005 + 0.497\varphi - 0.1149\varphi^2) \quad (3.33)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_w} = (0.9692\varphi + 0.9508) \quad (3.34)$$

Isı borusunun ısıl direnci ortalama buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı duvar sıcaklıkları arasındaki farkın giriş ısı gücüne oranıdır ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$R_{HP} = \frac{\bar{T}_{E,vap} - \bar{T}_{C,vap}}{Q} \quad (3.35)$$

Yoğunlaştırıcı ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$h_c = \frac{Q}{A_c \Delta T_c} \quad (3.36)$$

Burada

$$A_c = \pi d_c L_c,$$

$$\Delta T_c = T_{C,vap} - T_{C,surf}$$

Burada Q ısı girişi, A yoğunlaştırıcı alanı, ve ΔT_c yoğunlaştırıcı bölümündeki buhar ve yüzey arasındaki ısı farkıdır.

Buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$h_E = \frac{Q}{A_E \Delta T_E} \quad (3.37)$$

Isı borusunun etkili ısıl iletim katsayısı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$K_{eff} = \frac{1}{A_{c/s,H,P} R_{H,P}} \quad (3.38)$$

Burada;

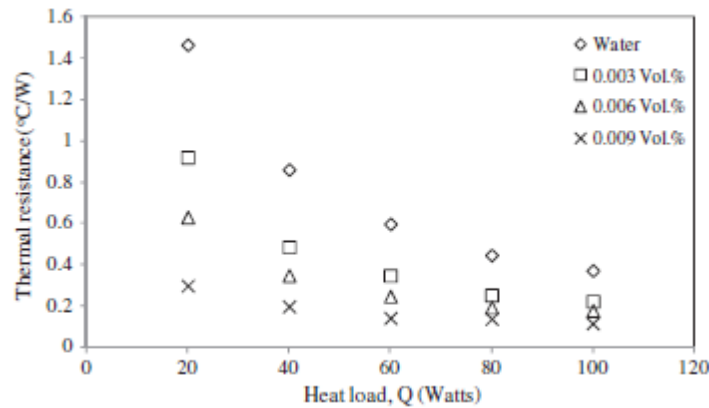
$$A_{c/s,H,P} = \frac{\pi}{4} d^2$$

Buharlaştırıcı bölümündeki çeşitli ısı yükleri ve konsantrasyonları için zamanın bir fonksiyonu olarak buhar sıcaklığı Şekil 3.53'de gösterilmiştir. Kararlı duruma yaklaşık 15-20 dakika sonra ulaşıldığı görülmüştür. Kurutma koşulu, çalışma sıvısı olarak DI su kullanan ısı boruları için 100W'da gözlenmiştir. Buhar sıcaklığı nanoakışkan konsantrasyonundaki artışla azalmıştır. Sıcaklıktaki bu düşüş, nanoakışkan kullanan ısı borusunun çalışma aralığını 100 W'ın üzerine çıkarmıştır. Ayrıca %0.003 ve %0.006 hacim için 106 ve 113 W civarında kuruma gözlenirken, %0.009 hacim %ile ısı borusu için kurutma 121 W'un üzerinde görülmüştür. Bu durum, ısıda %21'lik bir artış olduğunu göstermiştir. Transfer kabiliyeti, ısı borusunda çalışma sıvısı olarak nanoakışkan kullanılarak gözlemlenir

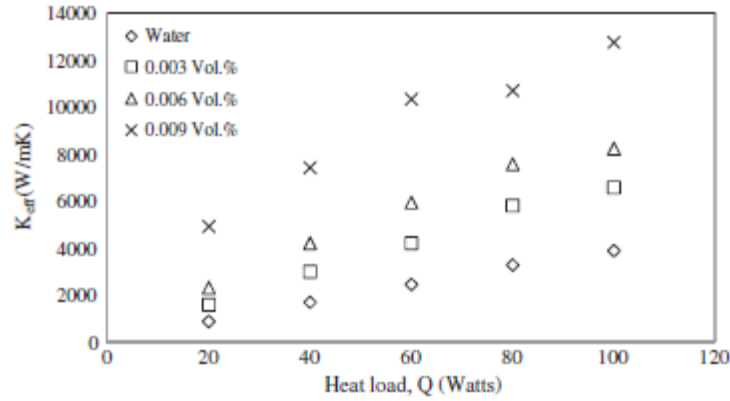
Isı borularının ısıl dirençleri, gümüş-su nanoakışkanları kullanarak ısı borularının ısıl performansını nicel olarak değerlendirmek için buhar sıcaklıklarına dayanarak hesaplanır. Şekil 3.53'de gösterildiği gibi, hem baz sıvı hem de nanoakışkanları kullanan ısı borularının ısıl dirençleri, buharlaştırıcı bölümünde kalın sıvı film tabakası yer aldığından düşük ısı yüklerinde yüksektir. Ancak ısı yükü arttıkça ısıl direnç hızla azalır. Gümüş-su nanoakışkan kullanan ısı borularının ısıl direncindeki bu azalma, DI su ile çalışan ısı borusuyla karşılaştırıldığında daha fazladır. DI su ile karşılaştırıldığında

hacimsel olarak %0.003 gümüş nanoakışkan için ısıl direncin %40 oranında azaldığı görülmüştür. Ayrıca, bu azalmanın, baz sıvıdaki nanopartiküllerin konsantrasyonu arttıkça kademeli olarak arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, hacim olarak gümüş nanoakışkanın maksimum konsantrasyonu %0.009 için, DI suyla karşılaştırıldığında ısıl direncin %76 oranında azaldığı görülmüştür. Nanopartiküller tarafından oluşturulan ince gözenekli kaplama tabakası, sadece maksimum ısı taşıma hızını arttırmakla kalmayıp aynı zamanda nanoakışkanlar kullanarak ısı borusunun ısıl direncini önemli ölçüde azaltması, ısı borusunun ısıl direncindeki azalmanın ana nedeni olarak kabul edilir.

Şekil 3.54'de görüldüğü gibi ısı borusunun etkin ısıl iletkenliği, ısı yükü ve konsantrasyonuna göre artmıştır. Gözlenen artış hacimce %0.009 gümüş-su nanoakışkan konsantrasyonu için %73.5'tir. Bu durumla nanoakışkan kullanılan ısı boruları yoluyla etkili ısı transferinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde hacimsel olarak %0.003 ve %0.006 ile çalışan ısı boruları, su bazlı ısı borusuna kıyasla iletkenlikte %42.4 ve %56.8 artış sağlamıştır.



Şekil 3.53. Farklı ısı girişlerinde ısıl direncin değişimi (Asirvatham *et al.* 2013)



Şekil 3.54. Farklı ısı yüklerinde ısı borusunun etkin ısı iletkenliği (Asirvatham *et al.* 2013)

Gümüş nanopartiküllerinin konsantrasyonundaki artışla birlikte buharlaşma ve yoğunlaşma ısı transfer katsayılarının arttığı da gözlenmektedir.

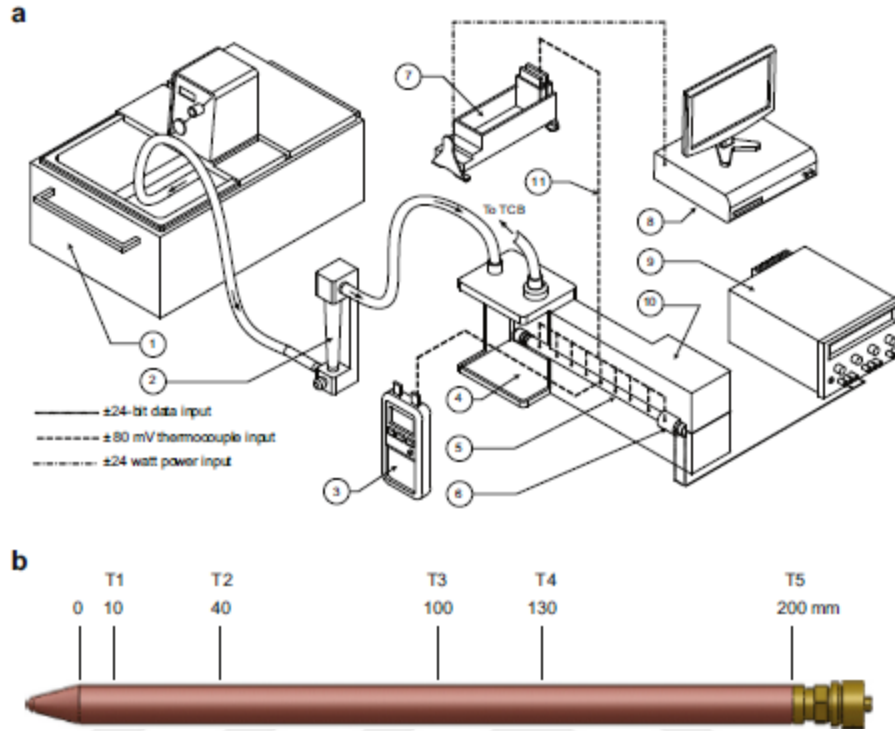
60 W ısı yükünde buharlaştırıcı duvar sıcaklığı ve buhar sıcaklığı arasındaki farkın sırasıyla su, %0.003, %0.006, %0.009 hacim konsantrasyonlarındaki ısı boruları için 5.8, 5.4, 4.7 ve 4.2 olduğu gözlenmiştir.

Saleh *et al.* (2013), iki aşamalı yöntem kullanılarak hazırlanan ZnO nanopartikül bazlı nanoakışkanları araştırmışlardır.

ZnO nanoakışkanları, ZnO nanopartiküllerinin, baz sıvı olarak etilen glikol (EG) içerisinde çözündürülmesiyle iki aşamalı yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Nanoakışkanların hazırlanmasında hiçbir yüzey aktifleştirici madde kullanılmadığı için, nanopartiküllerin nanoakışkan numunelerinde kümeler oluşturması beklenmekteydi. Sıvı numunelerdeki partiküllerin dağılımını geliştirmek için, nanoakışkanlar manyetik bir karıştırıcı kullanılarak karıştırılmış ve 2 saat boyunca sürekli darbe altında bir ultrasonik işlemci kullanılarak sonike edilmiştir. 25, 50, 75, 100 ve 500 mg ZnO nanopartiküllerinin 100 ml etilen glikol içinde çözündürülmesiyle beş ağırlık konsantrasyonunda nanoakışkan hazırlanmıştır.

Deneyde kullanılan ısı boruları, dış çapı 8 mm, iç çapı 7.44 mm ve uzunluğu 200 mm olan düz bakır boru kullanılarak elde edilmiştir. Her bir ısı borusu için fitiller, tel çapı 56.5 mm ve mm başına 67.42 iplikçikli paslanmaz çelik tel ekranlı bir ağdan yapılmıştır. Sıvı yükünün ısı borularının performansı üzerindeki etkisi, her biri dört katmanlı örgü fitillerine sahip borular kullanılarak test edilmiştir.

Deney sistemi (Şekil 3.55) soğutma sistemi, test bölümü, güç kaynağı, ölçüm sistemi ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Isı, DC güç kaynağına bağlı esnek bir elektrikli ısıtıcı kullanılarak 60 mm uzunluğunda bir buharlaştırıcı bölümüne uygulanmıştır. Isı kaybını en aza indirmek için, buharlaştırıcı ve adyabatik bölüm birkaç kat cam yünü ile sarılmış ve poliüretan kullanılarak izole edilmiştir. Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü soğutma odasına yatay olarak yerleştirilmiştir. Soğutucu, ısının yoğunlaştırıcı bölümünden termostatik sirkülasyon banyosuna (TCB) çıkarıldığı soğutma odasında sirküle edilmiştir. TCB gerekli sıcaklığa ayarlanarak ve deneyler boyunca sabit bir sıcaklıkta tutulmuştur. Burada test edilen ısı borularının yüzeyleri, buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümlerindeki yüzey sıcaklığı dağılımını ölçmek için duvar boyunca monte edilmiş beş K tipi termokupl ile donatılmıştır (Şekil 3.55 (b)). Üç termokupl buharlaştırıcıya, iki termokupl adyabatik kısma ve bir termokupl yoğunlaştırıcı kısmına tutturulmuştur. Tüm termokuplların çapları 0.05 mm dir ve bir dijital termometreye karşı kalibre edilmiştir. Sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlik 0.1°C 'dir. Termokupllar yüksek hassasiyetli bir veri toplama sistemine bağlanmıştır. Test edilen ısı borusunun geometrik boyutunun belirsizliği %0.5 tir. Duvar ısı akısı ve ısıl direncin maksimum belirsizlikleri ise sırasıyla %2 ve %3'tür.



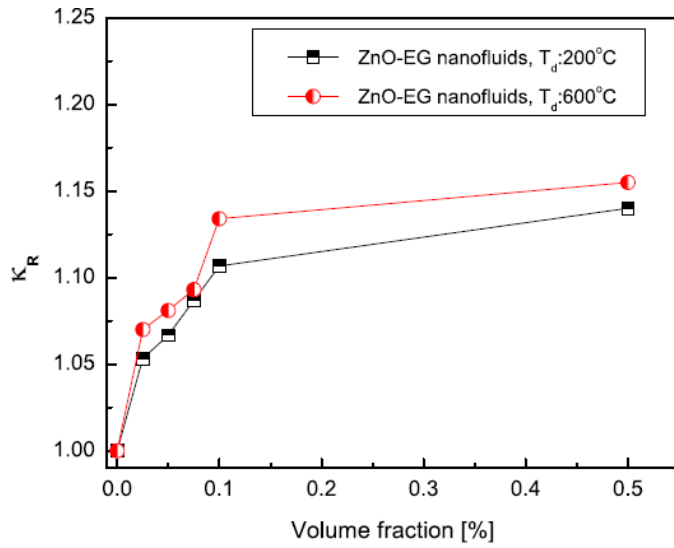
Şekil 3.55. Isı borusunun termal performansı için deney düzeneğinin şeması (Saleh *et al.* 2013)

1. TCB; 2. Akış ölçer; 3. Termometre; 4. Su deposu; 5. Isı borusu; 6. Isıtıcı; 7. DAQ sistemi; 8. Veri işleme için bilgisayar; 9. DC Güç kaynağı; 10. Yalıtım malzemesi; 11. Termokupl. b. Test edilen ısı borusunda termokupl dağılımı

Bu çalışmada, düşük konsantrasyonlarda ZnO nanopartikülleri içeren etilen glikol bazlı nanoakışkanların etkili ısı iletkenlikleri hakkında deneysel çalışma yapılmıştır. Ek olarak, nanoakışkan içindeki nanopartiküllerin bir örgü fitil ısı borusunun ısı iletkenliği üzerindeki etkisini araştırmak için bir deney yapılmıştır. Bu deneyler için, ZnO nanopartikülleri birlikte çökeltme yöntemi kullanılarak sentezlenmiş ve hacimce %0.025 ila 0.5'lik konsantrasyonlarda etilen glikol içinde dağıtılmıştır. Sentezlenen ZnO partiküllerinin ortalama kristalit boyutları 18 veya 23 nm olarak ölçülmüştür.

Ortalama kristalit boyutları 18 ve 23 nm ZnO / EG nanoakışkanların ısı iletkenlik oranları karakterize edilerek Şekil 3.56'da gösterilmiştir. Isıl iletkenlik, nanoakışkanların karıştırılmasından ve sonikasyonundan hemen sonra ölçülmüştür. Isıl iletkenlik K_R 'nin nispi değerleri, nanoakışkanın etkili ısı iletkenliğinin, baz sıvısının ısı iletkenlik değerine bölünmesiyle elde edilmiştir. Beklenildiği gibi, ısı iletkenliğinin nanopartiküllerin

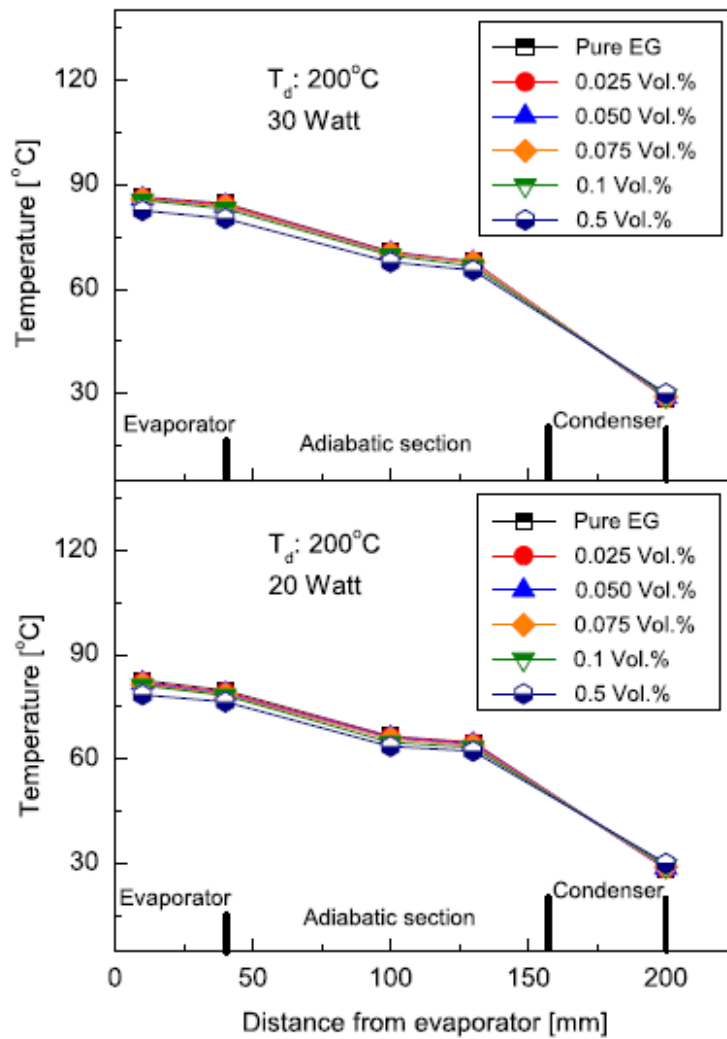
hacminin artması ve ortalama kristalit boyutunun artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Daha düşük partikül konsantrasyonlarında, iletkenlik oranı, %0.025'te yaklaşık %5.3 veya %7'lik artışlar göstermiştir, ancak bu değerler, ortalama 18 veya 23 nm'lik bir kristalit boyutuna sahip bir %0.5 ZnO / EG nanoakışkanı için sırasıyla %14 veya %15.5'e yükselmiştir.



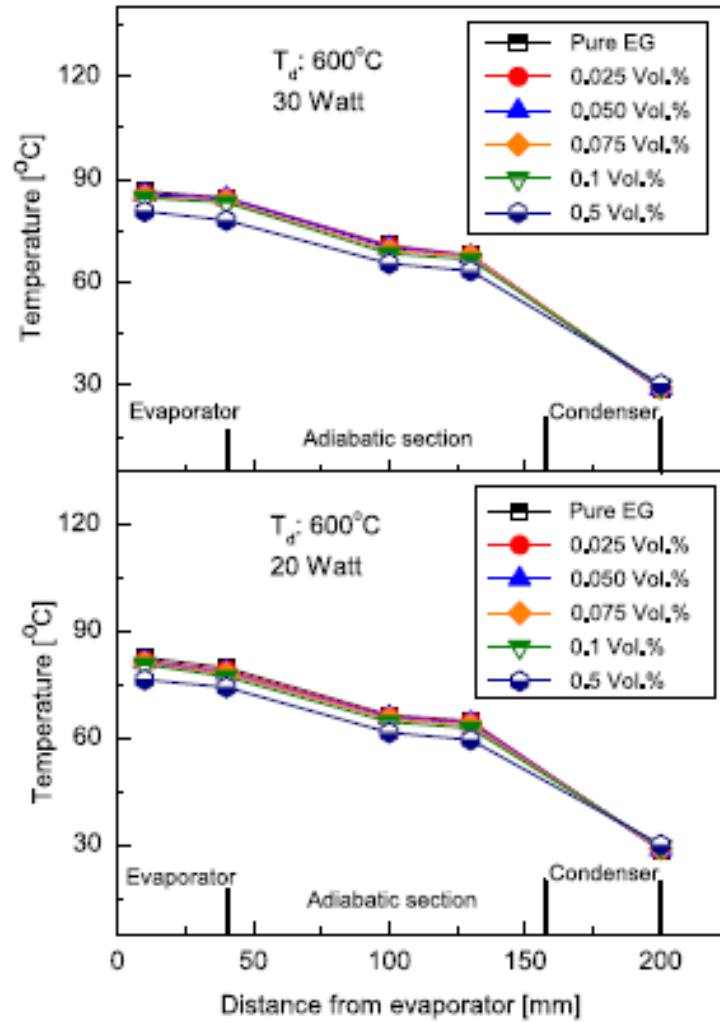
Şekil 3.56. Etilen glikol içinde dağılmış ZnO için ağırlık fraksiyonunun bir fonksiyonu olarak ısı iletkenliğinin bağıl değeri (Saleh *et al.* 2013)

Ortalama kristalit boyutları 18 ve 23 nm olan ZnO nanoakışkanları için ısı borusundan ısı aktarım hızındaki değişiklik buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdaki ortalama sıcaklıkları arasındaki farklarla birlikte Şekil 3.57 ve 3.58’de gösterilmiştir. Tüm ölçümler için, ısı borularının duvar sıcaklıkları, test bölümü boyunca buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcı bölümüne doğru azaldığı, giriş gücündeki artışla arttığı gözlenmiştir. Gösterildiği gibi, baz sıvı olarak etilen glikol içeren ısı borusunun sıcaklık dağılımları sırasıyla 88.6, 84.6, 70.8, 67.9 ve 28.7°C dir. EG, hacimce %0.5 ZnO / EG ile değiştirildiğinde, buharlaştırıcıdaki ısı borusu duvar sıcaklığı, sırasıyla 18 veya 23'lük ortalama kristalit boyutlarına sahip ZnO nanoakışkanları için 86.6'dan 80.7 C'ye ve 86.5'den 82.6 C'ye düşmüştür. Şekil 3.57 ve 3.58, ZnO nanopartiküllerinin hacim fraksiyonu arttıkça, ısı borusu duvar sıcaklığının, etilen glikol ile doldurulmuş borununkinden daha düşük olduğunu göstermektedir. Çalışma sıvısında daha fazla nanopartikül dağıtıldığında, ısı

borusu duvar sıcaklığı, çeşitli ısı yükleri altında saf baz sıvı dolu bir ısı borusundan daha fazla azalmıştır. Bu sonuçlar, çalışma sıvısı olarak etilen glikol bazlı ZnO (EG / ZnO) nanoakışkan kullanımının ısı borusunun ısıl performansını arttırdığını göstermiştir. Ek olarak, hem nanopartiküllerin hacim fraksiyonunun hem de nanopartiküllerin ortalama kristalit boyutunun, buharlaştırıcı bölümündeki duvar sıcaklığının azalmasını etkilediği gösterilmiştir.



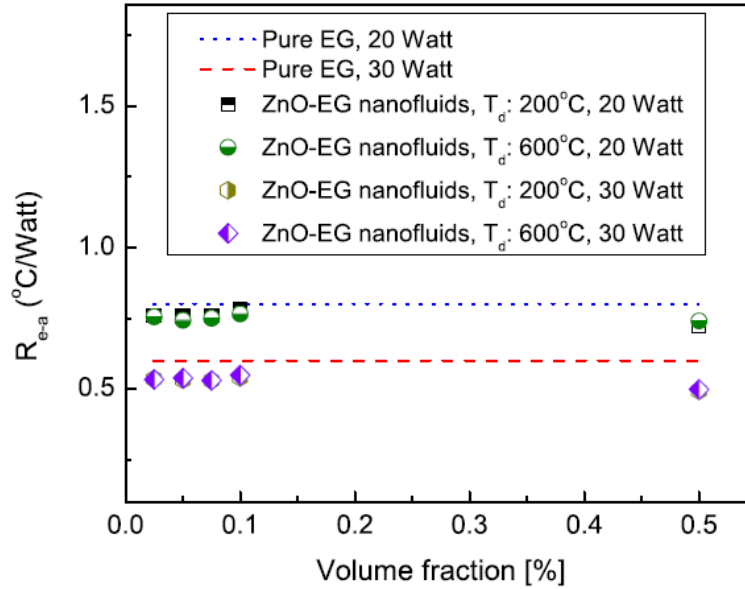
Şekil 3.57. Etilen glikol içinde dağılmış 200°C'lik bir kurutma sıcaklığı ile sentezlenen ZnO nanopartiküllerinin farklı ağırlık fraksiyonları için ortalama ısı borusu sıcaklık dağılımları (Saleh *et al.* 2013)



Şekil 3.58. Etilen glikol içinde dağılmış 600°C'lik bir kurutma sıcaklığı ile sentezlenen ZnO nanoparçacıklarının farklı ağırlık fraksiyonları için ortalama ısı borusu sıcaklık dağılımları (Saleh *et al.* 2013)

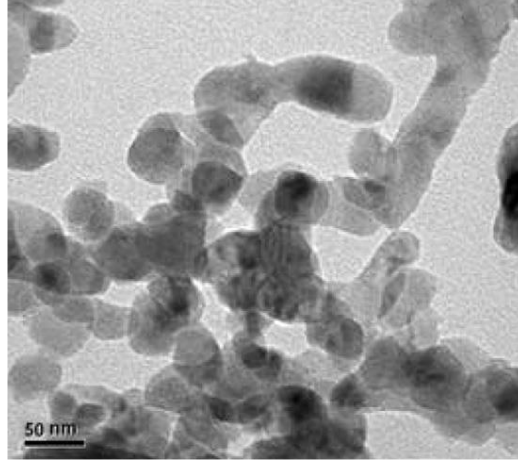
Duvar sıcaklığı ölçümlerinin dağılımına dayanarak, evaporatör bölümü ve adyabatik bölüm arasındaki ısı direnci, $R_{th} = \Delta T / Q$ denklemi kullanılarak hesaplanır; burada ΔT , buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler arasındaki sıcaklık farkı, Q giriş gücüdür. Şekil e'de görüldüğü gibi, ZnO / EG kullanan ısı borusunun ısı direnci, saf EG kullanan ısı borusundan daha düşüktür. Genel olarak, 23-nm boyutlu ZnO nanopartikül kristalitleri içeren ısı borusunun ısı direnci, daha küçük kristalit boyutu ZnO (18 nm) kullananlardan daha düşüktür. Nanopartiküllerin hacim fraksiyonunun arttırılması ile ısı direnci azalmıştır. Bu bulgu, nanopartiküllerin ısı borusundaki ısı direncin azaltılmasında önemli

bir rol oynadığını göstermektedir, çünkü ısı borusundaki çalışma akışkanının etkili ısı iletkenliğindeki artış, ısı borusunun ısıl direnciyle bir korelasyona sahiptir.



Şekil 3.59. Şekil 3.57 ve 3.58’de gösterilen ısı borularının ısıl dirençleri (Saleh *et al.* 2013)

Liu *et al.* (2011), su bazlı CuO nanoakışkanlarının, sabit atmosfer basıncı altında çalışan yatay örgü ısı borusunun termal performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. CuO nanopartikülleri, gaz yoğunlaştırma yöntemi ile yapılan ticari üründür. Üretici tarafından bildirilen ortalama çapı 50 nm dir. Baz sıvıya herhangi bir yüzey aktifleştirici madde eklenmemiştir. Şekil 3.60, ağırlıkça %1 kütle konsantrasyonu ile nanoakışkanın TEM fotoğrafını göstermektedir. Su bazlı Cu-nanoakışkanı daha iyi ısı transferi sağlayabilmesine rağmen, Cu nanopartikülleri mühendislik uygulamaları için çok pahalıdır. Ayrıca, Cu nanopartikülleri birkaç gün sonra deiyonize su içinde hızla oksitlenebilmektedir.



Şekil 3.60. Ağırlıkça %1'lik CuO nanopartiküllerinin nanoakışkan içindeki TEM fotoğrafı (Liu and Zhu 2011)

Nanoakışkan, CuO nanopartiküllerinin deiyonize suya doğrudan dağıtılmasıyla hazırlanmıştır. Daha sonra, 25-40 kHz çalışma frekansına sahip bir ultrasonik su banyosunda 10 saat boyunca sürekli olarak salınmış, böylece nanopartiküller eşit olarak dağıtılabilmektedir. Nanopartikül kütlelerinin baz sıvının kütlesine oranı olan kütle konsantrasyonu, nanopartikül konsantrasyonunu tanımlamak için kullanılmıştır. Deneyde, nanoakışkanın kütle konsantrasyonu, %0.078-0.31 hacim fraksiyonlarına karşılık gelen %0.5 ila %2.0 arasında düzenlenmiştir.

Hacimsel oran ϕ aşağıdaki korelasyonla hesaplanır:

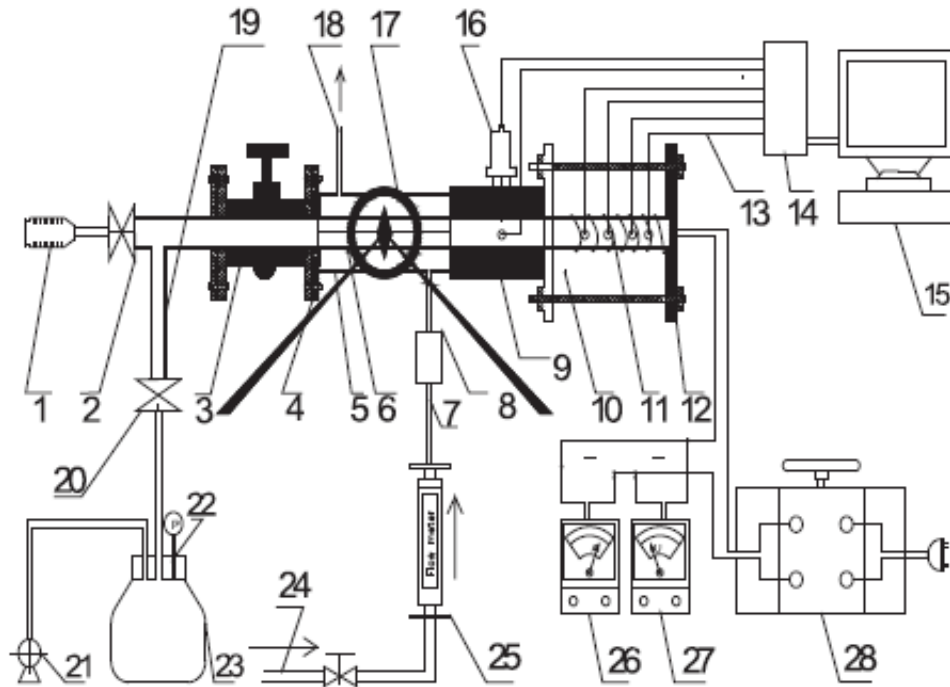
$$\frac{1-w}{w} \cdot \frac{\rho_p}{\rho_0} = \frac{1-\phi}{\phi} \quad (3.40)$$

Nanoakışkanın yoğunluğu ve özgül ısısı, baz sıvı ve nanopartiküllerden ve nanopartikül kütle konsantrasyonundan hesap edilebilir:

$$\rho = \left(\frac{1-w}{\rho_0} + \frac{w}{\rho_p} \right)^{-1} \quad (3.41)$$

$$C = C_p \cdot w + C_0 \cdot (1-w) \quad (3.42)$$

Deney aparatının şeması Şekil 3.61'de gösterilmektedir. Test edilen ısı borusu Çin'den elde edilen ticari bakır bir üründür. Isı borusunun uzunluğu, dış çapı ve et kalınlığı sırasıyla 350 mm, 8 mm ve 0.6 mm dir. Tüpün içinde iki kat bakır kafes (kafes numarası 160) vardır. Ögüler ve iç duvar arasında yakın temas örgülerin iç gerilimi nedeniyle garanti edilebilir. Test edilen boru ısısı yatay olarak yerleştirilmiştir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, adyabatik bölümü ve yoğunlaştırıcı bölümü sırasıyla 100 mm, 100 mm ve 150 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümü bir elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmış ve yoğunlaştırıcı bölümü soğutma suyu ile soğutulmuştur. Giriş gücü kademeli olarak değiştiğinde sabit çalışma basıncını korumak için soğutma suyunun sıcaklığı ve hızı iyi bir şekilde kontrol edilmiştir.



Şekil 3.61. Deney aparatının şematik gösterimi(Liu and Zhu 2011)

1. dereceli ölçüm tüpü, 2, 20. vakum mermi değeri. 4. flanş, 5. soğutma suyu ceket, 6. test tüpü, 7. soğutma suyu borusu, 8. bağlayıcı, 9,10. Teflon tüp, 11. ısıtıcı, 12. fikstür, 13. termokupl, 14. veri toplama sistemi, 15. bilgisayar, 16. basınç dönüştürücü, 17. eğimli aç kontrolörü, 18. soğutma suyu çıkışı, 19. pompalama tüpü, 21. vakum pompa, 22. basınç ölçer, 23. basınç dengeleme tankı, 24. Soğutma suyu girişi, 25. akış ölçer, 26. ampermetre, 27. voltmeter, 28. Transformatör

Eksenel doğrultuda sıcaklık dağılımını ölçmek için sekiz termokupl kullanılmıştır. Bunlardan dördü buharlaştırıcı bölümünün dış yüzeyinde biri adyabatik bölümde, üçü de

kondenser bölümünde aksel doğrultuda kaynaklanmıştır. Buhar basıncını, yani test bölümünün çalışma basıncını ölçmek için adyabatik bölümün orta noktasına yerleştirilmiş bir basınç transdüseri kullanılmıştır. Deney sonuçları, adyabatik kısımda ölçülen sıcaklık ile basınç transdüseri tarafından ölçülen doyma buhar basıncına göre hesaplanan sıcaklık arasındaki maksimum farkın sadece 0.2 K olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, adyabatik kısımda ölçülen sıcaklığın veri düzenlemelerinde doyma buhar sıcaklığı olarak kullanılmıştır.

Nanoakışkan, bir vakum mermi valfi vasıtasıyla test edilen ısı borusuna doldurulmuştur. Doldurma hacmi, buharlaştırıcı bölümünün %60'ına sabitlenmiştir. Bu çalışmada yapılan deneysel sonuca göre, bu doldurma oranı maksimum ısı çıkarma kapasitesine ve minimum toplam ısı direncine karşılık gelen optimal bir değerdir. Sıvı doldurma işleminden önce, ısı borusunda çözünmüş gazları uzaklaştırmak için vakum pompalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Test, sırasıyla 60°C, 50°C ve 40°C'lik doyma buhar sıcaklıklarına karşılık gelen sırasıyla 19.97 kPa, 12.38 kPa ve 7.45 kPa'lık üç sabit basınç altında gerçekleştirilmiştir. Her çalışma sırasında, giriş gücü, elektrikli ısıtıcıya giderek daha fazla verilmiştir. Çalışma sırasında deney aparatını aşırı sıcaklıktan korumak için güç devresine bir termal kesme cihazı takılmıştır.

Bazı testlerden sonra, ısı borusuna bir hafta boyunca dokunulmamıştır. Daha sonra aynı test yeniden başlatılarak ve deney tekrarlanmıştır. Tüm tekrarlanan testler için fark edilebilir bir fark bulunmamıştır. Mükemmel tekrarlanabilirliğin nedeni, konveksiyon etkisi altında baz sıvıdaki nanopartiküllerin rastgele hareketinin, nanopartiküller uzun süre yerleştikten sonra nanoakışkanı tekrar üniform hale getirmesidir. Eşit dağılmış bir nanoakışkan için deney sonuçları iyi bir şekilde tekrarlanabilir.

Buharlaştırıcı bölümünün (q_e) duvar ısı akısı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$q_e = Q/(2\pi r_0 L_e) \quad (3.43)$$

$$T_i = T_o \frac{q_e r_o}{\lambda_w} \ln \frac{r_i}{r_o} \quad (3.44)$$

Q giriş gücü olarak, r_o ve r_i test edilen ısı borusunun dış ve iç yarıçapı, L_e bölümünün ısıtılmış uzunluğu, T_o ve T_i dış duvar ve iç duvar sıcaklığı ve λ_w bakırın ısıl iletkenliğidir.

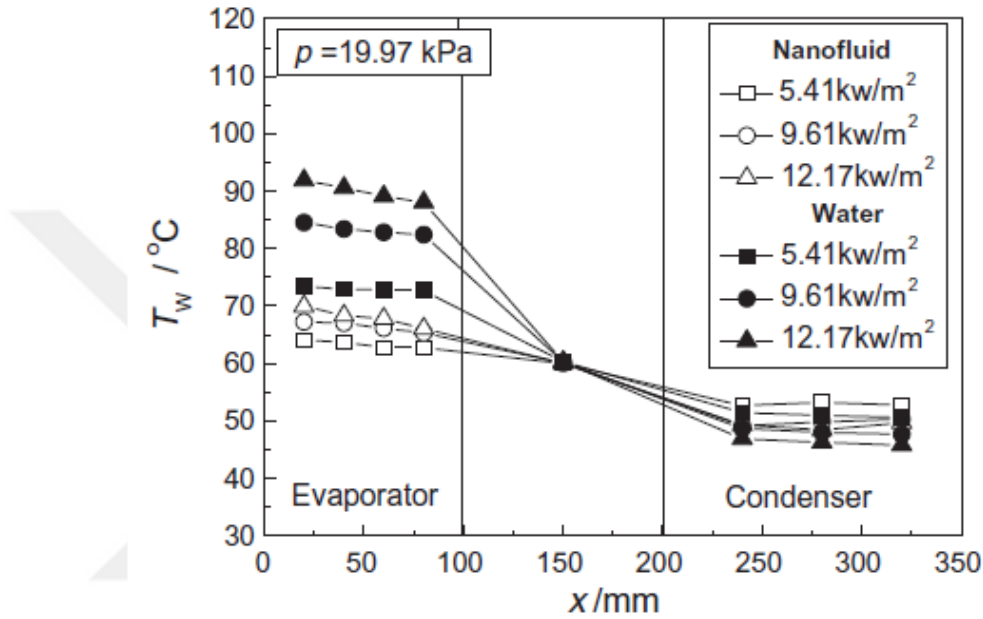
Ayrıca, ortalama duvar kızdırma ΔT 'si, ortalama iç duvar sıcaklığı ile buhar doygunluk sıcaklığı arasındaki farktır. Daha sonra, buharlaştırıcı bölümünün ortalama ısı transfer katsayısı (HTC), duvar ısı akışının q_e ortalama duvar aşırı ısı ΔT ile bölünmesi ile hesaplanmıştır:

$$h_e = q_e / \Delta T \quad (3.44)$$

Her çalışmada giriş gücü monoton olarak arttırılmıştır. Duvar sıcaklığı aniden arttığında ve ısı borusunda bir kuruma olduğunu gösteren sabit bir durumu koruyamadığında, elektrik güç kaynağı anında kapatılmıştır. Daha sonra, çalışma eski giriş gücünden yeniden başlatılmış ve giriş gücü, önceki giriş gücünün %1'lik bir artışıyla arttırılmıştır. Duvar sıcaklıkları bir kez daha aniden arttığında ve sabit bir durumda tutamadığında, elektrik güç kaynağı hemen tekrar kapatılarak test sonlandırılmıştır. Önceki sabit giriş gücü, maksimum ısı akışı olarak tanımlanmıştır. Çalışma basıncının maksimum belirsizliği %0.5 tir. Termokuplların maksimum kalibrasyon hatası 0,2 K dir. Test edilen ısı borusunun geometrik boyutunun maksimum belirsizliği %1'dir. Duvar ısı akısı ve ısı transfer katsayısının maksimum belirsizlikleri sırasıyla yaklaşık %4 ve %7'dir.

Şekil 3.62, sırasıyla 19.97 kPa çalışma basıncında ve ağırlıkça %1.0 kütle konsantrasyonunda, hem deiyonize su hem de nanoakışkan kullanılarak deney tüpünün sıcaklık dağılımlarının karşılaştırmasını gösterir. Nanoakışkan kullanan buharlaştırıcının duvar sıcaklıklarının, aynı girdi altında deiyonize su kullanılandan çok daha düşük olduğu bulunmuştur. Aksine, nanoakışkan kullanan yoğunlaştırıcının duvar sıcaklıkları, aynı girişte deiyonize su kullanılandan çok daha yüksektir. Ağırlıkça %1.0 CuO nanopartiküllerinin varlığı, buharlaştırıcının duvar sıcaklıklarını önemli ölçüde azaltırken, yoğunlaştırıcının duvar sıcaklıklarını arttırmıştır. Böylece, ısı borusunun ısı

transfer performansı büyük ölçüde artırılmıştır. Ek olarak, Şekil 3.62'de gösterildiği gibi, nanoakışkan kullanılarak daha homojen bir duvar sıcaklığı dağılımı elde edilmiştir. Bu aynı zamanda daha iyi bir çalışma durumuna ve ısı borusu için daha düşük bir ısı direncine neden olmaktadır.

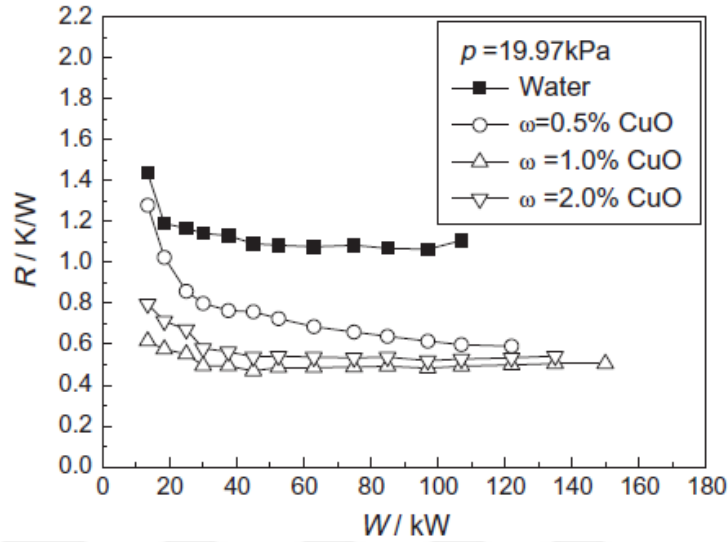


Şekil 3.62. Duvar sıcaklıklarının nanoakışkanlı ve nanoakışkansız ısı borusunda dağılımı (Liu and Zhu 2011)

Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ısı transfer katsayıları, kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'dan az olduğunda kütle konsantrasyonunun artmasıyla artmıştır. Daha sonra, kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'ın üzerine çıktıktan sonra azalmaya başlamıştır. Ağırlıkça %1.0 kütle konsantrasyonu, en iyi ısı transfer katsayısı (HTC) donanımına karşılık gelmektedir.

Maksimum ısı akısı, kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'dan az olduğunda kütle konsantrasyonunun artmasıyla artmaktadır. Daha sonra, kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'ın üzerine çıktıktan sonra yavaş yavaş azalmaya başlamaktadır. Ağırlıkça %1.0 kütle konsantrasyonu aynı zamanda en iyi giriş gücü artışına karşılık gelir. Isı borusunun maksimum giriş gücü, deiyonize su yerine nanoakışkan kullanıldığında %42 artar.

Şekil 3.63’de görüldüğü gibi deiyonize su yerine nanoakışkan kullanıldığında ısı borusunun toplam ısı direnci belirgin şekilde azalır.



Şekil 3.63. Nanopartiküllerin ısı borusunun ısı direnci üzerindeki etkisi (Liu and Zhu 2011)

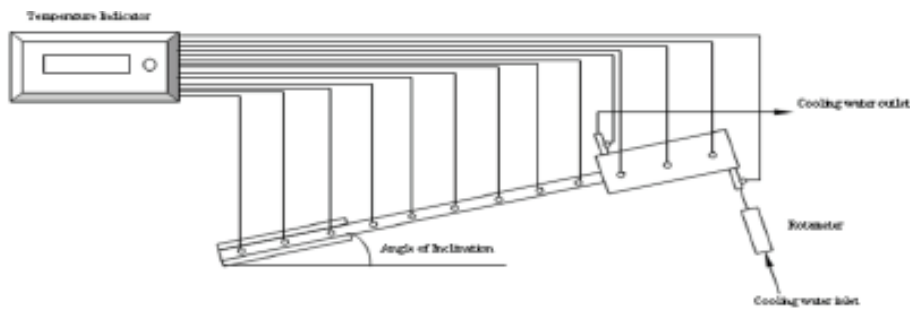
Senthilkumar *et al.* (2012) ısı borusunun ısı verimliliğindeki artışı incelemek için çalışma sıvısı olarak bakır nanoakışkan kullanmışlardır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3.64'te ve termokupl konumları Şekil 3.65'de gösterilmiştir. Isı borularının özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümü, buharlaştırıcı bölümüne bağlı olan çevresel elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Isı borusu boyunca sıcaklık dağılımını ölçmek için toplam on dört set bakır nikel telli termokupl kullanılır. Isı borusunun duvar sıcaklığı dağılımı, $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 'lik bir belirsizlik ile bakır nikelli tel (T tipi) termokupllar kullanılarak ölçülmüştür. Isı borusu, yaklaşık olarak buharlaştırıcıyı doldurmak için gereken miktara karşılık gelen 40 ml çalışma sıvısı ile doldurulmuştur. Deneyin başlangıcında, buharlaştırıcı sıcaklığı 30°C 'lik bir sıcaklıkta kontrol edilmiştir.

Soğutma suyu, çalışma akışkanının ısını uzaklaştırmak için ısı borusunun ucunda bulunan yoğunlaştırıcı bölümüne bağlı soğutma ceketi içinde sirküle edilir. Isı borusu ısıyı iç yapıdan geçirme özelliğine sahiptir. Sonuç olarak, ısı yoğunlaştırıcıda doğru şekilde serbest bırakılmazsa ısı borusuna zarar verebilecek ani bir duvar sıcaklığı

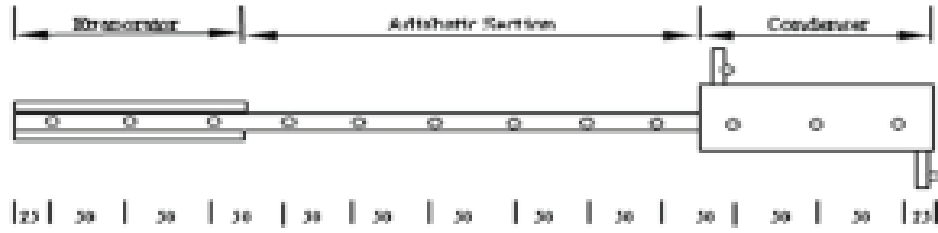
yükselmesi meydana gelir. Bu nedenle, soğutma suyu ısı buharlaştırıcıya verilmeden önce ilk olarak yoğunlaştırıcı ceketinden dolaştırılır. Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü su kullanılarak soğutulur ve akış hızı $\pm 1\%$ 'lik bir belirsizlik ile yüzen bir rotametre ile ölçülür. Soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları iki bakır nikelli telden termokupl kullanılarak ölçülür.

Isı borusunun adyabatik kısmı tamamen cam yünü ile yalıtılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı yüzeyindeki ısı kaybı miktarı göz ardı edilebilir. Deneyler, belirtilen boyutlara göre üretilen iki özdeş ısı borusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isı borularından biri deiyonize su ve diğeri de bakır nanoakışkan ile doldurulmuştur. Isı borusuna güç girişi kademeli olarak yükseltilerek istenen güç seviyesine getirilmiştir. Isı borusunun yüzey sıcaklıkları, ısı borusu sabit durumuna ulaşana kadar düzenli aralıklarla ölçülür. Eşzamanlı olarak, yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcı bölgesindeki duvar sıcaklıkları, yoğunlaştırıcı kısmına su giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmektedir.

Kararlı duruma ulaşıldığında, giriş gücü kapatılır ve ısı borusunu soğutmak ve daha fazla deneysel amaç için hazır hale getirmek için soğutma suyunun yoğunlaştırıcıdan akmasına izin verilir. Daha sonra güç bir sonraki seviyeye çıkarılır ve ısı borusu performansı için test edilir. Deneysel prosedür farklı ısı girişleri (30, 40, 50, 60 ve 70 W) ve farklı boru eğimleri (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°) yatay olarak tekrarlanır ve gözlemler kaydedilir. Yoğunlaştırıcıdan çıkan ısı transfer hızı, yoğunlaştırıcı akışına bir enerji dengesi uygulanarak hesaplanır. Isı borusunun iç tarafındaki vakum basıncı, ısı borusunun kondansatör ucuna tutturulmuş vakum ölçer ile izlenir.

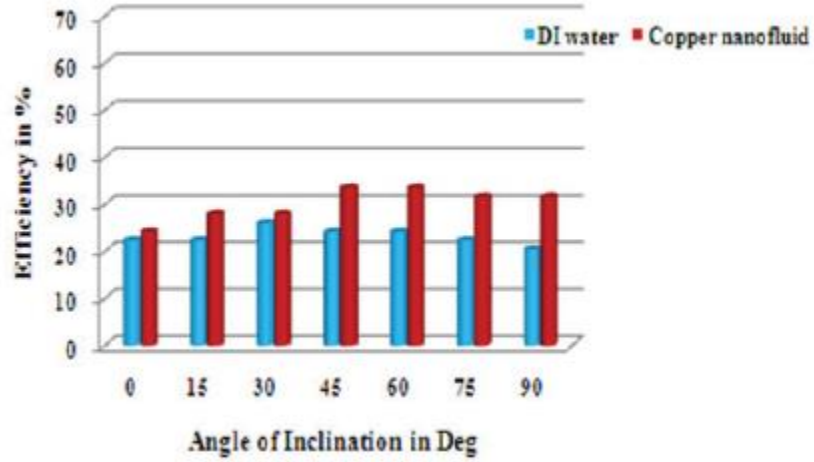


Şekil 3.64. Deney düzeneği (Senthilkumar *et al.* 2012)



Şekil 3.65. Isı borusundaki termokupl yerleşimi (Senthilkumar *et al.* 2012)

Isı borusunun ısı verimi, yoğunlaştırıcı kısmındaki yoğunlaştırıcı sıvısının soğutma kapasitesi oranının ve buharlaştırıcı bölümünde sağlanan gücün oranı ile hesaplanır. Şekil 3.66'dan ısı borusunun ısı verimliliğinin, ısı borusunun yatay pozisyonuna göre DI su için 30° ve bakır nanoakışkan için 45° 'ya kadar eğim açısının artan değerleri ile arttığı görülmektedir. Sadece fitilin kılcak hareketinden değil, yerçekimi kuvvetinin de buharlaştırıcı bölümü ile yoğunlaştırıcı bölümü arasındaki çalışma akışkanının akışında önemli bir etkisi vardır. Tersine, ısı borusunun eğim açısı DI suyu için 30° ve bakır nanofluid için 45° 'yi aştığında, ısı borusu ısı verimliliği düşmeye başlar. Bu, yoğunlaştırıcı içinde daha yüksek oranda sıvı film oluşumu nedeniyle ısı direncin artmasına neden olur. Bakır nanoakışkanda bulunan bakır nanopartiküllerinin, daha yüksek ısı kapasitesi ve daha yüksek çalışma sıvısı ısı iletkenliği nedeniyle ısı transferinin artırılması üzerinde önemli bir etkisi vardır. Böylece ısı borusu ısı verimi, nanoakışkan kullanıldığında su kullanıma kıyasla artar. Bu analizden, bakır nanoakışkan çalışma sıvısı olarak kullanıldığında DI su kullanıma kıyasla, ısı borusunun ısı veriminin yaklaşık %10 arttığı bulunmuştur.



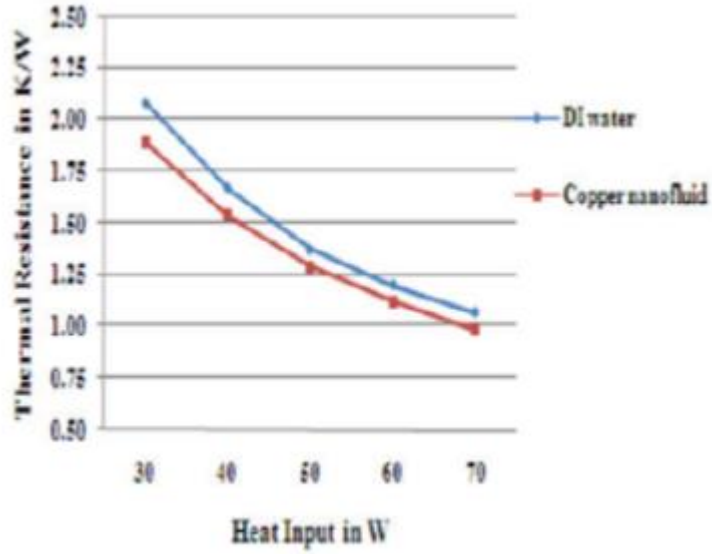
Şekil 3.66. 30 W ısı girişinde farklı eğim açılarında ısı borusu verimliliğinin değişimi (Senthilkumar *et al.* 2012)

Isı borusunun termal direnci R aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$R = \frac{(T_e - T_c)}{Q} \quad (3.45)$$

T_e ve T_c buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerindeki ortalama duvar sıcaklıkları, Q ısı giriş gücüdür.

Isı borusunun ısı direnci, hem artan eğim açısı değerleri hem de artan ısı girdisi ile her iki akışkan için de azalmaktadır (Şekil 3.67). Düşük ısı girdisinde, buharlaştırıcı bölümünde bulunan katı sıvı film nedeniyle her iki ısı borusunun ısı direnci yüksektir. Isı yükü arttığında, bu ısı dirençler hızla minimum değerlerine ulaşır. Nanoakışkanların ısı direnci her zaman DI sudan yaklaşık %10 daha azdır. Nanoakışkanlar kullanarak bir ısı borusunun ısı transferi artışının sebebi sadece nanoakışkanların termo fiziksel özelliklerinden değil, aynı zamanda buharlaşma bölgesinde nanopartiküller tarafından üretilen ince gözenekli kaplama tabakasının oluşumundan da kaynaklanmaktadır. Nanopartiküller tarafından oluşturulan kaplama tabakası temas açısını azaltarak ve yüzey pürüzlülüğünü artırarak yüzey ıslanabilirliğini artırır, bu da kritik ısı akışını artırır ve nanoakışkanlar kullanılarak ısı borusunun ısı direncini önemli ölçüde azaltılır.



Şekil 3.67. 30 °lik eğim açışında ısı borusunun ısıl direnci (Senthilkumar *et al.* 2012)

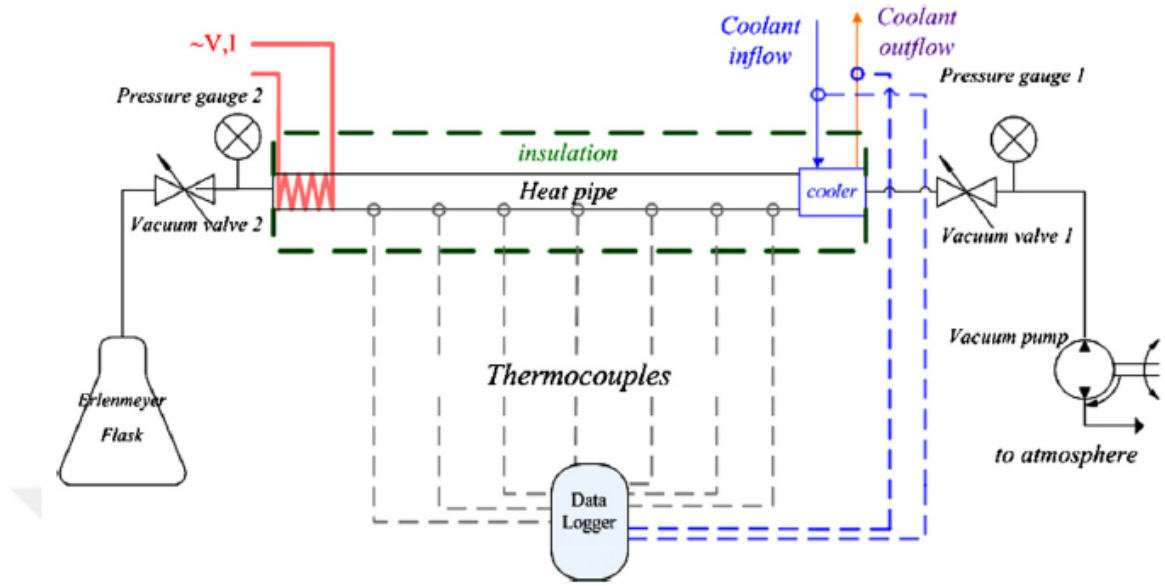
Çizelge 3.1. Isı borusu özellikleri (Senthilkumar *et al.* 2012)

Hazne malzemesi	Bakır
Fitel malzemesi	Paslanmaz çelik
Toplam boru uzunluğu	0.6 m
Buharlaştırıcı uzunluğu	0.15 m
Adyabatik uzunluk	0.3 m
Yoğunlaştırıcı uzunluğu	0.15 m
Borunun dış çapı	$20 \times 10^{-3} \text{m}$
Borunun iç çapı	$17.6 \times 10^{-3} \text{m}$
İnç başına örgü sayısı	60
Tel sayısı/m	2365
Katman sayısı	2
Kondenser dış çapı	0.036 m
Kondenser iç çapı	0.03 m
Kondenserdeki su akış hızı	0.08 kg / dak

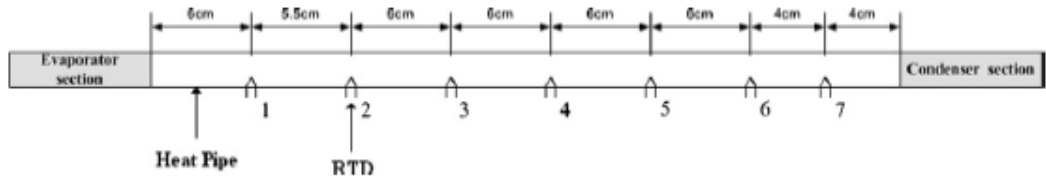
Hajian *et al.* (2012), nanoakışkanların hem geçici hem de sabit durumlarda orta büyüklükte silindirik örgülü ısı borusunun ısıl performansı üzerindeki etkileri üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır.

Isı borusunun 4.07 mm boru kalınlığı ile, uzunluğu ve dış çapı sırasıyla 1000 mm ve 33.5 mm'dir. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerinin uzunlukları sırasıyla 200 mm ve 250 mm'dir. Fitol sekiz adet 30x30 kare desenli örgü ağından yapılmıştır. Fitol kalınlığı 3,7 mm'dir ve gözenekliliği 0,94 olarak ölçülmüştür. Boru, fitil ve kapaklar paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Bununla birlikte, su ve paslanmaz çeliğin kombinasyonu normalde yoğunlaşmaz bazı gazların oluşmasına neden olabilir. Paslanmaz çelik ısı borusu, kısa süreli önemli miktarda yoğunlaştırılmaz gaz üretmeden DI-su nanoakışkanlarında ve DI su da kullanılabilir. Fitilin boruya yerleştirilmesinden sonra, tüm boru, fitil ve kapaklar trikloroetan, DI-su ve metanol ile durulanmıştır. Korozyona karşı ısı borusu direncini arttıran ısı borusu pasivasyonu, DI-suda nitrik asit %60 çözeltisi ile gerçekleştirilmiştir. Isı borusuna enjekte edilecek gerekli çalışma sıvısı miktarını hesaplamak için DI-su yoğunluğu dikkate alınmıştır.

Deney düzeneğinde ısı borusu, elektrikli ısı kaynağı, konvektif ısı alıcısı, termokupllar, izolasyonlar, basınç göstergeleri ve sıcaklık veri kaydedicisi bulunmaktadır (Şekil 3.68). Isı kaynağı ünitesi olarak elektrikli ısıtıcılar kullanılmıştır ve buharlaştırıcı bölümündeki borunun etrafına sıkıca tutturulmuştur. Elektrikli ısıtıcılar, yanmaz bir yalıtıcı ve daha sonra bir polimerik yalıtıcı ile yalıtılmıştır. Isı kaynağı bir AC güç kaynağına bağlanmış ve yaklaşık 600 W maksimum ısı oranı sağlayabilmektedir. Yoğunlaştırıcı bölümüne bir soğutma bloğu takılmıştır. Soğutucu hacimsel akış hızını ölçmek için soğutma bloğunun çıkışına bir rotametre monte edilmiştir. Soğutucu sıcaklığının artışı ölçmek için soğutma bloğunun giriş ve çıkışına iki termokupl yerleştirilmiştir.. Soğutma bloğu iki duvardan yapılmıştır ve aralarında yalıtkan olarak poliüretan köpük ile doldurulmuştur. Termokupllar ısı borusunun dış yüzeyine yedi noktadan tutturulmuştur (Şekil 3.69). Adyabatik kısımdaki ısı kaybını önlemek için, ısı borusunun bu kısmı mükemmel bir şekilde yalıtılmıştır.



Şekil 3.68. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Hajian *et al.* 2012)

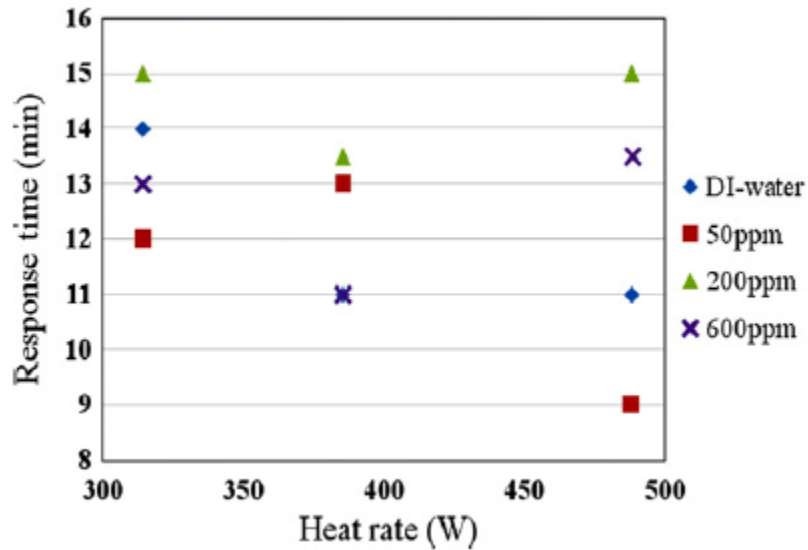


Şekil 3.69. Termokuplların ısı borusu üzerinde yerleşimi (Hajian *et al.* 2012)

DI-su nanoakışkanlarındaki gümüş, Ag iyonlarının indirgenmesinden oluşan kimyasal bir yöntemle üretilmiştir. Bu araştırmada 50, 200 ve 600 ppm gibi değişik konsantrasyonlarda üretilip, kullanılmıştır. Diğer katkı maddelerinin istenmeyen etkileri olmadan sadece ısı borusu performansı üzerindeki nanopartikül etkilerini araştırmak için hiçbir yüzey aktifleştirici madde kullanılmamıştır. Nanoakışkanlarda hiçbir yüzey aktifleştirici madde bulunmadığından, nanopartiküller arasındaki van der Waals kuvvetleri onları birbirine yapıştırır ve daha büyük Ag parçacıkları kütlesi oluşur, bu nedenle kısmi konglomerasyon ve sedimentasyon kaçınılmazdır. Şekil c, nanoakışkan içinde asılı nanopartiküllerin TEM görüntüsünü gösterir. Isı borusuna nanoakışkanların enjeksiyonundan önce, nanopartikül kütlelerini ayırmak ve nanoakışkaları homojenleştirmek için yaklaşık 15 dakika boyunca ultrasonik bir banyoya konulmuştur.

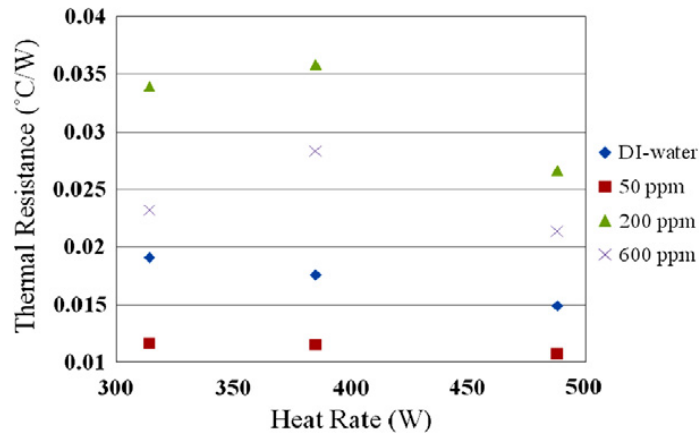
Isı borusunun ısı performansını değerlendirmek için, yüzeyindeki sıcaklık dağılımları ölçülmelidir. Performans testi için ısı borusuna 314 W, 385 W ve 488W ısı oranları uygulanmıştır. Bu ısı hızları, ısı kaynağı girişleri olarak 160 V, 180 V ve 200 V gerilimler uygulanarak üretilmiştir. Soğutma sıvısı hacimsel akış hızları, tüm deneyler için 1000 cc / dakikaya ayarlanmıştır. Sıcaklık verileri okumaları hem geçici hem de sabit çalışma durumlarını içermiştir ve ısı borusu işlemleri sırasında periyodik olarak yapılmıştır.

Orta boy silindirik paslanmaz çelik örgülü ısı borusunun geçici ve kararlı durum ısı performansları, hem çalışma sıvıları olarak gümüş kullanan DI su nanoakışkanı ile hem de DI-su ile deneysel olarak araştırılmıştır. Isı borusunun kararlı durumunu ve geçici davranışını tanımlamak için ısı direnç ve tepki süresi kullanılmıştır. Tepki süresi, ısı borusunun dış yüzey sıcaklığındaki değişime göre tanımlanmıştır (Şekil 3.70).



Şekil 3.70. Isı borusu tepki süresi (Hajian *et al.* 2012)

Deneyler, 500 W'dan daha az ısı oranları altında gerçekleştirilmiştir. Nanoakışkanlar, 50, 200 ve 600 ppm konsantrasyonlarda kullanılmıştır. 50 ppm nanoakışkan kullanılarak, ısı borusunun ısı direnci ve tepki süresi DI-suya kıyasla sırasıyla %30 ve yaklaşık %20 oranında azalmıştır (Şekil 3.71)

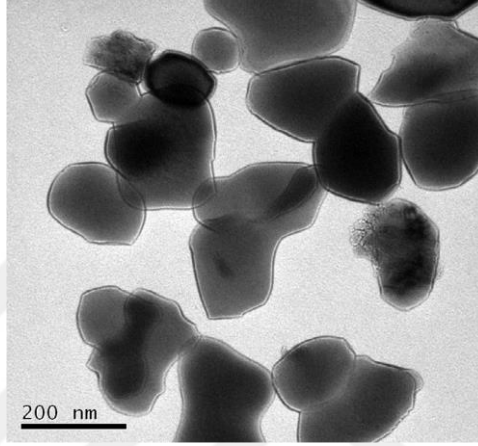


Şekil 3.71. Isı borusunun kararlı durum ısı direnci (Hajian *et al.* 2012)

Ayrıca, hem DI-su hem de nanoakışkanın kararlı durum performansı, yaklaşık 500 W gibi daha yüksek ısı oranlarında daha iyidir. Çalışma sıvısı olarak 50 ppm nanoakışkan kullanıldığında, DI-su ile karşılaştırıldığında ısı borusunun ısı performansını artmıştır ancak daha fazla konsantrasyona sahip nanoakışkanlarda azalmıştır. Nanoakışkan konsantrasyonunun ısı borusu performansı üzerindeki ters etkilerinin gözlemlenmesini haklı çıkarabilecek bazı olası nedenler sunulmuştur. Hiçbir yüzey aktifleştirici madde kullanılmaması, kısmi konglomerasyon ve sedimantasyona ve sonuç olarak, nanoakışkan konsantrasyonunun değişmesi ısı borusu işleminin kararsızlığına neden olmuştur. Bu açıdan, DI-su ile ısı borusu çalışması daha kararlıdır. Kararlılık sorununu çözerek, seyreltik nanoakışkanlar ısı boruları için daha etkili çalışma sıvıları gibi görünmektedir. Bununla birlikte, yüzey aktifleştirici madde kullanılması, partiküllerin birikmesini önleyebilir, ancak ısı borusu ısı performansını muhtemelen bozabilir. Bu nedenle, bu çalışmanın devamında, yüzey aktifleştirici maddeler dışında nanoakışkanların kararlılığı için araştırmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca, daha seyreltik nanoakışkanlar kullanılarak daha iyi performanslar elde edilebilir. Bu nedenle, bu çalışmanın devamında, bu tür çalışma sıvıları ısı borularında kullanılmalıdır.

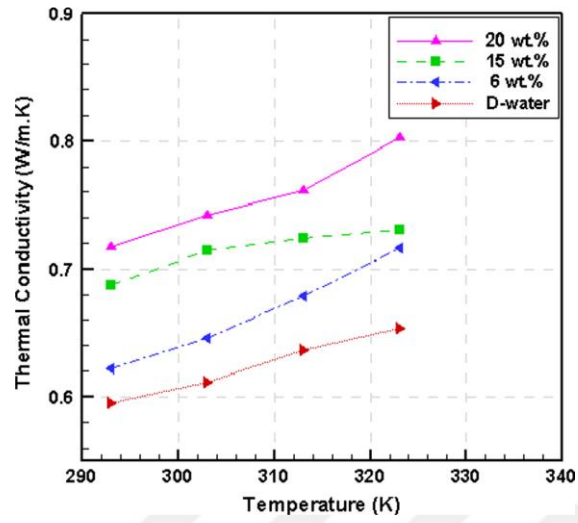
Ghanbarpour *et al.* (2015b), yaptıkları çalışma ile Al_2O_3 nanoakışkanının soğutma uygulamalarında örgü ısı borusunun ısı performansını üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

İki aşamalı yöntemle üretilen yüzey aktifleştirici madde olarak Silan içeren su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanı, pH'nın 9.1'e ayarlanarak üretilmiştir. Nanopartikül boyutu ve morfolojisinin transmisyon elektron mikroskobu (TEM) analizi yapılmış ve Şekil 3.72'de gösterilmiştir. Nanoakışkanın Şekil 3.72'de gösterildiği gibi, 100 nm-200 nm aralığında partikül boyutuna sahip poligonik morfolojilere sahip olduğu gözlenmiştir.

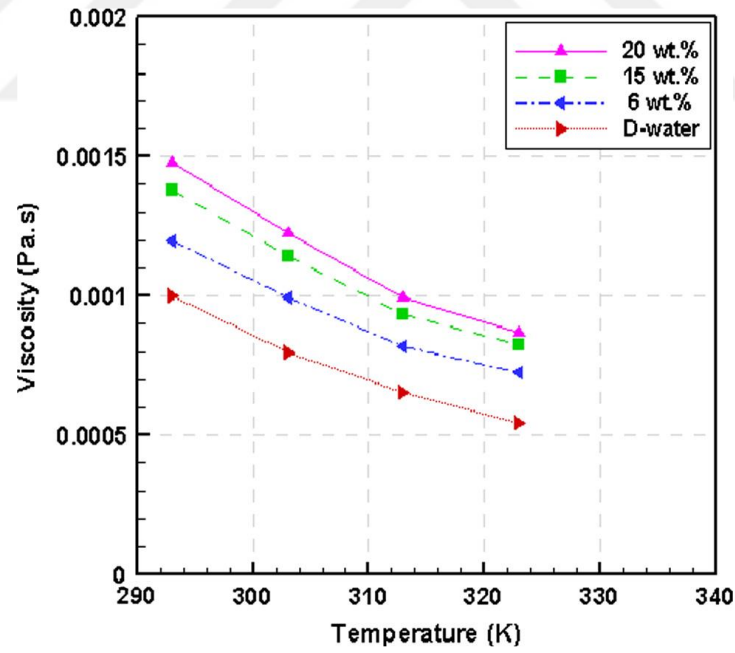


Şekil 3.72. Al_2O_3 TEM görüntüsü (Ghanbarpour *et al.* 2015b)

Şekil 3.73 ve 3.74, Al_2O_3 nanoakışkanının farklı konsantrasyonlarda ve sıcaklıklarda ısı iletkenliğini ve viskozitesini göstermektedir. Sonuçlar, nanoakışkanın ısı iletkenliğinin ve viskozitesinin, nanopartiküllerin konsantrasyonuna ve sıcaklığa büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Nanoakışkanın ısı iletkenliğinin hem konsantrasyon hem de sıcaklık artışlarıyla arttığı, viskozitesinin konsantrasyon artışı ile önemli ölçüde arttığı, ancak sıcaklık artışı ile azaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlardan elde edilen önemli bulgu, nanoakışkanın viskozitesindeki artışın, baz sıvı ile karşılaştırıldığında, nanoakışkanın ısı iletkenlik artışından iki kat daha fazla olduğudur.



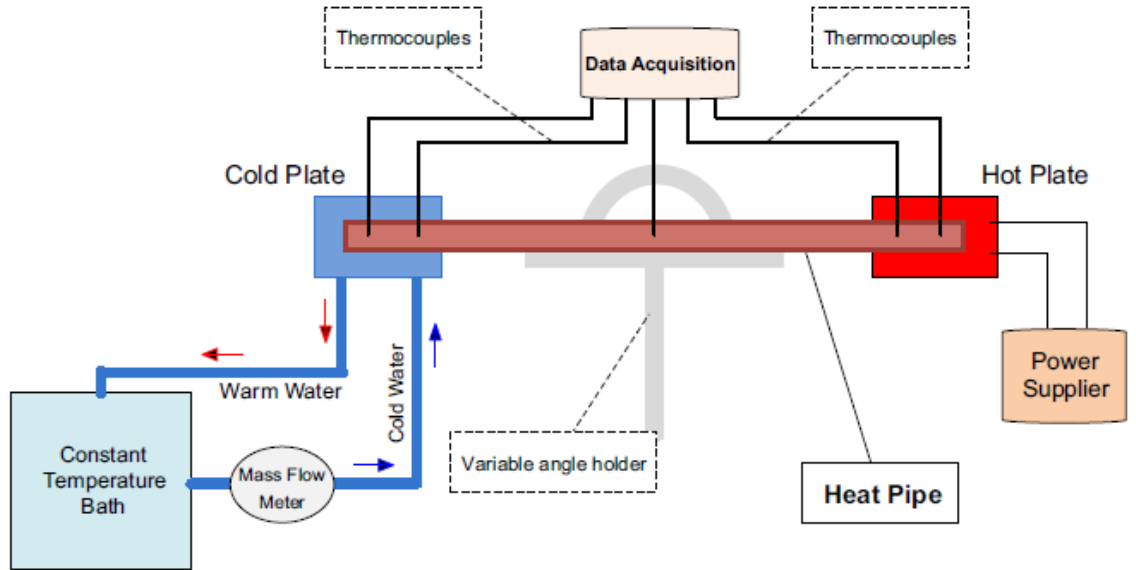
Şekil 3.73. Farklı konsantrasyonlardaki Al_2O_3 nanoakışkanının ısı iletkenliği (Ghanbarpour *et al.* 2015b)



Şekil 3.74. Farklı konsantrasyonlardaki Al_2O_3 nanoakışkanının viskozitesi (Ghanbarpour *et al.* 2015b)

Deney düzeneği Şekil 3.75'de gösterildiği gibi, sabit sıcaklık banyosu ve akış ölçerli bir soğutma sistemi, güç tedarikçisi, veri toplama sistemi ve ana test bölümünden oluşmaktadır. Isı borusu 20 cm uzunluğunda ve duvar kalınlığı 0.71 mm olan bakır bir

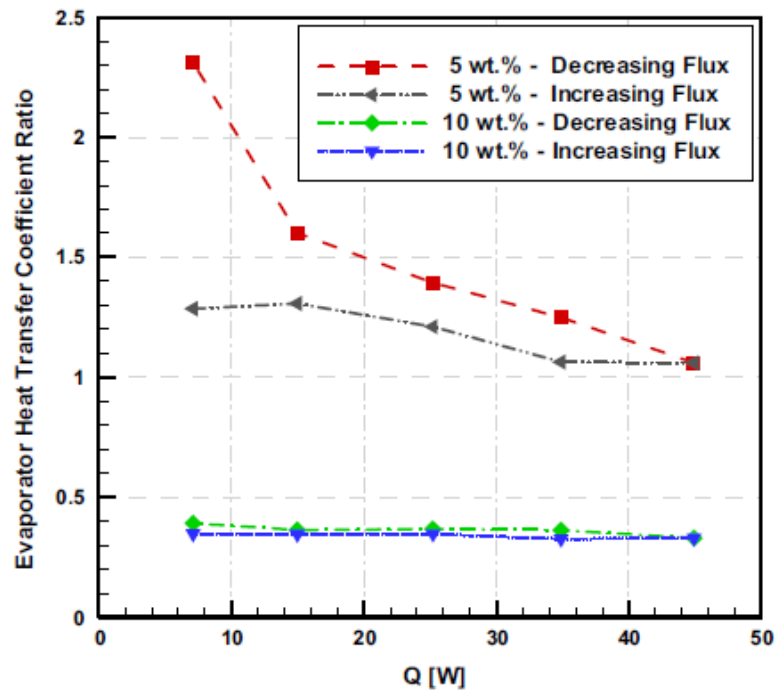
borudan yapılmıştır. Her ısı borusu, iç boruya dağıtılmış 2 kat 150 örgü fitil içerir. Örgü fitilin açıklık boyutu ve tel çapı sırasıyla 0.106 mm ve 0.063 mm'dir. Isı borusunun buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümleri sırasıyla 50 mm, 100 mm ve 50 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümünde, elektrikli bir kartuş ısıtıcı, ısı borusuna bağlı bakır ısıtma bloklarına eşit ısı akışı sağlar. Yoğunlaştırıcı bölümü, bu bölümde sabit soğutma koşullarını korumak için sırasıyla 288 K ve 51 kg / s sıcaklık ve akış hızında sabit sıcaklıkta bir soğutma banyosunda sirküle edilerek soğutulmaktadır. Isı borusu yüzeyinin sıcaklıkları, ikisi buharlaştırıcı bölümünün yüzeyine, biri adyabatik bölümün yüzeyine ve geri kalan ikisi kondansatör bölümünün yüzeyine monte edilen beş K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Testler sırasında giriş gücü monoton olarak artırılıp azaltılarak, yaklaşık 20 dakika sonra kararlı duruma ulaşılmıştır.



Şekil 3.75. Deney düzeneği (Ghanbarpour *et al.* 2015b)

%5 ve %10'luk kütle konsantrasyonlarına sahip su bazlı Al_2O_3 nanoakışkanı, buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı ve ısı borusunun ısı direncini araştırmak için kullanılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasındaki sıcaklık düşüşü ve dolayısıyla bir ısı borusunun ısı direnci, ısı performansını değerlendirmek için özellikle önemlidir. Isı borusunun toplam ısı direnci, buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı, buharlaştırıcıdaki sıcaklık farkları hesaplanır.

Artan ve azalan ısı akıları için nanoakışkan ile su arasındaki buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı oranları Şekil 3.76'da gösterilmektedir. Görülebileceği gibi, ağırlıkça %5 Al_2O_3 nanoakışkan kullanılarak ısı borusunun ısı transfer katsayısı hem artan hem de azalan basamaklar için artmıştır. Buna karşılık, artan ve azalan basamaklar için ağırlıkça %10 Al_2O_3 nanoakışkan ile ısı borusu için buharlaştırıcı ısı transfer oranları düşer, bu durum bu konsantrasyonda Al_2O_3 nanoakışkan kullanılmasının ısı borusu performansı için yararlı olmadığını gösterir. 10 wt. % Al_2O_3 nanoakışkan konsantrasyonunun ısı borusunun performansını düşürmesinin sebebi; buharlaştırıcının kalın yüzey yapısı ve viskozitenin %5 Al_2O_3 konsantrasyonuna göre iki kat daha fazla olmasıdır. Isı borusunun termal performansı, damıtılmış suyla karşılaştırıldığında ağırlıkça %5 Al_2O_3 nanoakışkan kullanılarak artarken, ağırlıkça %10 Al_2O_3 nanoakışkan ile azalır.



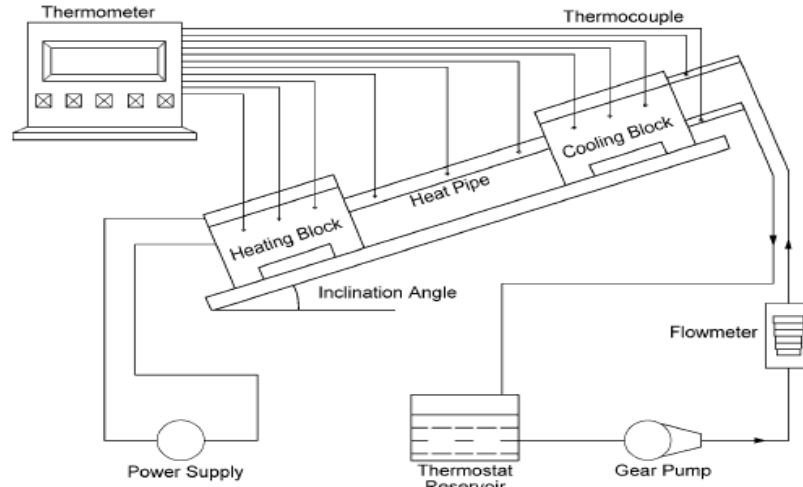
Şekil 3.76. Nanoakışkan ve su arasındaki buharlaştırıcı ısı transfer katsayısı oranları (Ghanbarpour *et al.* 2015b)

Artan ve azalan ısı akıları için ısı borusunun ısı performansı bir önceki adımdaki ısı akısından önemli ölçüde etkilenir. Isı borusunun ısı direnci su ve %10 Al_2O_3

nanoakışkan ile azalan ısı akısıyla artmaktayken, %5 Al_2O_3 nanoakışkanı ile azalmaktadır.

Sonuçlar göstermiştir ki %5 Al_2O_3 nanoakışkanı ile artan ve azalan ısı akıları için farklı ısı girişlerinde ısı borusunun etkili ısıl iletkenliği %30 dan %130 a çıkmaktadır, %10 Al_2O_3 nanoakışkanı ile ise %67 den %63 e düşmektedir.

Tsai *et al.* (2004), silindirik örgü fitil ısı borusu ile ilgili bir deney yapmışlardır. Monodisperslenmiş altın nanopartiküller, sulu hidrojen tetrakloratın (HAUCl_4 , Aldrich Chemical), trisodyum sitrat ve tannik asit (Aldrich Chemical) ile standart bir prosedür kullanılarak indirgenmesiyle hazırlanmıştır. Bakır borunun çapı ve uzunluğu sırasıyla 6 ve 170 mm'dir. İç boruya 200 gözenekli elek(örgü) dağıtılmıştır. Şekil 3.77'de gösterilen sistem, ısı borusunun termal performans ölçümü için kullanılmıştır. Isı borusundaki yerel sıcaklık, izole edilmiş dokuz tip T termokupl ile ölçülmüştür. Buharlaştırıcıya üç termokupl, adyabatik bölüme üç termokupl ve yoğunlaştırıcı bölümüne üç termokupl eşit olarak bağlanmıştır. Buharlaştırıcı bölümünün ve yoğunlaştırıcı bölümünün uzunluğu sırasıyla 30 ve 50 mm'dir. Tüm termokupllar bir kuvars termometreye karşı kalibre edilmiştir. Ölçümlerde ısı kaynağı olarak iki ısıtıcı çubuğu (maksimum 90 W) kullanılmıştır. Böylece, ısıtma yükü (Q) ve sıcaklık farkı ($\Delta T = T_{\text{buharlaştırıcı}} - T_{\text{yoğunlaştırıcı}}$) ölçülmüş ve ısıl direnç (R), $R = \Delta T / Q$ denklemi ile hesaplanmıştır. Mevcut çalışma için, ısı borusu ölçüm sırasında dikey olarak sabitlenmiştir. ΔT 'ye ek olarak, $\Delta T_e = T_{\text{buharlaştırıcı}} - T_{\text{adyabatik}}$ ve $\Delta T_c = T_{\text{adyabatik}} - T_{\text{yoğunlaştırıcı}}$ sıcaklık farklılıkları da hesaplanmıştır. Buharlaştırıcı bölümünden adyabatik bölüme, $R_{\text{buharlaştırıcı}}$ ve adyabatik bölümden yoğunlaştırıcı bölümüne, $R_{\text{yoğunlaştırıcı}}$ ya karşı ısıl direnç, sırasıyla $\Delta T_e / Q$ ve $\Delta T_c / Q$ ile hesaplanır.



Şekil 3.77. Nanoakışkan ile ısı borusunun ısı performansını ölçmek için sistemin şematik görünüşü (Tsai *et al.* 2004)

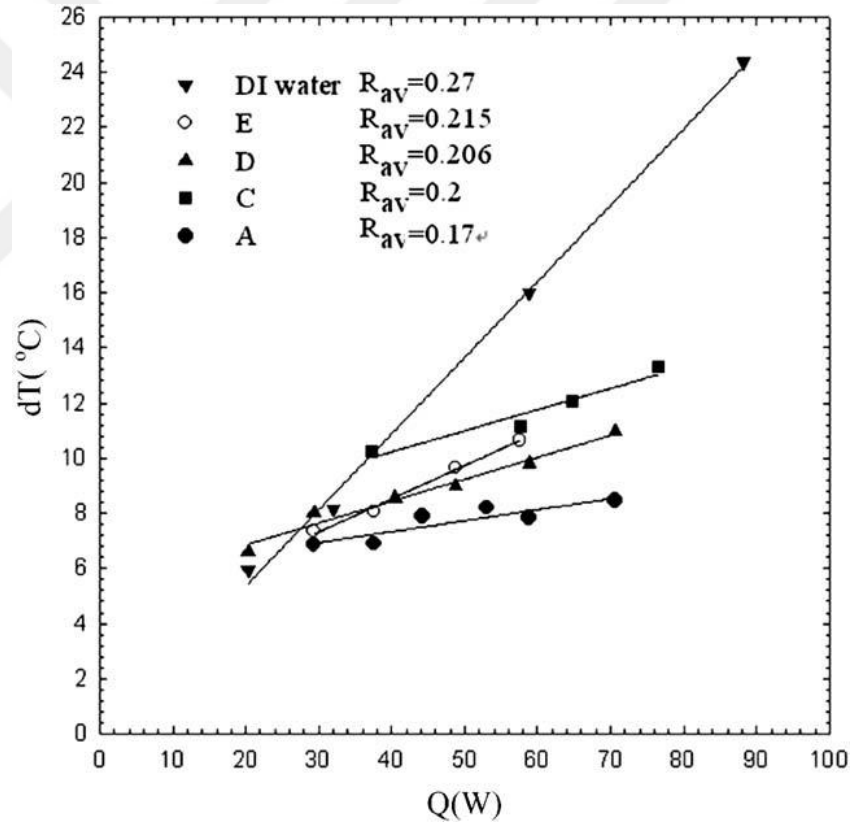
Çizelge 3.2. Farklı koşullarda hazırlanan malzemelerin konsantrasyonu (Tsai *et al.* 2004)

Volumes of materials used in different synthesis conditions			
Condition	Na ₃ citrate (ml)	Tannic acid (ml)	HAuCl ₄ (ml)
A	0.2	2.5	3
B	0.2	5	6
C	3	0.1	1
E	3	2.5	6
G	3	0.1	3

Farklı koşullarda hazırlanan altın nanopartikülleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Şekil 3.78, nanopartikül büyüklüğünün, örgü ısı borusunun ısı performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Test edilen ısı borusunda 200 gözenekli bir tel ekran kullanılmıştır. Koşul B ile hazırlanan nanoparçacıklarle deneyler için verilerin sonuçlar gösterilmemiştir çünkü bu çözeltinin nanopartikülleri 6 gün sonra geri dönüşümsüz çöktürülmüştür. A, C, D ve E koşulları ile hazırlanan nanopartikül çözeltisi içeren ısı borusunun ısı direnci sırasıyla 0.17, 0.2, 0.206 ve 0.215°C / W’dir. A koşuluyla hazırlanan nanoakışkan kullanılarak, ısı borusunun ısı direnci DI su kullananlara göre %37 daha düşüktür. C, D ve E koşulları ile hazırlanan nanoakışkan kullanılarak, ölçülen ısı dirençler DI su kullananlardan daha düşüktür ve ısı borusunun ısı direncini azaltma

yüzdesi sırasıyla %25, %23 ve %20'dir. Çizelge 3.3, E, D, C ve A sentez koşulları ile hazırlanan nanoakışkanlar için $R_{\text{buharlaştırıcı}}$ ve $R_{\text{yoğunlaştırıcı}}$ değerlerinin listesini gösterir. Çizelge 3.3'ten anlaşıldığı gibi ısı borusunun ısıl direncindeki büyük azalma, buharlaştırıcı kısmından adyabatik bölüme olan ısıl dirençtir. E, D, C ve A koşullarındaki $R_{\text{buharlaştırıcı}}$ değeri sırasıyla 0.085, 0.08, 0.066 ve 0.055 °C / W'dir. DI su kullanan $R_{\text{buharlaştırıcı}}$ değeri ile karşılaştırıldığında, azalma yüzdesi %33 ila %56 arasında değişmektedir. $R_{\text{buharlaştırıcı}}$ 'taki bu azalma yüzdesi $R_{\text{yoğunlaştırıcı}}$ 'dakinden daha büyüktür. Test ısı borusunda nano-akışkan kullanılması durumunda $R_{\text{yoğ}}$ 'da sadece %7 ila %20 azalma görülmüştür.



Şekil 3.78. Farklı koşullara göre hazırlanan nanoakışkan ile ısı borusunun ısıl direncinin ölçülen değerleri (Tsai *et al.* 2004)

Çizelge 3.3. Farklı sentez koşullarındaki ölçülen $R_{\text{buharlaştırıcı}}$ ve $R_{\text{yoğunlaştırıcı}}$ (Tsai *et al.* 2004)

Working Fluid	$R_{\text{evap}} (^{\circ}\text{C}/\text{W})$	$R_{\text{cond}} (^{\circ}\text{C}/\text{W})$
DI water	0.126	0.144
E	0.085	0.13
D	0.08	0.126
C	0.066	0.134
A	0.055	0.115

Isı borusunun ısı direncinin azalma nedeni şu şekilde açıklanabilir: Isı borusunun ısı direncinin büyük kısmı sıvı-katı arayüzünde buhar kabarcığı oluşumundan kaynaklanır. Daha büyük bir kabarcık çekirdeklenme boyutu, ısıya katı yüzeyden sıvıya transferini önleyen daha yüksek bir ısı direnci oluşturur. Süspansiyon halindeki nanopartiküller, kabarcık oluşumu sırasında buhar kabarcıklarını bombalamaya meyillidir. Bu nedenle, buhar kabarcığının çekirdeklenme boyutunun, aslı nanopartiküllere sahip sıvı için, onlarsız olandan çok daha küçük olması beklenir. Test ısı borusunda DI suyunun nanoakışkan ile değiştirilmesiyle R_{yog} 'da bir azalma gözlemlenebilir.

Sonuç olarak, nanoakışkanın daha yüksek ısı performansları, dikey dairesel örgülü ısı borusundaki geleneksel DI suyunun yerini alma potansiyelini kanıtlamıştır.

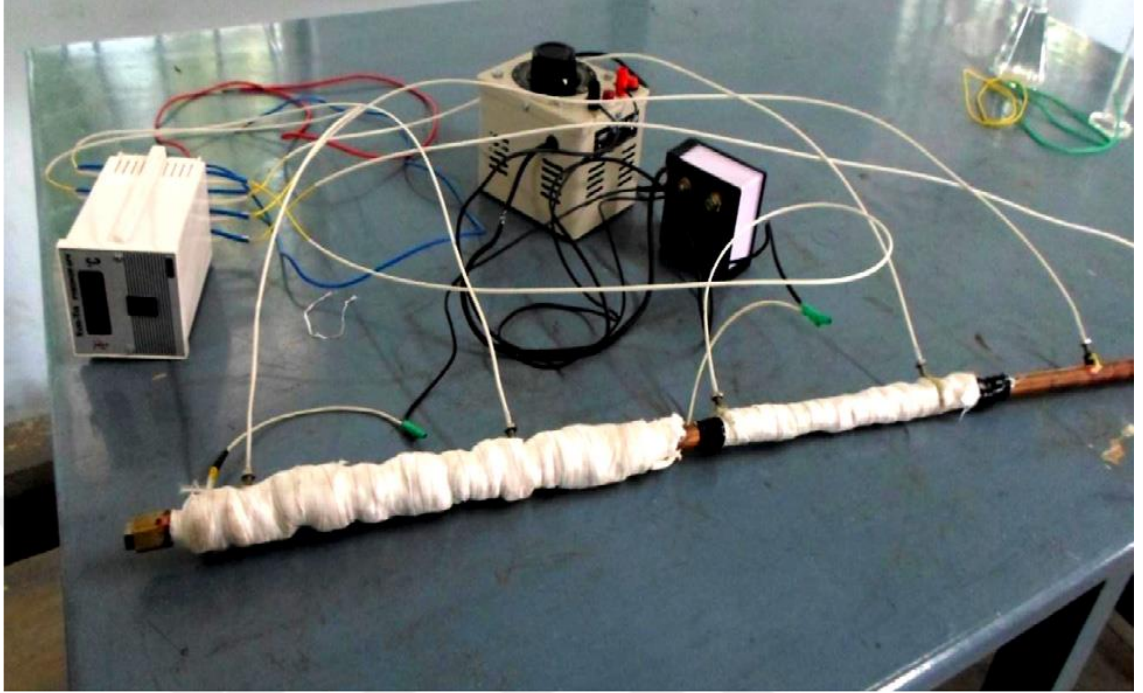
Senthil *et al.* (2016), ısı borusu kullanarak eğimli açıya göre ısı verim ve ısı direnci üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. 9.8 g/cm^3 yoğunluğa sahip ortalama 50 nm boyutunda Al_2O_3 nanopartikülü ısı transferinin özelliklerini belirlemek için Mumbai merkezli bir şirket olan OttoKemi Chemicals Private Ltd.'den elde edilmiştir. Daha sonra, düzgün dağılım ve kararlı süspansiyon elde etmek için 6 saat boyunca %1 hacim konsantrasyonu elde etmek için ultrasonik vibratör kullanılarak su içinde dağıtılmıştır.

Deney düzeneği, 190 mm iç çap ve 210 mm dış çap ile 1100 mm uzunluğunda kalın duvarlı bir bakır borudan oluşur. Şekil 3.79 ve 3.80, deney düzeneğinin ultrasonik banyosunu ve fotoğrafını göstermektedir. Şekil 3.81, ilk 350 mm ve son 350 mm'nin buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri olduğunu gösteren ısı borusunun şematik

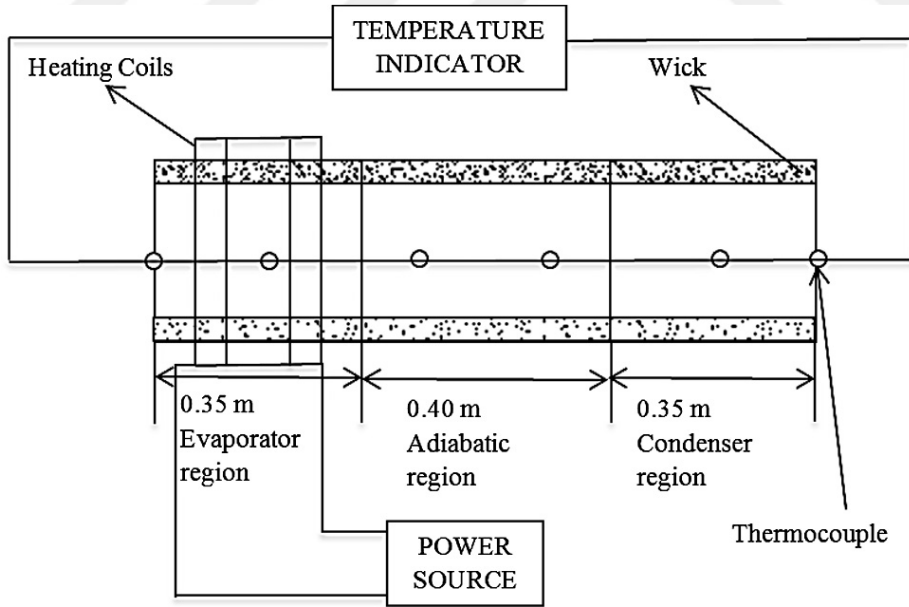
temsilini göstermektedir. Bu bölümler arasındaki 400 mm lik kısma adyabatik bölüm denilir termal olarak yalıtılmıştır. Kurulum 0.000183 m çapında paslanmaz çelikten yapılmış eleklerden oluşmaktadır. Bütün boru, buharlaştırıcı bölümünde doldurulması gereken sıvıya karşılık gelen 40 ml'lik analiz sıvısı ile doldurulur. Belirsizliği ± 0.1 C olan altı sabit termokupl, sabit bir mesafeye yerleştirilerek HP'nin sıcaklık dağılımını belirlemek için kullanılır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerindeki ısı kaybını ihmal ederek, okumalar elektrik gücü uygulanarak ölçülür. 230 V AC beslemeli elektrikli ısıtıcı bobinleri, çalışma sıvısının sıcaklığını arttırmak için buharlaştırıcı bölümü boyunca kullanılır. Tüm düzenleme termodinamik yasalarına uydukça, ısı borusu bobinler tarafından sağlanan ısıyı bakır boruya ve çalışma akışkanına transfer edecektir. Bu, kritik durumlardan kaçınmak için yoğunlaştırıcı tarafından yoğunlaştırılması gereken bakır borunun sıcaklığının artmasına neden olur. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının ortalama sıcaklıklarını ölçmek için eşit olarak yerleştirilmiş iki termokupl kullanılır.



Şekil 3.79. Ultrasonik banyo (Senthil *et al.* 2016)



Şekil 3.80. Deney düzeneğinin fotoğrafı (Senthil *et al.* 2016)

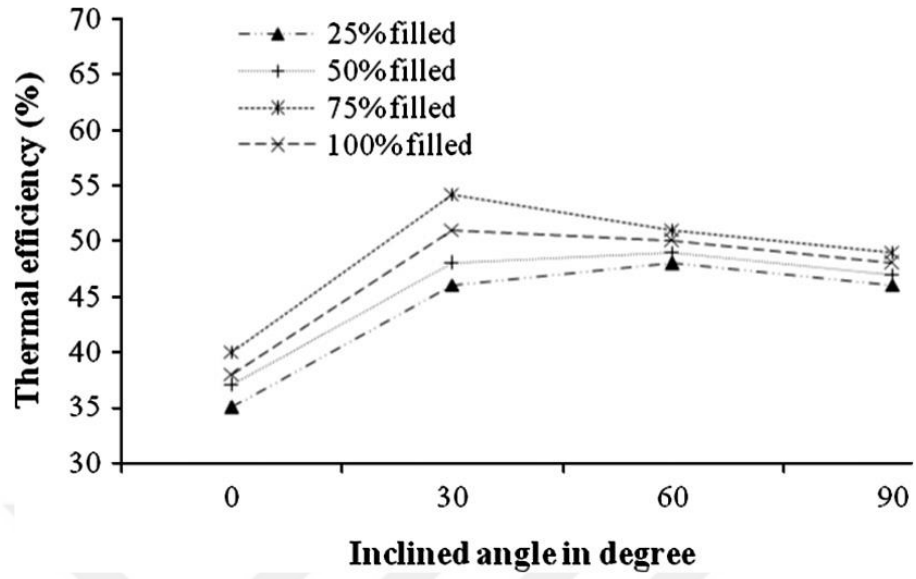


Şekil 3.81. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Senthil *et al.* 2016)

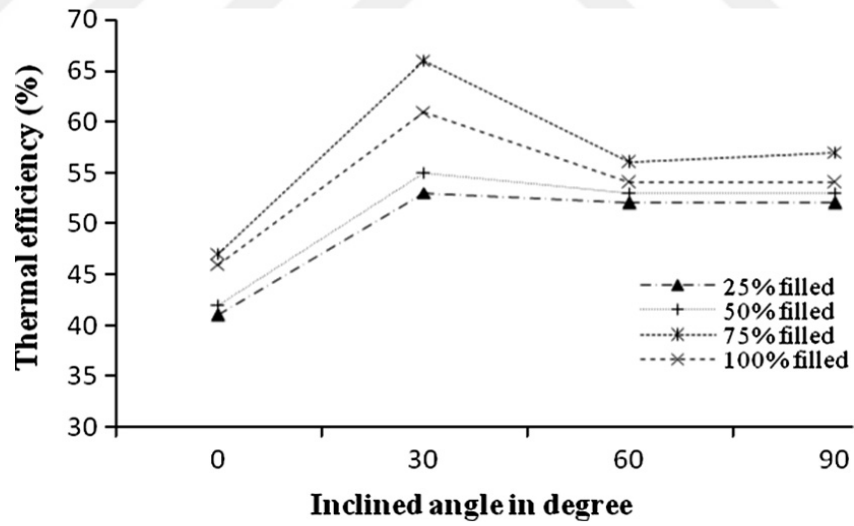
Termokupl ve ısı borusu yerleştirilir ve veri kaydediciler ilgili termokupllara bağlanır. Başlangıçta ısı pompası içindeki çözünmüş gazlar bir vakum pompası kullanılarak boşaltılır. Çalışma sıvısının 10 ml'sinin (%25 doluluk oranı) doldurulmasıyla,

buharlaştırıcı bölümü ısıtıcı bobinleri yoluyla ısı ile beslenir ve sabit durum koşulu sıcaklığı izlenir. Bu prosedür, ısı borusunun buharlaştırıcı bölgesindeki %50, %75 ve %100 oranlarında farklı hacimdeki çalışma sıvıları için tekrarlanır. Isı borusu verimliliği, eğim açısının artmasıyla artar çünkü yerçekimi kuvveti, çalışma akışkanının buharlaştırıcı bölümü ile yoğunlaştırıcı bölümü arasındaki akışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle okumalar 0°, 30°, 60° ve 90°'in farklı eğim açıları için ölçülür ve analiz edilir. Tüm prosedür DI su ve Al₂O₃ nanoakışkanları için yapılmıştır ve okumalar analiz için tablo haline getirilmiştir.

Verimlilik 30° eğimde yüksektir ve oryantasyon nedeniyle bundan sonra kademeli olarak azalır. Koşullara bağlı olarak, bir ısı borusu yatay konumda veya dikey konumda çalıştırılabilir. Bir ısı borusunun yatay konumu için yer çekiminin bir etkisi yoktur. Ancak dikey konumda, yerçekimi ısı borusunun çalışmasına yardımcı olabilir veya buna karşı olabilir. Bir ısı borusunun eğimi iki tipte sınıflandırılır: uygun eğim ve olumsuz eğim. Uygun eğim, yerçekiminin ısı borusu çalışmasına yardımcı olduğu eğim konumudur. Uygun eğimde, yoğunlaştırıcı buharlaştırıcının üzerindedir.. Bu şekilde, yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcıya sıvı dönüşü yerçekimi ile desteklenir. Bu nedenle, kılcal pompalama basıncı daha fazla basınç kaybının üstesinden gelebilir ve bu, ısı borusunun kılcal limit açısından ısı transfer kapasitesini artırır. Diğer tip ters eğimdir. Bu eğim durumunda, buharlaştırıcı yoğunlaştırıcının üzerindedir. Bu nedenle, yoğunlaştırıcıdaki sıvı buharlaştırıcıya geri dönmek için yerçekimi kuvvetinin üstesinden gelmelidir. Bu, kılcal pompalama basıncının üstesinden gelmek için ekstra sürtünme yaratır. Sonuç olarak, ısı borusunun ısı transfer kapasitesi azalır. Bu nedenle, bir ısı borusunun uygun eğim konumunda çalışması tercih edilir.



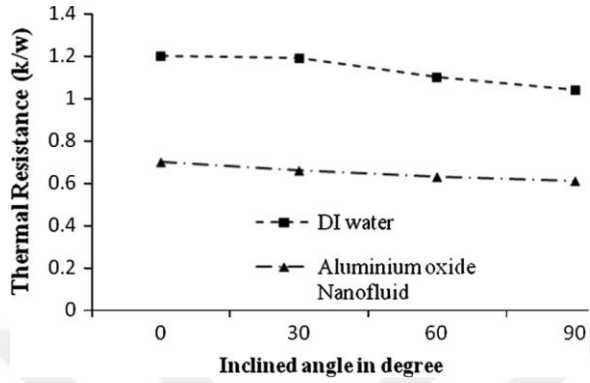
Şekil 3.82. Su kullanan ısı borusu için eğim açısı ve verimliliğin etkisi (Senthil *et al.* 2016)



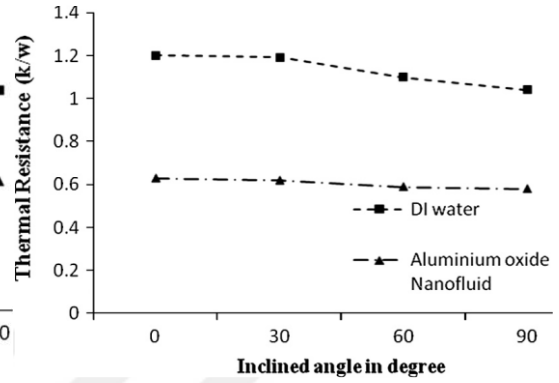
Şekil 3.83. Al_2O_3 nanoakışkanı kullanan ısı borusu için eğim açısı ve verimliliğin etkisi (Senthil *et al.* 2016)

Şekil 3.82 ve 3.83’ de görüldüğü gibi %75 doluluk oranı ve 30° eğimli açı için hem DI suyu hem de Al_2O_3 nanoakışkanı ısı veriminde bir düşüş gösterir.

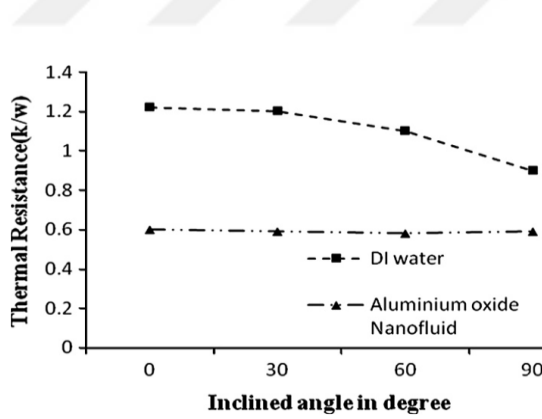
Isı borusunda Al_2O_3 nanoakışkan kullanılarak ısı verimin değeri, DI suyu kullanılarak elde edilen değerden daha yüksektir.



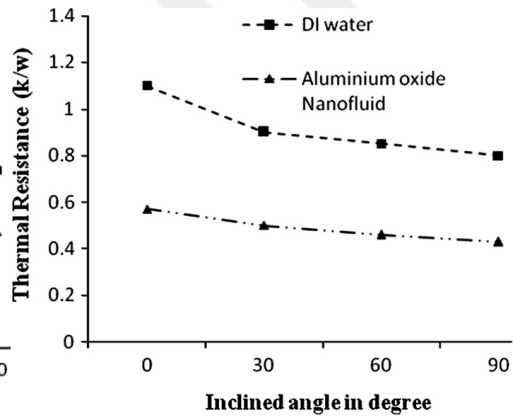
Şekil 3.84. %25 konsantrasyonda eğim açısı ile ısı direncin değişimi (Senthil *et al.* 2016)



Şekil 3.85. %25 konsantrasyonda eğim açısı ile ısı direncin değişimi (Senthil *et al.* 2016)



Şekil 3.86. %25 konsantrasyonda eğim açısı ile ısı direncin değişimi (Senthil *et al.* 2016)



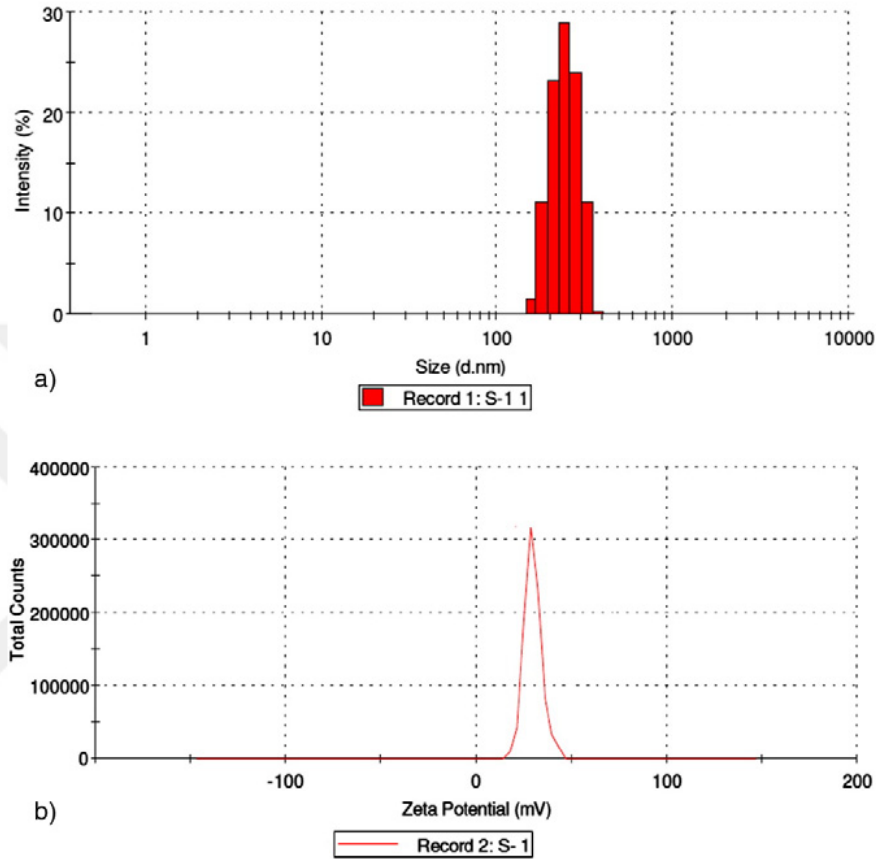
Şekil 3.87. %100 konsantrasyonda eğim açısı ile ısı direncin değişimi (Senthil *et al.* 2016)

Şekil 3.84, 3.85, 3.86, 3.87’de açıkça görülmektedir ki baz sıvıdaki nanopartiküllerin süspansiyonu ısı direnci düşürerek ısı transfer oranında muazzam bir iyileşmeye neden olmaktadır.

Kumaresan *et al.* (2014b), sinterlenmiş örgü fitil ısı borularının ısı performansındaki artışı; çalışma sıvısını, eğim açısını ve ısı girdisini değiştirerek karşılaştırmak için deneysel bir araştırma yapmışlardır.

Yüzey aktifleştirici madde içermeyen CuO / DI su nanoakışkanı iki aşamalı yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Bu çalışmada ticari olarak elde edilen CuO nanopartikülleri kullanılmıştır. Partiküller küresel şekildedir ve maksimum boyut 50 nm'dir. Hazırlanan çözelti, daha iyi stabilite için 45 kHz frekans ile 1 saat boyunca bir ultrasonikatörde tutulur. Şekil 3.88 (a), DI su içinde dağılmış CuO nanopartiküllerinin partikül boyutu dağılımlarını gösterir. Partikül büyüklüğünü bulmak için Scherrer formülü kullanılır ve sonuç partiküllerin büyüklüğünün 39,1 nm'yi aşmadığını göstermiştir. Ayrıca, hazırlanan nanoakışkanı 60 gün boyunca statik olarak tutarak %1.0 kütle konsantrasyonu için bir stabilite testi de yapılmıştır. 60 gün sonra dinamik bir ışık saçılım analizi (Zetasizer Nano ZSMalvern) yapılarak sonuçlardan nanopartiküllerin boyutunun 250 nm civarında olduğu bulunmuştur. Nanopartiküllerin artan boyutu, stabilite süresi boyunca hafif topaklaşmaya bağlı olabileceği düşünülmüştür. Hazırlanan numune 60 gün tutulmuş ve nanopartiküller ile su arasında bir ayırma çizgisi bulunmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, nanoakışkanın stabilitesini sağlamak için Zetasizer tarafından bir Zeta potansiyel testi yapılmış ve Şekil 3.88 (b) 'de gösterilmiştir. Çalışma akışkanının termofiziksel özellikleri, esas olarak ısı iletkenlikteki artıştan ötürü, CuO nanopartiküllerinin baz sıvı içinde dağıtılmasıyla geliştirilebilir. Ayrıca, CuO nanopartiküllerinin eklenmesi, çalışma sıvısının viskozitesini artırır ve daha yüksek viskozite, sıvı akışında daha fazla kısıtlama yaratır. Dolayısıyla, çalışma sıvısının ısı iletkenliği ve viskozitesi deneysel olarak ölçülür. Ağırlıkça %0.5, 1.0 ve 1.5 farklı kütle konsantrasyonlarına sahip CuO / DI suyunun ısı iletkenliği, bir KD2 Pro termal özellikler analizörü (Decagon Devices, Inc., ABD) ile ölçülür. ısı iletkenlik değerindeki artışlar ağırlıkça %0.5, 1.0 ve %1.5 CuO nanoakışkanları için sırasıyla %0.96, 2.37 ve 5.08'dir. Nanoakışkanın dinamik viskozitesini ölçmek için bir Brookfield viskozimetresi kullanılmıştır ve CuO nanopartiküllerinin kütle konsantrasyonu ile arttığı gözlenmiştir. Viskozitedeki artışlar ağırlıkça %0.5, 1.0 ve %1.5 CuO nanoakışkanları için sırasıyla %8.91, 11.67 ve 16.46'dır. Çalışma ortamının

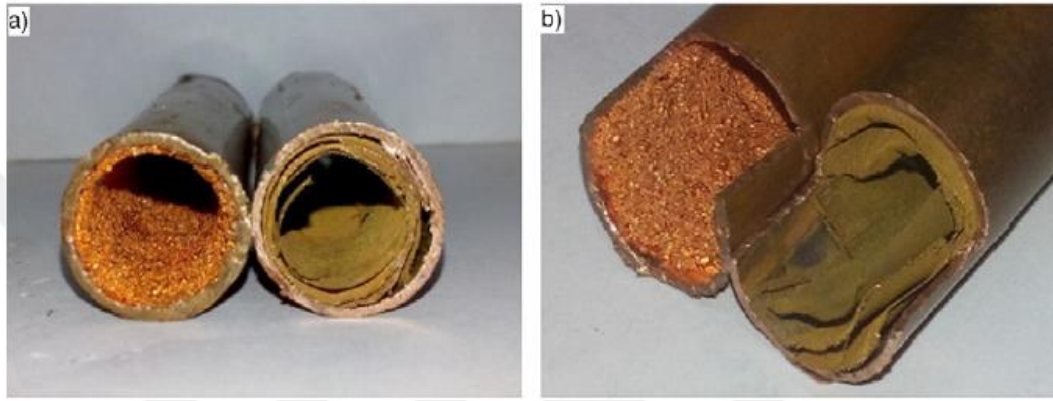
sıcaklığındaki artış, viskoziteyi kademeli olarak azaltır ve 33°C'ye kıyasla 80°C'de ağırlıkça %1.5 CuO / DI su nanoakışkanı için maksimum %54.93 azalma bulunur.



Şekil 3.88. a) partikül boyut dağılımı b) CuO Su nanoakışkanın zeta potansiyel analizi (Kumaresan *et al.* 2014b)

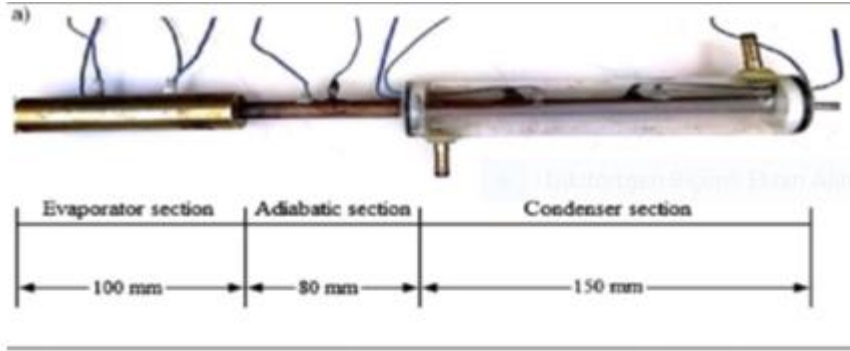
Bu çalışmada kullanılan ısı borusu, 330 mm uzunluğa, 12 mm dış çapa ve 1 mm kalınlığa sahip bakır borudur. Bu çalışmada toplam sekiz ısı borusu kullanılmış, dört ısı borusu sinterlenmiş fitillerle dört ısı borusu ise örgü fitillerle yapılmıştır. Her iki durumda da, bir ısı borusu DI su ve diğer üçü CuO nanoakışkanlar ile doldurulur. Her iki ısı borusunun fitil kalınlıkları 1 mm'lik sabit bir değerde tutulur. Elek örgü fitilleri silindirik bir şekle getirilir ve ısı borusunun iç yüzeyine sıkıca tutturulur, sırasıyla 300 µm ve 10 mm tel çapı ve aralığı olan ince bir paslanmaz çelik yay yerleştirilir. Şekil 3.89, hem sinterlenmiş hem de örgü fitil ısı borularının ayrıntılı enine kesit görünüşünü gösterir. İkisi buharlaştırıcı bölümünde, biri adyabatik bölümde ve geri kalan ikisi yoğunlaştırıcı bölümünde olmak

üzere beş termokupl ısı borusu yüzeyine tutturulmuştur. Yoğunlaştırıcı bölümü, hava soğutmasına kıyasla ısı borusundan daha fazla miktarda ısı çıkarmak için sıvı su ile soğutulur. Hem sinterlenmiş hem de örgü fitil ısı borularında doldurulan çalışma basıncı ve çalışma sıvısı miktarı sırasıyla 13,45 kPa ve 7,3 ml olarak sabit tutulur. Test bölümü cam yünü kullanılarak yalıtılarak çevreye ısı yayılımı en aza indirilir.



Şekil 3.89. Dijital kamera tarafından yakalanan sinterlenmiş ve örgü fitil ısı borularının kesit görünüşü (a) Önden görünüş ve (b) Yan görünüş. (Kumaresan *et al.* 2014b)

Deneyler, DI su ve ağırlıkça üç farklı konsantrasyonda %0.5, 1.0 ve 1.5 CuO / DI su nanoakışkanları kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 3.90 (b), ısı borusu deney düzeneğinin dijital görüntüsünü gösterir. Kurulum, bir otomatik transformatör, Caddo dijital multimetre, değişken açılı tutucu, sıcaklık kontrol ünitesi, Eureka Loflo metre (MG.9) ve kişisel bir bilgisayara bağlı veri kaydediciden (Agilent) oluşur. Her bir ısı girişi artışı arasında yaklaşık 45 dakikalık bir süre korunur. 10 w lık ısı girişi, 10 ar W lık bir artışla ısı borusu kurumaya başlayana kadar devam ettirilir. (ağırlıkça %1 CuO / DI su nanoakışkanı ile maksimum 160 W'da kurumaya ulaşır). Isı borusu eğim açısı, yatay ekseninden 30, 45, 60, 75 ve 90°'ye kadar değişken bir açı tutucu kullanılarak değiştirilir.



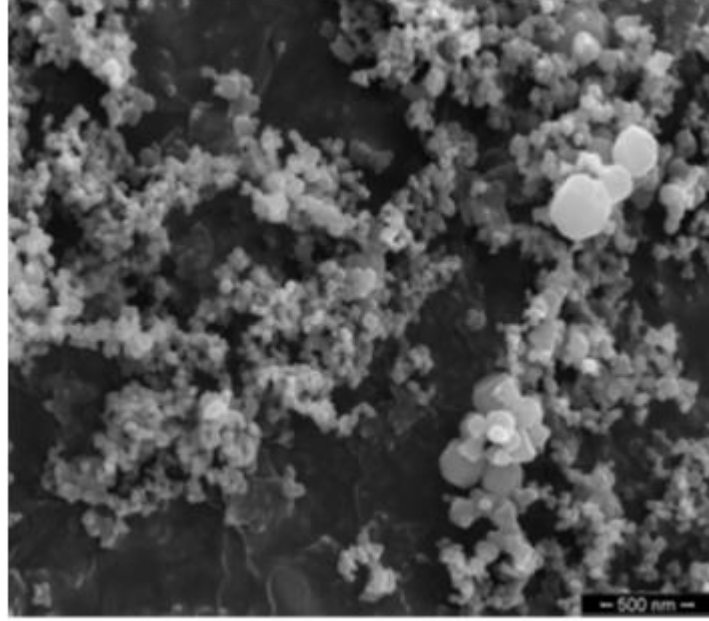
Şekil 3.90. (a) Isı borusu test bölümünün yerleşimi ve (b) Deney düzeneği (Kumaresan *et al.* 2014b)

Sinterlenmiş fitil ve örgü fitil ısı borularının ısı transfer performans özellikleri deneysel olarak incelenmiş ve çeşitli ısı giriş ve eğim açılarında CuO / DI su nanoakışkanları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sinterlenmiş fitil ısı borusunun ısı taşıma kapasitesinin, aynı çalışma koşullarında örgü fitil ısı borusu ile karşılaştırıldığında %14,3 daha fazla olduğu bulunmuştur. Benzer şekilde, örgü fitil ısı borusuna kıyasla ağırlıkça %1.0 CuO / DI su nanoakışkanları olan sinterlenmiş fitil ısı borusu için yüzey sıcaklığında %27.08 daha yüksek bir azalma gözlenmektedir. CuO nanopartiküllerinin eğim açısı ve ağırlık yüzdesi, her iki ısı borusunun da ısı performansını önemli ölçüde etkiler. Sinterlenmiş fitil ve örgü fitil ısı boruları için sırasıyla 45° ve 60° optimum eğim açıları gözlenirken, her iki durumda da optimum ağırlık yüzdesi aynıdır (ağırlıkça %1). Bu optimum koşullarda, hem sinterlenmiş fitil hem de örgü fitil ısı boruları için sırasıyla %49.64 ve

%35.44 ısı dirençte bir azalma ve %36.50 ve %29.84 ısı iletkenlikte bir artış gözlenmektedir. Gözlemlenen sonuçlara dayanarak, sinterlenmiş fitil ısı borusunun ısı performansının, örgü fitil ısı borusundan daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

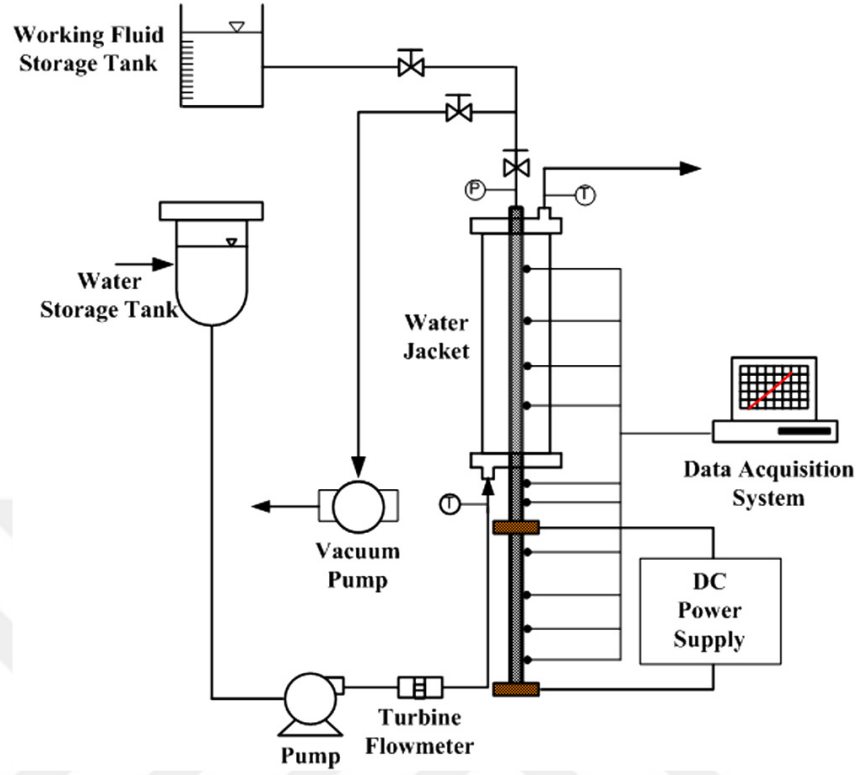
Kim *et al.* (2015), suyla dolu ve %0.01 ve %0.1 hacimli SiC/su nanoakışkanlı örgü fitil ısı borularının ısı performansı ile SiC nanopartikül kaplı örgü fitil ısı borularını, ısı borularının iç yüzeylerindeki nanopartikül etkisini incelemek için karşılaştıran deneysel bir çalışma yapmışlardır.

SiC, termal bozulmaya karşı iyi direnci, yüksek mekanik mukavemeti, iyi elektriksel iletkenliği ve yüksek ısı iletkenliği (490 W / m K) nedeniyle birçok mühendislik alanında araştırılmıştır. Bununla birlikte, iyi ısı iletkenliğine sahip çeşitli diğer nanopartiküller kullanılmasına rağmen, daha önce ısı borularının ısı performansını arttırmak için kullanılmamıştır. Bu çalışmada, SiC / su nanoakışkanı hazırlamak için Sigma-Aldrich (ABD) tarafından sağlanan SiC nanopartikülleri kullanılmıştır. Şekil 3.91, hazırlanan SiC nanopartiküllerinin test bölümüne yüklenmeden önce SEM görüntülerini göstermektedir. SiC / su nanoakışkanı, tartılmış nanopartiküllerin suya dağıtılması ve karışımın 3 saat boyunca sürekli olarak sonike edilmesi suretiyle hazırlanmıştır. Çalışma, su ve boş fitil (su denir), SiC / su nanoakışkanı ve boş fitil (SiC / su nanoakışkanı denir) ve su ve SiC kaplı fitil (SiC kaplı fitil olarak adlandırılır) kombinasyonu ile karakterize edilen üç tip ısı borusunda araştırılmıştır.

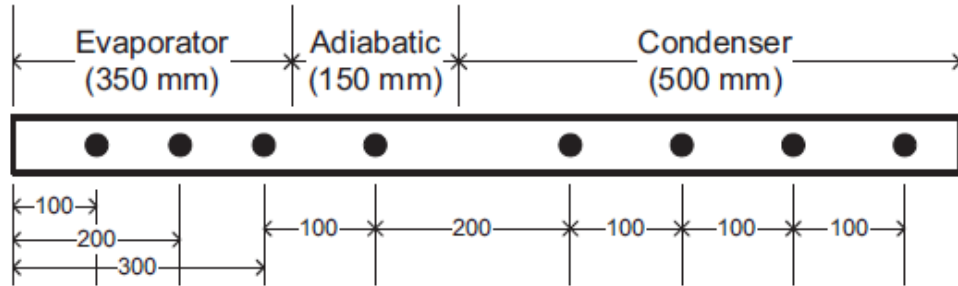


Şekil 3.91. SiC nanopartikülleri SEM görüntüsü (Kim *et al.* 2015)

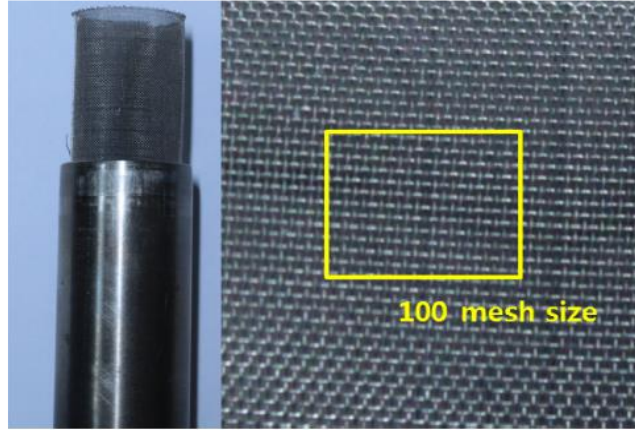
Şekil 3.92, ısı borusu deney tesisini göstermektedir. Deney tesisi, çalışma sıvısı tankı, test bölümü, buharlaştırılmış çalışma sıvısını yoğunlaştırmak için su ceket, soğutucuyu su depolama tankından su ceket içine sirküle eden bir pompa, bir vakum pompası ve güç kaynağına bağlı buharlaştırıcı bölmünün altında ve sütünde iki bakır elektrot içerir. Belirli bir güçte sıcaklık dağılımını kaydetmek için, test bölümünün buharlaştırıcı ve adyabatik bölümlerine (üçü buharlaştırıcıda ve biri adyabatik bölüme) dört K tipi termokupl ve dört T tipi termokupl yoğunlaştırıcı bölümüne monte edilmiştir. Şekil 3.93, test bölümündeki termokupl konumlarını gösterir ve Şekil 3.94, ısı borusunun ve elek tel örgüsünün bileşimini gösterir. Çizelge 3.4, deney koşullarını göstermektedir. Deney prosedürü aşağıdaki gibidir: İlk olarak, test bölümündeki basınç, vakum pompası yoluyla yoğunlaşmayan gazları uzaklaştırmak için 12.5 kPa'ya ayarlanmıştır. Daha sonra su, 0.134 kg / s'lik bir kütle akış hızında su kılıfından geçirilmiştir. Su ceket giriş ve çıkışındaki iki T tipitermokupl, ısı değişim oranını ve sıcaklık değişimini ölçmek için kullanılmıştır. Daha sonra test bölümü, %100 doluluk oranında (çalışma sıvısının fitil yapısına hacim oranı) çalışma sıvısı ile doldurulmuştur. Test bölümleri adım adım ısıtılmıştır.



Şekil 3.92. Isı borusu test bölümünün şematik gösterimi (Kim *et al.* 2015)



Şekil 3.93. Deneyde kullanılan termokuplların yerleşimi (Kim *et al.* 2015)

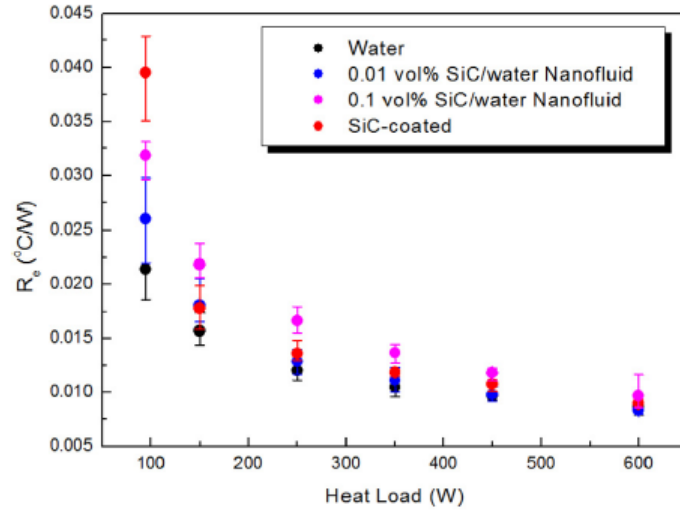


Şekil 3.94. Isı borusu ve ekran tel örgü görüntüleri (Kim *et al.* 2015)

Çizelge 3.4. Deney şartları (Kim *et al.* 2015)

Uzunluk oranı [%]	35: 15: 50
Isı yükü [W]	120–1120
Başlangıç basıncı [kPa]	12,5
Dolum oranı [%]	100
Fitel tipi	100 gözlü SS 304 ekran tel örgü
Gözeneklilik	0.62
Geçirgenlik, K [m ²]	1.9×10^{-10}

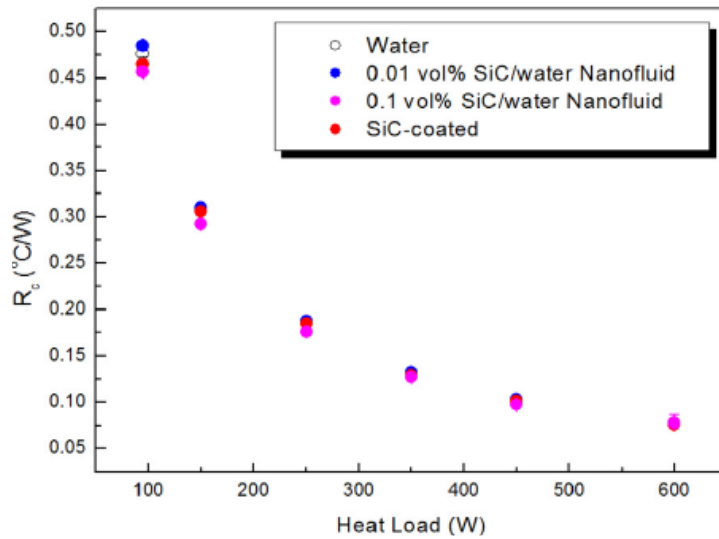
Şekil 3.95’de görüldüğü gibi SiC kaplı fitil bazlı ısı borusu ve SiC / su nanoakışkanlarla doldurulmuş ısı borularının buharlaşma ısı dirençleri, kaplanmamış su ısı borusununkinden daha yüksektir, çünkü fitil yapısındaki SiC kaplı tabaka ek ısı direnç ve artırılmış ıslanabilirliği, çekirdeklenme teorisi açısından nispeten düşük kaynama performansı ile sonuçlanmıştır.



Şekil 3.95. Buharlaştırma bölümündeki ısı direnci (Kim *et al.* 2015)

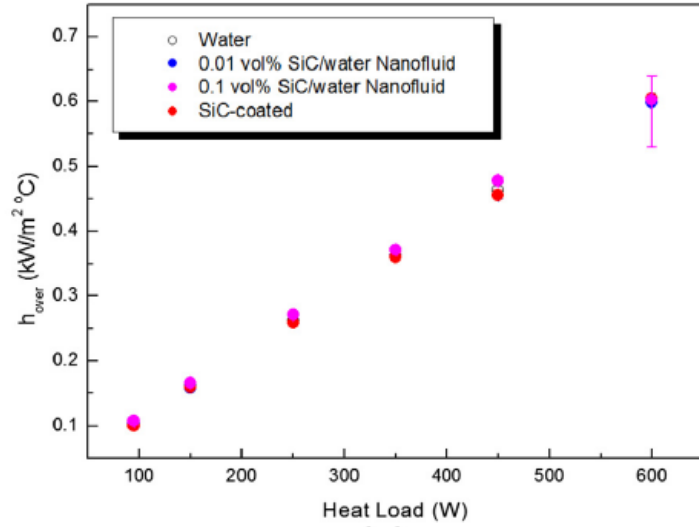
Buharlaştırıcı ısı direnci, daha kalın nanopartikül biriktirme tabakası, büyük viskozite ve faz değişiminin kesintiye uğraması nedeniyle nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça artmıştır.

Şekil 3.96’da görüldüğü gibi SiC nanopartikülleri kullanan ısı borularının yoğunlaştırıcı ısı dirençleri, kaplamasız su ısı borusununkiyle aynıdır çünkü fitil yapılarındaki sıvı film kalınlıkları, kararlı durum işleminde aynı olacaktır.



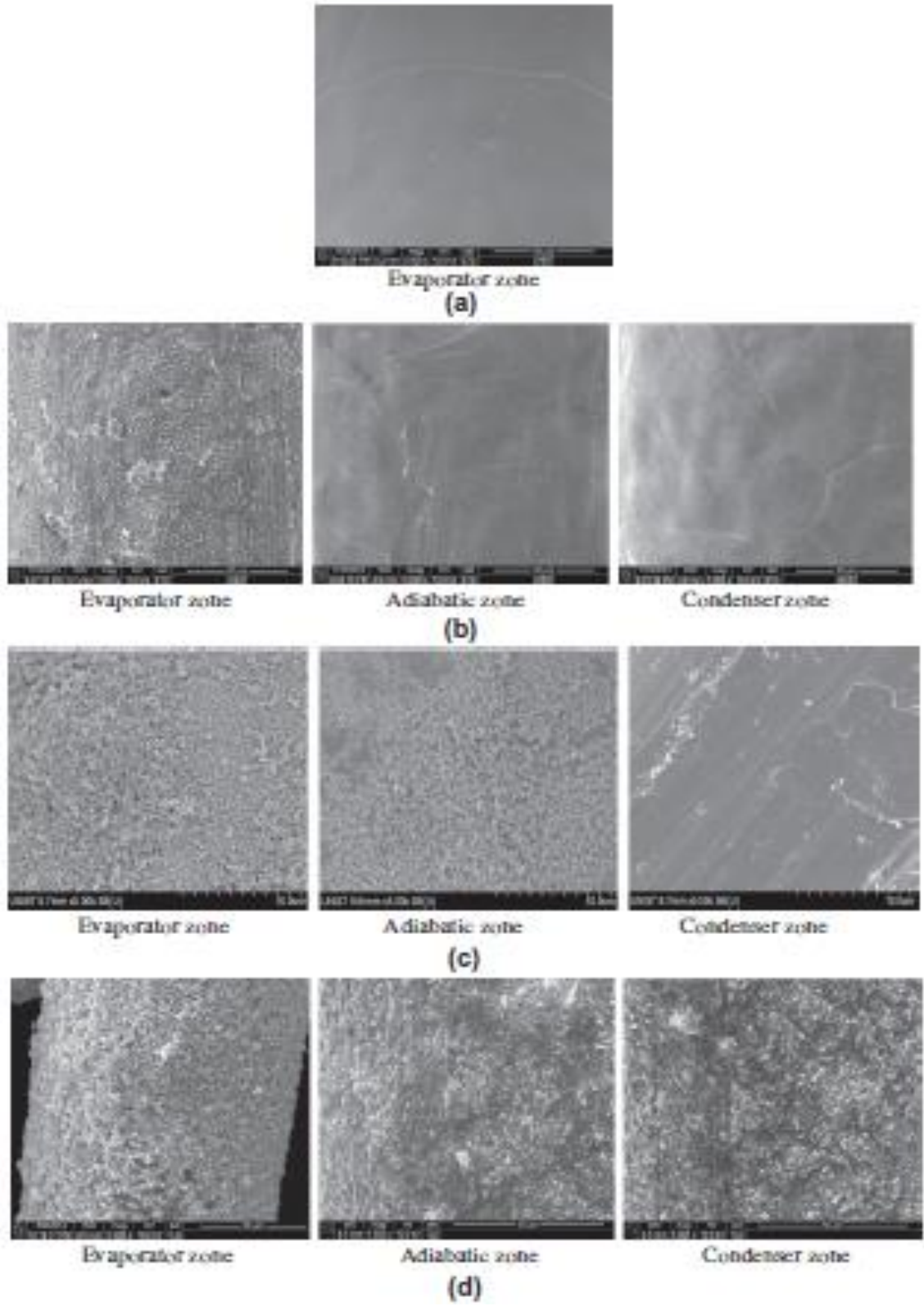
Şekil 3.96. Yoğunlaştırıcı bölümündeki ısı direnci (Kim *et al.* 2015)

Şekil 3.97’de görüldüğü gibi deneyde, SiC nanopartiküllerini kullanan ısı boruları, kaplanmamış su ısı borusuna kıyasla toplam ısı transferinde önemli bir fark göstermemiştir çünkü sıvı film, ısı borularındaki en büyük ısı dirençtir ve yoğunlaşma ısı transferi açısından da teyit edildiği gibi tüm test bölümleri için hemen hemen aynıdır.



Şekil 3.97. Giriş ısılarına göre ısı transfer katsayıları (Kim *et al.* 2015)

Fıtıl yapısı üzerindeki SiC kaplı tabaka SEM görüntüleri kullanılarak gözlenmiştir. Görüntüler, SiC / su nanoakışkanları ve SiC kaplı fıtıl kullanıldığında ısı borularının azaltılmış ısı transferi nedenlerini desteklemektedir.



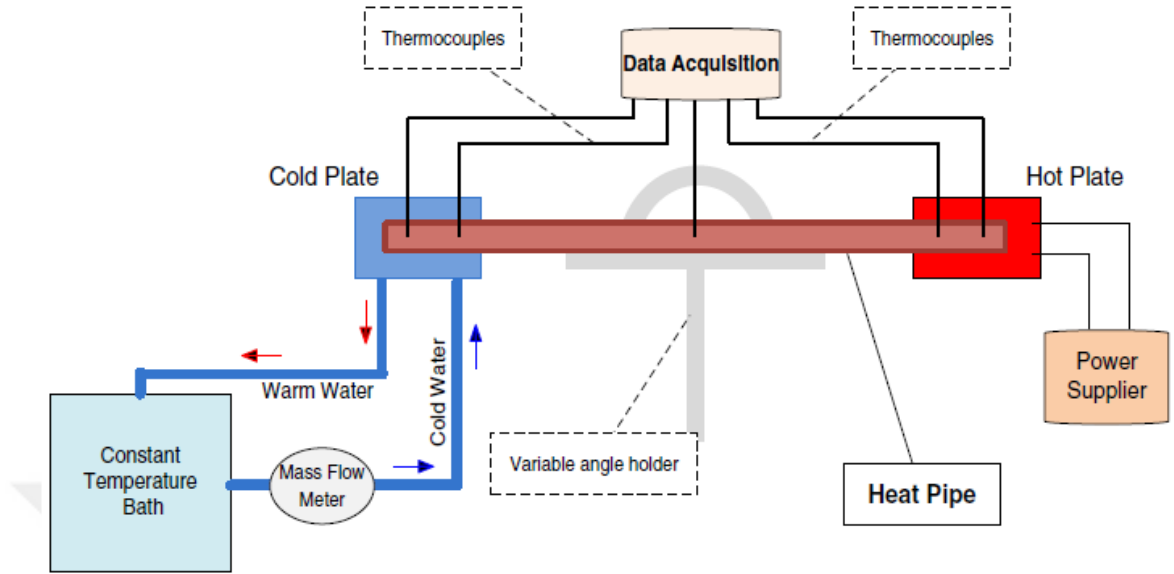
Şekil 3.98. Deneyden sonra buharlaştırıcı, adiabatik ve yoğunlaştırıcı bölümlerinin fitil yapılarının (soldan sağa) SEM görüntüleri (Kim *et al.* 2015)
 (a) kaplanmamış fitil (x5000), (b) hacimce %0.01 SiC / su nanoakışkanı (x5000), (c) hacimce %0.1 SiC / su nanoakışkanı (x5000) fitili, (d) SiC kaplı fitil (x5000).

Fitel yapıların ıslanma özellikleri gözlenmiştir. Gözlem, sıvı filmin hızlı oluşumu veya sıvı damlacıklarının hızlı yayılması ile SiC kaplı fitil yapısında daha fazla ıslanabilirlik göstermiştir. Değişen ıslatma özelliği, nanoakışkan kaynama çalışmalarında da bildirildiği gibi, kaynama ısı transferini destekler.

Ghanbarpour *et al.* (2015a), soğutma uygulamalarında gümüş nanoakışkan kullanarak eğimli örgü fitil ısı borusunun termal performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İki katörgü fitil içeren dört silindirik bakır ısı borusu, kütle konsantrasyonları %0.25, %0.5 ve %0.75 olan su bazlı gümüş nanoakışkanlarla ve damıtılmış su ile test edilmiştir. Deneyler, 0°, 30°, 6° ve 90°'lik dört eğim açısında gerçekleştirilmiştir.

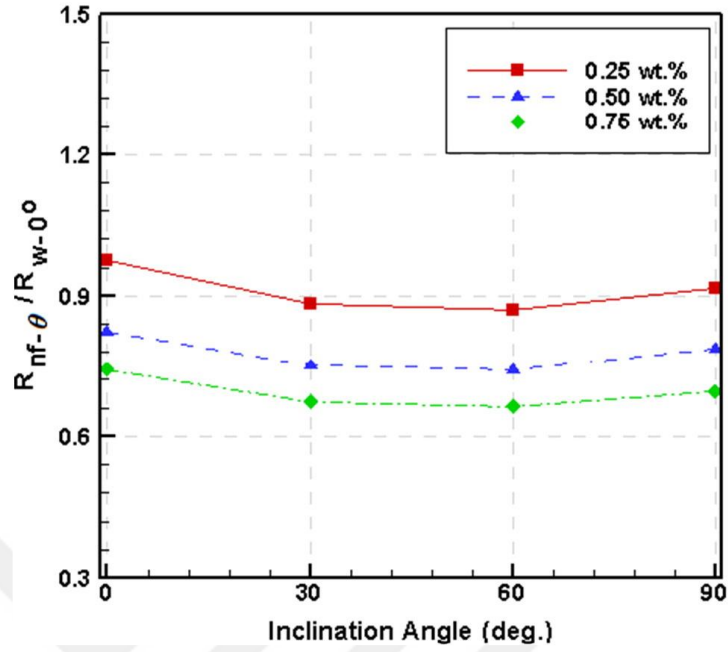
Ağırlıkça %0.75 olan ticari Ag nanoakışkan satın alınmış ve orijinal süspansiyon seyreltilerek ağırlıkça %0.5 ve ağırlıkça %0.25 içeren nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Ag nanopartiküllerinin ortalama boyutu 165 nm dir.

Deney düzeneği, sabit sıcaklık banyolu soğutma sistemi, pompa, akış ölçer, güç kaynağı, veri toplama sistemi ve Şekil 3.99'da gösterildiği gibi ana test bölümünden oluşmaktadır. Isı borusu, 20 cm uzunluğunda, 6.35 mm çapında ve 0.71 mm et kalınlığından oluşan bir bakır borudur. Isı borusunun buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümleri sırasıyla 50 mm, 100 mm ve 50 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümünde, bir elektrikli kartuş ısıtıcı, ısı borusuna bağlı bakır ısıtma bloklarına eşit ısı akışı sağlamaktadır. Yoğunlaştırıcı bölümü sabit soğutma koşullarını korumak için sırasıyla 288 K ve 51 kg / s sıcaklık ve akış hızında sabit sıcaklıkta bir soğutma banyosunda sirküle edilerek soğutulmuştur. Isı borusu yüzeyinin sıcaklıkları, biri adyabatik bölümün yüzeyine ve ikisi yoğunlaştırıcı bölümünün yüzeyine ve ikisi buharlaştırıcı bölümün yüzeyine monte edilmiş beş K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür.



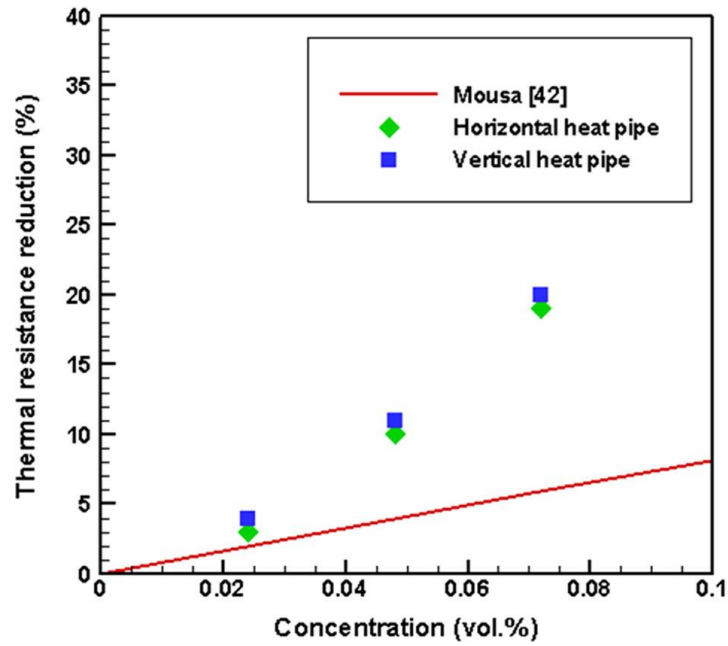
Şekil 3.99. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Ghanbarpour *et al.* 2015a)

Bu amaçla, ısı boruları için çalışma sıvısı olarak %0.25, %0.5 ve %0.75'lik üç farklı kütle konsantrasyonunda su bazlı Ag nanoakışkanları kullanılmış ve sonuçlar referans olarak su kullanan ısı borusu ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları Ag nanoakışkanlarının ısı borusu termal performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve nanoakışkan ile ısı borusunun termal direncinin su ile olandan daha düşük olduğunu ortaya koymuştur ve bu durum Şekil 3.100'de görülmektedir.



Şekil 3.100. Ag nanoakışkan ve su ile ısı borusunun ısıl dirençleri arasındaki oran (50 W) (Ghanbarpour *et al.* 2015a)

Ayrıca, tüm eğim açılarında nanopartikül konsantrasyonunun arttırılmasıyla ısı borularının ısıl direncinin azaldığı bulunmuştur. Şekil 3.101’de bu durum gösterilmektedir.



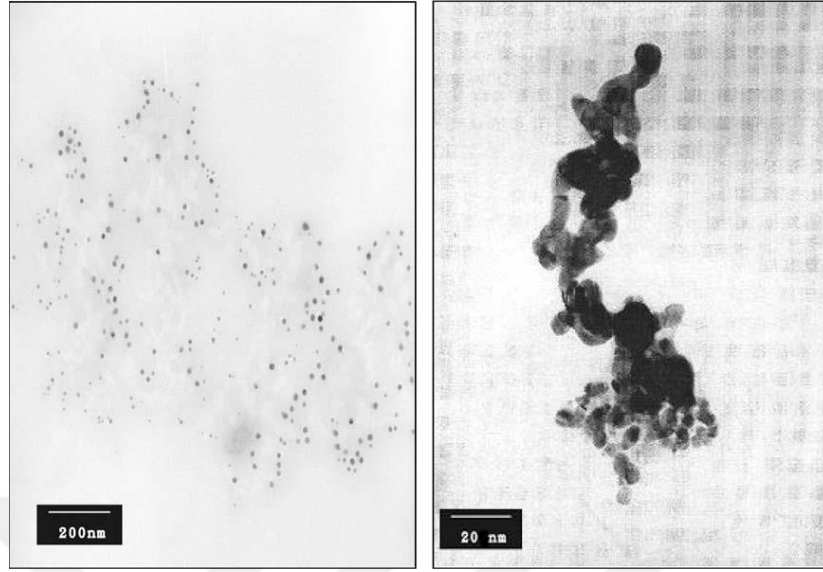
Şekil 3.101. Nanopartikül konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak ısı borusunun ısıl direncinin azalması (Ghanbarpour *et al.* 2015a)

Ek olarak, eğimli ısı borularının yerçekimi kuvveti etkileri nedeniyle dikey olandan daha düşük termal dirence sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, 0 °, 30 °, 60 ° ve 90 ° farklı eğim açıları altında, sonuçlar en düşük termal direncin tüm konsantrasyonlarda 60 ° 'lik eğim açısına ait olduğunu göstermiştir. Bu eğim açısında (60 °), ısı borusunun ortalama etkili termal iletkenliği, yatay ısı borusuna kıyasla yaklaşık %11 artmıştır.

3.1.3. Sinterlenmiş fitil ısı boruları

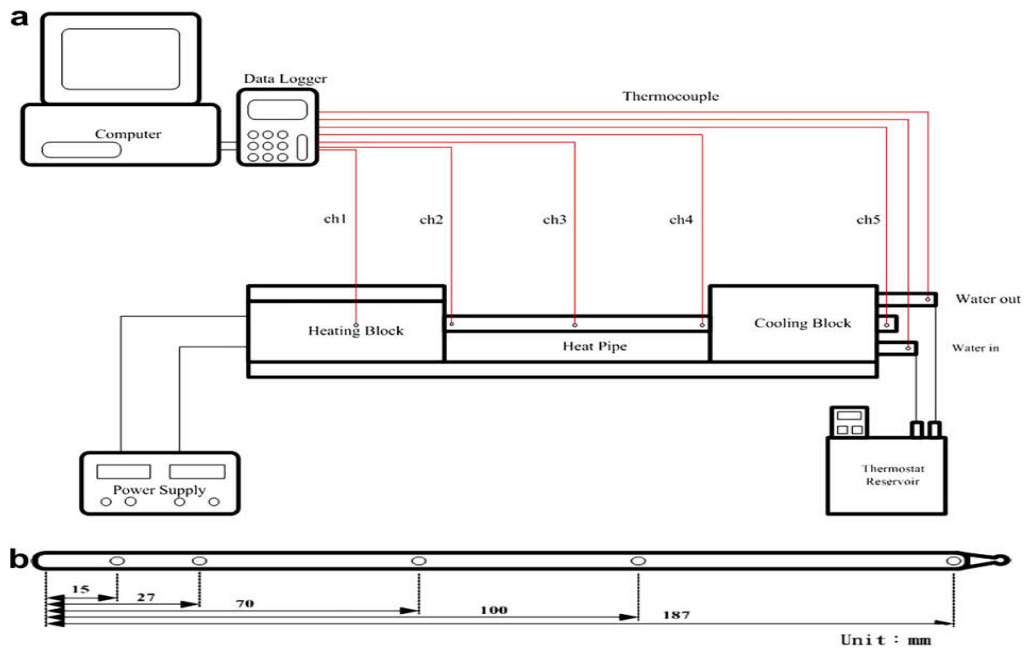
Sinterlenmiş metal ısı boruları, etkili performansı nedeniyle farklı uygulamalarda kullanılır. Bu tip ısı borularında sinterlenmiş fitilden yapılmış metalik toz, kılcal etkiyi üretmek için kullanılır. Kumaresan ve diğ. (Kumaresan *et al.* 2014b) sinterlenmiş metal ısı borularında ve örgü fitil ısı borularında deiyonize su ve CuO / deiyonize nanoakışkan kullanmışlardır. Araştırmacılar, sinterlenmiş metal ısı borusunun performansının örgü fitil ısı borusununkinden daha iyi olduğunu fark etmişlerdir. Nanopartiküllerin daha homojen birikimi ve sinterlenmiş fitilin daha iyi gözenek boyutu, örgü fitil ısı borusuna kıyasla sinterlenmiş metal ısı borusunun ısı performansında daha iyi bir artış sağlamıştır.

Kang *et al.* (2009), su ile 10-35 nm büyüklüğünde gümüş nanopartiküller kullanarak ısı borusunun ısı performansını araştırmışlardır. Deneyde 10 nm büyüklüğünde gümüş partiküller ve baz sıvı olarak su kullanılmıştır. Gümüş (Ag) nanoakışkanlar iki aşamalı yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Önce Ag nano partikülleri hazırlanmıştır. Ag nanopartikülleri, katalitik kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Daha sonra gümüş nano partiküller saf suya ilave edilmiştir. Ag-nanoakışkan süspansiyonlarında hiçbir yüzey aktifleştirici madde kullanılmamıştır. Karışım bir ultrasonik homojenizatör kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada 1, 10 ve 100 mg / l (ppm) nanoakışkan konsantrasyonları kullanılmıştır. Şekil 3.102, Ag nanopartiküllerinin TEM görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 3.102. Ag nanopartiküllerinin 10 nm (sol) ve 35 nm (sağ) TEM görüntüleri (Kang *et al.* 2009)

Dairesel ısı borularının ısıl direncini ölçmek için deney sistem oluşturulmuştur (Şekil 3.103). Bu deneylerde kullanılan ısı borularının dış çapı ve uzunluğu sırasıyla 6 ve 200 mm'dir. Isı borusunda 1 mm kalınlığında bakır tozu (150-180 lm) sinterlenmiş fitil bulunmaktadır.

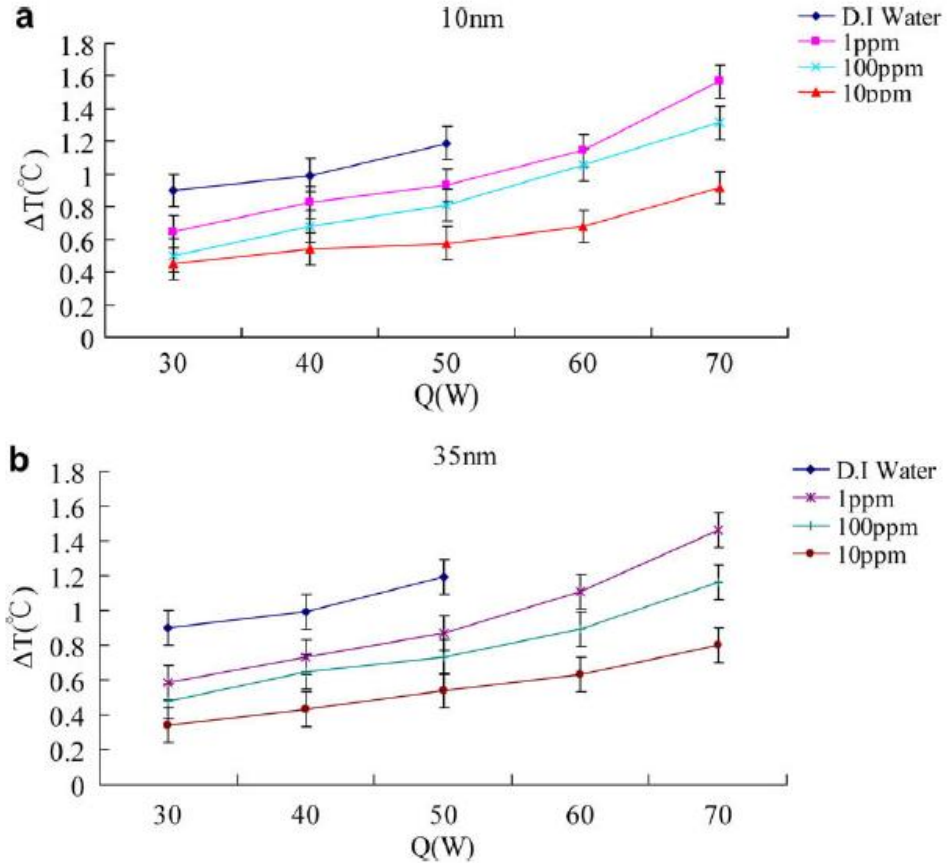


Şekil 3.103. (a) Deney düzeneğinin şeması ve (b) test edilen ısı borusu üzerindeki termokupl dağılımları (Kang *et al.* 2009)

Deney sistemi soğutma sistemi, test bölümü, ± 0.5 'lik bir belirsizlik ile bir güç kaynağı ve ölçüm sistemi ile bir veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Deneysel verileri izlemek, kayıt altına almak ve işlemek için bir PC kullanılmıştır. Soğutma sistemi, sabit sıcaklıkta bir termal banyo ve bir soğutma bölmesi içermektedir. Yassı ısı borusunun yoğunlaştırıcı kısmı, soğutma odasına yatay olarak yerleştirilmiştir. Soğutma sıvısı, soğutma odasından sirküle edilmiştir; ısı, yoğunlaştırıcı bölümünden zorlanmış konveksiyon ile çıkarılmış ve daha sonra soğutma sıvısı sabit sıcaklıklı bir banyoya gönderilmiştir. Sabit sıcaklık banyosu gereken sıcaklığa ayarlanmış ve testler yoluyla sabit bir sıcaklıkta tutulmuştur. Soğutma sıvısındaki sıcaklık değişimi 40°C 'da tutulmuş ve soğutma bloğunun çıkış sıcaklığı, $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 'lik bir belirsizlik içinde $40-45^{\circ}\text{C}$ aralığında değiştirilmiştir. Güç kaynağı ve ölçüm sistemi, DC güç tedarikçisi tarafından desteklenen bir elektrikli direnç ısıtıcısı kullanmıştır. 10 mm çapında elektrikli ısıtıcı, ısıtıcı ile ısı borusu yüzeyi arasındaki temas ısıl direnci azaltmak için termal gres ile evaporatör bölümünün bir tarafına tutturulmuştur. Isıtılan ve adyabatik bölümler, ısı kaybını en aza indirmek için bakalit (0.233 W / m K) ve cam elyaf yünü (0.034 W / m K) ile yalıtılmıştır.

Güç kaynağı açılmış ve güç kademeli olarak artırılmıştır. Testlerin bu noktasında, sabit duruma ulaşmak için yaklaşık 40-60 dakika gerekmiştir. Kararlı duruma ulaşıldığında, ısı borusu boyunca sıcaklık dağılımı ölçülmüş ve diğer deneysel parametrelerle birlikte kaydedilmiştir. Daha sonra güç girişi kademeli olarak artırılmış ve işlem, kurumaya ulaşılncaya kadar tekrarlanmıştır. Kurumaya ulaşıldığında, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasındaki sıcaklık farkı hızla artmıştır. Bu noktadaki güç girişinin, ısı borusunun maksimum ısı taşıma kapasitesi olduğu varsayılmıştır. Lokal ısı borusu sıcaklığı beş izole Omega T tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Buharlaştırıcıya iki termokupl adyabatik kısma bir termokupl, kondenser kısmına iki termokupl tutturulmuştur. Tüm termokupllar bir kuvars termometreye karşı kalibre edilmiştir. Sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlik $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 'dir. Isıtma bölümünde ısı kaynağı olarak iki ısıtıcı çubuğu (maksimum 120 W) kullanılmıştır. Böylece, ısıtma yükü (Q) ve sıcaklık farkı (ΔT) ölçülmüş ve ısıl direnç (R), $R = \Delta T / Q$ denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

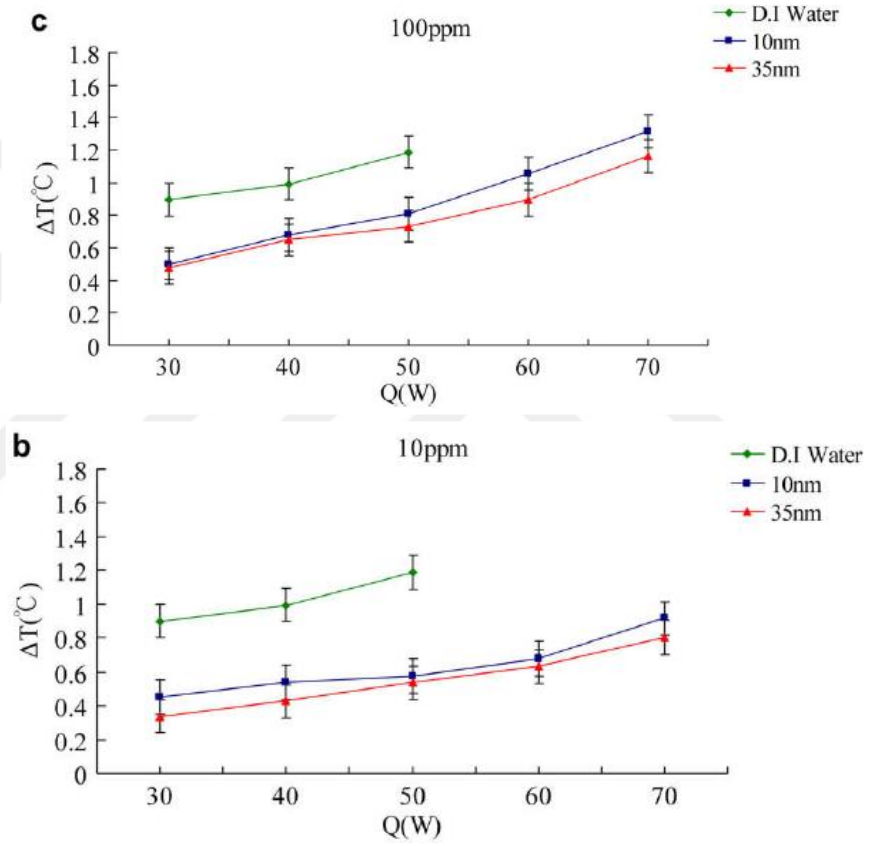
Şekil 3.104'de görüldüğü gibi, saf su içeren ısı borusunun duvar sıcaklık farkı sırasıyla 0,89, 0,9 ve 1,19°C'dir (30-50 W). Saf suya az miktarda gümüş nano partikül ekledikten sonra, sıcaklık farkı saf su ile doldurulmuş borulardakinden daha düşük hale gelmiştir. 60 W'lık bir giriş gücünde, saf su dolu ısı borusunun sıcaklık farkı 10°C'yi aşarken ancak nanoakışkan dolu ısı borularındaki hala 1.2°C'den azdır. Özellikle, nanoakışkanların (10 ve 35 nm) çalışma sıvısı olarak kullanılması, kuruma olgusu olmadan yaklaşık 70W'a kadar çıkabilir. Bununla birlikte, Şekil 3.104 (a) ve b)'de gösterildiği gibi, çeşitli ısı akıları altında 10 ppm'den yüksek konsantrasyonlarda ısı borusu sıcaklık farkında sürekli bir azalma gözlenmemiştir.



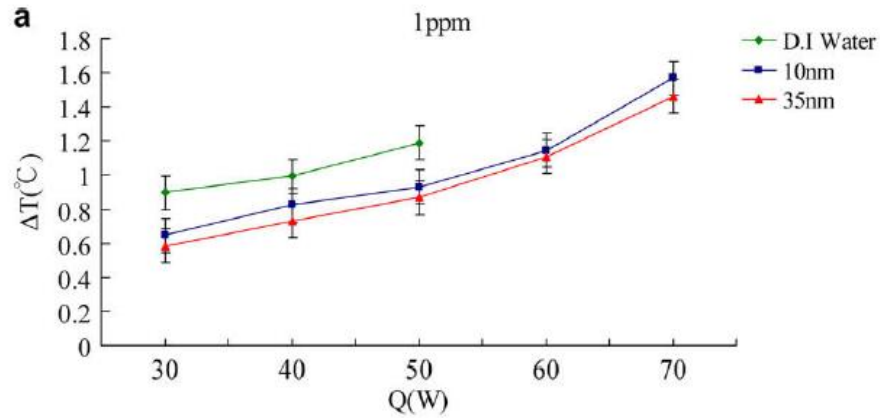
Şekil 3.104. Partikül konsantrasyonunun çeşitli giriş gücü altında ısı borusunun sıcaklık farkı üzerine etkisi (Kang *et al.* 2009)

Partikül büyüklüğü etkisini vurgulamak için, DI-suda dağılmış 10 ve 35 nm gümüş nano-partiküller ile doldurulmuş sinterlenmiş ısı borusunun sıcaklık farkı Şekil 3.105'de

gösterilmektedir. Saf su içeren ısı borusunun sıcaklık farkı sırasıyla 0,89, 0,99 ve 1,18°C (30–50 W) dir ve nanoakışkanlara göre daha yüksek sıcaklık farkına sahiptir. Aynı konsantrasyonda 10 ve 35 nm nano-partikül ile karşılaştırıldığında, sıcaklık farkı aralığı yaklaşık 0.33-0.93 C'dir ve iki boyutlu nano partikülün sıcaklık farkı 30-70 W'da birbirine yakındır.



Şekil 3.105. Partikül büyüklüğünün çeşitli giriş gücü altında ısı borusunun sıcaklık farkı üzerine etkisi (Kang *et al.* 2009)



Şekil 3.105. Partikül büyüklüğünün çeşitli giriş gücü altında ısı borusunun sıcaklık farkı üzerine etkisi (Kang *et al.* 2009) (devam)

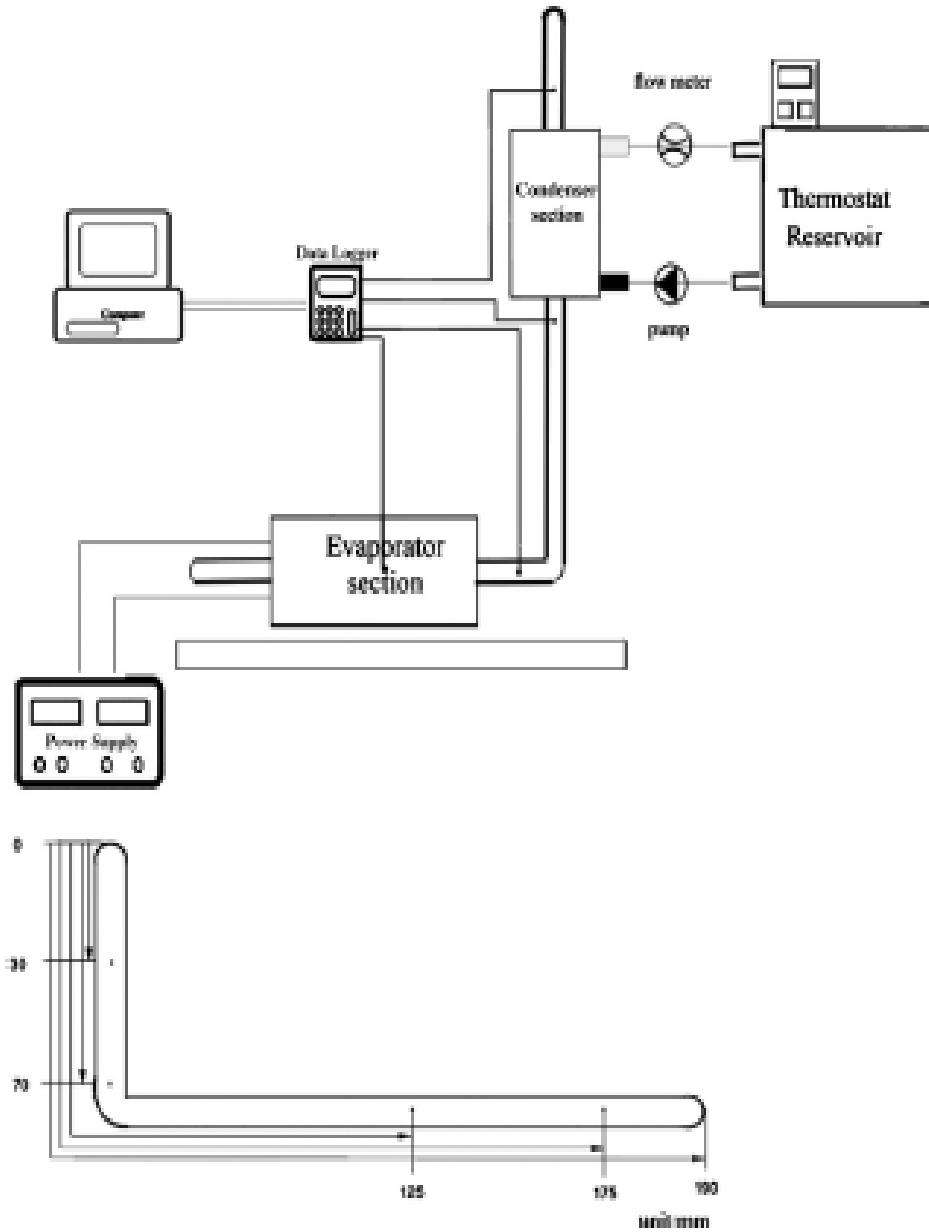
Bu araştırmada, ısı borusunun ısı performans artışı, oluklu ısı boruları ve sinterlenmiş ısı borularındaki geleneksel saf suyun yerine nanoakışkan potansiyelini göstermektedir. Bu bulgu nanoakışkanları bir soğutma sıvısı olarak daha çekici hale getirmektedir.

Keshavarz Moraveji ve Razvarz (2012), alüminyum oksit nanoakışkan kullanılarak buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri arasında 90° eğrilere sahip ısı borusunun (sinterlenmiş fitil) ısı performansındaki artışı incelemiştir.

Küresel alüminyum oksit nanopartiküller (35-45 nm nominal çaplı, 3.88 g / cc yoğunluğa sahip) ve nanoakışkanı hazırlamak için baz sıvı olarak deiyonize su ve %1 ve %3 hacim konsantrasyonuna ulaşmak için gerekli nanopartikül miktarı kullanılmıştır. Daha sonra nanopartiküller deiyonize su içinde dağıtılmış ve çözelti, düzgün dağılmış bir çözelti elde etmek için 90 dakika boyunca bir ultrason cihazında titreştirilir. Al_2O_3 nanopartikülleri katalitik kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Karışım bir ultrasonik homojenizatör kullanılarak oluşturulmuştur.

Deney aparatının şematik görünüşü Şekil 3.106'da gösterilmektedir. Deney döngüsü bir test bölümü, soğuk su döngüsü ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Soğuk suyun kapalı döngüsü 0.125 m³'lük bir depolama tankından oluşmaktadır. Soğuk su bir sıcaklık kontrolörü tarafından kontrol edilir ve depolama tankından dışarı pompalanır. Soğutma suyu, sabit akış hacmini izleyen bir akış ölçerle (doğruluk: %0.2, belirsizlik: 0.017 L /

da) $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 'lik bir sıcaklığa ayarlanır. Deney ortamının sıcaklığı $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de kontrol edilir ve çalışma borusu , sırasıyla dış çapı ve uzunluğu 6 ve 190 mm olan düz bir bakır tüptür. Isı borusu, 1 mm fitil kalınlığında bakır tozu (140-200 nm) içeren sinterlenmiş ısı borusudur. Yassı ısı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü, soğutma odasına dikey olarak yerleştirilmiştir. Elektrikli ısıtıcı, ısıtıcı ile ısı borusu yüzeyi arasındaki temas ısıl direncini azaltmak için termal gres (ana soğutucu – HTX3-GL) ile tutturulmuştur.

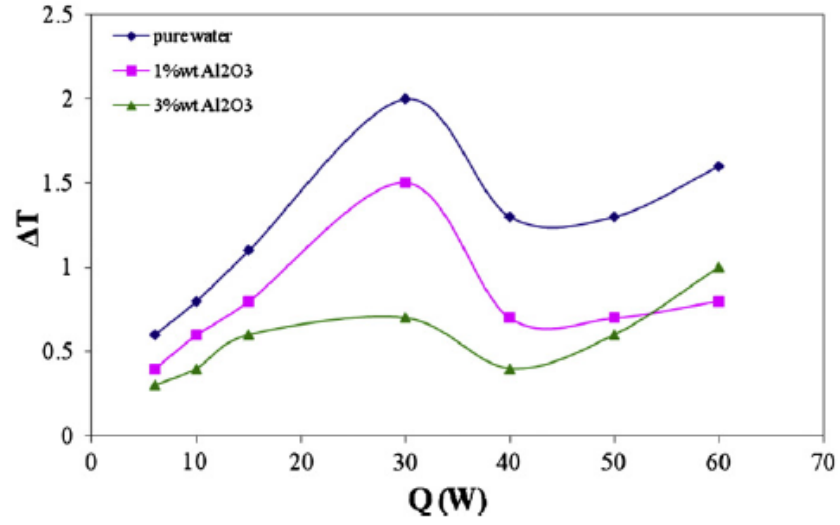


Şekil 3.106. Deneyin şematik görünümü (Keshavarz Moraveji and Razvarz 2012)

Güç kaynağı açıldıktan sonra güç artırılmıştır. Testler, kararlı duruma ulaşmak için yaklaşık 15-25 dakika sürmüştür. Kararlı duruma ulaşıldığında, ısı borusu boyunca sıcaklık dağılımı ölçülmüş ve diğer deneysel parametrelerle birlikte kaydedilmiştir. Daha sonra güç girişi kademeli olarak arttırılmış ve işlem, kuruma oluşuncaya kadar tekrarlanmıştır. Kuruma oluştuktan sonra, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasındaki sıcaklık farkı hızla artmıştır. Lokal ısı borusu sıcaklığı dört izole tip - T termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Tüm termokupllar bir dijital sıcaklık kaydediciye bağlıdır. Bir termokupl buharlaştırıcı kısmının ortasına, iki termokupl adyabatik kısma ve bir termokupl yoğunlaştırıcı bölümüne tutturulmuştur. Isıtma bölümünde ısı kaynağı olarak bir ısıtıcı çubuğu (maksimum 90 W) kullanılmıştır. Böylece ısıtma yükü (Q) ve sıcaklık farklılıkları (ΔT) ölçülmüştür.

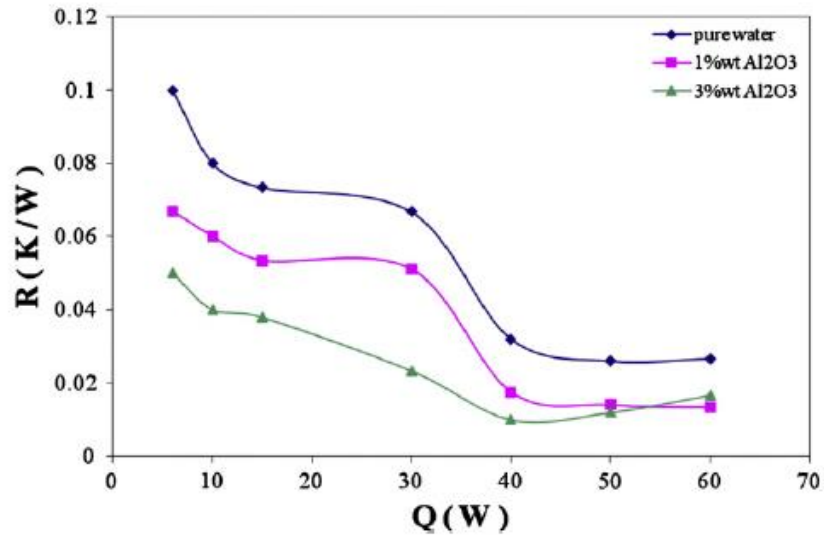
Bu çalışma, deneysel olarak test edilen 1 mm fitilli kalınlıkta sinterlenmiş dairesel ısı borusu içinde çalışma sıvısı olarak Al_2O_3 nanoakışkanı kullanılarak yivli ısı borusu performansının artırılmasını araştırmıştır.

Ne kadar çok Al_2O_3 nanopartikülleri çalışma sıvısında dağıldıysa, ısı borusunun performansı o kadar artmıştır. Şekil 3.107, nanopartikül konsantrasyonunun, farklı giriş güçleri altında ısı borusunun sıcaklık farkı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekilden, nanoakışkan konsantrasyonunu arttırarak sıcaklık farkının azaldığı görülmektedir.. Ayrıca ısı yükünü arttırarak bir artış ve sonra ani bir düşüş görülmektedir. Sabit bir sıcaklık farkı için, çalışma sıvısı olarak bir nanoakışkan kullanımının, ısı borusunun daha büyük bir ısı yükü altında çalışmasına izin verdiği görülmektedir.



Şekil 3.107. Nanopartikül konsantrasyonunun, farklı giriş güçleri altında, ısı borusunun sıcaklık farkı üzerine etkisi (Keshavarz Moraveji and Razvarz 2012)

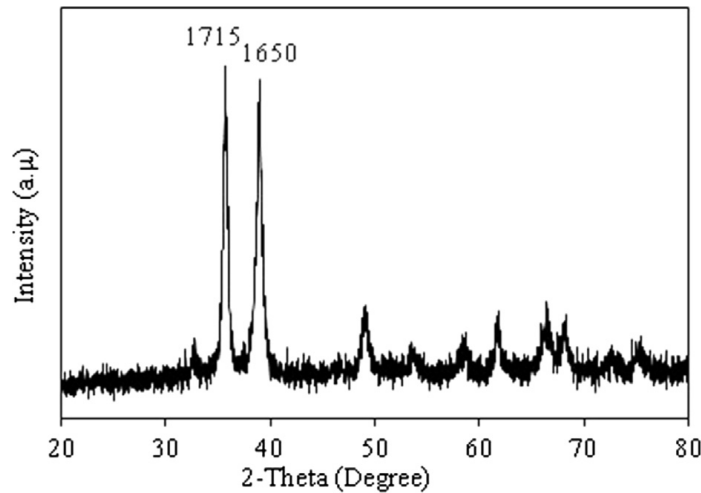
Şekil 3.108, nano-akışkan konsantrasyonunun, farklı ısı yüklerinde, ısı borusunun ısı direnci üzerindeki etkisini göstermektedir. Çalışma sıvısı olarak nanoakışkan ve saf su kullanılarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Nanoakışkan kullanan ısı borusunun ısı direnci saf su kullananınkinden düşüktür.



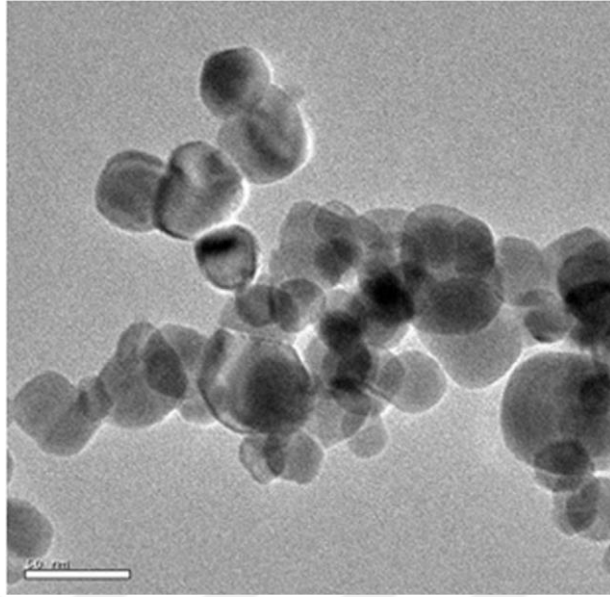
Şekil 3.108. Farklı nanopartikül konsantrasyonları ve giriş güçlerinin ısı borusu ısı direnci üzerindeki etkisi (Keshavarz Moraveji and Razvarz 2012)

Kumaresan *et al.* (2014a), deiyonize suda dağılmış, yüzey aktifleştirici madde içermeyen CuO nanopartiküllerine sahip bakır sinterlenmiş fitil ısı borusunun ısı transfer özelliklerindeki artışı deneysel olarak incelemişlerdir.

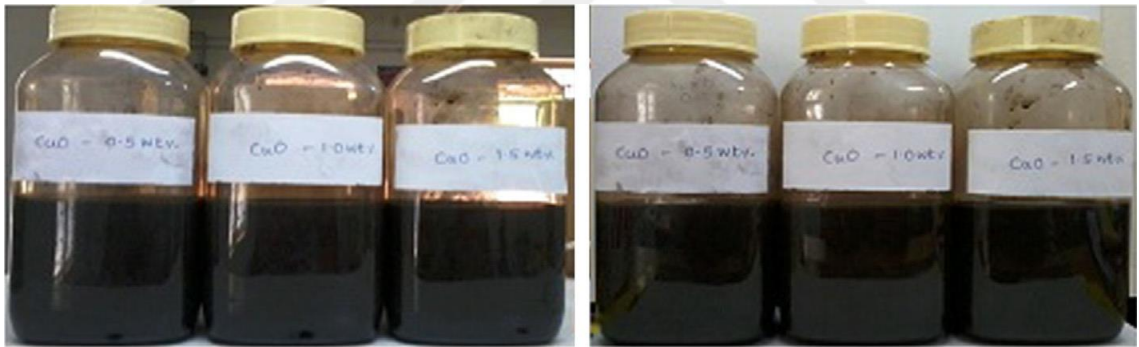
Bu çalışmada kullanılan CuO nanopartikülü (%97.5 saf), ticari bir üründür. Şekil 3.109, X-ışını kırınım analizi ile teyit edilen CuO nanopartiküllerinin kristal modelini göstermektedir. Scherrer formülü kullanılarak partikülün ortalama büyüklüğü 39.1 nm olarak bulunmuştur. Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu, deiyonize suda dağılmış CuO partiküllerinin morfolojisini incelemek için kullanılmış olup ve Şekil 3.110'da gösterilmektedir. Nanoakışkan, iki aşamalı yöntemle hazırlanmıştır; başlangıçta yüzey aktifleştirici madde içermeyen CuO partikülleri, belirli ağırlık fraksiyonu ile DI suda dağıtılmıştır. Daha sonra, karışım 60 dakika süreyle 40 kHz frekansta bir ultrasonik homojenleştiricide tutulmuştur. Çözelti eşit olarak dağıtılmış ve iyi bir stabilite elde edilmiştir. Nanoakışkan ağırlıkça %0.5, 1.0 ve %1.5 olmak üzere üç farklı konsantrasyonda hazırlanmıştır. Bir sedimantasyon testi yapılmış ve Şekil 3.111'de gösterilmiştir. Nanoakışkan içinde 30 gün sonra bile bir ayırma çizgisi gözlenmemiştir.



Şekil 3.109. CuO nanopartiküllerinin X ışını kırınım analizi (Kumaresan *et al.* 2014a)



Şekil 3.110. Deiyonize suda dağılmış CuO nanopartiküllerinin Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu görünümü (Kumaresan *et al.* 2014a)



(a) After 24 hours

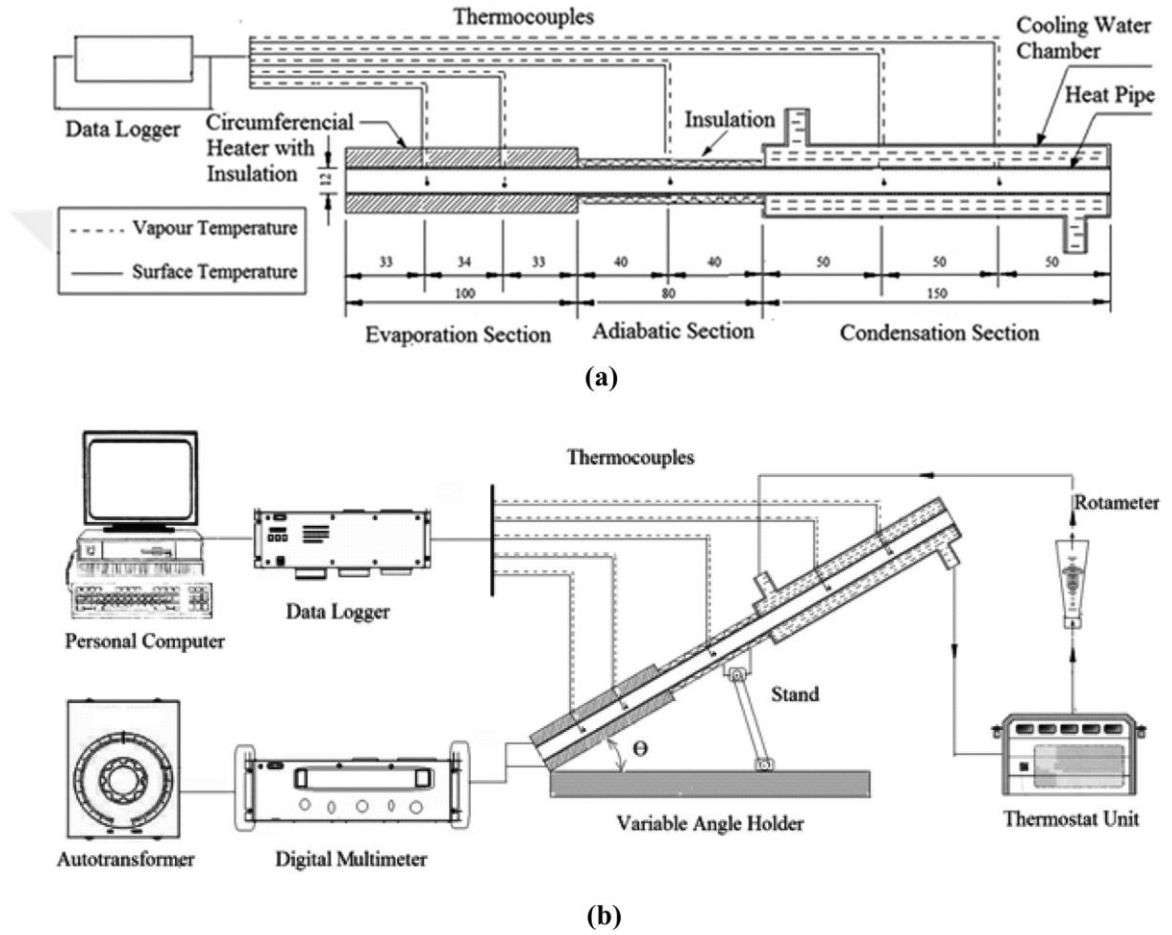
(b) After 30 days

Şekil 3.111. Ağırlıkça %0.5, 1.0 ve %1.5 CuO / DI su nanoakışkanı için sedimentasyon testi (Kumaresan *et al.* 2014a)

Farklı CuO ağırlıklarındaki nanoakışkan yoğunluğu ve özgül ısısı hesaplanmıştır.

Deney düzeneğinin şematik diyagramı ve test bölümünün kesit görünüşü Şekil 3.112 'de gösterilmiştir. Düzenek bir test bölümü, otomatik transformatör, sıcaklık kontrolörü, dijital multimetre, veri toplama sistemi ve kişisel bilgisayardan oluşmaktadır. Isı borusu bakırdan yapılmıştır, uzunluk, çap ve duvar kalınlığı sırasıyla 330 mm, 12 mm ve 0.5 mm'dir. 1 mm kalınlığında bakır sinterlenmiş fitil, yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcı ucuna

sıvı akışı için kılcal etki sağlamaktadır. On T tipi termokupl (0.1 C hassasiyet) ısı borusuna takılmış, yüzey ve buhar sıcaklıklarını ölçmek için eşit olarak dağıtılmıştır. Homojen ısı girişi için buharlaştırıcı bölümüne 400W'lık bir çevresel seramik ısıtıcı takılmıştır.

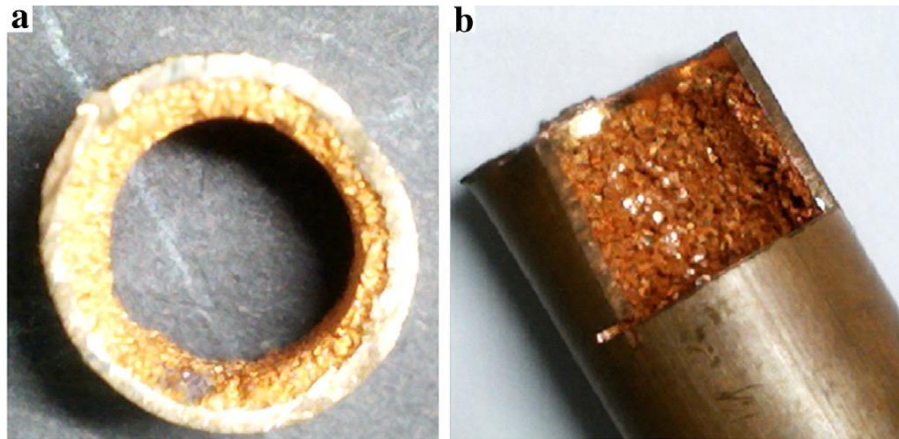


Şekil 3.112. Şematik yerleşimi a) deney düzeneğinin kesit görünümü ve termokuplların şematik yerleşimi b) Deney düzeneği (Kumaresan *et al.* 2014a)

Buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler, ısı borusu ve çevre arasındaki ısı kayıplarını en aza indirmek için cam yünü ile mükemmel bir şekilde yalıtılmıştır. Yoğunlaştırıcının (150 mm) tüm bölümü 32 mm çapında akrilik bir tüp ile kaplanmıştır. Şekil 3.113, bakır sinterlenmiş ısı borusunun kesit üstten ve yandan görünüşünü temsil eder, görüntü bir dijital kamera tarafından çekilmiştir. Sinterlenmiş fitil ısı borusunun çalışma basıncı 13.46 kPa'dır. Bu değer hem DI su hem de CuO nanoakışkanlı ısı boruları için sabit

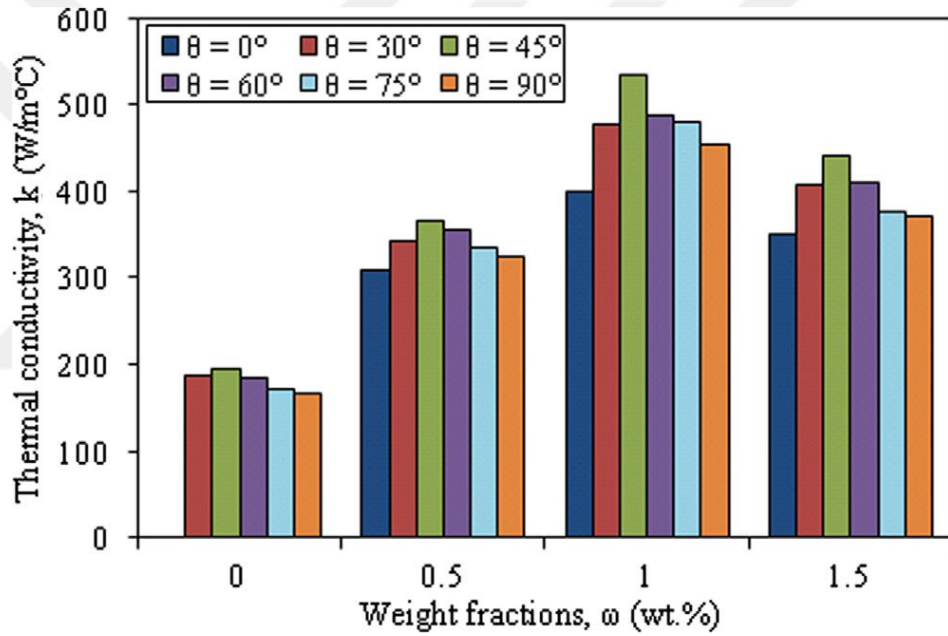
kalmıştır. Giriş suyu sıcaklığını belirtilen bir değerde tutmak için devreye sabit bir sıcaklık banyosu eklenmiştir. Yüzey sıcaklığının ölçümü için, ikişer termokupl buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerine, bir termokupl ise adyabatik bölüme takılmıştır. Benzer şekilde, buhar sıcaklığını ölçmek için termokupllar eklenmiştir. Tüm termokupllar okumaları izlemek için bir Agilent veri toplama sistemine bağlanmıştır. Elektrikli ısıtıcıya giden güç kaynağı bir otomatik transformatör tarafından kontrol edilmiş ve güç girişi dijital bir multimetre ile ölçülmüştür. Girişe 220 V, 50 Hz AC besleme verilmiştir.

Deneyler, biri DI su ve diğer üçü de farklı konsantrasyonlarda CuO / DI su nanoakışkanı ile olmak üzere dört farklı durumda gerçekleştirilmiştir. Isı girişi başlangıçta 10W'tır ve 10 ar W'lık artışla 160W'a kadar arttırılmıştır. Maksimum giriş gücü, ısı borularının kuruma durumuna (evaporatör ve kondenser uçları arasındaki sıcaklık farkında beklenmedik artış) bağlıdır. Ayrıca deneyler sırasıyla 0, 30, 45, 60, 75 ve 90 olmak üzere çeşitli ısı borusu eğim açıları ile gerçekleştirilmiştir. Isı borusunun çalışma basıncı DI su ve CuO nano-akışkan ısı boruları için sabit olarak 13.46 kPa'dır. Deney sırasında, her termokuplun sıcaklıkları bir Agilent veri toplama sistemi kullanılarak sürekli olarak izlenerek, sıcaklık okumalarında herhangi bir dalgalanma gözlenmeyene kadar kişisel bir bilgisayarda saklanmıştır. Sıcaklık okumalarında dalgalanma olmadığından emin olduktan sonra, bu durum daha fazla veri azaltımı için kullanılan sıcaklığın kararlı durum değeri olarak alınmıştır.



Şekil 3.113. Sinterlenmiş fitil ısı borusunun bir dijital kamera ile kesit görünüşü (a) üstten görünüm ve (b) yandan görünüm (Kumaresan *et al.* 2014a)

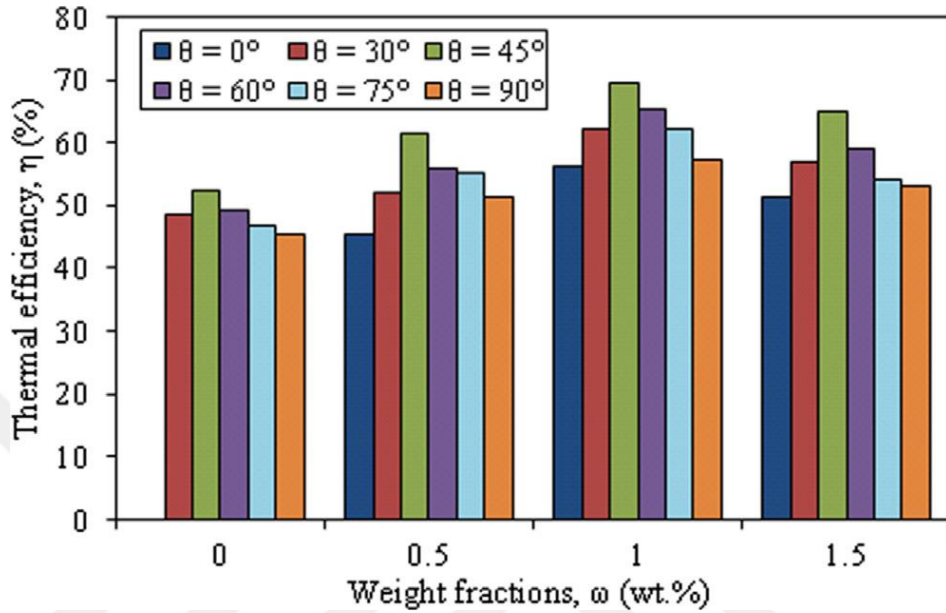
45° eğim açısı optimum performans sağlar ve bunun ötesinde bozulma meydana gelir. Bunun nedeni, büyük eğim açısının sıvıyı yoğunlaştırıcıdan buharlaştırıcı bölümüne hızlı bir şekilde geri döndürmesi, ancak buharlaştırıcıdaki buhar üretiminin yetersiz olmasıdır. Ağırlık fraksiyonunun ısı borusunun ısıl iletkenliği üzerindeki etkisi Şekil 3.114'de gösterilmiştir. DI su ile karşılaştırıldığında ağırlıkça %1.0 CuO / DI su nanoakışkanı için %63.5'lik bir artış kaydedilmiştir. Aynı zamanda, ağırlıkça %0.5 ve %1.5'lik artış sırasıyla %46.6 ve %55.9'dur. Isıl iletkenlik, nanoakışkanların fiziksel özellikleri nedeniyle ağırlıkça %1.5 konsantrasyon için azalmıştır.



Şekil 3.114. CuO nanoakışkanının farklı ağırlık fraksiyonları için ısı borusunun ısıl iletkenliği (ısı girişi - 120 W) (Kumaresan *et al.* 2014a)

Şekil 3.115, farklı eğim açıları ve ağırlık fraksiyonları için ısıl verimlilikteki değişiklikleri göstermektedir. CuO / DI su nanoakışkanının artan ağırlık fraksiyonları ile ısıl verimdeki artışı açıkça görülmektedir ve ağırlıkça %1.0'da maksimum değere ulaşmaktadır. DI su ısı borusunun 0° eğim açısındaki verimliliği Şekil 3.115'te gösterilmemiştir, çünkü ısı borusu kuruma koşullarına ulaşır ve bozulma meydana gelir. %1.0 CuO nanoakışkanı optimum ağırlık oranı için %24.91'lik bir verimlilik artışı elde edilir ve 45'lik bir eğim açısı DI su sonuçlarıyla karşılaştırılır. Bununla birlikte, konsantrasyon ağırlıkça %1.0'ı

aşarsa, verimlilik düşer çünkü sıvıdaki daha fazla nanopartikül çalışma sıvısının konvektif ısı transfer performansını azaltacaktır.



Şekil 3.115. 120 W ısı girişinde farklı ağırlık ve eğim açısı için ısı borusunun ısı verimliliği (Kumaresan *et al.* 2014a)

Isı transferinin artmasının nedenleri şunlardır:

(a) Nanopartiküllerin baz sıvı içinde dağılması, çalışma sıvısının ısı iletkenliğini artırır. DI suyun nanoakışkan ile değiştirilmesi, ısı borusunun ısı transfer performansını artırır.

(b) Operasyon sırasında, baz sıvı içinde bulunan nanopartiküller, sinterlenmiş fitil yapısı üzerinde bir kaplama tabakası oluşturur. Bu, çalışma akışkanının kılcal hareketini artırır ve böylece ısı performans artar.

(c) Isı borusunun eğim açısı da ısı borusu performansı üzerinde etkilidir. Yoğunlaştırıcı bölümünde sıvının yoğunlaşmasını teşvik eder ve buharlaşmaya daha fazla sıvı akışı alabilir. Bununla birlikte, daha büyük eğim açıları, yani dikey konuma daha yakın, performansın düşmesine neden olur. Bunun nedeni, buharlaştırıcı bölümünün işlevini etkileyen daha hızlı kondens dönüşleridir.

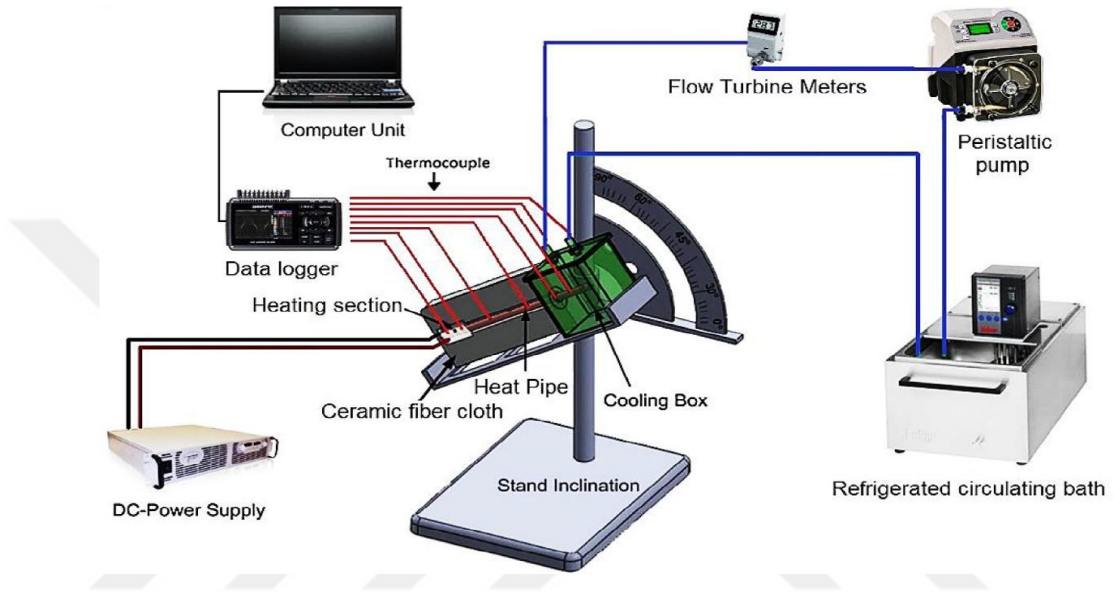
(d) Sıcaklık arttığında nanopartiküllerin Brownian hareketi düzelir. Bu aynı zamanda sıvının konvektif ısı transferini artırır.

Sadeghinezhad *et al.* (2016), sinterlenmiş fitil ısı borusunun grafen nanoakışkan kullanılarak termal performansını incelemek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çalışma, grafen konsantrasyonu, ısı borusu eğim açısı ve giriş gücünün etkilerindeki değişikliklere odaklanmıştır.

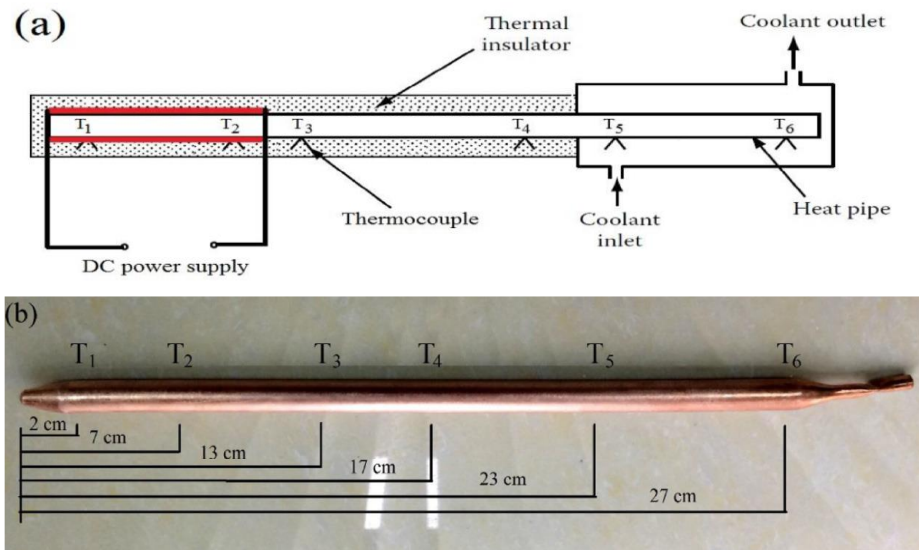
Sulu grafen nanoakışkanların hazırlanması için damıtılmış su kullanılmıştır. Nanoakışkan numuneleri dağılmayı içeren iki aşamalı hazırlama yöntemiyle hazırlanmıştır. İncelenen nanoakışkan konsantrasyonları ağırlıkça %0.025, 0.05, 0.075 ve %0.1'dir. Hazırlanan tüm deney numuneleri, statik koşullar altında 600 saat boyunca sedimantasyon belirtisi göstermemiştir.

Isı borusunun ısı verimliliğini değerlendirmek için kullanılan deney düzeneği, test bölümü, ısıtma ve soğutma ünitesi, değiştirilebilir eğim açısına sahip montaj platformu, veri toplama sistemi ve Şekil 3.116'da gösterildiği gibi ölçüm sisteminden oluşur. Isı borusu test bölümü bakırdan yapılmıştır ve dış çapı 12 mm, et kalınlığı 0.5 mm ve uzunluğu 300 mm'dir. Isı borularının bakır sinterlenmiş fitilinin kalınlığı 1 mm sabit bir değerde tutulur. Deneyi başlatmadan önce, ısı boruları başlangıçta bir vakum pompası ile boşaltılır ve daha sonra eşit miktarda damıtılmış su, grafen nanoakışkanları ile doldurulur. Isı borusunun yoğunlaştırıcı, buharlaştırıcı ve adyabatik bölümlerinin uzunluklarının her biri 100 mm'dir. Isı borusunun yoğunlaştırıcı kısmı akrilik borudan yapılmıştır ve teflon uç kapaklarına sahiptir. Yoğunlaştırıcı kesit halkası, bir soğutma peristaltik pompası (Daha uzun pompa) ve soğutma suyunu soğutulmuş bir sirkülasyon banyosundan devridaim etmek için akış sensörleri (Omega) ile donatılmıştır. Yoğunlaştırıcı bölümünün giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek için iki K tipi termokupl (Omega) kullanılır. DC güç kaynağına bağlanan buharlaştırıcı bölümüne ısı uygulanır. Buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümlerinden ısı kaybını azaltmak için, test bölümü birkaç kat seramik elyaf bezle sarılır. Deneysel test bölümü Şekil 3.117'de gösterilmiştir. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümündeki kapalı ucundan 20 mm (T1), 70 mm (T2) 130 mm (T3), 170

mm (T4), 230 mm (T5) ve 270 mm (T6) altı termokupl ısı borusunun dış yüzeyine tutturulmuştur ve ısı borusu duvar sıcaklıklarını ölçer. Tüm termokupllar deneylerden önce kalibre edilir. Termokupllar, her termokupl sıcaklığının sürekli kaydedilmesi ve izlenmesi için bir Graphtec veri kaydedicisine (midi logger gl220) bağlanır.



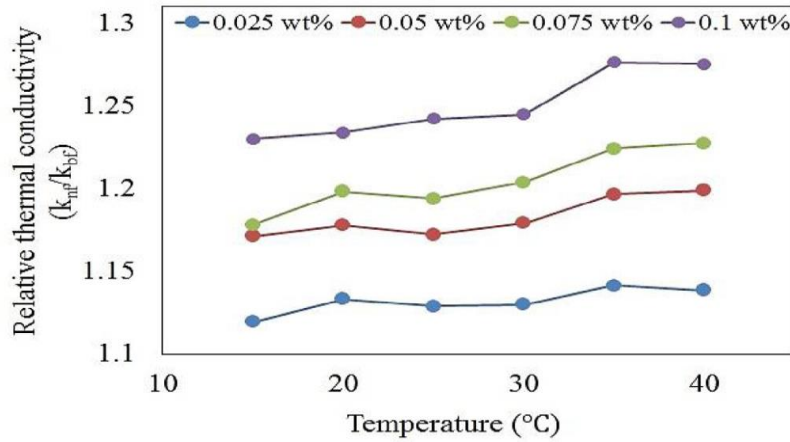
Şekil 3.116. Isı borusu ısıl performansını test etmek için deney düzeneği (Sadeghinezhad *et al.* 2016)



Şekil 3.117. (a) DeneySEL test bölümünün kesiti, (b) Deneyde kullanılan ısı borusu örneği (Sadeghinezhad *et al.* 2016)

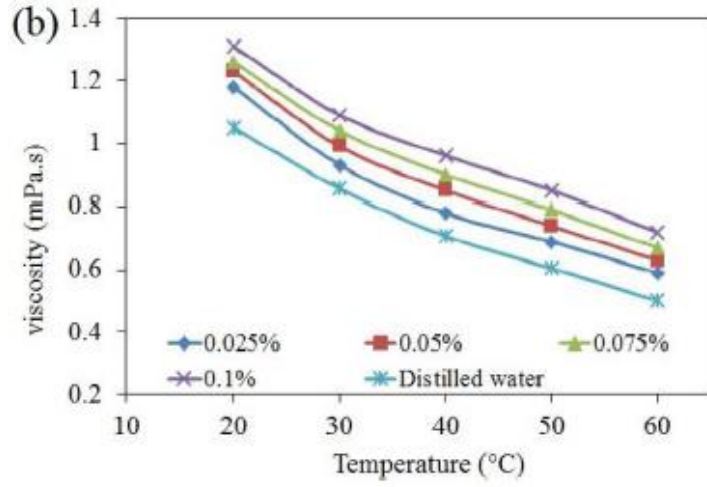
Sinterlenmiş fitil ısı borularının ısı transferi ve ısıl performansı deneysel olarak incelenmiş ve farklı konsantrasyonlarda sıvılar (deiyonize su ve nanoakışkanlar ağırlıkça %0.025 ila %0.1 arasında değişen konsantrasyonlarda), ısı giriş oranları ve ısı borusu eğim açıları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sistematik deneyler ile, ısı borusu için yüzey sıcaklığı, termal direnç, etkili termal iletkenlik, ısı transfer katsayısı ve entropi üretimi elde edilmiştir.. Ek olarak, viskozite ve ısıl iletkenliğin sıcaklığa bağımlılığı çeşitli sıcaklıklarda ve nano-sıvı konsantrasyonlarında ölçülmüştür. Bu araştırmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Grafen nanoakışkanın ısıl iletkenliği, nanopartikül konsantrasyonu ve çalışma sıcaklığı ile artmıştır. Kullanılan nanoakışkan konsantrasyonları için artış %12 ile %28 arasında değişmiştir.



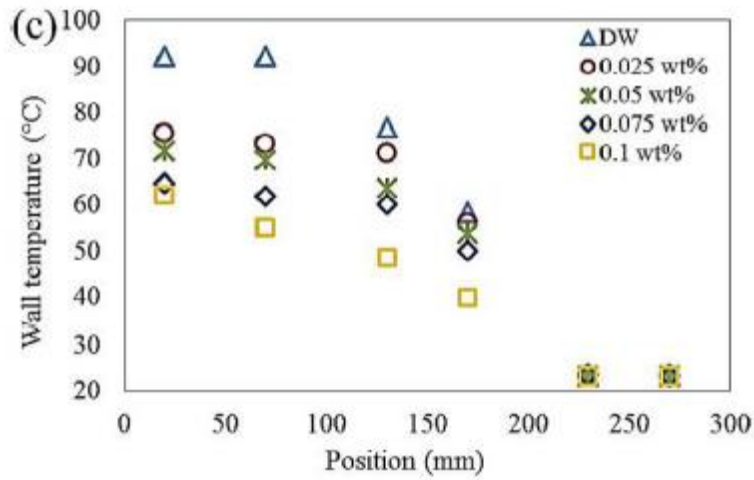
Şekil 3.118. Sıcaklık ve konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak grafen nanoakışkanın ısıl iletkenlik oran (Sadeghinezhad *et al.* 2016)

- Bir nanoakışkanın viskozitesi, ısı eşanjörleri ve soğutma sistemleri dahil olmak üzere çeşitli ısıl uygulamalarda kullanımını etkileyen önemli bir özelliktir. Şekil 3.119, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çeşitli konsantrasyonlarda grafen nanoakışkanların viskozitesini gösterir. Grafen nanoakışkanların viskozitesinin, sıcaklık 20°C'den 60°C'ye yükseldikçe %4 ila 44 arasında azaldığı ve artan grafen konsantrasyonuyla arttığı görülmektedir.



Şekil 3.119. Çeşitli konsantrasyonlar için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafen nanoakışkan viskozitesi (Sadeghinezhad *et al.* 2016)

- Grafen konsantrasyonu arttıkça ısı borularının duvar sıcaklığı önemli ölçüde düşüş göstermiştir. Yüzey sıcaklığındaki maksimum azalma 27°C'dir (60° eğim açısı, ağırlıkça %0.1 nanoakışkan konsantrasyonu ve 80W giriş ısıtma gücü için).



Şekil 3.120. 60° eğim açısında, 80W giriş gücünde grafen konsantrasyonunun ısı borularının duvar sıcaklığı dağılımına etkisi (Sadeghinezhad *et al.* 2016)

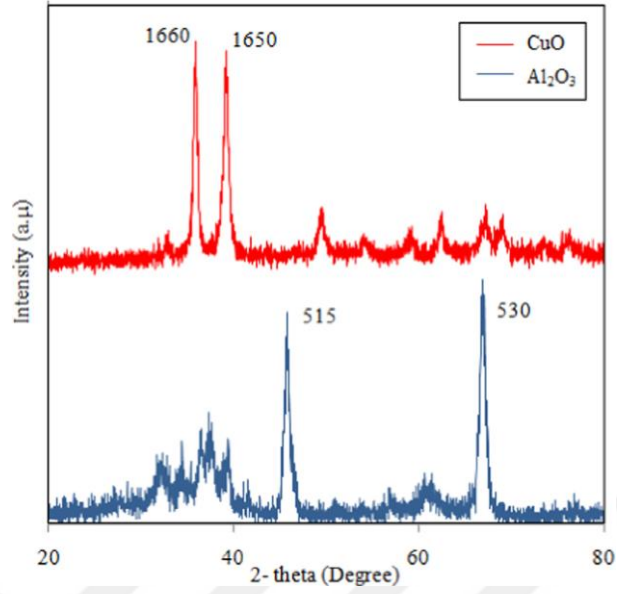
- Eğim açısı ve çalışma sıvısı konsantrasyonu ısı borularının ısı transfer performansını güçlü bir şekilde etkiler. Ağırlıkça %0.1 grafen nano-akışkan konsantrasyonunda, 60° eğim açısında ve 80W ısıtma gücünde bir ısı borusunun toplam ısı direnci, aynı

koşullarda çalışma sıvısı su olan bir ısı borusununkinden %48.4 daha azdır. Ayrıca, $\theta = 60^\circ$ 'lik eğim açısı, 21.2 kW / m²'lik giriş ısı akısı ve ağırlıkça %0.025 nanoakışkan konsantrasyonu için ısı transfer katsayısı, çalışma sıvısı su olandan yaklaşık %7.4 ve aynı koşullarda ağırlıkça %0.1 konsantrasyondan %53 daha fazladır.

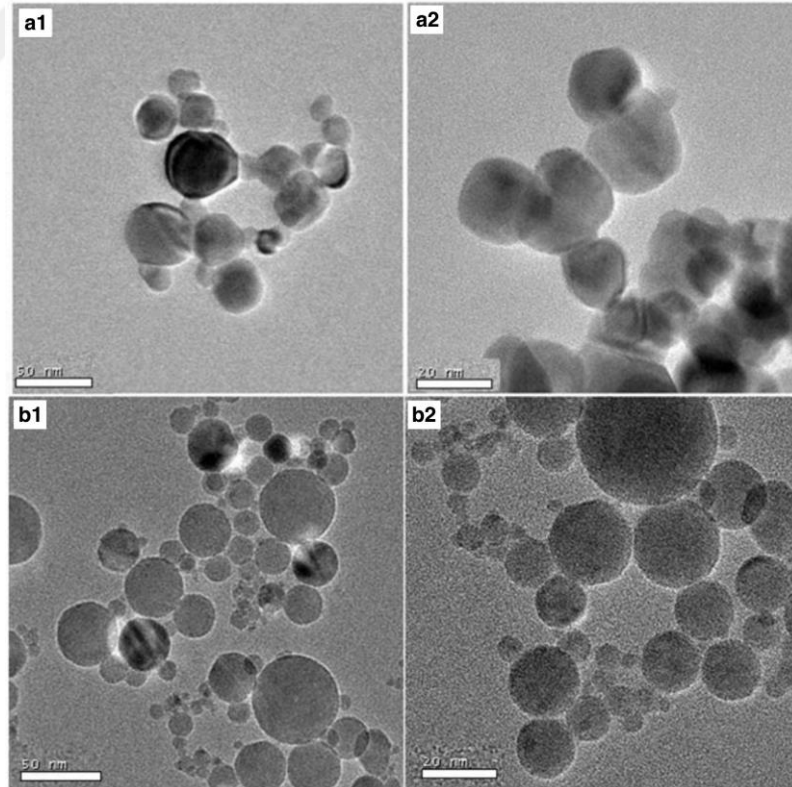
- Bir ısı borusunun eğim açısının ısı performans üzerindeki etkileri dikkat çekicidir. 20, 40, 60 ve 80W ısı giriş oranları için ısı borusunun ağırlıkça %0.1 nanoakışkan konsantrasyonunda ve 60°'lik bir eğim açısında etkili ısı iletkenlikte maksimum artışlar yatay konumla karşılaştırıldığında ($\theta = 0^\circ$), sırasıyla %23.4, 29.8, 37.2 ve 28.3'tür.
- Grafen nanoakışkan ısı borusunun buharlaştırıcı bölümündeki sinterlenmiş fitil yüzeylerinde ince bir kaplama oluşturur ve bu durum yüzey ıslanabilirliğini ve ısı borusu ısı performansını artırır.

Vijayakumar *et al.* (2017), yüzey aktifleştirici madde içermeyen CuO ve Al₂O₃ nanoakışkanları kullanılarak eğimli bakır sinterlenmiş fitil ısı borularının ısı transfer özellikleri üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır.

Nanoakışkan hazırlığı birincil adımdır ve saf nanopartiküller ağırlık fraksiyonuna göre ayrılır. Bu çalışmada CuO (%97.5 saf) ve Al₂O₃ (%94.5 saf) nanopartiküller kullanılmıştır. Şekil 3.121, X ışını kırınım analizi (XRD) kullanılarak çizilen CuO ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin kristalin modelini göstermektedir. Nanopartiküllerin ortalama boyutlarının sırasıyla 39.1 nm ve 37.5 nm olduğu bulunmuştur (Scherrer formülü kullanılarak). Şekil 3.122, CuO ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu görüntülerini göstermektedir. Görüntüler, her iki nanopartikülün de küre şeklinde olduğunu açıkça göstermektedir. Mevcut çalışmada, DI suyu baz sıvı olarak kullanılmaktadır, çünkü etilen glikol gibi diğer sıvılara göre daha iyi stabilite sağlar. CuO ve Al₂O₃ nanopartikülleri, iki aşamalı yöntem kullanılarak DI su içinde dağıtılır. Konsantrasyonlar ağırlıkça %0.5, ağırlıkça %1.0 ve ağırlıkça %1.5'dir. Daha sonra nanopartiküller deiyonize suda dağıtılır. Çözelti, 60 dakika boyunca nanopartiküllerin eşit dağılımı için 40 kHz frekanslı bir ultrasonik homojenleştiricide tutulur. Yüzey aktifleştirici madde ilavesi nanoakışkanların termal özelliklerini bozacağı için işlem sırasında hiçbir yüzey aktifleştirici madde eklenmez.

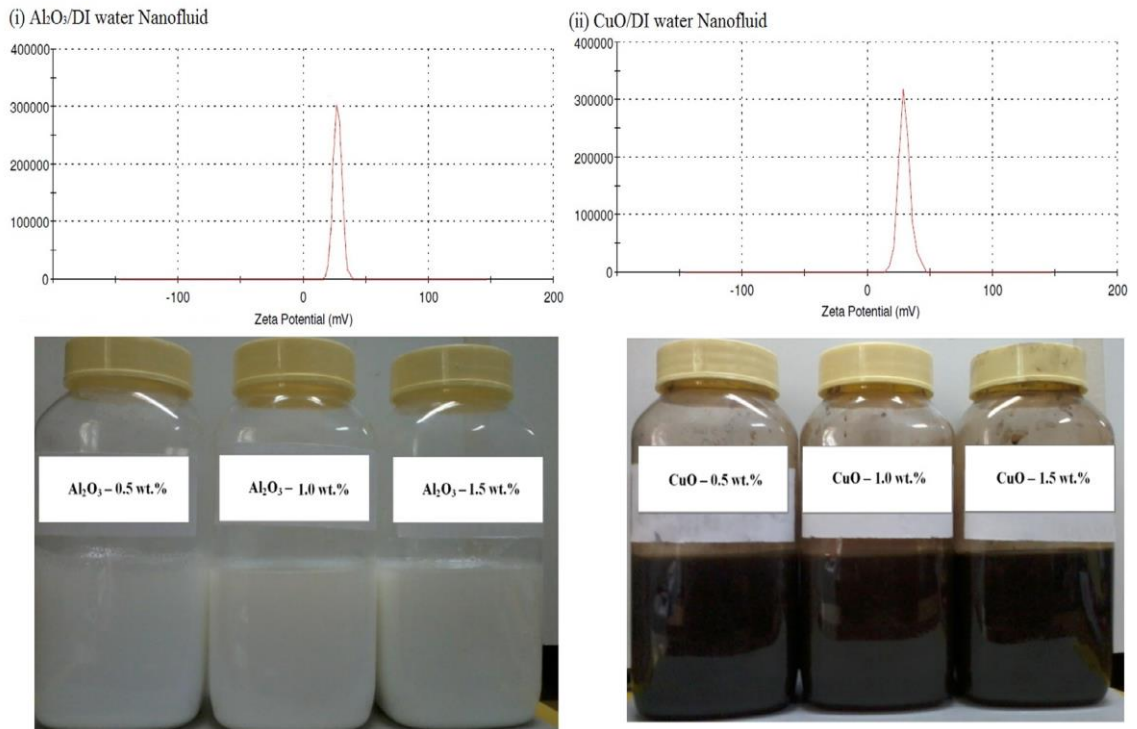


Şekil 3.121. CuO ve Al₂O₃ XRD Analizi (Vijayakumar *et al.* 2017)



Şekil 3.122. Farklı konsantrasyonlarda a)CuO b)Al₂O₃ HRTEM(Yüksek Çözünürlüklü İletim Elektron Mikroskobu) görüntüleri (Vijayakumar *et al.* 2017)

Nanopartiküllerin baz sıvı içine çökmesi hazırlanan nanoakışkanların performansını bozmuştur CuO / DI su ve Al₂O₃ / DI su nanoakışkanların sedimentasyon testi yapılmış ve Şekil 3.123'te gösterilmiştir. Fotoğraf, nanopartiküllerin ultrasonik homojenizatör önünde dağılmasının 60 günlük süresinden sonra çekilmiştir. Hem CuO hem de Al₂O₃ nanoakışkanlarında bir ayırma çizgisi bulunmamıştır. Ek olarak, elektrostatik kararlılığı analiz etmek için Al₂O₃ / DI su ve CuO / DI su nanoakışkanları için maksimum ağırlıkça %1.5'lik zeta potansiyel testi yapılmıştır (Şekil 3.123). Al₂O₃ / DI su ve CuO / DI su nanoakışkanları için elde edilen sonuçlar sırasıyla +24.6 mV ve +31.4 mV'dir. Nanopartiküller ve DI su arasındaki potansiyel farkın iyi olduğu açıkça görülmektedir. Termal iletkenlik ve dinamik viskozite, çalışma akışkanının ısı transfer özelliklerini etkileyen önemli termofiziksel özelliklerdir. CuO ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin kütle konsantrasyonunun termal iletkenlik ve dinamik viskozite üzerindeki etkisi Çizelge 3.5'te gösterilmiştir; Baz sıvıya nanopartiküllerin eklenmesi termal iletkenliğini artırır. Isı, buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcı bölümüne geçiş hızını artıracaktır. Al₂O₃ / DI su nanoakışkanlarının dinamik viskozitesi, CuO / DI su nanoakışkanlarından nispeten daha yüksektir.

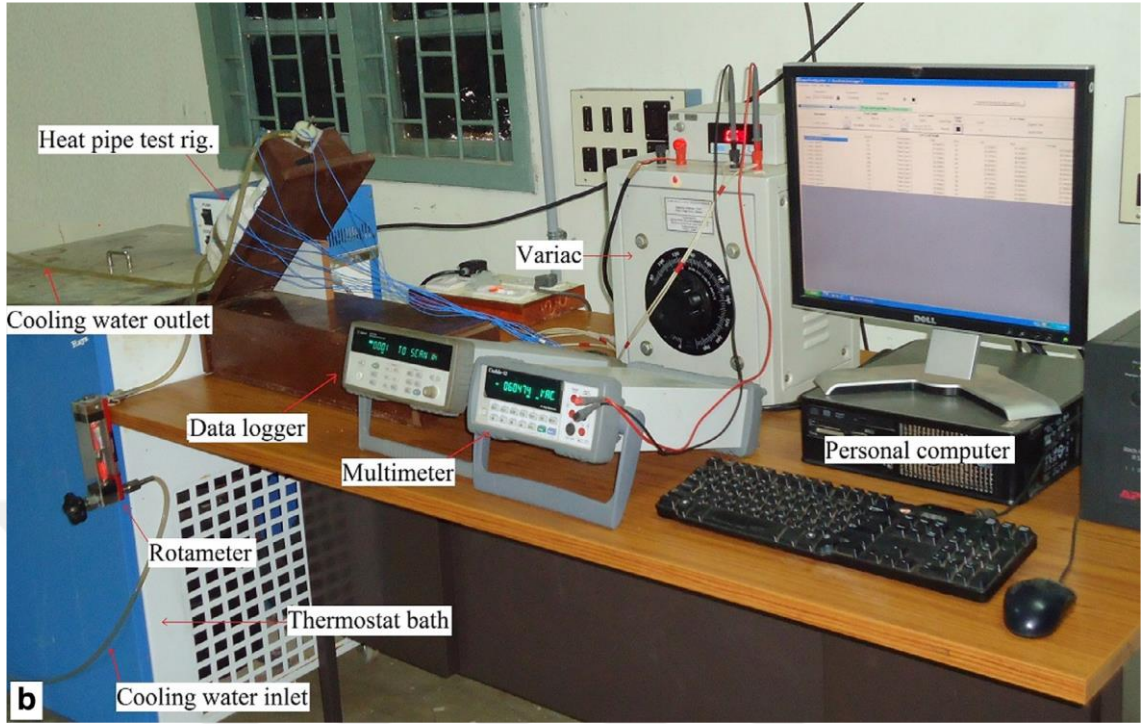


Şekil 3.123. Al₂O₃/su ve CuO/su nanoakışkanları zeta potansiyel ve sedimentasyon testleri (Vijayakumar *et al.* 2017)

Çizelge 3.5. CuO / DI su ve Al₂O₃ / DI su nanoakışkanlarının farklı konsantrasyonlarda termal iletkenliği ve dinamik viskozitesi (Vijayakumar *et al.* 2017)

Nanoakışkan Konsantrasyonu (%ağırlık)	Isıl İletkenlik(W/m°C)		Dinamik Viskozite (Cp)	
	CuO/Su	Al ₂ O ₃ /Su	CuO/Su	Al ₂ O ₃ /Su
Su	0.613		0.787	
0.5	0.618	0.615	0.799	0.821
1	0.627	0.623	0.801	0.844
1.5	0.645	0.637	0.802	0.878

Bakır tozu, enjeksiyon borusu yöntemi ile bakır borunun içinde sinterlenir. Sinterlenmiş bakır boru, uzunluk, çap ve kalınlık ölçüleri sırasıyla 330 mm, 12 mm ve 0,5 mm boyutlarındadır. Isı borusunun buharlaştırıcı bölümündeki ısı girişi 10 W'dan başlar. Isı borusu adyabatik bölümü tamamen cam yünü ile yalıtılır ve sistem ile çevre arasındaki ısı kaybının sıfır olduğu kabul edilir. Yüksek ısı akısı koşullarında, düşük konvektif ısı transfer katsayısı nedeniyle hava ısıyı uzaklaştırmak için yetersizdir. Dolayısıyla, sabit giriş sıcaklığını korumak için soğutma suyu devresine düşük sıcaklıkta bir banyo tutturulur. Kararlı durum durumuna ulaşmak, deney sırasında karşılaşılan önemli bir konudur. Yüksek ısı yüklerinde, ısı borusu kısa sürede sabit duruma ulaşır. Bu arada, düşük ısı girişi için yaklaşık 45 dakikalık bir süre gerektirir. Eğim açısı (Yatay çizgi ile ısı borusunun eksenel çekirdeği arasındaki açı) 0° ila 90° arasında değişir ve deneyler sırasıyla 0°, 30°, 45°, 60° 75° ve 90° için tekrarlanır. Fabrikasyon deney tesisinin şematik yerleşimi Şekil 3.124'te gösterilmiştir.



Şekil 3.124. Deney düzeneğinin fotoğrafı (Vijayakumar *et al.* 2017)

Sinterlenmiş fitil ısı borusunun termal performansı, çalışma sıvısının farklı konsantrasyonlarını 45° en uygun eğim açısıyla kullanarak deneysel olarak araştırılmıştır. Buharlaştırıcı bölümünün yüzey ve buhar sıcaklığı arasındaki minimum fark deiyonize su ile karşılaştırıldığında ağırlıkça %1.0 ve ağırlıkça %1.5 optimum konsantrasyon için 1.8°C ve 2.6°C dir. Yoğunlaştırıcı bölümünde aynı koşullar için elde edilen sonuçlar CuO ve Al_2O_3 nanoakışkanları için -1.3°C ve -2.1°C 'dir. CuO ve Al_2O_3 nanoakışkanlar için buhar sıcaklığı farkında optimum azalma ağırlıkça %1.0 ve ağırlıkça %1.5 konsantrasyonlarında 9.6°C ve 8.5°C dir. Her iki durumda da eğim açısı 45° 'de sabit tutulur.

Düşük çalışma koşullarında nanopartiküllerin eklenmesi ile ısı borusunun termal verimliliği yaklaşık %30,42 artar, bakır sinterlenmiş fitil ısı borusunun yüksek ve düşük ısı akısı operasyonları için uygun olduğu görülmüştür.

Sonuçlar, yüksek iletken partiküllerin eklenmesinin, sinterlenmiş fitil ısı borusunun termal performansını 45 ° 'lık optimum eğim açısında muazzam bir şekilde artırdığını göstermiştir.

3.1.4. Termosifon ısı borusu

Noie *et al.* (2009), çalışma sıvısı olarak %1–3 hacim konsantrasyonunda Al_2O_3 / su nanoakışkanı kullanıldığında kapalı bir termosifonun ısı performansını araştırmışlardır.

Bu çalışmada Çizelge 3.6'da sunulan fiziksel özelliklere sahip alüminyum oksit (Al_2O_3) nanopartikülleri kullanılmıştır. Nanopartikül süspansiyonlarının hazırlanması, ısı transferi geliştirmede nanoakışkanların uygulanmasının ilk adımıdır. Bu çalışmada, Al_2O_3 nanopartikülleri, ilavelerin varlığı nedeniyle nanoakışkanın kimyasal özelliklerinde olası herhangi bir değişikliği önlemek için herhangi bir yüzey aktifleştirici madde kullanılmadan damıtma suyunda ultrasonikleştirme ile dağıtılmıştır. Hacimce %1, %1.5, %2, %2.5 ve %3'lük nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Süspansiyondaki nanopartiküllerin hacim oranı ve yoğunluğu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$v = \frac{V_s}{V_t} \quad (3.46)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (3.47)$$

V_s : Karışımdaki nanopartikül hacmi (m^3)

V_t : Karışımın toplam hacmi (m^3)

ρ_s : Nanopartikül yoğunluğu

m_s : Karışımdaki nanopartikül kütlesi

Nanoakışkanın hazırlanması için gerekli nanopartikül kütlesi:

$$m_s = 1 \times 10^{-3} v \cdot \rho_s$$

v:Nanopartikül hacim fraksiyonu

Çizelge 3.6. Çalışmada kullanılan Al_2O_3 nanopartiküllerinin fiziksel özellikleri (Noie *et al.* 2009)

Partikül	Ortalama çap (nm)	Yüzeysel yoğunluk(kg/m ³)	Gerçek yoğunluk (kg/m ³)	Suyun özgül ısısı(j/kgK)	K(w/Mk)
Al_2O_3	20	160-400	3700	880	46

Gerekli nanopartikül tozu kütlesine eşdeğer hacim ölçüldükten sonra, yaklaşık 4 saat süreyle ultrasonikasyona tabi tutulan bir şişede damıtılmış su ile karışım yapılmıştır. Süspansiyonun yerleşmesinden 24 saat sonra nanopartiküllerde çökme / çökme gözlenmemiştir. TPCT(Çift Fazlı Kapalı Termosifon) nin ısı performans ölçümü için kullanılan sistem Şekil 3.125'te gösterilmiştir. Bu sistem iç çapı 20 mm, kalınlığı 1 mm ve 1000 mm uzunluğunda bakır borudan yapılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri sırasıyla 350 ve 400 mm uzunluğundadır. Buharlaştırıcı bölümü çevresinde kullanılan elektrikli ısıtıcılar, nominal gücü 1000 W olan bir Nikel-Krom telden yapılmıştır. Giriş gücünü ölçmek için devreye bir ampermetre ve bir voltmeter monte edilmiştir.

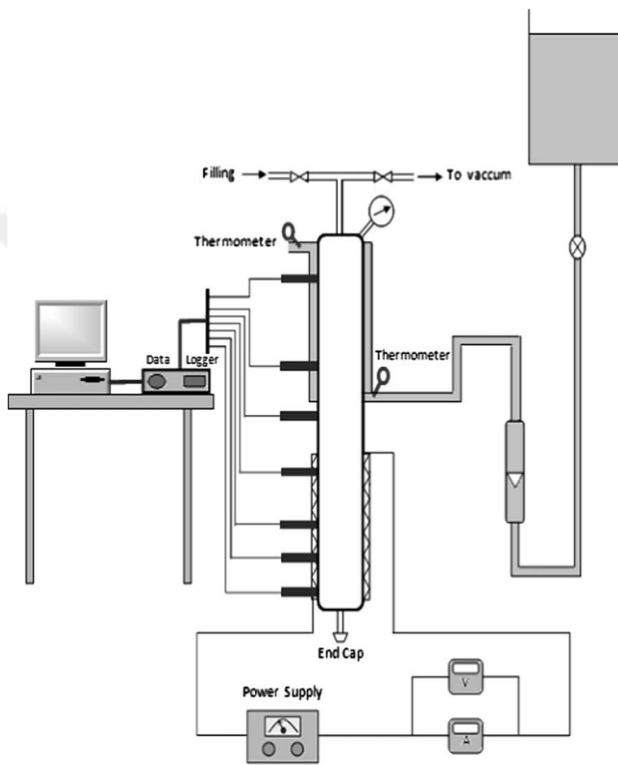
$$Q_{in} = VI - Q_{loss} \quad (3.48)$$

Q_{loss} : Radyasyon ve serbest konveksiyon ile buharlaştırıcı bölümünden toplam ısı kaybıdır.

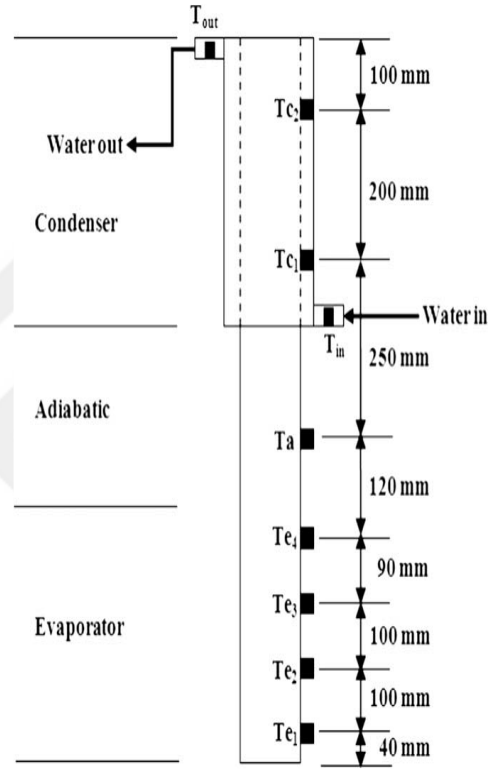
$$Q_{loss} = Q_{rad} + Q_{conv}. \quad (3.49)$$

Isı borusu üzerindeki lokal sıcaklıklar yedi termokupl (tip-LM35) ile ölçülmüştür. Buharlaştırıcı bölümüne dört, adyabatik bölüme bir ve yoğunlaştırıcı bölümüne iki termokupl monte edilmiştir. Ayrıca, soğutucu suyun giriş ve çıkış sıcaklığını okumak için yoğunlaştırıcı bölümünde iki hassas termometre kullanılmıştır. Isı borusu üzerindeki termokuplların konfigürasyonu ve yerleri Şekil 3.126'da gösterilmektedir. Tüm elektrikli

(termokupllar, termometreler, ampermetre ve voltmetre gibi) ve mekanik ekipman (rotametre gibi) başlangıçta kalibre edilmiştir. Ayrıca, DC akımını termokupllardan dijital sinyallere dönüştüren bir veri kaydedici, ölçülen tüm verilerin izlenmesini mümkün kılmıştır.



Şekil 3.125. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Noie *et al.* 2009)



Şekil 3.126. Termokuplların yerleşimi (Noie *et al.* 2009)

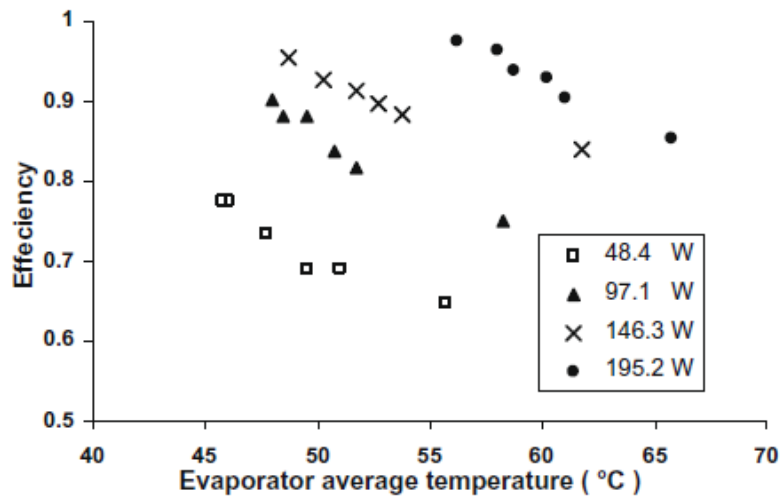
Bu çalışmada, çalışma sıvısı olarak Al_2O_3 / su nanoakışkanı kullanan çift fazlı kapalı bir termosifonun verimlilik iyileştirmesi amaçlanmıştır. Isı borusundaki farklı hacimdeki nanopartikül konsantrasyonları (%1-3) deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar saf su ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Termosifon ısı borusu, nanoakışkanlar ile yüklendiğinde, verimlilik yani ısı transfer kapasitesi önemli ölçüde artar. Örneğin, 97.1 W giriş gücünde, %1 konsantrasyonlu nanoakışkan ısı borusu verimini %75.1'den %81.56'ya yükseltebilir. Bu gelişme nanopartiküllerin hacim konsantrasyonu ile artar. Tüm çalışma akışkanları için, düşük

giriş güçlerindeki verimlilik gradyanı, yüksek giriş güçlerinden daha büyüktür. Örneğin, giriş gücü 48,4'ten 97,1 W'a yükseldiğinde, %2'lik bir nanoakışkan ile yüklenen ısı borusunun verimliliği %14,7 artarken, giriş gücünün 146,3'den 195,2 W'a çıkarılması ile sadece %2,7 lik bir artış elde edilir.

Isı borusu nanoakışkan ile yüklendiğinde, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri arasındaki sıcaklık farkları saf sudan daha azdır. Bu durum, saf su yerine nanoakışkan kullanıldığında termosifon ısı borusunun ısı performansının daha iyi olduğunu doğrular. Çeşitli ısı yüklemeleri altında çalışma sıvısında daha fazla Al_2O_3 nanopartikülünün dağıtılmasıyla, duvar sıcaklıklarında saf sudan daha düşük bir artış gözlenmiştir.

Şekil 3.127, farklı giriş güçleri için ortalama buharlaştırıcı sıcaklığına karşı termosifon ısı borusunun verimini göstermektedir. Şekil göz önüne alındığında, ısı borusunun verimliliği giriş gücü artışı ve buharlaştırıcı ortalama sıcaklık düşüşü ile artmaktadır. Şekil 3.127, saf suya nanopartiküllerin eklenmesinin buharlaştırıcı ortalama sıcaklığının belirgin bir şekilde azalmasına ve ayrıca ısı borusu verimliliğinin arttırmasına neden olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 3.127. Isı borusunun farklı giriş güçleri için ortalama buharlaştırıcı sıcaklığına karşı verimliliği (Noie et al. 2009)

Termosifon ısı borusu üzerindeki sıcaklık dağılımları saf suya kıyasla nanoakışkan kullanılarak daha düşük seviyededir. Nanoakışkan kullanıldığında buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri arasındaki sıcaklık farkları saf sudan daha az olarak elde edilmiştir yani nanoakışkan kullanıldığında ısı borusunun ısı direnci daha az olarak elde edilmiştir.

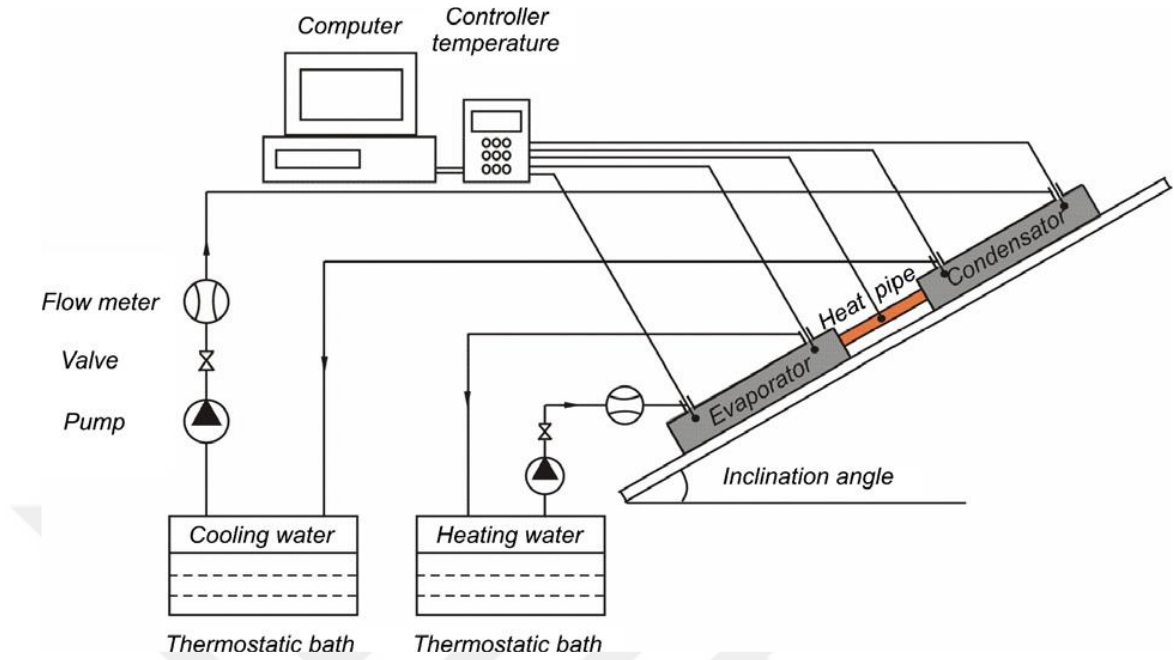
Nanoakışkan kullanan termosifon ısı borusu ısı transferi artışı büyük ölçüde partikül tipine, partikül boyutuna, baz sıvıya ve kabarcık çekirdeklenme boyutuna bağlıdır.

Huminić *et al.* (2011), termosifon ısı borusunda Fe_2O_3 / su nanoakışkan uygulanması ile ilgili araştırma yapmışlardır. Test nanoakışkanları, demir oksit nanopartiküllerinin saf suda dağıtılmasıyla elde edilmiştir. Nanopartiküllerin ortalama büyüklüğü 4-5 nm dir.

Deney koşullarının değişimi, sentezlenen nanopartiküllerin boyutunun ve morfolojisinin izlenmesine izin vermektedir. Bu çalışmada kullanılan demir oksit numunelerinin hazırlanması için lazer gücü, reaktör basıncı, oksitleyici ajanın (hava) bağlı akışı ve etilen akışı ($Fe(CO)_5$ taşıyıcı olarak) aşağıdaki değerlerde optimize edilmiş ve sabitlenmiştir: sırasıyla 35 W, 300 mbar, 70 sccm ve 145 sccm.

Termosifon ısı borularının sıcaklığını ölçmek için deneysel bir sistem kurulmuştur (Şekil 3.128). Deneyde, bakır termosifon ısı borusunun dış çapı ve uzunluğu sırasıyla 15 ve 2000 mm'dir. Termosifon ısı borusu için diğer tüm geometrik parametreler Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Termosifon ısı borusunun duvarındaki sıcaklık dağılımı, 6 mm çapında P-100 tipi termo direnç ile ölçülmüştür. Toplamda beş termokupl, ikişer tanesi buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bir tanesi adyabatik bölüme tutturulmuştur. Sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlik $\pm 0.1^\circ C$ 'dir.



Şekil 3.128. Deney düzeneği (Huminic *et al.* 2011)

Çizelge 3.7. Isı borusu özellikleri (Huminic *et al.* 2011)

Isı borusu	Bakır
Isı borusu uzunluğu	2000 mm
Buharlaştırıcı uzunluğu	850 mm
Yoğunlaştırıcı uzunluğu	850 mm
Adyabatik bölüm	300 mm
Dış çap	15 mm
Duvar kalınlığı	0.7 mm
Doldurulan sıvı hacmi	%12
Eğim açısı	45° ve 90°

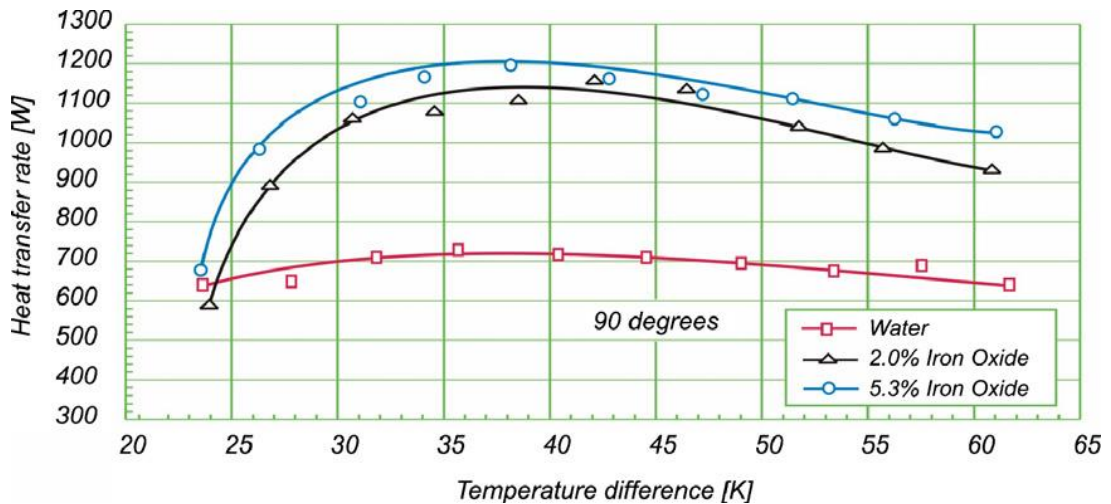
Buharlaştırıcı bölümündeki ısıtma suyunun sıcaklığı bir termostatik banyo (GD 120-S26) ile sabit tutulmuş ve çalışma sıcaklığı 50 ila 95°C arasında değiştirilmiştir. Yoğunlaştırıcıdan gelen soğutma suyunun sıcaklığı, ± 0.04 C'lik bir belirsizlikle bir termostatik banyo (Haake C10 - P5 / U) ile 20°C'de sabit tutulmuştur. Adyabatik çalışma sıcaklıkları 34 ila 40°C arasında değişmiştir: Termosifon ısı borusu 10 mm kalınlığında

köpüklü polistiren ile yalıtılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerinden giriş ve çıkış sıcaklıkları ile soğutma suyunun kütle akış hızları da ölçülmüştür.

Şimdiye kadar yapılan tüm testler sırasıyla 45° ve 90° (dikey) eğim açılarındaki gerçekleştirilmiştir. Termosifon ısı borusunun eğim açısı, yatay eksen ile termosifon ısı borusunun yüzeyi arasındaki açı olarak tanımlanmıştır.

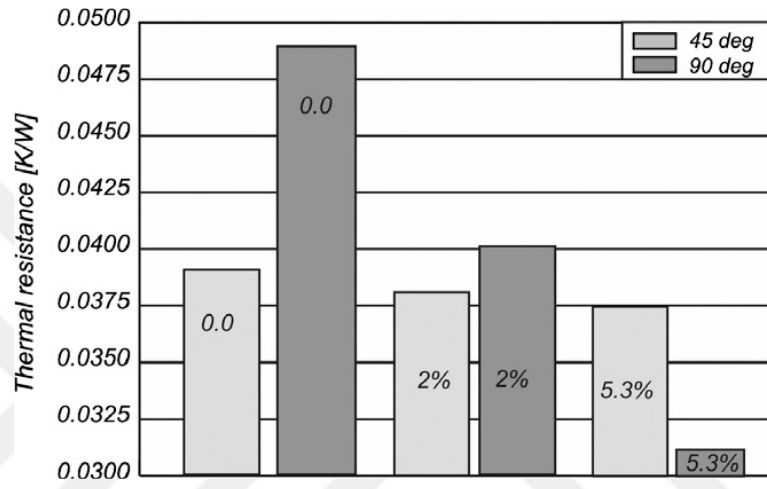
Farklı çalışma sıvılarına ve 45°'lik bir eğim açısına sahip termosifon ısı borusunun performans eğrileri göstermektedir ki su termosifon ısı borusu ile karşılaştırıldığında, farklı konsantrasyonlarda demir oksit nanopartiküllerine sahip termosifon ısı borusunun ısı transfer hızında önemli artışlar gözlenmiştir. Örneğin, suda %2'lik demir oksit nanopartiküllerinin mevcudiyeti, ısı aktarım hızında %19 ve sudaki %5.3'lük demir oksit nanopartikülleri ise %22.2 artış sağlamıştır.

Şekil 3.129, 90°'lik bir eğim açısı için termosifon ısı borusunun ısı performansını göstermektedir. Bu şekilde, %2 demir oksit nanopartikülleri ile %39'luk, %5,3 demir oksit nanopartikülleri için %42'lik bir ısı aktarım hızı artışı elde edilmiştir. Ayrıca, şekil 3.129 nanopartiküllerin termosifon ısı borusunun ısı performansındaki olumlu etkisini açıkça vurgulamaktadır.

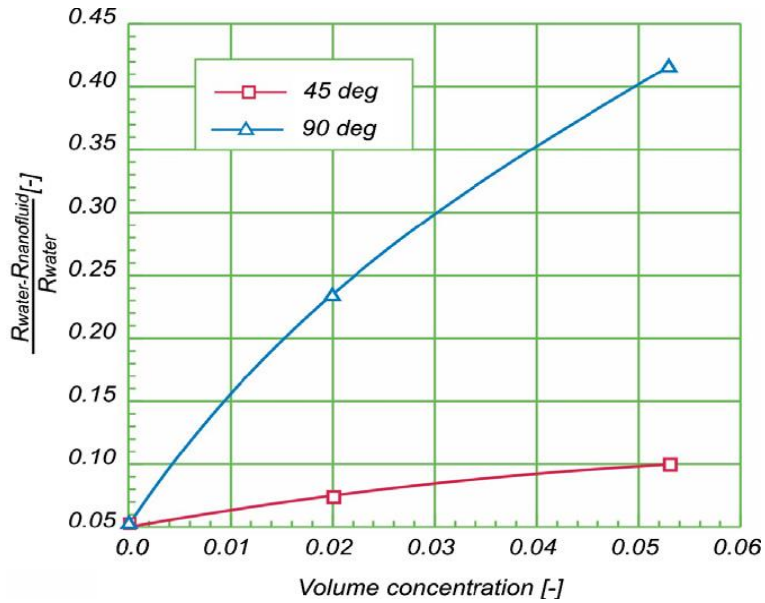


Şekil 3.129. Farklı konsantrasyon seviyeleri ve 90 ° lik eğim açısı için ısı aktarım hızı dağılımları (Huminic *et al.* 2011)

Farklı nanopartikül konsantrasyon seviyelerinin termosifon ısı borusu ısıl direnci üzerindeki etkisi Şekil 3.130 ve Şekil 3.131’de gösterilmiştir. Şekil 3.130, nanoakışkanlı termosifon ısı borusunun saf su ile olan ısı borusu ısıl direncinin azalma oranı gösterilmiştir. Nanopartikül konsantrasyonunun artırılmasının termosifon ısı borusu ısıl direncini azalttığı ve böylece daha iyi bir performans sağladığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.130. Farklı nanopartikül konsantrasyon seviyelerinin termosifon ısı borusu ısıl direnci üzerindeki etkisi (Huminic *et al.* 2011)



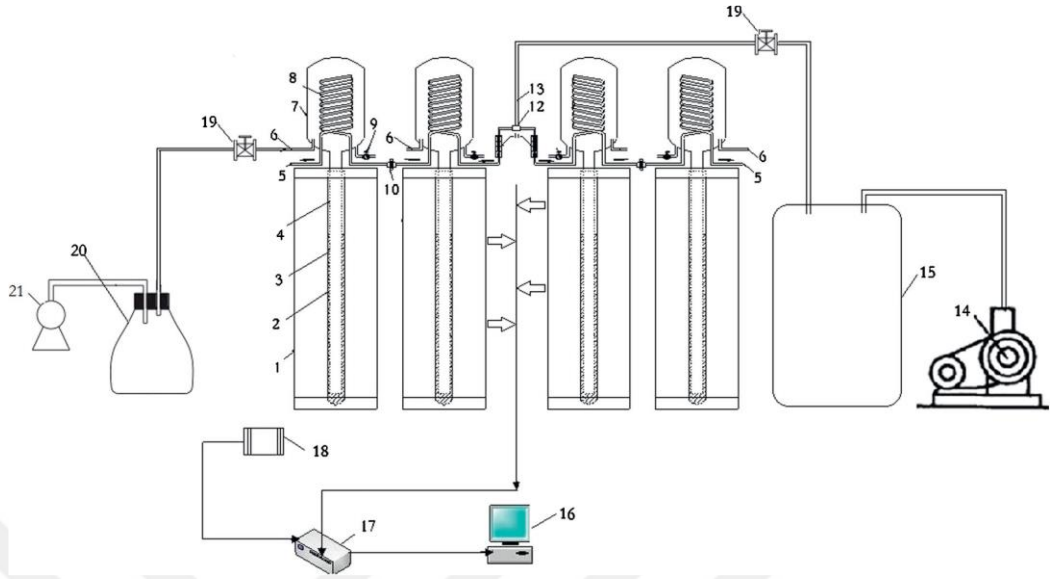
Şekil 3.131. Farklı nanopartikül konsantrasyon düzeylerinin ısıl direncin azaltılması üzerindeki etkisi (Huminic *et al.* 2011)

Termosifon ısı borusunun ısıl direncinin azaltma nedeni şu şekilde açıklanabilir: Termosifon ısı borusunun büyük bir ısıl direnci, sıvı-katı arayüzünde buhar kabarcığı oluşumundan kaynaklanmaktadır. Daha büyük bir kabarcık çekirdeklenme boyutu, ısıнын katı yüzeyden sıvıya transferini önleyen daha yüksek bir ısıl direnç oluşturur. Süspansiyon halindeki nanopartiküller, kabarcık oluşumu sırasında buhar kabarcıklarını bombalamaya meyillidir. Bu nedenle, buhar kabarcığının çekirdeklenme boyutunun, asılı nanopartiküllere sahip olan sıvı için çok daha küçük olması beklenir.

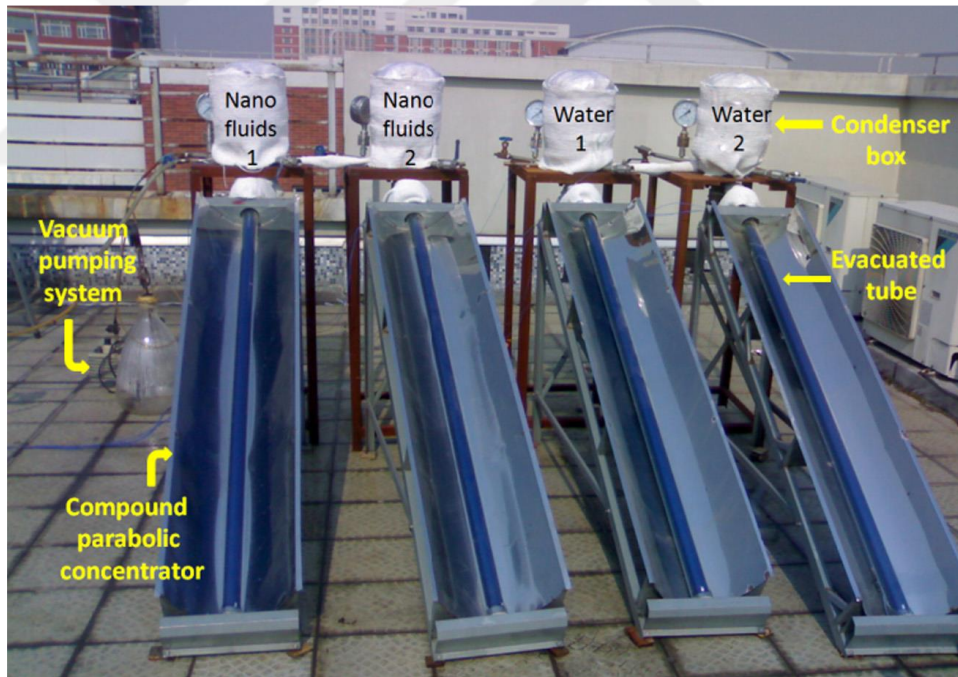
Liu *et al.* (2013), basitleştirilmiş CPC (bileşik parabolik yoğunlaştırıcı) ile entegre edilmiş yeni boşaltılmış tübüler güneş hava kollektörü ve çalışma sıvısı olarak su bazlı CuO nanoakışkan kullanan özel açık termosifon yüksek ve orta sıcaklıkta hava sağlamak için tasarlanmıştır.

Deney aparatı paralel olarak iki adet güneş hava toplayıcı sistem, veri toplama ve işleme sistemi, hava pompalama sistemi ve vakum pompalama sisteminden oluşur. Güneş hava kollektörü sistemi seri olarak iki ısı toplama panelinden oluşur ve tüm bu paneller yapısal olarak aynıdır. Şekil 3.132, deney aparatının şematik bir görünüşünü Şekil 3.133 ise deney aparatının bir fotoğrafını verir.

Kolaylık olması için, deney aparatının sol tarafındaki güneş hava kollektör sistemi Sistem I, sağ tarafındaki karşılığı ise Sistem II olarak adlandırılmıştır. Sistem I'deki açık termosifonlar çalışma sıvısı olarak su bazlı CuO nanoakışkan ile doldurulurken, Sistem II'deki açık termosifonlar deiyonize su ile doldurulur.



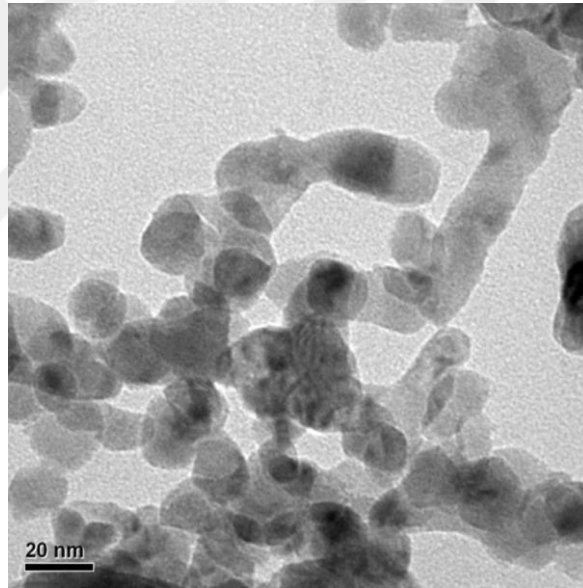
Şekil 3.132. Deney aparatının şematik görünüşü (Liu *et al.* 2013)



Şekil 3.133. Deney aparatının fotoğrafı (Liu *et al.* 2013)

Bu çalışmada, açık termosifonda deiyonize su ve su bazlı CuO nanoakışkanı çalışma sıvıları olarak kullanılmıştır. CuO nanopartikülleri gaz yoğunlaştırma yöntemi ile yapılan ticari ürünlerdir. Tedarikçi tarafından rapor edilen ortalama ortalama çap 50 nm'dir. Nanoakışkan, CuO nanopartiküllerinin doğrudan baz sıvıya dağıtılmasıyla hazırlanmış,

daha sonra nanopartiküllerin eşit olarak dağılabilmesi için 25-40 kHz'lik çalışma frekansına sahip bir ultrasonik su banyosunda yaklaşık 10 saat boyunca sürekli olarak salınmıştır. Bu salınım süresi bir referans süresidir ve tam bir dispersiyon sağlayabilir. Baz sıvıya herhangi bir yüzey aktifleştirici madde eklenmemiştir. Önceki iç mekan deneysel sonuçlarına dayanarak, açık termosifon içine doldurulmuş çalışma sıvısı hacmi buharlaştırıcı hacminin %60'ına sabitlenir ve CuO nanopartiküllerin kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.2'ye sabitlenir. Her iki değer, önceki temel çalışmaya göre açık termosifonun en iyi termal performansına karşılık gelir. Şekil 3.134, ağırlıkça %1.2 kütle konsantrasyonuna sahip CuO nanopartikül süspansiyonlarının SEM fotoğrafını göstermektedir.



Şekil 3.134. CuO nanopartiküllerinin SEM görünüşü (Liu *et al.* 2013)

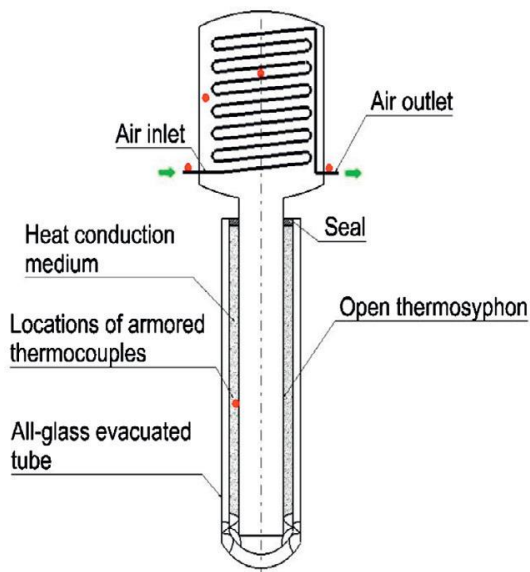
Şekil 3.135 (a)'da gösterildiği gibi, açık termosifon, buharlaştırıcı tüp ve buhar kutusu olmak üzere iki parça içerir. Her iki parça da paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Buharlaştırıcı borusu iç cam borunun içine eşmerkezli olarak sokulur ve bu şekilde oluşan halka şeklindeki boşluk özel bir ısı iletim ortamı ile doldurulur. Buharlaştırıcı tüpünün alt ucu kapalı ve üst ucu silindirik bir tank olan buhar kutusuna bağlanır. Hava ve açık termosifonun çalışma sıvısı arasında ısı transferi için buhar kutusunun içine spiral olarak sarılmış bir bakır boru monte edilmiştir. Bu spiral olarak sarılmış bakır boru, ortak ısı

borusundaki yoğunlaştırıcıya karşılık gelir ve değiştirilebilir yoğunlaşma ısı transfer alanı nedeniyle önemli bir avantaja sahiptir.

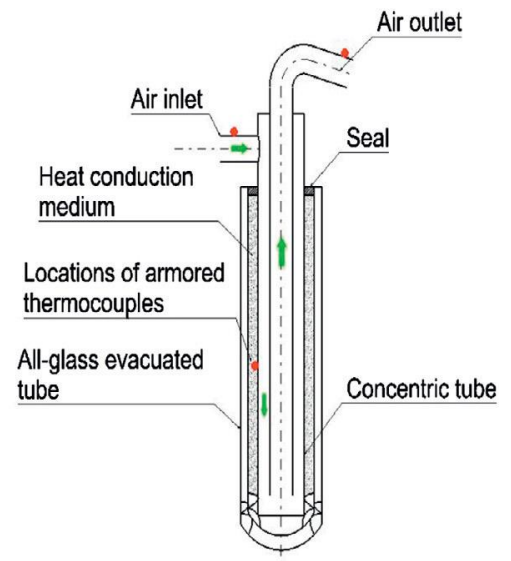
Mevcut deneyde, ortak eşmerkezli tüp ile entegre edilmiş bir güneş kolektörünün toplama performansı, yapısal tasarımın etkilerini anlamak için açık termosifon ile entegre olana kıyasla da test edilmiştir.

Eşmerkezli boru ayrıca bir kauçuk conta yoluyla tamamen camdan boşaltılmış bir tüpe monte edilmiştir. Hava, konsantrik tüpün girişine girer, halka şeklindeki bölüme girer, daha sonra altta bulunan iç tüpün girişine gelir ve son olarak iç tüpün çıkışından çıkar. Eşmerkezli borulu deneysel kolektör sistemi de iki panelden oluşur ve her panelde boşaltılan cam boru, basitleştirilmiş TBM ve boşaltılan cam borunun içine sokulan eşmerkezli boru bulunur. Güneş enerjili hava ısıtma karşılaştırma deneyinde, iki deney sistemi de paralel bağlanmıştır.

Şekil 3.135 (b), eş merkezli boru yapısını gösterir. Eşmerkezli borunun ayrıntılı boyutu ayrıca Çizelge 3.8'de gösterilmiştir. Etkili uzunluğu ve dış çapı, açık termosifonun buharlaştırıcı borusuyla aynıdır.



a) Açık termosifonun yapısı



b) Eş merkezli borunun yapısı

Şekil 3.135. Açık termosifon ve eş merkezli boru yapıları (Liu *et al.* 2013)**Çizelge 3.8.** Açık termosifon ve eş merkezli borunun ölçüleri (Liu *et al.* 2013)

Parametre	Değer
Açık termosifon	-
Buharlaştırıcı borusunun çapı	36 mm
Buharlaştırıcı borusunun etkili uzunluğu	1500 mm
Buharlaştırıcı kutusunun çapı	180 mm
Buharlaştırıcı kutusunun yüksekliği	300 mm
Spiral sarma borusunun çapı	12 mm
Spiral sarma borusunun uzunluğu	5000 mm
Eş eksenli tüpler	-
Eş eksenli tüplerin dış çapı	36 mm
Buharlaştırıcı tüpünün etkin uzunluğu	1500 mm

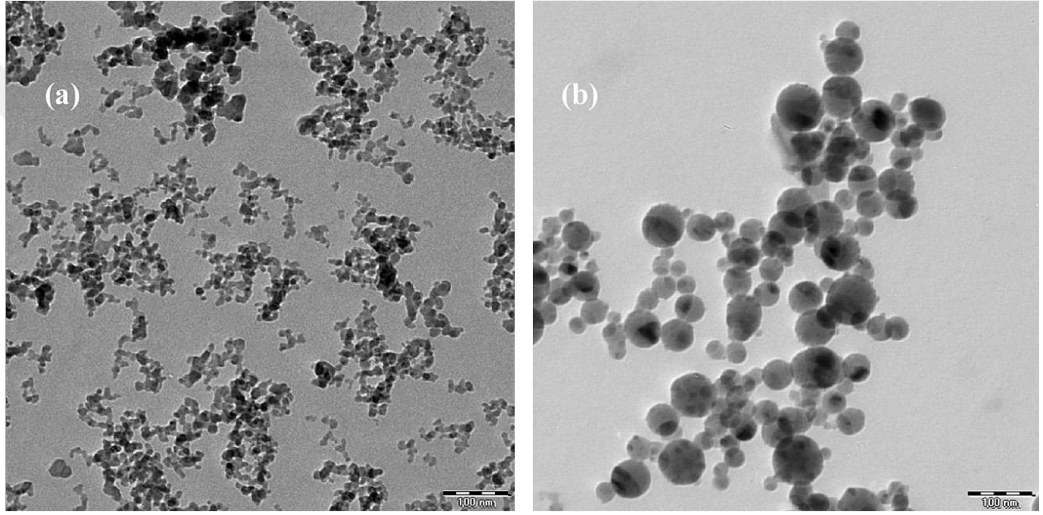
Sonuçlar, nanoakışkan uygulamasının güneş hava kolektör sisteminin toplama verimliliğini arttırdığını ve suyun çıkış sıcaklığının su kullanandan daha yüksek olduğunu göstermiştir. Deney düzeneği sadece iki toplama panelinden oluşmasına rağmen, kışın $7.6 \text{ m}^3 / \text{s}$ hava debisinde maksimum çıkış havası sıcaklığı 170°C 'yi aşmaktadır.

Kamyar *et al.* (2013), farklı hacimsel konsantrasyonlarda (%0.01, %0.02, %0.05 ve %0.075) Al_2O_3 ve TiSiO_4 nanoakışkanların (su bazlı) kapalı termosifonun ısıtım performansı üzerine uygulanmasını incelemişlerdir.

Deneyde Al_2O_3 (13 nm, %99.8 metal) ve TiSiO_4 (<50 nm, %99.8 metal) olmak üzere iki tür nanopartikül kullanılmıştır. Nanoakışkanları hazırlamak için iki aşamalı yöntem uygulanmıştır. Bu nanopartiküller, ultrasonik homojenleştirici kullanılarak damıtılmış su içinde dağıtılmıştır. Sonikasyon, düzgün ve kararlı bir partikül dispersiyonu elde etmek için 50 kHz'lik ses frekansında tutulmuştur. Nanoakışkanların özelliklerinde olası değişikliklerden kaçınmak için bu çalışmada hiçbir yüzey aktifleştirici madde

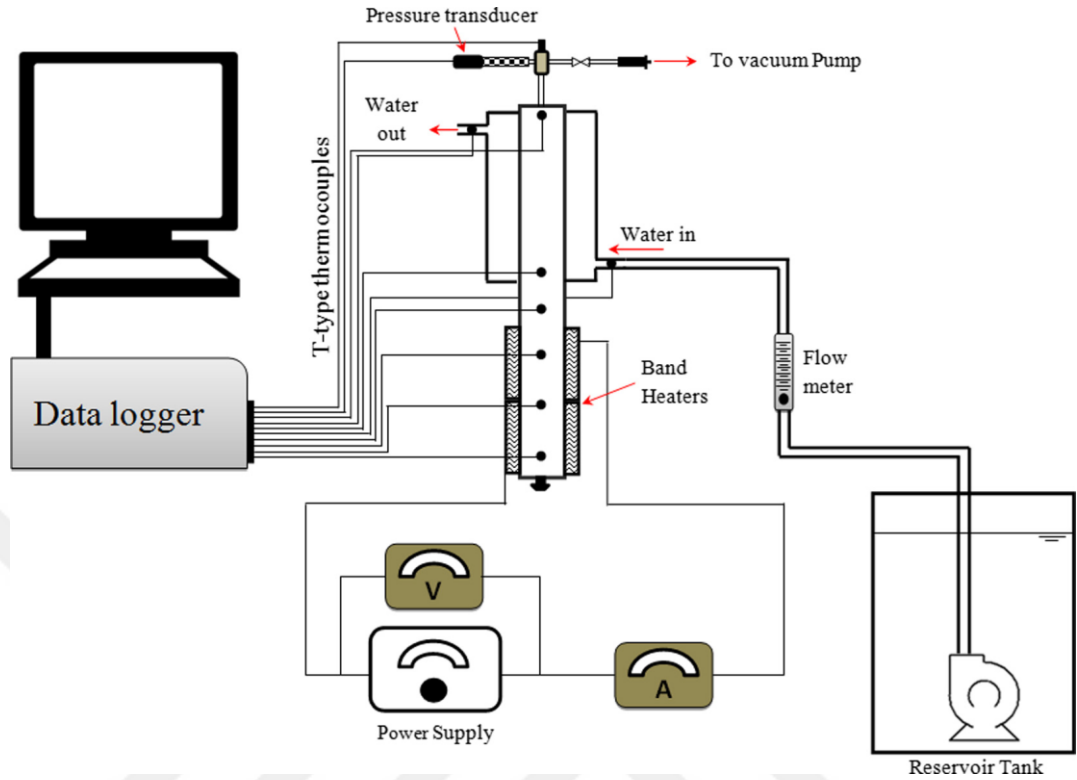
kullanılmamıştır. Nanoakışkanlar, %0.01, %0.02, %0.05 ve %0.075 hacim konsantrasyonlarında hazırlanmıştır.

Şekil 3.136, %0.05 hacim ile Al_2O_3 ve TiSiO_4 nanopartiküllerinin Transmisyon Elektron Mikroskopisi (TEM) görüntülerini göstermektedir. TiSiO_4 nanopartiküllerinin küresel şekli belirgin bir şekilde görülebilir. Sonikasyondan sonra, nanoakışkanlar gözlem altına alınmış ve 48 saat hareketsiz kaldıktan sonra sedimentasyon gözlenmemiştir.



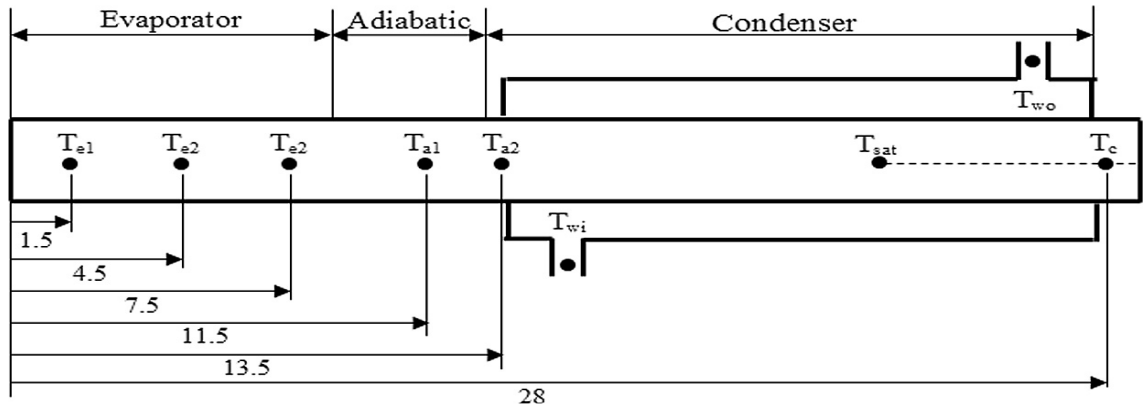
Şekil 3.136. %0.05 konsantrasyonda su içinde dağıtılmış (a) Alümina ve (b) TiSiO_4 nanopartiküllerinin TEM görüntüleri (Kamyar *et al.* 2013)

Şekil 3.137, fitilsiz bir ısı borusundaki nanoakışkanların ısı performansını araştırmak için kullanılan sistemin şematik diyagramını göstermektedir. Termosifon iç çapı 19 mm, kalınlığı 1.7 mm ve uzunluğu 300 mm olan bakırdan yapılmıştır. Buharlaştırıcı, adyabatik kesit ve yoğunlaştırıcı kısmın uzunlukları sırasıyla 100 mm, 40 mm ve 140 mm'dir. Dış çapı 55 mm olan bir soğutma ceketı yoğunlaştırıcı bölümünün etrafına yerleştirilmiştir. Buharlaştırıcı kısmındaki ısı akışını sağlamak için her biri 250 Ω değerinde iki elektrik bandı ısıtıcısı kullanılmıştır. Termosifonun tüm uzunluğu, ısı borusundan çevreye ısı kaybını en aza indirmek için 60 mm kalınlığında taş yünü ile yalıtılmıştır. Isı yükü, 40 W, 70 W, 120 W, 180 W ve 210 W farklı değerlere sahip elektrik bandı ısıtıcıları tarafından sağlanmıştır. Güç, şekilde gösterildiği gibi bir voltmetre ve ampermetre yardımıyla ölçülmüştür.



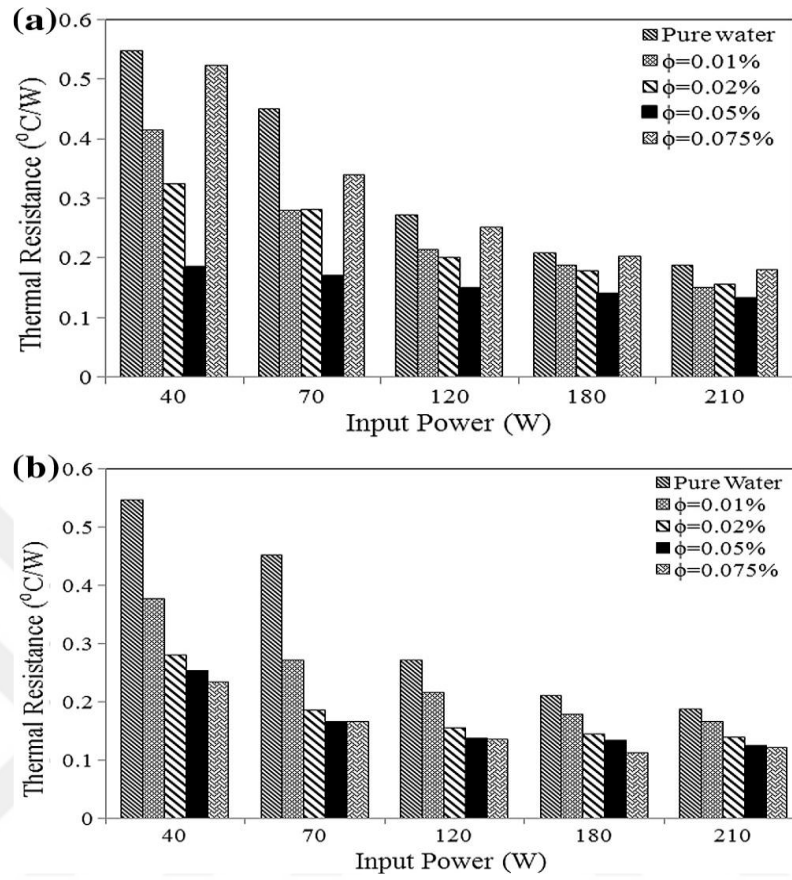
Şekil 3.137. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Kamyar *et al.* 2013)

T-tipi termokupllar, buharlaştırıcı ve adyabatik ve yoğunlaştırucu su çıkış / giriş sıcaklığı ve borunun içindeki buhar doygunluk sıcaklığı (T_{sat}) dahil olmak üzere gerekli sıcaklıkları ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 3.138, ısı borusu uzunluğu boyunca termokuplların yerlerini göstermektedir. Termosifonun içindeki basınç değişikliklerini kaydetmek için bir basınç dönüştürücü de yerleştirilmiştir. Ölçülen sıcaklıklar ve basınç, daha fazla analiz için bir veri toplama sistemi kullanılarak kaydedilmiştir. Soğuk su, yaklaşık 0.012 kg / s'lik bir kütle akış hızı ile yoğunlaştırıcının etrafında dolaştırılmıştır.



Şekil 3.138. Termokuplların yerleşimi (Kamyar *et al.* 2013)

Farklı konsantrasyonlarda (%0.01, %0.02, %0.05 ve %0.075) Al_2O_3 ve TiSiO_4 partikülleri, damıtılmış su içinde dağıtılmıştır. Araştırma, sıcaklık dağılımındaki değişikliklere, termosifonun genel ısıl direncine ve buharlaştırıcı bölümünün ısı transfer katsayısına odaklanmıştır. Düşük ve yüksek ısı yüklerinde nanoakışkan dolu termosifonun davranışını görmek için buharlaştırıcıda çeşitli giriş güçleri (40-210 W) uygulanmıştır.

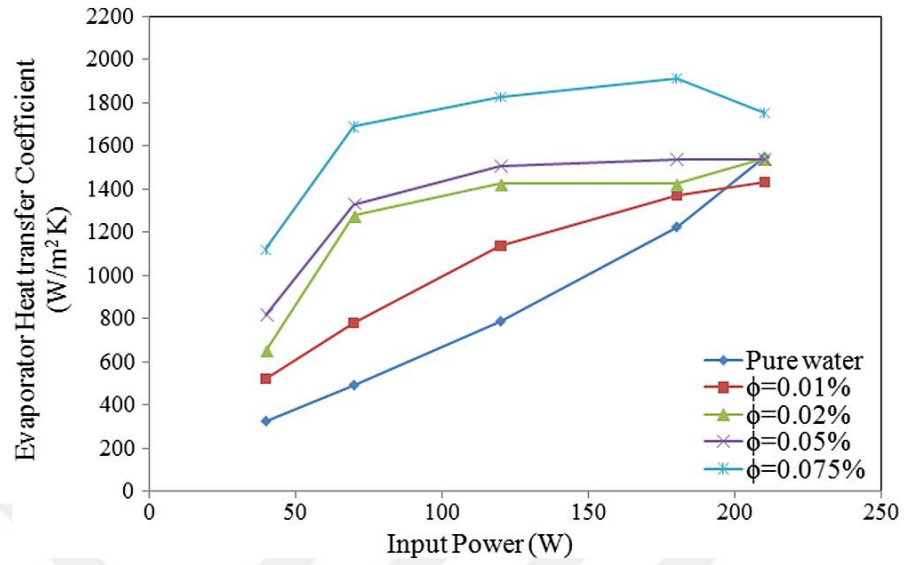


Şekil 3.139. (a) Al₂O₃ ve (b) TiSiO₄ nanopartiküllerinin farklı konsantrasyonları için farklı giriş güçlerinde termosifonun genel ısı direnci (Kamyar *et al.* 2013)

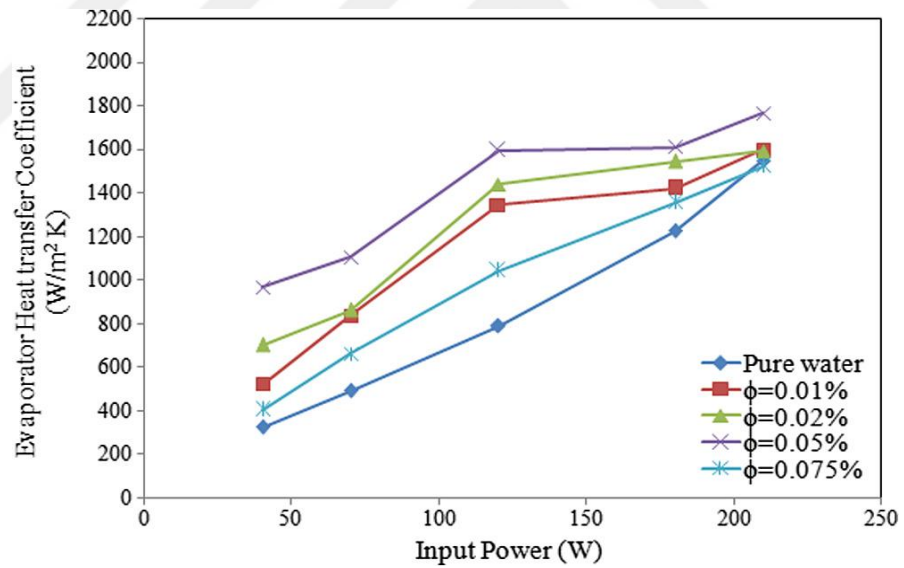
Saf su ile karşılaştırıldığında, her iki nanoakışkan da ısı borusu boyunca daha düşük sıcaklık dağılımı göstermiştir.

Isıl dirençte Al₂O₃ için %0.05 hacim değerinde %65'e varan azalmalar elde edilmiştir. Bununla birlikte, TiSiO₄ için en iyi performans %0.075 hacim oranında ısı dirençte %57'lik bir azalma ile elde edilmiştir.

Buharlaştırma ısı transfer katsayısındaki artış düşük güçlerde daha fazla elde edilmiştir. Şekil 3.140 ve 3.141 de görüldüğü gibi her ne kadar ısı transfer katsayısı TiSiO₄ / su için partikül konsantrasyon arttırılarak iyileşmiş olsa da, Al₂O₃ / su için %0.05 hacimce en yüksek değere ulaştığından partikül konsantrasyonundaki artışlar için bu değer sınırdır.



Şekil 3.140. Farklı konsantrasyonlar (TiSiO₄ / su) için giriş gücüne göre buharlaşma ısı transfer katsayısı (Kamyar *et al.* 2013)

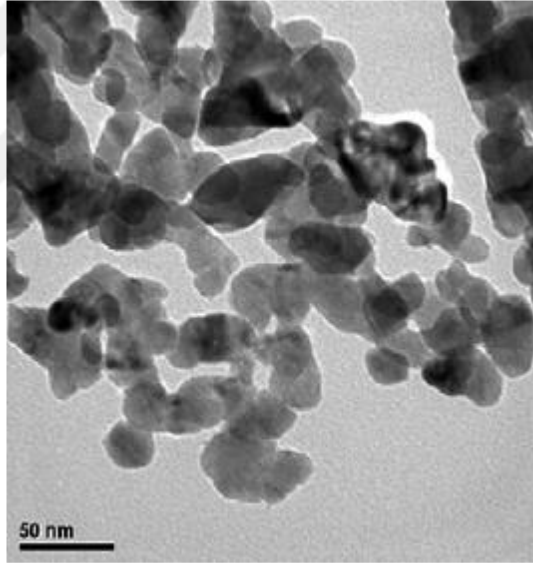


Şekil 3.141. Farklı konsantrasyonlar (Al₂O₃ / su) için giriş gücüne göre buharlaşma ısı transfer katsayısı (Kamyar *et al.* 2013)

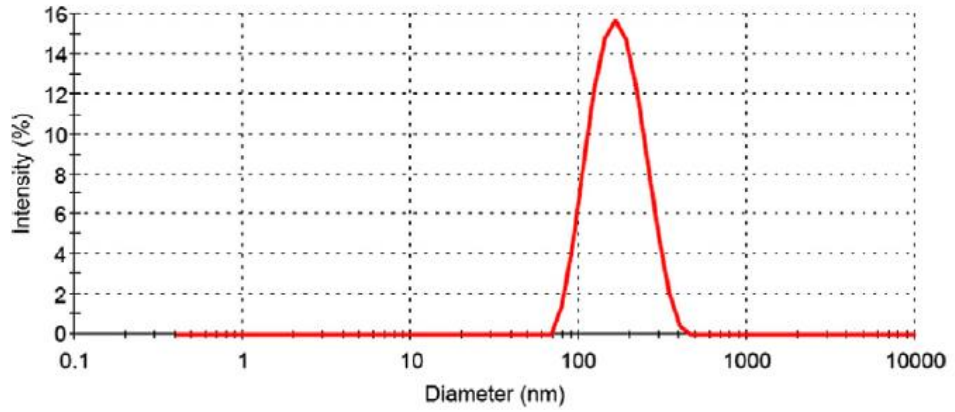
Gözenekli bir tabakanın yüzeyde birikmesi ve yoğun Brownian hareketi, ısı transfer performansta gözlenen iyileşmelerin kaynağı olarak özetlenebilir.

Yang *et al.* (2012), sabit atmosferik basınç altında bir termosifon döngüsünün buharlaştırıcısındaki su bazlı CuO nanoakışkanının akış kaynatma ısı transferini anlamak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Bu deneyde hem deiyonize su hem de su bazlı CuO nanoakışkanını çalışma sıvısı olarak kullanılmıştır. CuO nanopartikülleri ticari ürünlerdir. Tedarikçi, nanopartiküllerin ortalama çapını 50 nm olarak bildirmiştir. TEM (Transmisyon Elektron Mikroskobu) resmi ve CuO nanopartiküllerinin çap dağılımı sırasıyla Şekil 3.142 ve 3.143'de gösterilmiştir. Çap dağılımı Malvern Şirketinden Zeta ölçüm cihazı kullanılarak dinamik ışık saçılımı yöntemi ile alınmıştır.



Şekil 3.142. Nanopartiküllerin TEM görüntüsü (Yang and Liu 2012)

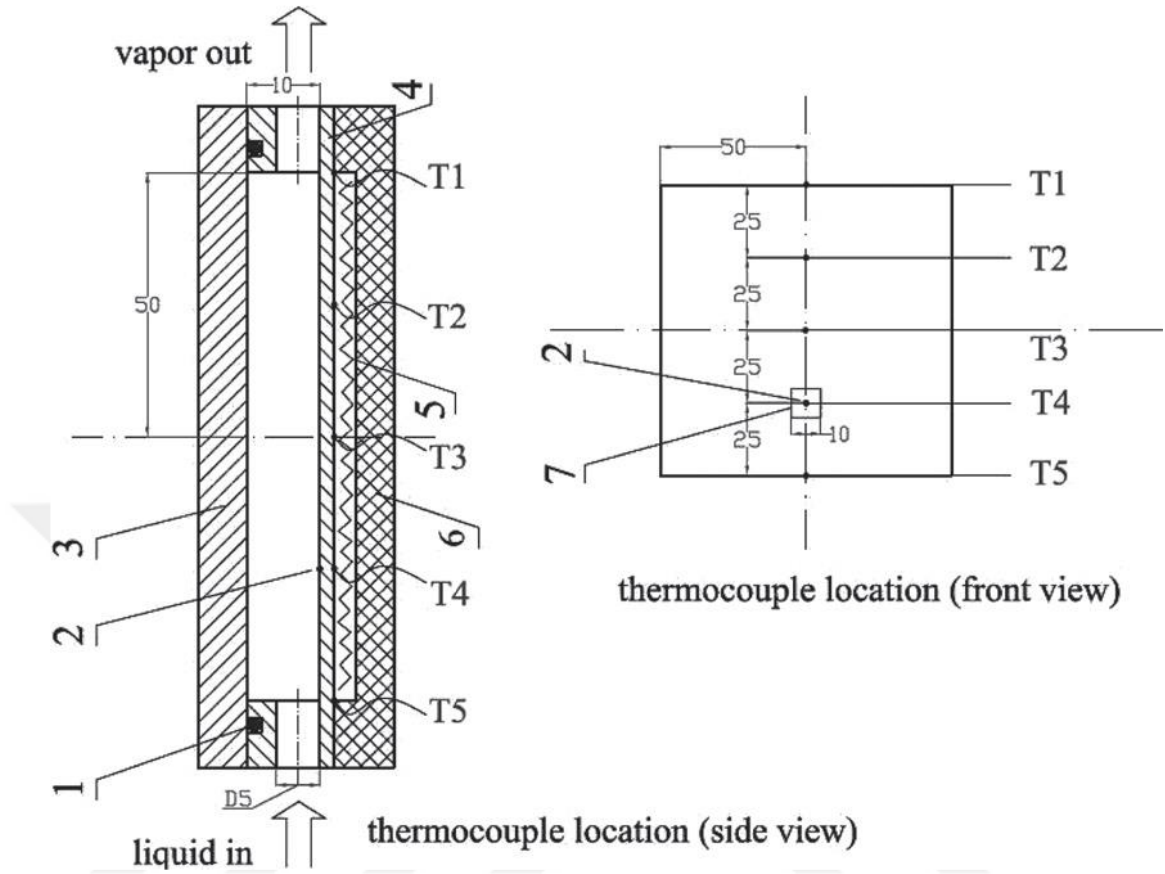


Şekil 3.143. Nanopartiküllerin çap dağılımı (Yang and Liu 2012)

CuO nanopartikülleri, deiyonize suya dağıtılmış ve süspansiyon, 12 saat boyunca ultrasonik bir banyoda salınmıştır. Daha sonra nanoakışkanlar birkaç gün boyunca homojen ve stabil halde kalabilmiştir. CuO nanopartiküllerinin kütle konsantrasyonu ağırlıkça %0.1 ila ağırlıkça %1.5 arasında değişmektedir.

Şekil 3.144, bakırdan yapılmış termosifon halkasının şemasını göstermektedir. Buharlaştırıcı bölümü, buhar hatları, yoğunlaştırıcı bölümü ve sıvı dönüş hatlarından oluşmaktadır. Dikey olarak konumlandırılmış buharlaştırıcı bölümü, güç kaynağına bağlı bir film ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Dikey olarak konumlandırılmış yoğunlaştırıcı bölümü, bir soğutma ceketinde dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Buharlaştırıcıdaki çalışma sıvısı ısıtılmış ve buhara dönüştürülmüştür. Oluşan buhar, buhar hattından geçerek, yoğunlaştırıcı tarafından sıvı faza kondanse edilmiştir. Sıvı, sıvı dönüş hattından buharlaştırıcıya geri akmış ve tekrar ısıtılmıştır.

Buharlaştırıcı, Şekil 3.144'te gösterildiği gibi 100 mm genişliği, 100 mm yüksekliği ve 10 mm kalınlığı olan dikdörtgen bir bölmedir. Vakum sızdırmazlığı için cıvatalar ve kauçuk O-ring ile bir teflon kapak birlikte sabitlenmiştir. Buharlaştırıcının bir tarafı, kaynağına bağlı bir film ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Etkili ısıtma alanı 100 mm x 100 mm dir.



Şekil 3.144. Buharlaştırıcı bölümünün şematik görünümü (Yang and Liu 2012)

(1) kauçuk o-ring; (2) bakır tabakanın lehimlendiği nokta; (3) Teflon örtü; (4) bakır taban; (5) ısıtıcı; (6) yalıtım tabakası; (7) lehimlenmiş bakır levha; (8) T1-T5: termokupllar

Yoğunlaştırıcı uzunluğu 600 mm ve dış çapı 16 mm olan bakır borudan yapılmıştır, soğutma ceketinde dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Yoğunlaştırıcının sıvı çıkışı, buharlaştırıcının sıvı girişinin yaklaşık 200 mm üzerine yerleştirilmiştir.

Beş T-tipi termokupl buharlaştırıcının, beş T-tipi termokupl yoğunlaştırıcının dış yüzeyine monte edilmiştir. Giriş ve çıkıştaki sirkülasyonlu soğutma suyunun sıcaklıklarını ölçmek için soğutma ceket girişine ve çıkışına iki adet termokupl yerleştirilmiştir. Buhar sıcaklığını ölçmek için buhar hattına bir termokupl yerleştirilmiştir. Sistem çalışma basıncını ölçmek için termokuplun yakınındaki buhar hattına bir basınç transdüseri takılmıştır.

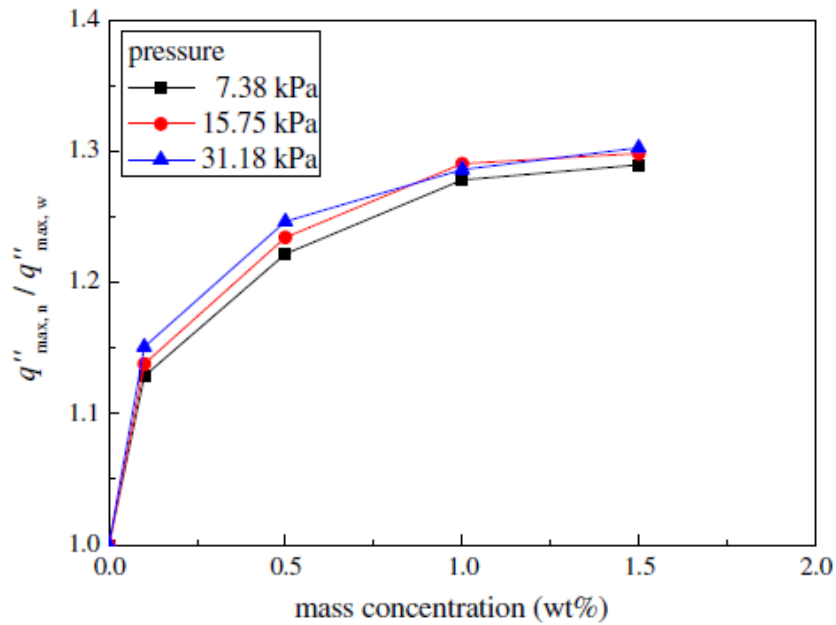
Deneysel sonuçlar, ölçülen sistem basıncından hesaplanan çalışma akışkanının doyma sıcaklığı ile buhar hattındaki ölçülen buhar sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının 0.3 K'dan düşük olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, buhar hattındaki ölçülen buhar sıcaklığı, doymuş buhar sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Deney, sırasıyla 40°C, 55°C ve 70°C'lik doyma sıcaklıklarına karşılık gelen 7.38 kPa, 15.75 kPa ve 31.18 kPa'lık üç sabit basınç altında gerçekleştirilmiştir. Değişen ısı akıları için çalışma basıncını sabit bir değerde tutmak için soğutma suyunun sıcaklığı ve hızı dikkatlice kontrol edilmiştir. Termokupulların ve basınç dönüştürücünün dijital sinyallerini toplamak için bir veri toplama sistemi kullanılmıştır.

Her testten önce, termosifon döngüsünde ve çalışma sıvısında çözünen gazları uzaklaştırmak için vakum pompalama işlemi ve sıvı ön ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir. Vakum basıncı, yoğunlaştırılmaz gazların etkisini ortadan kaldırmak için 8103 Pa'dan daha düşük bir değere pompalanmıştır. Rasyona tabi tutulan nanoakışkan, vakum valfleri aracılığıyla termosifon döngüsüne doldurulmuştur.

Doldurma hacmi (105 cm³), termosifon döngüsünün (yaklaşık 420 cm³) %25'inde tutulmuştur. Çalışmada, ısıtma gücü %5'lik bir artışla kademeli olarak arttırılmıştır. Ölçülen duvar sıcaklığı aniden arttığında ve duvarda bir kuruma olgusunun oluştuğunu gösteren sabit bir durumu tutamadığında, ısıtma güç kaynağı anında kapatılmıştır. Daha sonra, çalışma eski sabit ısıtma gücünden yeniden başlatılmış ve güç, eski gücün %1'lik bir artışıyla arttırılmıştır. Ölçülen duvar sıcaklıkları bir kez daha aniden arttığında ve sabit bir duruma sahip olamadığında, elektrik güç kaynağı anında kapatılmış ve test durdurulmuştur.. CHF değeri önceki zamanın ısıtma gücünden belirlendi.

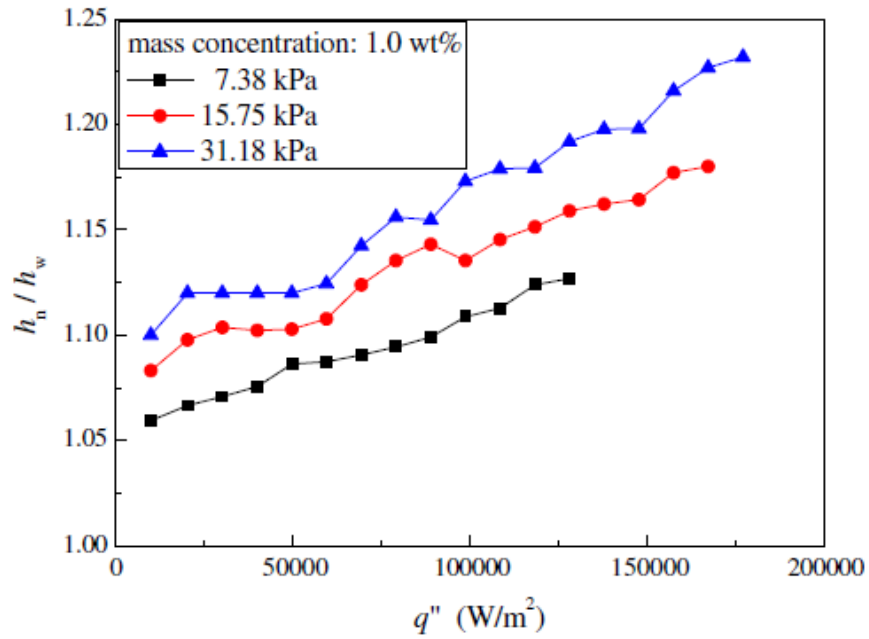
Deneylerden sonra, termosifon döngüsü bir hafta bekletilmiştir. Daha sonra çalışma yeniden başlatılmış ve tekrarlanan deneyler yapılmıştır. Tekrar eden tüm çalışmalar için anlamlı bir fark bulunamamıştır. Homolojinin nedenleri, nanopartiküllerin termal hareketinin ve kabarcıkların karıştırma etkisinin nanopartiküller depolandıktan sonra çözeltiyi tekrar homojen hale getirmesi olarak açıklanmıştır.

Termosifon döngüsünün buharlaştırıcısındaki akış kaynatma ısı transferi, suya CuO nanopartikülleri eklenerek artmıştır. Isı transfer katsayısının maksimum geliştirmesine karşılık gelen, ağırlıkça %1.0'luk bir optimal kütle konsantrasyonu vardır. Nanopartikül kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'dan az olduğunda, nanoakışkanın ısı transfer katsayısı geliştirme oranı, artan nanopartikül kütle konsantrasyonu ile artmaktadır. Nanopartikül kütle konsantrasyonu ağırlıkça %1.0'ın üzerinde olduğunda yaklaşık %30 olma eğilimindedir (Şekil 3.145).



Şekil 3.145. Nanoakışkanın ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi (Yang and Liu 2012)

Basıncın ısı transfer katsayısı üzerinde belirgin etkisi ve kritik ısı akısı üzerinde ise ihmal edilebilir bir etkisi vardır. Isı transfer katsayısı gelişme oranı artan basınçla artar. Kritik ısı akışı artışı esas olarak ısıtılmış yüzey üzerinde nanopartiküller tarafından oluşturulan bir kaplama tabakasının mevcut olmasından kaynaklanır. Isı transfer katsayısı artışı ise hem kaplama tabakasının mevcut etkilerinden hem de nanoakışkanın termofiziksel özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklanır.



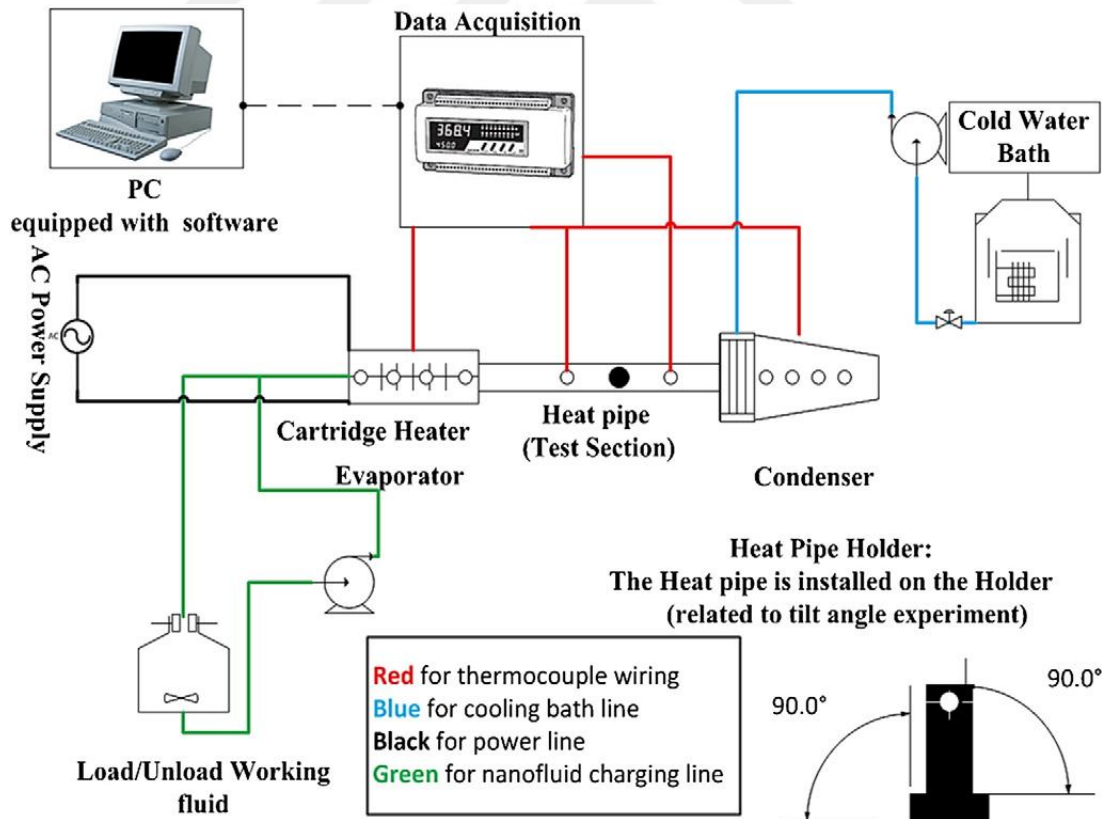
Şekil 3.146. Basıncın ısı transfer katsayısı artışı üzerine etkisi (ağırlıkça %1.0 kütle konsantrasyonunda) (Yang and Liu 2012)

Nanopartikül kütle konsantrasyonu ve kaynama süresi, nanoakışkanların kaynatılmasından sonra oluşan kaplama yüzeyinin yüzey morfolojisini etkiler. Bununla birlikte, çalışma basıncının kaplama yüzeyinin yüzey morfolojisi üzerinde anlamlı bir etkisi yoktur.

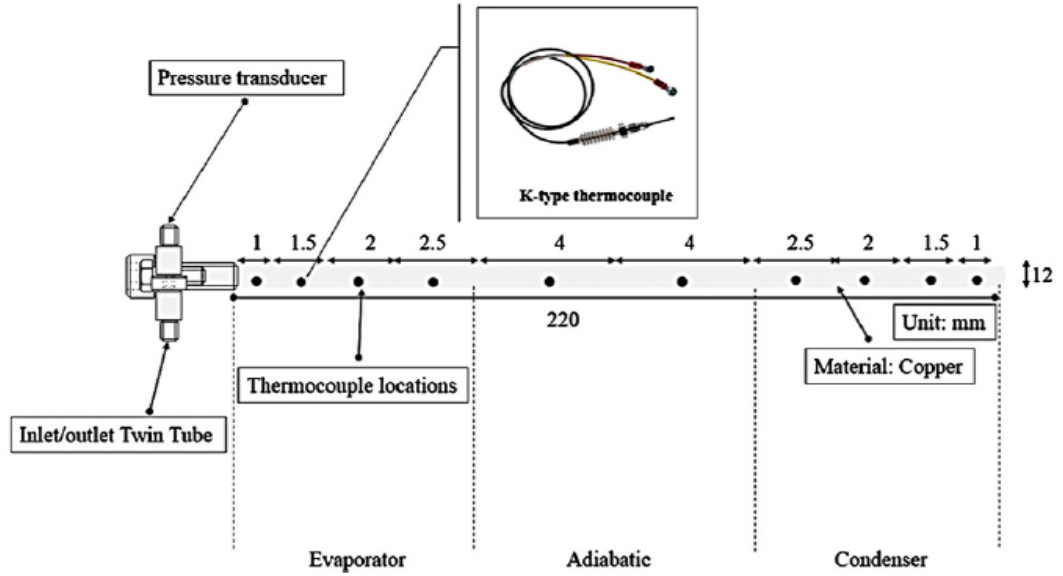
Sarafraz *et al.* (2014a), ortalama büyüklüğü 42-48 nm olan alümina küresel nanopartikülleri, ultrasonik homojenleştirici, manyetik karıştırıcı, sabit sıcaklıkta pH kontrolü kullanılarak farklı partikül konsantrasyonlarında su-EG ve su-DEB baz sıvılarında iyi bir şekilde dağıtılmış, hazırlanmış ve stabilize edilmiş olarak deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Şekil 3.147, bir ana test cihazından (buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümleri dahil), ölçüm cihazlarından ve veri toplama sisteminden oluşan bir deney düzeneği şemasını göstermektedir. Gerekli ısı akışını sağlamak için, 12 mm uzunluğunda esnek bir elektrikli kartuş ısıtıcı kullanılmış ve bir AC güç kaynağına bağlı buharlaştırıcı bölümüne monte edilmiştir. Buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler olası ısı kaybını en aza indirmek

için cam yünü kullanılarak yalıtılmıştır. Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü yatay olarak çelik soğutma odasına daldırılmış ve yoğunlaştırıcı sıcaklığını 20°C 'ye ayarlamayı amaçlayan soğuk su sirkülasyon banyosu içinde soğutucu olarak deiyonize su kullanılmıştır. Isı borularının yüzey sıcaklıkları yirmi K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Belirsizliği 0.1°C olan sekiz termokupl buharlaştırıcı yüzeyine dört tanesi adyabatik bölümün yüzeyine geri kalan sekiz tanesi yoğunlaştırıcı bölümüne monte edilmiştir. Her bir termokuplun ısı borusu üzerindeki yeri Şekil 3.148'de görülmektedir. Tüm K-tipi termokupllar 1 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda olup, bunlar yüksek hassasiyetli bir veri toplama sistemine bağlanmıştır. Deneylerden önce, ısı borusu başlangıçta 0.5 hp vakum pompası boşaltılmış ve daha sonra nanoakışkanla doldurulmuştur. İki farklı glikol bazlı sıvı ve farklı ısı akışları ve eğim açıları ile deneyler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.147. Deneyin şematik görünümü (Sarafraz and Hormozi 2014a)



Şekil 3.148. Isı borusunun geometri özellikleri ve termokuplların yeri (Sarafraz and Hormozi 2014a)

Bu çalışmada, iki ikili glikol bazlı karışım; suda (hacimce 50:50) etilenglikol / su, (EG / su) ve (hacimce 50:50) çözünmüş dietilenglikol / su (DEG / su) baz sıvı olarak ve farklı hacimsel konsantrasyonlarda alümina (Al_2O_3) nanopartikül kullanılmıştır.

Nanoakışkanların hazırlanması için iki aşamalı yöntem kullanılmıştır. Nanoakışkanları stabilize etmek için, polivinil-pirolidon (PVP), yüzey aktifleştirici madde olarak ilave edilmiş ve bu da nanoakışkanların stabilitesine ve dispersiyon işleminin kalitesini arttırmıştır.

Bu çalışmada nanoakışkanların hazırlanmasından sonra kalite kontrol testleri yapılmıştır. Bu testler şunları içerir: tarama elektron mikroskobu (SEM), transmisyon elektron mikroskopisi (TEM), partikül sayımı ve X-ışını kırınım testleridir.

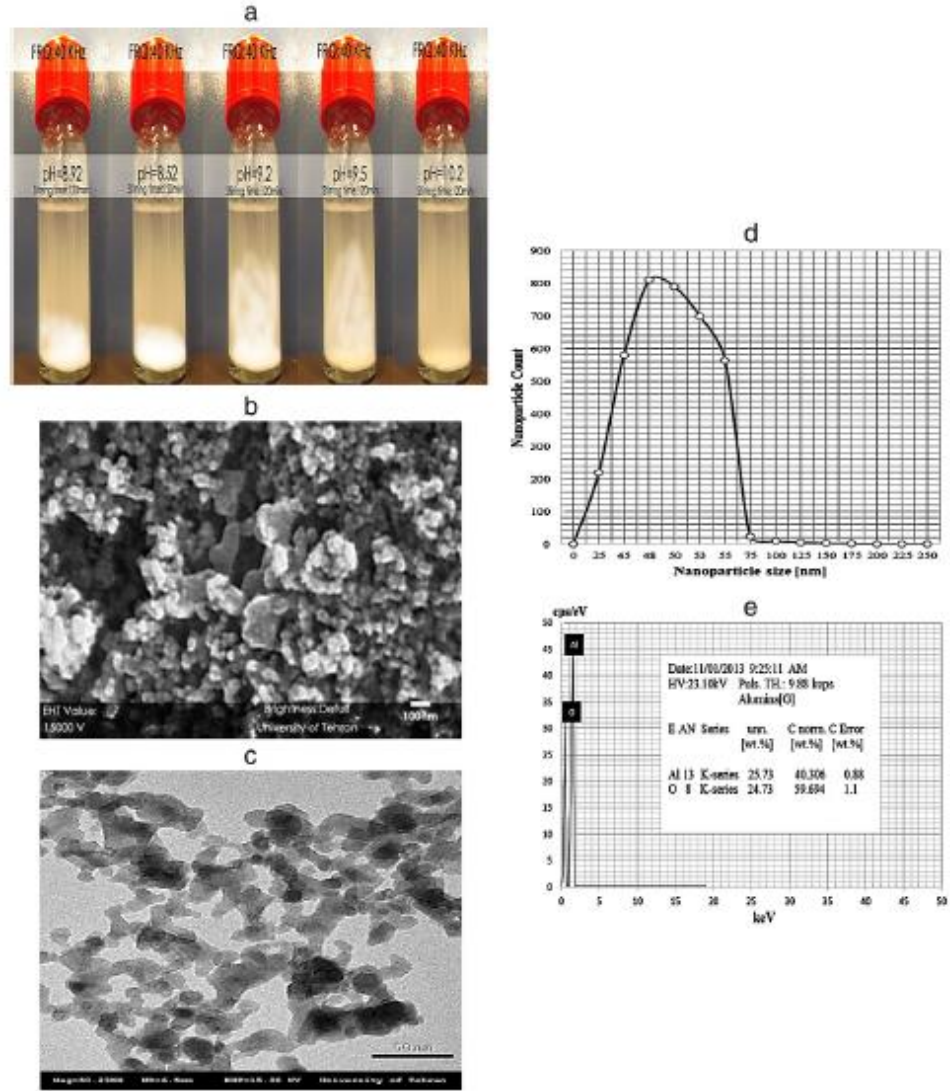
Şekil 3.149 (a) 'nın görüldüğü gibi, %5 hacimsel konsantrasyonda alümina-su / DEG nanoakışkanında sedimantasyon ve küme oluşumu vardır. Görülebileceği gibi, pH = 10.2'de, nanoakışkanlar için 42 günlük maksimum stabilite rapor edilmiştir.

Şekil 3.149 (b), alümina nanopartiküllerine ilişkin SEM görüntüsünü temsil etmektedir. Görülebileceği gibi, partiküllerin şekilleri neredeyse küresel ve muntazamdır. Benzer şekilde, partiküllerin ortalama boyutu 50 nm'den daha düşüktür, bu da üretici tarafından talep edilenle iyi bir uyum içinde olduğunun göstergesidir.

Şekil 3.149 (c), nanoakışkanların TEM görüntüsünü göstermektedir; baz akışkanının içinde topaklaşma ve kümelenme yoktur. Nanopartiküllerin baz sıvı içinde iyi dağıldığı ve nanoakışkan ve daha sonra ısı borusunun içinde sedimantasyon tabakasının oluşmadığı da görülmektedir.

Şekil 3.149 (d), partikül sayım testinin sonucunu göstermektedir. Sonuçlara göre, nanopartiküllerin maksimum boyutları 45 ila 50 nm arasındadır, ancak farklı ortalama çapları 25 ila 45 nm arasında değişen başka nanopartiküller de vardır.

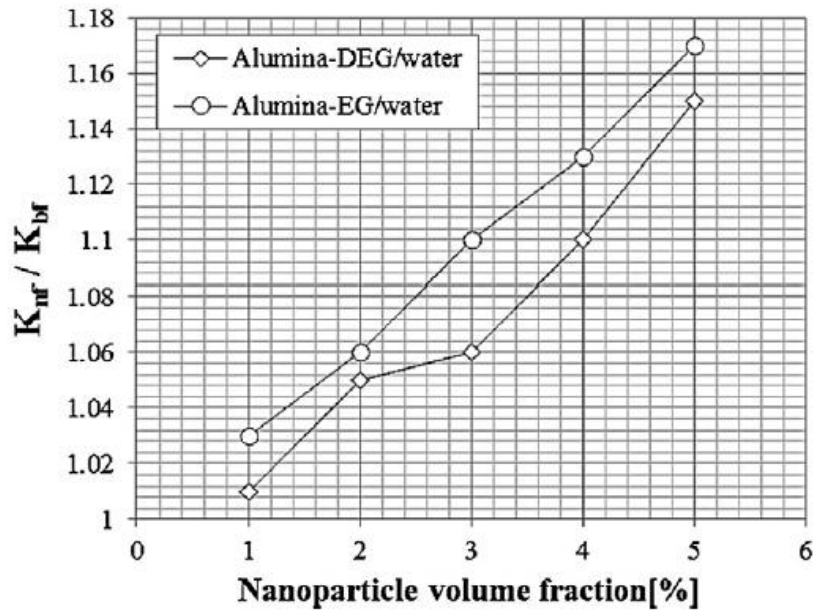
Şekil 3.149 (e) 'de görülebileceği gibi, XRD paterni, alümina nanopartiküllerinin saflığını ima eden monoklinik bir yapıya sahip tek fazlı Al_2O_3 'ü temsil etmektedir.



Şekil 3.149. (a) %5 konsantrasyonda alümina-su / DEG için nanoakışkanların stabilizasyon işlemi, kümeleme ve sedimentasyon oluşumu sonuçları (b). Alümina nanopartiküllerinin taramalı elektron mikroskopisi görüntüsü. (c). EG / su bazlı sıvı içinde dağılmış alümina nanopartiküllerinin transmisyon elektron mikroskobu görüntüsü (d) Alümina nanopartikülleri için partikül boyutu sayım deneyinin sonuçları. (e). Alümina nanopartiküllerinin XRD test sonuçları (Sarafray and Hormozi 2014a)

Bu deneyden şu sonuçlar elde edilmiştir:

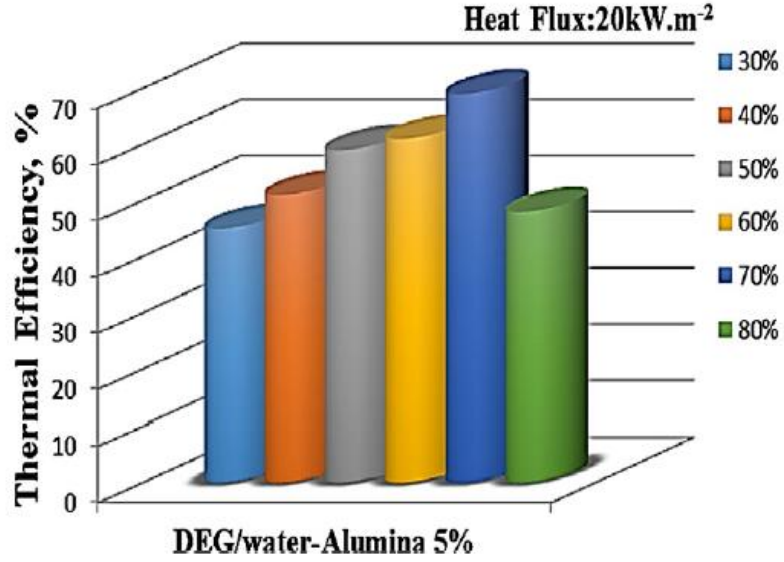
- Su / EG'ye kıyasla su / DEG, büyük bir ısı transfer karakteristiğine ve termal özelliklere sahiptir. Daha yüksek termal iletkenlik ve daha iyi termal performans, su / etilenglikolün ana özelliğidir. Ayrıca sonuçlar, su / EG bazlı nanoakışkanların 45 günden fazla stabilize edilebildiğini göstermiştir.



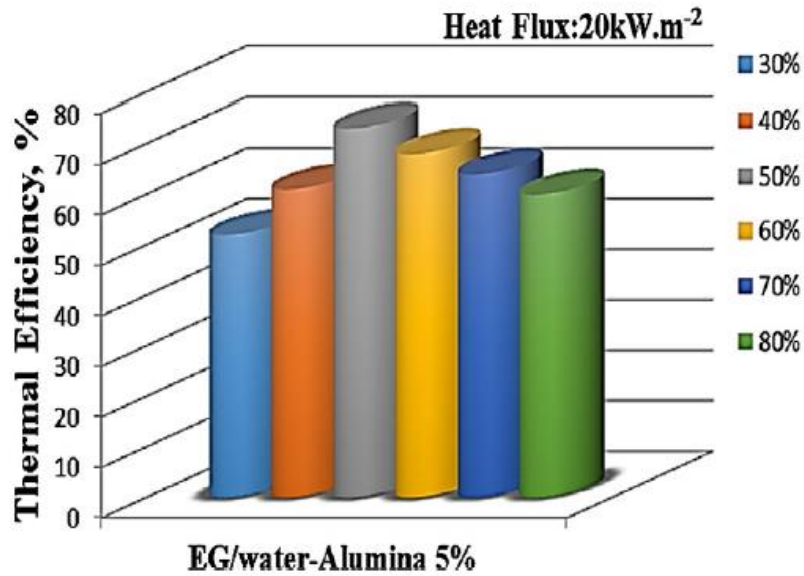
Şekil 3.150. Nanopartiküllerin su / EG ve su / DEG baz sıvılarının ısı iletkenliğine etkisi (Sarafraz and Hormozi 2014a)

- Alümina-su / EG ve alümina-su / DEG'nin stabilitesi, pH kontrolü, ultrasonik ve manyetik karıştırma kullanılarak incelenmiştir. Su / EG ve su / DEG bazlı nanoakışkanlar için pH = 10.1 ve 10.2'de, sırasıyla 45 gün ve 42 gün maksimum stabilite elde edilmiştir.
- Nanoakışkanın hacimsel konsantrasyonunun arttırılmasıyla, toplam sıcaklık, tüm çalışma sıvıları için ısı borusu boyunca buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcıya düşmüştür. Maksimum azalma %5 Al_2O_3 – su / EG nanoakışkanı ile %22,63 olmuştur. Tüm nanoakışkan konsantrasyonlarında buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasında özellikle düşük hacimsel nanopartikül konsantrasyonu için önemli bir sıcaklık farkı da görülebilir.
- Isı borusunun %şarj değerine ait sonuçlar, ısı borusunun termal verimliliğinin %şarj değerinden güçlü bir şekilde etkilendiğini, böylece sırasıyla su / EG ve su / DEG bazlı nanoakışkan için %şarj değeri %30'dan %50'ye ve %30'dan %70'e yükseldiğinde ısı borusunun verimliliğinin büyük ölçüde arttığı görülmüştür (Şekil 3.151 ve Şekil 3.152). %5 hacimsel konsantrasyonda en iyi %şarj edilen değer su / EG ve su / DEG esaslı nano-akışkanlar için sırasıyla %50 ila %70 arasındadır. Bu değerlerin ötesinde

(%30'dan küçük ve %70'den büyük), ısı borusunun verimliliği önemli ölçüde azalmaktadır.

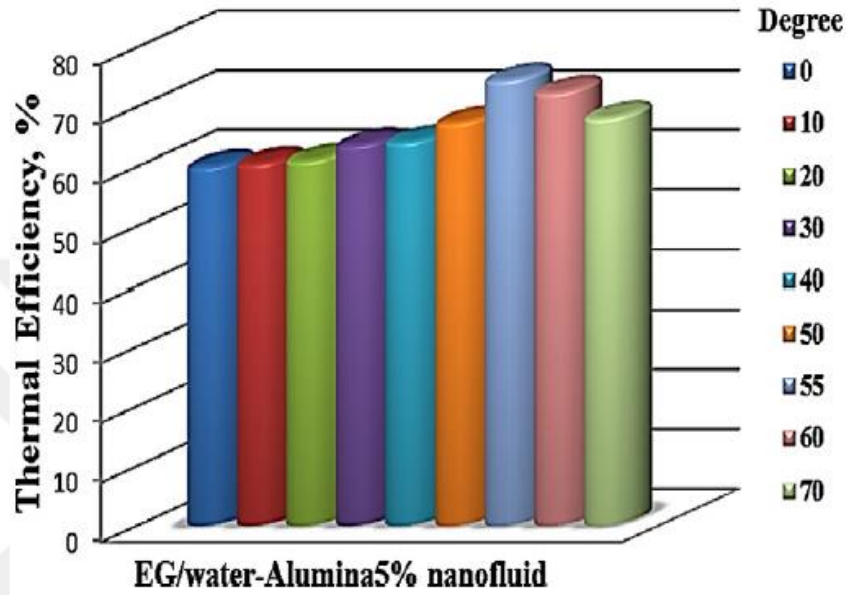


Şekil 3.151. Çalışma akışkanının %yüklü değerinin, 20 kW / m². ısı akışında su / DEG bazlı nanoakışkan için ısı borusunun ısı verimliliği üzerindeki etkisi (Sarafraz and Hormozi 2014a)

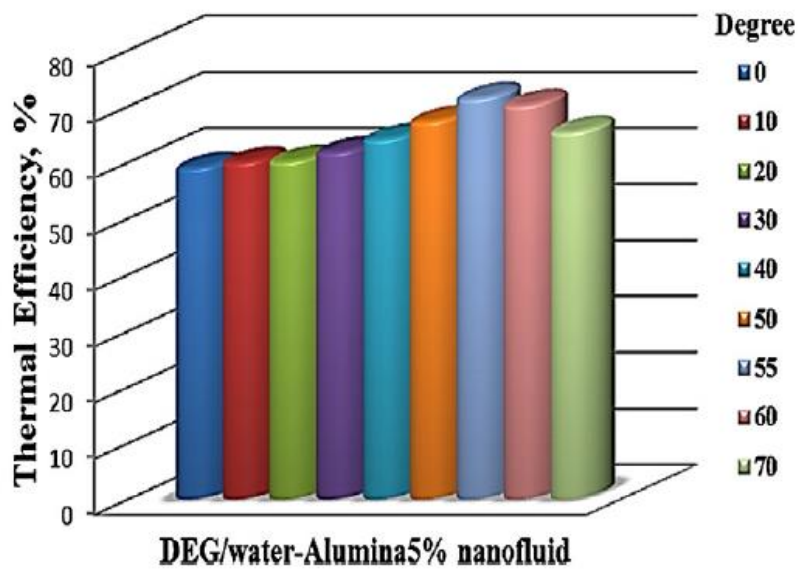


Şekil 3.152. Çalışma akışkanının %yüklü değerinin, 20 kW / m². ısı akışında su / EG bazlı nanoakışkan için ısı borusunun ısı verimliliği üzerindeki etkisi (Sarafraz and Hormozi 2014a)

- Eğim açısı, ısı borusunun termal performansı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir, eğim açısı arttığında, yerçekimi kuvvetinin, özellikle nanopartikül ve çalışma sıvısının akışı üzerindeki güçlü etkisi nedeniyle, ısı borusu verimliliği artmaktadır (Şekil 3.153 ve 3.154)



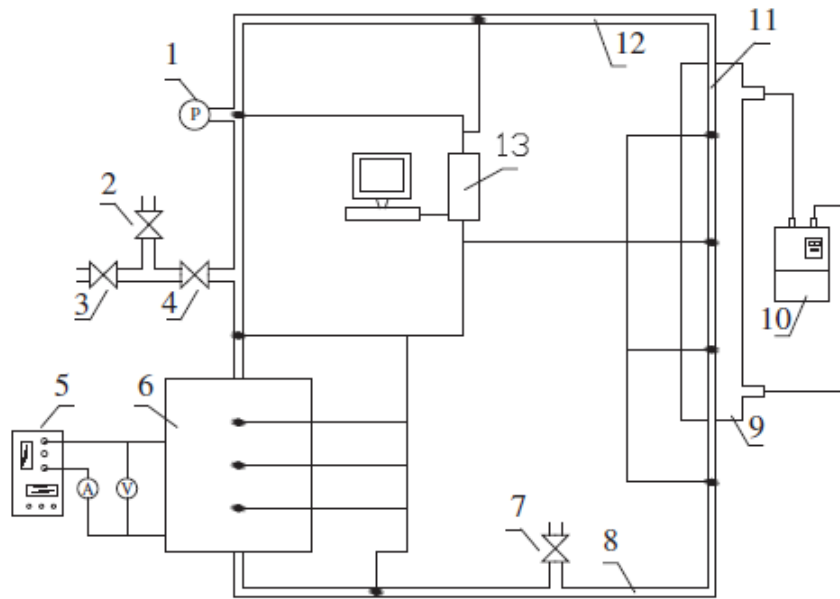
Şekil 3.153. Eğim açısının, optimum %şarj değeri için su / EG ile doldurulmuş ısı borusunun termal verimliliği üzerindeki etkisi (Sarafraz and Hormozi 2014a)



Şekil 3.154. Eğim açısının, optimum %şarj değeri için su / DEG ile doldurulmuş ısı borusunun termal verimliliği üzerindeki etkisi (Sarafraz and Hormozi 2014a)

Chen *et al.* (2013), içine yüklenen su bazlı SiO_2 işlevselleştirilmiş nanoakışkanın buharlaşma ısı transfer özelliklerini incelemişlerdir.

Şekil 3.155, bakırdan yapılmış termosifonunun deney şemasını göstermektedir. Buharlaştırıcı bölümü, buhar hatları, yoğunlaştırıcı bölümü ve sıvı dönüş hatlarından oluşmaktadır. Dikey olarak konumlandırılmış buharlaştırıcı bölümü, güç kaynağına bağlı bir film ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Dikey olarak konumlandırılmış yoğunlaştırıcı bölümü, bir soğutma ceketinde dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Buharlaştırıcıdaki çalışma sıvısı ısıtılmış ve buhara dönüşmüştür. Oluşan buhar buhar hattından geçerek yoğunlaştırıcı tarafından sıvı faza kondanse edilmiştir. Sıvı, sıvı dönüş hattından buharlaştırıcıya geri akıp, tekrar ısıtılmıştır.

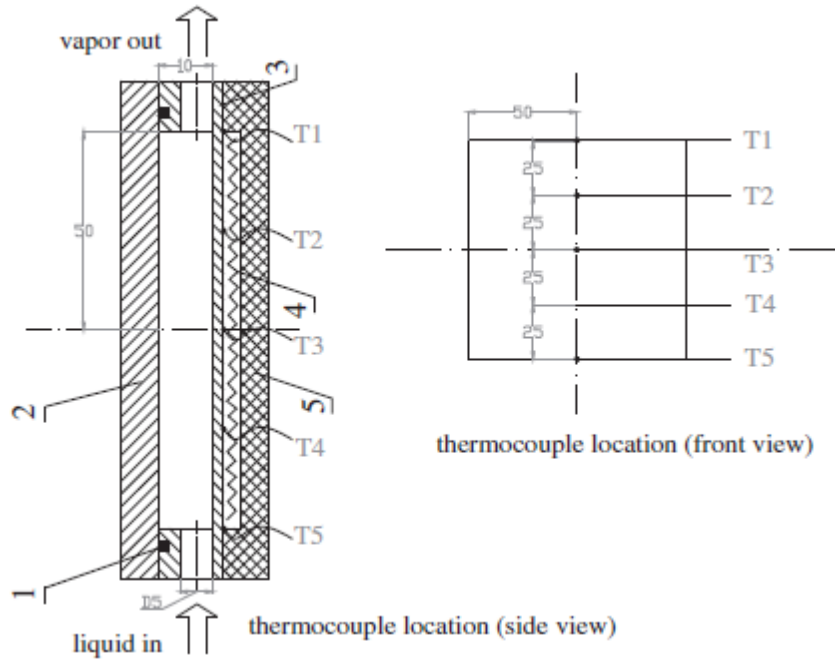


Şekil 3.155. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Chen *et al.* 2013)

Buharlaştırıcı, Şekil 3.156’da gösterildiği gibi, 100 mm genişliği, 100 mm yüksekliği ve 10 mm kalınlığı olan dikdörtgen bir bölmedir. Vakum sızdırmazlığı için cıvatalar ve kauçuk O-ring ile bir teflon kapak birlikte sabitlenmiştir. Buharlaştırıcının bir tarafı, güç kaynağına bağlı bir film ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Etkili ısıtma alanı 100 mm x100 mm dir.

Yoğunlaştırıcı dış çapı 6 mm, uzunluğu 600 mm olan bakır borudan yapılmıştır ve soğutma ceketinde dolaşan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Yoğunlaştırıcının sıvı çıkışı, buharlaştırıcının sıvı girişinin yaklaşık 200 mm üzerine yerleştirilmiştir.

Beş T-tipi termokupl, buharlaştırıcının dış yüzeyine, Şekil 3.156'da gösterildiği gibi monte edilmiştir. Yoğunlaştırıcının dış yüzeyine iki adet termokupl yerleştirilmiştir. Buhar sıcaklığını ölçmek için buhar hattına bir termokupl yerleştirilmiştir. Sistem çalışma basıncını ölçmek için termokupl yakınındaki buhar hattına bir basınç transdüseri takılmıştır.

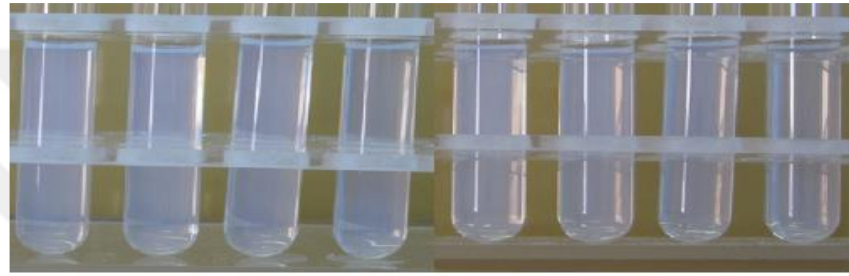


Şekil 3.156. Buharlaştırıcı bölümünün şematik görünümü (Chen *et al.* 2013)

(1) kauçuk o-ring (2) Teflon kapak (3) bakır taban (4) ısıtıcı (5) yalıtım katmanı T1-T5 termokupllar

Kararlı nano-akışkan elde etmek için yüzey fonksiyonelleştirilmiş silika nanopartikülleri kullanılmıştır. Ortalama çapı yaklaşık 30 nm olan silika nanopartikül tozları ve (3-glisidoksilproil) trimetioksisilan (CAS numarası: 2530-83-8) bir silan kullanılmıştır. Reaksiyona giren silan ve silika nanopartiküllerinin kütle oranı 0.115 idi. Fonksiyonel nanopartiküller suda dağıtılmış ve çözelti 12 saat boyunca 50°C sıcaklığında tutulmuştur.

Elde edilen çözeltiye fonksiyonelleştirilmiş nanoakışkan adı verilir. Fonksiyonel nanopartiküller, nanoakışkan %10'luk kütle konsantrasyonunda bile 12 ay durduktan sonra bile iyi dağılmaya devam edip, sedimentasyon gözlenmemiştir. Fonksiyonelleştirilmiş nanoakışkan resimleri Şekil 3.157 'de gösterilmiştir. Gösterildiği gibi, işlevselleştirilmiş nanoakışkan 12 ay sonra iyi dağılmaya devam etmektedir. Sterik stabilizasyon etkisi ve benzerlik çözünürlük kuralı, nanopartiküllerin baz sıvılarda homojen dağılmasına yardımcı olur.



After 0 hour

After 12 months

a) İşlevselleştirilmiş (fonksiyonelleştirilmiş) nanoakışkan



After 0 hour

After 10 days

b) Geleneksel nanoakışkan

Şekil 3.157. İşlevselleştirilmiş ve geleneksel nanoakışkan resimleri (Chen *et al.* 2013)

Yüzey işlevselleştirilmiş silika nanopartikülleri, bir çeşit kararlı nanoakışkan (işlevselleştirilmiş nanoakışkan olarak adlandırılır) hazırlamak için kullanılmıştır. Sabit çalışma basıncı altında su, işlevselleştirilmiş nanoakışkan ve geleneksel nanoakışkan (işlevsiz nanopartiküllerden oluşan nanoakışkan) kullanılarak bir termosifonunun termal performansını incelemek için bir deney gerçekleştirilmiş ve şu şekilde sonuçlar elde edilmiştir:

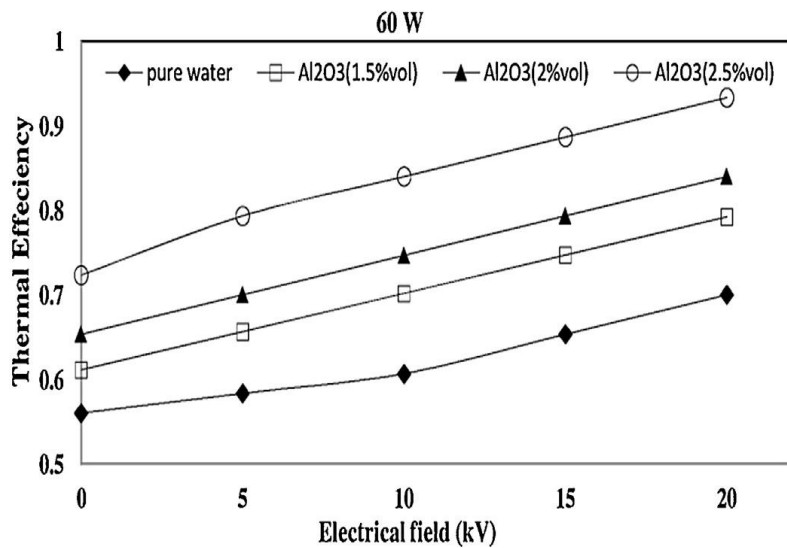
- Çalışma sıvısı olarak su bazlı işlevselleştirilmiş SiO_2 nanoakışkan kullanılmıştır. İşlevselleştirilmiş nanoakışkan iyi bir dağılma ve kararlılığa sahiptir. Fonksiyonelleştirilmiş nanoakışkanın ısı iletkenliği hafif bir artışa sahipken viskozitesi, su ile karşılaştırıldığında belirgin bir artışa sahiptir.
- İşlevselleştirilmiş nanoakışkan buharlaşma ısı transfer katsayısının bozulmasına naeden olur. Isıtılmış yüzeyde birikme tabakası oluşmaz. Bozulma, fonksiyonelleştirilmiş nanoakışkan kütle konsantrasyonunun artmasıyla artar. Fonksiyonelleştirilmiş nanoakışkanın viskozite artışı esas olarak bozulmaya neden olur. Nano ölçek etkisi bulunamamıştır.
- Geleneksel nanoakışkan (işlevselleştirilmemiş nanopartiküllerden oluşur), termosifondaki buharlaştırma deneyinin ardından ısıtılmış yüzey üzerinde sulu çamur şeklinde bir tabaka oluşturur. Bu tabaka, temas açısını ve yüzey pürüzlülüğünü azaltır. Geleneksel nanoakışkan ayrıca buharlaşma ısı transfer katsayısını fonsiyonelleştirilmiş nanoakışkaninkinden daha fazla bozar, ancak termosifonun maksimum ısı transferini fonksiyonelleştirilmiş nanoakışkana kıyasla artırır.

Heris *et al.* (2014), termosifon ısı borusunda Al_2O_3 / su ve CuO / su nanoakışkanların uygulanmasını incelemişlerdir.

DeneySEL kurulum, elektrik alan ve nanoakışkanların iki fazlı kapalı termosifonun termal performansı üzerindeki etkilerini incelemek için tasarlanmış ve yapılmıştır. Termosifonun tüp uzunluğu 40 cm'dir. Borunun üstten ilk 15 cm yoğunlaştırıcı bölümü, sonraki 5 cm adyabatik bölüm ve diğer 20 cm buharlaştırıcı bölümüdür. Elektrik alanını termosifona uygulamak için, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri iki farklı elektrot görevi görür ve yüksek voltajlı bir güç kaynağına bağlanır. Elektrik alanı uygulandığında iş akışkanının elektriksel iletkenliği en önemli sorun olmuştur. Sorunu çözmenin anahtarı, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümünü ayıran iletken olmayan bir Teflon tüpüdür. Teflon halka, termosifonun adyabatik kısmı olarak işlev görür. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı, elektrik alanı uygulayan elektrotlar olarak kullanılır. Elektriksel deşarj voltajının belirlenmesinden sonra, testler deşarj voltajının altındaki voltajlarda gerçekleştirilir. İlk vakum işlemi, gage basıncı her deneyde 0.9 bara ulaşana kadar devam

eder. Isı kaybını önlemek için termosifon iyi yalıtılmıştır. Sıcaklığı ölçmek için 0.1 8C hassasiyete sahip termometreler kullanılmıştır.

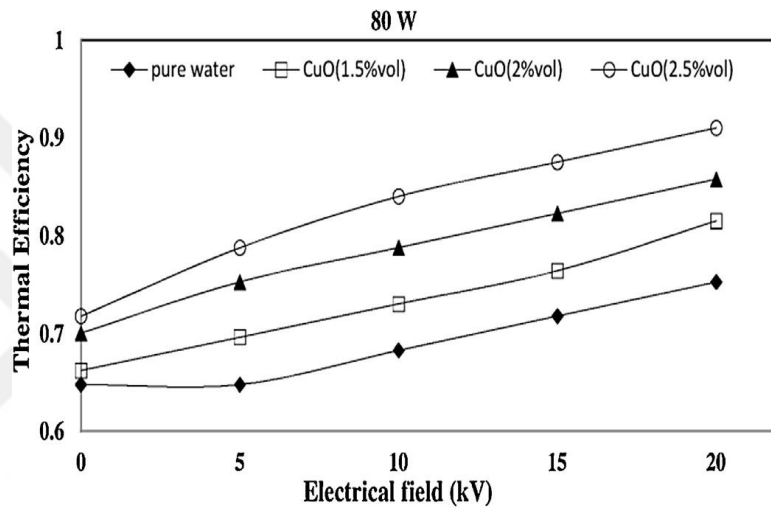
İş akışkanı olarak saf su, alüminyum oksit / su ve bakır oksit / su nanoakışkanları kullanılmıştır. Bu araştırmada, nanoakışkanın kimyasal özelliklerinde olası bir değişikliği önlemek için herhangi bir dağıtıcı veya stabilizatör kullanılmadan ortalama 50 nm çaplı CuO nanopartikülleri ve ortalama 25 nm çaplı Al_2O_3 nanopartikülleri, saf suda ultrasonik karıştırıcı (UP400S) ile dağıtılmıştır. Nanoakışkanlar hacimce yüzde 1.5, 2 ve 2.5 nanopartikül konsantrasyonları ile hazırlanmıştır. Giriş gücü ve elektrik alan kuvvetinin termosifon termal verimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için farklı çalışma sıvıları kullanılmıştır. Şekil 3.158, 60W giriş gücü altında farklı konsantrasyonlarda Al_2O_3 / su nanoakışkanı için elektrik alan kuvvetine karşı termal verimliliği temsil etmektedir. Çalışma sıvıları olarak nanoakışkan kullanılan iki fazlı kapalı termosifonun termal performansının, artan elektrik alan yoğunluğu ile arttığını göstermektedir. Sisteme 60W giriş gücü ekleyerek ve hacimce %2.5 Al_2O_3 nanopartikülleri kullanarak, termosifonun termal performansı yaklaşık %23.3 artmıştır. Suya nanopartiküllerin eklenmesinin ve konsantrasyonlarının artırılmasının termal performans üzerinde tercih edilen etkilere sahip olduğu da gözlenmiştir. En iyi ısıl performans, hacim olarak %2.5 nanopartikül konsantrasyonları ile elde edilmiştir (Şekil 3.158).



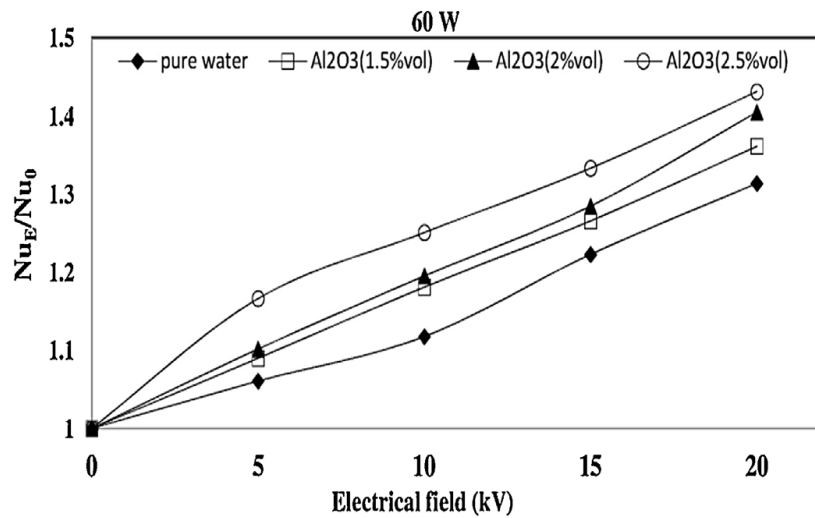
Şekil 3.158. Saf su ve Al_2O_3 / su nanoakışkanı için 60W giriş ısı gücü altında termosifonun elektrik alan kuvvetine karşı ısı verimliliği (Heris *et al.* 2014)

Şekil 3.159, 80W giriş gücü altında farklı konsantrasyonlarda saf su ve CuO / su nanoakışkanı için elektrik alan gücüne karşı ısı performansını göstermektedir

Şekil 3.160'da sonuçlar, elektrik alan yoğunluğundaki artışın daha yüksek Nusselt sayı oranının artmasına neden olduğunu göstermektedir. Bu, elektrik alan yoğunluğunu artırarak daha yüksek ısı transferinin gerçekleştiği anlamına gelmektedir.

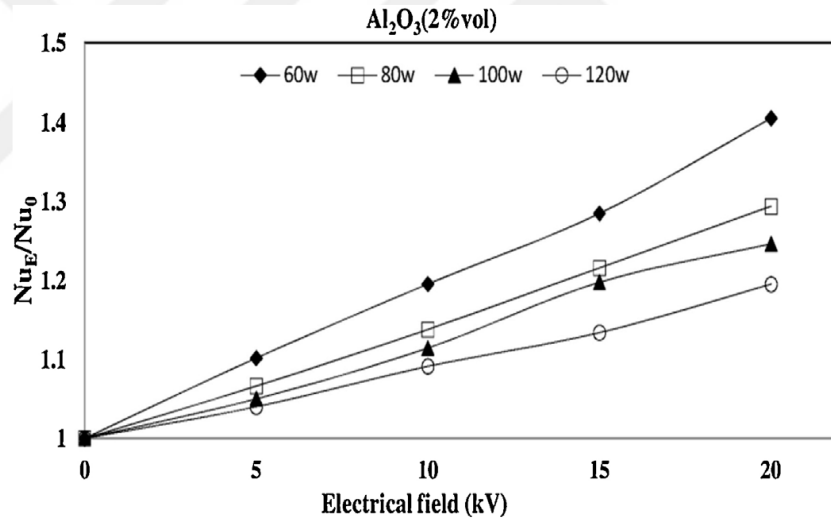


Şekil 3.159. Saf su ve CuO/ su nanoakışkanı için 60W giriş ısı gücü altında termosifonun elektrik alan kuvvetine karşı ısı verimliliği (Heris *et al.* 2014)



Şekil 3.160. Saf su ve farklı konsantrasyonlarda Al₂O₃ / su nanoakışkanı için 60W giriş gücü altında elektrik alan gücüne karşı termosifon ısı borusunun Nusselt sayı oranı (Heris *et al.* 2014)

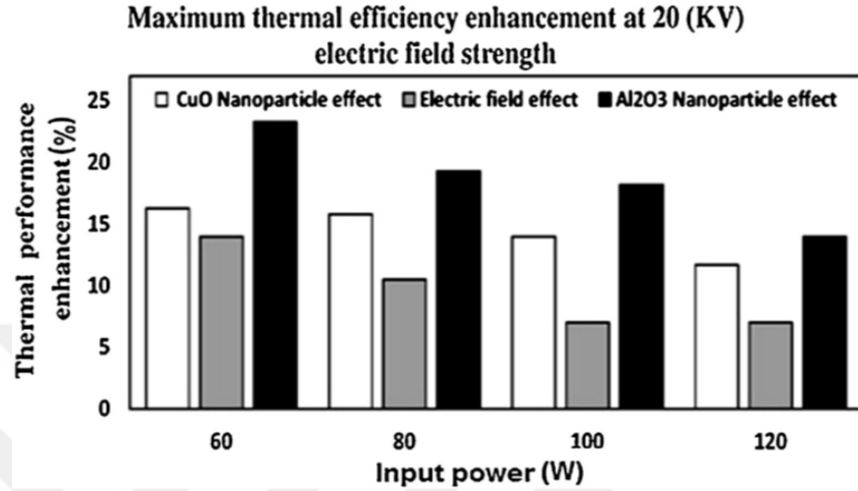
Nanopartiküllerin %2 hacim konsantrasyonlarında giriş ısı gücünün Nu sayısı üzerindeki etkisi Şekil 3.161'de gösterilmektedir, Nusselt sayısında, giriş gücünü 60'dan 120 W'a yükselterek %20'den fazla azalma görülmüştür. Nusselt sayı oranının maksimum artışı yaklaşık %43 olarak 20 V elektrik alan kuvveti altında hacimce %2.5 Al₂O₃ nanopartikül çalışma sıvısında 60W giriş gücünde gözlenmiştir. Bu durum, yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcı arasındaki sıcaklık farkının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Isı gücü arttıkça, yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcı arasındaki sıcaklık farkı da artar. Elektrik alanı uygulandığında, termosifon için yoğunlaştırıcı ve buharlaştırıcı arasındaki sıcaklık farkı da artmaktadır. Sıcaklık farkı artışının olası nedeni, elektrik alanı tarafından dirençli sınır tabakasını bozan ve ısı transferini ilerleten ikincil akış indüksiyonudur. Isı transferindeki bu artış nedeniyle, buharlaştırıcı sıcaklığı artmış, yoğunlaştırıcı sıcaklığı azalmıştır.



Şekil 3.161. %2 Al₂O₃/su hacim konsantrasyonunda nanoakışkan için, 60, 80, 100 ve 120 W giriş güçlerinde nusselt sayısının elektrik alan kuvvetine göre değişimi (Heris *et al.* 2014)

Şekil 3.162, nanopartiküllerin eklenmesi ve elektrik alanlarının kullanılması ile ısı performansı artırılmasını göstermektedir. Nanopartiküllerin eklenmesinin termosifon termal performansı üzerindeki etkisinin elektrik alan etkisinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Nanopartiküllerin ve uygulanan elektrik alanının aynı anda eklenmesi, ısı performansta önemli bir artışa neden olmaktadır. Elektriksel alan ve nanopartiküllerin, ısı performansı üzerindeki etkileri, iki fazlı kapalı termosifona giriş gücünün artmasıyla azalmaktadır. Artan giriş gücü, termosifonun ısı performansı üzerinde önemli bir

doğrudan etkiye sahiptir ve elektrik alanının ve nanopartiküllerin azalan etkilerinin az almasına neden olmaktadır.



Şekil 3.162. %2.5 hacim oranında nanopartiküller ekleyerek, 20 kV elektrik alanı uygulanarak ısı performans artışı (Heris *et al.* 2014)

Menlik *et al.* (2015), MgO / su nanoakışkanın farklı çalışma koşullarında bir termosifonun ısı performansını üzerindeki etkisini incelemiştir.

Nanoakışkanın hazırlanması deneysel araştırmalarda ilk temel adımdır. Nanoakışkanı hazırlamak için, MgO'nun nano boyutlara göre aşağı boyutlandırma için öğütülmesi, uygun bir yüzey aktif leştirici maddenin belirlenmesi ve karışımın stabilitesinin korunması gerekmektedir. Bu çalışmada, nanopartiküllerin çökmesine karşı süspansiyonu stabilize etmek için üç etkili yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler:

(i) ultrasonik işlemcinin kullanımı, (ii) yüzey aktif cismi ilave edilmesi, (iii) nanofluidin PH değerini değiştirmek.

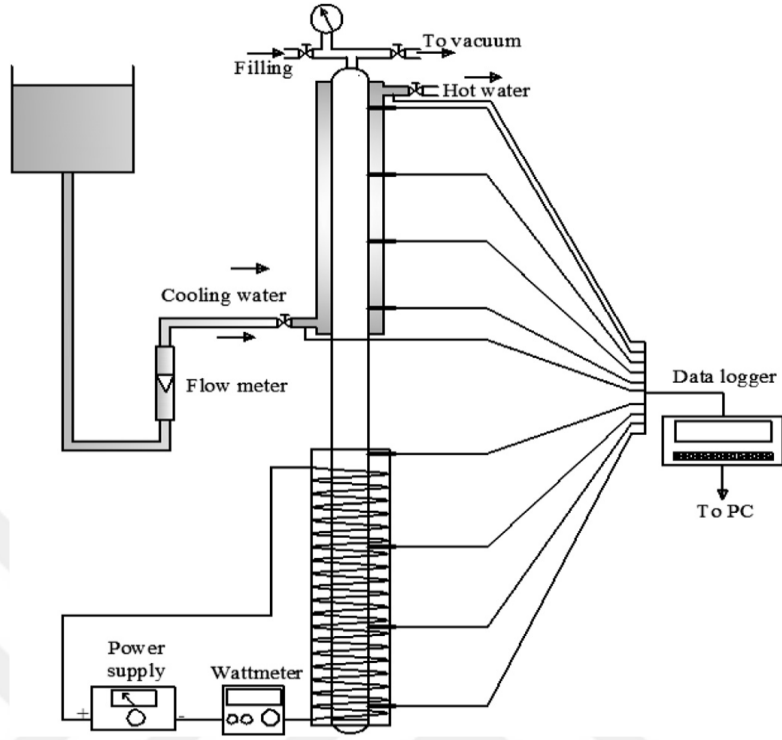
MgO nanopartikülleri, bir ultrasonik banyo kullanılarak 8 saat boyunca sürekli titreştirme yoluyla deiyonize su içinde dağıtılmıştır. Konteyner, nanoakışkanın hazırlanması sırasında yüzey aktifleştirici maddenin buharlaşmasını önlemek için düzenli olarak soğutulmuştur.

Deney düzeneğinin akış şeması Şekil 3.163'te şematik olarak gösterilmiştir ve ayrıca deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3.164'te verilmiştir. İç çapı 13 mm, duvar kalınlığı 2 mm ve uzunluğu 1 olan 400 mm buharlaştırıcı, 200 mm adyabatik ve geri kalan 400 mm yoğunlaştırıcı olan ısı borusu bu çalışmada kullanılmıştır. Buharlaştırıcı bölgesi, NieCr kablосundan oluşan nominal gücü 1500 W olan bir elektrikli ısıtıcı kullanılarak ısıtılmıştır. Isıtıcı tamamen yalıtılmıştır. Giriş gücü bir wattmetre kullanılarak ölçülmüş ve izlenmiştir. Güç deneysel olarak Watt cinsinden ölçülmüştür. Isıtıcı (buharlaştırıcı bölümü) tamamen yalıtılmıştır ve bu nedenle wattmetrede ölçülen ısıtıcı gücünün çalışma sıvısına tamamen aktarıldığı varsayılmaktadır.

Isı borusunun yoğunlaştırıcı bölümü bir soğutma bölmesi ile kapatılmıştır. Isı, odadaki soğutucu akışkanın sirkülasyonu yoluyla yoğunlaştırıcıdan çıkarılmıştır. Soğutma sıvısının akış hızını gerektiği gibi kontrol etmek ve ayarlamak için bir kütle akış ölçer kullanılmıştır (± 0.01 g). Sistemden minimum ısı kaybını sağlamak için ısı borusunun tüm bölümleri cam yünü kullanılarak sarılmıştır.

Sıcaklığın ısı borusunun duvarı boyunca dağılımını izlemek için on termokupl (k-tipi, ± 0.5 C) kullanılmıştır. Bunlardan dördü buharlaştırıcıya ve dördü yoğunlaştırıcı kısmına yerleştirilirken, geri kalan ikisi soğutucu sıvısının sıcaklık değişimini izlemek için soğutucunun giriş ve çıkışına yerleştirilmiştir. Şekil 3.165, ısı borusu boyunca termokuplların yerlerini göstermektedir. Termokuplların kayıtları otomatik olarak bir veri kaydedici ile izlenmiştir.

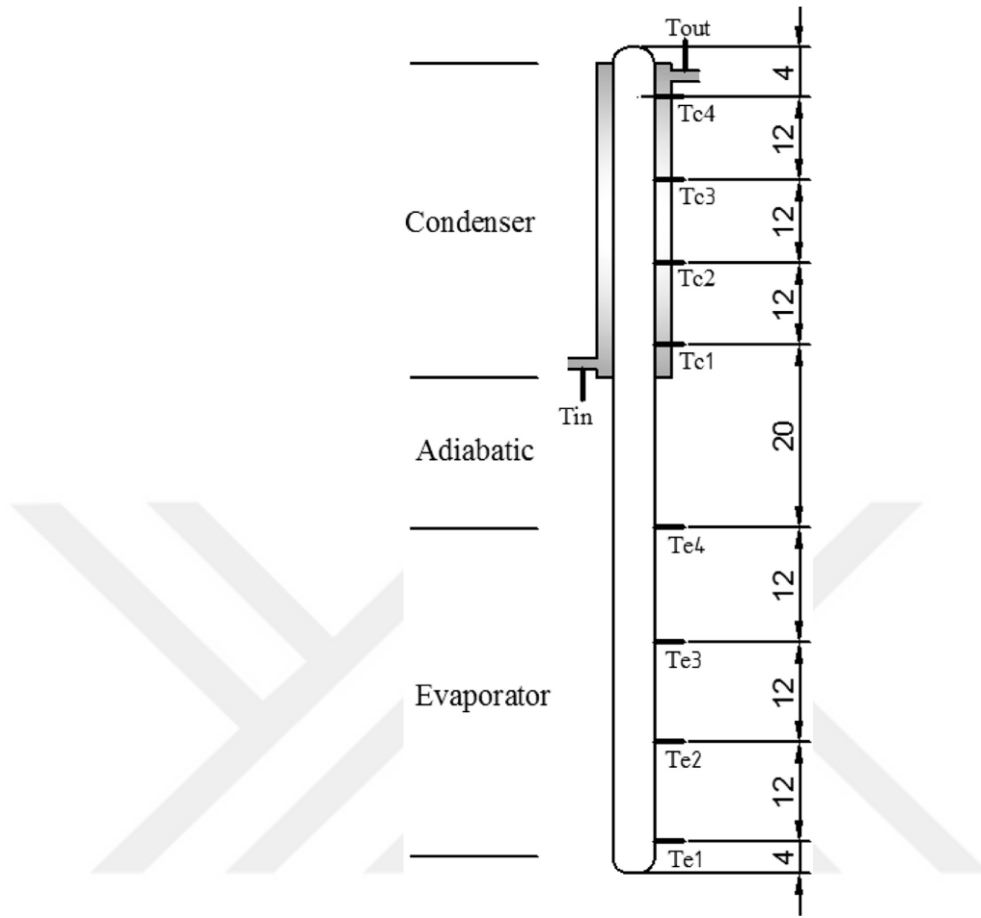
Isı borusu yatay ile 90° açığa yerleştirilmiştir. Çalışmada 100 W'lık artışlarla 200-400 W aralığında farklı giriş gücü değerleri test edilmiştir. Yoğunlaştırıcıdaki çalışma sıvısını yoğunlaştırmak için kullanılan soğutma suyunun akış hızı üç farklı değere ayarlanmıştır; 5 g/s, 7.5 g/s ve 10 g/s.



Şekil 3.163. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Menlik *et al.* 2015)



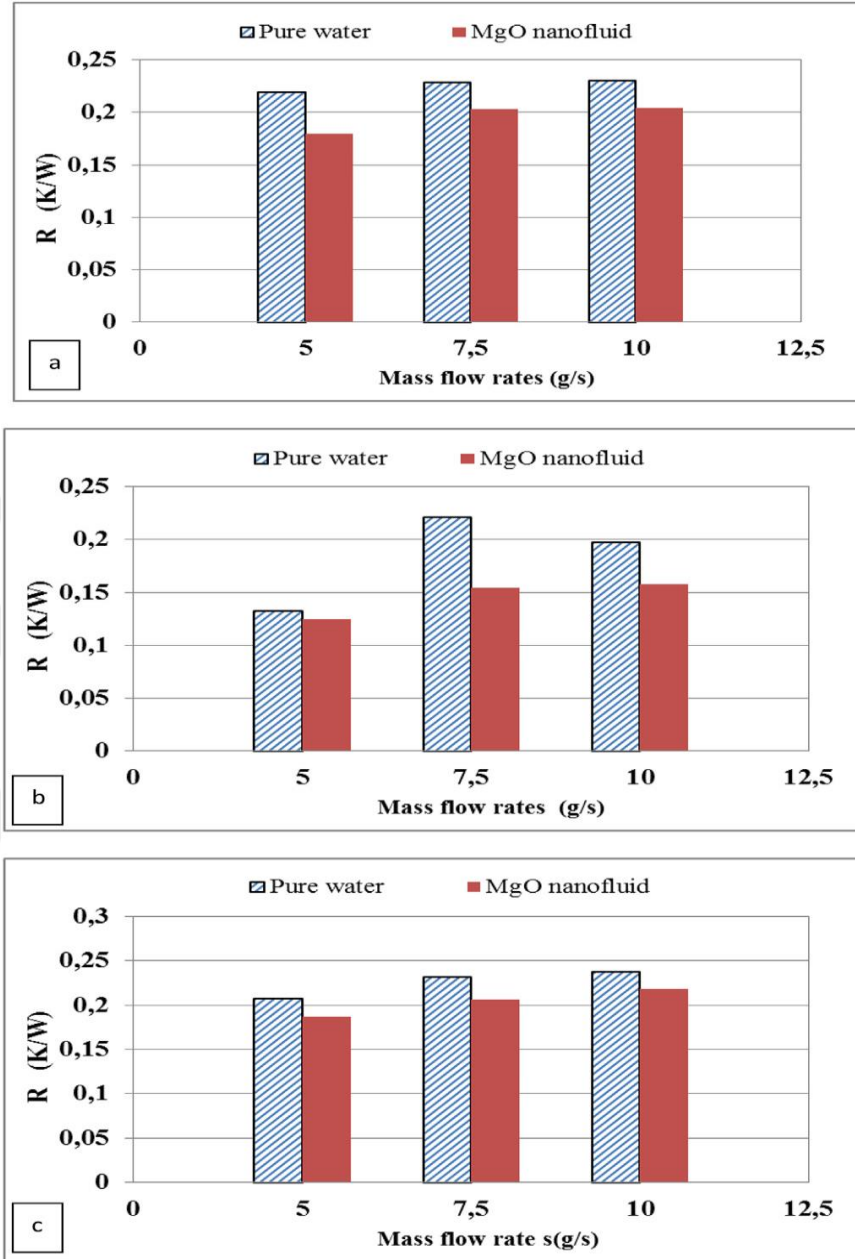
Şekil 3.164. Deney düzeneğinin fotoğrafı (Menlik *et al.* 2015)



Şekil 3.165. Isı borusu boyunca termokuplların yerleşimi (Menlik *et al.* 2015)

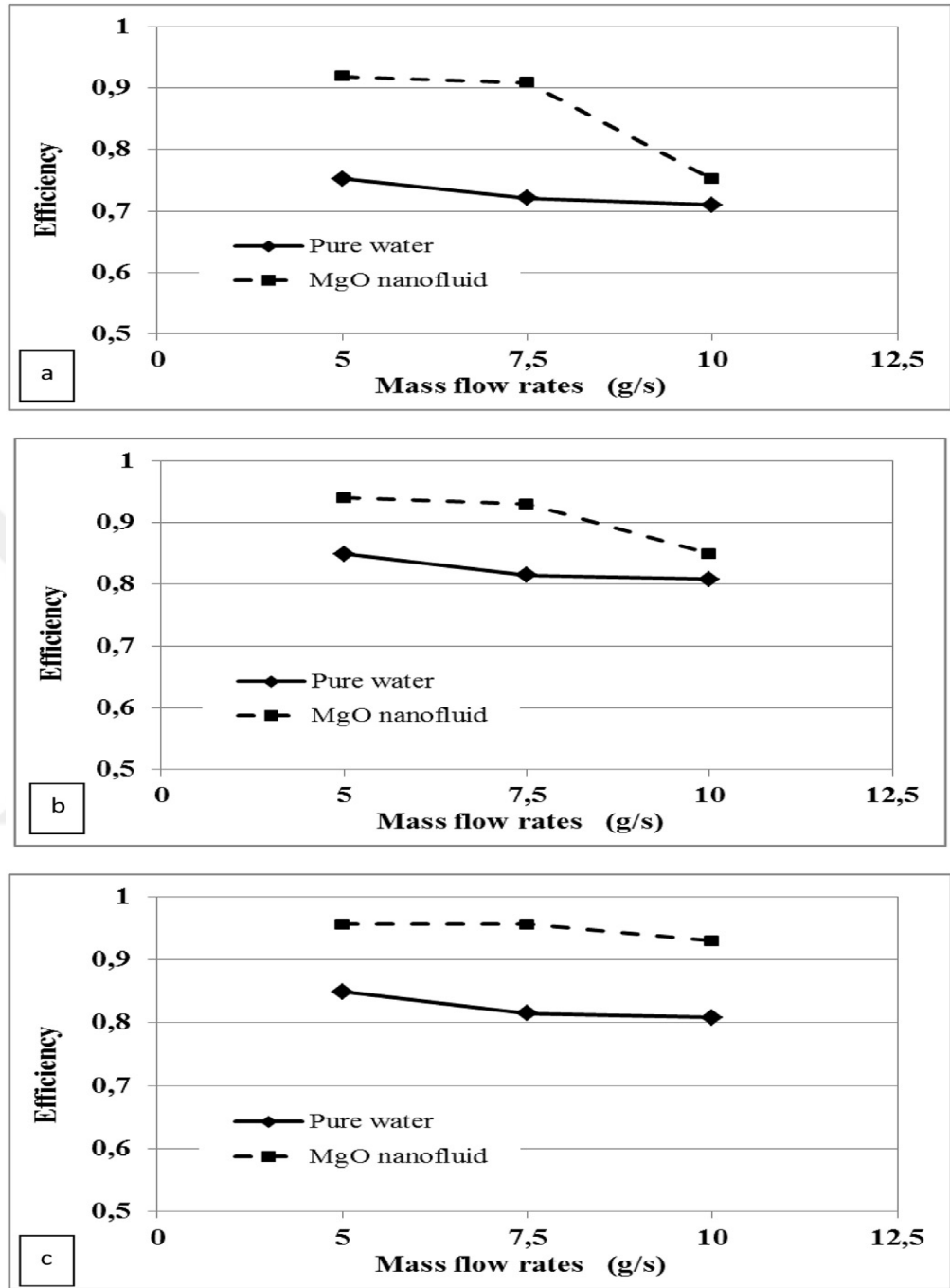
Isı borusunun verimliliğinin artırılması, deiyonize su ve su bazlı bir MgO nanoakışkan kullanılarak belirlenmiştir. Testler başlangıçta ısı borusunu deiyonize su ile ve daha sonra nanoakışkan ile doldurarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.166, ısı borusunun yoğunlaştırıcıda değişen akış debilerinde su ve MgO içeren nanoakışkanlar ile ısıl direnci göstermektedir. Isıl direncin, düşük ısı yüklerinde hem su hem de nanoakışkan için yüksek olduğu tespit edilmiştir ancak Şekil d’de gösterildiği gibi artan ısı yükleri ile hızla en aza inmiştir



Şekil 3.166. a) 200 W, (b) 300 W ve (c) 400 W ısı yüklerinde yoğunlaştırıcıda değişen soğutma sıvısı akış hızları için ısı borusunun toplam ısı direnci (Menlik *et al.* 2015)

Isı borusunun verimliliğindeki iyileşmeyi belirlemek için testler, çalışma sıvısı olarak deiyonize su ve deiyonize su içinde süspansiyon haline getirilmiş %5 MgO (hacim) 'den hazırlanan nanoakışkan kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.167, 200 W, 300 W ve 400 W değişen güç girişleri ile sağlanan yoğunlaştırıcıdaki farklı soğutma sıvısı kütle akış hızlarına göre verimliliği ve verimlilikteki artışı göstermektedir.



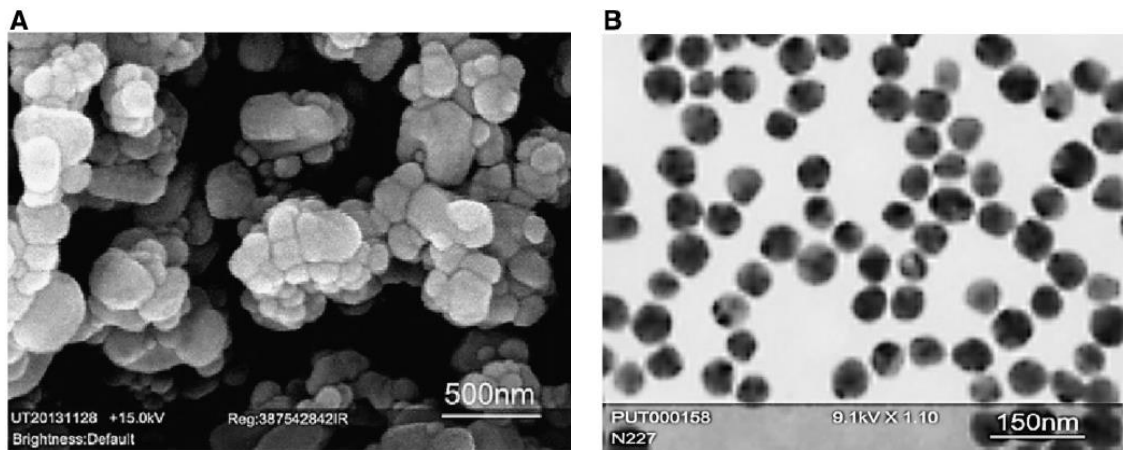
Şekil 3.167. a) 200 W, (b) 300 W ve (c) 400 W ısı yüklerinde yoğunlaştırıcıda değişen soğutma sıvısı akış hızları için ısı borusunun verimliliği (Menlik *et al.* 2015)

Maksimum artış, 200 W'lık bir ısı yükünde ve 7.5 g / s'lik bir kondansatör soğutucu akış hızında %26 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.167 (a)).

Sarfraz *et al.* (2014b), nanoakışkan ile doldurulmuş ısı borusunun (sulu AgNO_3 ve taze çayın yaprak ekstraktından üretilen Ag nanopartiküllerine sahip) ısı performansını araştırmışlardır. Buharlaştırıcı ısıtma gücü, şarj oranı, eğim açısı, konsantrasyon ve tepki süresi gibi farklı çalışma parametrelerinin ısı performans üzerindeki etkileri tartışılmıştır.

Mevcut çalışmada, nanopartiküllerin üretilmesi için, Yu ve diğerleri tarafından kullanılan biyolojik yöntem kullanılmıştır. İndirgeyici madde olarak çay yaprağı ekstresi kullanılmıştır. Yaklaşık 14.8 g yeşil çay yaprağı, mikrodalga destekli fırında kurutulmuş ve öğütmeden sonra bir şişede 100 mL iyonu giderilmiş suya ilave edilmiştir. Karışım 7-10 dakika kaynatılmış, söndürülmüş, elenmiş ve süzölmüştür. Ag nanopartikülleri konsantre edilip, santrifüjlü ultrafiltrasyon saflaştırılıp daha sonra durulanmış ve kurutulmuştur. Nanoakışkanları hazırlamak için, elde edilen partiküller baz sıvı olarak DI su içine dağıtılmıştır. Nanoakışkanlar, %0,1-0,4'lük farklı ağırlık konsantrasyonlarında hazırlanmıştır. Nanoakışkanları stabilize etmek için PH kontrolü, sonikasyon ve yüzey aktifleştirici madde kullanılmıştır.

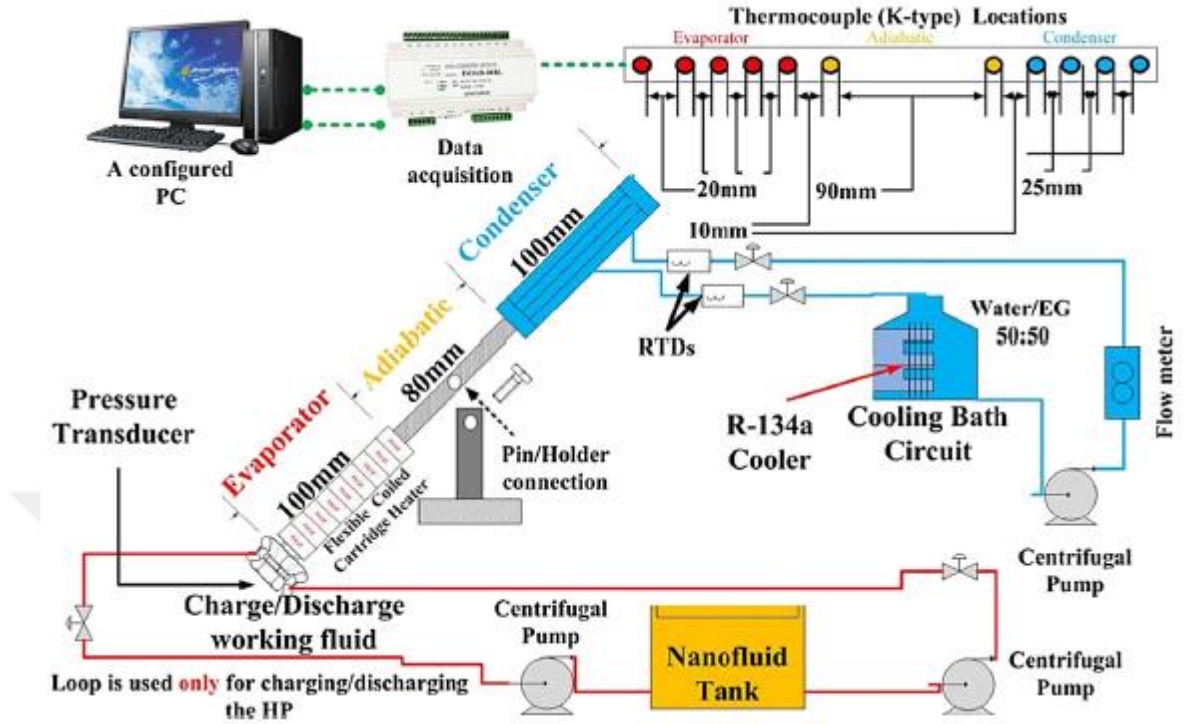
Nanopartiküllerin baz sıvı içinde düzgün dağılı, boyutu, şekli, saflığından emin olmak için kalite testleri yapılmıştır. SEM ve TEM görüntüleri Şekil 3.168'de (a-b) görülmektedir.



Şekil 3.168. (a) Üretilen Ag nanopartiküllerinin taramalı elektron mikroskopisi. (b) Ağırlıkça %= 0.1'deki Ag / su nanopartiküllerinin TEM görüntüsü (Sarfraz *et al.* 2014b)

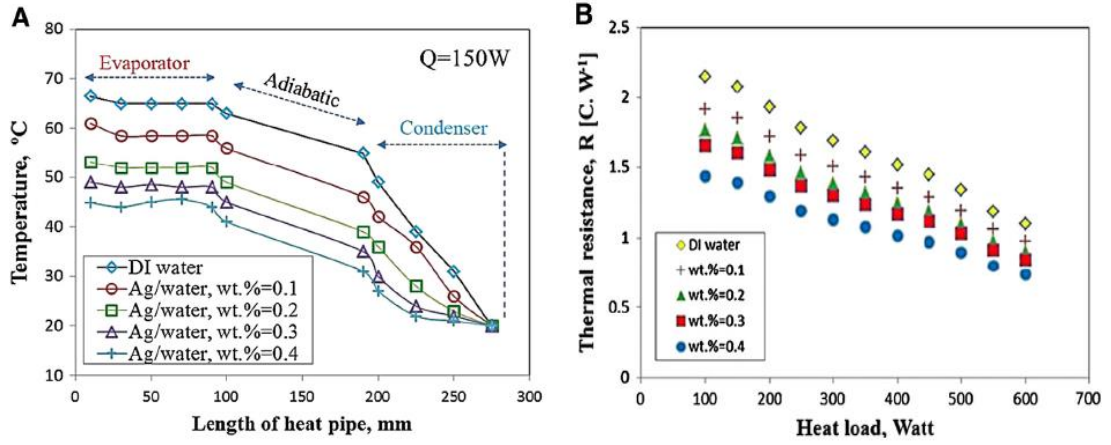
Şekil 3.168 (a) 'da görülebileceği gibi, nanopartiküller muntazam küresel şekle ve neredeyse 40 ila 50 nm arasında değişen özdeş bir ortalama boyuta sahiptir ve bu da partikül boyutu sayım testi ile kanıtlanmıştır. Şekil 3.168 (b) 'nin gösterdiği gibi, nanopartiküller baz sıvı içinde iyi dağılmıştır. Görülebileceği gibi, nano-akışkan yığının da ne topaklanma ne de kümelenme oluşmamıştır.

Şekil 3.169, deney düzeneğinin detaylarını ve şematik görünüşünü göstermektedir. Test düzeneği bir termosifon test bölümü (buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümleri dahil), ölçüm ve veri toplama sistemlerinden oluşmaktadır. Buharlaştırıcı bölümüne AC güç kaynağına bağlı esnek bir ısıtıcı (Kartuş tipi) monte edilmiştir. Isı kaybını azaltmak için, buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler taş yünü ve silikon örtü ile kaplanmıştır. Yoğunlaştırıcı, su / etilen glikol 50:50 (hacimce) konvektif soğutma banyosu ile soğutulmuş ve 20°C'ye kadar ayarlanmıştır. Isı borularının yüzey sıcaklıkları, ısı borusunun dış yüzeyine monte edilmiş on bir K tipi termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Yoğunlaştırıcının sıcaklığını kontrol etmek için soğutma banyosu giriş ve çıkışına iki termokupl monte edilmiştir. Tüm K-tipi termokupllar bir veri toplama sistemine bağlanmıştır. Deneyleri çalıştırmadan önce, ısı borusu başlangıçta 0.5 hp'lik bir pompa ile boşaltılmış ve hazırlanan nanoakışkanlar ile doldurulmuştur. Deneyler farklı ısı akışları, eğim değerleri, nanoakışkan konsantrasyonları ve doldurma oranlarında gerçekleştirilmiştir. Termokuplların boyutları ve mesafeleri Şekil 3.169'da görülmektedir. Deneylerde, ısı borusunun eğim açısı küçük derecelerde artmış, buharlaştırıcı kısmına uygulanan ısı akısı oranı sabit tutulmuştur. Gerekli ısı, bir otomatik transformatör tarafından kontrol edilen kartuş ısıtıcı tarafından sağlanmıştır. Kayıtlı verilerin tekrar üretilebilirliğini sağlamak için her aşamadaki sıcaklık dört kez kaydedilmiştir.



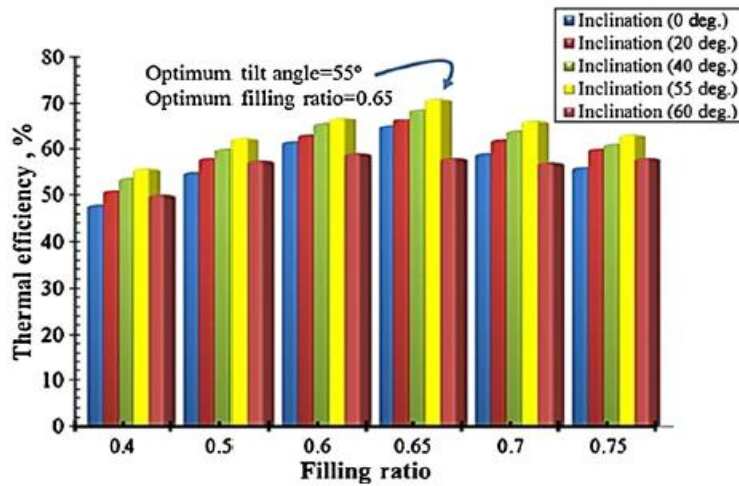
Şekil 3.169. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Sarafriz *et al.* 2014b)

Deneyisel çalışmalar, Ag / su nanoakışkanlarının, ısı borusu boyunca sıcaklık dağılımı profilini, buharlaştırıcıdan yoğunlaştırıcı bölümüne kadar azalttığını ve nanoakışkan konsantrasyonunun artmasıyla bu azalma oranının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, nanopartiküllerin konsantrasyonu optimum konsantrasyondan fazlaysa, ters eğilim görülebilir. Bir termosifonun tüm bölümleri için maksimum sıcaklık düşüşün görüldüğü konsantrasyon nanoakışkanın optimum konsantrasyonudur.



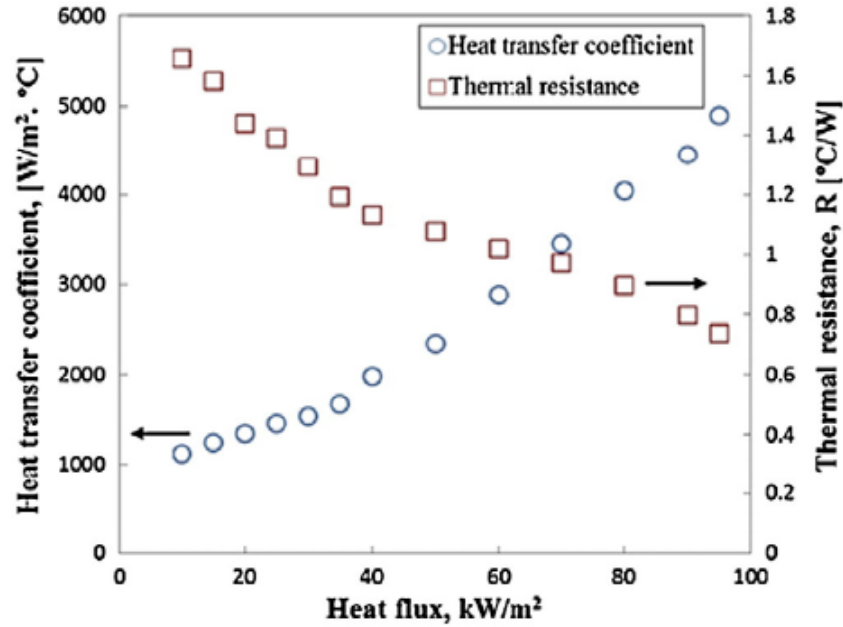
Şekil 3.170. (A). Nanoakışkan konsantrasyonunun ısı borusunun sıcaklık dağılım profiline etkisi. (B). Nanoakışkan konsantrasyonunun ısı borusunun termal direncine etkisi (Sarafriz *et al.* 2014b)

Çalışma sıvısının ısıyı absorbe etme, faz değişim olayı nedeniyle çalışma sıvısının buharını hareket ettirme yeteneği ısı borusunun ısı performansını etkileyen iki ana faktördür. Bu nedenle, eğim açısı doldurma oranı ile aynı anda incelenmelidir. Sonuçlar, Ag / su nanoakışkanlarının ağırlıkça % = 0.4 konsantrasyonda, 0.65 doldurma oranında ve 55° eğim açısında, ısı borusunun en iyi termal performansı sergilediğini göstermiştir.



Şekil 3.171. % = 0.4 konsantrasyonda, doldurma oranı ve eğiminin ısı borusunun termal performansı üzerindeki etkisi (Sarafriz *et al.* 2014b)

Isı akısının etkisi ısıl direncin azaltılması üzerinde görülebilir. Uygulanan ısı akısını artırarak, daha fazla çalışma sıvısı buharlaşmakta ve yoğunlaştırıcıya doğru hareket etmektedir. Bu nedenle, daha iyi ısı transfer performansı elde edilmektedir.



Şekil 3.172. Isı akısının ısı borusunun ısı verimi ve ısı aktarım katsayısına etkisi (Sarafraz *et al.* 2014b)

Isı borusunun sıcaklık değişimi ve zaman yanıtı üzerine yapılan çalışmalar, artan Ag / su nanoakışkan konsantrasyonu ile, ısı borusunun sabit sıcaklığa ulaşması için gereken sürenin önemli ölçüde azaldığını göstermiş, bu da daha yüksek konsantrasyonlarda daha iyi termal performansın beklendiği anlamına gelmiştir.

Çiftçi vd (2016), nano boyutta TiO₂ (Titanyum dioksit) partikülleri içeren nanoakışkan kullanılarak çift fazlı kapalı bir termosifonun (ısı borusu) ısıl performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmada, boyutları 100 nm'den küçük olacak şekilde elde edilen %2 oranındaki TiO₂ metal oksit parçacıkları saf su ile karıştırılmıştır. Elde edilen süspansiyon

ultrasonik banyoda 5 saat bekletilmiştir. Çözelti içerisindeki çökelmeleri önlemek amacıyla karışıma yüzey aktifleştirici olarak %0,2 oranında Triton X-100 ilave edilmiştir. Ultrasonik banyoda bekletme işleminde saf su-TiO₂ partikülleri karışımına (nanoakışkan) ultrasonik titreşimler gönderilerek homojen ve kararlı bir karışım elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan ultrasonik banyonun teknik özellikleri Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Ultrasonik banyonun teknik özellikleri

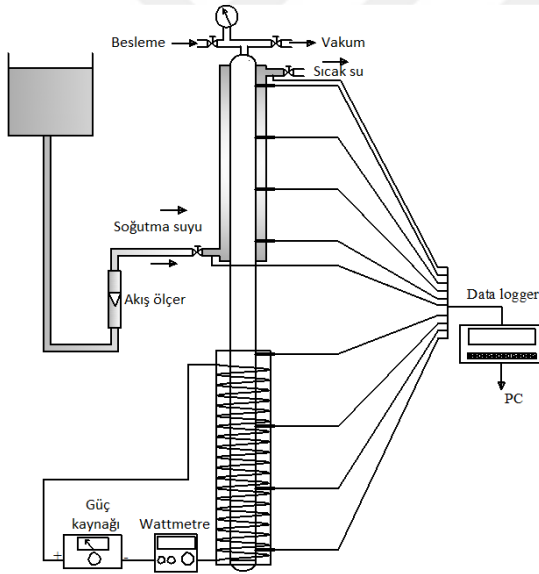
Özellik	Değer
Voltaj (V / Hz)	230 / 50
Ultrasonik Güç (Peak /W)	600 / 300
Ultrasonik Frekans (kHz)	28

Deney düzeneğinin şematik olarak görünümü ve deney düzeneğine ait bir fotoğraf Şekil 3.173 ve Şekil 3.174’te verilmiştir. Deneyde kullanılan ısı borusu 1000 mm uzunluğa, 13 mm iç çapa ve 15 mm dış çapa sahiptir. Malzemesi bakır olan borunun buharlaşma ve yoğunlaşma bölgeleri 400 mm uzunluğuna sahip olmasına karşın adyabatik bölgesi 200 mm uzunluğundadır. Borunun buharlaşma bölümü Ni-Cr kablodan oluşan, ortalama gücü 1500 W olan bir elektrikli ısıtıcı kullanılarak ısıtılmıştır. Isıtıcı tamamen yalıtılmıştır. Buradaki giriş gücü ölçülmüş ve bir wattmetre aracılığıyla (Fluke-43b analyzer) görüntülenmiştir. Güç Watt cinsinden deneysel olarak ölçülmüştür. Isıtıcı yani buharlaşma bölgesi tamamıyla yalıtılmış ve buna istinaden deneysel olarak ölçülen ısıtıcı gücünün tamamıyla iş akışkanına aktarıldığı kabul edilmiştir. Isı borusunun yoğunlaşma bölümü, bu bölüm dışına yapılan bir cep vasıtasıyla soğutulmaktadır. Isı cep içerisinde dolaşan soğutucu akışkan aracılığıyla yoğunlaştırıcıdan atılmıştır. Soğutucu akışkanın debisini ayarlamak ve gerektiği zaman kontrol altında tutmak amacıyla bir akış ölçer kullanılmıştır. Sistemdeki ısı kaybını en aza indirmek için ısı borusunun tüm bölümleri cam yünü ile yalıtılmıştır.

Isı borusu duvarı boyunca ısı dağılımını gözlemlemek için 10 adet termokupl (K- tipi) kullanılmıştır. Soğutucu akışkanın sıcaklık değişimini gözlemlemek amacıyla bu

termokuplların 4 adeti yoğuşma bölümü, 4 adeti buharlaşma bölümü ve 2 adeti de soğutucu giriş-çıkışına yerleştirilmiştir. Şekil c’de termokuplların ısı borusu üzerindeki yerleşimleri görülmektedir. Temokupl kayıtları datalogger (E-680 Elimko, Türkiye) kullanı-larak görüntülenmiştir (Şekil 3.175).

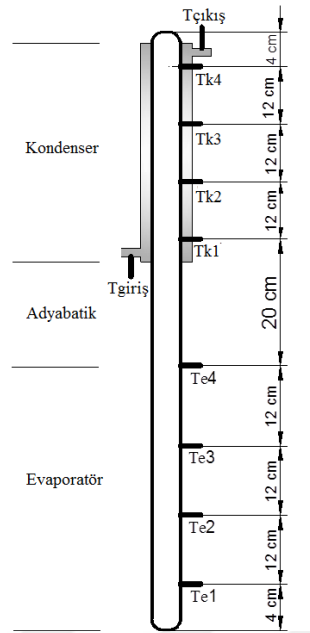
Sistemde kullanılan iş akışkanının debisi kullanılan akışkanın türünü gözetmeksizin 44,2 ml değerinde sabit tutulmuştur. Bu değer ısı borusundaki toplam hacmin 1/3’üne karşılık gelmektedir. Deneyler sırasında ısı borusu yatayla 90° açı yapacak şekilde tutulmuştur. Giriş gücü 200 W ile 400 W aralığında 100 W farkla uygulanmıştır. Yoğunlaştırıcıdaki iş akışkanını yoğuştırmada kullanılan soğutma suyunun debisi 3 farklı değere (5 g/s, 7,5 g/s ve 10 g/s) ayarlanmıştır.



Şekil 3.173. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Çiftçi *et al.* 2016)



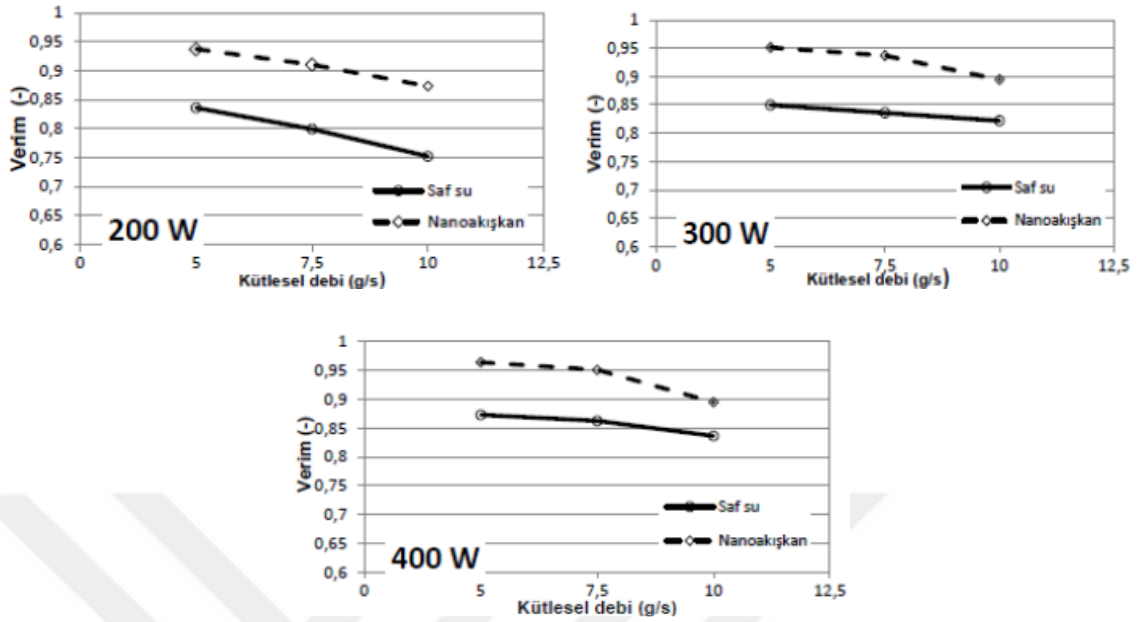
Şekil 3.174. Deney düzeneğinin görünümü (Çiftçi *et al.* 2016)



Şekil 3.175. Isı borusu üzerinde yer alan termokuplların genel dağılımı (Çiftçi *et al.* 2016)

Isı borularının performanslarını belirlemek amacıyla yapılan bu deneysel çalışmada iş akışkanı olarak kullanılan iki farklı akışkanın performans üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan iş akışkanları, ağırlıkça %2 konsantrasyondaki TiO_2 parçacıkları ile saf suyun karıştırılması sonucu elde edilen TiO_2 nanoakışkanı ve saf sudur. Isı borusuna farklı debiler ve farklı giriş güçleri uygulanarak yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen çıktılar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar şu şekildedir:

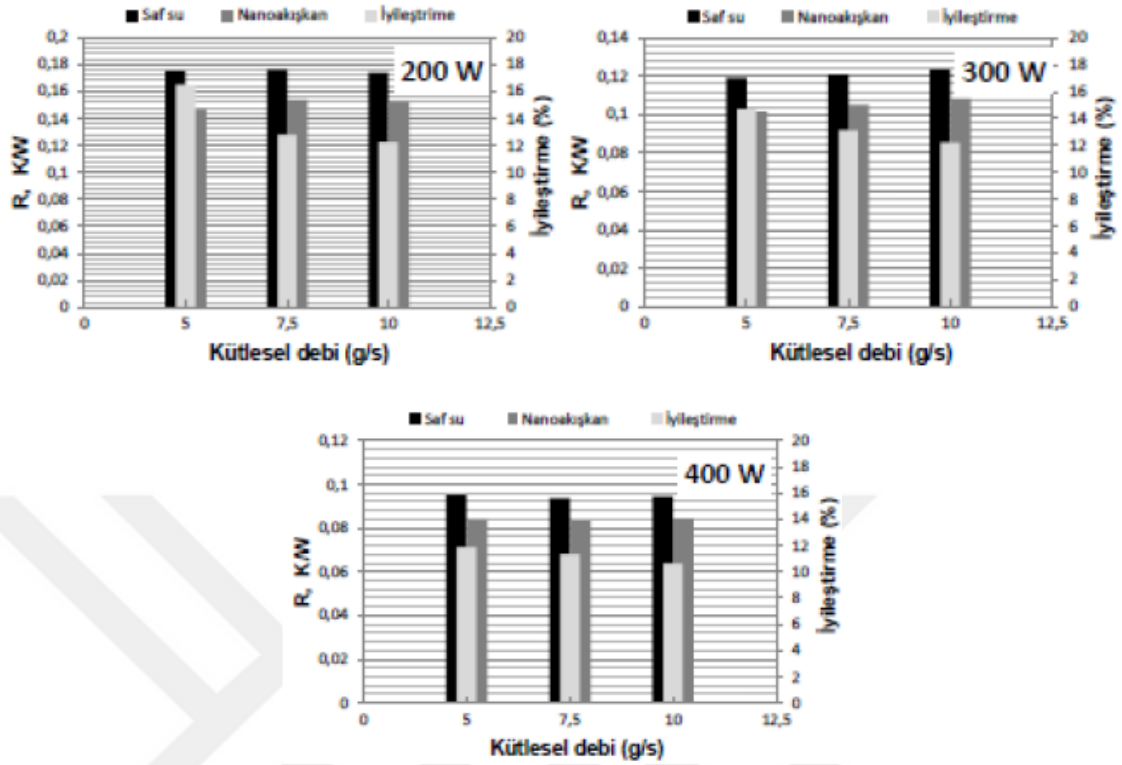
- Saf su yerine TiO_2 nanoakışkanı kullanıldığında ısı borusunun duvar sıcaklıklarındaki dağılım daha dar bir aralıkta sınırlandırılmıştır. Benzer şekilde, yoğunlaşma ve buharlaşma bölgelerinin duvar sıcaklıkları, iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığında daha küçük değerlerde seyretmiştir.
- Nanoakışkan kullanımı ile buharlaşma sıcaklığı ortalama 10°C daha düşük olmuştur
- Nanoakışkan içerisindeki metal oksit parçacıklarının iş akışkanın iletkenliğini artırdığı, bunun sonucunda da ısı borusunun veriminde artış olduğu görülmüştür. Bu artış miktarı yaklaşık olarak %11,76 civarındadır.



Şekil 3.176. Farklı soğutma suyu debileri ve ısıtıcı güçlerinde ısı borusu veriminin değişimi (Çiftçi *et al.* 2016)

Yapılan deneyler sonucunda, nanoakışkan kullanımının ısı borusu verimini artırdığı gözlemlenmiştir. En yüksek verim, $\eta = 0.95$ ile 400 W ısıtıcı gücü ve 5 g/s soğutma suyu debisinde nanoakışkan kullanılarak yapılan deney sonucu elde edilmiştir. İş akışkanı ne olursa olsun, soğutma suyu debisi arttıkça ısı veriminde bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 3.177’de, su ve nanoakışkan için ısı direnç (R) ve iyileştirme oranının ısı borusu yoğunlaştırıcundaki değişken soğutucu akışkan debilerine göre değişimi görülmektedir. Düşük ısı yüklerinde hem su hem de nanoakışkan için ısı direncin yüksek olduğu belirlenmesine rağmen, artan ısı yüküne bağlı olarak ısı direnç en küçük değerine ulaşmıştır.



Şekil 3.177. Isı borusundaki ısı direncin değişimi ve elde edilen iyileştirme miktarları (Çiftçi et al. 2016)

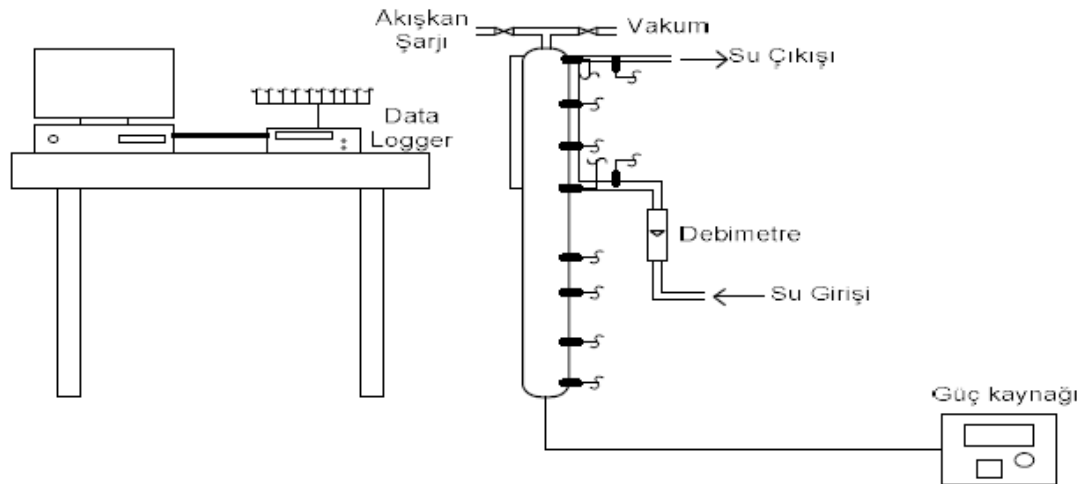
Isıl direnç için iyileştirme miktarındaki en iyi sonuç, %16.5 oranındaki iyileştirme ile iş akışkanını olarak nanoakışkanın kullanıldığı 200 W ve 5 g/s soğutma suyu debisiyle yapılan deneyde elde edilmiştir. Bu iyileştirmenin en büyük nedeni nanoakışkan içerisinde yer alan TiO_2 parçacıklarının iş akışkanının yüzey alanını, dolayısıyla ısı transfer alanını arttırmasıdır. Ayrıca, nanoakışkan kullanımıyla arttırılan ısı iletkenlik, bu akışkanın kullanıldığı deneylerin daha iyi sonuçlar verdiğini deneysel olarak göstermiştir. İş akışkanını olarak nanoakışkan kullanıldığında, ısıtıcı gücünün artmasıyla akışkana aktarılan ısı transferi hızlanmış ve buna bağlı olarak iş akışkanının evaporatör bölgesine doğru hızla hareket ettiği gözlemlenmiştir. İş akışkanının vakumlu ortam içerisindeki hızının artmasına neden olan bu etken ile boru içerisindeki akış özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği (kayıpların arttığı) düşünülmektedir. 200 W ısı gücü ve 5 g/s soğutma suyu debisinde elde edilen sonuçlar bunun en belirgin göstergesidir. Bahsi geçen deneyde ısıtıcı gücünün ve soğutma suyu debisinin çok küçük olması karışım içerisindeki kararsızlığı arttıracak etmenleri elimine etmektedir.

Çakır (Çakır 2015), termosifon (fitilsiz) tipi ısı borusunda çalışma akışkanı olarak içerisinde hacimsel olarak %2 Al_2O_3 (Alumina) nano partiküller bulunan nanoakışkan kullanarak ısı performansın artırılmasını amaçlamıştır.

Deneyisel çalışmalar farklı aşamalardan meydana gelmektedir ve ilk adımını nanoakışkanın hazırlanması oluşturmaktadır. Deneyisel çalışmada kullanılan nano partiküller alüminyum oksittir (Al_2O_3). Temel akışkan olarak ise saf su kullanılmıştır. Isıl iletkenliği bilinen Al_2O_3 saf suyun içerisine %2 hacimsel oranda ortalama 10nm boyutunda nanopartikül ilave edilerek elde edilen süspansiyon ultrasonik banyoda 4 saat karıştırılmıştır. Ayrıca karışıma yüzey aktifleştirici olarak %0,2 oranında Triton X-100 ilave edilmiştir. Bu işlem sonucu elde edilen nanoakışkanın ısı özellikleri Çizelge 3.10’da verilmiştir. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 3.178’de görülmektedir. Deney düzeneğinde istenilen bölgelerin anlık sıcaklık değerlerinin ölçümü için 10 adet ısı çifti, akış kontrolü için debimetre, vakum işlemini gözlemleyebilmek için manometre, akışkanın doldurulması için doldurma musluğu ve güç kaynağı bulunmaktadır. Veri toplama için bir adet bilgisayar, data logger kullanılmıştır (Şekil 3.179-3.180).

Çizelge 3.10. %2 derişimindeki alümina nanoakışkanının termal özellikleri (Çakır 2015)

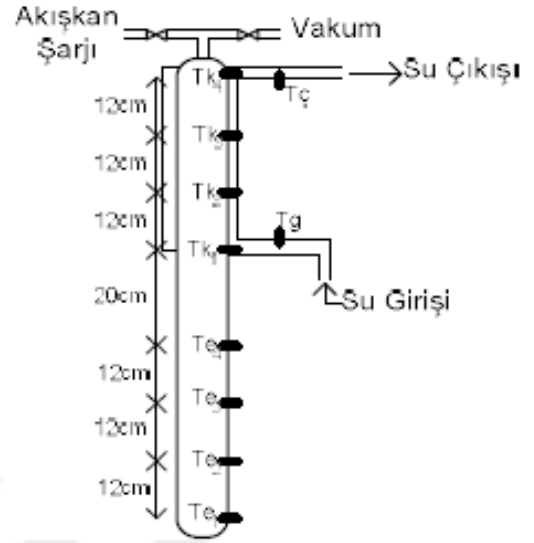
Yoğunluk (d)	kg/m ³	1056.1384
Özgöl Isı (Cp)	j/kgK	3931.5972
Isıl İletkenlik (K)	W/mK	0.62337083



Şekil 3.178. Deney düzeneğinin şematik resmi



Şekil 3.179. Isı borusunun deney düzeneğinin görünümü



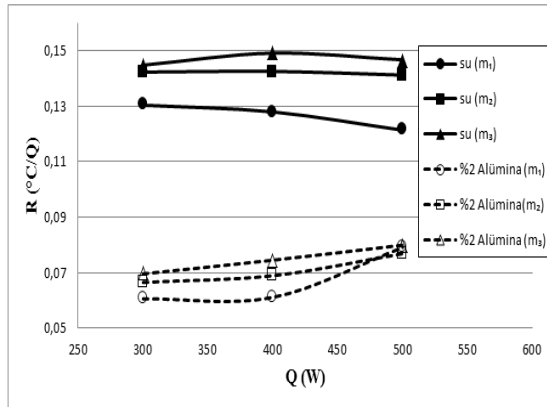
Şekil 3.180. Termokuplların yerleşimi

Deney düzeneği; 1 adet ısı borusu, 1 adet debimetre, 1 adet manometre, 10 adet ısı çifti, 1 adet data logger, doldurma vanası, güç kaynağı ve bilgisayardan oluşmaktadır.

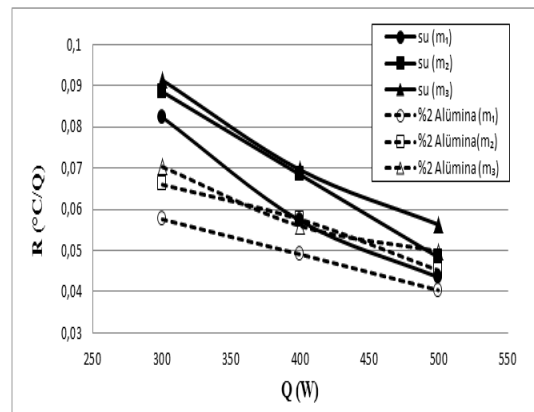
Ticari olarak satılan alümina nano parçacıkları istenilen nano boyutta olmadığı için Spex-8000 (Spex Industries, Inc., Edison, NJ) tipi bilyeli öğütücü ile ortalama 10nm'e getirilmiştir. Hazırlanan saf su içerisine %2 oranında alumina nanopartikülleri ilave edilmiştir. Yüzey aktifleştirici olarak hazırlanan süspansiyon içerisine %0,2 oranında Triton X-100 yüzey aktifleştirici katılarak 8 saat süreyle ultrasonic banyoda (Bandelin Sonorex Super RK514H) karıştırılmıştır. Bu çalışmayı diğerlerinden ayıran iki temel özellik bulunmaktadır. Bunlardan biri nanopartikül tanecik boyutunun literatürdekinden çok daha düşük hale gelmiş olması diğeri ise kullanılan yüzey aktifleştiricinin nanoakışkanın çökelme ve topaklanma problemini çözmesidir. Kullanılan yüzey aktifleştirici Triton X-100 orijinalinde ticari olarak Rohm & Haas Co tarafından üretilmekte olup daha çok deterjan endüstrisinde kullanılmaktadır. Triton X-100 kimyasal olarak $(C_{14}H_2O_2(C_2H_4O)_n)$ ifade edilir. Jelleşerek bir kayganlık sağlar ve temas açısını düşürür.

Deneyler önce saf su ile sonra %2 oranındaki Al_2O_3 süspansiyonu ile yapılmıştır. Isı akışı sağlanacak olan akışkan yoğuşturucuya 3 farklı ($m_1=0,005\text{kg/s}$, $m_2=0,0075\text{kg/s}$ ve $m_3=0,01\text{kg/s}$) debide verilmiştir. Sisteme 300W, 400W, 500W'lık farklı ısı enerjileri buharlaştırıcıdan aktarılmıştır. Yapılan her deneyde 20 dakika süren kararlı hale ulaşma süresinden sonra veriler kaydedilmiş, akış şartları bir alt debi değerine ayarlanmış ve son debi değerine kadar deneyler tekrarlanmıştır. Isı borusunun 45° ve 75° 'lik eğim açıları için aynı işlemler tekrar yapılmıştır. Buharlaştırıcıya ısı girişi Ni-Cr spiral tipi ısıtıcı ile sağlanarak güç kontrolü sayesinde sabit ısı çalışma akışkanına aktarılmıştır. Aktarılan ısı wattmeter (Fluke-43b analyzer) ile kaydedilmiştir. Yoğuşturucuda kullanılan debi metre $\pm 0.01\text{ g/s}$ hassasiyetlidir.

Nanoakışkan kullanımı ile ısı borusunun ısıl direnci 45° eğimli ısı borusu için 0,07 seviyelerinde iken saf su kullanımında 0,13 civarındadır. Nanoakışkan kullanımı ortalama olarak %46 ısıl direncin azalmasına neden olmuştur. Benzer durum ısı borusunun 75° eğimi içinde elde edilmiştir (Şekil 3.181-182) Isı direncin azalmasına neden olan nanoakışkan ile çalışan ısı borusunda çalışma akışkanın ısıyı absorplayarak daha düşük sıcaklıkta buharlaşması ve bu suretle ΔT sıcaklık farkının düşmesidir.

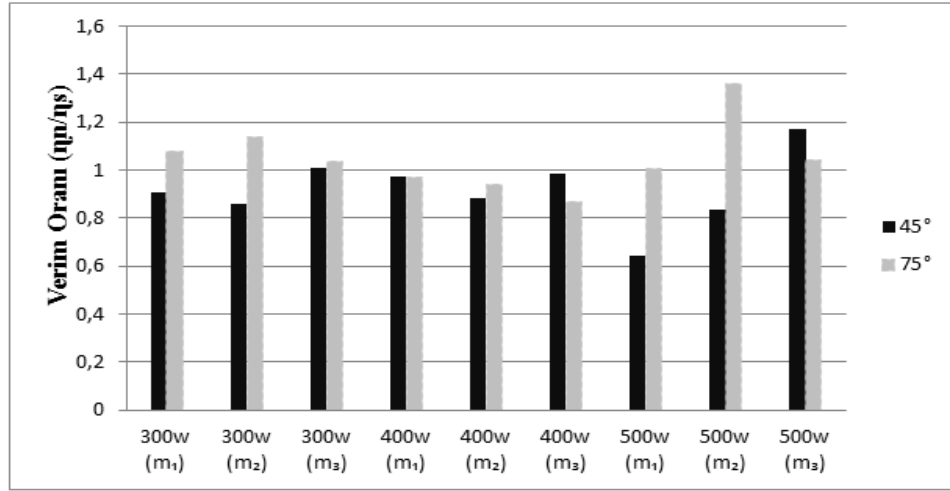


Şekil 3.181. 45° lik ısı borusu açısıyla elde edilen ısıl direnç grafiği



Şekil 3.182. 45° lik ısı borusu açısıyla elde edilen ısıl direnç grafiği

Nanoakışkan kullanımı ısı borusunun ısıl verimini arttırmıştır.

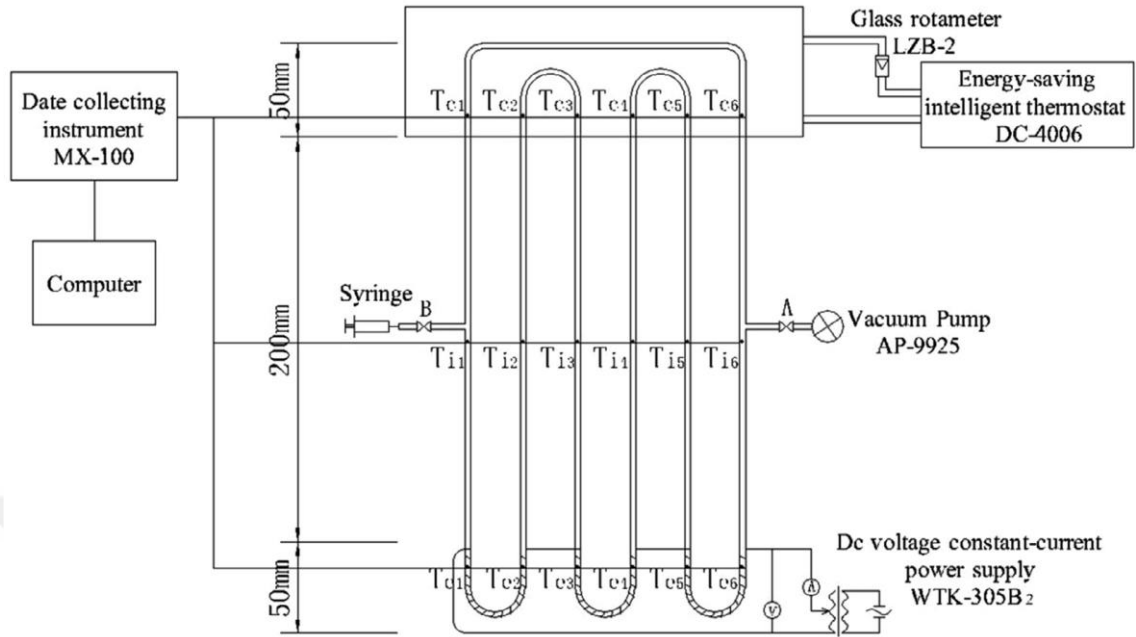


Şekil 3.183. 45° ve 75° yapılan deneylerde; Nanoakışkan verimlerinin saf su verimlerine göre karşılaştırılması

3.1.5. Salımlı/titreşimli ısı boruları

Su *et al.* (2016), nano-akışkan, kendi kendini ısılatan sıvı ve kendi kendini ısılatan bir nano-akışkan kullanarak salımlı ısı borusunun ısı performansını araştırmıştır.

Salımlı ısı borusu, iç ve dış çapları sırasıyla 2 mm ve 4 mm olan bükme bakır kılcal tüpler kullanılarak üretilmiştir. Isı borusu toplam 2.2 m uzunluğunda U şeklinde bükülmüş üç dönüğe sahiptir. Şekil 3.184'te gösterildiği gibi, deney düzeneği esas olarak bir ısı borusu düzeneği, veri toplama sistemi, DC güç kaynağı (WYR-305B2, EAST) ve su soğuk banyosundan (DC- 4006, SCIENTZ) oluşmaktadır. Sırasıyla 50, 200 ve 50 mm uzunluğunda buharlaşma, adyabatik ve yoğunlaşma bölümlerinden oluşan salımlı ısı borusu dikey olarak yönlendirilmiştir. Buharlaşma bölümü elektrikle ısıtılırken, giriş voltajı U ve akım I , DC güç kaynağı tarafından ayarlanmıştır. Yoğunlaştırıcı bölümü soğuk banyodan pompalanan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Hem buharlaşma hem de adyabatik bölümler, bu iki bölümden ısı kaybını en aza indirmek için termal olarak iyi yalıtılmıştır. Veri toplama sistemi T tipi bakır-sabit termokupllar, bir MX-100 veri toplama sistemi ve bir kişisel bilgisayardan oluşmaktadır. Şekil 3.184'te gösterildiği gibi, ısı borusunun dış yüzeyine ± 0.1 C hassasiyete sahip on sekiz T tipi termokupl monte edilmiştir. Ölçülen konumdaki sıcaklık yanıtı bilgisayar tarafından kaydedilmiştir.



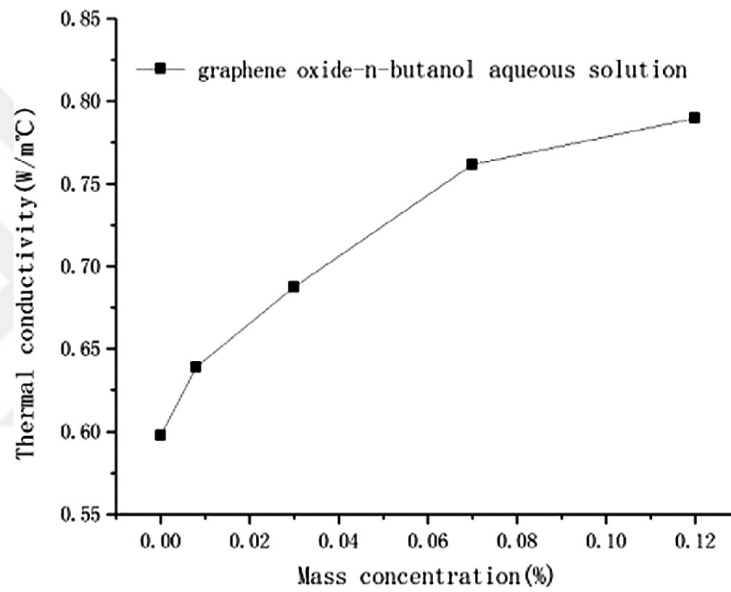
Şekil 3.184. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Su *et al.* 2016)

Isı borusu deneyden önce bir vakum pompası ile boşaltılmıştır. Çalışma sıvıları daha sonra bir şırınga kullanılarak ısı borusuna doldurulmuştur. Bu çalışmada şarj oranı hacimce %50 olarak belirlenmiştir. Deney boyunca sabit bir giriş sıcaklığına ve akış hızına sahip soğutma suyu sürekli olarak yoğunlaştırıcıya beslenmiştir. Buharlaştırıcıya güç girişi kademeli olarak arttırılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdaki sıcaklık verileri, sistem sabit bir duruma ulaştıktan sonra kaydedilmiştir.

Kendini ıslatan nanoakışkan, Nanjing XFNANO Materials Tech Co., Ltd'den satın alınan grafen oksit dispersiyon çözeltisinin n-butanol alkol sulu çözeltisi ile karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Grafen oksidin parçacık çapı ve kalınlığı, sırasıyla 50-200 nm ve 0.8-1.2 nm dir. Tek katman oranı ise %99 dur. Grafen oksit nanopartikülleri en az üç gün boyunca suda kararlı bir şekilde süspansiyon haline getirilebilir ve sabit bir deneyle kontrol edilebilir. Bu deney için grafen oksit nanopartiküllerinin ve n-butanol alkolün birçok farklı kütle bölümü hazırlanmıştır.

Kendini ıslatan nanoakışkan, yüksek iletkenliğin birleştirici etkisi ve ters Marangoni etkisinin yüzey gerilimi nedeniyle ısı borusunun ısı transfer performansını artırır. Kendini

ıslatan nanoakışkan için optimum bir bileşen konsantrasyonu gözlenir. Isı borusunun ısı transfer performansı, bu optimum bileşen konsantrasyonunda göze çarpmaktadır. Bu deneyde, ısı borusunun maksimum ısı transfer performansı, ağırlıkça %0.07 grafen oksit konsantrasyonu ve ağırlıkça %0,7 n-butanol konsantrasyonunun optimum bileşen konsantrasyonunda elde edilmiştir. Bu optimum bileşen konsantrasyonundaki artış oranının maksimum değeri, kendi kendini ıslayan sıvınıninkine kıyasla yaklaşık %16 ve nanoakışkana göre yaklaşık %12'dir.

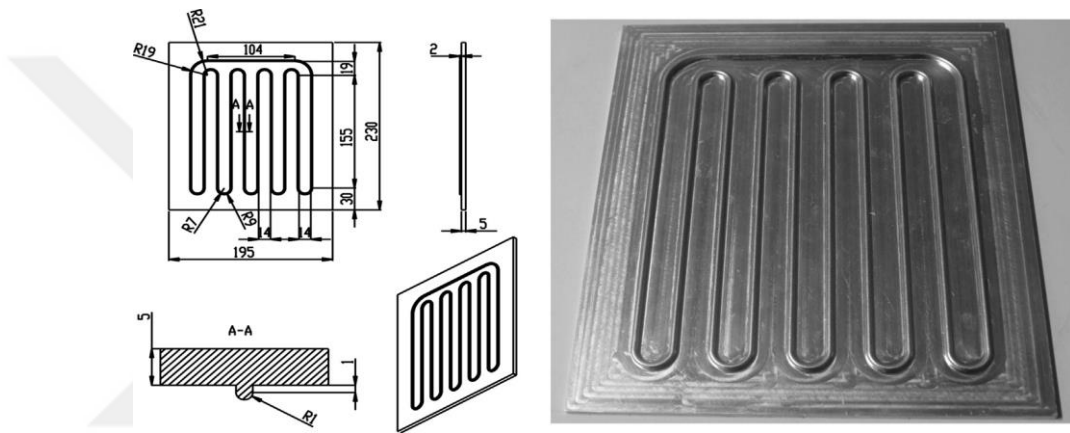


Şekil 3.185. Nanopartikül konsantrasyonunun, kendini ıslatan nanoakışkanın ısı iletkenliği üzerine etkisi (Su *et al.* 2016)

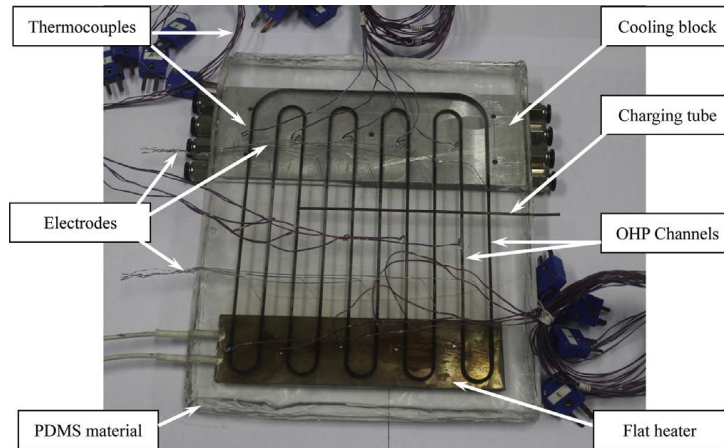
Önerilen yöntem, yüzey gerilimi ve ısı iletkenliğin ölçülmesinde etkilidir. Isı borusunun en iyi ısı transfer performansına karşılık gelen optimum bileşen konsantrasyonunun belirlenmesinde de başarılıdır. Kendiliğinden ıslanan nanoakışkan aynı zamanda yüksek bir ısı iletkenliğe ve büyük türev ve yüzey gerilimi gradyanına sahiptir.

Ji *et al.* (2013), beş tur polidimetilsiloksandan (PDMS) yapılmış şeffaf salınlı ısı borusu üzerinde bir araştırma yürütmüşlerdir.

PDMS salınlımlı ısı borusu imal etmek için, önce Şekil 3.186'de gösterildiği gibi bir alüminyum kalıp yapılmıştır. Bu kalıp kullanılarak, birbirine bağlı kanal ve beş turlu bir PDMS plakası kolaylıkla imal edilebilir. Elektrik alan etkisini araştırmak için, Şekil 3'te gösterildiği gibi PDMS ısı borusu kanallarına 10 elektrot yerleştirilmiştir. Sıcaklıkları ölçmek için 15 termokupl kullanılmıştır. PDMS malzemelerinin benzersiz özelliğini kullanarak, termokupllar kanal yüzeyine yakın yerleştirilebilmiştir. Şekil 3.187, mevcut araştırmada test edilen PDMS ısı borusunun nihai prototipini göstermektedir.



Şekil 3.186. Alüminyum ısı borusu kalıbının ölçüleri ve resmi (Ji *et al.* 2013)



Şekil 3.187. PDMS Salınlımlı ısı borusu resmi (Ji *et al.* 2013)

Mevcut araştırma için silindir şeklindeki 80 nm böhmüt alümina nanopartikülleri kullanılmıştır. Şekil 3.188'te gösterildiği gibi, partikül şeklini ve boyutunu belirlemek için

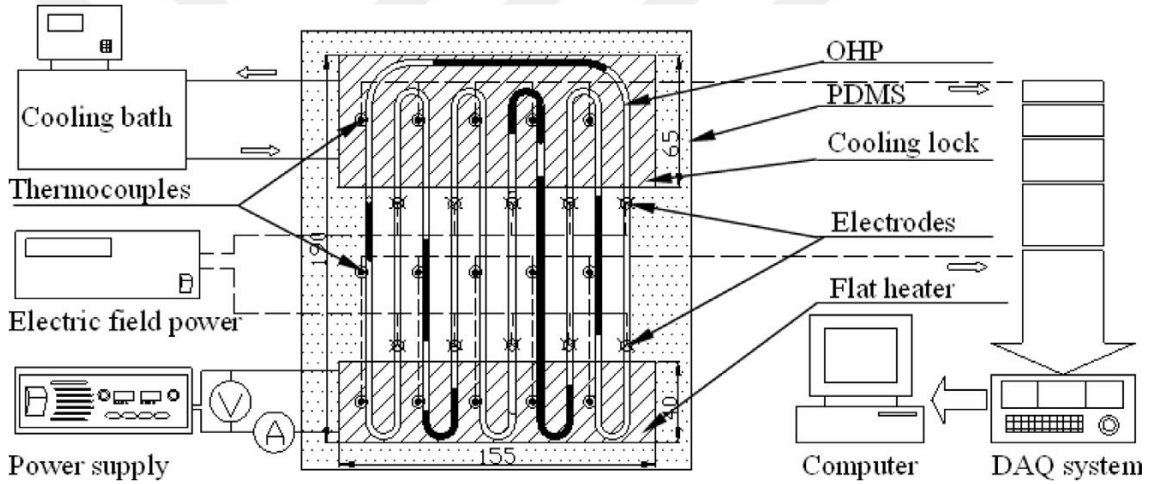
üretici tarafından transmisyon elektron mikroskopisi (TEM) görüntüleri sağlanmıştır. Partikül, hacmen %1.0 konsantrasyonda etanol baz sıvısına doğrudan ilave edilmiştir. Partiküller baz sıvıya eklenir eklenmez, partikül içeren baz sıvı manyetik bir karıştırıcı kullanılarak bir gün boyunca sürekli olarak karıştırılmıştır. Ayrıca bir saat boyunca ultrasonik osilatör ile sonike edilmiştir. Nanoakışkanın hazırlanmasından bir gün sonra neredeyse hiç sedimentasyon gözlenmemiştir.



Şekil 3.188. Alümina nanopartiküllerinin TEM görüntüsü (Ji *et al.* 2013)

Şekil 3.189'da gösterilen deney sistemi bir PDMS OHP, sirkülatör, soğutma bloğu, NI-DAQ sistemi, güç kaynağı, elektrik alan güç kaynağı ve elektrikli düz ısıtıcıdan oluşmaktadır. Şekil 3.189'da gösterildiği gibi PDMS OHP, beş dönüş ve sırasıyla 40 mm, 65 mm ve 85 mm uzunluklarında buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı ve adyabatik olmak üzere üç bölüme sahiptir. PDMS OHP dikey olarak test edilmiştir ve alttaki buharlaştırıcı düzgün bir elektrikli düz ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Yoğunlaştırıcı bölümü doğrudan sabit sıcaklıktaki bir sirkülatör ile soğutulan bir soğutma bloğuna bağlanmıştır. Deneysel

verilerin kaydedilmesi için veri toplama sistemi kullanılmıştır. Elektrik alanı oluşturmak için elektrik alan güç kaynağı elektrotlara bağlanmıştır. Isı borusu sıcaklıklarını ölçmek için toplam 15 T tipi termokupl kullanılmıştır. Şekil 3.189, bu termokuplların yerlerini göstermektedir. Tüm veri toplama sisteminin sıcaklık ölçüm hassasiyeti 0,25 C'dir. PDMS iyi bir yalıtım malzemesidir ve PDMS OHP'nin 29 mm'ye kadar bir kalınlığı vardır. Ek olarak, OHP kanalları içindeki salınım hareketini gözlemlemek için, yoğunlaştırıcının ve buharlaştırıcının sadece arka tarafları fiberglas ile yalıtılmıştır. Soğutma bloğunun giriş ve çıkış sıcaklığı izlenmiştir. Soğutma bloğundan gelen suyun akış hızı kaydedilmiştir.

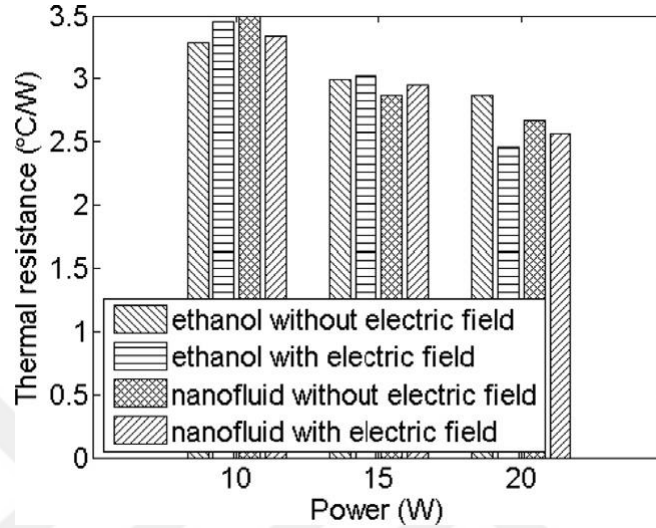


Şekil 3.189. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Ji *et al.* 2013)

Daha büyük bir PDMS OHP üretilmiş, nanoakışkan ve elektrik alanının PDMS OHP ısı transfer performansı üzerindeki etkileri araştırılmış aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Mevcut araştırmada dört grup deney gerçekleştirilmiştir; bunlar elektrik alanı olmayan etanol PDMS OHP (Grup 1), elektrik alanı olan etanol PDMS SIP (Grup 2), etanol / Al_2O_3 nanoakışkan PDMS OHP elektrik alanı olmayan (Grup 3) ve elektrik alanlı etanol / Al_2O_3 nanoakışkan PDMS OHP (Grup 4). Şekil 3.190, tüm gruplar arasındaki termal direnç karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 3.190 ayrıca her bir grup için giriş gücü arttıkça termal direncin nasıl azaldığını göstermektedir. Giriş gücü arttığında, SIP'deki sıvı tapalarının ve buhar kabarcıklarının salınım hareketi artar. Bu şekilde,

SIP'nin ısı transfer performansı geliştirilebilir. Böylece, giriş gücü arttıkça termal direnç azalır.



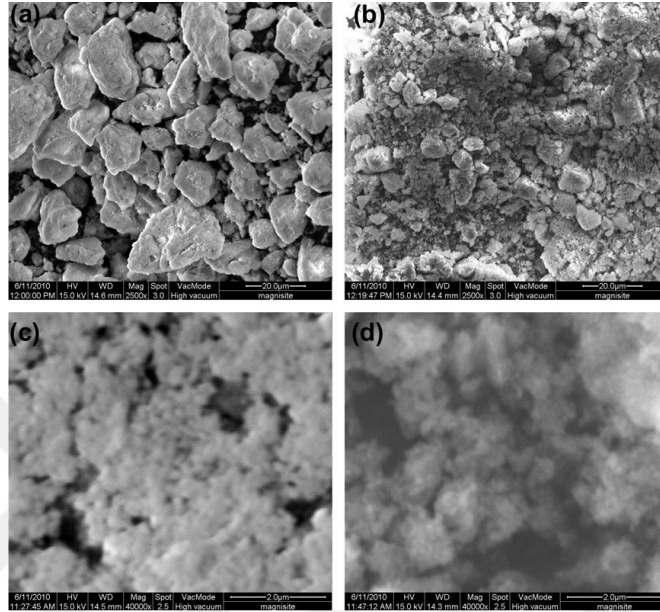
Şekil 3.190. Isıl direnç karşılaştırması (Ji *et al.* 2013)

- PDMS OHP etanol / Al_2O_3 nanoakışkan ile doldurulduğunda, iç yüzeyde partikül tortusu ve çok sayıda küçük kabarcık gözlenmiştir. Ek olarak, etanol ile yüklü PDMS OHP ve etanol / Al_2O_3 nanoakışkan arasında önemli bir fark olmadığı bulunmuştur. Elektrik alan etkisi için, 30 V DC elektrik alanı PDMS OHP'ye uygulandığında farklı bir fenomen gözlenmemiştir.
- Bu çalışmada elektrik alanı ve Al_2O_3 nanopartiküllerinin PDMS OHP'nin ısı transfer performansını etkileyemediği görülmüştür.

Ji *et al.* (2011), Al_2O_3 nanopartiküllerinin OHP'nin ısıl performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. OHP için baz sıvı olarak su kullanılmıştır. Ortalama çapları 50 nm, 80 nm, 2.2 μm ve 20 μm olan dört boyutta partikül incelenmiştir.

Partiküller, tüm testler için ağırlıkça %0.5'lik bir konsantrasyonla baz akışkan suya doğrudan ilave edilmiştir. Partiküller suya eklenirken, partikül içeren baz sıvı ultrasonik osilatör tarafından en az 1 saat süre ile karıştırılmış, partikül içeren baz sıvı hemen

OHP'ye doldurulmuştur. Tarama elektron mikroskobu (SEM), Şekil 3.191'de gösterildiği gibi Al_2O_3 partiküllerini karakterize etmek için kullanılmıştır.



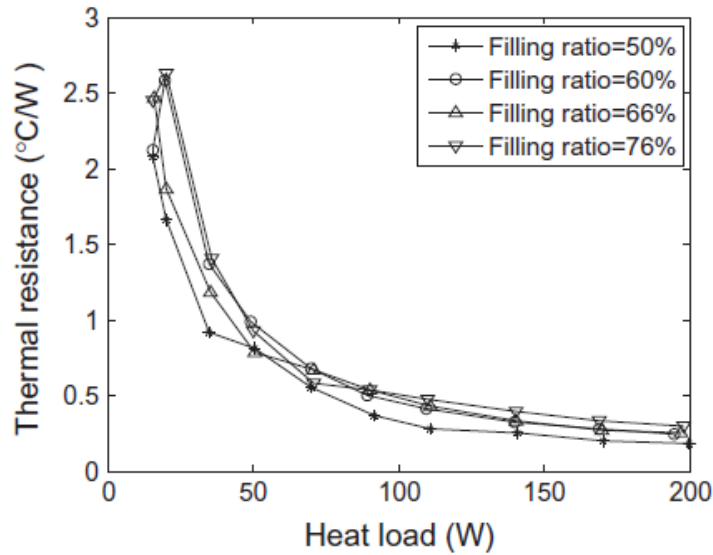
Şekil 3.191. Ortalama çapları (a) 20 lm, (b) 2,2 lm, (c) 80 nm ve (d) 50 nm olan Al_2O_3 partiküllerinin SME görüntüsü (Ji *et al.* 2011)

OHP'nin konfigürasyonu ve tasarımı farklı olduğundan, optimum şarj oranı da farklıdır. Mevcut araştırma için en uygun şarj oranını belirlemek amacıyla %50, %60, %66 ve %76 şarj oranları uygulanmıştır. Optimum şarj oranı belirlendiğinde, bu şarj oranı burada yapılan tüm testler için kullanılmıştır.

OHP dikey olarak test edilmiştir yani altta buharlaştırıcı ve üstte yoğunlaştırıcı vardır. Testten önce, soğutma banyosu sıcaklığı SIP'nin çalışma sıcaklığı olarak tanımlanan $25^{\circ}C$ 'ye ayarlanmıştır. Soğutma banyosu $25^{\circ}C \pm 0.3^{\circ}C$ sıcaklığa ulaşır ulaşmaz, güç kaynağı açılmış ve OHP'nin buharlaştırıcı bölümüne giriş gücü verilmiştir. Güç, toplam güce bağlı olarak kademeli bir modda 5W, 15W veya 30W'lık güç artışı ile artırılmıştır. Giriş gücü 20 W'tan az olduğunda, artış 5W, giriş gücü 20 ila 100 W arasında olduğunda, artış 15 W, giriş gücü 100 W'dan yüksek olduğunda, artış 30 W olarak ayarlanmıştır. Giriş gücü artırıldığında, sistem yeni bir sabit duruma ulaşmak için zamana ihtiyaç duymuştur. Deneysel veriler, güç girişi düşük olduğunda, sabit duruma ulaşma süresinin yaklaşık 30

dakika olduğunu ve daha yüksek bir giriş gücü için, 10 dakikanın, sistemin deneyde kullanılan kurulum için yeni bir sabit duruma ulaşmasını sağlayabildiğini göstermiştir. Buharlaştırıcı sıcaklığı 1 dakika içinde $0,5^{\circ}\text{C}$ 'den daha az değiştiğinde, test bölümünün sabit bir duruma ulaştığı kabul edilmiştir. Giriş gücü ve sıcaklık verileri kişisel bir bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Bu, mevcut araştırmada kullanılan ısıtıcı tarafından toplam güç 200W 'ı aşana kadar devam etmiştir.

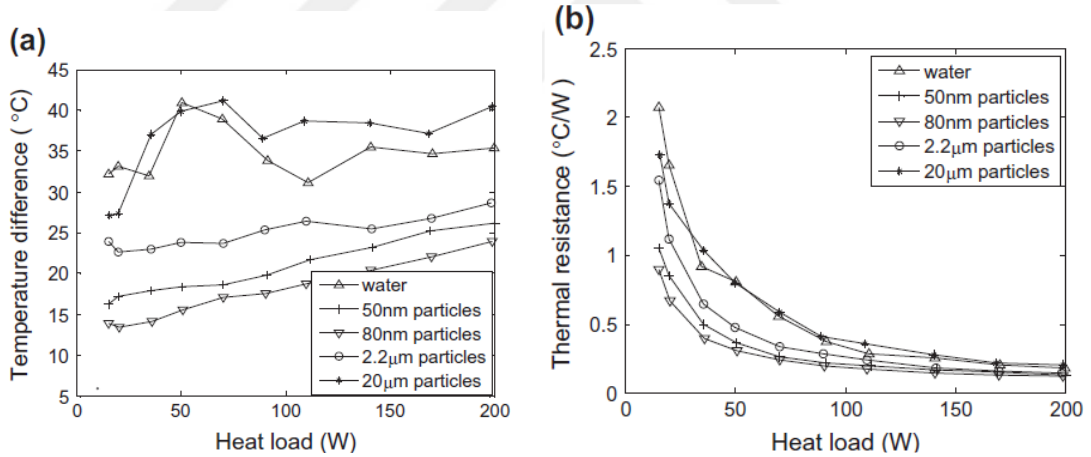
Yukarıda bahsedilen deney düzeneği ve prosedürler kullanılarak, doldurma oranı, partikül boyutu ve giriş gücünün OHP'deki ısı taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 3.192, su ile doldurulmuş OHP'nin ısı direnci üzerindeki doldurma oranı etkisini göstermektedir. Şekil 3.192'de gösterildiği gibi, OHP'nin ısı direnci doldurma oranına bağlıdır ve daha yüksek bir doldurma oranı daha yüksek bir ısı dirence yol açar. Burada incelenen OHP için optimum doldurma oranının yaklaşık %50 olduğu görülmektedir. Bu sonuca dayanarak, testler için %50 doluluk oranı seçilmiştir.



Şekil 3.192. Isıl direnç üzerinde doldurma oranının etkisi (Ji *et al.* 2011)

Sisteme güç verildiğinde sıcaklık artmaya başlar ve sıcaklık salınımı gözlenmez. Sıcaklık bir noktadan daha yüksek olduğunda, sıcaklık dalgalanması gözlenmiştir. Bu noktadan sonra, sıcaklık salınımı başlamış ve sıcaklık daha fazla artırılmamıştır, bu salınım

hareketinin ve dolayısıyla OHP'nin çalışmaya başladığını gösterir. Bu sıcaklık başlangıç sıcaklığı olarak adlandırılır. OHP sade suyla ve 20 nm, 2.2 nm, 80 nm, and 50 nm çaplarında dört farklı partikül boyutunda suyla doldurulduğunda karıştırılmış beş farklı çalışma sıvısı arasında en yüksek olan yaklaşık suyla doldurulduğunda 54,2 °C'ye ulaşmıştır. Başka bir deyişle, partiküller OHP'ye yüklendiğinde, salınım hareketinin başlatılmasına yardımcı olmuştur. Bununla birlikte, başlangıç sıcaklığı partikül büyüklüğüne bağlıdır. Partikül boyutu küçüldüğünde, başlangıç sıcaklığı düşmektedir. Burada test edilen 20 nm'lik en büyük partiküller için başlangıç sıcaklığı 48.5°C iken, 50 nm partiküller için başlangıç sıcaklığı 40.6°C'dir. Mevcut deneyde kullanılan tüm partiküllerin başlangıç sıcaklığını düşürebileceği ve OHP'nin başlamasına yardımcı olabileceği sonucuna varılabilir. Partikül boyutu azaldığında, belirli bir giriş gücü için başlangıç sıcaklığı düşmektedir.



Şekil 3.193. (a) sıcaklık farkı ve (b) ısı direnç (tanecik oranı: %50) üzerinde partikül boyutu etkisi (Ji *et al.* 2011)

Şekil 3.193, OHP'deki ısı taşıma kapasitesi üzerindeki partikül boyutu etkisini göstermektedir. Şekil 3.193'te gösterilen sonuçlardan, ısı taşıma kapasitesinin partikül boyutuna bağlı olduğu bulunmuştur. Partikül boyutu 20 nm ila 80 nm arasında küçüldükçe, ısı taşıma kapasitesi artmış, ısı direnç azalmıştır. Ancak partikül boyutu 50 nm'den daha fazla azalır, ısı direnç daha da azaltılamaz. Bu, maksimum ısı taşıma kapasitesi için en uygun partikül boyutu olduğu anlamına gelir. Burada test edilen 20 nm,

2,2 lm, 80 nm ve 50 nm'lik dört partikül arasında, 80 nm partiküllerin OHP için en iyi ısı taşıma kapasitesiyle sonuçlanabileceği görülmüştür.

Qu *et al.* (2011), SiO_2 / su ve Al_2O_3 / su nanoakışkanların aynı iki OHP'nin termal performansı üzerine uygulanmasını araştırmışlardır.

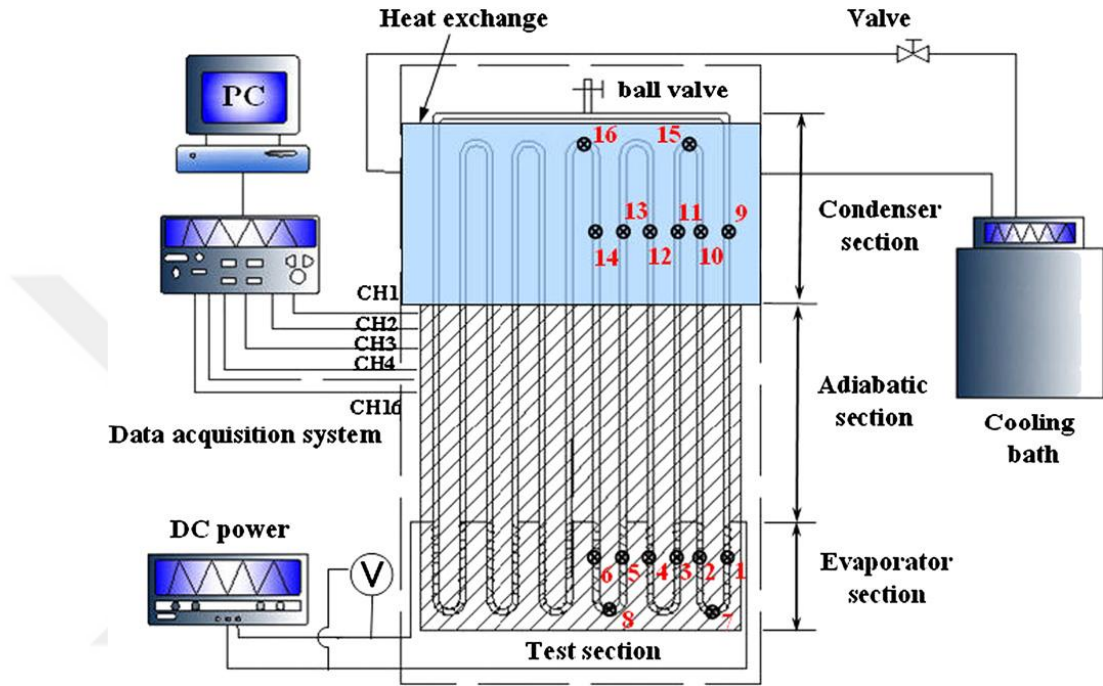
Bu çalışmada, ortalama çapları 30 ve 56 nm olan SiO_2 ve Al_2O_3 olmak üzere iki çeşit küresel oksit nanopartikül kaynak malzeme olarak seçilmiş ve saf su baz sıvı olarak kullanılmıştır.

SiO_2 / su ve Al_2O_3 / su nanoakışkanları deneyleri için sırasıyla 2 mm iç çap ve 3 mm dış çap paslanmaz çelik kılcal boruların bükülmesi ile imal edilen aynı salınımlı ısı borularından OHP iki set hazırlanmıştır. Her OHP seti, toplam uzunluğu 3.0 m olan 6 dönüşe sahiptir. Şekil 3.194'de gösterildiği gibi, deney düzeneği esas olarak bir OHP düzeneği, çok kanallı veri toplama sistemi, DC güç kaynağı ve su soğuk su banyosundan oluşmaktadır. Sırasıyla 50, 105 ve 70 mm uzunluğunda buharlaşma, adyabatik ve yoğunlaşma bölümlerinden oluşan OHP dikey olarak yerleştirilmiştir. Buharlaşma bölümü (yani, buharlaştırıcı) elektrikle ısıtılmış ve giriş voltajı U ve akım I , dijital multimetre ile ölçülmüştür. Yoğunlaşma bölümü (yani, yoğunlaştırıcı) soğuk su banyosundan pompalanan soğutma suyu ile soğutulmuştur. Hem buharlaşma hem de adyabatik bölümler, bu iki bölümden ambiyansa ısı kaybını en aza indirmek için termal olarak iyi yalıtılmıştır.

Şekil 3.194'de gösterildiği gibi, OHP'nin dış yüzeyine sekiz tanesi buharlaştırıcıya ve diğer sekiz tanesi yoğunlaştırıcıya yerleştirilecek şekilde 0.1 mm çapında ve 0.1 °C hassasiyette on altı OMEGA T tipi termokupl kullanılmıştır. Tüm duvar sıcaklığı ölçümleri veri toplama sistemi tarafından kaydedilmiştir.

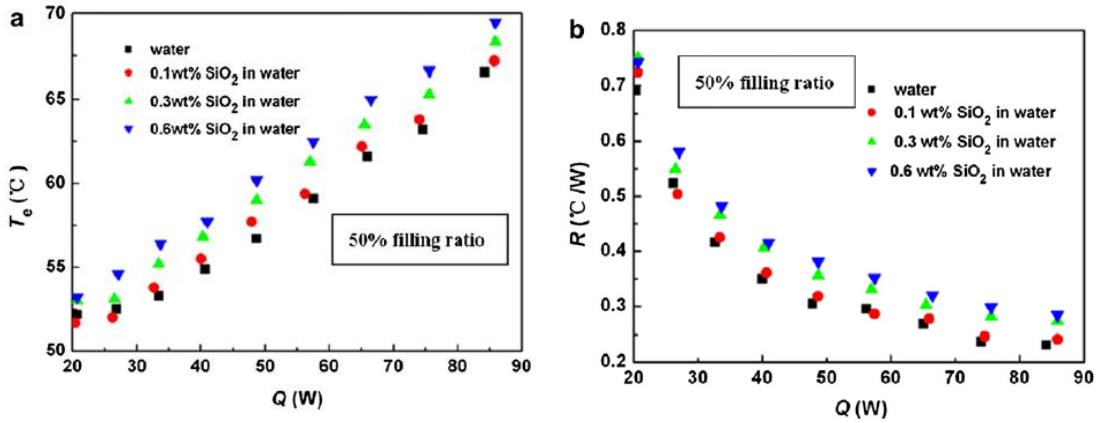
Deneyden önce OHP'ler bir vakum pompası ile boşaltılmış ve daha sonra hazırlanan nanoakışkanlarla doldurulmuştur. Karşılaştırma kolaylığı için, hem SiO_2 / su hem de Al_2O_3 / su nanoakışkanlarla yüklü OHP'ler için doldurma oranları hacimce %50'ye ayarlanmıştır. Deney sırasında sabit giriş sıcaklığı ve akış hızına sahip soğutma suyu

sürekli olarak yoğunlaştırıcıya verilmiş ve buharlaştırıcıya güç girişi kademeli olarak arttırılmıştır. Her bir güç girişi altında, sistem sabit bir duruma ulaştıktan sonra buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdaki sıcaklık verileri kaydedilmiştir.



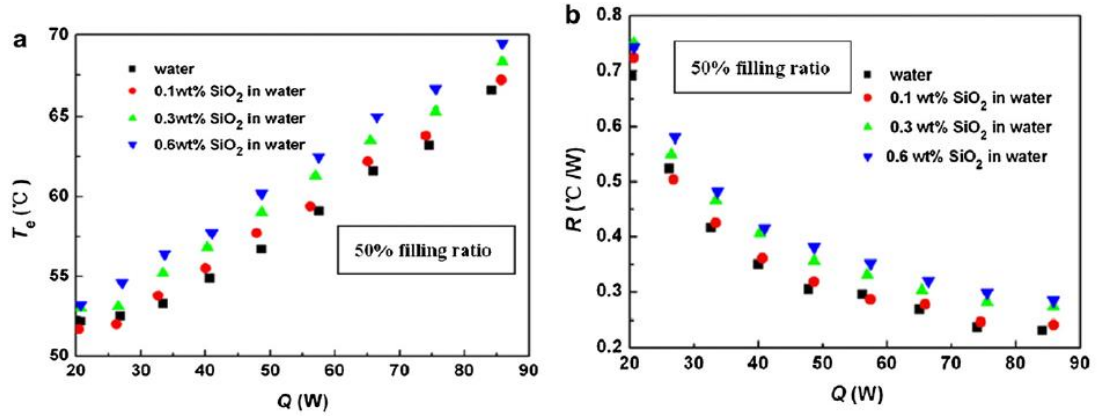
Şekil 3.194. Deney seti (Qu and Wu 2011)

Güç girişinin bir fonksiyonu olarak farklı kütle konsantrasyonlarında (ağırlıkça %0-0.6) SiO_2 / su nanoakışkanları ile yüklü OHP'nin ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığı ve toplam ısı direnci sırasıyla Şekil 3.195 (a) ve (b) 'de gösterilmiştir. Beklenenin aksine, saf su yerine SiO_2 / su nanoakışkanları kullanıldıktan sonra hem buharlaştırıcı duvar sıcaklığı hem de toplam ısı direnci artmıştır. Ayrıca, bu artış SiO_2 nanopartikül konsantrasyonlarının ağırlıkça %0.1'den ağırlıkça %0.6'ya yükselmesiyle daha belirgin hale gelmiştir. Ağırlıkça %0.6 konsantrasyonda, buharlaştırıcı duvar sıcaklığı ve toplam ısı direnci, saf su ile karşılaştırıldığında, sırasıyla 3.5 C (veya %5.5) ve 0.075 C / W (veya %23.7) artmıştır. Böylece, silika nanopartiküllerinin baz suya eklenmesi SIB'nin ısı performansını bozmuştur.



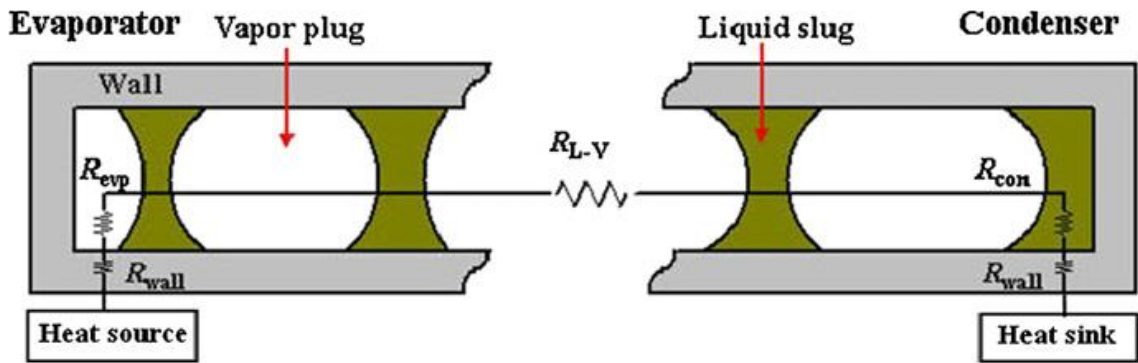
Şekil 3.195. SiO₂ / su nanoakışkanları ile yüklü farklı kütle konsantrasyonlarında OHP'nin ısı performansı: (a) ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığı; (b) toplam ısı direnci (Qu and Wu 2011)

Şekil 3.196 (a) ve (b), güç girişinin bir fonksiyonu olarak sırasıyla farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %0-1.2) Al₂O₃ / su nanoakışkanları ile yüklü OHP'nin ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığını ve toplam ısı direncini göstermektedir. Al₂O₃ / su nanoakışkanları ile yüklü OHP'nin hem buharlaştırıcı duvar sıcaklığının hem de genel ısı direncinin saf su yüklü OHP'ye kıyasla azaldığı, yani alümina nanopartiküllerinin eklenmesinin ısı transferini arttırdığı görülmüştür. Ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığı ve ısı direnci başlangıçta partikül konsantrasyonunu ağırlıkça %0'dan ağırlıkça %0.9'a yükselmesiyle azalmış, ancak konsantrasyon ağırlıkça %0.9'dan %1.2'ye arttıkça artmıştır. Dolayısıyla, mevcut deneyde Al₂O₃ / su nanoakışkanları ile yüklü OHP için ağırlıkça yaklaşık %0.9 olan optimal bir partikül konsantrasyonu vardır. Al₂O₃ / su nanoakışkanları ile yüklü OHP'nin %0.9'luk optimal konsantrasyonda ve 82W'lık güç girişinde, buharlaştırıcı duvar sıcaklığındaki ve ısı direncindeki düşüşleri yaklaşık 5.6 C (veya %8.7) ve 0.057 C / W (veya %25.7) elde edilmiştir. Yani bz sıvı olan suya alümina nanopartiküllerinin eklenmesiyle OHP'in ısı performansı artmıştır.



Şekil 3.196. SiO_2 / su nanoakışkanları ile yüklü farklı kütle konsantrasyonlarında OHP'nin ısı performansı: (a) ortalama buharlaştırıcı duvar sıcaklığı; (b) toplam ısı direnç (Qu and Wu 2011)

Farklı nanopartikül biriktirme davranışları nedeniyle buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdaki yüzey koşullarındaki değişim, OHP'lerin farklı ısı performans sergilemelerini açıklar. Alümina nanoakışkan ile yüklü OHP için, nanopartiküllerin birikmesi (çoğunlukla buharlaştırıcıda meydana gelir), yüzey çekirdeklenme bölgelerini arttırmış ve böylece OHP'nin ısı transferini arttırmıştır. Silika nanoakışkanları ile yüklü OHP için, nanopartiküllerin birikmesi (hem buharlaştırıcıda hem de yoğunlaştırıcıda meydana gelir), yüzey çekirdeklenme alanlarını ve temas açısını azaltır ve böylece OHP'nin ısı transferi bozulur.



Şekil 3.197. OHP'nin ısı direnç modeli (Qu and Wu 2011)

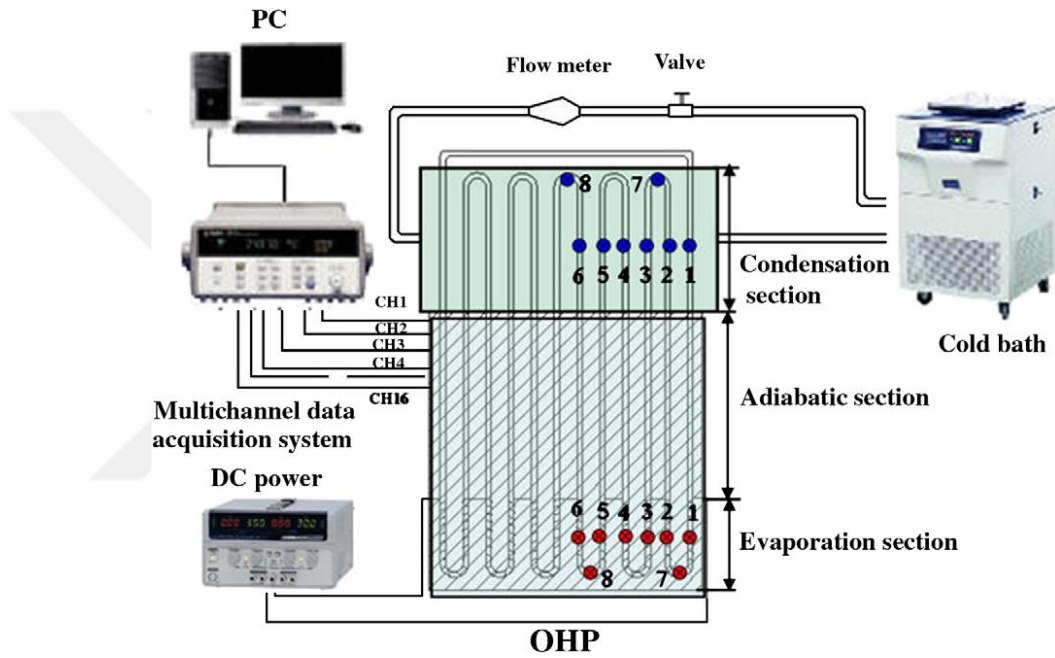
Qu *et al.* (2010), salınımlı ısı borusu içerisinde Al_2O_3 / su nanoakışkanının uygulanmasını incelemiştir. Deneyler sırasında, nano-akışkan dolum yüzdesi %, Al_2O_3

nanopartiküllerinin kütle fraksiyonları, güç girişleri, ısı borusunun maksimum ısı performansı elde etmek için değiştirilmiştir.

Kaynak malzeme olarak ortalama çapı 56 nm olan Al_2O_3 nanopartikülleri kullanılmış ve saf su, baz sıvı olarak seçilmiştir. Su bazlı alümina nanoakışkanları iki aşamalı bir yöntemle sentezlenmiştir. Nanopartiküllerin birikmesini önlemek için elektrostatik stabilizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, baz suyun pH değerleri, az miktarda hidroklorik asit (HCl) çözeltisi ilave edilerek düzenlenmiş ve daha sonra nanopartiküller eklenmiştir. Homojen süspansiyon elde etmek için dispersiyon çözeltisi, bir ultrasonik banyoda 4 saat boyunca sürekli olarak ultrasonik olarak titreştirilmiştir. Alümina nanopartikülleri, pH değeri 4.9 olduğunda su içinde en az 3 gün boyunca kararlı bir şekilde süspanse edilebildiğinden, bu pH değeri hazırlama işleminde seçilmiştir. PH değerini kontrol ederek ve ultrasonik işlem altında, bu deney için %0,1, %0,3, %0,6, %0,9 ve %1,2'de beş farklı kütle fraksiyonuna sahip alümina nanoakışkanları hazırlanmıştır.

Şekil 3.198, çok kanallı bir veri toplama sistemi, bir DC güç kaynağı ünitesi (GPR-3060D, GW) ve bir su soğuk banyosundan (DC-0506, BILANG) oluşan deney aparatını gösterir. OHP, 2 mm iç çapa ve 3 mm dış çapa sahip paslanmaz çelik kılcal boru bükülerek üretilmiştir. Toplam uzunluğu 3 m olan 6 dönüşü vardır. Sırasıyla 50, 105 ve 70 mm uzunluğunda buharlaşma, adyabatik ve yoğunlaşma bölümlerinden oluşan OHP dikey olarak yönlendirilmiştir. Buharlaştırıcı bölümü (buharlaştırıcı) elektrikle ısıtılmış ve yoğunlaşma bölümü (kondansatör), soğuk banyodan pompalanan su ile soğutulmuştur. Hem buharlaştırıcı hem de adyabatik bölümler termal olarak yalıtılmış ve bu iki bölümden ısı kaybı ihmal edilebilir derecede küçük hale getirilmiştir. OHP'nin dış yüzeyine 0,1 mm çapında on altı termokupl ($\pm 0.1^\circ C$ hassasiyette OMEGA T tipi) monte edilmiştir. Şekil 3.198'da gösterildiği gibi, sekiz termokupl buharlaştırıcıya sekiz termokupl da yoğunlaştırıcıya yerleştirilmiştir. Deneysel verileri kaydetmek için Agilent 34970A veri toplama sistemi kullanılmıştır.

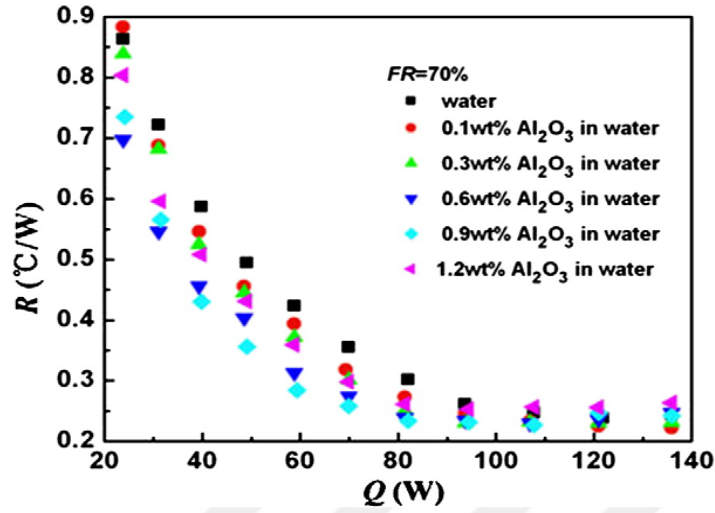
Deneyden önce, OHP önce bir vakum pompası ile boşaltılmış ve daha sonra nanoakışkanlarla doldurulmuştur. Doldurma oranları %50, %60 ve %70 arasında değişmiştir. Her doldurma oranı için, sabit sıcaklık ve akış hızına sahip soğutma suyu sürekli olarak yoğunlaştırıcıya sağlanmış ve buharlaştırıcıya güç girişi kademeli olarak arttırılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdaki sıcaklık verileri, sistem kararlı duruma ulaştıktan sonra kaydedilmiştir.



Şekil 3.198. Salinimlı ısı borusu deney düzeneği (Qu *et al.* 2010)

Bu deneyden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir

- OHP'nin ısı transfer performansı, çalışma sıvısına alümina nanopartiküllerinin ilave edilmesinden sonra artmıştır. Saf su ile karşılaştırıldığında, ısıl direncin maksimum azalması, güç girişi 58,8 W, doluluk oranı %70 ve kütle fraksiyonu %0,9 olduğunda $0,14^{\circ}\text{C} / \text{W}$ (veya %32,5) olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.199)



Şekil 3.199. Su ve alümina nanoakışkanlarla doldurulmuş OHP için %70 doluluk oranlarında termal direnç karşılaştırması (Qu *et al.* 2010)

Alümina nanopartiküllerinin ilave edilmesinin, çalışma akışkanının ısı iletkenliğini ve dolayısıyla ısı transfer kapasitesini artıracığı bilinmektedir. Ancak, nanopartiküllerin bu küçük kütle fraksiyonlarının (ağırlıkça %0,1 ila ağırlıkça %1,2 arasında) eklenmesi ile artış çok küçüktür ve ısı iletkeninin önemli ölçüde azalmasını nedenini açıklamaz.

Bu nedenle, diğer faktörlerden dolayı ısı iletkeninin azaltılmasının nedenlerini analiz etmek gerekir. Bu amaçla, OHP'nin buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasındaki toplam ısı iletkeni aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R = 2R_{\text{wall}} + R_{\text{l-v}} + R_{\text{evp}} + R_{\text{con}} \quad (3.50)$$

R_{duvar} =boru duvarındaki iletken ısı iletken

$R_{\text{l-v}}$ = ısı borusu uzunluğu boyunca iki fazlı akıştaki termal direnç

R_{evp} =kaynama nedeniyle buharlaştırıcıdaki ısı iletken

R_{con} =yoğunlaştırıcıdaki ısı iletken

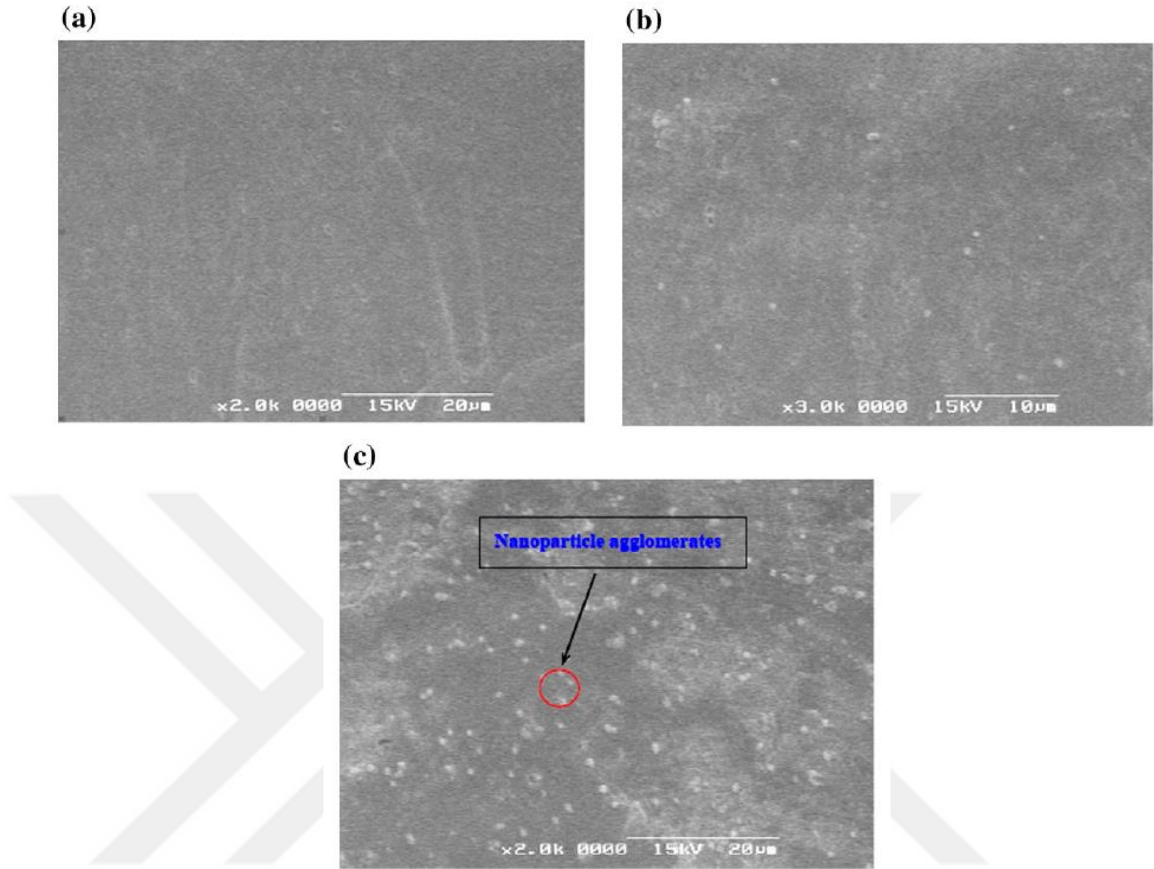
Genel olarak, metalik OHP'nin R_{duvar} iletken direnci küçüktür ve çalışma sıvısından neredeyse bağımsızdır. Böylece, ısı borusu boyunca $R_{\text{l-v}}$, R_{evp} , R_{con} OHP'nin ısı iletken

performansını etkileyen en önemli faktörlerdir. Aşağıda R_{l-v} , R_{evp} ve R_{con} üzerindeki nanopartiküllerin analizi anlatılmıştır:

Nanoakışkanın ısı iletkenliğinin artması nedeniyle saf suya kıyasla OHP'nin ısı performansını da artıracak muhtemeldir. Ek olarak, OHP'de çalışan sıvının salınım ve dolaşım hareketi nanopartiküllerin askıda kalmasını sağlar, bu da nanopartikül göçünü kolaylaştırır ve sedimentasyonu önler. Böylece, OHP'deki nanopartiküller sadece sıvı ısı iletkenliğini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda partikül göçüne bağlı konvektif ısı transferini de artırır. Sonuç olarak, iki fazlı akışın, R_{l-v} azalacaktır. Bununla birlikte, nanopartiküllerin varlığına bağlı olarak R_{l-v} 'nin azalması, partiküllerin nispeten küçük kütle fraksiyonları nedeniyle küçüktür. Bu nedenle, bu deneydeki toplam ısı direncin belirgin bir şekilde azalmasının ana nedeni değildir.

Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıda kaynama ve buharlaşma nedeniyle oluşan ısı dirençler yüzey şartlarından büyük ölçüde etkilenirler. OHP'de , nanopartiküllerin birikmesi hem buharlaştırıcı hem de yoğunlaştırıcıda meydana gelebilir. Nanopartikül birikimi ve yüzey durumu üzerindeki yapışma etkilerini analiz etmek için, deneylerden sonra OHP'nin kesilmesiyle buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcıdan temsili örnekler elde edilmiştir. Ayrıca, karşılaştırma için saf suda kaynatılmış temiz bir numune de hazırlanmıştır. Bu üç örneğin yüzey koşulları daha sonra bir tarama elektron mikroskobu (S 2150, Hitachi Co.) ile gözlenmiştir.

Şekil 3.200, bu üç örneğin yüzey koşullarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir. Her ne kadar nanopartikül yerleşimleri hem buharlaştırıcıda hem de yoğunlaştırıcıda meydana gelmiş olsa da, yoğunlaştırıcıdaki lokalize topaklanmaların miktarı buharlaştırıcıdakine kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir. Şekil 3.200 (b), yoğunlaştırıcıdaki yüzey koşulunun, Şekil 3.200 (a) 'da olduğu gibi temiz bir yüzeye yakın olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, yoğunlaşma nedeniyle oluşan ısı direnç, R_{con} , nanoakışkan ve saf su için neredeyse aynıdır. Bu nedenle, nano-akışkanlar tarafından ısı direncin değiştirilmesi esas olarak buharlaştırıcıda meydana gelmiştir.



Şekil 3.200. (a) saf suda kaynatılmış temiz bir altkatman, (b) yoğunlaştırıcıda nanopartiküllere maruz kalan bir altkatman ve (c) buharlaştırıcıda nanopartikülle biriken bir alt katman (Qu *et al.* 2010)

Bir OHP'nin buharlaştırıcısında kabarcıklı kaynamanın geçerli olduğu göz önüne alındığında, buharlaştırıcıdaki kabarcıklı kaynamaya bağlı ısı direnç şu şekilde yazılabilir:

$$R_{evp} = \frac{1}{2N_a D_b^2 \sqrt{f} \sqrt{\pi k_l \rho_l c_l}} \quad (3.51)$$

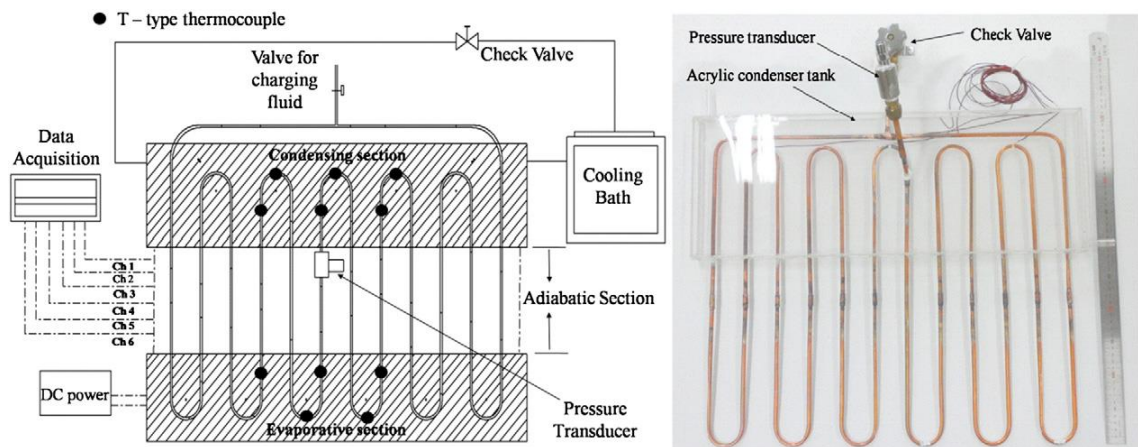
N_a , D_b , f , k_l , ρ_l ve c_l sırasıyla aktif çekirdeklenme bölgesi yoğunluğu, kabarcık bırakma çapı, kabarcık bırakma frekansı, sıvı termal iletkenlik, yoğunluk ve özgül ısıdır. Çalışma sıvısına nanopartiküllerin eklenmesi ile sıvı termal iletkenlik k_l ve yoğunluk ρ_l artmış ve spesifik ısı c_l azalmıştır. Düşük nanopartikül kütle fraksiyonlarında (bu makalede ağırlıkça %-1.2), Denklemden ürünün değişimi (k_l ρ_l c_l) önemsiz derecede küçüktü (

%1.0), bu yüzden Re_{vp} üzerindeki etkileri ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, nanopartiküllerin N_a , D_b ve f değerlerindeki değişiklikler üzerindeki etkileri Re_{vp} 'teki değişim için daha önemlidir.

- %0.9; %50, %60 ve %70 doldurma oranları için OHP'nin maksimum ısı transferi artışını sağlamak için alümina nanoakışkanlarının optimal kütle oranıdır.

Tanshen *et al.* (2013), çok duvarlı karbon nanotüplü (MWCNT) su bazlı nanoakışkan kullanarak OHP'deki ısı transferi ve basınç dağılımını araştırmışlardır.

Çok döngülü OHP, plaka tipi bir ısıtıcı ile çalışan 100 mm buharlaştırma bölümü, sabit bir soğutma banyosuna bağlı yoğunlaşma bölümü ve buharlaştırıcı ile yoğunlaştırıcı arasındaki orta bölümün termal olarak yalıtılmış olarak Şekil 3.201'de gösterilmiştir. Isı borusu, 3 mm iç çapa ve toplam 6 m uzunluğa sahip bakırdan yapılmıştır. Buharlaştırıcı bölüm, çalışma giriş gücünün 50 W ila 400 W aralığında tutulduğu 100 mm dikey bir uzunluğu kapsar. Benzer şekilde, yoğunlaştırıcıyı 18°C'nin altında tutmak için izotermal soğutma ünitesinin kullanıldığı sızdırmaz yoğunlaşma tankına 140 mm üst döngü bölümü yerleştirilmiştir. 200 mm adyabatik kesitli OHP'nin ortası, mükemmel ısı yalıtımı için 2 cm kalınlığında cam yünü ile kaplanmıştır. T-tipi termokupl, ısı borusunun duvar sıcaklığını ölçmek için hem yoğunlaştırma hem de buharlaştırma bölümlerinde dış duvara lehimlenmiştir.



Şekil 3.201. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Tanshen *et al.* 2013)

Bu çalışmada ~ 20 nm ϕ , ~ 5 μ m uzunluk, %95'ten fazla saflık, %3'ten az safsızlık ve 40-300 m² / g'lık spesifik bir yüzey alanına sahip kimyasal buhar birikimi (CVD) ile sentezlenen MWCNT kullanılmıştır. Daha iyi dağılım için MWCNT'ler kimyasal işlemle polarize edilmiştir. Basit bir yöntem olan nitrik asit (HNO₃) ve sülfürik asit (H₂SO₄) kullanımı MWCNT'leri saflaştırmak için uygulanmıştır.

Farklı konsantrasyonlarda değişen MWCNT'lerin sulu çözeltisi kullanılarak salınımlı ısı borusu içindeki ısı direnci ve basınç dalgalanmalarını ölçmek için deneysel bir araştırma yapılmıştır. Salınımlı ısı borusunda, ısı transferi, tekrarlanan basınç dalgalanmaları nedeniyle meydana gelir ve basınç dalgalanmasının daha fazla tekrarlanması, daha yüksek ısı transferi anlamına gelmektedir.

Ham MWCNT'ler üzerindeki asit işlemi, MWCNT'lerin dağılımlırlığını arttıran amorfun serbest kalmasını sağlar.

Fonksiyonelleştirilmiş MWCNT'lerin dahil edilmesi, buharlaştırıcı bölümden yoğunlaştırıcı bölümüne ısı taşınımı artırır. En düşük ısı direnci, ağırlıkça %0,2 MWCNT esaslı sulu nanoakışkanlar ile elde edilmiştir.

OHP içinde daha yüksek basınç ve ortalama basınç sağlayan ağırlıkça %0,2 MWCNT esaslı sulu nanoakışkanlar elde edilmiştir. Termal özellikler basınç dağılımı ile önemli ölçüde ilişkilidir ve zamanla oluşan basınç dalgalanmalarının sayısına bağlıdır.

Goshayeshi *et al.* 2015, bakırdan ayrılmış ısı borusunda Fe₂O₃/Parafin nanoakışkan kullanarak manyetik alan altında deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Çalışma sıvısını bakır OHP'ye yüklemeyen önce, cihaz üç yollu bir valfe bağlı vakum pompası kullanılarak 15 dakika boyunca 0.1 Pa emme basıncı altına yerleştirilerek boşaltılmıştır. Bu ilk tahliye sonrası, vakum pompasını izole etmek ve çalışma akışkanının OHP'ye yüklenmesine izin vermek için üç yollu vana kullanılmıştır (Şekil 3.202).

Buharlaştırıcı bölümündeki bir dizi farklı ısı yükünü araştırmak için, elektrikli ısıtıcı elektrik izleme sistemi yoluyla elektrik kaynağına bağlanmıştır. Isı girdisi, standart bir volt ve akım metreden oluşan elektrik izleme sisteminden elde edilen ölçümler kullanılarak hesaplanmıştır. Gerilim ve akımdaki belirsizlikler sırasıyla ± 0.4 V ve ± 0.015 A dir.

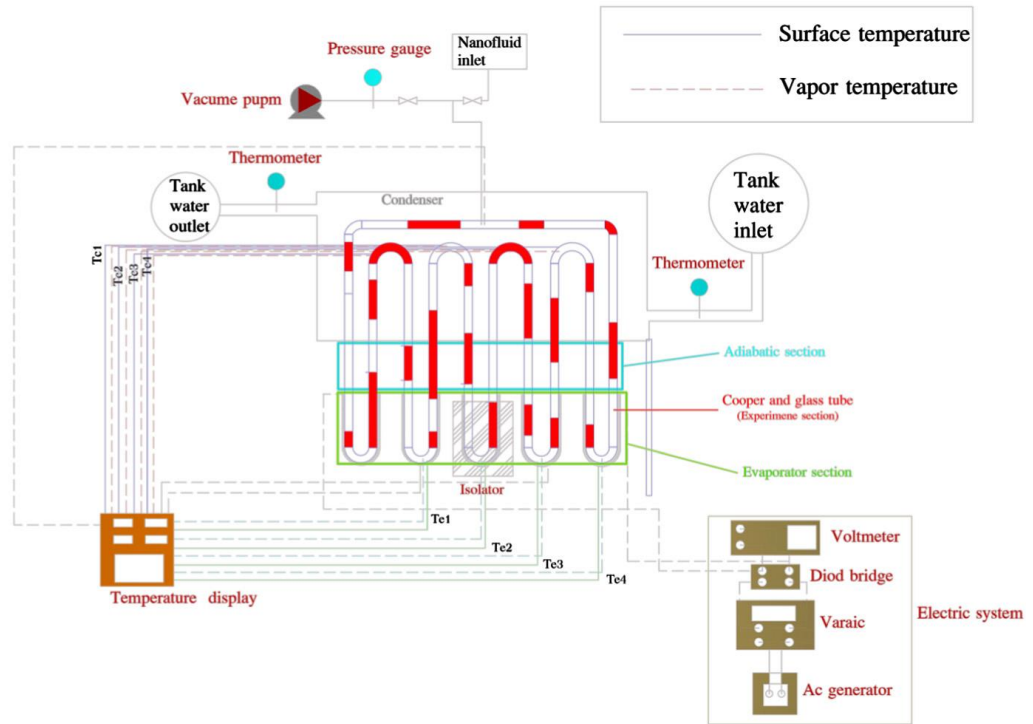
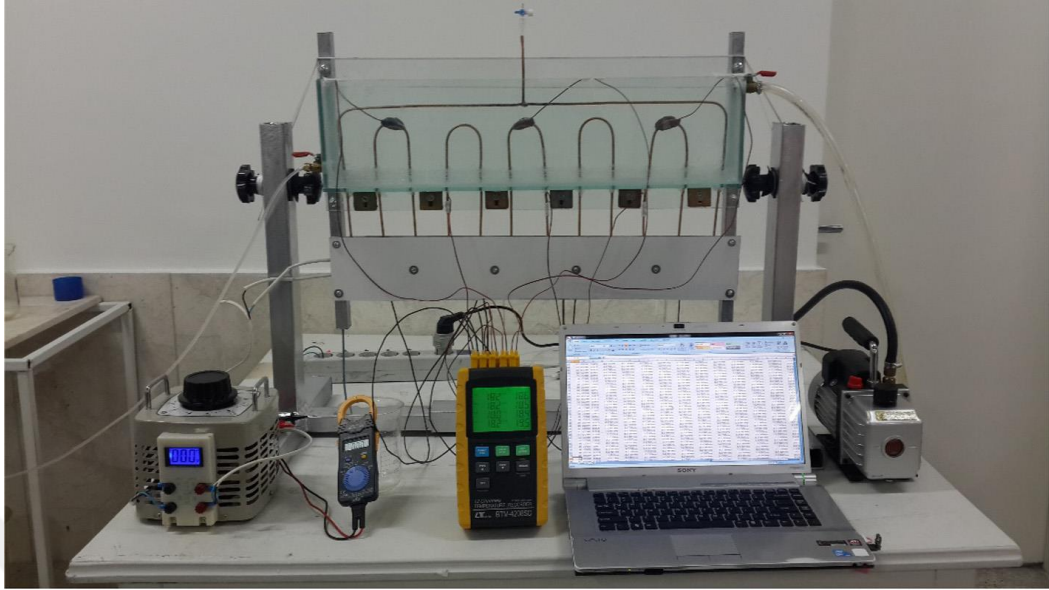
Sistemin çeşitli bölümlerindeki sıcaklıklar (buharlaştırıcı, adyabatik ve yoğunlaştırıcı), taşınabilir bir veri kaydediciye ve bir görüntüleme sistemine bağlı bir dizi K tipi termokupl kullanılarak izlenmiştir. Sıcaklık izleme düzenlemesi ile belirlenen sıcaklık ölçümü belirsizliği ± 1 K dir. OHP için tüm geometrik parametreler Çizelge 3.11'de sunulmuştur.

Deneyleri takiben, ısı borusu on gün boyunca aynı durumda tutulmuştur. Daha sonra benzer test prosedürü uygulanmış ve testler arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Test sonuçları, nanoakışkanın düzgün bir şekilde yayılmasını sağlamak için başarıyla tekrarlanabilir.

Mevcut çalışmada, baz sıvı olarak gazyağı, yüzey aktifleştirici madde olarak Oleik asit ve %2 hacimli Fe_2O_3 'ün nanopartikülleri kullanılmıştır. Fe_2O_3 nanopartiküllerinin özellikleri Çizelge 3.12'de verilmiştir. Fe_2O_3 nanopartikülleri baz sıvıya ilave edilmiş ve sıvıyı sürekli karıştırmak için bir karıştırıcı kullanılmıştır. Nanoakışkan ayrıca ultrasonik osilatör kullanılarak 5 saat sonike edilmiştir. Şekil 3.203, incelenen süspansiyonun sedimantasyon seviyesinin net bir resmini vermektedir. Şaşırtıcı olmayan bir şekilde Fe_2O_3 nanopartikülleri organik çözücüler içinde kolayca dağılabilir. Nanoakışkana uygulanan manyetik alan 0.374 T'ye eşittir ve 2 A elektrik akımı ile oluşturulmuştur.

Çizelge 3.11. Isı borusu özellikleri (Goshayeshi *et al.* 2015)

OHP Saklama Kabı	Bakır&cam
OHP Uzunluğu	380 mm
Yoğunlaştırıcı uzunluğu	100 mm
Adyabatik Uzunluk	100 mm
Buharlaştırıcı Uzunluğu	100 mm
Dış çap	3 mm
Duvar kalınlığı	1.25 mm
İç Çap	1.75 mm
Sıvı doldurma oranı	%50
Isı borusunun toplam uzunluğu	4.4 m



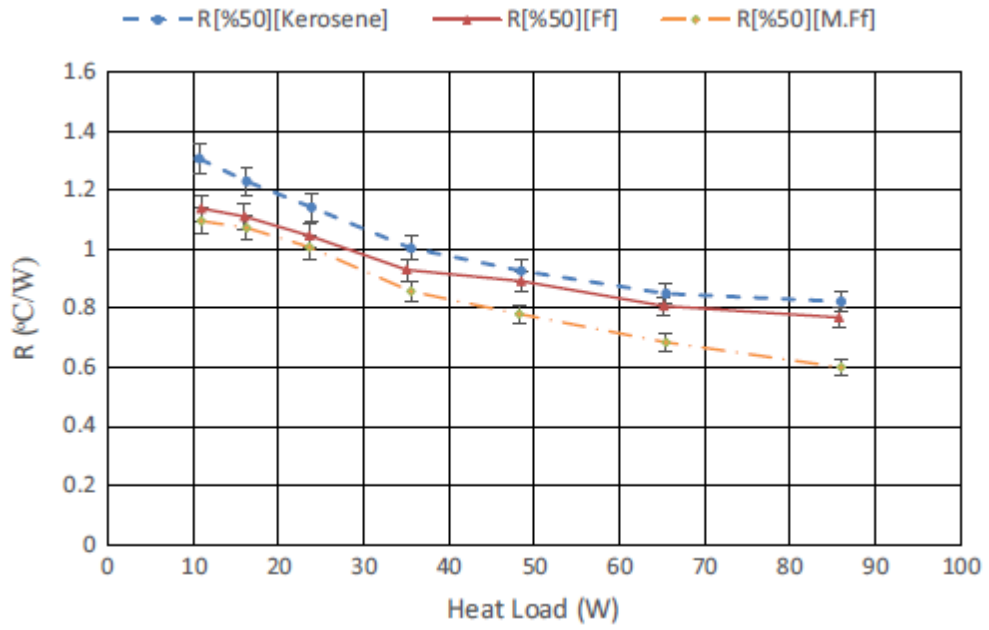
Şekil 3.202. Deney düzeneği (Goshayeshi *et al.* 2015)

Çizelge 3.12. Demiroksit nanopartikül özellikleri (Goshayeshi *et al.* 2015)

Saflık	%99.5
Partikül büyüklüğü	20 nm
SSA	40–80 m ² /g
Renk	Kırmızı kahve
Şekil	Küresel



Şekil 3.203. Baz sıvıdaki ferro-akışkan nanopartiküllerin (I) 1 saat sonra (II) 1 gün sonra (III) 10 gün sonra tortu fotoğraf sonuçları (Goshayeshi *et al.* 2015)

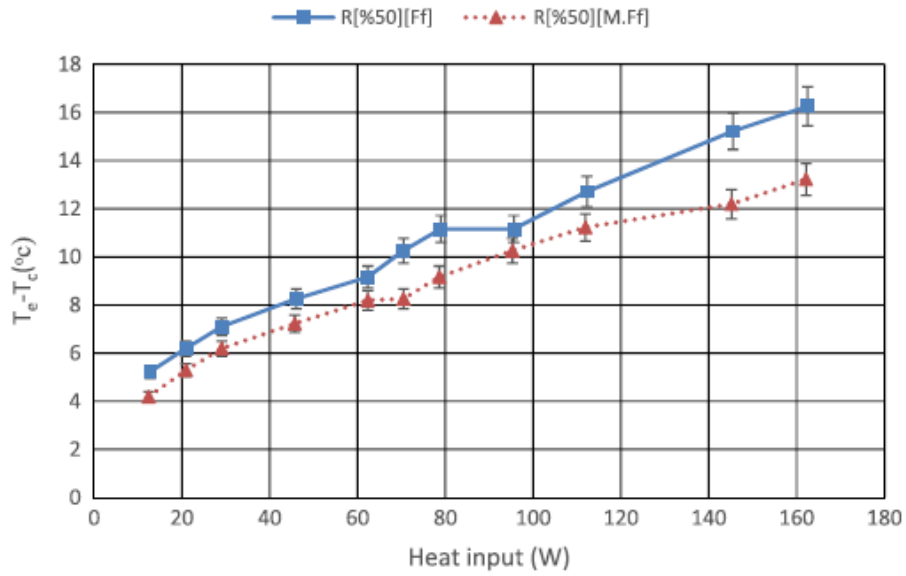


Şekil 3.204. %50 doluluk oranında baz sıvı (kerosen) ve manyetik alanlı-manyetik alan olamadan nanoakışkanlar arasındaki ısı dirençlerinin karşılaştırılması (Goshayeshi *et al.* 2015)

Şekil 3.204'te, Fe_2O_3 nanoakışkan yüklü ısı borusunun toplam ısı direncinin, parafin yüklü OHP'ye kıyasla azaldığı, yani Fe_2O_3 nanopartiküllerinin ısı borusunun özellikle manyetik alana maruz kaldığında ısı transferini arttırdığı görülmektedir.

Isı borusunun yüzey sıcaklığı, buharlaştırıcı bölümündeki buhar sıcaklığından daha yüksektir, çünkü buharlaştırıcı elektrikli ısıtıcı ile doğrudan temas halindedir. Sonuç

olarak, ısı buharlaştırıcıdan buhar çekirdeğinin merkez alanına aktarılır. Ancak yoğunlaştırıcı için işlem tersine çevrilir ve yüzey sıcaklığı buhar sıcaklığından daha düşüktür. Buharlaştırıcı bölümündeki yüzey ve buhar çekirdeği arasındaki sıcaklık farkı, bakır ısı borusunda (Fe_2O_3 'ün eklenmesinden sonra) manyetik alan olmadan ve manyetik alanla birlikte sırasıyla 3.1°C ve 2°C olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.205. %2'si için Fe_2O_3 nanoakışkan yüklü ısı borusu için buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri arasındaki buhar sıcaklığı farkı (Goshayeshi *et al.* 2015)

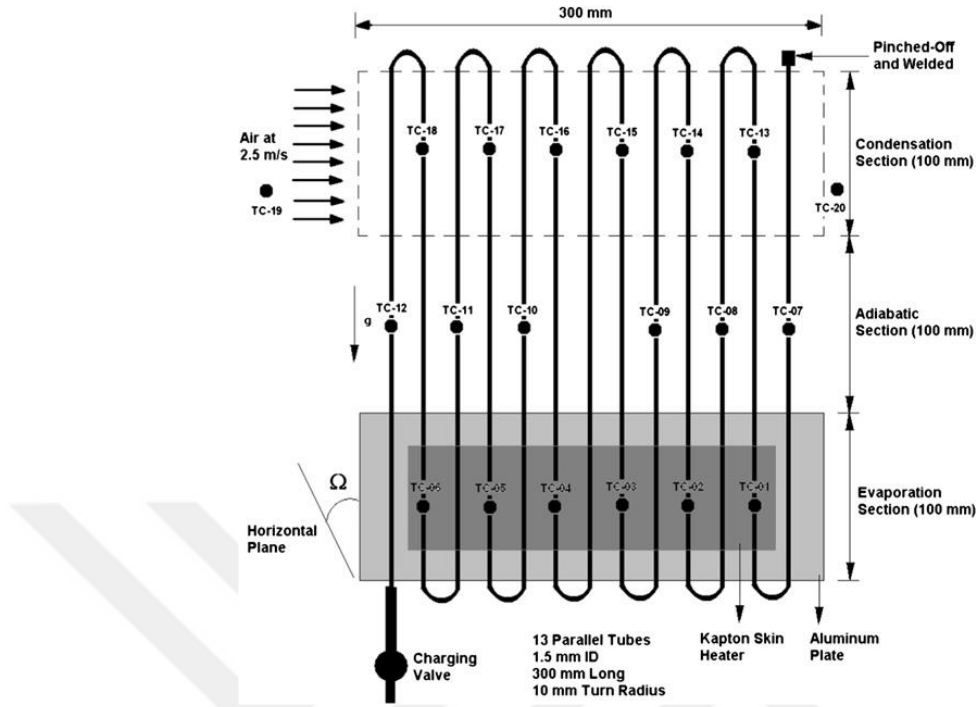
Şekil 3.205, farklı ısı akışı girişlerinde buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri arasındaki buhar sıcaklığı farkını göstermektedir. Sıcaklık farkı ile giriş ısısı arasında pozitif bir doğrusal ilişki vardır. Manyetik alan altında Fe_2O_3 nanopartiküllerinin eklenmesi, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı arasındaki sıcaklık farkını azaltmıştır. Benzer şekilde, buharlaştırıcının ısı transfer katsayısı, ısı girişindeki artışla artmıştır.

Ayrıca bulgular, giriş ısısındaki artışın, buharlaştırıcı ile aynı nedenden kaynaklanabilecek olan yoğunlaştırıcının ısı transfer katsayısını da arttırdığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, her iki durumda da manyetik alan altındaki ferro nanoakışkanın ısı transfer katsayısı, manyetik alanın uygulanmadığı koşuldan daha yüksektir.

Riehl *et al.* (2012), bakır nanopartiküllerin sırasıyla düşük ısı yüklerinde ve daha yüksek ısı yüklerinde buharlaşmayı ve kabarcıklı kaynamayı geliştirdiği sonucuna varmışlardır.

Bu araştırma için, 6 g iyonu giderilmiş su ile 29 nm çapında bakır nanopartiküller %5 (safılık %99.8) konsantrasyon ile karıştırılarak bir çalışma sıvısı oluşturulmuştur. Deiyonize suyun ve bakır nanoakışkanın PHP a nin şarj edilmesinden önce gazı giderilmiştir.

Titreşimli ısı borusu, sonuçları karşılaştırmak amacıyla deiyonize su ve %5 lik bakır nanopartiküllü nanoakışkan ile test edilmiştir. Deney düzeneği, 1.5 mm iç çap ve toplam uzunluğu 4 m olan bakır borudan, Şekil 3.206'de gösterildiği gibi toplam 13 paralel kanaldan yapılmıştır. Yirmi tip T termokupl (100°C'de 0.3 C hassasiyet) ısı borusu boyunca sıcaklıkları izlemek için kullanılmış ve buharlaşma bölümüne bir ısıtıcı eklenmiştir. Yoğuşma, Şekil 3.206'de gösterildiği gibi 2,5 m / s'lik hızda bir fan tarafından üflenene basınçlı havanın yükseltilmesi ile desteklenmiştir. Bu bölüm ortam havasına açıkken, buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler termal olarak yalıtılmıştır. PHP'yi nanoakışkan ile doldurmadan önce, cihaz boşaltılmış ve en az 24 saat boyunca 105 mbar'lık bir vakum seviyesi sunulmuştur. Böyle bir prosedür, çalışması sırasında ısı borusunda yoğunlaşmayan gazların etkisini ortadan kaldırmak için yapılmıştır. PHP, %50 su ve buna karşılık gelen nanoakışkan kullanılarak doldurulmuş ve üç yönde test edilmiştir: yatay, yoğunlaştırıcının üstünde buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcının altında buharlaştırıcı olacak şekilde.



Şekil 3.206. Açık döngülü titreşimli ısı borusu deney düzeneği (Riehl and Santos 2012)

PHP ön koşullandırma prosedürleri olmadan çalıştırılmıştır. Buharlaştırma bölümüne yerleştirilen ısıtıcı açılmadan önce, yoğunlaştırıcı bölümündeki fan açılmış ve testin sonuna kadar bu şekilde tutulmuştur. Test düzeneği 18 ila 20°C arasında tutularak kontrollü bir sıcaklık ortamına yerleştirilmiştir.

Saf su ile çalışan titreşimli ısı borsunun, çalışma akışkanını hareket ettirmek için için yeterli küçük kabarcık yer değiştirmesi nedeniyle tamamen işlevsel olmasına rağmen, bu cihazın özellikleri olan titreşimleri sunmadığını gözlenmiştir. Bununla birlikte, katı bakır nanoparçacıkların eklenmesiyle, titreşimler buharlaşma bölümünde 5°C, adyabatik bölümde 22°C ve yoğunlaşma bölümünde 23°C genliklerle 40 W'da görünmeye başlayıp 50 W'da daha belirgin hale gelmiştir ve esas olarak 50 W ile karşılaştırıldığında 40 W'deki düşük sıvı hızlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca nano-sıvı kullanılırken ortalama buharlaşma bölümü sıcaklığının 90°C civarında, saf su kullanıldığında aynı çalışma koşulu için 50 W için 118 C civarında stabilize olduğu da gözlemlenmiştir Genel olarak, nanoakışkan kullanılırken buharlaşma sıcaklıkları, deiyonize su kullanırken olandan daha düşüktür. Bu doğrudan karşılaştırma, nanoakışkan kullanıldığından ana amaç

buharlaşma bölümü sıcaklıklarını düşürmekse, ısıl performansta bir kazanç sağlandığını göstermektedir. Aynı davranış PHP buharlaştırıcı yoğunlaştırıcının üstünde ve buharlaştırıcı yoğunlaştırıcının altında çalıştırırken de gözlemlenebilir.

Tüm deneysel testlerden, PHP'nin saf su ile ilgili testinden daha düşük ortalama buharlaşma sıcaklıkları sunduğı gibi aynı davranış gözlemlenebilir. Cihazın termal kontrolündeki bu gelişmeyle ilgili birçok faktör olabilir. Birincisi, suya eklenen nanopartiküllerin çekirdeklenme yerleri gibi davranması, PHP 'lerin bir özelliğı olan kabarcık oluşumu ve yer değıştirmeyi yoğunlaştırmasıdır. Sümüklü böcek / tıkaç oluşumu daha dinamik olduğı için daha fazla sıvının pompalandığına ve sonuç olarak saf su ile çalışırken buharlaşma bölümü sıcaklıklarının gözlenen seviyelerin altında kalmasına katkıda bulunulduğuna inanılmıştır.

Nanoakışkan lehine hareket eden bir diğerk önemli faktör kabarcık kritik çapıdır. 20°C'lik bir doyma sıcaklığı için, su için kritik çap 5.45×10^{-3} m'dir ve su-bakır nanoakışkan (kütle olarak %5 ilave edilmesi) için 5.33×10^{-3} m'dir, bu da doğrudan buhar kabarcığı oluşumunu arttırmakta ve dolayısıyla titreşimler nanoakışkan ile daha yoğun hale gelmektedir.

Aşağıdaki ilişki ile buharlaşma ve yoğunlaşma seansları arasındaki termal iletkenliklerin doğrulanmasıyla:

$$TC = Q / [T_{evap} - T_{cond}], \quad (3.52)$$

Nanoakışkan kullanıldığında daha düşük sıcaklıklar gözlenmesine rağmen, nanoakışkan ile çalışan PHP için ısıl iletkenliklerin, saf su ile çalışan ısı borusu için olanlardan daha yüksek olduğı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, katı bakır nanopartiküller sıvıda karıştırıldığında daha fazla çekirdeklenme alanı sunulmuş olması ve dolayısıyla kabarcık oluşumunun dinamiğinin, özellikle daha yüksek ısı yüklerinde daha yoğun olmasıdır. PHP nanoakışkan ile çalıştığında daha yoğun titreşimler doğrulandığından, bu etki deneysel verilerden gözlemlenebilir. Buhar, sıvıya kıyasla daha düşük termal iletkenlik

sunduğundan ve nanoakışkan kullanıldığında daha fazla buhar bulunduğundan, PHP'nin su-bakır nanoakışkan ile çalıştırılması sırasında daha yüksek termal iletkenlikler doğrulanmıştır. Bu özel durumda, daha yoğun titreşimler ve düşük sıcaklıklar endişe verici olduğu sürece PHP'nin daha iyi performans göstermesi için daha yüksek termal iletkenliklerin doğrulanması gerekir. Sunulan bakır nanoakışkanın termal iletkenliği saf sudan yaklaşık %15 daha büyük olduğu için nanoakışkan ile çalışan PHP için termal iletkenlikte saf su ile karşılaştırıldığında bir artış beklenmektedir ve gözlemlenen deneysel veriler bu durumu doğrulamıştır.

Gunnasegar *et al.* (2013), 20 W ila 100 W arasındaki ısı giriş aralığı için nanoakışkan kullanarak döngülü ısı borusunun ısı performansını araştırmışlardır.

İncenen döngülü ısı borusu için deney düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 3.207'de gösterilmektedir. Bu deney düzeneğinin ana işlevi, çalışma akışkanı olarak $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkanı kullanarak LHP'nin termal performansını belirlemek ve bunu geleneksel saf su kullanarak karşılaştırmaktır. LHP, çalışma ortamı olarak tüpün içinde saf su ve $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkan kullanan kapalı yüksek basınçlı bir boru sistemidir. LHP pompalı bir su deposu, iki adet fan ile monte edilen yoğunlaştırıcı, düz pürüzsüz bakır tabanlı buharlaştırıcı, iki taşıma hattı (buhar ve sıvı hatları), termokupl ve güç kaynağının takılması için bakır boru bölümünden oluşmaktadır. LHP 'nin ayrıntılı boyutları Çizelge 3.13'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.13. Döngülü ısı borusu özellikleri (Gunnasegaran *et al.* 2013)

Boyut	Malzeme
Buharlaştırıcı Ölçü(mm)	U50 × G50 × Y4
Depo Hacim (litre) 0.75 Ölçü (mm)L149 × W100 × H85 Malzeme	0.75 U149xG100xY85 Alüminyum
Buhar hattı Dış Çap (mm) İç Çap (mm) Uzunluk (mm)	15 13.5 830
Sıvı Hattı Dış Çap (mm) İç Çap (mm) Uzunluk (mm)	15 13.5 500
Yoğunlaştırıcı Ölçü (mm) L321 × W100 × H1 Malzeme	U321xG100xY1 Alüminyum
Pompa Performance (litre/saat) Basma Yüksekliği (mm)	750 1800

Şekil 3.207'de gösterilen LHP, dengeleme haznesi ile birleştirilen, toplam boyutu 50 mm x 50 mm x 4 mm olan düz bir buharlaştırıcıya sahiptir. Sıvı deposu olarak 0,75 l cam kaplı drenaj vanası ile donatılmış bir su deposu kullanılır ve düşük gürültülü ve düşük titreşimli olarak inşa edilmiş bir pompaya bağlanır. DIB içindeki olayları gözlemlemek için hem buhar hattı hem de sıvı hattı şeffaf plastik tüpten yapılmıştır. DIB'nin diğer kısmı bakırdan yapılmıştır. Buhar ve sıvı hatlarının iç ve dış çapları sırasıyla 13.5 mm ve 15 mm'dir. Yoğunlaştırıcı bölümü 50 alüminyum dikdörtgen kanattan yapılmıştır ve iki adet uzun vidalı fan takılarak soğutulmuştur. Yoğunlaştırıcı bölümündeki kararlı durum soğutma koşullarını korumak için, soğutma sıvısının sıcaklığı ve akış hızı sabit bir değere ayarlanmıştır. Vakum, boruyu evaporatör bölümünde ısıtarak ısı borusunda tutulur ve safsızlıklar, basınç tahliye vanası açılarak giderilmiştir. Isı kaybını en aza indirmek için, tüm LHP cam yünü kullanılarak yalıtılmıştır. Isı kaynağını simüle etmek için içinde ısı çubukları olan bir bakır blok kullanılmıştır ve buharlaştırıcı ile ısı kaynağı arasındaki

temas alanı 50 mm × 50 mm'dir. Isıtma gücü, transformatörün çıkış voltajını elektronik ısıtma çubuklarına ayarlayarak değiştirilebilir.

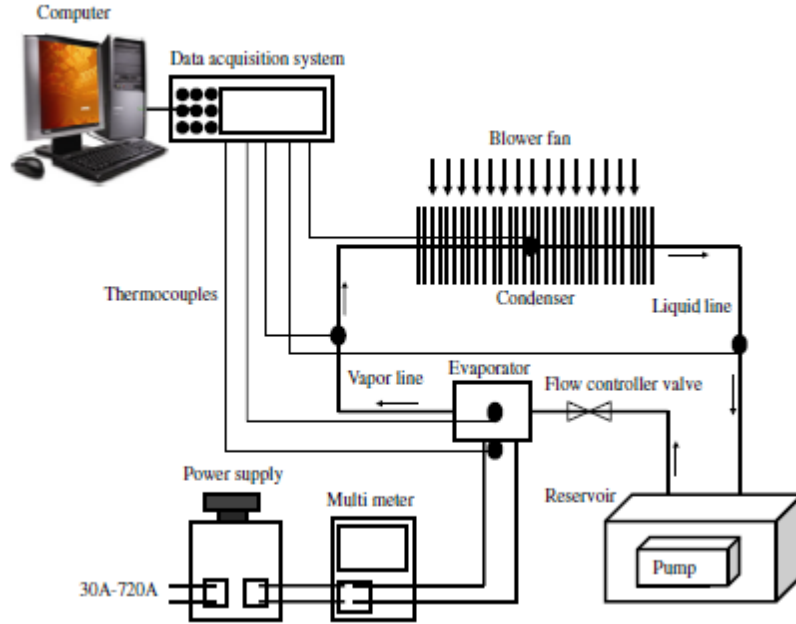
Bu deneyde, K-tipi termokupllar döngünün farklı yerlerine boru / duvar üzerine monte edilmiştir. Termokupllar tarafından ölçülen sıcaklıklar, bir veri edinimi (Agilent 34970A) ile toplanıp, verileri toplamak için bir PC'ye bağlanmıştır. Saf su ve SiO₂-H₂O nanoakışkan kullanan her LHP için, deney 20 W ısıtma gücü ile başlayıp, 20 W'lık artışlarla 100 W'a kadar yükselmiştir. Hava akış hızı 4 m / s ve akış kontrol valfi ayarlanarak soğutucu akış hızı saatte 750 l ye sabitlemiştir. Geçici sıcaklık dağılımını incelemek için, deneyin başlangıcından itibaren her 500 saniyede bir sıcaklıklar, kararlı durum oluşuncaya kadar not edilmiştir.

Mevcut çalışmada, deiyonize su, silika (SiO₂-H₂O) nanoakışkan hazırlanması için baz sıvı olarak alınmıştır. Araştırma için kullanılan (SiO₂) nanopartiküllerinin ortalama boyutu 12 nm ve yoğunluğu 2.65 g / cm³'tür. Çıplak gözle görülen SiO₂ nanopartiküllerinin fotoğrafik görüntüsü Şekil 3.208'de gösterilmiştir. %3,0 partikül kütle fraksiyonu ile 1500 ml SiO₂-H₂O nanoakışkan hazırlamak için 45 g SiO₂ nanopartikül kullanılmıştır. Silika nanopartikülleri, 0.1 mg çözünürlüğe sahip hassas bir denge kullanılarak çok doğru bir şekilde tartılmıştır. Mevcut çalışmada SiO₂-H₂O nanoakışkanın partikül kütle fraksiyonu aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$\% \text{ mass concentration} = \frac{W_{\text{SiO}_2}}{W_{\text{bf}}} \times 100\% \quad (3.53)$$

W_{SiO_2} : SiO₂ nanopartiküllerinin gram olarak miktarı

W_{bf} :Baz akışkanın gram olarak miktarı



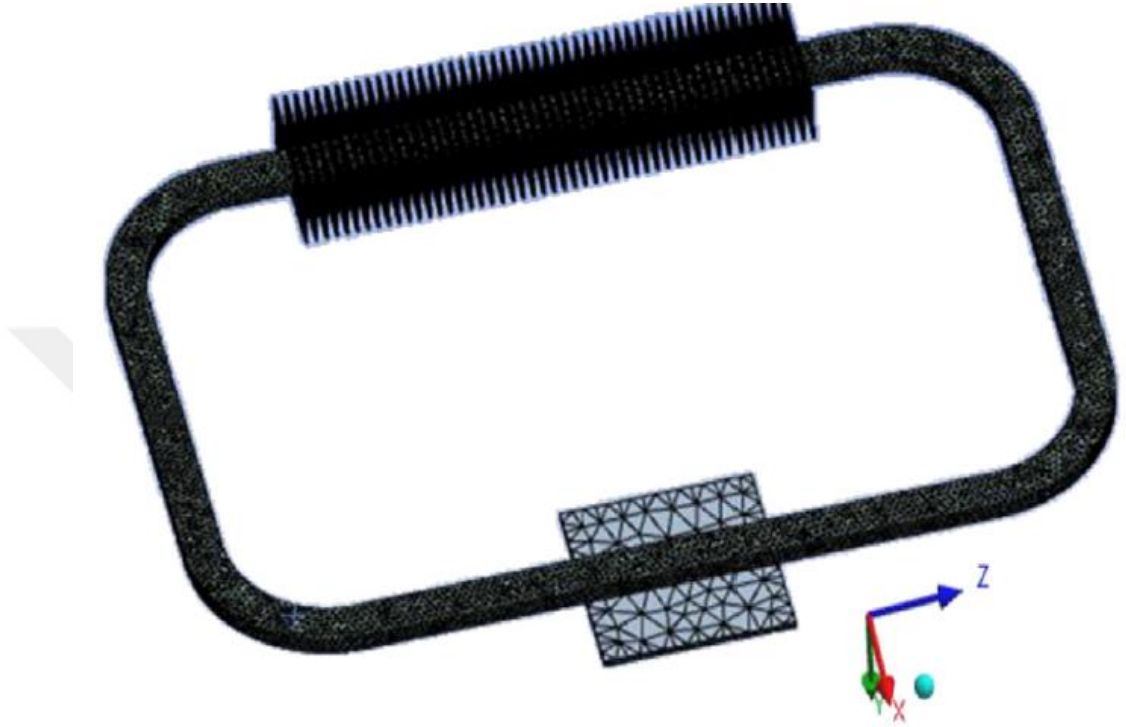
Şekil 3.207. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Gunnasegaran *et al.* 2013)



Şekil 3.208. SiO₂ nanopartiküllerinin fotoğrafı (Gunnasegaran *et al.* 2013)

Bu çalışmada kullanılan simülasyonun amacı deneysel gözlemleri doğrulamaktır. Buna göre, üç boyutlu (3B) bir model, LHP içinde meydana gelen olayları dikkate almadan tüm

LHP'yi iletken bir ortam olarak kabul ederek tasarlanmıştır. LHP 'nin 3B modeli Şekil 3.209'da gösterilmiştir.



Şekil 3.209. Simülasyon modeli (Gunnasegaran *et al.* 2013)

Bu çalışmada, LHP üzerinde kapsamlı deneysel ve Sonlu Eleman Metodu (FEM) simülasyon incelemeleri yapılmıştır. Şeffaf plastik borudan yapılan LHP, akım örneklerini görselleştirmek için kullanılan mevcut çalışmanın eşsiz özelliğidir.

Güç arttıkça, buhar hattında üç farklı akış örneği gözlenmiştir. Kabarcıklı, sülük ve halka şeklindedirler. LHP'nin saf su ve $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkan kullanılarak çeşitli ısı yüklerinde termal analizi incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, çalışma sıvısı olarak nanoakışkan kullanan sistemin termal performansı üzerindeki olumlu etkisini göstermiştir. $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkan kullanıldığında LHP'nin R_t değerinin azaldığı bulunmuştur. Test sonucu, saf su ile karşılaştırıldığında nanoakışkan kullanan LHP'nin R_t 'sinde 20 W ila 100 W arasında değişen ısı yükünde ortalama %28-44 arası düşüş olduğunu göstermiştir. Termal direnç ile ilgili çalışma dışında, deney ve FEM simülasyonundan elde edilen geçici sıcaklık

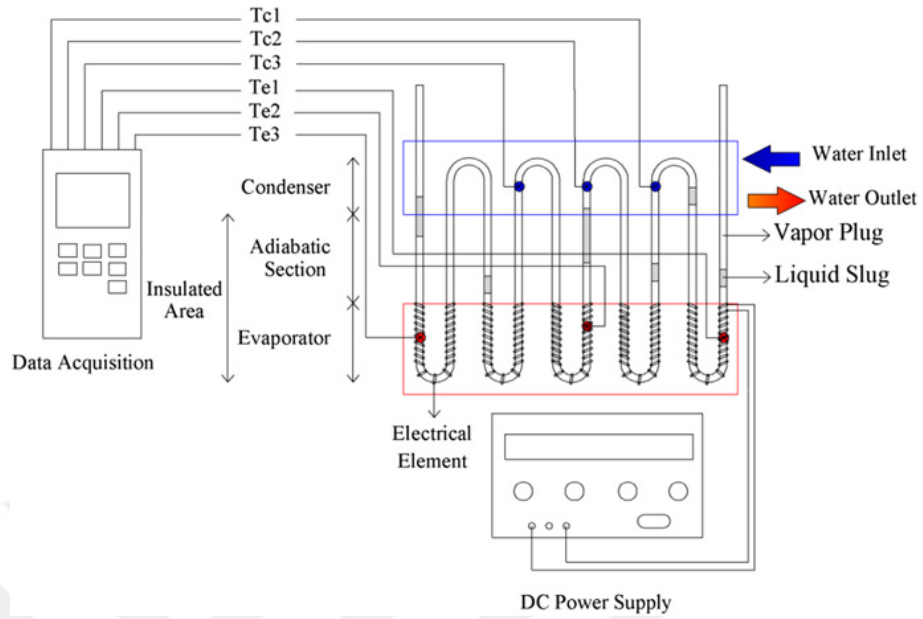
dağılımlarının iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ nanoakışkan kullanan LHP daha düşük sıcaklık verir ve saf su kullanan LHP'den daha kısa sürede kararlı hale gelir. Isı borusunda nanoakışkan kullanımı, bu alanda teknolojinin gelişiminde cazibe kazandıkça ve örneğin masaüstü PC CPU'ları gibi fonksiyonel bileşenler tarafından yayılan sürekli artan miktarda ısı ile birlikte, bu çalışma kesinlikle daha fazla araştırma için yol gösterici olacaktır. Önerilen sistemin farklı tipte nanoakışkanlarla termal performansını incelemek için çalışmalar devam etmektedir

Taslimifar *et al.* (2013), açık LHP'de ferroakışkan uygulamasının, kararlı bir durumda termal performansı arttırdığını ve bunun manyetik alan uygulanarak daha da geliştirilebileceğini bildirmişlerdir.

Başlangıçta beş türlü OLPHP (açık döngülü titreşimli ısı borusu), bakır boruyu kıvrımlı bir şekilde bükerek üretilmiştir. Bakır borunun iç ve dış çapları, sırasıyla 1.75 ve 3 mm olarak seçilmiştir. Sıcaklık ölçümleri için altı K tipi termokupl kullanılmıştır bunların üçü buharlaştırıcıda (T_{e1} , T_{e2} ve T_{e3}) ve geri kalanı yoğunlaştırıcıda (T_{c1} , T_{c2} ve T_{c3}) kullanılmıştır. Nikel krom elektrikli ısıtıcı, buharlaştırıcıdaki bakır borunun etrafına sarılmış ve yoğunlaştırıcıda soğutma suyu akışı sağlanmıştır. Elektrikli ısıtıcıda istenen gücü sağlamak için bir DC güç kaynağı kullanılmıştır. OLPHP'nin iç basıncını istenen miktara düşürmek için yüksek vakum pompası ve ilgili bağlantı parçaları içeren bir vakum sistemi kullanılmıştır.

OLPHP sırasıyla 70, 50 ve 80 mm boyutlarında buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı ve adyabatik bölümler olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Buharlaştırıcı ve adyabatik bölümler ısı kaybını önlemek için deney sırasında yalıtılmıştır. Şekil 3.210, deney düzeneğinin şemasını göstermektedir.

Buharlaştırıcı ve adyabatik bölümde manyetik alanın uygulanması için üç seramik mıknatıs kullanılmıştır. Yüzeylerinde 3700 G'lik manyetik akı yoğunluğuna sahiptirler. Mıknatıslar 50 mmx 100 mmx 25 mm boyutlarındadır.



Şekil 3.210. Deney düzeneğinin şematik diyagramı (Taslimifar *et al.* 2013)

Bu çalışmada kullanılan ferro-akışkan, Bagheri ve arkadaşları (Bagheri *et al.* 2011) tarafından uygulanan bir metotla hazırlanmıştır. Tüm adımlarda dikkat edilmesi gereken önemli görev, hazırlanan çözeltiyi N_2 gazı atmosferinde tutmaktır çünkü Fe_3O_4 nanopartikülleri oksijenle reaksiyona girme ve Fe_2O_3 'e dönüştürülme eğilimindedir. Bu reaksiyonun oluşumu nanopartiküllerin renginden belirlenebilir. Fe_3O_4 nanopartikülleri siyahtır, Fe_2O_3 nanopartikülleri ise kahverengidir.

İlk önce, N_2 gazı ortamı altında 0.85 mL konsantre edilmiş HCl , 2 g $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ve 5.2 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ karışımı hazırlanır. Daha sonra 250 mL sodyum hidroksit çözeltisi (1.5 M) bir kapta hazırlanır ve N_2 gazı kullanılarak gazı giderilir. Daha sonra, birinci çözelti ikincisine yavaşça eklenir, ikincisi yaklaşık 30 dakika boyunca tamamen karıştırılır. İlk çözeltiyi eklemenin kalitesi çok önemlidir. İnce ve homojen nanopartiküllere sahip olmak için ekleme oranı damla damla olmalıdır. Elde edilen çözelti ferroakışkandır.

Nanopartiküllerin çapı doğrudan ışık saçılımı (DLS) tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Bu teknik, $25^\circ C$ 'de Malvern aracından NanoZS (kırmızı rozet) -ZEN3600 ışık yayılımı

kullanılarak gerçekleştirilir. Ferro-akışkan nanopartiküllerin ortalama çapı yaklaşık 25 nm'dir.

Ferroakışkan büyük bir manyetizma etkisine sahiptir ve manyetik alanın uygulanması altında, nanopartiküllerin neredeyse tamamı etkilenir.

Başlangıçta, OLPHP'nin toplam iç hacmini hesaplamak için, yüksek vakum pompası kullanılarak yaklaşık 16 Pa basınca kadar boşaltılmış ve daha sonra tamamen su ile doldurulmuştur. OLPHP'ye eklenen su hacmi, bu durumda, OLPHP'nin toplam iç hacmini göstermektedir.

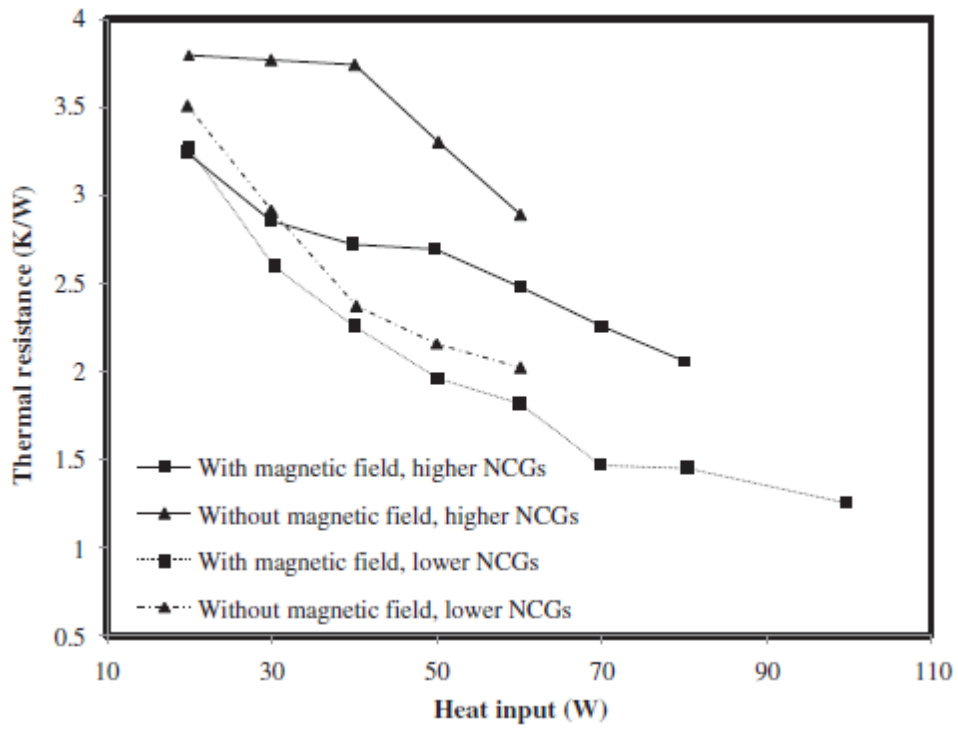
OLPHP'nin %60 şarj oranını şarj etmek için tahliye edilip daha sonra yeterli miktarda çalışma sıvısı ile doldurulmuştur. Çalışma sıvısının enjeksiyonundan önce, içinde çözünen NCG(yoğuşmayan gaz) miktarının en aza indirgenmesini sağlamak için gazı giderildiğine dikkat edilmelidir. Bu bağlamda, çalışma sıvısı ısıtılır, çünkü sıcaklık artışı NCG'lerin çözünürlüğünü azaltır.

Bu araştırmada iki farklı deneysel prosedür kullanılmıştır; biri ferroakışkan yüklü OLPHP'lerin başlangıç performansının değerlendirilmesi ve diğeri ferroakışkan OLPHP'lerin sabit durumda ısı transfer özelliklerinin belirlenmesi içindir.

Başlangıç performansının analizi için, yoğunlaştırıcıda su akışı sağlandıktan sonra, ısı girişi bir DC güç kaynağı kullanılarak buharlaştırıcıya uygulanmış ve buharlaştırma ve yoğunlaştırma bölümlerinin sıcaklıkları bir veri toplama sistemi (örnekleme) kullanılarak 45 dakika boyunca aynı anda kaydedilmiştir.

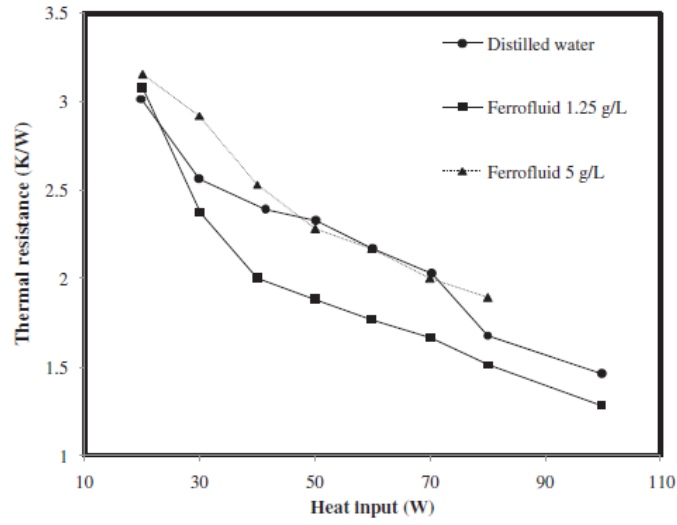
Sabit termal performansın araştırılması durumunda, başlangıçta yoğunlaştırıcıya su akışı sağlanır. Daha sonra OLPHP ye DC güç kaynağı kullanılarak ısı akısı verilir. Yarı-kararlı bir durum koşulu elde edildikten sonra sıcaklıklar, 1 Hz örnekleme hızında veri toplama sistemi kullanılarak ölçülür ve kaydedilir. Daha sonra, ısı girişi artırılır ve prosedür,buharlaştırıcı sıcaklığı yaklaşık 230°C'ye ulaşana kadar tekrarlanır. Yukarıda

- Ferroakışkan, OLPHP'lerin belirli koşullar altında damıtılmış su yüklü olanlara göre kararlı durum termal performansını iyileştirmiştir.
- Ferro-akışkan yüklü OLPHP'lerin başlatma ve kararlı durum termal performansları manyetik alan uygulanmasıyla artmıştır. Ayrıca, termomanyetik konveksiyonun bu güçlendirme üzerinde önemli bir role sahip olduğu görülmüştür.
- Manyetik alan uygulamasıyla 20 W ısıtma gücünde, daha yüksek miktarda NCG'ler daha iyi başlatma performansına neden olmuştur. Manyetik alanın yokluğunda isetam tersi durum söz konusudur. Bununla birlikte, kararlı durum koşulunda, yüksek miktarda NCG, manyetik alanın hem varlığında hem de yokluğunda kötü termal performansa sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.212)



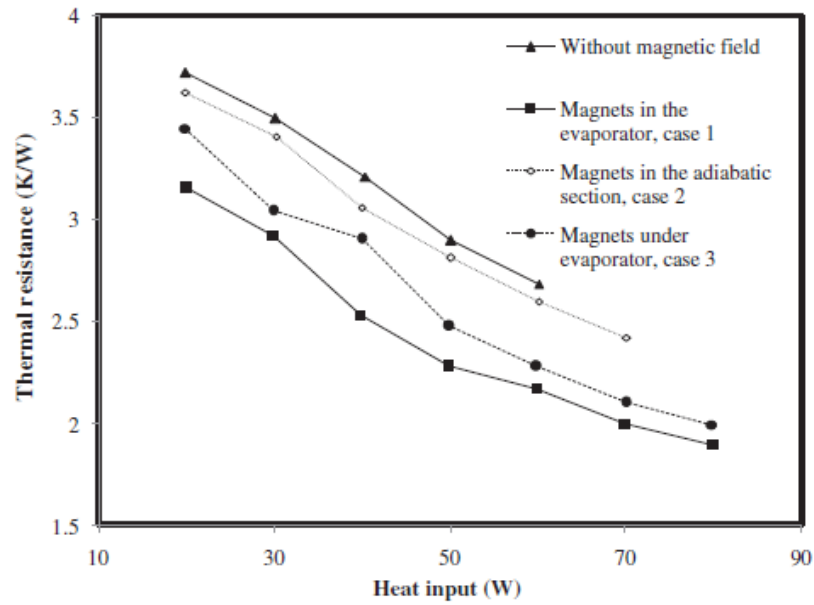
Şekil 3.212. NCG'lerin ferro-akışkan yüklü OLPHP'lerin yatay ısıtma modunda termal performansı üzerindeki etkisi (Taslimifar *et al.* 2013)

- Yüksek ferroakışkan konsantrasyonları, yüksek viskozitenin bir sonucu olarak OLPHP'lerin kararlı durum termal performansını azaltmıştır (Şekil 3.213).



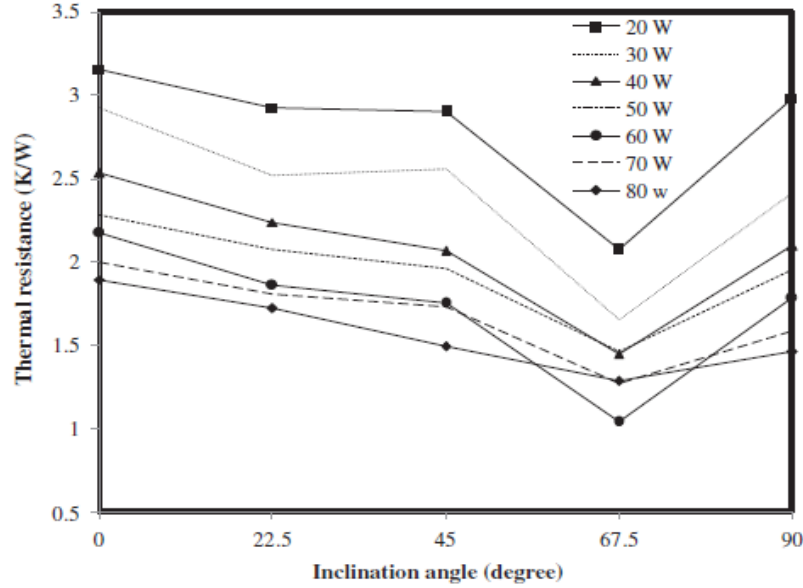
Şekil 3.213. Yatay ısıtma modunda farklı çalışma sıvıları için ısı direnci ve ısı girişi (Taslimifar *et al.* 2013)

- Kararlı durum koşulu için mıknatıs konumunun değişimi, ferroakışkan yüklü OLPHP'lerin farklı termal performanslarıyla sonuçlanmıştır (Şekil 3.214).



Şekil 3.214. 5 g / L konsantrasyonda ferro-akışkan için farklı mıknatısların yerlerinde termal direnç ve ısı girişi (Taslimifar *et al.* 2013)

- Çeşitli çalışma sıvıları ve ısı girişlerinde kararlı durum termal performansı için en iyi eğim açısının, yatay eksene göre 67,5 civarında olduğu görülmüştür (Şekil 3.215).



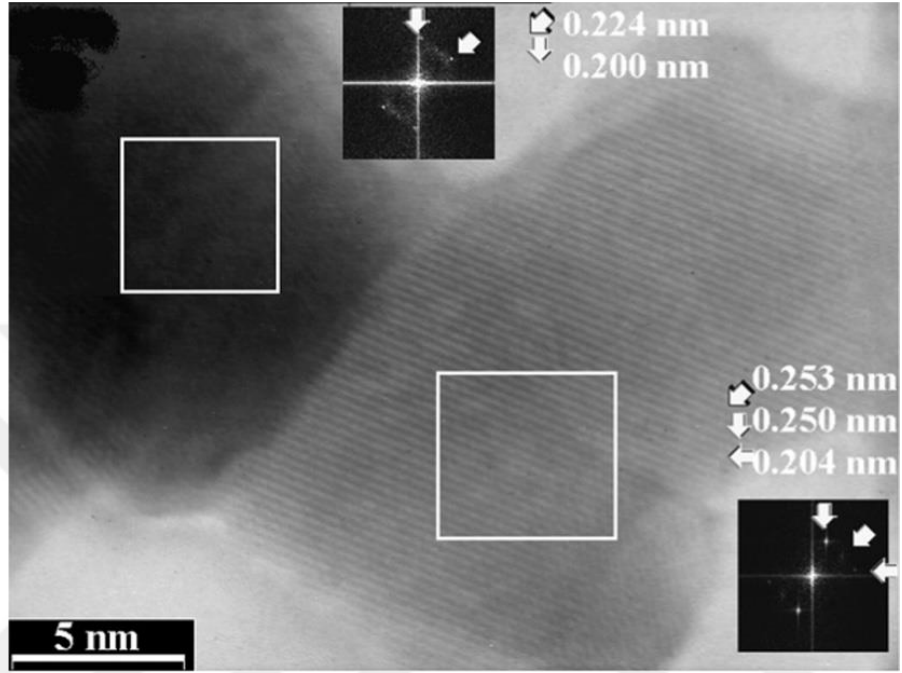
Şekil 3.215. Buharlaştırıcıdaki manyetik alanın varlığında ferroakışkan OLPHP'ler için termal direnç ve eğim açısı (Taslimifar *et al.* 2013)

3.2. Sayısal Çalışmalar

Huminić ve Huminić (2013), çalışma sıvısı olarak su ve nanoakışkan (suda asılı Fe-Fe₂O₃ nanopartikülleri) kullanarak termosifon ısı borsunun ısı performansını üzerinde sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Deneyde kullanılan nanoakışkanlar, Fe₂O₃ nanopartiküllerinin saf suda dağıtılmasıyla elde edilmiştir. Ortalama boyutları yaklaşık 4-5 nm olan Fe₂O₃ nanopartikülleri, demir pentakarbonil Fe(CO)₅ (buharlar) ve havanın CO₂ lazer ko-pirolizi ile hazırlanmıştır. Sentezden sonra, nanokompozitlerin morfolojisi ve bileşimi farklı analitik tekniklerle karakterize edilmiştir: X-ışını kırınımı (XRD), transmisyon elektron mikroskopisi (TEM), seçilen alan elektron kırınımı (SAED) ve yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskopisi (HRTEM). Nanokompozitin birçok farklı alanında yüksek

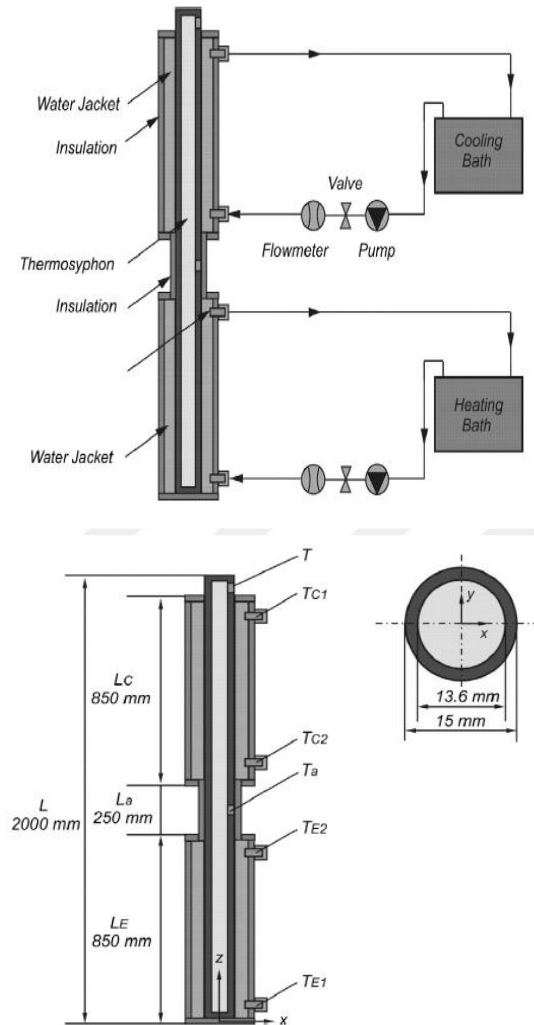
çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskobu analizi yapılmış ve Şekil 3.216'da sunulmuştur.



Şekil 3.216. Demir oksit numunesi için HRTEM görüntüleri

(a) ayırma ara yüzünü gösteren izole edilmiş monokristaller ve (b) kümelenmiş nanopartiküller. Her iki görüntüde de Fourier dönüşümünün alan gösterimleri görüntülenir (Huminic and Huminic 2013).

Termosifon ısı borusunun şematik görünümü Şekil 3.217'de gösterilmiştir. Termosifon ısı borusu, dış çapı 15 mm, kalınlığı 0.7 mm ve uzunluğu 2000 mm olan bakır borudan yapılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümleri sırasıyla 850 ve 850 mm uzunluğa sahiptir. Buharlaştırıcı bölümündeki ısıtma suyunun sıcaklığı bir termostatik banyo (GD 120-S26) ile sabit tutulmuş ve çalışma sıcaklığı 60 ila 90°C arasında değiştirilmiştir; yoğunlaştırıcıdan gelen soğutma suyunun sıcaklığı, bir termostatik banyo yoluyla 20°C'da sabit tutulmuştur; test edilen nanopartiküllerin konsantrasyon seviyesi %0, %2 ve %5,3'tür. Termosifon ısı borusundaki yerel sıcaklıklar beş termokupl (tip-P-100) ile ölçülmüştür. İki buharlaştırıcı bölümüne, biri adyabatik bölüme ve ikisi yoğunlaştırıcı bölümüne monte edilmiştir. Termosifon ısı borusu, 10 mm kalınlığında köpüklü polistiren ile yalıtılmıştır. Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerinden giriş ve çıkış sıcaklıkları ile soğutma suyunun kütle akış hızları da ölçülmüştür.



Şekil 3.217. Termosifon Isı Borusunun Şematik Görünümü (Huminic and Huminic 2013)

Matematiksel model:

1) Isı Transfer Katsayısı

Buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölümlerindeki ısı transfer katsayıları şu şekilde tanımlanır:

Isıl direnç ise şu şekilde hesaplanır:

$$h_c = \frac{\dot{Q}}{\pi D L_c (T_s - T_{cm})} \quad (3.54)$$

$$h_E = \frac{\dot{Q}}{\pi D L_E (T_{Em} - T_s)} \quad (3.55)$$

$$R = \frac{T_{Em} - T_{cm}}{\dot{Q}_{max}} \quad (3.56)$$

Burada:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c c_p (T_{cout} - T_{cin}) \quad (3.57)$$

Kutataladze'nin korelasyonu (Kutateladze 1990), çok çeşitli sıvılar ve kaynama koşulları için sabitler ve güçler ile geliştirilmiştir:

$$h_E = 0.44 \left(\frac{k_l}{\left(\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right)^{1/2}} \right) \left(\frac{10^{-4} q p}{g h_{fg} \rho_v \mu_l} \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v} \right) P \Gamma_l^{0.35} \quad (3.58)$$

k: Isıl iletkenlik (W/m K) l: sıvı faz v: buhar h_{fg} : buharlaşma ısısı (J / kg K)

σ : yüzey gerilimi (N / m)

q: ısı akısı (W/m)

p: basınç (Pascal)

ρ : yoğunluk (kg/m³)

μ : dinamik viskozite (N s/m²)

h: özgül entalpi (J/kg)

g: yerçekimi ivmesi (m/s²)

2) Etkili Isıl İletkenlik

Nanoakışkanın etkili ısıl iletkenliğinin belirlenmesi için ampirik bir ölçeklendirme faktörü ile Hamilton-Crosser korelasyonu aşağıdaki gibi kullanılmıştır (Hamilton and Crosser 1962):

$$k_{NF} = k_{BF} \left[\frac{k_{NP} + (n-1)k_{BF} - (n-1)\phi(k_{BF} - k_{NP})}{k_{NP} + (n-1)k_{BF} + \phi(k_{BF} - k_{NP})} \right] \quad (3.59)$$

$$n = \frac{3}{\psi}$$

Burada Ψ farklı partikül şekillerinin ısı iletkenlik üzerindeki etkisini dikkate alan küreselliktir. Bu araştırmada kullanılan nanopartiküller küresel olduğundan şekil faktörü Ψ 1'dir. Dolayısıyla $n = 3$ tür.

3) Nanoakışkan viskozitesi, özgül ısı ve yoğunluğu

Brinkman denklemi nano-akışkan viskozitesinin tahmini için kullanılabilir (Brinkman 1952).

$$\mu_{NF} = \frac{\mu_{BF}}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (3.60)$$

Nanoakışkanın özgül ısı:

$$c_{p,NF} = \frac{(1 - \phi)(\rho c_p)_{BF} + \phi(\rho c_p)_p}{(1 - \phi)\rho_{BF} + \phi\rho_p} \quad (3.61)$$

ϕ : Hacimsel konsantrasyon

Nanoakışkanın yoğunluğu:

$$\rho_{NF} = (1 - \phi)\rho_{BF} + \phi\rho_p \quad (3.62)$$

4) Korunum Denklemleri

Termosifon ısı borularının içindeki akış ve ısı transferinin ana denklemleri, kararlı durum koşulları için Kartezyen koordinat sisteminde çözülmüştür. Yerçekimi etkisi de dikkate

alınmıştır. Çözülen denklemler kümesi süreklilik denklemi, RANS (Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) denklemleri ve termal enerji denklemidir.

Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (3.63)$$

Momentum Denklemi

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) &= -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \\ &= \nabla \cdot (-p\delta + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) + S_M \end{aligned} \quad (3.64)$$

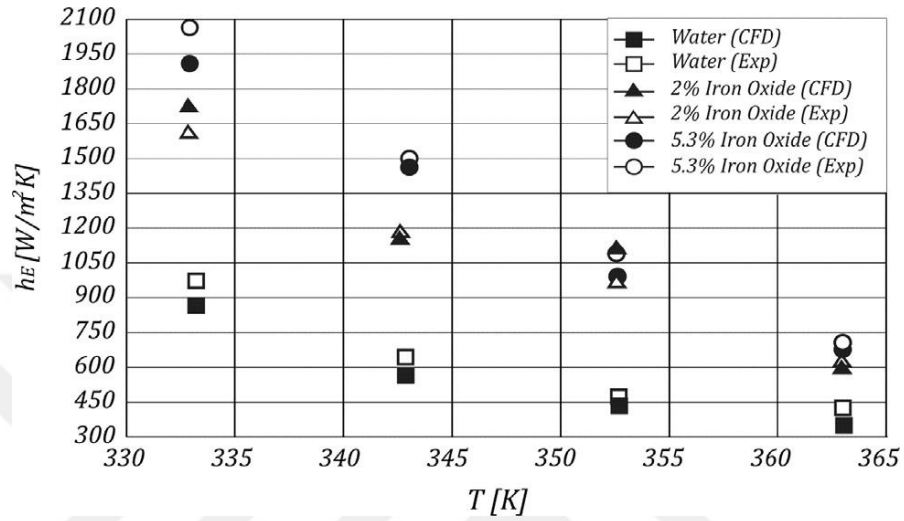
Toplam Enerji Denklemi

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h_{\text{tot}}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{\text{tot}}) &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M \\ &+ S_E \end{aligned} \quad (3.65)$$

Mevcut analizde, sayısal simülasyonlar, termosifon ısı borusunun dört çalışma sıcaklığı (60, 70, 80 ve 90 °C) ve iki nanopartikül konsantrasyonu (hacimce %2 ve hacimce %5.3) için gerçekleştirilmiştir.

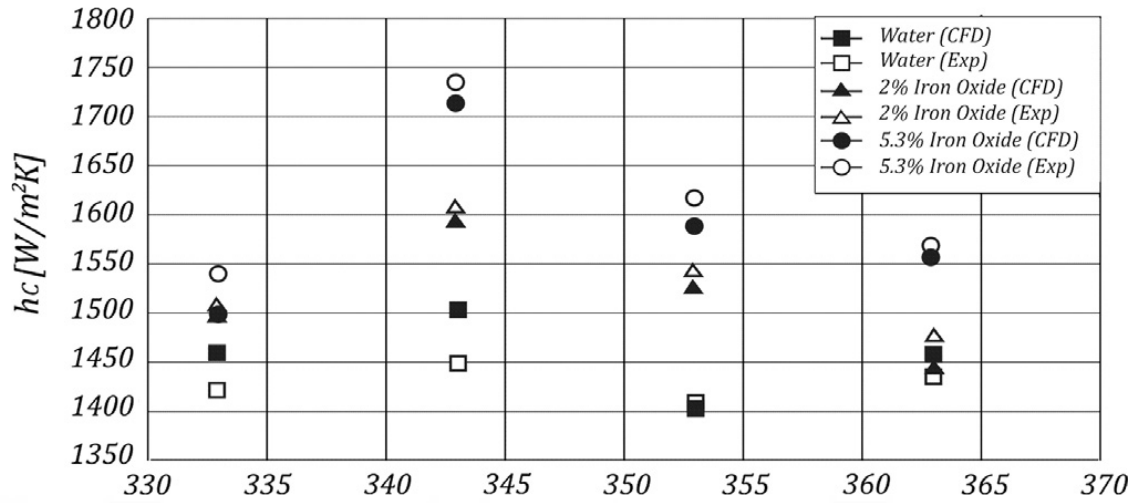
- CFD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) çözeltilerini doğrulamak için adyabatik bölümün ortasındaki sıcaklık çıkış verisi olarak izlenmiştir. Sayısal sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Farklı nanopartikül konsantrasyonları için termosifon ısı borusunun sıcaklık dağılımlarının sayısal sonuçları ve deneysel sonuçları birbiri ile uyumlu çıkmıştır.
- Şekil 3.218, nanopartikül konsantrasyonunun, 60-90°C çalışma sıcaklığında su ve demir oksit nanopartikülleri kullanarak termosifon ısı borusunun buharlaşma ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu şekilde görülebileceği gibi, nanopartikül konsantrasyonunun artmasıyla buharlaşma ısı transfer katsayıları artmıştır. Sayısal sonuçlar, nanopartikül konsantrasyonundaki artışın ısı transfer

katsayısında bir artışa neden olduğunu göstermektedir, çünkü buharlaştırıcı bölümünde yüzey ve çalışma sıvıları arasındaki ısı direnç artmaktadır. Ayrıca, sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve uyumlu çıkmıştır.



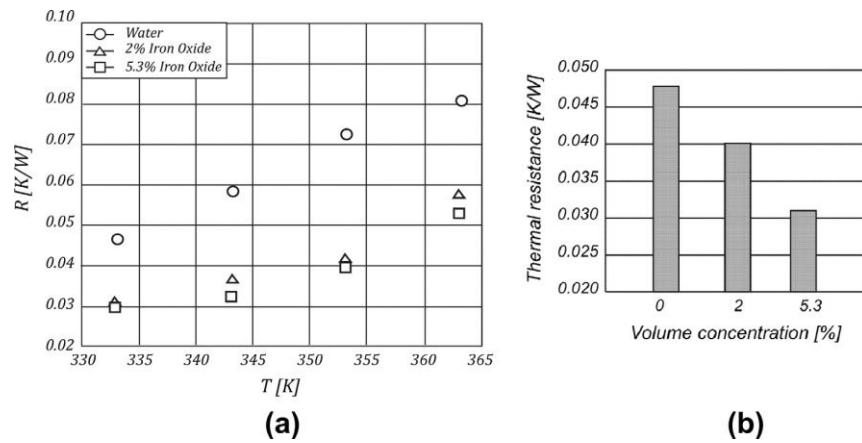
Şekil 3.218. Demir oksit nanopartiküllerinin buharlaşma ısı transfer katsayısı üzerine etkisi (Huminic and Huminic 2013)

- Şekil 3.119, nanopartikül konsantrasyonunun, 60-90 °C çalışma sıcaklığında su ve demir oksit nanopartikülleri kullanılarak termosifon ısı borusunun yoğunlaşma ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 3.119'da gösterildiği gibi, her iki çalışma sıvısı için yoğunlaşma ısı transfer katsayıları düşük çalışma sıcaklıklarında kademeli olarak artar ve yüksek çalışma sıcaklıklarında azalır. Ayrıca, sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.119. Demir oksit nanopartiküllerinin yoğunlaşma ısı transfer katsayısı üzerine etkisi (Huminic and Huminic 2013)

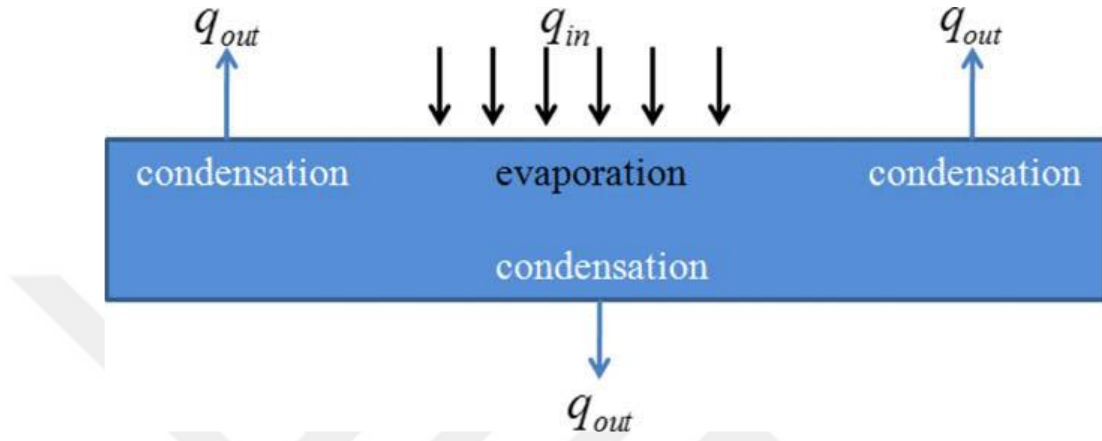
- Şekil 3.220, termosifon ısı borusunun toplam ısı direncinin nanoakışkan ve su ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Nanopartikül konsantrasyonunun artırılmasının termosifon ısı borusunun ısı direncini azalttığı ve böylece daha iyi bir performans sağladığı görülmektedir.



Şekil 3.220. Demir oksit nanopartiküllerinin termosifon ısı borusunun toplam ısı direncine etkisi (Huminic and Huminic 2013)

Shafahi ve diğerleri (2010b), nano-akışkanlar kullanarak dikdörtgen ve disk şekilli ısı borularının termal performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Dikdörtgen veya disk şekilli bir ısı borusunun enine kesitinin basitleştirilmiş bir şeması Şekil 3.221'de

gösterilmektedir. Buhar ve sıvı akışının sabit ve laminar olduğu; buhar ve sıvının taşıma özelliklerinin sabit kabul edildiği varsayılmaktadır; buhar enjeksiyonu ve emme hızlarının buharlaştırıcıda aynı olduğu düşünülmektedir (Vafai and Wang 1992).



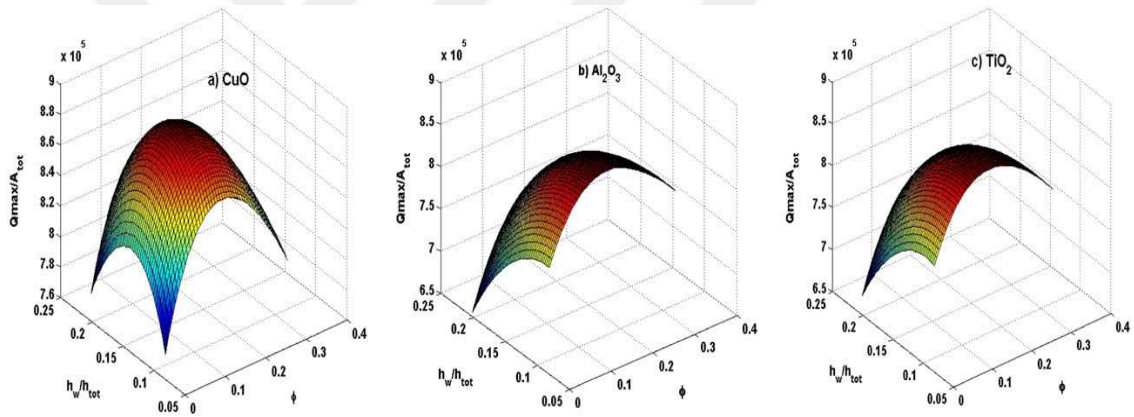
Şekil 3.221. Dikdörtgen veya disk şekilli ısı borusu kesitinin basit şeması (Shafahi *et al.* 2010b)

Disk ve dikdörtgen şekilli ısı boruları için analitik modeller, nanoakışkan kullanımının bu ısı borularının termal performansı üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmıştır. Çalışma sıvısı içinde nanopartiküller içeren disk ve dikdörtgen şekilli ısı boruları için sonuçlar elde edilmiştir. Disk şeklinde ısı borusunun çapı, 0,46 m olan dikdörtgen şekilli ısı borusunun uzunluğuna eşit olarak alınmıştır. En yaygın nanopartiküllerden üçü, sırasıyla (10, 20 ve 40 nm) çapa sahip olan Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 kullanılmıştır. Nanoakışkanın sıvı basıncı, sıcaklık dağılımı, sıvı hızı, sıcaklık eğimi, termal direnç, ısı borusu boyutu ve düz şekilli ısı borularının maksimum ısı giderme kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, nanoakışkan kullanarak düz şekilli ısı borusunun boyutunun küçültülmesi olasılığı araştırılmıştır.

Sonuçlar, çalışma sıvısında nanopartikül varlığının, sıvının hızında bir azalmaya, ısı borusu boyunca daha küçük sıcaklık farkına ve aynı çalışma koşulları altında boyutta küçülme olasılığına yol açtığını göstermiştir.

Nanoakışkan kullanmak, deneysel olarak elde edilen sonuçla aynı olarak düz şekilli ısı borusunun ısı direncini azalttığı gözlenmiştir. Düz şekilli ısı borusunun maksimum ısı giderme kapasitesi, bir dizi fitil kalınlığı ve nanopartikül konsantrasyon seviyeleri için gösterilmiştir. Düz şekilli ısı borusunun ısı çıkarma kapasitesini en üst düzeye çıkarmada optimum nanoparçacık konsantrasyon seviyesi ve fitil kalınlığı varlığı belirlenmiştir.

Fitil kalınlığının ve nanopartikül konsantrasyon seviyesinin değiştirilmesinin, yassı şekilli bir ısı borusunun maksimum ısı giderme kapasitesi üzerindeki etkisi Şekil 3.222’de gösterilmektedir. Bu şekilde hem fitil kalınlığı hem de nanopartikül konsantrasyon seviyesi için optimum bir noktanın varlığı görülebilmektedir.

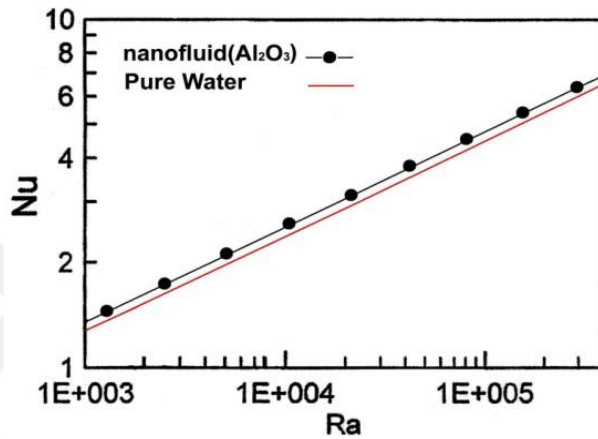


Şekil 3.222. Nanopartikül konsantrasyon seviyeleri ve fitil kalınlığı açısından disk şekilli ısı borusunun maksimum ısı giderme kapasitesinin üç boyutlu gösterimi (a) CuO, (b) Al₂O₃ ve (c) TiO₂ (Shafahi *et al.* 2010b)

Tahery *et al.* (2010), Al₂O₃ nanopartikülleri içeren su bazlı nanoakışkanları analitik olarak araştırmışlardır.

Bu çalışmada su bazlı Al₂O₃ nanopartikül içeren nanoakışkanlar sayısal olarak incelenmiştir. Doğal konvektif ısı transfer koşulları altında kararlı nanoakışkanların kullanımı üzerine sayısal çalışmalar yapılmıştır. Isıtma işlemi iki farklı şekilde yapılmıştır: ilk işlemde ısıtıcı aşağı duvara, ikinci şekilde sonlu uzunlukta sol dikey duvara monte edilmiştir, ayrıca ısıtılmış ve soğutulmuş duvarlar sabit bir sıcaklıkta tutulmuştur. Sayısal simülasyon, homojen bir katı-sıvı karışımını içererek

gerçekleştirilmiştir. Özellikle bu çalışma Newtonian davranışı olan Al_2O_3 nanoakışkanları ile ilgilidir. Simülasyon $Ra = 103-106$ aralığında yapılmıştır. Nanopartiküllerin hacimsel fraksiyonu %1.3 tür. Nusselt-Rayleigh sayı ilişkisi gösterilmiş ve ardından bulunan nanoakışkan Nu-Ra sayı diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.223)



Şekil 3.223. Nanoakışkan ve saf su için Nusselt sayısı sonuçları (Tahery AA 2010)

Baz sıvı üzerinde nanopartikül kullanıldığında, baz sıvıya göre nanoakışkan Nusselt sayısının arttığı görülmüştür. Ortalama Nusselt sayısındaki artış ısı transferi uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır.

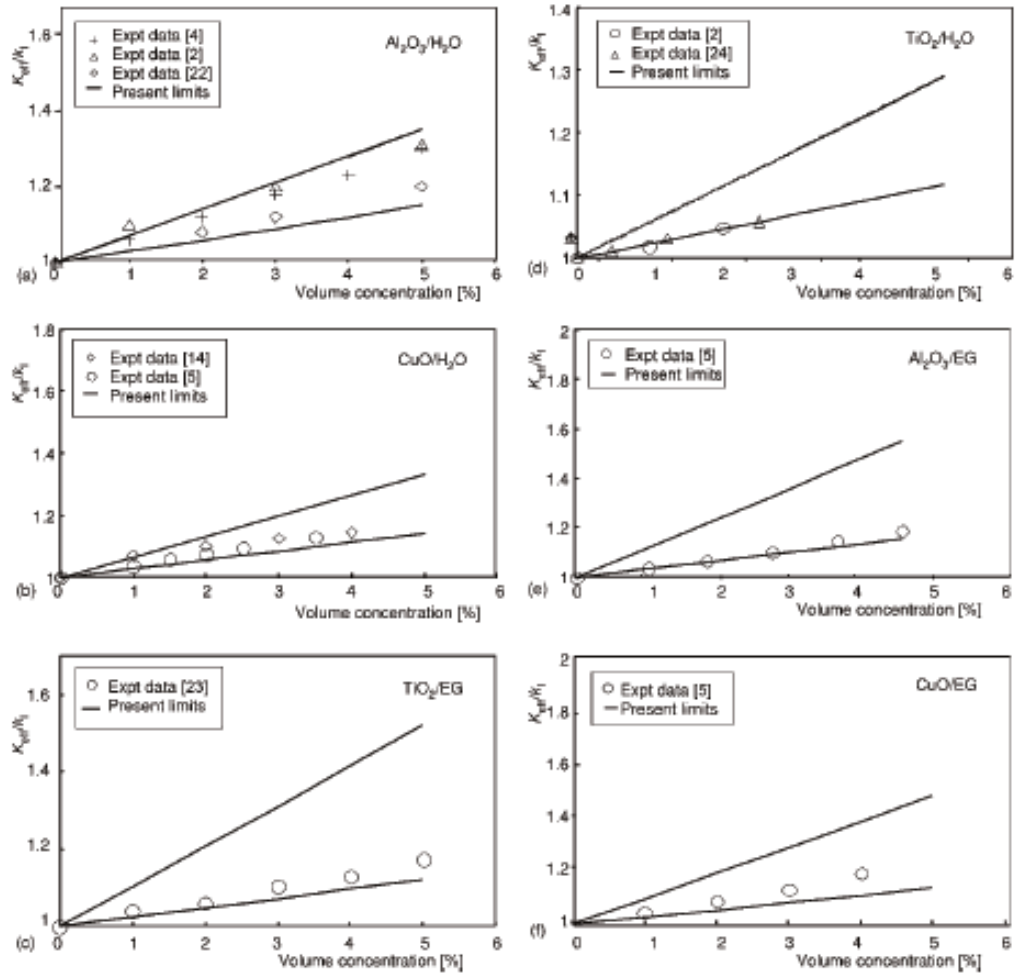
Rayleigh sayısı artırılarak, dikey sıvı katmandaki akım sayıcılar için deformasyon eğilimi yatay sıvı katmanındakinden daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak Rayleigh sayısını artırarak, yatay sıvı tabakasındaki eş sıcaklık eğirileri için deformasyon eğilimi dikey sıvı tabakasından daha fazladır

Sayısal araştırmalarımız nedeniyle nanoakışkanlı dikey boşluklar yatay boşluklardan daha iyidir. Ayrıca, nanoakışkan kullanılan boşlukların hem yatay hem de dikey sıvı tabakası için doğal konveksiyon sayısal modellemesinde daha iyi verime sahip olduğu görülmüştür.

Vasu *et al.* (2008), otomobil düz boru düz kanatlı kompakt ısı değıştirci üzerinde soğutucu olarak $Al_2O_3+H_2O$ nanoakışkan kullanılarak NTU değeriendirme yöntemi ile teorik bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Kompakt ısı eşanjörü üzerindeki parametrik çalışmaların ayrıntılı bir çalışması, e NTU sayısal yöntemi ve soğutma sıvısı olarak $Al_2O_3+H_2O$ nanoakışkanları kullanılarak yapılır. Teorik analiz için dikkate alınan faktörler, hava giriş sıcaklığının etkisi, hava ve soğutma sıvısı kütle akış hızının etkisi, soğutucu giriş sıcaklığının etkisi ve nanopartiküllerin hacim konsantrasyonunun etkisidir. Bu makale, $Al_2O_3+H_2O$ nanoakışkanını geleneksel sıvılarla karşılaştırmış ve $Al_2O_3+H_2O$ nanoakışkanın soğutma kapasitesinin çok yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Nanoakışkanın genel ısı transfer katsayısı suyunkinden çok yüksektir ve nanopartiküllerin hacim fraksiyonundaki artışla azalmıştır.

Murugesan and Sivan (2010), nanoakışkanların termal iletkenliği için alt / üst limitler geliştirmiş ve teorik veriler yayınlanan deneysel sonuç ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.224 (a) - (f) termal iletkenlik için geliştirilen alt / üst limitler ile deneysel veriler arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir. Karşılaştırma, dikkate alınan deneysel verilerin yeni geliştirilen sınırlar arasında olduğunu göstermektedir. Karşılaştırma ayrıca mevcut sınırların dar bir alt ve üst sınır yerleştirmede daha sıkı olduğunu ortaya koymuştur. Deneysel verilerin çoğu yeni geliştirilen sınırlar içinde olduğundan, partikül şeklinin, Brownian hareketinin ve nano tabakanın nanoakışkanların termal iletkenliğini artırmada önemli olduğu sonucuna varılabilir. Bu parametrelerin rolünün daha iyi anlaşılmasıyla nanoakışkanların termal iletkenliğini tahmin etmek için daha gerçekçi bir teorik model geliştirmek mümkün olacaktır.



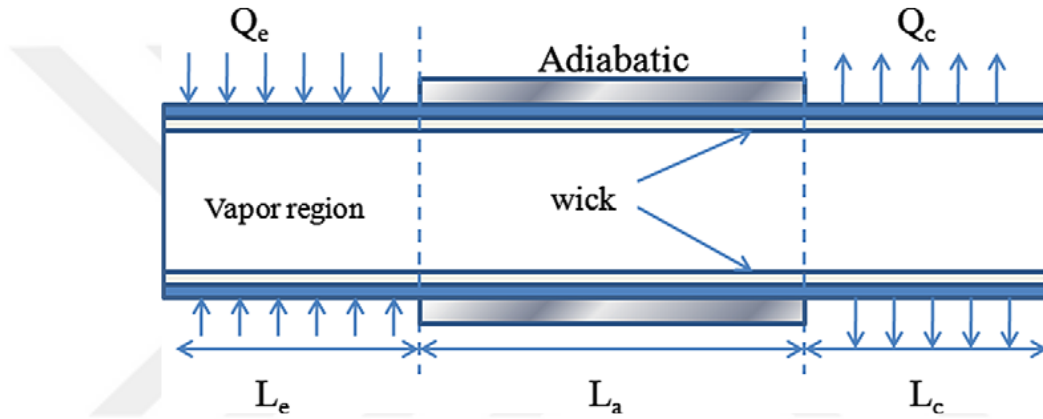
Şekil 3.224. Çeşitli nanoakışkanların termal iletkenliği için mevcut sınırların karşılaştırılması (Murugesan and Sivan 2010)

Shafahi *et al.* (2010a), silindirik ısı borusunun ısı performansını Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 nanoakışkanları ile iki boyutlu analizler kullanarak teorik olarak incelemiştir. Mevcut analizde kullanılan silindirik ısı borusunun şeması, Şekil 3.225'da verilmektedir.

Buharlaştırıcı bölümüne uygulanan ısı, buharlaşmaya ve sonuç olarak çalışma sıvısında bir basınç artışına neden olur. Buharlaştırıcıda oluşan buhar, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölgeleri arasındaki basınç farkının bir sonucu olarak yoğunlaştırıcıya doğru akar. Buhar yoğunlaştırıcıda gizli ısını açığa çıkarır ve yoğunlaşma suyu gözenekli fitilden buharlaştırıcıya geri akar ve böylece döngü tamamlanır. Bu çalışmada benimsenen matematiksel model şu varsayımlara dayanmaktadır: süreç kararlı bir

durumdur; radyasyon ve yerçekimi etkileri önemsizdir ve sıvı Newtonian ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilir.

Ayrıca, sıvı-buhar arayüzündeki enjeksiyon ve emme hızlarının muntazam olduğu düşünülmektedir. Ayrıca fitilin izotropik olduğu ve çalışma sıvısı ile doymun olduğu varsayılmaktadır. Gözenekli fitil içindeki sıvı akışı, genelleştirilmiş momentum denklemi kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 3.225. Silindirik Isı Borusunun Şeması (Shafahi *et al.* 2010a)

En yaygın nanopartiküllerden üçü, yani Al_2O_3 , CuO ve TiO_2 kullanılmıştır. Farklı nanopartikül konsantrasyon seviyeleri ve boyutları için ısı borusu hızı, basıncı, sıcaklığı ve maksimum ısı transfer limiti elde edilmiştir. Ayrıca, nanoakışkanlar kullanılarak silindirik ısı borusunun boyutunun küçültülmesi olasılığı da incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar önceki deneysel sonuçları doğrulamış yani çalışma sıvısı olarak nanoakışkanlar kullanıldığında ısı borusunun termal performansı artar, ısı borusu boyunca sıcaklık gradyanı ve ısı direnci azalır. Konsantrasyon arttıkça veya partikül çapı azaldıkça termal direncin azaldığı gösterilmiştir. Nanoakışkanın ve fitilin geometrik özelliklerinin silindirik ısı borusunun maksimum ısı yükü taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Maksimum ısı transferinin üretilmesinde optimum konsantrasyon seviyesinin varlığı belirlenir.

4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR

Bu çalışmada, nanoakışkan kullanılarak çeşitli ısı borularının ısı transfer performansının araştırma sonuçları sunulmuştur. Araştırma sonuçları ve değişiklikten sorumlu ısı transfer mekanizmaları çizelgeler haline getirilerek özetlenmiştir. Bazı nanoakışkanların olumsuz etkileri olmasına rağmen, bunların çoğu termal performansta bir miktar artış sağlamıştır. Araştırmacılar, farklı mekanizmaları termal performanstaki değişiklikten sorumlu olarak ortaya koymuşlardır.

Çizelge 4.1. Mikro oluklu ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti

Yazar	Isı borusunun boyutu	Nano partikül	Nanopartikül boyutu	Ana akışkan	Konsantrasyon (%ağırlık)	Etkisi	Elde Edilen Sonuçlar
Wang <i>et al.</i> (2010)	Uzunluk:350 mm Dış çap:8 mm Duvar kalınlığı: 0.6 mm	CuO	50 nm.	Su	0.5–2.0	a	1, 2, 3, 4
Liu <i>et al.</i> (2010)	Uzunluk:350 mm Dış çap:8 mm Duvar kalınlığı: 0.6 mm	CuO	50 nm	Su	0.5, 1.0 ve 2.0	a	1
Do <i>et al.</i> (2010b)	W (mm) 13.41 T (mm) 0.1 D (mm) 8.92 N (ea.) 62 W ₀ (mm) 4.875 Le (mm) 15.6 D ₀ (mm) 0.61 La (mm) 70.0 H (mm) 0.42 Lc (mm) 34.4 S (mm) 0.2 Lb (mm) 0	Al ₂ O ₃	38,4 nm	Su	0.0-1.2	a	1&4
Mehrali <i>et al.</i> (2016)	Dış çap:10 mm Duvar kalınlığı:0.5 mm İçerisinde kısa kenarı 75 mm uzun kenarı 300 mm olan oluk bulunur.	Grafen	-	Su	0.01, 0.02, 0.04 ve 0.06	a	1&4
Wei <i>et al.</i> (2005)	Uzunluk:180 mm Dış çap:6 mm	Ag (Gümüş)	10 nm	Su	5 mg / l, 10 mg / l ve 15 mg / l	a	1
Kang <i>et al.</i> (2006)	Uzunluk:200 mm Dış çap:6 mm	Ag (Gümüş)	10 nm-35 nm	Su	1 mg / l, 10 mg / l ve 100 mg / l (ppm)	a	1&4

Çizelge 4.1. (devam)

Liu <i>et al.</i> (2007)	İçerisinde kısa kenarı 0.5 mm uzun kenarı 0.8 mm olan 40x40 mm ölçülerinde oluk bulunur.	Cu (Bakır)	30 nm	Su	%0.5, %1	a	1&9
Liu <i>et al.</i> (2011)	Uzunluk:350 mm Dış çap:8 mm Duvar kalınlığı: 0.6 mm	Cu, CuO, SiO	40&20 nm 50&20 nm 30 nm	Su	0.5, 1, 1.2	a	1, 9, 12
Aly <i>et al.</i> (2017)	Uzunluk:550 mm Dış çap:15,87 mm	Al ₂ O ₃	20 nm	Su	3	a	1, 4, 9, 10

a: Isıl performans artmıştır

b: Isıl performans azalmıştır

-: Araştırmacılar istenilen değeri belirtmemişlerdir

Mikro oluklu ısı borularındaki oluklar ısı transferini iyileştirerek daha yüksek verimlilik sağlarlar. Mikro oluklu ısı borularında nanoakışkanlar ile ilgili yapılan araştırmalar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Kullanılan nanopartiküller, boyutları, baz sıvı çizelgede yer almaktadır. Baz sıvı olarak su kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardaki rakamların hangi anlama geldiği Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Örgü fitil ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti

Yazar	Isı borusunun boyutu	Nano partikül	Nanopartikül boyutu	Ana akışkan	Konsantrasyon (%w)	Etkisi	Elde edilen sonuçlar
Kole <i>et al.</i> (2013)	Uzunluk:300 mm Dış çap:10 mm Duvar kalınlığı:0.6 mm	Cu	40 nm	Su	0.0005, 0.005, 0.05, 0.5	a	4
Do <i>et al.</i> (2010a)	Uzunluk:300 mm Dış çap:4 mm Duvar kalınlığı:1 mm	Al ₂ O ₃	30 ± 5 nm	Su	%1.0 ve %3.0	a	4
Putra <i>et al.</i> (2012)	Uzunluk:200 mm Dış çap:8 mm İç çap:7.44 mm	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , - ZnO,		Su H ₂ O, Etilen glikol C ₂ H ₆ O ₂	%5 ve %1	a	4
Wang <i>et al.</i> (2012)	Uzunluk:350 mm Dış çap:8 mm Duvar kalınlığı:0.6 mm	CuO	50 nm	Su	%0.5, %1, %2	a	1 ve 2
Solomon <i>et al.</i> (2012)	Uzunluk:400 mm Dış çap:19.5 mm	Cu	80-90 nm	Su	%0.003, %0.006, %0.009	a	4
Asirvatham <i>et al.</i> (2013)	Uzunluk:180 mm Dış çap:10 mm	Ag	58 nm	Su	0.003-0.009	a	4
Saleh <i>et al.</i> (2013)	Uzunluk: 200 mm Dış çap: 8 mm Duvar kalınlığı:0.56 mm	ZnO	18-23 nm	Etilen Glikol (EG)	%0.025, %0.5	a	1&4
Liu ve Zhu (2011)	Uzunluk:350 mm Dış çap:8 mm Duvar kalınlığı:0.6 mm	CuO	50 nm	Su	%0.5, %1, %2	a	1, 2, 3 ve 4
Senthilkumar <i>et al.</i> (2012)	Uzunluk:600 mm Dış çap:20 mm	Cu	40 nm	Su	100 mg/L	a	1 ve 4
Hajian <i>et al.</i> (2012)	Uzunluk:1000 mm Dış çap:33.5 mm Duvar kalınlığı:4.07 mm	Ag	-	Su	50, 200, 600 ppm	a	1, 2, 3 ve 4

Çizelge 4.2. (devam)

Ghanbarpour <i>et al.</i> (2015b)	Uzunluk:200 mm Dış çap: Duvar kalınlığı:0.71mm	Al ₂ O ₃	100 nm	nm-200 Su	5.0, 10.0	%5 için a %10 için b	%5 için 4 ve 7; %10 için 11 ve 12
Tsai <i>et al.</i> (2004)	Uzunluk:170 mm Dış çap:6	Altın	24, 40, 8, 12 nm	Su	-	a	1, 4 ve 6
Senthil <i>et al.</i> (2016)	Uzunluk:1100 mm Dış çap:210	Al ₂ O ₃	50 nm	Su	%1.0	a	-
Kumaresan <i>et al.</i> (2014b)	Uzunluk:330 mm Dış çap:12 Duvar kalınlığı:1	CuO	59 nm	Su	%1.0	a	4
Kim <i>et al.</i> (2015)	Uzunluk:1000 mm Dış çap:17.4	SiC	-	Su	%0.01, %0.1	b	4
7Ghanbarpour <i>et al.</i> (2015a)	Uzunluk:2000 Dış çap:6.35 Duvar kalınlığı:0.71	Ag	165 nm	Su	%0.25, %0.5 ve %0.75	a	1, 4, 7 10

a: Isıl performans artmıştır

b: Isıl performans azalmıştır

-: Araştırmacılar istenilen değeri belirtmemişlerdir

Örgü fitil ısı borularında nanoakışkanlar ile ilgili yapılan araştırmalar Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Kullanılan nanopartiküller, boyutları, baz sıvı çizelgede yer almaktadır. Baz sıvı olarak su ve etilen glikol kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardaki rakamların hangi anlama geldiği Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sinterlenmiş fitil ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti

Yazar	Isı borusunun boyutu	Nano partikül	Nanopartikül boyutu	Ana akışkan	Konsantrasyon (%w)	Etkisi	Elde edilen sonuçlar
Kang <i>et al.</i> (2009)	Dış çap:6 mm Uzunluk:200 mm	Ag	10-35nm	Su	1.0, 10.0 & 100 mg/L	a	1,3,4 ve 10
Keshavarz Moraveji ve Razvarz (2012)	Dış çap:6 mm Uzunluk:190 mm	Al ₂ O ₃	35 nm	Su	0.0, 1.0 & 3.0	a	1, 9
Kumaresan <i>et al.</i> (2014a)	Dış çap:12 mm Uzunluk:330 mm	CuO	39.1 nm	Su	1.0	a	1, 3, 4 ve 10
Sadeghinezhad <i>et al.</i> (2016)	Dış çap:12 mm Uzunluk:300 mm	Grafen	Kalınlık= 2 Çap= 2 µm	Su	0.025, 0.050, 0.075 & 0.1	a	1, 2, 4, 10 ve 11
Vijayakumar <i>et al.</i> (2017)	Dış çap:12 mm Uzunluk:330 mm	CuO, Al ₂ O ₃	39.1nm 37.5 nm	Su	0.5, 1.0, 1.5	a	1, 4, 9, 11

a: Isıl performans artmıştır

b: Isıl performans azalmıştır

-: Araştırmacılar istenilen değeri belirtmemişlerdir

Sinterlenmiş fitil ısı borularında nanoakışkanlar ile ilgili yapılan araştırmalar Çizelge 4.3’te gösterilmiştir. Kullanılan nanopartiküller, boyutları, baz sıvı çizelgede yer almaktadır. Baz sıvı olarak su kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardaki rakamların hangi anlama geldiği Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Termosifon ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti

Yazar	Isı borusunun boyutu	Nano partikül	Nanopartikül boyutu	Ana akışkan	Konsantrasyon (%w)	Etkisi	Elde Edilen Sonuçlar
Noie <i>et al.</i> (2009)	İç çap:20 mm Kalınlık:1 mm Uzunluk:1000 mm	Al ₂ O ₃	20 nm	su	1.0–3.0 %	a	-
Huminic <i>et al.</i> (2011)	İç çap:15 mm Kalınlık:- Uzunluk:2000 mm	Fe ₂ O ₃	4-5 nm	su	0%, 2%, ve 5.3	a	4
Liu <i>et al.</i> (2013)	İç çap:36 mm Kalınlık:- Uzunluk:6500 mm	CuO	50 nm	su	%0,8–%1,5	-	1, 2, 3, 4
Kamyar <i>et al.</i> (2013)	İç çap:19 mm Kalınlık:1.7 mm Uzunluk:300 mm	Al ₂ O ₃ ve TiSiO ₄	<100 nm	su	%0.01, 0.02, 0.05 ve 0.075	a	1 ve 4
Yang <i>et al.</i> (2012)	-	CuO	50 nm	su	%>0.1 ve <1.5		
Sarfraz <i>et al.</i> (2014a)	İç çap:12 mm Kalınlık: - Uzunluk:220 mm	Al ₂ O ₃	42-48 nm	su	%1,0–5.0	a	1 ve 4
Chen <i>et al.</i> (2013)	-	SiO ₂	30 nm	su	%0,5–2.5	b	-
Heris <i>et al.</i> (2014)	-	Al ₂ O ₃ & CuO	25&50	su	%1.5, 2.0 & 2.5	a	1 ve 4
Menlik <i>et al.</i> (2015)	İç çap:13 mm Kalınlık:2 mm Uzunluk:1000 mm	MgO	40 nm	su	%5	a	-
Sarafriz <i>et al.</i> (2014b)		Ag	40-50 nm	su	%0.1-0.4	a	1 ve 4
Çiftçi <i>et al.</i> (2016)	İç çap:13 mm Kalınlık:2 mm Uzunluk:1000 mm	TiO ₂	<100 nm	su	%2	a	1 ve 4
Çakır (2015)		Al ₂ O ₃	10 nm	su	%0.2	a	1 ve 4

a: Isıl performans artmıştır

b: Isıl performans azalmıştır

-: Araştırmacılar istenilen değeri belirtmemişlerdir

Isı borusu, çalışma sıvısı tarafından ısının emildiği buharlaştırıcı bölümü ve ısının verildiği yoğunlaştırıcı bölümünden oluşur. Buhar, yoğun ısını yoğunlaştırıcı kısmındaki soğutucuya vererek yoğunlaşır ve yoğunlaşan sıvı buharlaştırıcıya fitilli ısı borusunda kılcal kuvvet yardımıyla dönerken termosifon ısı borusunda yerçekimi kuvveti etkisi ile döner. Bundan dolayı termosifon ısı borularında yoğunlaştırıcı üstte buharlaştırıcı altta konumlandırılmıştır. Diğer taraftan fitilli ısı borularında buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı konumlarında bir sınırlama yoktur. Basit yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle, termosifon ısı borularına büyük ilgi vardır. Termosifon ısı borularında nanoakışkanlar ile yapılan araştırmalar Çizelge 4.4’te verilmiştir.



Çizelge 4.5. Salınlı/Titreşimli ısı borularında nanoakışkan kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların özeti

Yazar	Isı borusunun boyutu	Nano partikül	Nanopartikül boyutu	Ana akışkan	Konsantrasyon (%w)	Etkisi	Elde edilen sonuçlar
Su <i>et al.</i> (2016)	İç Çap:2 mm Dış Çap:4 mm Toplam Uzunluk:2.2 m	Grafen oksit	50-200 nm	n-butanol	0.3, 0.7, 1.2 & 1.8	a	1 ve 2
Ji <i>et al.</i> (2013)	-	Al ₂ O ₃	50,80	Etanol	-	c	-
Ji <i>et al.</i> (2011)	-	Al ₂ O ₃	50, 80, 2.2 µm and 20 µm	Su	0.5	a	-
Qu <i>et al.</i> (2011)	İç Çap:2 mm Dış Çap:3 mm Toplam Uzunluk:3 m	SiO ₂ &Al ₂ O ₃	30 & 56	Su	0–0.6 ve 0–1.2	a	4
Qu <i>et al.</i> (2010)	İç Çap:2 mm Dış Çap:3 mm Toplam Uzunluk:6 m	Al ₂ O ₃	56	Su	0.1, 0.3, 0.6, 0.9 & 1.2	a	4
Tanshen <i>et al.</i> (2013)	İç Çap:3 mm Dış Çap:4 mm Toplam Uzunluk:6 m	MWCNT	56	Su	0.05, 0.1, 0.2 and 0.3	a	5
Goshayeshi <i>et al.</i> (2015)	İç Çap:1.75 mm Dış Çap:3 mm Toplam Uzunluk:4,4 m	Fe ₂ O ₃	20	Gazyağı(Parafin)	2	a	1
Riehl <i>et al.</i> (2012)	İç Çap:1 mm Dış Çap: mm Toplam Uzunluk:4 m	Cu	29	Su	5	a	5
Gunnasegaran <i>et al.</i> (2013)	İç Çap:13.5 mm Dış Çap:15 mm Toplam Uzunluk: m	SiO ₂	12	Su	3	a	1 ve 2
Taslimifar <i>et al.</i> (2013)	İç Çap:1.75 mm Dış Çap:3 mm Toplam Uzunluk: m	Fe ₃ O ₄	25	-	2.5g/l	a	1, 3, 4

a: Isıl performans artmıştır

b: Isıl performans azalmıştır

-: Araştırmacılar istenilen değeri belirtmemişlerdir

Etkili termal yönetim, modern elektronik sistemlerde ve uzay mühendisliğinde ısı akısı artışı ile en büyük zorluklardan biri haline gelmiştir. Salınlı ısı borusu genellikle termal yönetim alanında kullanılan küçük ve oldukça etkili iki fazlı bir ısı transfer cihazıdır. OHP bir kılcal tüpün boşaltılması ve kısmen bir çalışma sıvısı ile doldurulmasıyla üretilir. OHP bir uçtan ısı alır ve diğer uçtan soğutulur. Sıvı ve buhar damlası / kabarcığının akışı, cihazın içinde kabarcıkların oluşması ve çökmesi nedeniyle basınç darbesi ile pompalanır. Bu etki, ısı transferine neden olur. Salınlı ısı borusunda ısı transfer performansını artırmanın en etkili yöntemi duyulur ısı transferini artırmaktır. Duyulur ısı transfer verimliliğini etkileyen en önemli faktör ise çalışma sıvısının ısı iletkenliğidir.

Nanoakışkanlar, geleneksel ısı transfer sıvılarında nanometre boyutlu katı partiküllerin kararlı bir şekilde dağıtılmasıyla üretilen nanoteknoloji tabanlı ısı transfer sıvılarıdır. Nanopartikül, baz akışkandan daha yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir. Bu nedenle, nanoakışkan OHP'deki duyarlı ısı transferini etkili bir şekilde artırmaktadır. Birçok araştırmacı, nanoakışkanları kullanarak OHP'nin ısı transfer performansını artırmak için deneyler yapmıştır. Buna göre, bu çalışmaların çoğu nanoakışkanların OHP'nin ısı transfer performansını artırabildiğini göstermiştir.

Mikroelektronik ve uzay teknolojisinin hızla gelişmesi nedeniyle ayrıca küçük boyutlu ve yüksek verimli ısı dağıtım ürünlerine olan talep artmıştır. Titreşimli ısı borusu (PHP), basit yapısı, küçük boyutu, yüksek eşdeğer ısı transfer katsayısı ve düşük maliyeti nedeniyle bu amaçlar için büyük bir potansiyele sahiptir. Nanoakışkan kullanan PHP'lerin çalışma özelliklerinin araştırılması için çok fazla çalışma yapılmıştır. Sonuçlar nanoakışkanın PHP'lerin termal direncini önemli ölçüde azaltabildiğini göstermiştir.

Nanoakışkan kullanan salınlı/titreşimli ısı boruları ile yapılan deneysel çalışmalar Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Nanoakışkan kullanan ısı boruları üzerine teorik çalışmaların özeti

Yazar	Nanoakışkan	Yorumlar
Huminić <i>et al.</i> (2013)	Fe ₂ O ₃	Sayısal ve deneysel veriler, nanoakışkan kullanılarak ısı borusunun termal performansının artırılması konusunda iyi bir uyum içindedir.
Shafahi <i>et al.</i> (2010b)	Al ₂ O ₃ , CuO, TiO ₂	Nanopartiküller, düz şekilli ısı borusunun ısıl direncini azaltır, maksimum ısı yük kapasitesini artırır.
Tahery <i>et al.</i> (2010)	Al ₂ O ₃	Nanoakışkanlardaki dikey boşluklar, hem yatay hem de dikey sıvı tabakası için doğal konveksiyon sayısal modellemesinde daha iyi verime sahiptirler.
Vasu <i>et al.</i> (2008)	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ nanoakışkanının soğutma kapasitesi çok yüksektir.
Murugesan <i>et al.</i> (2010)	Al ₂ O ₃ , CuO TiO ₂	Partikül şekli, Brownian hareketi ve nanotabaka, nanoakışkanların termal iletkenliğini artırmada önemlidir.
Shafahi <i>et al.</i> (2010a)	Al ₂ O ₃ , CuO, and TiO ₂	Araştırmacılar, nanoakışkan kullanan ısı borusunun maksimum ısı transferi, termal direnç ve duvar sıcaklığı dağılımındaki değişikliği fark ettiler.

a: Isıl performans artmıştır

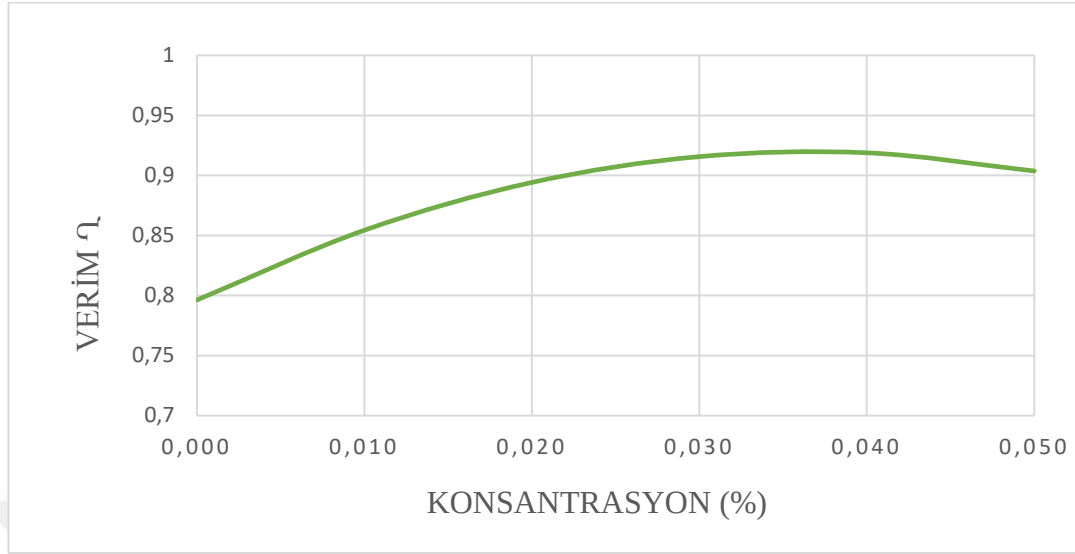
b: Isıl performans azalmıştır

-: Araştırmacılar istenilen değeri belirtmemişlerdir

Nanoakışkan kullanan ısı boruları üzerine yapılan sayısal araştırmaları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Nanoakışkan uygulanmasının HP’lerin termal performansını arttırdığı görülmektedir. Sayısal araştırmalar, deneysel çalışmalara kıyasla çok sınırlıdır ve kesin sonuçlara varmak için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, deneysel araştırma bulgularını doğrulamak için daha fazla sayısal araştırma gerekmektedir.

Çizelge 4.7. Araştırmacılar tarafından nanoakışkanlar kullanılarak yapılan çalışmalarda ısı borularının termal performansındaki değişiklikten sorumlu mekanizmaların / nedenlerin özeti

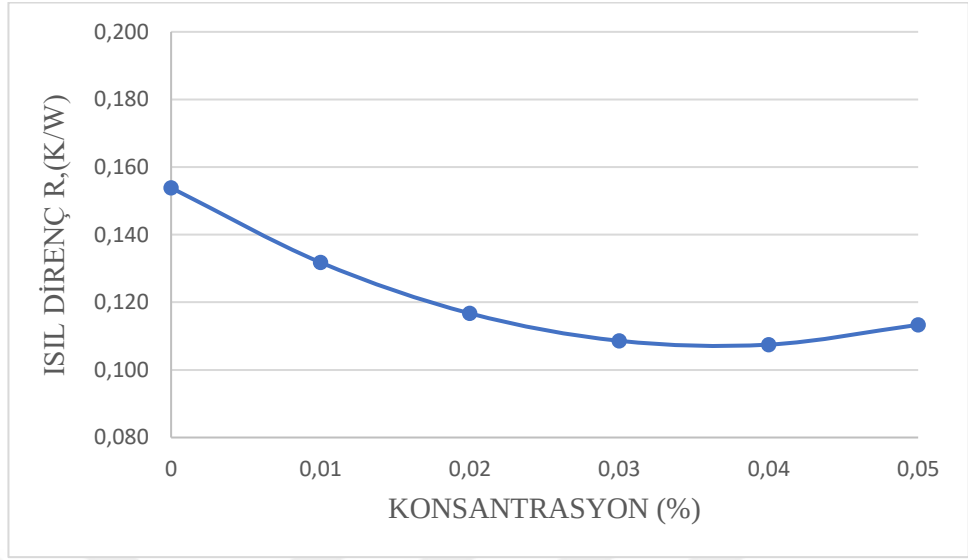
Numara	Isı Borusunun Isıl Performansındaki Değişikliğe Neden Olan Mekanizmalar/Nedenler
1	Nanoakışkanın gelişmiş termo fiziksel özellikleri (özellikle termal iletkenlik) ısı transferini arttırmıştır
2	Nanoakışkan ve ısı borusunun iç yüzeyi arasındaki temas açısındaki azalma, kılcal kuvveti ve yüzey ıslanabilirliğini arttırmıştır
3	Baz sıvıdaki nanopartiküllerin Brownian hareketi ısı transferini arttırmıştır
4	Nanopartiküllerin yüzeyde birikmesi, katı-sıvı arayüzeyinde kabarcık oluşumu sırasında buhar kabarcıklarını bombardıman ederek termal direnci azaltan yapay bir tabaka oluşturur.
5	Nanopartiküllerin birikmesi kabarcık oluşumunu, titreşim hareketini ve son olarak ısı verimliliği daha da arttıran çekirdekleşme bölgelerinin sayısını arttırmıştır.
6	Geliştirilmiş konvektif ısı transfer katsayısı ve kritik ısı akısı, ısı borusunun ısı girdisinin çalışma aralığını artırmıştır
7	İnce bir gözenekli tabaka oluşturarak buharlaştırıcıda artan ısı transfer alanı
8	Salınımlı / titreşimli ısı borularının ısı performansını artıran daha yüksek karışım dalgalanmaları
9	Optimum nanoakışkan konsantrasyonunun varlığı
10	Eğim açılarının (Yerçekimi etkisi) ısı borusunun ısı performansını üzerindeki etkisi
11	Viskozitedeki artış nedeniyle ısı borusunun ısı performansını azaltmıştır
12	Partiküller ve ısıtılmış yüzey arasında zayıf yapışma kuvvetlerine sahip topaklanmış partiküllerden oluşan bir örtünün oluşması nedeniyle, ısı borusunun ısı performansı düşmüştür



Şekil 4.1. Nanoakışkan konsantrasyona göre ısı borusu veriminin değişimi

Şekil 4.1 incelendiğinde nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça verimde artış olduğu ancak belli bir konsantrasyon değerinden sonra verimin düşmeye başladığı görülmektedir. Bu konsantrasyon optimum konsantrasyon değeridir. Yapılan birçok araştırmada en fazla verimin elde edildiği bir optimum konsantrasyon değeri bulunmuştur (Kang *et al.* 2006; Liu *et al.* 2007; Noie *et al.* 2009; Wang *et al.* 2010; Liu *et al.* 2010; Do *et al.* 2010a; Do *et al.* 2010b; Liu *et al.* 2011; Aly *et al.* 2017; Senthilkumar *et al.* 2012; Hajian *et al.* 2012; Sarfraz *et al.* 2014b; Irmak 2019).

Ayrıca; $\eta = -91,528 x^2 + 6,725 x + 0,7963$ olacak şekilde bir denklem elde edilmiştir. Bu denklem yaklaşık nanoakışkan konsantrasyon oranına bağlı olarak verim ifadesini vermektedir.



Şekil 4.2. Nanoakışkan konsantrasyona göre ısı borusu ısıl direncinin değişimi

Şekil 4.2 incelendiğinde nanoakışkan konsantrasyonu arttıkça ısıl direncin düştüğü görülmektedir. Belli bir konsantrasyon artışından sonra ise ısıl direncin artmaya başladığı görülmektedir. Farklı nanopartikül konsantrasyon seviyelerinin ısı borusu ısıl direnci üzerindeki etkisi daha önce yapılan çalışmalarda ele alınmıştır. (Tsai *et al.* 2004; Wei *et al.* 2005; Wang *et al.* 2010; Liu *et al.* 2010; Do *et al.* 2010b; Huminic *et al.* 2011; Senthilkumar *et al.* 2012; Yang *et al.* 2012; Asirvatham *et al.* 2013; Kamyar *et al.* 2013; Chen *et al.* 2013; Sarafraz *et al.* 2014; Sarfraz *et al.* 2014b; Ghanbarpour *et al.* 2015a; Aly *et al.*; Irmak 2019)

Ayrıca; $R = 34,896x^2 - 2,5555x + 0,1539$, bir denklem elde edilmiştir. Bu denklem yaklaşık nanoakışkan konsantrasyon orana bağlı olarak ısıl direnç ifadesini vermektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, nanoakışkanlı ısı boruları üzerinde yapılan çeşitli deneysel/sayısal araştırmaların sonuçları tartışılmıştır. Deneysel çalışmaların çoğu ısıl performansta artış gösterirken, çok azı da azalma göstermiştir. Isıl performanstaki artış veya azalma birçok deneysel koşullara bağlıdır. Deney koşulları arasında ısı borusu türleri, nanoakışkan özellikleri, ısı borularının tasarımı ve çalışma koşulları gibi farklı parametreler bulunmaktadır. Bu nedenle, çok sayıda deneysel koşul ve sonuçlardaki farklılık, ısı borularında mevcut nanoakışkan araştırmalarının yetersiz olduğunu ve daha fazla deneysel çalışma gerektirdiğini göstermektedir.

Mevcut literatürün sayısal araştırmaları nanoakışkanların uygulanmasının ısı borularının termal performansını artırdığını göstermektedir. Sayısal araştırmalar, deneysel çalışmalar ile kıyaslandığında kesin sonuçlara varmak için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, deneysel araştırma bulgularını doğrulamak için daha çok sayısal araştırmanın yapılması gerekmektedir.

Buharlaştırıcı yüzeyinde veya fitil yüzeyinde gözenekli nanopartikül tabakalarının birikmesi, ısı borularında kullanılan nanoakışkanlarla ilgili temel özelliklerden biri gibi görünmektedir. Farklı araştırmacılar aynı nanopartikülleri kullanarak iyileştirme ve bozulmaların nedenlerini açıklamaya çalışmışlardır. Statik temas açısının azalmasıyla, yüzey ıslanabilirliğini önemli ölçüde artıran bu tür katmanlarla ilgili genel etkiler Kim ve diğerleri (Kim *et al.* 2006) tarafından araştırılmıştır. Nanopartikül tabakasının yüzey enerjisi ve yüzey morfolojisinin değişmesi statik temas açısının azalmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte, bu deneyler daha karmaşık ısı borularında gerçekleştirilmemiştir. Nanopartiküllerden oluşan gözenekli tabaka ile ilgili hala cevaplanmamış sorular vardır. Bunlar arasında, bu tabakaların nanoakışkanlar olmadan inşa edilip edilemeyeceği ve bu tür yapay tabakaların çalışma akışkanı olarak kullanılan nanoakışkanların nanopartiküllerinin yenilenmeden sürdürülebilir olup olmayacağı soruları vardır. Solomon ve diğerleri (Solomon *et al.* 2012) bir fitili nanoakışkan içerisine daldırıp, sonrasında kurutarak nanopartiküllerle kaplamışlardır. Saf suyu çalışma sıvısı

olarak kullanarak termal direncin %19'a kadar azaldığını görmüşlerdir ancak bu konuda çok daha ayrıntılı deneylere ihtiyaç var.

Tüm deneysel / sayısal çalışmalar, ısı borularının termal performansını değiştiren parametreleri aşağıdaki şekilde sınıflandırabilir:

- Nanoakışkan parametreleri ile ilgili olan etkiler; ana akışkan, nanoakışkan hazırlama tekniği (tek adım veya iki adım yöntemi), nanopartikülün şekli, boyutu, malzemeleri, nanoakışkanın kararlılığı, konsantrasyon, yüzey gerilimi, termal iletkenlik, viskozite, özgül ısı, yoğunluk, vb.
- Isı borularının çalışma parametrelerine ilişkin etkiler; Dolum oranı, eğim açısı, güç girişi, emme basıncı vb.
- Tasarım parametreleri ile ilgili etkiler; Isı borusu tipi, malzemesi, buharlaştırıcı uzunluğu, adyabatik ve yoğunlaştırıcı bölümü, örgü / oluk özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, örgü duvarı pürüzlülüğü vb.
- Nanoakışkan ile ilgili etkiler; Yüzey pürüzlülüğü ile partikül boyutu oranı gibi ısı borusu etkileşimleri, partiküller ve ısıtılmış yüzey arasındaki yapışma kuvvetleri, ıslanma özelliklerinde değişiklik

Yapılan deneysel/sayısal çalışmaların incelenmesine dayalı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Çalışmaların çoğu doldurma oranının, eğim açısının ve çalışma sıcaklığının, nanoakışkanlarla çalışan ısı borularını geleneksel akışkanlarla çalışan ısı borularıyla aynı şekilde etkilediğini göstermiştir. Bununla birlikte, birkaç deney nanoakışkanlar için spesifik eğilimleri de göstermektedir.
- Nanopartikül boyutu, şekli, malzeme ve kimyasal stabilizasyonun termal performans üzerinde önemli bir etkisi vardır.
- Isı borularının konsantrasyondan bağımsız olarak termal performansının optimizasyonu, farklı baz sıvılarda dağılmış Ag, TiO₂ ve CuO nanopartikülleri için

bulunmuştur. Şaşırtıcı bir şekilde, H_2O / Al_2O_3 nanoakışkanları ile uğraşan birkaç bağımsız araştırma grubu tarafından ısı borularında optimum bulunmamıştır.

- Manyetik nanoakışkanlar ve karbon nanotüplü nanoakışkanlar ümit verici seçeneklerdir, çünkü karbon nanotüplerin ana eksen boyunca ek harici kuvvetlerin veya olağanüstü yüksek termal iletkenliğin uygulanması gibi ek etkilerin kullanılmasına izin verirler. Bununla birlikte, pratik kullanımdan hala uzaktırlar, çünkü çalışmaların sayısı, bu özel sıvıların ısı borularındaki davranışları hakkında güvenilir bilgi oluşturmak için çok daha azdır.
- Buharlaştırıcı sıcaklığında ciddi bir düşüş ya da buharlaştırıcı ısı transfer katsayısında artış deneysel sonuçların büyük kısmında görülmüştür.
- Çalışmaların çoğu, cihazın termal direncinde bir düşüş olduğunu göstermektedir. Dirençte azalmanın önemli bir bölümü buharlaştırıcıda meydana gelir. Ancak farklı nanoakışkanların etkilerini, ısı direnç sadece nanoakışkan özelliklerine bağlı olmayıp, aynı zamanda giriş ısısı, eğim açısı ve doldurma oranı ile ilişkili olduğundan, genellemek zordur.
- Yoğunlaştırıcı, bazı deneylerde güçlü etkiler saptansa da, birçok çalışmada nanoakışkanlardan hiç etkilenmemekte yada zayıf bir şekilde etkilenmektedir. Nanopartiküllerin çalışma sıvısından ayrılıp ayrılmadığı ve buhar fazı tarafından taşınıp taşınmadıkları sorusu hala açıktır.
- Birçok deneysel çalışma, nanopartiküllerle çalışan sıvıların, kurutma olmadan daha yüksek giriş güçlerinde çalışmaya izin verdiğini göstermektedir
- Nanoakışkanların uzun süreli kararlılığı ve bunların kullanıldığı aletlerin uzun süreli çalışma davranışları henüz ayrıntılı olarak araştırılmamıştır.

Özetlemek gerekirse nanoakışkanlar ısı borularında çalışma sıvıları olarak umut verici bir seçenektir. Şimdiye kadar yapılan deneysel çalışmaların çoğu, termal direncin düştüğünü ve bununla birlikte termal performansın önemli ölçüde iyileştiğini göstermiştir. Isı borularında çalışma sıvıları olarak kullanılan nanoakışkanların spesifik sorularını ele alan daha ayrıntılı deneylere ihtiyaç vardır.

KAYNAKÇA

- Albadr, J., Tayal, S. and Alasadi, M. (2013). Heat transfer through heat exchanger using Al₂O₃ nanofluid at different concentrations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 1(1), 38-44.
- Ali, N., Teixeira, J. A. and Addali, A. (2018) "A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties." *Journal of Nanomaterials* 2018, 1-33 DOI: 10.1155/2018/6978130.
- Alt, N. (2010). Tek kanallı ısı borusu ile çok kanallı ısı borusu verimlerinin karşılaştırılması Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi.
- Aly, W. I. A., Elbalshouny, M. A., Abd El-Hameed, H. M. and Fatouh, M. (2017). Thermal performance evaluation of a helically-micro-grooved heat pipe working with water and aqueous Al₂O₃ nanofluid at different inclination angle and filling ratio. *Applied Thermal Engineering*, 110(5 January 2017), 1294-1304.
- Anonymous (2017a). Nanoparticle dispersion. <https://www.sonicator.com/pages/nanoparticle-dispersion> (29.04.2020).
- Anonymous (2017b). Digital benchtop ultrasonic cleaners. <http://www.soniclean.com.au/products/digital-bench-top-cleaner> (29.04.2020).
- Arslan, G. (2007). Üç kolonlu titreşimli ısı borusunun matematiksel modellenmesi ve deneysel incelenmesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Arthur, O. and Karim, M. A. (2016). An investigation into the thermophysical and rheological properties of nanofluids for solar thermal applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55(March 2016), 739-755.
- Asirvatham, L. G., Nimmagadda, R. and Wongwises, S. (2013). Heat transfer performance of screen mesh wick heat pipes using silver–water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60(May 2013), 201-209.
- Atmaca, İ., Soylu, S. K., Samet, Ö. O. and Asiltürk, M. (2019). Nanoakışkanlar ve güneş enerjili sıcak su sistemlerinde kullanımı. 8. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, Yenişehir Belediyesi Atatürk Kültür Merkezi, Mersin.
- Azizian, R., Doroodchi, E. and Moghtaderi, B. (2016). Influence of controlled aggregation on thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 138(2), 021301.
- Babita, Sharma, S. K. and Gupta, S. M. (2016). Preparation and evaluation of stable nanofluids for heat transfer application: A review. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79(December 2016), 202-212.
- Bagheri, H., Zandi, O. and Aghakhani, A. (2011). Extraction of fluoxetine from aquatic and urine samples using sodium dodecyl sulfate-coated iron oxide magnetic nanoparticles followed by spectrofluorimetric determination. *Anal Chim Acta*, 692(1-2), 80-84.
- Bergles, A. E. (1998). The imperative to enhance heat transfer. *Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers*. S. Kakaç, A. E. Bergles, H. Mayinger and H. Yüncü. Dordrecht, Springer: 13-29.
- Brinkman, H. C. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, 20(4), 571-571.

- Bushehri, M. K., Mohebbi, A. and Rafsanjani, H. H. (2016). Prediction of thermal conductivity and viscosity of nanofluids by molecular dynamics simulation. *Journal of Engineering Thermophysics*, 25(3), 389-400.
- Chang, H., Jwo, C. S., Fan, P. S. and Pai, S. H. (2006). Process optimization and material properties for nanofluid manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(3-4), 300-306.
- Chen, L., Xie, H., Li, Y. and Yu, W. (2008). Nanofluids containing carbon nanotubes treated by mechanochemical reaction. *Thermochimica Acta*, 477(1-2), 21-24.
- Chen, Y.-j., Wang, P.-y. and Liu, Z.-h. (2013). Application of water-based SiO₂ functionalized nanofluid in a loop thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 56(1-2), 59-68.
- Choi, C., Yoo, H. S. and Oh, J. M. (2008). Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants. *Current Applied Physics*, 8(6), 710-712.
- Choi, S. U. S. and Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. ASME International mechanical engineering congress and exhibition and exposition, San Fransisco, CA.
- Chopkar, M., Sudarshan, S., Das, P. K. and Manna, I. (2008). Effect of particle size on thermal conductivity of nanofluid. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39(7), 1535-1542.
- Choudhary, R., Khurana, D., Kumar, A. and Subudhi, S. (2017). Stability analysis of Al₂O₃/water nanofluids. *Journal of Experimental Nanoscience*, 12(1), 140-151.
- Çakır, M. T. (2015). Improving The Efficiency Performance Of Heat Pipes Using Alumina Containing Nano-Fluids. *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(4), 547-556.
- Çaylıoğlu, E. and Akdemir, Ö. (2011). Isı borusu uygulamaları. *Soğutma Dünyası*, 2013-2011(51-53), 42-48.
- Çiftçi, E., Sözen, A. and Karaman, E. (2016). Experimental Investigation of Nano fluid Usage Including TiO₂ on The Effect of Heat Pipe Performance. *Politeknik Dergisi*, 19(3), 367-376.
- Das, S. K., Choi, S. U. S. and Patel, H. E. (2006). Heat transfer in nanofluids—a review. *Heat Transfer Engineering*, 27(10), 3-19.
- Demirpolat, A. B. (2018). Etilen Glikol Bazlı Nanoakışkanların Üretilmesi, Viskozite ve Termal Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.
- Dey, D., Kumar, P. and Samantaray, S. (2017). A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties. *Heat Transfer-Asian Research*, 46(8), 1413-1442.
- Do, K. H., Ha, H. J. and Jang, S. P. (2010a). Thermal resistance of screen mesh wick heat pipes using the water-based Al₂O₃ nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(25-26), 5888-5894.
- Do, K. H. and Jang, S. P. (2010b). Effect of nanofluids on the thermal performance of a flat micro heat pipe with a rectangular grooved wick. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(9-10), 2183-2192.
- Eggers, J. R. and Kabelac, S. (2016). Nanofluids revisited. *Applied Thermal Engineering*, 106(5 August 2016), 1114-1126.
- Einstein, A. (1906). Eine neue bestimmung der moleküldimensionen. *Annalen der Physik*, 324(12), 289-306.

- Einstein, A. (1956). Investigation on the theory of the brownian movement. Dover Publications,
- Gaugler, R. S. (1944). Heat transfer device. U.S. Patent 2: 350,348.
- Ghanbarpour, M., Nikkam, N., Khodabandeh, R. and Toprak, M. S. (2015a). Thermal performance of inclined screen mesh heat pipes using silver nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 67, 14-20.
- Ghanbarpour, M., Nikkam, N., Khodabandeh, R., Toprak, M. S. and Muhammed, M. (2015b). Thermal performance of screen mesh heat pipe with Al₂O₃ nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 66(September 2015), 213-220.
- Goshayeshi, H. R., Goodarzi, M. and Dahari, M. (2015). Effect of magnetic field on the heat transfer rate of kerosene/Fe₂O₃ nanofluid in a copper oscillating heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 68(November 2015), 663-668.
- Grove, G. M., Cotter, T. P. and Erikson, G. F. (1964). Structures of very high thermal conductivity. *Journal of Applied Physics*, 35(6), 1990-1991.
- Gunnasegaran, P., Abdullah, M. Z. and Shuaib, N. H. (2013). Influence of nanofluid on heat transfer in a loop heat pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47(October 2013), 82-91.
- Güngür, A. (1995). İklimlendirmede Enerji Geri Kazanımında Isı Borulu Isı Değiştiriciler. 2. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, İzmir.
- Hajian, R., Layeghi, M. and Abbaspour Sani, K. (2012). Experimental study of nanofluid effects on the thermal performance with response time of heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 56(April 2012), 63-68.
- Hamilton, R. L. and Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3), 187-191.
- Hashemian, M., Jafarmadar, S., Nasiri, J. and Sadighi Dizaji, H. (2017). Enhancement of heat transfer rate with structural modification of double pipe heat exchanger by changing cylindrical form of tubes into conical form. *Applied Thermal Engineering*, 118, 408-417.
- Heris, S. Z., Mohammadpur, F. and Shakouri, A. (2014). Effect of electric field on thermal performance of thermosyphon heat pipes using nanofluids. *Materials Research Bulletin*, 53, 21-27.
- Hızal, G., Aras, M., Sürücü, B., Akış, s. and Buğatekin, R. A. (2011). Isı borusu ile CPU soğutulması. *Meslek Seçmeli II Dönem Projesi*.
- Huminic, G. and Huminic, A. (2013). Numerical study on heat transfer characteristics of thermosyphon heat pipes using nanofluids. *Energy Conversion and Management*, 76, 393-399.
- Huminic, G., Huminic, A., Morjan, I. and Dumitrache, F. (2011). Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(1-3), 656-661.
- Ilyas, S. U., Pendyala, R. and Marneni, N. (2013). Settling characteristics of alumina nanoparticles in ethanol-water mixtures. *Applied Mechanics and Materials*, 372, 143-148.
- Ilyas, S. U., Pendyala, R. and Marneni, N. (2014). Preparation, sedimentation, and agglomeration of nanofluids. *Chemical Engineering & Technology*, 37(12), 2011-2021.

- Irmak, A.F., 2019. Termosifon Isı Borusunda Uçucu Kül/Su Nanoakışkanını Kullanarak Isı Transfer Performansının Artırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Jana, S., Salehi-Khojin, A. and Zhong, W.-H. (2007). Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. *Thermochimica Acta*, 462(1-2), 45-55.
- Ji, Y., Liu, G., Ma, H., Li, G. and Sun, Y. (2013). An experimental investigation of heat transfer performance in a polydimethylsiloxane (PDMS) oscillating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 690-697.
- Ji, Y., Ma, H., Su, F. and Wang, G. (2011). Particle size effect on heat transfer performance in an oscillating heat pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(4), 724-727.
- Jiang, L., Gao, L. and Sun, J. (2003). Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes. *Journal of Colloid and Interface Science*, 260(1), 89-94.
- Kamyar, A., Ong, K. S. and Saidur, R. (2013). Effects of nanofluids on heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 610-618.
- Kang, S.-W., Wei, W.-C., Tsai, S.-H. and Huang, C.-C. (2009). Experimental investigation of nanofluids on sintered heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 29(5-6), 973-979.
- Kang, S.-W., Wei, W.-C., Tsai, S.-H. and Yang, S.-Y. (2006). Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 26(17-18), 2377-2382.
- Keshavarz Moraveji, M. and Razvarz, S. (2012). Experimental investigation of aluminum oxide nanofluid on heat pipe thermal performance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(9), 1444-1448.
- Kim, K. M., Jeong, Y. S., Kim, I. G. and Bang, I. C. (2015). Comparison of thermal performances of water-filled, SiC nanofluid-filled and SiC nanoparticles-coated heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 862-871.
- Kim, S. J., Bang, I. C., Buongiorno, J. and Hu, L. W. (2006). Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids. *Applied Physics Letters*, 89(15), 153107.
- Kole, M. and Dey, T. K. (2013). Thermal performance of screen mesh wick heat pipes using water-based copper nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 763-770.
- Kong, L., Sun, J. and Bao, Y. (2017). Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids. *RSC Advances*, 7(21), 12599-12609.
- Kumaresan, G., Venkatachalapathy, S. and Asirvatham, L. G. (2014a). Experimental investigation on enhancement in thermal characteristics of sintered wick heat pipe using CuO nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 507-516.
- Kumaresan, G., Venkatachalapathy, S., Asirvatham, L. G. and Wongwises, S. (2014b). Comparative study on heat transfer characteristics of sintered and mesh wick heat pipes using CuO nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 208-215.
- Kutateladze, S. S. (1990). Heat transfer and hydrodynamic resistance, Moscow,

- Lee, S., Choi, S. U.-S., Li, S. and Eastman, J. A. (1999). Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. *Journal of Heat Transfer*, 121(2), 280-289.
- Li, X., Zhu, D. and Wang, X. (2007). Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions. *J Colloid Interface Sci*, 310(2), 456-463.
- Liu, Z.-H., Hu, R.-L., Lu, L., Zhao, F. and Xiao, H.-s. (2013). Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector. *Energy Conversion and Management*, 73, 135-143.
- Liu, Z.-H., Li, Y.-Y. and Bao, R. (2010). Thermal performance of inclined grooved heat pipes using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(9), 1680-1687.
- Liu, Z.-H. and Zhu, Q. (2011). Application of aqueous nanofluids in a horizontal mesh heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 292-300.
- Liu, Z.-H. L., Yuan-Yang Bao, Ran (2011). Compositive effect of nanoparticle parameter on thermal performance of cylindrical micro-grooved heat pipe using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(4), 558-568.
- Liu, Z.-h. X., Jian-guo Bao, Ran (2007). Boiling heat transfer characteristics of nanofluids in a flat heat pipe evaporator with micro-grooved heating surface. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(12), 1284-1295.
- Mahbubul, I. M., Elcioglu, E. B., Saidur, R. and Amalina, M. A. (2017). Optimization of ultrasonication period for better dispersion and stability of TiO₂-water nanofluid. *Ultrason Sonochem*, 37, 360-367.
- Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Azizian, R., Akhiani, A. R., Tahan Latibari, S., Mehrali, M. and Metselaar, H. S. C. (2016). Effect of nitrogen-doped graphene nanofluid on the thermal performance of the grooved copper heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 118, 459-473.
- Menlik, T., Sözen, A., Gürü, M. and Öztaş, S. (2015). Heat transfer enhancement using MgO/water nanofluid in heat pipe. *Journal of the Energy Institute*, 88(3), 247-257.
- Mirko Dinulović, B. R. (2009). Dielectric properties modeling of composite materials. *FME Transactions*, 37(3), 117-121.
- Mukherjee, S. and Paria, S. (2013). Preparation and stability of nanofluids-a review. *IOSR Journal of Mechanical and civil engineering*, 9(2), 63-69.
- Murugesan, C. and Sivan, S. (2010). Limits for thermal conductivity of nanofluids. *Thermal Science*, 14(1), 65-71.
- Nallusamy, S. (2016). Thermal conductivity analysis and characterization of copper oxide nanofluids through different techniques. *Journal of Nano Research*, 40, 105-112.
- Nan, C.-W., Birringer, R., Clarke, D. R. and Gleiter, H. (1997). Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance. *Journal of Applied Physics*, 81(10), 6692-6699.
- Neouze, M.-A. and Schubert, U. (2008). Surface modification and functionalization of metal and metal oxide nanoparticles by organic ligands. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*, 139(3), 183-195.
- Noie, S. H., Heris, S. Z., Kahani, M. and Nowee, S. M. (2009). Heat transfer enhancement using Al₂O₃/water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(4), 700-705.

- Özerinç, S., Kakaç, S. and Yazıcıoğlu, A. G. (2009). Enhanced thermal conductivity of nanofluids: A state of the art review. *Microfluidics and Nanofluidics*, 8(2), 145-170.
- Pak, B. C. and Cho, Y. I. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), 151-170.
- Peng, X. F., Yu, X. L., Xia, L. F. and Zhong, X. (2007). Influence factors on suspension stability of nanofluids. *Journal-Zhejiang University Engineering Science*, 41(4), 577-580.
- Putra, N., Septiadi, W. N., Rahman, H. and Irwansyah, R. (2012). Thermal performance of screen mesh wick heat pipes with nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 40, 10-17.
- Qu, J., Wu, H.-y. and Cheng, P. (2010). Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al_2O_3 -water nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(2), 111-115.
- Qu, J. and Wu, H. (2011). Thermal performance comparison of oscillating heat pipes with SiO_2 /water and Al_2O_3 /water nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(10), 1954-1962.
- Reay, D. A., Kew, P. A. and McGlen, R. J. (2014). *Heat pipes theory, design and applications*. Amsterdam, Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier,.
- Riehl, R. R. and Santos, N. d. (2012). Water-copper nanofluid application in an open loop pulsating heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 42, 6-10.
- Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Rosen, M. A., Akhiani, A. R., Tahan Latibari, S., Mehrali, M. and Metselaar, H. S. C. (2016). Experimental investigation of the effect of graphene nanofluids on heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 100, 775-787.
- Saleh, R., Putra, N., Prakoso, S. P. and Septiadi, W. N. (2013). Experimental investigation of thermal conductivity and heat pipe thermal performance of ZnO nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 63, 125-132.
- Sarafraz, M. M. and Hormozi, F. (2014a). Experimental study on the thermal performance and efficiency of a copper made thermosyphon heat pipe charged with alumina-glycol based nanofluids. *Powder Technology*, 266, 378-387.
- Sarafraz, M. M., Hormozi, F. and Peyghambarzadeh, S. M. (2014b). 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.
- Senthil, R., Ratchagaraja, D., Silambarasan, R. and Manikandan, R. (2016). Contemplation of thermal characteristics by filling ratio of Al_2O_3 nanofluid in wire mesh heat pipe. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), 1063-1068.
- Senthilkumar, R., Vaidyanathan, S. and Sivaraman, B. (2012). Effect of inclination angle in heat pipe performance using copper nanofluid. *Procedia Engineering*, 38, 3715-3721.
- Setia, H., Gupta, R. and Wanchoo, R. K. (2013). Stability of nanofluids. *Materials Science Forum*, 757, 139-149.
- Shafahi, M., Bianco, V., Vafai, K. and Manca, O. (2010a). An investigation of the thermal performance of cylindrical heat pipes using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3), 376-383.

- Shafahi, M., Bianco, V., Vafai, K. and Manca, O. (2010b). Thermal performance of flat-shaped heat pipes using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(7-8), 1438-1445.
- Singh, A. K. and Raykar, V. S. (2008). Microwave synthesis of silver nanofluids with polyvinylpyrrolidone (PVP) and their transport properties. *Colloid and Polymer Science*, 286(14-15), 1667-1673.
- Solomon, A. B., Ramachandran, K. and Pillai, B. C. (2012). Thermal performance of a heat pipe with nanoparticles coated wick. *Applied Thermal Engineering*, 36, 106-112.
- Su, X., Zhang, M., Han, W. and Guo, X. (2016). Experimental study on the heat transfer performance of an oscillating heat pipe with self-rewetting nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 100, 378-385.
- Suganthi, K. S. and Rajan, K. S. (2017). Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 226-255.
- Şahin, F. and Namli, L. (2018). Nanoakışkanlarda Kararlılığın Isı Transferini İyileştirme Açısından Önemi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 880-898.
- Tahery AA, P. S., Zehforoosh A (2010). Numerical study of heat transfer performance of homogenous nanofluids under natural convection. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 1(1), 49-54.
- Tanshen, M. R., Munkhbayar, B., Nine, M. J., Chung, H. and Jeong, H. (2013). Effect of functionalized MWCNTs/water nanofluids on thermal resistance and pressure fluctuation characteristics in oscillating heat pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 48, 93-98.
- Taslimifar, M., Mohammadi, M., Afshin, H., Saidi, M. H. and Shafii, M. B. (2013). Overall thermal performance of ferrofluidic open loop pulsating heat pipes: An experimental approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 65, 234-241.
- Tawfik, M. M. (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239-1253.
- Trefethen, L. (1962). On the surface tension pumping of liquids or a possible role of the candlewick in space exploration. *G. E. Tech. Info., Ser. No. 615 D114*.
- Tsai, C. Y., Chien, H. T., Ding, P. P., Chan, B., Luh, T. Y. and Chen, P. H. (2004). Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance. *Materials Letters*, 58(9), 1461-1465.
- Vafai, K. and Wang, W. (1992). Analysis of flow and heat transfer characteristics of an asymmetrical flat- plate heat pipe. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35(9), 2087– 2099.
- Vasu, V., Krishna, K. and Kumar, A. (2008). Application of nanofluids in thermal design of compact heat exchanger. *Int J Nanotechnol Appl*, 2(1), 75-78.
- Vijayakumar, M., Navaneethakrishnan, P., Kumaresan, G. and Kamatchi, R. (2017). A study on heat transfer characteristics of inclined copper sintered wick heat pipe using surfactant free CuO and Al₂O₃ nanofluids. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 81, 190-198.
- Wang, G.-S., Song, B. and Liu, Z.-H. (2010). Operation characteristics of cylindrical miniature grooved heat pipe using aqueous CuO nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8), 1415-1421.

- Wang, P.-Y., Chen, X.-J., Liu, Z.-H. and Liu, Y.-P. (2012). Application of nanofluid in an inclined mesh wicked heat pipes. *Thermochimica Acta*, 539, 100-108.
- Wei, W. C., Tsai, S. H., Yang, S. Y. and Kang, S. W. (2005). Effect of nanofluid on heat pipe thermal performance. 3rd IASME / WSEAS Int. Conf. on Heat Transfer, Thermal Engineering And Environment, Corfu, Greece.
- Wei, X. and Wang, L. (2010). Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nanofluids. *Particuology*, 8(3), 262-271.
- Wen, D. and Ding, Y. (2004). Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(24), 5181-5188.
- Wu, J. M. and Zhao, J. (2013). A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement—Research gap to engineering application. *Progress in Nuclear Energy*, 66, 13-24.
- Wyatt, T. (1963). Satellite temperature stabilization system. Early development of spacecraft heat pipes for temperature stabilization. U.S. Patent No. 3,152,774 (October 13, 1964), application was filed June 11, 1963.
- Xuan, Y. and Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58-64.
- Yang, X.-F. and Liu, Z.-H. (2012). Flow boiling heat transfer in the evaporator of a loop thermosyphon operating with CuO based aqueous nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(25-26), 7375-7384.
- Yimin Xuan, W. R. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 3701-3707.
- Yu, W. and Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Yozgat'ta doğdu. İlkokulu Yozgat Sakarya İlkokulu'nda, ortaokul ve liseyi Yozgat Anadolu Lisesi'nde tamamladı.1998 yılında girdiği Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2002 yılında mezun oldu.2004-2009 yılları arasında Türkiye Şeker Fabrikaları A.Ş.'de çalıştı. 2009 yılında Sanayi ve Teknoloji Bakanlığında Sanayi ve Teknoloji Uzman Yardımcısı olarak işe başladı. 2013 yılında hazırladığı uzmanlık tezini vererek Sanayi ve Teknoloji Uzmanı olarak atandı. Halen, 2016 yılında eş durumu tayiniyle mühendis olarak atandığı Erzurum Sanayi ve Teknoloji İl Müdürlüğü'nde görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk annesidir.