



ISI GERİ KAZANIM ÜNİTELERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMI

İpek AYTAÇ

DOKTORA TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2020

İpek AYTAÇ tarafından hazırlanan “ISI GERİ KAZANIM ÜNİTELERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adnan SÖZEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Şerafettin EREL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ataollah KHANLARI

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Türk Hava Kurumu Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 09/06/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İpek AYTAÇ

09/06/2020

ISI GERİ KAZANIM ÜNİTELERİNDE NANOAKIŞKAN KULLANIMI
(Doktora Tezi)

İpek AYTAÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2020

ÖZET

Atık ısı geri kazanım üniteleri, endüstriyel ve atık ısı tesislerinde ihtiyaç duyulan temiz havanın ön ısıtılmasında yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Bu çalışmada; ısı değiştiricisi ısı borusu demetinden oluşan bir ısı geri kazanım ünitesinin performansının nanoakışkan kullanılarak iyileştirilmesi ve böylece ısı geri kazanım ünitesinin çalışma sıcaklık aralığının arttırılması amacıyla kurulan deney düzeneği üzerinde uygulamalı bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın özgün yanı; ısı değiştiricisi olarak kullanılan ısı borularında çalışma akışkanı olarak, son yıllarda pek çok uygulamada yer bulan nanoakışkanların kullanılmış olmasıdır. ZnO/Su ve ZnOAl₂O₃/Su nanoakışkanları ısı borularında çalışma akışkanı olarak kullanılmış ve temel akışkan olan saf suya göre ısı geri kazanım ünitesi ısı performansındaki ve ısıl direncindeki iyileşme oranları belirlenmeye çalışılmıştır. Saf su yerine nanoakışkanların kullanılması ile bütün Reynolds sayılarında ısı geri kazanım ünitesinin ısı performansında iyileşme sağlanmıştır. Her bir Re değerindeki ZnOAl₂O₃/Su nanoakışkanının ısıl performansı ve ısıl direnci iyileştirme oranının ZnO/Su nanoakışkanına kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Soğuk hava bölgesinde (kondenser), soğuk hava hızı 0,437 m/s ve Re=7100 olduğunda ZnOAl₂O₃/Su ve ZnO/Su nanoakışkanları için sırasıyla %90 ve %80 oranında iyileşme elde edilmiştir. Re değeri 12000 ve soğuk hava hızı 0,751 m/s olduğunda, temel akışkana (saf suya) göre ZnOAl₂O₃/Su ve ZnO/Su nanoakışkanları için maksimum dirençte iyileşmeler elde edilmiştir. Bu değerler; ZnOAl₂O₃/Su nanoakışkanında %77.6 ve ZnO/Su nanoakışkanında ise %72.1' dir.

Bilim Kodu : 91412
Anahtar Kelimeler : Isı borusu, Isı geri kazanım, Nanoakışkan, Termosifon
Sayfa Adedi : 96
Danışman : Prof. Dr. Adnan SÖZEN

USE OF NANOFLUID IN HEAT RECOVERY UNITS

(Ph. D. Thesis)

İpek AYTAÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2020

ABSTRACT

Waste heat recovery units are widely used systems for preheating the fresh air needed in industrial and waste heat plants. In this study, in order to improve the performance of a heat recovery unit consisting of a heat exchanger heat pipe bundle using nanofluid and thus to increase the working temperature range of the heat recovery unit, an applied study has been performed on the experimental setup. The original aspect of the study, the nanofluids used in many applications in recent years have been used as working fluids in heat pipes. ZnO/Water and ZnOAl₂O₃/Water nanofluids are used as working fluid in heat pipes. According to pure water, which is the base fluid, the recovery rates of heat recovery unit thermal performance and thermal resistance were tried to be determined. With the use of nanofluids instead of pure water, an improvement in the thermal performance of the heat recovery unit was achieved in all Reynolds numbers. The thermal performance and thermal resistance improvement rate of ZnOAl₂O₃/Water nanofluid at each Re value was found to be higher compared to ZnO/Water nanofluid. In the cold duct zone (condenser), when the cold air velocity was 0,437 m/s and Re=7100, 90% and 80% improvement was achieved for ZnOAl₂O₃/Water and ZnO/Water nanofluids, respectively. When the value of Re is 12000 and the cold air velocity is 0,751 m/s, improvements in maximum resistance were obtained for ZnOAl₂O₃/Water and ZnO/Water nanofluids compared to the base fluid. These improvement rates; 77.6% for ZnOAl₂O₃/Water nanofluid and 72.1% for ZnO/Water nanofluid.

Science Code : 91412

Key Words : Heat pipe, Heat recovery, Nanofluid, Thermosiphon

Page Number : 96

Supervisor : Prof. Dr. Adnan SÖZEN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında sonsuz sabrı ile ilgi ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sn. Prof. Dr. Adnan SÖZEN'e şükran ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez hazırlık sürecinde yardım ve katkılarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki kıymetli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım. Hayatımda paha biçilmez emekleri ve destekleri olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. ISI BORUSU	13
3.1. Isı Borusu Tanımı.....	13
3.2. Isı Borusu Çalışma Prensibi	15
3.3. Isı Borusu Temel Bileşenleri.....	16
3.4. Yerçekimi Destekli Isı Borusu (Çift Fazlı Kapalı Termosifonlar).....	19
4. HAVADAN HAVAYA ISI GERİ KAZANIM ÜNİTELERİ	21
4.1. Havadan Havaya Isı Değiştiricisi Tipleri	21
4.1.1. Plakalı ısı geri kazanım üniteleri ve uygulamaları.....	21
4.1.3. Bataryalı ısı geri kazanım üniteleri ve uygulamaları	24
4.1.4. Isı borulu ısı geri kazanım üniteleri ve uygulamaları	24
5. NANOAKIŞKAN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ	27
5.1. Nanoakışkan Türleri.....	29
5.1.1. Tek tip nano partikülden oluşan nanoakışkanlar.....	30
5.1.2. Hibrid tip nanoakışkanlar	30

	Sayfa
5.2. Nanoakışkan Hazırlama Yolları	30
5.2.1. İki adımlı yöntem	30
5.2.2. Tek adımlı yöntem	31
5.3. Nanoakışkanların Kararlılığı	32
5.3.1. Nanoakışkanların kararlılıkları değerlendirilirken kullanılan yöntemler	33
5.3.2. Nanoakışkanların kararlılığını arttırmak için kullanılan yöntemler.....	35
5.4. Nanoakışkanların Yaygın Olarak Kullanıldıkları Alanlar	37
5.5. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri	38
5.5.1. Isıl iletkenlik	38
5.5.2. Viskozite değeri	41
5.5.3. Yoğunluk ve özgül ısı	42
5.5.4. Yüzey gerilim faktörü	42
6. MATERYAL METOT	45
6.1. Deneysel Çalışma.....	45
6.1.1. Nanoparçacık üretimi ve nanoakışkanların hazırlanması	48
6.1.2. Nanoakışkanların ısı geri kazanım ünitesi performansına etkisinin incelenmesi	52
6.2. Deneysel Yöntem ve Ekipmanlar.....	53
6.2.1. Deney düzeneği.....	53
6.2.2. Isı değiştiricisi tasarımı	57
6.2.3. Deneylerde kullanılan yardımcı araç ve gereçler.....	58
6.3. Deneyin Yapılışı.....	66
6.3.1. Termofiziksel özelliklerin hesaplanması	68
6.3.2. Teorik analiz ve hesaplamalar.....	68
6.3.3. Deney düzeneğindeki ölçme belirsizlikleri.....	70
6.3.4. İyileşme yüzdesi.....	72

	Sayfa
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	75
7.1. Isı Geri Kazanım Ünitesi Isı Değiştiricisinin Isıl Performansları	76
7.2. Isı Geri Kazanım Ünitesi Performans Deney Sonuçları	78
7.2.1. Sıcak akışkan bölgesi (evaporatör bölgesi) akışların performansa etkisi	79
7.2.2. Soğuk akışkan bölgesi (kondenser bölgesi) akışların performansa etkisi	81
8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ	85
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Akışkanın buharlaştırıcı bölgesine dönebilmesi için uygulanan kuvvetler	14
Çizelge 3.2. Bazı çalışma akışkanları ve boru malzemesinin uyumluluk verileri	17
Çizelge 3.3. Isı borularında kullanılan çalışma sıvıları.....	19
Çizelge 6.1. Bazı katı ve sıvı akışkanların termal iletkenlik katsayıları	46
Çizelge 6.2. Ultrasonik banyonun özellikleri	50
Çizelge 6.3. Anemometre teknik özellikleri	60
Çizelge 6.4. Elimko E 680 Datalogger teknik özellikleri	62
Çizelge 6.5. Radyal salyangoz fan teknik özellikleri.....	64
Çizelge 6.6. ACS 150 motor kontrol sürücüsü teknik özellikleri.....	65
Çizelge 6.7. Isı borularının fiziksel özellikleri.....	67
Çizelge 6.8. Deneylerde kullanılan hava hızları ve debileri	67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Isı borusu çalışma prensibi şematik gösterimi.....	15
Şekil 4.1. Plakalı ısı değiştiricisinde plakaların kenetlenmeleri ve plakaların önden görünüşü	22
Şekil 4.2. Döner tip ısı değiştiricisi şematik gösterimi	23
Şekil 4.3. Bataryalı ısı geri kazanım ünitesi bağlantı şeması ve bataryalı sistemin gerçek görüntüsü.....	24
Şekil 4.4. Isı borulu ısı geri kazanım ünitesi şematik görünümü.....	25
Şekil 5.1. Taban sıvısı içindeki nano parçacıkların görünümü.....	27
Şekil 5.2. Nanoakışkan hazırlamada iki adımlı yöntem akış şeması	31
Şekil 5.3. Nanoakışkan hazırlamada tek adımlı yöntem.....	32
Şekil 5.4. Brownian hareketinin şematik görünümü.....	39
Şekil 5.5. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen parametreler şeması	39
Şekil 6.1. Bazı katı ve sıvıların grafiksel olarak ısı iletkenlik karşılaştırmaları (MY: Makina yağı, EG: Etilen glikol)	47
Şekil 6.2. Nanoakışkan hazırlama şeması.....	51
Şekil 6.3. ZnO parçacık boyutu dağılım eğrisi	51
Şekil 6.4. ZnOAl ₂ O ₃ parçacık boyutu dağılım eğrisi.....	52
Şekil 6.5. Deney düzeneğinin şematik görünümü	55
Şekil 6.6. Deney düzeneğinin ve ısı değiştiricisinin üç boyutlu yazıcıdan çıkartılmış modelinin görüntüleri	56
Şekil 6.7. Isı borularından oluşan ısı değiştiricisi demetinin şematik gösterimi	58
Şekil 7.1. $Re_{sıcak}=12000$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları	77
Şekil 7.2. $Re_{sıcak}=8800$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları	77
Şekil 7.3. $Re_{soğuk}=11500$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları	78

Şekil	Sayfa
Şekil 7.4. $Re_{soğuk}=6500$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları	78
Şekil 7.5. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdelerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi	79
Şekil 7.6. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı direnç ve iyileşme yüzdelerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi	80
Şekil 7.7. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdelerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi	82
Şekil 7.8. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısı direnç ve iyileşme yüzdelerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi	83

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Isı borusu	13
Resim 3.2. Fitilli ısı borusu görüntüsü.....	18
Resim 4.1. Döner (tamburlu) tip ısı geri kazanım cihazı ve ısı değiştirici kesit alanı	23
Resim 5.1. Çeşitli nano parçacıklara ait elektron mikroskobu görüntüleri	28
Resim 5.2. (a) Al_2O_3 nano parçacıklarının SEM mikroskobu görüntüleri ve (b) ZnO nano parçacıklarının SEM mikroskobu görüntüleri	35
Resim 6.1. Spex-8000M bilyalı öğütücü	49
Resim 6.2. ISOLAB Ultrasonik banyo ve nanoakışkan hazırlama görüntüleri	50
Resim 6.3. Deney düzeneği ile ilgili genel bilgiler.....	54
Resim 6.4. Deney düzeneğinin genel görüntüsü.....	55
Resim 6.5. Isı borularından oluşan ısı değiştiricisi demetinin farklı açılardan gösterimi	58
Resim 6.6. Anemometre	59
Resim 6.7. K tipi termokupl (ısı çifti).....	61
Resim 6.8. Soğuk hava kanalı giriş ve çıkışındaki termokupl bağlantıları gösterimi.....	61
Resim 6.9. Datalogger ve termokuplların bağlantı görüntüsü	62
Resim 6.10. Elektrikli rezistansların çalışma durumları.....	63
Resim 6.11. Motor kontrol sürücüsü bağlantısı ve radyal salyangoz fan	64
Resim 6.12. ABB ACS 150 motor kontrol sürücüsü	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Kanal alanı (m^2)
C_p	Özgül ısı ($kcal/kg^{\circ}C$)
D	Boru çapı (m)
$\dot{m}$	Akışkan kütleli debi (kg/s)
$\Delta\eta$	Sistem iyileşmesi
μ	Akışkanın dinamik viskozitesi (kg/ms)
η	Isıl verim
ΔT	Sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
$\dot{Q}$	Isı borusuna verilen ısı (W)
$\dot{Q}_E$	Evaporatör bölgesinden ısı transfer miktarı (W)
$\dot{Q}_K$	Kondenser bölgesinden ısı transfer miktarı (W)
ρ	Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
R	Isıl direnç ($\frac{^{\circ}C}{W}$)
Re	Reynolds sayısı
$T_{sıcak\ giriş}$	Hava kanalına giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
$T_{sıcak\ çıkış}$	Hava kanalından çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
u	Akışkanın hızı (m/s)
V_{bg}	Hava hızı (m/s)
ZnO	Çinko oksit
$ZnOAl_2O_3$	Çinko spinel

Kısaltmalar	Açıklamalar
bg	Baca gazı
CNT	Karbon nano tüp

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
E	Evaporatör
EÇ	Isı değiştiricisi evaporatör çıkışı
EG	Isı değiştiricisi evaporatör girişi
EGKH	Enerji geri kazanımlı havalandırma cihazlarıdır
F	Belirsizlik analizinde hesaplanması istenilen büyüklük
GDT	Geçici düzlem kaynağı yöntemi
GST	Geçici sıcak tel yöntemi
I	Isıl verim
İÇ	Isıtıcı çıkışı
IGK	Isı geri kazanım
IGKH	Isı geri kazanımlı havalandırma cihazları
K	Kondenser
KÇ	Isı değiştiricisi kondenser çıkışı
KG	Isı değiştiricisi kondenser girişi
SEM	Tarama elektron mikroskobu
SS	Sıcaklık salınım tekniği
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
TPCT	İki fazlı kapalı termosifon
W_F	Belirsizlik analizinde toplam hata oranı

1. GİRİŞ

Enerji, ülkelerin sosyoekonomik kalkınmasının en önemli girdilerinin başında gelmektedir. Enerji kaynakları, ekonomik ve sosyal kalkınma açısından oldukça önemlidir. İnsanların enerji kaynaklarına olan talebi ve enerji tüketimi Endüstri Devrimi ile artış göstermiş ve bu artış; nüfus artışı, sanayileşme ve şehirleşme ile birlikte günümüzde de devam etmiştir. Dünyada ihtiyaç duyulan bu enerjinin büyük bir kısmı fosil kaynaklardan elde edilmektedir. Fosil yakıt kaynakları günlük yaşantımız içerisinde her alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Enerji ihtiyacı yıldan yıla yaklaşık %4-5 oranında artmakta, bununla birlikte söz konusu enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamak için kullanılan fosil yakıt rezervi hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu sorunu çözebilmek ve de mevcut enerji kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılabilmesini sağlamak amacıyla, teknolojik yenilikler ve gelişmeler bakımından daha gelişmiş olan dünya ülkeleri yeni kaynak arayışlarına ve çalışmalarına yönelerek bu konuyu geliştirmeye odaklanmışlardır. Enerji konusunda gelişmiş ve gelişmekte olan diğer ülkeler ile rekabet edebilmenin sağlanması için enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılması da büyük önem kazanmıştır.

Enerjinin verimli kullanılmasının, dünya geneline sağlayacak sayısız faydalarının yanında, sanayi sektörünün enerji giderlerinin ve çevre kirliliğinin azaltılmasına da önemli ölçüde katkı sağlayacağı apaçık ortadadır. Bu nedenle, küresel kapsamda enerjinin verimli kullanılması alanında yapılan çalışmalar büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte hem günlük yaşamımızda kullandığımız teknolojik ürünlerde hem de endüstride kullanılan ısı değiştiricilerde, ısı borularında ve ısı geri kazanım ünitelerinde ısı transferini iyileştirmeye ve performansın artırılmasına yönelik araştırmalar yaygınlaşmış ve bu konuda dikkate değer çalışmalar yapılmıştır [2].

Günümüzde önem kazanan Isı transferini iyileştirme çalışmaları, endüstriyel alanda ve enerji tasarrufu açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Konvansiyonel ısı transferi akışkanlarının (su, yağ, etil alkol, hava gibi), endüstriyel, iklimlendirme, ısıtma ve soğutma, elektronik vb. alanlarda kullanımı önemli rol oynamaktadır. Fakat ısı transferinde kullanılan bu geleneksel iş akışkanlarının düşük ısı transferi özellikleri verimlilik açısından karşılaşılan büyük engellerden biridir [3]. Bu amaçla kullanılan akışkanların ısı iletimlerini yükseltmek amacıyla çeşitli yöntemler denenmiştir. Bundan yola çıkarak geliştirilen konvansiyonel akışkanların içerisine nano boyuttaki katı parçacıklar eklenmek suretiyle oluşturulan

akışkanlar, geleneksel akışkanlara kıyasla üstün ısı transferi potansiyeline ve ısı transferi verimini arttırma konusunda da önemli bir role sahip olmuşlardır. Nano boyutta katı partikül içeren bu iş akışkanlarına nanoakışkan adı verilmektedir.

Isı boruları; vakumlandıktan sonra içerisine bir miktar akışkanın şarj edilerek hazırlandığı, evaporatör, adyabatik ve kondenser bölgesi olarak adlandırılan üç temel kısımdan oluşan bir çeşit ısı transfer cihazıdır. Evaporatör bölgesine buharlaştırıcı bölgesi de denilip burada dışarıdan alınan ısı absorbe edilir. Dış ortama doğru ısı transferinin meydana geldiği bölge kondenser veya yoğunlaştırıcı, hiçbir ısı alışverişinin olmadığı ortadaki nötr bölge ise adyabatik kısım olarak adlandırılır. Isı geri kazanımı için çeşitli ısı değiştiricileri kullanılmakta ve yaygın olarak da son yıllarda ısı borulu ısı geri kazanım üniteleri tercih edilmektedir.

Yapılan bu çalışmada; geleneksel çalışma akışkanına çeşitli yöntemlerle nano boyutta farklı metal oksit parçacıkları eklenerek oluşturulmuş nanoakışkanlar ile ısı iletkenlik ve ısı performansın iyileştirilmesi, sonuç olarak ısı verimin de arttırılması amaçlanmıştır. Geliştirilen bu çalışma akışkanları sayesinde akışkan içerisine yayılmış partiküller akışkanın yüzey alanını ve ısıyı tutma kapasitesini arttırır. Böylece sistemin ısı transferi kapasitesinde artış sağlanmış olur [4]. Ayrıca ısı geri kazanım ünitesine, düşük sıcaklığa sahip olan atık ısıdan yararlanabilme özelliğinin kazandırılması hedeflenmiştir.

Bu tezin amacı, havadan havaya ısı geri kazanım ünitelerinde farklı çalışma akışkanları kullanılarak ısı geri kazanım performanslarının incelenmesidir dolayısıyla nanopartikül içeren çalışma sıvısının ısı transferini geliştirerek ısı performansın iyileştirilmesi için deneysel bir çalışma yapmaktır. Bundan yola çıkılarak kurulan deney düzeneği ile yapılan deneyler sonucunda, belirli sıcaklık aralıklarında, farklı ısı güçlerinde, farklı soğutma havası debilerinde ve evaporatör bölgesi farklı giriş sıcaklığındaki değişik hava hızlarında kullanılan sıvılar arasındaki verimlilik karşılaştırmaları gözlemlenmiştir. Deneysel veriler her bir hız kademesindeki çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre ısı borulu ısı değiştiricisinin performans verileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla bu tez; birinci bölümde giriş, ikinci bölümde literatür taraması, üçüncü bölümde ısı borusu, dördüncü bölümde havadan havaya ısı geri kazanım üniteleri hakkında bilgi sunmakta, beşinci bölümde nanoakışkan tanımı ve genel özellikleri, altıncı bölümde materyal ve metot başlığı altında deneysel çalışma, deney düzeneği ve yapılışı hakkında ayrıntılı bilgi verilmekte,

yedinci bölümde deneysel sonuçlar ve tartışma, sekizinci bölümde de değerlendirme ve sonuç kısmı yer alacak şekilde düzenlenmiştir.

Literatüre bakıldığında nanoakışkanların, ısı geri kazanım ünitelerinin verim iyileştirilmesi konusunda kullanılması ile ilgili yapılan çok fazla araştırma bulunmamaktadır. Fakat günümüzde nano parçacıkların ısı transferi iyileştirmesi ile ilgili çalışmalar artarak devam etmektedir. Literatürdeki bu boşluğu kapatmak ve alternatif iş akışkanları konusundaki çalışmalara katkı sağlamak amacıyla yapılan bu çalışmanın literatüre katkısı, havadan havaya ısı geri kazanım ünitelerinde çinko oksit (ZnO)/su ve çinko spinel (ZnOAl_2O_3)/su nano akışkanları kullanılarak ısı performansın artırılmasıdır. ZnO/su, ZnOAl_2O_3 /su nanoakışkanları ve saf su ile yapılan deneylerde kaydedilen verilere göre grafiksel olarak Reynolds sayıları ile verim ve iyileşme karşılaştırılması yapılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Sürekli değişen ve ilerleyen teknoloji ile birlikte küresel ısınma probleminin daha çok gün yüzüne çıkması sonucunda taze havaya ihtiyaç duyulan ortamlarda havalandırma yaparken çevreye duyarlı ve enerji tasarrufu sağlayan ısı geri kazanım ünitelerinin ısıtma – soğutma ve iklimlendirme sektöründe önemi git gide artmaktadır.

Çalışmanın bu kısmında; ısı transferinin artırılmasına etki eden nanoakışkanlar, ısı boruları, ısı değiştiricileri ile ilgili literatürde bulunan önemli çalışmalar özetlenmiş olarak anlatılacaktır.

Isı boruları ve burada kullanılan çalışma akışkanları ile ilgili birçok teorik çalışma ve deneysel olarak yapılan uygulamaların literatür özetleri aşağıda verilmiştir.

Choi, nanometre boyutlarında tanecik içeren çalışma sıvılarını nano akışkan olarak tanımlayan ilk araştırmacı olarak bilinir. Choi vd., saf su, makina yağı, etilen glikol ve sıvı vakum pompası içine dağılan Al_2O_3 , ve Cu nano parçacıklarını kullanarak akışkanların termal iletkenliğini test etmişlerdir. Deneysel sonuçlar, nano parçacıklı akışkan karışımlarının termal iletkenliklerinin baz sıvısına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir [5].

Alizad vd., yaptıkları çalışmada nanoakışkanlar kullanarak düz yassı şeklindeki ısı borularının ısı performanslarını, geçici davranışları ve operasyonel başlangıç özelliklerini analiz etmişlerdir. Analizlerinde CuO, Al_2O_3 ve TiO_2 olmak üzere üç farklı birincil nanoakışkan kullanarak, ısı borusu çeperi içindeki ısı transfer özelliklerini, kondenser ve evaporatör bölümleri içindeki fitili detaylı olarak açıklayan kapsamlı bir analitik model oluşturmuşlardır. Sonuçlar, belirli süreç boyunca hem düz plaka hem de disk şeklindeki ısı boruları için ısı dirençte bir azalma sağlarken, ısı borusu performansındaki gelişmeyi göstermişlerdir. Nano parçacıkların daha yüksek konsantrasyonlarının, yassı plakanın veya disk şeklindeki ısı borularının termal performansını arttırabileceğini göstermişlerdir [6].

Han vd., çalışma akışkanı olarak %0,25 ve %0,5 konsantrasyonlu Al_2O_3 nanoakışkanı kullanarak, çift tüplü ısı değiştiricisi içinde farklı giriş sıcaklıklarındaki ısı transferi performansını geliştirmek üzere nanoakışkan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç

olarak ısı transferinin, nano partiküllerin hacim ve sıcaklık konsantrasyonlarındaki artış ile arttığı gözlemlenmiştir [7].

Anoop vd., endüstriyel tip ısı eşanjörlerinde nanoakışkanların termal performanslarını incelemiştir. %2, %4 ve %6 oranlarındaki silikon dioksit-su (SiO_2 -su) nanoakışkanlarının üç kütle parçacık konsantrasyonunu, 20 nm çapındaki nano parçacıkların damıtılmış su içinde dağıtılmasıyla formüle etmişlerdir. Laboratuvar ölçekli plaka, kabuk ve borulu ısı eşanjörlerinde toplam ısı transfer katsayısı ile sudaki nano-sıvı basınç düşüşünü karşılaştırmak için deneyler yapmışlardır. Elde ettikleri deneysel sonuçlarda, akış hızına ve ısı eşanjörleri boyunca nanoakışkan konsantrasyonuna bağlı olarak nanoakışkanlar için ısı transfer katsayısının artırılmasını ve bozulmasını göstermişlerdir [8].

Sözen vd., çeşitli konsantrasyonlarda metal oksitlerden oluşan alümina veya fly- ash'den üretilen nano akışkanların, paralel ve çapraz akışlı eş merkezli iç içe borulu ısı değiştiricisinin performansına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Türbülanslı akış sırasında yüzeydeki ve toplamdaki ısı transfer katsayılarının belirlenmesi için tüm yardımcı ekipman ve cihazlarla birlikte paralel veya karşıt akışlı ısı değiştirici kullanmışlardır. Fly-ash nanoakışkan çalışmada akışkan olarak kullanıldığında, ısı değiştiricisinin paralel ve karşıt akıştaki verimliliğinin sırasıyla %31,2 ve %6,9 oranında arttığını bulmuşlardır. Isı değiştiricisinin verimliliğindeki gelişmeleri, çalışma sıvısı olarak alümina nanoakışkan kullanıldığında ise sırasıyla %5,1 ve %2,8 olarak belirlemişlerdir [9].

Tiwari vd., plakalı ısı değiştiricilerde çeşitli nanoakışkanlar kullanarak bunların deneysel olarak ısı transferi performanslarını karşılaştırmışlardır. Plakalı ısı eşanjörünün ısı transfer performansını, çeşitli hava debileri ve geniş konsantrasyon aralığı için farklı nanoakışkanları (CeO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2) kullanarak incelemiştir. Baz akışkan üzerinde maksimum ısı transfer gelişimini sağlamak amacıyla farklı nanoakışkanlar için optimum konsantrasyonlar belirlemişlerdir. Deneylerden önce, nanoakışkanların gerekli termodinamik özelliklerini ölçmüşlerdir. Isı transferi performansını, ısı transferi katsayısı oranı, toplam ısı transferi katsayısı oranı, basınç düşüş oranı, pompalama gücü oranı, etkinlik oranı ve performans endeksi oranı açısından tartışmışlardır. Yapılan bu çalışmada, CeO_2 /su nanoakışkanının, çalışılan nanoakışkanlar içinde nispeten daha düşük optimum konsantrasyonla (%0,75 hacim) en iyi performansı (%16 maksimum performans indeksi artırma) verdiğini göstermişlerdir [10].

Menlik vd., bu çalışmada, MgO/su nanoakışkanının, iki fazlı kapalı termosifon ısı borusunun çeşitli çalışma durumlarında ısı performansını nasıl etkilediğini araştırmışlardır. Deneysel olarak, MgO' dan elde edilen bir nanoakışkan kullanımının bir ısı borusunun performansını artırma üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Deney düzeneğinde iç çapı 13 mm, duvar kalınlığı 2 mm ve uzunluğu 1m olan düz bir bakır ısı borusu kullanmışlardır. Nanoakışkan, ısı borusunun hacminin %33,3' ü (44,5 ml) olacak şekilde doldurulmuştur. Deneylerde, sistemi soğutmak için kondansatörde kullanılan üç farklı soğutma suyu akış hızı (5 g/s, 7,5 g/s ve 10 g/s) ve üç farklı ısıtma gücü seviyesi (200 W, 300 W ve 400 W) kullanmışlardır. Nanoakışkan, çalışma akışkanı olarak su yerine sisteme yüklendiğinde, kullanılan ısı borusunun etkinliğinin 200 W ısıtma gücünde ve 7,5 g/s akış hızında %26' lık bir iyileştirme seviyesi gösterdiğini rapor etmişlerdir [11].

Ardekani vd., düzgün ısı akışı koşulunda helisel olarak sarılmış borulardan akan nanoakışkanların akış ve ısı aktarım özelliklerini türbülanslı akış için Ag/su ve SiO₂/su olmak üzere iki farklı tür nanoakışkan kullanarak, deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmayı, düz borular ile birlikte üç farklı helisel sarmal boru, daire çapı ve helisel alan gibi geometrik parametrelerin yanı sıra nano parçacık hacim konsantrasyonu gibi geometrik parametrelerin etkilerini de araştırmak için yapmışlardır. Nanoakışkanların viskozitesini ve ısı iletkenliğini farklı hacimlerde ve sıcaklıklarda deneysel olarak belirlemişlerdir [12].

Hung vd., bu çalışmada nano akışkan yüklü bir ısı borusunun ısı performansının artırıldığını göstermişlerdir. Al₂O₃/su nanoakışkanını, ısı borularında ağırlıkça %0,5, %1 ve %3 olmak üzere üç konsantrasyonlu çalışma sıvısı olarak kullanmışlardır. Isı borusu, dış çapı 9,52 mm olan ve uzunlukları 0,3 m, 0,45 m ve 0,6 m olan düz bir bakır borudur. Bu çalışmada, çalışma akışkanının farklı yüklü hacim oranının (%20, %40, %60 ve %80), farklı eğim açısının (10°, 40°, 70° ve 90°), farklı boru uzunluğunun, farklı ısıtma gücünün (20 W, 30 W ve 40 W) ve nano partiküllerin ağırlık oranının ısı borusunun toplam termal iletkenlik performansına etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlar, çalışma akışkanı olarak su kullanan borulara kıyasla daha iyi sonuçlar vererek; 40W'lık bir ısıtma gücünde, Al₂O₃/su nano-akışkanı kullanıldığında ısı boruları için optimal ısı performansın, 0,3 m, 0,45 m ve 0,6 m uzunlukları için sırasıyla %22,7, %56,3 ve %35,1 olduğunu göstermiştir [13].

Teng vd., nanoakışkan ile yüklenmiş bir ısı borusunun ısıl veriminin artırılmasını gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça %0,5, %1,0 ve %3,0 olan üç farklı konsantrasyondaki doğrudan sentez yöntemiyle üretilen Al_2O_3 /su nanoakışkanını, deneysel olarak ısı borularında çalışma sıvısı olarak kullanmışlardır. Isı borusu, iç çapı 8 mm ve uzunluğu 600 mm olan düz bir bakır borudur. Deneysel çalışmada su ve nanoakışkan yüklü ısı borularını sırasıyla test etmişlerdir. Çalışmada, çalışma akışkanının şarj miktarının, ısı borusunun eğim açısının ve nano partiküllerin ağırlık oranlarının, ısı borusunun ısıl verimi üzerindeki etkilerini tartışmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, ısı borusunun optimum koşulu nano parçacıkların ağırlıkça %1,0 olduğu durum olduğu gözlemlemişlerdir. Bu koşulda, ısıl verim %16,8 olarak hesaplanmış ve suyla yüklü ısı borusundan daha yüksek olduğunu ve şarj miktarının %60' tan %20' ye düşürülebileceğini belirtmişlerdir [14].

Termosifonlar, pasif soğutma yetenekleri sayesinde elektronik soğutma ve atık ısı geri kazanımı gibi termal mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Termosifonların performansı, çalışma akışkanının taşıma özelliklerini ve ısı transfer özelliklerini değiştirmek gibi çeşitli yöntemlerle iyileştirilebilmektedir. Baz sıvısı ile olan süspansiyon ve nano boyutta (1-100 nm) katı partiküllü özellikleri ile nanoakışkan, bu hedefe ulaşmak için bir seçenektir. Termosifonların ısı değişim doğasını ve nanoakışkanların farklı termal özelliklerini birleştirmek, ısı transferi alanında yeni ufuklar açabilmektedir. Yapılan mevcut çalışmada Kamyar ve ark., Al_2O_3 ve $TiSiO_4$ nano partikülleri ile baz sıvı olarak su kullanılarak karıştırmış ve iki nano sıvı ile doldurulmuş iki fazlı bir kapalı termosifonun termal performansını incelenmişlerdir. Nanoakışkanları, %0,01, %0,02, %0,05 ve %0,075 olarak farklı hacimsel konsantrasyonlarda hazırlamış, evaporatör bölümüne 40 W, 70 W, 120 W, 180 W ve 210 W olmak üzere farklı ısı yükleri uygulamışlardır. Sonuçlarda, her iki nanoakışkanın, termal dirençteki %65 (Al_2O_3 için %0,05 hacimde) ve %57 ($TiSiO_4$ için %0,075 hacimde) oranında azaltılmasıyla performansı iyileştirdiğini göstermişlerdir. Isı transfer katsayısındaki artış ve evaporatör duvar sıcaklığındaki düşüş formlarında başka gelişmelerin de ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir [15].

Hassan vd. bu çalışmada, bir nanoakışkanın çalışma ortamı olarak kullanımından sonra nano partiküllerin birikmesinin ısı borusu fitil gözenekliliği üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. %1, %2 ve %3 hacme sahip su bazlı alüminyum oksit nanoakışkanlar hazırlamışlar ve karakterize etmişlerdir. Nanoakışkanları, bakır borudan yapılmış ve gözenekli bir fitil ile kaplanmış, vakumlanmış ısı borusuna yüklemişlerdir. Isı borusunu,

farklı çalışma koşulları altında performansını değerlendirmek için bir vakum basıncı ve sıcaklık sensörleri ile donatmışlardır. Başlangıçta, ısı borusu performansının, nano-sıvıların baz akışkan olan saf su üzerinde kullanımı için önemli bir iyileşme gösterdiğini ancak bu artışın, birkaç tekrardan sonra düşüş göstermeye başladığını elde etmişlerdir. Tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinden ısı borusu fitili için; fitil ağ yüzeyi üzerinde toplanmış nano parçacık tabakası görüntüleri ortaya çıkarmışlardır. Bu parçacıkların, ısı borusu performansını etkileyen ciddi bir kılcal ve ısıl direnç geliştirip, ısı borusundaki iyileşmenin düşmesine sebep olduğu sonucuna varmışlardır [16].

Moraveji vd. yaptıkları araştırmada, farklı çalışma koşullarında alüminyum oksit nanoakışkanının (35 nm boyutundaki Al_2O_3 nano parçacık ile karıştırılmış saf su) kullanılmasının ısı borusunun ısı veriminin artırılmasındaki etkisini araştırmışlardır. Deneyleri, dış uzunluğu 8 mm ve 190 mm olan ve 1 mm kalınlıkta sinterlenmiş dairesel ısı borusu olan düz bir bakır boru ile yapmışlardır. Isı borusunu, evaporatör ve kondenser bölümleri arasında 90° lik açı olacak şekilde konumlandırmışlardır. Nanoakışkan konsantrasyonlarını hacimce %0, %1 ve %3 olarak belirlemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, nanoakışkanın ısı borusuna yüklenmesiyle, ısıl direncin ve duvar sıcaklık farkının azaltıldığı ve dolayısıyla ısıl performansın artırıldığını göstermişlerdir [17].

Huminic vd., ısı transfer cihazlarının ısı transfer karakteristiklerinin, çalışma akışkanlarının akışkan taşıma özellikleri ve akış özellikleri ile değişebileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmada, iki fazlı kapalı termosifonun (TPCT) demir oksit nanoakışkanlarla ısı transfer özelliklerini incelemişlerdir. Termosifonu, dış çapı ve uzunluğu sırasıyla 15 mm, 2000 mm olan bakır borudan imal etmişlerdir. TPCT eğim açısı, çalışma sıcaklığı ve nano parçacık konsantrasyon seviyelerinin TPCT' nin ısı transfer özellikleri üzerindeki etkileri göz önünde bulundurularak deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Nanoakışkanlar ile baz akışkan sonuçlarını karşılaştırarak, nano partiküllerin, TPCT' nin ısı transfer özelliklerinin geliştirilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [18].

Venkatachalapathy vd., bu çalışmada, su bazlı CuO nanoakışkanları kullanarak bir silindirik bakır fitil ısı borusunun termal performansını analiz etmişlerdir. Çalışmalarını, ısı borusu eğim açısı ve ısı girişi değerlerini değiştirerek daha da genişletmişlerdir. CuO/DI su nanoakışkanlarının termofiziksel özelliklerini de etkili bir şekilde analiz etmişlerdir. ısıl direnç oranındaki azalmayı, düşük konsantrasyona kıyasla ağırlıkça; %1,0 ve %1,5 CuO

nanoakışkan için sırasıyla %23,83 ve %10,43 olarak gözlemlemişlerdir. Buharlaştırma ve yoğunlaşma ısı transfer katsayısı oranlarını, CuO nanoakışkan kullanımıyla iyileştirerek, elde edilen maksimum gelişmeyi, 60°' lik optimum eğim açısı için sırasıyla %30,50 ve %23,54 olarak hesaplamışlardır. Isı borusunun ısı veriminin, ısı yükü ve eğim açısı ile artma eğiliminde olduğunu ve 60°' lik eğim açısında yatay ısı borusuna kıyasla 120 W' lık ısı yükü için %33,34' lük bir iyileşme gözlendiğini belirtmişlerdir. Deneyden sonra ağ fitil yapılarının karakterizasyonunu incelemişlerdir ve CuO nano partiküllerinin birikmesiyle, evaporatör bölümündeki fitil yüzeylerinde ince bir kaplama tabakası oluştuğunu ve bunun da yüzey ıslaklığı ile birlikte ısı borusunun ısı performansını arttırdığını belirtmişlerdir [19].

Naphon vd., bu çalışmada, soğutucu-nano partiküllerin karışımları ile ısı borusu verimliliğinin artırılmasını amaçlamışlardır. Dış çapı ve uzunluğu sırasıyla 15 mm ve 600 mm olan düz bakır borudan imal edilen bir ısı borusu ile çalışmışlardır. Soğutucu akışkan (R11), temel (baz) çalışma akışkanı olarak kullanılmış, boyut olarak 21 nm çapında titanyum nano partikülleri ile çalışma sıvısı yük miktarının ve ısı borusu eğim açısının ısı borusunun verimliliği üzerindeki etkilerini gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, çalışma sıvısı olarak kullanılan saf soğutucu akışkan için, 60° eğim açısı ve %50 çalışma sıvısı yükü miktarının ısı borusu için en yüksek verimi verdiğini tespit etmişlerdir. Saf soğutucu için bu optimum durumda, %0,1 nano parçacık konsantrasyonlu ısı borusunun, saf soğutucu akışkandan 1,40 kat daha fazla verim sağladığını ortaya çıkarmışlardır [20].

Gürü vd., bu çalışmada, çalışma akışkanı olarak bentonit içeren nanoakışkanın, bir ısı borusunda kullanılmasının evaporatör bölümünde uygulanan farklı ısıtma güçlerinde ve kondenser bölümünde uygulanan farklı kütle debilerinde, verime etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca, konsantrasyon değişiminin ısı borusu üzerindeki etkilerini araştırmak için farklı nanoparçacık konsantrasyonlarında da (%0,5, %2 ve %4) deneyler yapmışlardır. Bentonit içeren nanoakışkanın çalışma akışkanı olarak kullanılması durumunda 200 W' ta yapılan deneyde, ısı borusunun verimliliğinde %37' lik bir artış sağlandığını tespit etmişlerdir [21].

Arya vd., çift borulu bir ısı eşanjöründe MgO/su-etilen glikol nanoakışkanlarının potansiyel uygulamalarını değerlendirmek için deneysel bir araştırma yapmıştır. Isı eşanjörü içindeki toplam ısı transfer katsayısı, çalışma sıvısının giriş sıcaklığı, basınç düşüşü, sürtünme faktörü ve nanoakışkanların hidrolik performans özellikleri deneysel olarak ölçülmüştür.

Sonuçlara bakıldığında ağırlıkça %0,3 MgO nano partiküllerinin, türbülans rejiminde Re değeri 10500' de ısı aktarım katsayısını %39 arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, sürtünme faktörünü ve basınç düşmesi değerlerini artırdığını belirlemişlerdir. Genel olarak, soğutucu olarak MgO /su-etilen glikolün, ısı eşanjöründe kullanılmak üzere büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir [22].

Anitha vd., Al_2O_3 -Cu/su hibrid nanoakışkanının nanoparçacık hacim konsantrasyonunun ve oranının, tek geçişli bir kabuk ve tüp ısı eşanjörlerinde ısı transfer performansına etkisini analiz etmişlerdir. Akışı modellemek için çok fazlı karışım modelini kullanmışlardır. Üç boyutlu yönetim denklemleri ve sınır koşulları ile sonlu hacim yöntemi kullanılarak, sayısal sonuçlar ile deney sonuçlarını doğrulamışlardır. Sonuçlarda, hibrid nanoakışkanın optimize edilmiş nanoparçacık hacim konsantrasyonu ve oranının, ısı transferi performansında baskın rol oynadığını göstermişlerdir. Hibrid nanoakışkan kullanılan sistemler için geleneksel akışkanlara kıyasla, en yüksek ısı transfer performansına ulaşıldığını belirtmişlerdir [23].

Onyiriuka vd., bu çalışmada, mango kabuğundan yapılan yeni bir nano-sıvı sınıfının çift borulu bir ısı değiştiriciden türbülanslı akış sırasında ısı transfer özelliklerini sayısal olarak simüle etmiş ve incelemişlerdir. Süreklilik, momentum, enerji ve hacim fraksiyonu denklemlerini düzenleyen karışım modelini, sonlu hacimler yöntemi kullanarak çözmüşlerdir. Sonuçlarda, nanoakışkanın ısı transfer katsayısının baz sıvınıninkinden yaklaşık iki kat daha fazla olduğunu göstermişlerdir [24].

Moghadam vd., U-kıvrımlı çift borulu ısı eşanjörleri içindeki Fe_3O_4 /su nanoakışkanı için kapsamlı bir duyarlılık analizi, termo-hidrolik ve performans karakteristiklerinin türbülanslı akışta çok amaçlı optimizasyonunu yapmışlardır. Tüm önemli sıvı koşullarını (nanoparçacık konsantrasyonu, Reynolds sayısı ve Prandtl numarası dahil) ve geometrik parametreleri (boyuna şerit kesici uçların en boy oranı ve çap oranı dahil) araştırmalarda dikkate almışlardır ve optimum verilere ulaşmışlardır [25].

Pourhoseini vd., gümüş-su nanoakışkan sentezi için basit ve ekonomik bir süreç önermişler ve nanoakışkanın, hacim akış hızı ve 0-10 mg/l aralığındaki konsantrasyon değerlerinin, sistemin genel ısı transfer katsayısını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sonuçlarda nanoakışkanın hem konsantrasyonunun hem de hacim akış hızının, plakalı ısı değiştiricilerde toplam ısı transfer katsayısını arttırdığını göstermişlerdir. Bununla birlikte, hacim akış

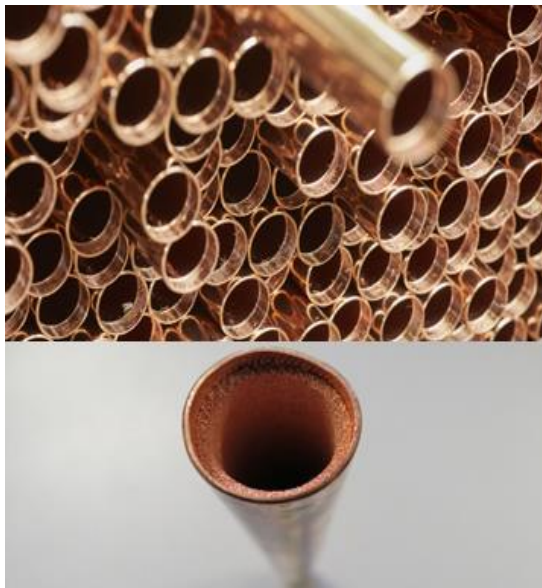
hızının, nanoakışkan konsantrasyonuna göre toplam ısı transfer katsayısının artırılması üzerinde daha büyük bir etkisi olduğunu ve gümüş-su nanoakışkanının termal iletkenliğinin saf suyunkinden %36,6 kadar daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [26].

3. ISI BORUSU

3.1. Isı Borusu Tanımı

Isı boruları, küçük yüzeylerden oldukça büyük değerlerde ısı enerjisi çeken ısı değiştiricileridir. Isı boruları, düşük basınç altında ve sıcaklıkları farklı ortamlar arasında ısı enerjisini taşımak amacıyla tasarlanıp kullanılırlar. Tamamen aynı özellikte parametrelere sahip içleri dolu metal çubuklarla karşılaştırıldıklarında, ısı borularının taşıdıkları ısı akısının metal çubuklara göre 1000-10000 kez daha fazla olduğu görülmüştür. Isı borusunun tercih edilmesinin en önemli sebebi, fazladan bir güç girişine ihtiyaç duymaksızın belirli bir kesit alanından, büyük miktardaki ısıyı istenilen mesafelere iletebilmesidir. Bunun yanında, üretiminin kolay, tasarımının karmaşık olmaması, farklı sıcaklık değerlerindeki yüksek ısı oranlarının bile kolayca kontrol edilebilirliği gibi özellikleri ısı borularının kullanımını cazip kılan sebepler arasında yer almaktadır. Isı borusu veriminde yerçekimi kuvvetinin etkisi ve borunun eğim açısı da büyük önem taşımaktadır.

Isı borusu; buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı ve adyabatik bölge olmak üzere üç kısımdan oluşan, önceden havası alındıktan sonra içine belirli bir miktarda çalışma sıvısının koyulduğu ve bu sıvının hareketi sayesinde ısı transferine olanak sağlayan kapalı hazneli cihazlardır. Isı boruları geniş sıcaklık aralıklarında, silindirik, düzlemsel vb. şekillerde, kullanım alanlarındaki ihtiyaca uygun olarak kolayca üretilebilirler (Resim 3.1).



Resim 3.1. Isı borusu

Dış ortamdaki ısı kaynağından çekilen “buharlaştırma ısı”, çalışma akışkanının buharlaşmasına neden olur ve akışkanın buharlaştığı bu bölgeye buharlaştırıcı veya evaporatör bölgesi denir. Buharlaştan akışkan, yoğunlaştırıcı ya da kondenser denilen bölgeye doğru hareket eder. Bu bölgede akışkan, ısını ısı borusu duvarlarından dışarı vererek yoğunlaşır. Yerçekimi veya fitiller etkisiyle akışkan sıvı halde evaporatör bölgesine geri döner. Yoğuşan akışkan, tekrar buharlaştırıcı bölgesine dönebilmek için yerçekimi kuvveti, kılcal, osmotik, merkezkaç, manyetik kuvvet gibi etkilerden yararlanır [27]. Böylelikle bu çevrim ısı alışverişi süresince devam eder. Isı borusunda, evaporatör ve kondenser bölgesinin yanında, adyabatik bölge denilen ısı transferinin meydana gelmediği bir de nötr bölge vardır. Çizelge 3.1’de yoğunlaşmış akışkanın buharlaştırıcıya geri dönmesine yardımcı olmak adına uygulanan kuvvetlere göre ısı borusu çeşitleri verilmiştir.

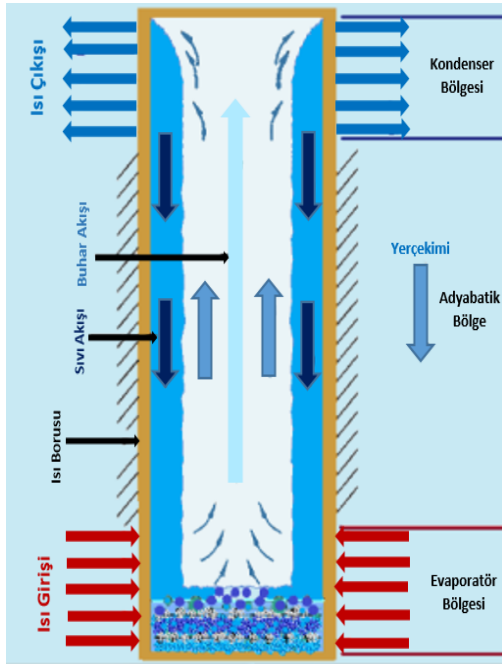
Çizelge 3.1. Akışkanın buharlaştırıcı bölgesine dönebilmesi için uygulanan kuvvetler [28]

Uygulanan Kuvvet	Cihazın Adı
Yerçekimi kuvveti	Termosifon
Kapiler kuvvet	Standart ısı borusu
Merkezcil kuvvet	Dönel ısı borusu
Elektrostatik kuvveti	Elektro hidrodinamik ısı borusu
Manyetik kuvveti	Manyeto hidrodinamik ısı borusu
Osmotik kuvvetler	Osmotik ısı borusu

Isı boruları çalışma şekillerine ve kullanım amaçlarına göre, en temel mühendislik disiplinlerinin kalbi olan; akışkanlar mekaniği, ısı transferi, termodinamik, mekanik gibi alanlardan oluşmaktadır. Isı borularının uygulama alanlarına; pişirme fırınları, boya kurutma fırınları, döküm fabrikaları, ısıtma alanları, yiyecek kurutma, kazanlar, laboratuvar egzozları gibi endüstriyel prosesler ve süpermarketler, hastaneler, spor kompleksleri gibi iklimlendirme uygulamaları ortamları ayrıca elektronik cihazların soğutulması, atık ısıların yeniden kullanımları, enerji depolama, araçlarda iç ısıtma ve iç ısıtmalar için egzoz ısılarından yararlanma, uçaklarda fren mekanizmalarının soğutulması vb. uygulamalar örnekler verilebilir.

3.2. Isı Borusu Çalışma Prensibi

“Perkin Borusu” olarak adlandırılan “termosifon” mekanizması ısı borularının temelini oluşturmaktadır [29]. Termosifonda çevrim, yerçekimi etkisiyle gerçekleştiğinden, yoğunlaşma işleminin gerçekleştiği kondenser bölgesi üst tarafta ve buharlaşma işleminin gerçekleştiği evaporatör bölgesi alt tarafta olmalıdır. Isı borusunda ise, evaporatör ve kondenser konumlarında herhangi bir sınır olmaz çünkü yoğunlaşan akışkanın hareketi kılcal etkiler yardımıyla meydana gelmektedir [30]. Örneğin; fitilli bir ısı borusunda yoğunlaşan sıvı, ısı borusunda yer çekimine zıt yönde olacak şekilde çevrimini yapar. Isı borusu ile aynı çalışma prensibine sahip çift fazlı termosifonun çalışma prensibi ise şu şekildedir; vakumlanmış dik bir borudaki belirli miktardaki akışkan, dışarıdaki bir kaynaktan ısıya maruz kalır. Isı borusu duvarlarından akışkana doğru ısı transferi gerçekleşir ve akışkan buhar fazına geçmeye başlar. Isının çekilip buharlaşmanın meydana geldiği bu alt bölgeye evaporatör bölgesi denir. Dik borudaki buhar yukarı doğru hareket etmeye başlar ve üst ucunda ısısını boru dışındaki bir kaynağa vererek yoğunlaşıp sıvı faza döner. Burası kondenser bölgesidir. Sıvı fazdaki bu akışkan yerçekimi etkisiyle tekrar evaporatör bölgesine döner. Böylece çevrim tamamlanır (Şekil 3.1). Sonuç olarak ısı boruları, çalışma akışkanının faz değişiminden yararlanarak, ısıyı bir bölgeden başka bir bölgeye transferini mümkün kılar.



Şekil 3.1. Isı borusu çalışma prensibi şematik gösterimi

3.3. Isı Borusu Temel Bileşenleri

Isı boruları kullanılacak alanlara göre çeşitli boyut ve şekilde tasarlanabilirler. Kapalı bir boru, boyutları ve malzemesi, fitil yapısı, çalışma akışkanı seçimi ve akışkanın miktarı ısı borusunun temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Bunun yanında ısı borusunun taşıması istenen ısı kapasitesi, ısı borusunun çalışma sıcaklığı aralıklarının yani evaporatör ve kondenser bölgelerinin yüzey sıcaklıklarının da belirlenmesi gereklidir. Kondenser bölgesi yüzeyi, sabit sıcaklıkta çalışmaya eğilimlidir. Sabit sıcaklıkta bölgesel bir ısı yükü uygulandığında, bu bölgede daha fazla buhar yoğunlaşır ve sıcaklığı ilk seviyede tutmaya yardımcı olur.

Isı boruları düşük sıcaklık değişiklikleriyle belirli mesafeler arası enerji geçişini sağlar. Isı boruları; fitil tasarımı, iç ve dış boru çapı, çalışma akışkanı özellikleri ve ısı borusunun konumu (eğimi) gibi özellikleri ile ilişkili olarak belirlenen ısı transfer kapasitesinde olurlar. Buharlaştırıcı bölgesi en düşük pozisyonda ise yerçekimi kuvvetleri kılcal basınca yardım edebilir. Bu parametrelerin belirlenmesiyle iletilmesi istenen enerjinin, ısı borularının iletebileceği en fazla ısı transferi limit değerlerinin altında kalmasına sebep olacak parametrelerin değiştirilip yeniden düzenlenmesiyle sistem tasarımı tamamlanır.

Isı borularının ömürleri, uyumlu çalışan çalışma akışkanı, boru malzemesi ve fitil yapısına doğrudan bağlıdır. Tasarlanan parçalardan biri diğerleriyle uyumsuzluk gösterirse, ısı borusu performansı direkt etkilenir. Verim düşebilir, boru aşınabilir, kimyasal tepkimeler, boru malzemeleri çalışma akışkanı içinde çözünüp ayrışmalar oluşabilir.

Isı borusu malzemesi

Isı borusu dış gövde malzemesi olarak, bakır, alüminyum, paslanmaz çelik vb. malzemeler yaygın olarak kullanılır. Sistem tasarlanırken, ısı borusu malzemesi ve çalışma sıvısının birlikte çalışırken korozyon, kabarcık oluşumu vb. türden problemler yaratmaması gerekir. Çizelge 3.2’de çalışma sıvısı ve boru malzemesinin uyumluluk örnekleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazı çalışma akışkanları ve boru malzemesinin uyumluluk verileri [31]

Malzeme	Çalışma Akışkanı			
	Su	Aseton	Amonyak	Metanol
Bakır	ÖG	ÖG	UD	ÖG
Alüminyum	GÜB	ÖL	ÖG	UD
Paslanmaz çelik	GÜY	UO	ÖG	GÜY
Nikel	UO	UO	ÖG	ÖL

ÖG: Geçmiş uygulamalara göre önerilebilir.

GÜB: Bütün sıcaklıklarda gaz üretimi.

GÜY: Yüksek sıcaklıklarda gaz üretimi (oksitleme mevcutsa).

UD: Uygun değil.

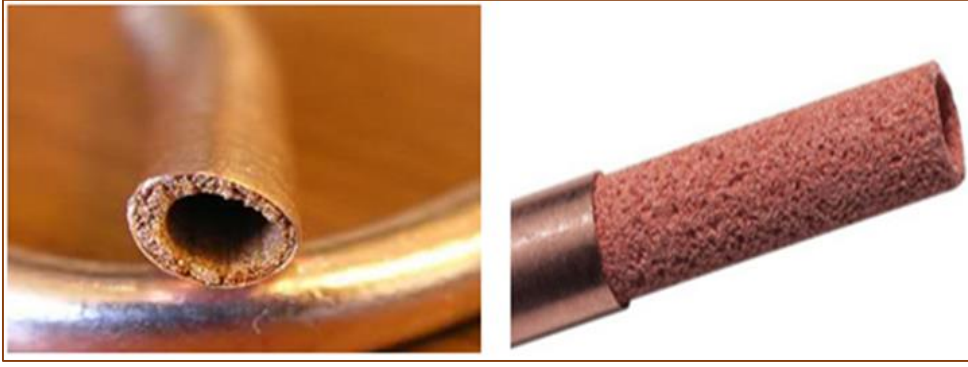
UO: Uygun olabilir.

ÖL: Literatüre göre önerilebilir.

Fitil malzemesi

Isı borusunda, yoğunlaşan çalışma sıvısı kondenserden evaporatöre fitiller aracılığıyla hareket eder. Fitilin iç bölgesindeki kılcal kuvvetlerle oluşan gerilim sayesinde çalışma sıvısı yüksek hızda hareket etmiş olur [32].

Fitil malzemesi seçilirken öncelikle çalışma sıvısıyla uyumlu olması gerekmektedir. Çalışma sıvısının kondenserden evaporatöre doğru hareketine yardımcı olan kapılar basıncı oluşturması beklenen fitiller ince oranda olması kaydıyla; bakır, alüminyum, nikel, paslanmaz çelik gibi malzemelerden üretilebilirler (Resim 3.2). Farklı standartlarda elekler, lifli ve ince akış kanallılar fitil yapılarına örnektir [31].



Resim 3.2. Fitilli ısı borusu görüntüsü

Isı borusu çalışma sıvıları

Isı borusu tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden biri de çalışma sıvılarıdır. Düşük sıcaklıklarda buharlaşabilmesi ve evaporatörden aldığı enerjiyi kondenser bölgesine hızlıca iletebilme yeteneği bir çalışma akışkanından beklenen en önemli görevlerdir. Isı borusu uygulamalarında kullanılan en yaygın çalışma sıvıları Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çalışma sıvısı, ısı borusu evaporatör bölgesi hacminin $1/3$ ' ü kadar doldurulur. Miktarı, sıvı ve buhar fazlarındaki toplam kütle olarak hesaplanır. Akışkan miktarı, ısı borusunun verimine etki eden faktörlerin başında yer almaktadır. Fazla çalışma akışkanı konulması durumunda, kondenser bölümünde fazla sıvı olarak toplanır ve ısıl direncin artmasına sebep olarak ısı borusunun ısı taşıma kapasitesini düşürebilir [33].

Isı borularında kullanılacak olan çalışma sıvılarının belirleyiciliğinde; kaynama noktası, buharlaşma ısısı, donma noktası, sıcaklık aralıkları, ısıl iletkenlik, ıslanabilirlik, buhar basıncı, ısıl kararlılık, viskozite vb. özellikler dikkate alınır.

Çalışma sıvısı seçiminde dikkat edilmesi gereken önemli parametreler şunlardır;

- Yüksek yüzey gerilimine, düşük viskoziteye ve yüksek ısıl kararlılığa sahip olmalıdır.
- Yoğuşamayan gaz oluşturmamalıdır.
- Kullanılan fitil ile herhangi bir reaksiyona girmemelidir.
- Çalışma sıvısına ısı iletilirken aşırı ısıtmaya ihtiyaç duyulmaması için akışkan-fitil-yüzey arasındaki temas açısı yüksek olmalıdır.
- Isı borusu malzemesi ile uyumlu olmalıdır.

- Isı iletiminde buharlaşma ve yoğunlaşma gizli ısı rol oynadığı için bu değer ne kadar yüksek ise verim de o kadar fazladır. Buharlaşma gizli ısı değeri yüksek olmalıdır.
- Sistem boyutlarının küçük olması için buhar yoğunluğu yüksek olmalıdır.
- Isıl iletkenlik ve ısılatma kabiliyeti yüksek olmalıdır.
- Sıvı ve buhar viskozitesi düşük olmalıdır.
- Kılcal basınç değeri yüksek olmalıdır [34].

Çizelge 3.3. Isı borularında kullanılan çalışma sıvıları [35]

Çalışma Akışkanı	Donma Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)	Kullanım Bölgesi (°C)
Helyum	-272	-269	-271 ~ -269
Azot	-210	-196	-203 ~ -160
Amonyak	-78	-33	-60 ~ 100
Freon 11	-111	24	-40 ~ 120
Pentan	-130	28	-20 ~ 120
Freon 113	-35	48	-10 ~ 110
Aseton	-95	57	0 ~ 120
Metanol	-98	64	10 ~ 130
Flutec PP2	-50	76	10 ~ 160
Etanol	-112	78	0 ~ 130
Heptan	-90	98	0 ~ 150
Su	0	100	30 ~ 200
Flutec PP9	-70	160	0 ~ 150
Freon 21	-134	9	-40 ~ 87
Civa	-39	361	250 ~ 650
Sezyum	29	670	450 ~ 900
Potasyum	62	774	500 ~ 1000
Sodyum	98	892	600 ~ 1200
Lityum	179	1340	1000 ~ 1800
Gümüş	960	2212	1800 ~ 2300

3.4. Yerçekimi Destekli Isı Borusu (Çift Fazlı Kapalı Termosifonlar)

Çift fazlı kapalı şekil termosifonlar, fitilsiz ısı borularıdır. Kondenser bölgesinde yoğunlaşan çalışma akışkanının yerçekimi yardımıyla evaporatör bölgesine geri dönebilmesi için bu tür ısı borularında, evaporatör bölgeleri daima kondenser bölgelerinin aşağısına konumlandırılmıştır [36].

Yerçekimi takviyeli ısı borularında, evaporatör bölgesine dışarıdan ısı verilmesiyle, çalışma sıvısının bir kısmı buharlaşarak ısı borusunun iç hacmini doldurur. Kondenser bölgesinde ısınıp bırakarak yoğunlaşan akışkan, yerçekimi etkisiyle evaporatör bölgesine döner. Tekrar aynı etkiler sonucunda yeniden buharlaşır ve yoğunlaşma sonucu tekrar evaporatöre geri döner. Çevrim bu şekilde devam eder.

Yerçekimi destekli ısı borularında, sonik limit, buhar basıncı sınırları, köpürme limitinin termosifonlardaki karşılığı olan taşma limiti gibi etkiler fitilli ısı borularına göre daha etkilidir. Taşma limiti, duvar sıcaklığında ve buhar basıncında ani yükselmelere sebep olmaktadır. Buharlaştırıcı bölgesindeki akışkan ve boru duvarı arası buhar filmi oluştuğu zaman kaynama limiti ortaya çıkmaktadır. Çalışma akışkanının adım adım doldurulduğu anlarda, akışkanın tümünün sıvı filmde muhafaza edildiği ve sıvı alanında sıvı bulunmadığı durum ise kuruma sınırına gelindiğinin göstergesidir. Buharlaştırıcı bölgesinde uygulanan ısı gittikçe artarak sistemdeki sıcaklığın da normalden fazla artmasına sebep olur.

4. HAVADAN HAVAYA ISI GERİ KAZANIM ÜNİTELERİ

Isı geri kazanım sistemleri; taze havaya ihtiyaç duyulan ortamlarda havalandırma yaparken aynı zamanda enerji tasarrufunu sağlayan cihazlardır. Isı veya kütle halindeki enerjiyi, yüksek sıcaklıktaki hava akış ortamından, düşük sıcaklıktaki akış ortamına aktararak geri kazandırılmasını sağlar. Havalandırma uygulamalarında ısı geri kazanımı sistemleri iki grupta incelenir.

Isı geri kazanımlı havalandırma cihazları (IGKH); paralel, ters ya da çapraz akışlı, havadan havaya ısı geçişi sağlayan ısı değiştiricilerdir.

Enerji geri kazanımlı havalandırma cihazları (EGKH); duyulur ısıнын ve buna ek olarak gizli ısıнын da iletilmesini sağlayan ısı değiştiricilerdir [37].

Isı geri kazanım sistemi uygulamalarının enerji verimliliği açısından önemi büyüktür. Bir bacadan dışarı atılan egzoz gazındaki atık ısıнын mümkün olduğu miktardaki kısmı, direkt dışarıya atılmadan önce bir ısı değiştiricisi ile tekrar ısıtma sistemine geri kazandırılması buna örnektir.

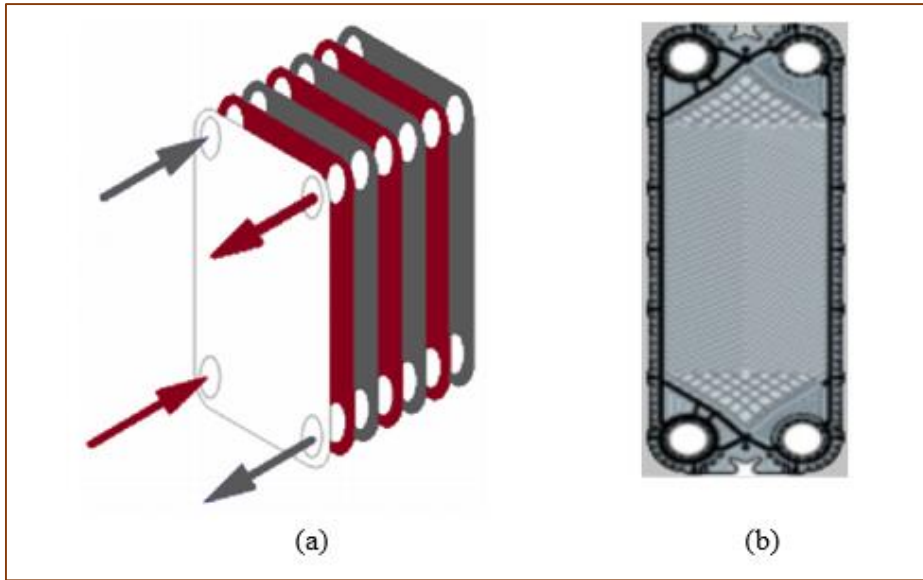
4.1. Havadan Havaya Isı Değiştiricisi Tipleri

Havadan havaya ısı geri kazanım ünitelerinde; farklı türdeki ısı değiştiricilerin kullanılması ile atık ısıların sıcaklığından faydalanılarak istenilen ortamın ısıtılması hedeflenmektedir. Havadan havaya ısı değiştiricisi tiplerini; plakalı, döner tip, batarya sistemli ve ısı borulu olarak dört grupta inceleyebiliriz.

4.1.1. Plakalı ısı geri kazanım üniteleri ve uygulamaları

Plakalı tip ısı değiştiriciler, sıcaklıkları farklı iki akışkanın birbirine temas etmeden hareket ederek, farklı tiplerdeki plakaların yüzeyinden ısı aktarımını gerçekleştiren sistemlerdir. Farklı malzemelerden üretilmiş plakaların, birbirlerine 90°' lik açı ile gelecek şekilde art arda, uçlarından birleştirilmiş bir şekilde toplanmaları ile oluşturulurlar (Şekil 4.1). Akışkan, plakalara köşelerdeki delikler aracılığıyla giriş çıkış yapar. Açık veya kapalı olarak çalışan delikler, kanallar arası geçiş yollarını belirler. Plakalı ısı değiştiriciler, her boyutta, şekilde ve malzemede üretilebildikleri gibi dayanıklı olduğundan ve yanmama özelliğinden ötürü

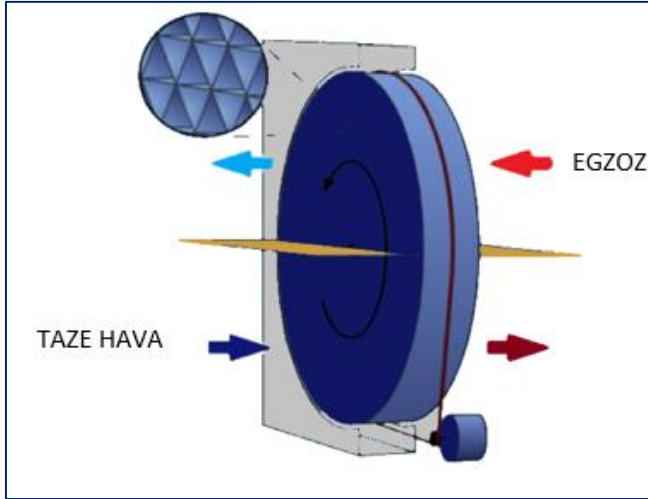
tercihen alüminyum malzemeden yapılırlar. Plakalı ısı değıştircilerinde verimlilik; hava hızı, kanat yüzey formu, kanat aralığı ve basınç kaybı ile orantılıdır. Verimlilik arttığında hava hızı ve basınç kaybı düşer böylece ısı değıştircisi boyutu büyütölmek zorunda kalacak ve maliyeti artacaktır. Tam tersi durumda basınç kaybı arttığında hava hızı da artacak, ısı değıştircisi boyutu küçöltölerek ucuzlayacak diğeryandan verimlilik azalacaktır. Plakalı ısı değıştircilerin verimliliğini etkileyen diğery faktörler ise; plakaların kuru veya nemli olmalarıdır. Islak durumdaki verimlilik, kuru duruma göre %5 civarında daha yüksektir [38]. Plakalı ısı değıştirciler, boyutlarının küçük olması, verimlerinin yüksek olması gibi özellikleri nedeni ile gıda sektörü, ısıtma ve soğuma sistemleri gibi uygulamalarda daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 4.1. Plakalı ısı değıştircisinde plakaların kenetlenmeleri ve plakaların önden görünüşü

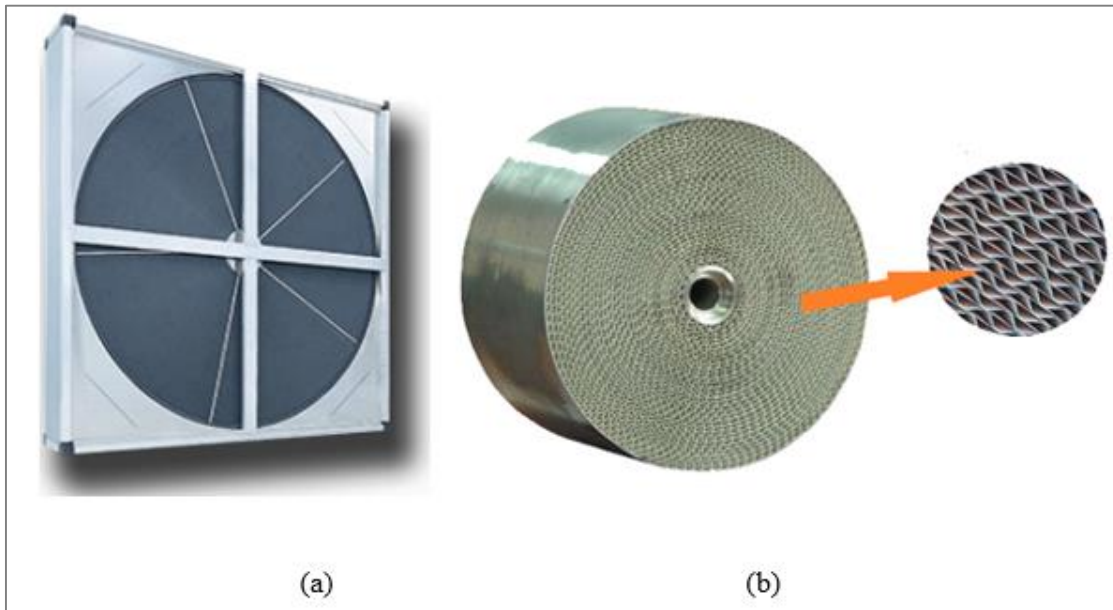
4.1.2. Döner (tamburlu) tip ısı geri kazanım üniteleri ve uygulamaları

Rotorlu tip de denilen döner tip ısı değıştircileri, matris denilen gözenekli yapıda ısıyı depolayarak soğuk akışkana olan ısı transferini gerçekleştirirler. Rotor dolguları çoğu zaman ince alüminyum şeritten üretilirler. Yatay bölme üzerinde bulunan hava kanalları ile ikiye bölünmüş haldedir. Kanallar, alttan taze hava ve üstten egzoz havası veya tam tersi olarak alttan egzoz havası üstten ise taze hava geçecek şekilde tasarlanmıştır. Sıcak akışkan kanaldan geçerken ısısı kanalın duvarlarındaki matrislerde depolanır. Depolanan bu termal enerji, sıcak akışkandan sonra aynı kanaldan geçecek olan soğuk akışkana transfer edilir [39]. Döner tip ısı değıştircisi şematik gösterimi Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Döner tip ısı değıştiricisi şematik gösterimi

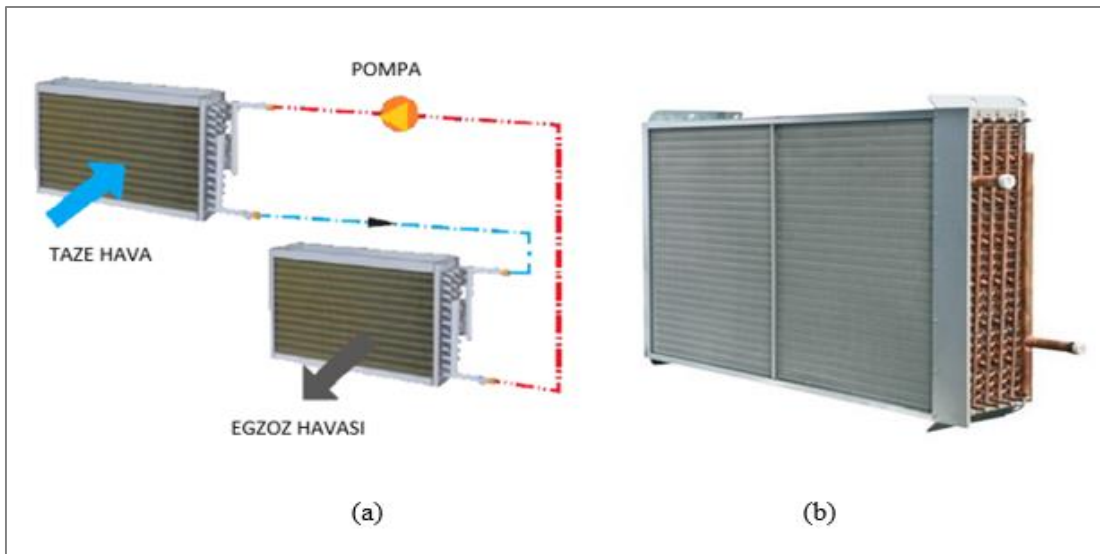
Resim 4.1' de döner (tamburlu) tip ısı geri kazanım cihazı ve kesit alanı görölmektedir. Tamburun hareketi, bir elektrik motoru yardımı ile gerçekleşmektedir. Ortalama dakikada on kez dönecek şekilde tasarlanan tamburlar veya rotorlar, %90 ile %95 arası termal verimlilik oranına çıkılabilmekle birlikte, uygulanabilir verimlilik değeri %65 ile %85 arasındadır. Tambur dönüş hızının kontrol edilebilir olmasıyla, sabit olmayan egzoz ve taze hava sıcaklıklarında bile yüksek verimlilikle çalıştırılmaları mümkündür. Tamburun (ısı tekerleğinin) bu yüksek ısı verimine rağmen, hareketli parçalara sahip olmalarının dışında en büyük dezavantajı taze hava ile atık havanın karışabilme riskinin fazla olmasıdır.



Resim 4.1. Döner (tamburlu) tip ısı geri kazanım cihazı ve ısı değıştirici kesit alanı

4.1.3. Bataryalı ısı geri kazanım üniteleri ve uygulamaları

Bataryalı ısı geri kazanım cihazlarında; birbiriyle borulama yöntemi ile bağlı olan ve bir tanesi taze hava tarafında bulunan diğeri dönüş havası tarafında bulunan iki serpantin üzerinden geçen hava akımı aracılığıyla ısı transferi gerçekleşmektedir. Sudan havaya olan bataryalı ısı geri kazanım sistemlerinde, egzoz havası bölgesinde ve taze hava bölgesinde birer tane batarya mevcuttur. Bataryalar çoğunlukla bakır boru ve alüminyum kanatçıklı olarak üretilirler. Su dolaşım pompası aracılığıyla iki batarya birbiri ile kapalı devre olarak çalışmaktadır. Egzoz havası bölgesindeki bataryada havadan suya transfer edilen ısı, temiz hava bölgesindeki batarya yardımıyla bataryadan geçen havaya transfer edilerek temiz havanın ısınması sağlanmaktadır (Şekil 4.3). Bu iki bataryalı sistem, temizliğin ön plana çıktığı ameliyathaneler, yoğun bakım odaları gibi yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Havalar soğuk olduğunda, kapalı sistemde etilen glikol bulundurulmasıyla devre içerisindeki suyun donması engellenmeye çalışılır. Bu tür ısı geri kazanım ünitelerinin ısı verimi %30-55 arasındadır.



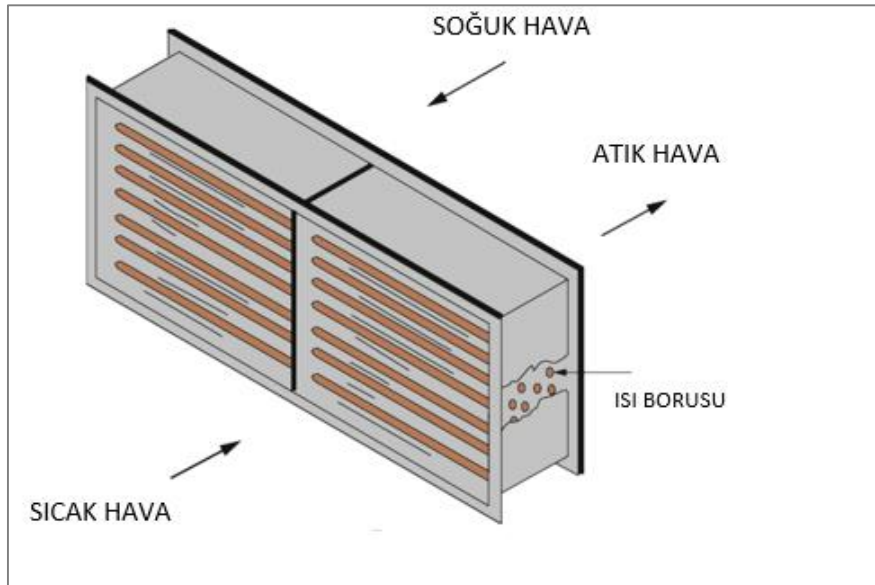
Şekil 4.3. Bataryalı ısı geri kazanım ünitesi bağlantı şeması ve bataryalı sistemin gerçek görüntüsü

4.1.4. Isı borulu ısı geri kazanım üniteleri ve uygulamaları

Isı boruları, içinde bulunan sıvının evaporatör bölgesinde buharlaşmasıyla ortaya çıkan gizli ısıyı, çok düşük sıcaklık farklarında uzun mesafelere iletebilen ısı transfer araçlarıdır. Evaporatör bölgesinde buharlan ısı, kondenser bölgesine taşınır. Burada yoğunlaşan akışkan

ısısını atarak yerçekimi etkisiyle borunun evaporatör bölgesine geri döner. Isı borulu ısı değiştiricilerinde, demet halinde bağımsız ya da birleştirilmiş olan borular mevcuttur. İçlerine hal değişikliği esnasında faz değiştirebilen çeşitli çalışma akışkanları doldurulur. Böylelikle ısı transferi aracılığıyla ısı geri kazanımı gerçekleştirilmiş olur.

Egzoz havası tarafından ısıtılan çalışma akışkanı, bu enerji yardımıyla hal değiştirerek buharlaşır ve özgül ağırlığının düşmesi ile boru içinde yukarı kısım olan taze hava bölgesine geçer. Kondenser bölgesinde taze hava ile karşılaşarak taşıdığı enerjiyi taze havaya verir. Isısını kaybederek soğuyan akışkan yoğuşur. Yerçekimi etkisiyle evaporatör bölgesine hareket eder. Evaporatör bölgesinde sisteme gelen egzoz havası duruncaya kadar ısı geri kazanımı devam eder. Birbirine karışmadan bir taraftan egzoz havası diğer taraftan taze hava geçebilmesi için seperatör parçası kullanılır. Taze hava ve egzoz havasını yönlendiren bu parça, borular içindeki akımı etkilemez. Isı transferi yüzey alanını genişleterek verimliliği artırması sayesinde kanat demeti kullanılır. Kanatçıklar genellikle alüminyum malzemeden, ısı boruları ise bakır malzemeden üretilirler. Kanatçıklı olup olmaması, boru ve kanat aralıkları, boyutları ve üretildikleri malzemenin cinsi, çalışma akışkanı cinsi ve sıcaklık değerleri ısı geri kazanım ünitesi veriminde doğrudan etkili faktörlerdir. Verimlilik değerleri ortalama %45 ile %55 arasındadır. Hareketli parçalara sahip değildir. Bu yüzden kullanım ömürleri yüksek, maliyetleri düşüktür. Düzenli aralıklarla kanat bakımları yapılmadığı takdirde basınç kaybının artmasıyla verimlilik düşmektedir. Şekil 4.4' te ısı borulu ısı geri kazanım ünitesi görüntüsü verilmiştir.

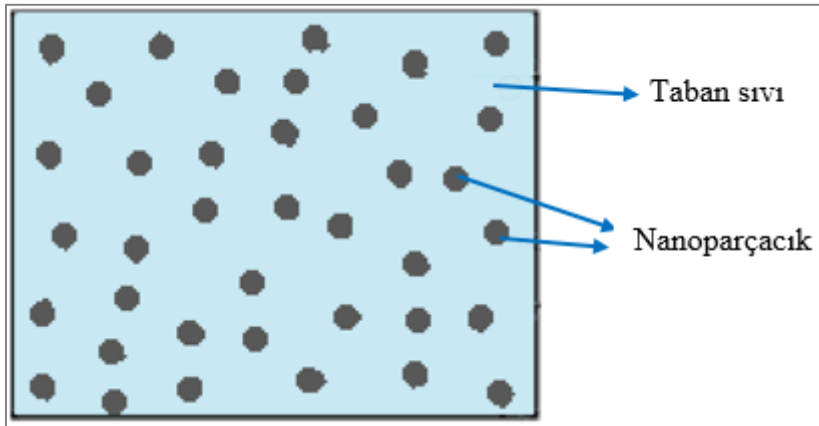


Şekil 4.4. Isı borulu ısı geri kazanım ünitesi şematik görünümü

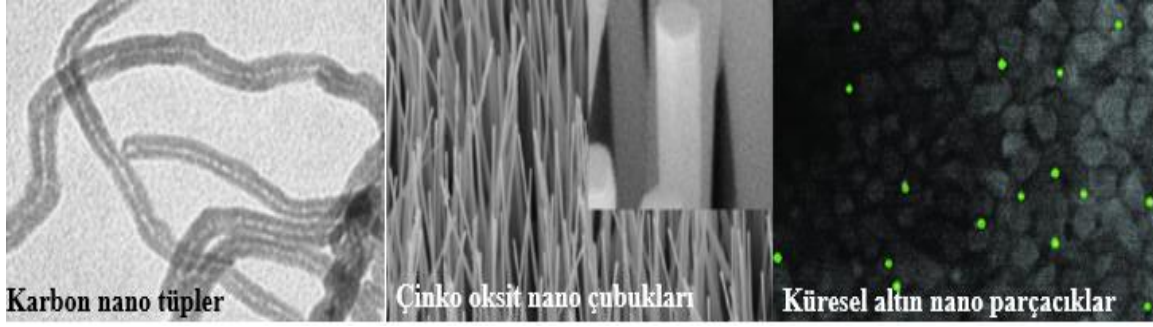
5. NANOAKIŞKAN TANIMI VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Nano kelimesi, milimetrenin milyonda biri anlamına gelmektedir. Nanopartikül ise, boyutu 100 nanometre ve 100 nanometreden daha küçük boyutlu parçacık olarak tanımlanmaktadır. Nano boyutlu nano parçacıklar daha büyük boyutlu yapılara oranla elektronik, biyolojik, termal, fiziksel, kimyasal, manyetik gibi birtakım kendilerine has özelliklere sahiptirler. Bu özgün yapılanmaları ile metalik nano parçacıklar; ısıtma-soğutma, elektronik, malzeme-metalürji, ilaç taşınımı gibi uygulamalarda yeni ve daha verimli yöntemlerin geliştirilmesine imkân vermektedir.

Nanoakışkanlar, nano partikül denilen en az bir boyutu 1-100 nm aralığında olan nanometre boyutlu parçacıkların (metal, metal oksit, karbon, karbit, nitrit vb.); su, soğutucu, etilen glikol, mineral yağ vb. geleneksel akışkanlar olarak da adlandırılan taban (baz) sıvıları ile birlikte süspansiyon oluşturmasıyla meydana gelen ısı transferi akışkanlarıdır (Şekil 5.1). Yüksek yüzey alanına sahip nano partiküllerin, ısı iletkenliği, ısı transfer oranı, ısı aktarım katsayısı gibi özellikleri konvansiyonel akışkanlara oranla daha yüksektir. Boyutları 20 nm' den daha az olan partiküllerin atomlarının %20 kadarı yüzeylerinde taşınır ki bu da onları termal etkileşime hazır hale getirir. Resim 5.1' de çeşitli nano parçacıklara ait elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Taban sıvısı içindeki nano parçacıkların görünümü



Resim 5.1. Çeşitli nano parçacıklara ait elektron mikroskobu görüntüleri [40]

Nanoakışkanlar, geleneksel çalışma akışkanlarına oranla ısı sistemde kullanımları için birçok avantaja sahiptirler:

- Geleneksel çalışma akışkanlarına göre, akış kanallarında tıkanmaya neden olma, akışı bozma ve engelleme, aşınma, çökme vb. sorunlarla başa çıkmada daha aktiftir; yüksek ısı yüklerinin olduğu mikro kanallar ile nanoakışkanların birlikteliği sayesinde hem daha yüksek iletkenli akışkanlar hem de geniş bir ısı transfer alanı elde edilecektir. Mikro kanalların kolay tıkanabilme gibi problemleri nedeniyle milimetre veya mikro boyutlu partiküller ile çalışılmaz. Sadece nano parçacıklar mikro kanallardan geçmek için uygundur. Nano boyutlu parçacıkların düşük parçacık momentumu ile katı bir bölgeye uyguladıkları momentum kuvveti de küçük olacağından ısı değiştiricileri, boru yüzeyleri vb. temasta bulunan alanların aşınma veya korozyona uğrama şeklinde zarar görme ihtimalleri düşüktür.
- Akışkan, küçük parçacıklardan oluştuğundan hafiftir, çökme olasılığı da azdır dolayısıyla kararlı hale gelmesi kolaydır. Bir akışkan içinde süspansiyon haline getirilmiş parçacıkların rastgele hareketi ile oluşan Brownian kuvveti, nanoakışkanın kararlılığını arttırabilmektedir.
- Küçük boyutlu olması ile akışkanda mikro hareketliliğe neden olan nano partiküllerin hareketli olması, ısı taşınım miktarını artırır. Böylece, mikro-taşınım ve artan ısı transferi ile akışkanda daha yüksek oranda ısı dağılımı sağlanmaktadır. Aynı zamanda mikro-taşınım hareketi ve sıcaklıktaki artış da birleşince nanoakışkandaki ısı iletkenliğinin artmasına olanak sağlar.
- Hacim oranlarına göre geniş yüzey alanına sahip olan nanoakışkanlar, süspansiyonun kararlılığının artmasına yardımcı olurlar. Buna ek olarak, büyük yüzey alanı ile nano parçacıklar taban akışkanında daha istikrarlı dağılmış bir süspansiyon oluştururlar.

- Isıl iletkenlikleri ile ısı aktarım kabiliyetini iyileştirirler. Böylece ısıl sistemin verimliliğine etkileri de büyüktür.
- Akışkanın viskozitesinde aşırı bir artış olmadığı takdirde, eğer küçük hacimsel konsantrasyonlarda termal iletkenlikte artış sağlanırsa pompalama gücünden büyük oranda tasarruf sağlayabilirler.
- Isıl sistemin tasarım boyutlarının küçülmesini sağlayarak maliyeti düşürürler.
- Fiyat/ performans oranları makuldür [41].

5.1. Nanoakışkan Türleri

Nanoakışkanlar parçacık tiplerine göre çeşitlendirilirler. Değişik partikül ve sıvıların kombinasyonuyla farklı nanoakışkanlar meydana gelmektedir [41]:

- Tek tip metalik nano partiküller (Cu, Fe, Ni, Ag, vb.).
- Metal oksitler (CuO, Al₂O₃, TiO₂, vb.).
- Alaşım nanoakışkanlar (Ag-Cu, Ag-Al, Al-Cu, Fe-Ni, vb.): Aynı olmayan metallerin birleşmesiyle oluşan alaşımlar, kullanılması amaçlanan alanlarda ana metallere göre daha etkilidir. Alaşımlı nano parçacıklardan elde edilen deney sonuçlarına göre alaşımın fiziksel özellikleri ile onu oluşturan metallerin fiziksel özelliklerinin farklı olduğu görülmüştür [42].
- Çok metalli oksitler (NiFe₂O₄, ZnFe₂O₄, vb.).
- Karbon tabanlı nanoakışkanlar veya karbon malzemeler (CNT, elmas, fulleren, grafit, grafen, vb.): Karbon tabanlı nanoakışkanların metallere oranla yoğunluklarının düşük olması ve ısıl iletkenliklerinin yüksek olması nedeniyle çalışma akışkanı olarak tercih edilmektedir. Metal ve metal-oksit malzemelerle karşılaştırıldığında, CNT' lerin daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip oldukları görülmüştür.
- Seramik nanoakışkanlar veya metal karbürler (SiC, Al₂O₃, CeO₂, CuO, Fe₂O₃, MgO, ZnO, WO₃, vb.).
- Metal nitrürler (SiN, TiN, AlN).

5.1.1. Tek tip nano partikülden oluşan nanoakışkanlar

Yalnızca tek bir nano parçacık tipini içeren nanoakışkan çeşididir. Termofiziksel özellikleri bakımından geleneksel akışkanlara göre daha üstün olması nedeniyle araştırmalarda daha etkili sonuçlar ortaya çıkarmışlardır [43].

- Metalik nanoakışkanlar: Saf bir metal ile baz akışkanın süspansiyonu olarak tanımlanır. Cu, Fe, Ni, Ag gibi metallerin termal iletkenliklerinin yüksek olması ile metalik nanoakışkanların da termal iletkenliği artırdığı görülmüştür.
- Seramik nanoakışkanlar: Seramik nanopartiküller, üretim rahatlığı, ekonomik olması, yoğunluklarının düşük olması ve solüsyondaki kararlı yapıları sayesinde daha çok tercih edilmelerinin yanında nanoakışkan ile ilgili araştırmalarda kullanılan ilk maddelerdir. Farklı tipteki seramikler arasında en fazla ilgi oksit nano akışkanlar üzerine olmuştur.

5.1.2. Hibrid tip nanoakışkanlar

Temel akışkan içine, birçok nano partikül kombinasyonu eklenerek oluşturulan nano akışkanlardır. Hibrid nanoakışkanlar, tek tip nano partikül içeren akışkanlara göre daha yüksek termal iletkenliğe ve viskoziteye sahiptir.

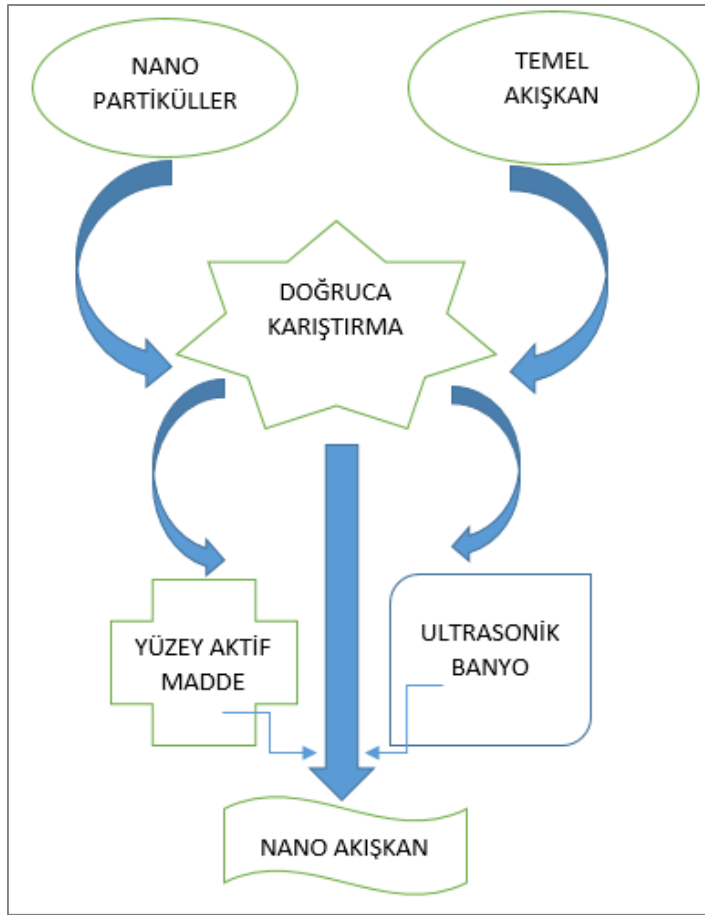
5.2. Nanoakışkan Hazırlama Yolları

Isı transferi uygulamalarında kullanılan nanoakışkanların davranışları; baz sıvının ve fazların karakteristiklerine, nano parçacık boyutuna, miktarına, cinsine, homojen dağılımına öte yandan kullanılan seyreltici özelliğine ve yüzey aktifleştirici maddenin kullanımına bağlı olarak değişiklik gösterir. Isı transferi uygulamaları için kullanılacak yüksek kararlılık gösteren nanoakışkanların hazırlanması iki farklı yol ile gerçekleştirilir; ilki nano partiküllerin aynı zamanda üretildiği ve dağıtıldığı tek adımlı yöntem, diğeri ise boyut azaltma ile gerçekleşen iki adımlı yöntemdir.

5.2.1. İki adımlı yöntem

Sentezlenmiş veya kuru toz halinde satın alınmış nano parçacıklar son haline getirilmesi için çeşitli işlemlerden geçirilir. Nano parçacıklar; mekanik, öğütme, dövme, buhar fazı vb. yöntemlerle seri üretime uygun şekilde hem ekonomik hem kaliteli ürün elde etmek için

sentezlenirler. Çeşitli şekillerde sentezlenmiş nano parçacıkların fiziksel ve kimyasal özellikleri de farklılık gösterir [44]. Kuru toz halindeki nano parçacıkların temel akışkan içinde, ultrasonik banyo, karıştırıcılar, bilyalı öğütücüler gibi ekipmanların yardımıyla homojen dağıtılması en sık kullanılan işlemdir. Parçacıklar arasındaki Van der Waals kuvvetleri ve yüzey alan büyüklükleri kümeleşmeye neden olduğundan dolayı, kararlılığı arttırmak için yüzey aktif madde kullanılmaktadır. Üretim maliyetinin diğer yöntemlere oranla düşük olması ve nanopartikül üretiminin kolay olması nedeniyle nanoakışkanların hazırlanmasında en çok kullanılan yöntem iki adımlı yöntemdir [45]. Nanoakışkan hazırlamada iki adımlı yöntem kullanılmasına dair şema Şekil 5.2’ de verilmiştir.



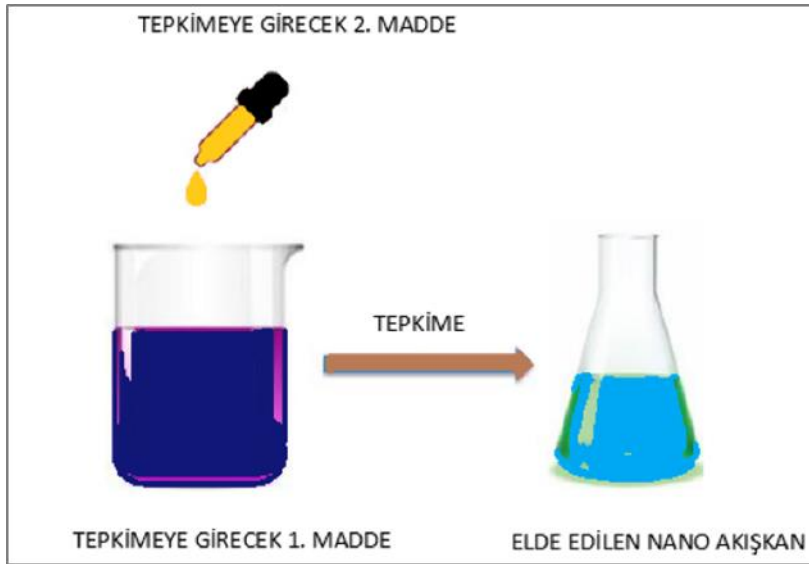
Şekil 5.2. Nanoakışkan hazırlamada iki adımlı yöntem akış şeması

5.2.2. Tek adımlı yöntem

Tek adımlı yöntem; nano partiküllerin elde edilmesi ve temel akışkan ile buluşması yalnızca tek bir aşama olan “nanoakışkanda birleşmesi” yolu ile meydana gelir. Bu yöntemde, fiziksel ve kimyasal tepkimeler aracılığı ile kimyasal ıslatma yöntemi, vakum buharlaştırma yöntemi

vb. işlemlerle nanoakışkan elde edilir. Yöntemde, nano partiküllerin çökmesini azaltmak ve kararlılığı artırıp homojen karışım elde etmek için depolama, kurutma, dağıtma işlemleri uygulanır. Genellikle ısı iletim katsayısı yüksek ve oksitlenme hızı yüksek olan metal nano partiküller tercih edilir. Metal nano parçacıklar akışkan ile birlikte sentezlenirken oksijen ile teması engellenmektedir.

Tek adımlı yöntemin avantajı, nanoakışkandaki partiküllerin topaklanması veya kümeleşmesi nispeten daha azdır. Dezavantajları ise, yöntemin maliyetinin yüksek olması, tepkimeler tamamlanmadığı takdirde oluşan ve çöken kalıntılar ve yöntemle uyumlu sıvıların sadece düşük buhar basınçlı sıvılar olmasıdır [46]. Tek adımlı kimyasal süreçli yöntem ile nanoakışkan hazırlamada tek adımlı yöntem şeması Şekil 5.3' te verilmektedir.



Şekil 5.3. Nanoakışkan hazırlamada tek adımlı yöntem

5.3. Nanoakışkanların Kararlılığı

Kararlılık, nanoakışkanın performansını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Tanecikler arasındaki Van der Waals kuvveti onları bir arada tutup kümeleştirmeye meyillidir ve yerçekimi ile de sıvı içinde kümeleşen tanecikler dibine çökerler. Eğer nanoakışkan kararsız bir yapıya sahipse; topaklaşma, çökme gibi ısı transferi verimliliğini düşüren, pompalama gücünün artmasına ihtiyaç duyulan ve sistemin borularında tıkanmaya neden olan etkiler ortaya çıkabilir. Nano parçacıkların kümeleşmesi, yalnızca kanalların tıkanmasına sebep olmamakta aynı zamanda ısıl iletkenliğin azalmasında da rol

oynamaktadır. Taneciklerin davranışını etkileyen diğer bir kuvvet ise, elektriksel çift katmanlı itme kuvvetidir. Partiküller sterik ve elektrostatik itme mekanizmasıyla birbirinden ayrılır [47]. Nanoakışkanın kararlı bir yapıda olabilmesi için, elektriksel çift katmanlı itme kuvvetinin, Van der Waals çekme kuvvetinden baskın olması beklenir. Kullanılacak nanoakışkanların kararlılık dağılımını etkileyen faktörlerin analiz edilmesi çok gerekli bir işlem olmaktadır.

5.3.1. Nanoakışkanların kararlılıkları değerlendirilirken kullanılan yöntemler

Nanoakışkanların kararlılıkları değerlendirilirken kullanılan yöntemler şunlardır;

- Zeta potansiyeli analizi,
- Sedimentasyon veya çökelme ve santrifüj yöntemi,
- Ultraviyole-görünür bölge absorpsiyon spektroskopisi yöntemi veya spektral emicilik analizi,
- Elektron mikroskopisi yöntemi,
- Dinamik ışık saçılım yöntemi.

Zeta potansiyeli analizi

Zeta potansiyeli; nano parçacıkların arasındaki itme kuvvetinin elektriksel olarak potansiyel değeridir. Birimi mili voltur. Bu değer, parçacıkların yüzeylerindeki yüklere göre negatif veya pozitif olabilir. Zeta potansiyeli yüksek olan negatif veya pozitif yüklü nanoakışkanlar elektriksel anlamda kararlı yapıya sahiptirler. Zeta potansiyeli düşük olan akışkanlarda ise kararsızlık ile topaklanma gibi etkiler söz konusudur. Nano akışkanlarda zeta potansiyeli değeri;

- 15 mV-30 mV aralığında ise kısa süreli çökelti gözlemlenmektedir,
- 30 mV ise akışkanın kararlı olduğu bilinmektedir yalnız 45 mV ve üzeri değerlerde kararlılığın en üst seviyede olduğu gözlemlenmiştir ve Zeta potansiyeli 40-60 mV arası olan nanoakışkanların da mükemmel bir kararlılığa sahip olduğuna inanılmaktadır [48].

Sedimentasyon yöntemi

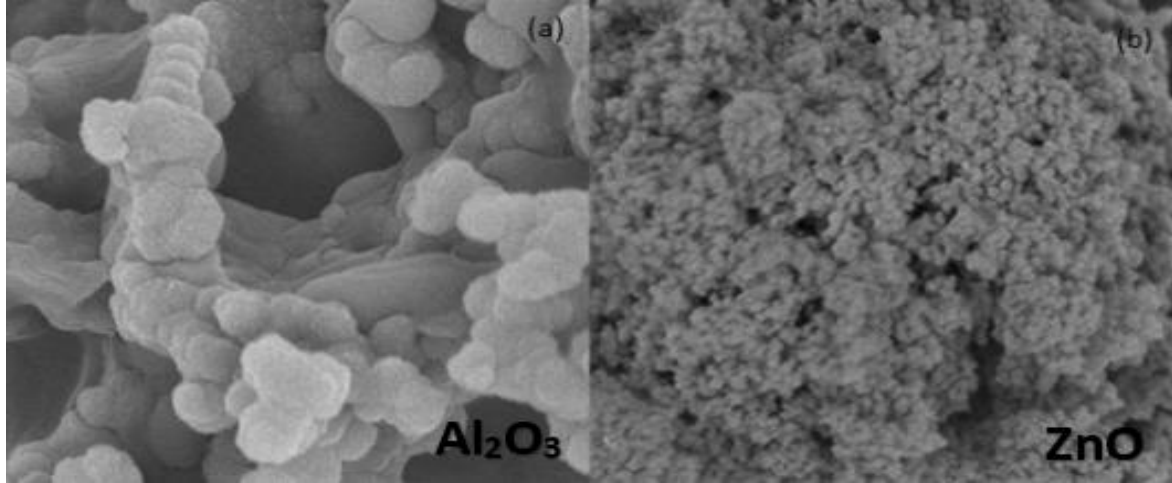
Çökelme ve santrifüj da denilen yöntemde kararlılık seviyesi, nanoakışkandaki nano parçacıkların çökelme miktarlarına göre belirlenir. Yöntem diğerlerine kıyasla ucuz ve basittir. Ölçülendirilmiş cam tüp içerisine son haline getirilmiş kullanıma hazır olan nano akışkandan örnek alınarak geçen süreyle birlikte çökelme miktarı ölçülür. Çökelme hızı parçacık boyutuyla doğru orantılıdır. Parçacık boyutu büyüdükçe çökelme hızı da artar. Nanoakışkan parçacık boyutu ve sıvıdaki dağılımı zamanla sabit kalıncaya kadar beklenir, eğer çökelme problemi yaşanmıyorsa nanoakışkan kararlıdır denilebilir. Sonuçlar, nanoakışkan çöktürülmesinin fotoğrafı ile tahmini olarak değerlendirilir [49].

Ultraviyole-görünür bölge absorpsiyon spektroskopisi yöntemi

UV-spektroskopisinde, spektral absorpsiyon yönteminin, bir nanoakışkanın karakteristik absorpsiyon bandı 190-1100 nm dalga boyunda olduğu zaman kararlılık analizinde kullanılması mantıklı ve uygundur. Ölçülen absorpsiyon değeri çözelti konsantrasyonu ile ilgilidir. Konsantrasyonu yüksek veya rengi koyu olan nanoakışkanlar ışığı emdiği için dağınık ışık şiddeti azalır ve bu yöntemin uygulanması zorlaşır [50].

Elektron mikroskopisi yöntemi

Bu yöntemde, TEM adı verilen geçirimsiz elektron mikroskobu ya da SEM adı verilen taramalı elektron mikroskobu ile nano parçacıkların sıvıdaki konsantrasyonu, çökmesi, toplanması vb. gelişmeleri izlenerek kararlılık belirlenir (Resim 5.2). TEM mikroskobu ile yüksek çözünürlüklü elektron mikrofotografisi denilen görüntüler alınır. Bu görüntüler incelenerek nano parçacık toplanması veya kümeleşmesi tespit edilir ve akışkanın kararlı olduğu sonucuna varılır [51].



Resim 5.2. (a) Al_2O_3 nano parçacıklarının SEM mikroskobu görüntüleri ve (b) ZnO nano parçacıklarının SEM mikroskobu görüntüleri [52]

Dinamik ışık saçılım yöntemi

Bu yöntemde inceleme yapılırken, sıvı içinde karışmış nano partikülleri aydınlatan lazer bulunur. Brownian hareketi ile parçacıklar hızla hareket etmeye başlar. Işık dalgalanmaları bir foton detektörü yardımıyla kaydedilip parçacık hızı belirlenir ve hız verilerinden değişken olan parçacık boyutu ve dağılımı ölçülür. Parçacık boyutu ve sıvıdaki parçacık dağılımı verilerine göre uzun vadede kararlılık izlenebilir. Parçacık boyutu zamanla sabit bir değer alıyorsa akışkan kararlı, boyut değerleri zamanla artıyorsa akışkan kararsız olarak adlandırılacaktır. Bu yöntem ile parçacıkların boyutlarını 1nm değerine kadar ölçmek mümkündür.

5.3.2. Nanoakışkanların kararlılığını arttırmak için kullanılan yöntemler

Nano akışkanların kararlılığını arttırmak için kullanılan başlıca yöntemler şunlardır;

- Yüzey aktifleştirici madde eklenmesi,
- Ultrasonik karıştırma,
- pH değeri kontrolü.

Yüzey aktifleştirici madde ilavesi

Nanoakışkan, nano parçacıklar ve baz sıvının karışımıyla oluşan bir akışkan türüdür. Nanoakışkanın kararlılık özelliği, kullanılan nano parçacıklar ve baz akışkanın türüne

bağlıdır. Yüzey aktifleştirici madde, nanoakışkanı oluşturan parçacıklar ve temel sıvı için bağlantı oluşturarak kararlılığı sağlamakla görevlidir. Dağıtıcı olarak da adlandırılır. Dağıtıcılar, iki maddenin temasını artırarak ıslanabilirliği artırır. İki fazın arasına yerleşerek nano parçacık ile akışkan arasındaki sürekliliği sağlarlar. Dört çeşit yüzey aktifleştirici madde türü mevcuttur. Bunlar;

- Anyonik yüzey aktif maddeler (Sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS), vb.),
- Katyonik yüzey aktif maddeler (Setil trimetil amonyum bromür (CTAB), Benzalkonyum klorür, vb.),
- İyonik olmayan yüzey aktif maddeler (Gum arap (GA), Polioksietilen (10) nonilfenil eter, Poli vinil pirolidon (PVP), Tween 80, Tween X-100, vb.)
- Amfoterik yüzey aktif maddelerdir (Lesitin, Sodyum lauroamphoasetat, vb.) [48].

Dezavantajları; dağıtıcı eklenmesi ile ısı transfer ortamında bozulma meydana gelebilir, ısıtıldığında köpük oluşturabilir, yüzey aktifleştirici madde molekülleri, nano parçacıklar ve taban akışkanı arasındaki ısı direnci artırabilir. Bu da ısı iletkenlik artışını olumsuz etkileyebilir.

Ultrasonik karıştırma

Ultrasonik karıştırma işleminde ultrasonik dalgalardan yararlanılır. Akışkan içindeki nano parçacıkların birbirlerine olan çekim kuvvetini engelleyerek kararlılık sağlamaya yardımcı olur. Uygulama süresi çalışılacak sisteme göre değişmekle birlikte banyo ve prob tipli olarak iki çeşit yöntem vardır. Uzun süre uygulanan sonikasyon işlemi nano partikül boyutlarını ve yüzey aktifleştirici maddeyi olumsuz etkileyebilmektedir [48].

pH değeri kontrolü

pH değerinde yapılacak olan değişimle nano akışkanların kararlılık seviyeleri yükseltilerek çalışılacak sistemin verimini artırmak mümkündür. pH değeri, nano parçacıkların yüzeyleri ile ilgilenir. Nanoakışkanın pH değeri, reaktif olmayan alkali ya da asidik çözelti ilave edilmesiyle değiştirilebilir. Zeta potansiyeli değerinde değişim sağlanabilir [53].

5.4. Nanoakışkanların Yaygın Olarak Kullanıldıkları Alanlar

Nanoakışkanlar teknolojik gelişmelerle birlikte, geleneksel çalışma akışkanlarına kıyasla sahip olduğu üstün termal özellikleri sebebiyle ısı transferi uygulamalarında verim artırmaya yönelik ve ısı transferini iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Nanoakışkanların başlıca kullanım alanları; ulaşım ve otomotiv sektörü, elektronik uygulamalar, endüstriyel ısıtma ve soğutma sistemleri, nükleer reaktörlerin soğutulması, ilaç ve biyomedikal sektörü, enerji ve uzay uygulamalarıdır.

Elektronik sistemlerdeki problemler; fazla ısı üretiminden kaynaklanan ısı yönetimindeki zorluklar ve sistem boyutlarının küçülmesiyle azalan yüzey alanlarının ısı atımında yani soğutmada karşılaştığı zorluklardır. Soğutma, birçok sektörün karşılaştığı önemli problemlerden biridir. Soğutma miktarını arttırmanın yolu, ısı transfer yüzey alanını arttırmaktır. Isı atımını iyileştirmede; soğutma cihazlarında optimum geometriyi bulmak ve ısı iletim kapasitesini artırmak gibi yöntemler mevcuttur. Araştırmalarda, nanoakışkanların soğutucunun ısıl iletkenliğini artırarak ısı taşınım katsayısını artırabileceği kanıtlanmıştır. Örneğin bilgisayarda, çalışma sıvısı olarak nanoakışkan kullanılan ısı boruları ile daha yüksek ısıl performans sergilenmektedir. Nanoakışkanlar yakıt tasarrufuna neden olarak radyatörün boyutunun düşürülmesine olanak sağlar.

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içinde en büyük potansiyele sahip enerji çeşididir. Güneş enerjili su ısıtıcılarının kullanımı giderek yaygınlaşmakta ve verimliliğini artırmak için birçok yöntem geliştirilmektedir [43]. Kullanılan çalışma akışkanının ısı transfer özellikleri güneş kolektörlerinin performansını etkilemektedir. Çözüm, geleneksel akışkanlara eklenen yüksek optik özelliklere ve ısıl iletkenliğe sahip nano parçacıkların kullanılmasındadır. Nanoakışkanlardaki nano partiküller, akışkanın güneş enerjisini emmesine katkı sağlayarak piyasada yaygın olarak kullanılan güneş enerjili su ısıtıcılarının verimliliğini arttırmaktadırlar. Giderek artan enerji ihtiyacı ile enerji depolama ihtiyacı da ortaya çıkmıştır. Termal enerjinin depolanması, endüstriyel tesislerde ve yaşam alanlarında ısının verimli kullanılması, atık ısı yönetimi bakımından önemli yere sahiptir.

Jeotermal enerji ve madencilik uygulamalarında da nanoakışkanlardan yararlanılmaktadır. Yer yüzeyinden derinliklere inildikçe sıcaklık artışı problem oluşturmaktadır.

Nanoakışkanların kullanılmasıyla bu sıcaklıkla ısınan araçların soğutulması mümkün olmaktadır.

5.5. Nanoakışkanların Termofiziksel Özellikleri

Nano boyuttaki parçacıkların temel akışkana eklenmesiyle, sıvının bazı termofiziksel özelliklerinde değişimler ve iyileşmeler meydana gelmektedir. Farklı türdeki, farklı boyuttaki ve farklı derişimdeki nano parçacıklar, taban akışkanın fiziksel özelliklerinde farklı etkilere yol açmaktadır. Parçacıkların eklenmesiyle akışkanda; yoğunluk, özgül ısı, viskozite, ısıl iletkenlik gibi fiziksel özelliklerde değişimler oluşmaktadır ve uygulamaya geçmeden önce bu özelliklerin belirlenip üzerinde çalışılması gerekmektedir.

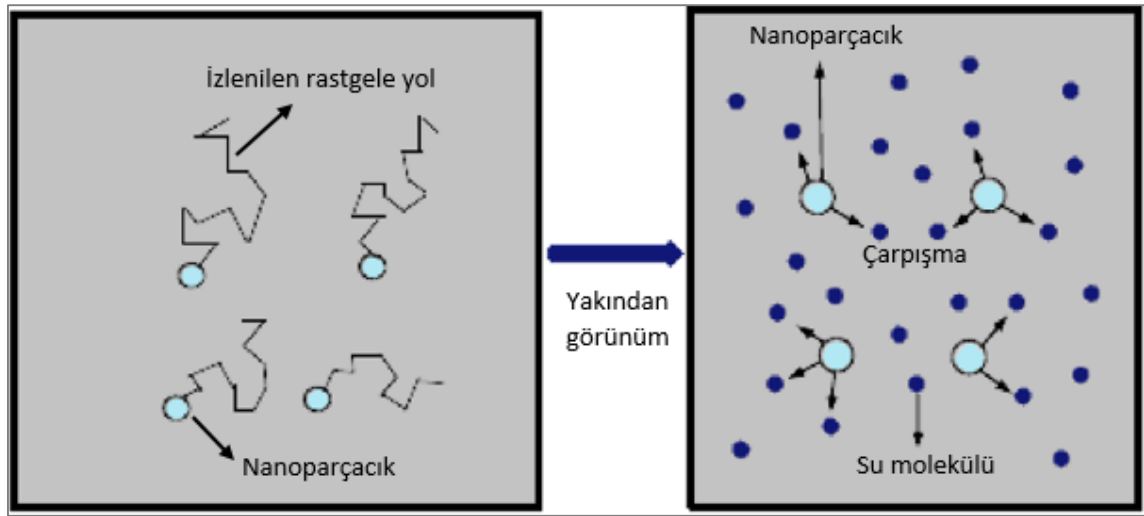
5.5.1. Isıl iletkenlik

Akışkan ya da parçacığın ısıyı sıcak bölgeden alıp daha soğuk bölgeye doğru iletebilme kapasitesi ısıl iletkenlik olarak tanımlanır. Nanoakışkan elde etmenin amacı; termal iletkenliği daha yüksek olan ısı transfer akışkanı ile çalışma ihtiyacıdır ve nanoakışkanların termal iletkenlik değerleri, süspansiyonların kapasitelerini göstermeleri açısından çok önemlidir. Termal iletkenlik değeri, akımdaki bir akışın ısı transfer özelliklerini gösteren Nusselt ve Rayleigh sayılarını değiştirir.

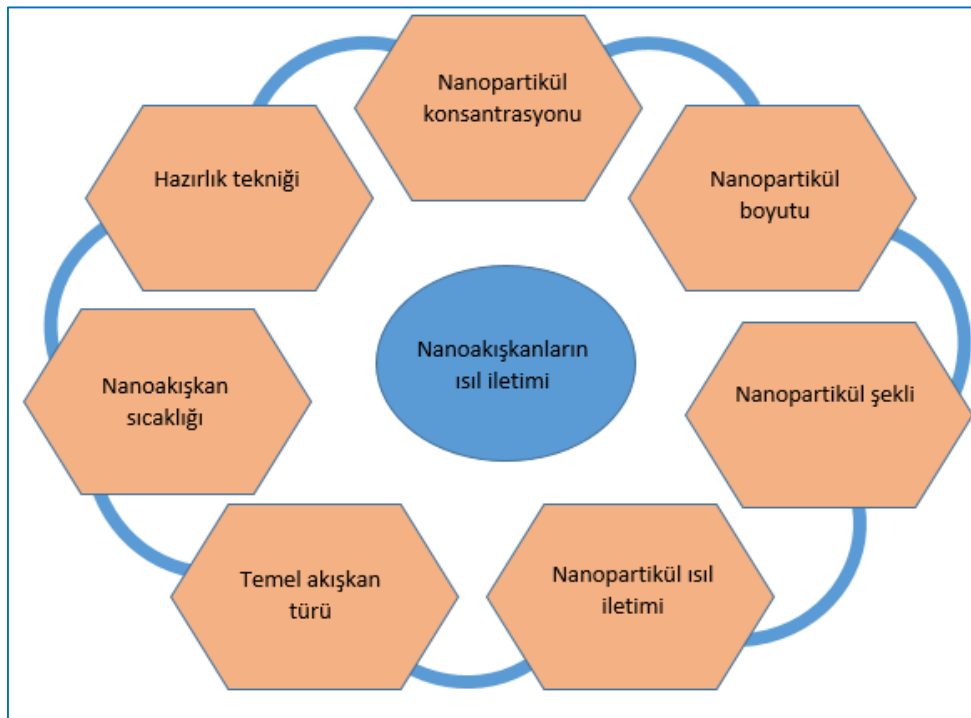
Nano parçacıklar, taban akışkanlara eklendiklerinde, eğer ısıl iletkenlik değerleri taban sıvısından büyük ise eklendikleri sıvının ısıl iletkenlik değerlerinin yükselmesine sebep olurlar. Nanoakışkanların ısıl iletkenlik değerlerinin taban sıvısına kıyasla daha yüksek olmasının bir nedeni; nano parçacıkların sıvı içindeki moleküllerle çarpışıp gelişigüzel yönlerde hareket etmeleridir. Bu harekete Brownian hareketi denilmektedir. Brownian hareketi ile parçacık boyutu ters orantılıdır. Parçacık boyutu azalırsa, Brownian hareket etkinliği artar. Brownian hareketinin şematik görünümü Şekil 5.4’ te verilmiştir. Nano akışkanların ısıl iletkenlik değerlerinin taban sıvısına kıyasla daha yüksek olmasının diğeri bir nedeni ise; nano parçacığın ara yüzey katmanının sıvı ve bu katı partiküller ile köprü görevi görmesi ile ısıl iletkenliğin artışıdır. Uygulamalarda en çok tercih edilen nano parçacık türlerinin ve taban sıvılarının ısıl iletkenlikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Termal iletkenlik ölçümünde şu yöntemlerden faydalanılmaktadır; geçici sıcak tel yöntemi (GST),

geçici düzlem kaynağı yöntemi (GDK), sıcaklık salınım tekniği (SS), optik yöntem, zamandan bağımsız paralel plaka yöntemi.

Isı iletimi uygulamalarında kullanılan nanoakışkanın ısı iletim değeri; nano parçacık hacim konsantrasyonu, nano parçacıkların ısı iletim değeri, nano parçacık şekli, boyutu ve ara yüz, taban sıvısının türü, kümeleşme, sıcaklık, pH değeri vb. parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterir (Şekil 5.5).



Şekil 5.4. Brownian hareketinin şematik görünümü



Şekil 5.5. Nanoakışkanların ısı iletkenliğini etkileyen parametreler şeması [31]

Literatüre bakıldığında, nanoakışkanların ısı iletkenlik değ erlerine ulaşabilmek için araşt ırmacılar tarafından çe şitli teorik ç alı ş malar yapı lmı ş ve modeller geli ş tirilmi ş tir. 1881 yılında Maxwell tarafından olu ş turulan ısı iletim modeli, diğ erlerine oranla daha büyük parç acıklara sahip katı-sıvı karı ş ımı için ö ne sürö len ilk modellerden biridir ve kü re biçimli nano parç acıkların baz akı ş kan içindeki süspansiyonu için geli ş tirilmi ş tir [60]. Maxwell'in ısı iletkenlik modeli Eş . 5.1' de verilmi ş tir.

$$\frac{k_n}{k_t} = \frac{k_p + 2k_t + 2(k_p - k_t)\phi}{k_p + 2k_t - (k_p - k_t)\phi} \quad (5.1)$$

Bu model küçük hacimsel konsantrasyonlarda ve homojen olarak karı ş mı ş , parç acık boyutlarının eş it ve birbiri ile etkileş im içinde olmadı ğ ı akı ş kanlar için kullanılabilmektedir.

Bruggman ise Maxwell'in modelinden yola ç ıkarak daha yüksek konsantrasyonlardaki nanoakı ş kanlar için bir model geli ş tirmi ş tir. Bruggman'ın modeli Eş . 5.2' de verilmi ş tir. Homojen haldeki küresel parç acıklar iç eren iki fazlı karı ş ımlar için geli ş tirilmi ş tir.

$$k_n = \frac{1}{4} [(3\phi - 1)k_p + (2 - 3\phi)k_t] + \frac{k_t}{4} \sqrt{\Delta} \quad (5.2)$$

$$\Delta = \left[(3\phi - 1)^2 \left(\frac{k_p}{k_t} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{k_p}{k_t} \right) \right] \quad (5.3)$$

Eş . 5.4' de Lu-Lin tarafından küresel ve küresel olmayan parç acıklar için geli ş tirilen model verilmi ş tir. Küresel parç acıklarda $\alpha=10$ için, $a=2,25$, $b=2,27$; $\alpha=\infty$ için $a=3$, $b=4,51$ olarak kabul edilir.

$$\frac{k_n}{k_t} = (1 + \alpha\phi + b\phi^2) \quad (5.4)$$

Modellerde k_p parç acık ısı iletkenliğ i, k_t temel akı ş kanın ısı iletkenliğ i, k_n nanoakı ş kanın ısı iletkenliğ i, ϕ süspansiyonun parç acık hacim oranı, α ısı iletkenlikler oranı, ($\alpha = k_p/k_t$), $\beta = (\alpha - 1)/(\alpha + 2)$ ve n parç acık ş ekill faktö rü olarak tanımlanmı ş tir. β ise nano katman kalınlığ ının parç acık yarıç apına oranıdır [61]. Bu modellerden yola ç ık ılarak hesaplanan, deneylerde kullanılan nanoakı ş kanların ısı iletkenlik değ erleri Ç izelge 6.9' da verilmi ş tir.

5.5.2. Viskozite değeri

Akışkanın akmaya gösterdiği iç dirence viskozite denir. Nanoakışkanlarda, zorlanmış taşınım esnasında basınç düşüşünü direkt etkilemesi sebebiyle pratikteki uygulamalarda ısı transferini iyileştirmekte kullanılan en etkili faktörlerden biri viskozitedir. Nano parçacıkların taban sıvısına eklenmesiyle bu sıvının viskozite değerinde değişiklikler meydana gelir. En az ısıl iletkenlik değeri kadar önemli olan viskozite değeri, gerekli pompalama gücünü de etkilemektedir. Basınç düşüşü viskozite ile doğrudan ilgili olduğundan, basınç düşüşünün artmasıyla pompalama gücü ihtiyacı da artar. Sıcaklık, kayma gerilimi, nanopartikül boyutu ve şekli, kararlılığı artırmak için kullanılan yüzey aktifleştirici madde eklenmesi, taban sıvı cinsi gibi özellikler viskozitede değişime sebep olabilir. Örneğin akışkanların ısıtılıp sıcaklığının artması ile moleküllere enerji verilir ve moleküllerin gelişigüzel hareketi artar bununla birlikte molekülleri bir arada tutan kuvvetlerin etkisi zayıflar. Böylelikle akışkanın kayma gerilmesine karşı gösterdiği direnç azalır ve viskozite değeri düşer. Viskoziteye etki eden diğer bir etken de nanopartikül konsantrasyonudur ve konsantrasyon arttıkça viskozite değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Titreşimli viskozimetre, döner viskozimetre, kılcal viskozimetre, kabarcık ve orifis viskozimetre kullanılarak nanoakışkanların viskozite değerleri hesaplanabilir.

Literatüre bakıldığında, nanoakışkanların viskozite değerlerine ulaşabilmek için araştırmacılar tarafından çeşitli teorik çalışmalar yapılmış ve modeller geliştirilmiştir. Einstein, çok küçük hacimsel oranlardaki küresel parçacıklar için Eş. 5.5'te verilen modeli geliştirmiştir.

$$\frac{\mu_n}{\mu_t} = (1 + 2,5\phi) \quad (5.5)$$

Batchelor, Brownian hareketinden yola çıkarak Einstein modelini geliştirmiş ve aşağıdaki modeli elde etmiştir.

$$\mu_n = (1 + 2,5\phi + 6,5\phi^2)\mu_t \quad (5.6)$$

Brinkman, Einstein modelinden geliştirilmiş ve %4' den daha küçük parçacık oranındaki sürekli ortam koşullarında geçerli bir model türetmiştir. Deneylerde kullanılan

nanoakışkanlar için Brinkman modeli kullanılmış olup elde edilen viskozite değerleri Çizelge 6.9’ da verilmiştir.

$$\mu_n = \mu_t (1 - \emptyset)^{-2,5} \quad (5.7)$$

Modellerde μ_p parçacık viskozitesi, μ_t temel akışkanın viskozitesi, μ_n nanoakışkanın viskozitesi, $\emptyset$ süspansiyonun parçacık hacim oranıdır [62].

5.5.3. Yoğunluk ve özgül ısı

Nanoakışkanlar için özgül ısı; bir gram nanoakışkanın sıcaklığını 1 santigrat derece kadar arttıracak olan sıcaklık değeridir. Yoğunluk ve özgül ısı kapasitesi, nanoakışkanlarda taşınım ile ısı transferini iyileştirmede, ısı depolamada ve ısı transfer hızını etkilemede önemli bir yere sahiptir. Prandtl sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Nano parçacık konsantrasyonunun ve sıcaklığın özgül ısı üzerinde etkili oldukları gözlemlenmiştir.

Nanoakışkanların özgül ısı ve yoğunluk değerlerini elde edebilmek için literatürde Pak ve Cho. [63] tarafından geliştirilen modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller aşağıda verilmiştir.

$$Cp_n = \emptyset Cp_p + (1 - \emptyset) Cp_t \quad (5.8)$$

$$\rho_n = \emptyset \rho_p + (1 - \emptyset) \rho_t \quad (5.9)$$

Modellerde Cp_p parçacık özgül ısı ve ρ_p parçacık yoğunluğu, Cp_t temel akışkanın özgül ısı ve ρ_t temel akışkanın yoğunluğu, Cp_n nanoakışkanın özgül ısı ve ρ_n nanoakışkanın yoğunluğu olup $\emptyset$ süspansiyonun parçacık hacim oranıdır.

5.5.4. Yüzey gerilim faktörü

Akışkanların yüzey gerilimi, sıcaklık, parçacık konsantrasyonu ve parçacık boyutuna bağlı olarak değişen ve ısı sistemine ısı transfer performansı için göz önünde bulundurulması gereken önemli bir faktördür. Yüzey gerilimi; yüzeyin ıslanabilirlik, kabarcık büyümesi gibi etkilerde, ısı transfer katsayısını artırmaya yönelik bir kuvvettir. Moleküller arası çekme kuvvetinin, yüzeydeki geometrik dengesizliğinin sonucudur. Sabit sıcaklık ve sabit basınçta

akışkan yüzeyini 1 m^2 ya da 1 cm^2 büyütmek için verilmesi gereken enerji, yüzey gerilimi (σ) olarak tanımlanır. Birimi dyn/cm ' dir.

6. MATERYAL METOT

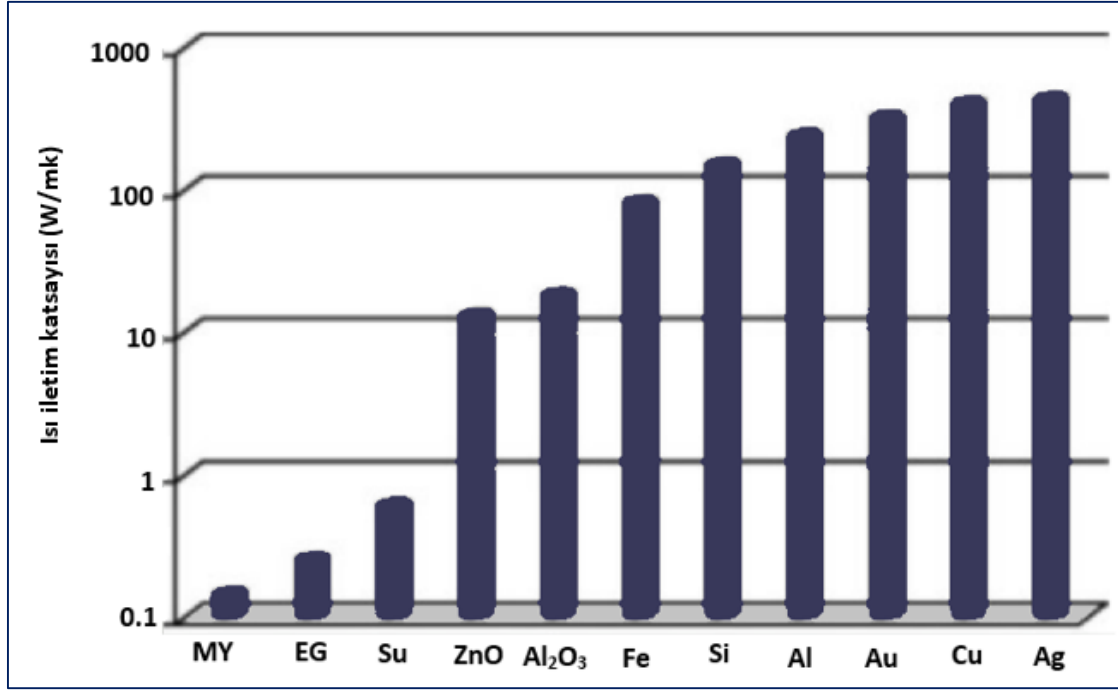
6.1. Deneysel Çalışma

Isı transferi miktarı; ısı transferi yüzeyinin artırılması, akış geometrisinin ve yüzey sınır koşullarının değiştirilmesi, çalışma akışkanının ısı iletkenliğinin yükseltilmesi gibi çeşitli yollarla artış gösterebilmektedir. Bir diğer önemli yöntem ise, çalışma akışkanının ısı iletkenliğini yükseltmektir. Çalışma akışkanının yanı sıra, evaporatör ve kondenser bölgesi arasındaki sıcaklık farkının yüksek olması ve bu ısının kondenser bölgesine aktarılabilmesi ve ayrıca ısı borularının eğim açısı da, ısı borularının verimini etkileyen parametrelerin başında gelmektedir.

Isı borularında, çalışma akışkanları ısı transferinin gerçekleşmesi için ısıyı taşımakla görevlidir. Bu bağlamda saf su, geleneksel çalışma akışkanı olarak bilinmektedir. Isı borularının verimlerine etki eden en önemli noktalardan biri, kullanılan çeşitli çalışma sıvılarıdır. Çalışma akışkanlarının ısı iletkenliklerini yükseltmek amacıyla içlerine, bu akışkanların ısı iletkenliklerinden daha yüksek iletkenlikteki nano parçacıklar eklenmektedir. Eklenen 1-100 nm boyutlu bu nanopartiküller ile bilinen temel ısı transfer akışkanları olan su, sentetik yağ ve etilen glikol gibi akışkanlar belirli hacimsel veya kütsel oranlarda karıştırılarak yeni akışkanlar elde edilmektedir. Böyle akışkanlara nanoakışkan denilmektedir. Akışkanın ısı iletkenliği (W/mK) ve ısı direnci, ısı iletimindeki performansı etkileyen başlıca faktörlerdir. Nano boyuttaki bazı parçacıkların ısı iletkenlik verileri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Şekil 6.1’de bazı katı ve sıvıların grafiksel olarak ısı iletkenlik karşılaştırmaları verilmiştir. Anlaşıldığı üzere katı parçacıkların ısı iletkenlikleri sıvılara göre daha fazladır [10]. Katıların yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğunun gözlemlenmesi sonucunda, mikro veya daha küçük boyutlarda partiküllerin sıvı akışkanlara belirli oranlarda katılmasıyla termal iletkenliği artırma fikri ortaya çıkmıştır. Çalışma akışkanının içine eklenen bu nano parçacıkların boyutlarının ısı transferine etkisi; ısı direncin artmasına sebep olmaları veya sıvı içinde çekirdeklenmeye neden olarak olumsuz etkilenmesine yol açmaları gibi etkilerinden dolayı çok önemlidir. Yapılan araştırmalar sonucunda, XO ve X_2O_3 tipi oksitlerin kullanılmasıyla; temel çalışma akışkanı olan saf suya %1-5 oranlarında ısı iletkenliği yüksek olan bakır, alüminyum, gümüş gibi metal elementler kullanılarak Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CuO vb. süspansiyonlarla, akışkanın ısı iletkenliğini yükselterek ısı borusunun veriminin artmasına olanak sağladığı görülmüştür [54].

Çizelge 6.1. Bazı katı ve sıvı akışkanların termal iletkenlik katsayıları [10]

MATERYAL	TERMAL İLETKENLİK (W/mK)	ÖLÇÜM (K)	SICAKLIĞI
Metalik Katılar			
Alüminyum (Al)	237	293	
Bakır (Cu)	401	273-373	
Altın (Au)	318	273-373	
Demir (Fe)	80,40	273-373	
Gümüş (Ag)	429	300	
Metalik Olmayan Katılar			
Alümina (Al_2O_3)	40		
CNT	3000		
Bakır Oksit (CuO)	76,50		
Elmas	3300		
Fulleren	0,40		
Silisyum (Si)	148		
Silikon	148		
Sıvılar			
Etilen Glikol	0,20		
Motor Yağı	0,14		
Gliserol	0,29	293	
Su	0,61	293	



Şekil 6.1. Bazı katı ve sıvıların grafiksel olarak ısı iletkenlik karşılaştırmaları (MY: Makina yağı, EG: Etilen glikol) [55]

Yapılan deneysel çalışmada, ısı borulu ısı geri kazanım ünitesi içinde çalışma akışkanı olarak saf su ve yüksek ısı depolama ve taşıma kapasitesine sahip nano boyutta ZnOAl₂O₃ ve ZnO parçacıkları içeren nanoakışkanlar kullanılmıştır. Nanoakışkan kullanarak yapılan deneysel çalışmada, akışkanların yüzey geriliminin azaltılmasıyla ısı borularının ısı direncini düşürmek, buharlaştırıcı ve yoğunlaştırıcı bölgeleri arasındaki sıcaklık farkı sayesinde ısı transferi miktarını arttırmak ve böylelikle ısı borulu ısı geri kazanım ünitesinin performansında artış sağlamak amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalar;

- Nano parçacık üretilmesi,
- Nanoakışkanların hazırlanması,
- Nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi,
- Nanoakışkanların ısı geri kazanım ünitesi performansına etkisinin gözlemlenmesi olmak üzere dört aşamadan oluşmaktadır.

6.1.1. Nanoparçacık üretimi ve nanoakışkanların hazırlanması

Nano boyuttaki metal ve metal oksit parçacık içeren nanoakışkanların, ısı iletkenlik açısından diğer akışkanlara göre daha yüksek performans sergilediği birçok çalışma ile gözlemlenmiştir. Isıl sistemlerde verimliliği artırmada çalışma akışkanı olarak tercih edilmektedirler. Isıl sistem problemleri çözümünde çalışma akışkanlarının termofiziksel özellikleri önemli parametrelerdir. Bu çalışmada; çinko oksit (ZnO) ve Zn Gahnit ya da Çinko spinel (ZnOAl_2O_3) partikülleri nano boyuta indirgenmiş olup baz akışkan olarak saf su içerisine belirli oranlarda süspanse edilerek yüzey aktifleştirici madde ile beraber nanoakışkanlar hazırlanmıştır ve termofiziksel özellikleri belirlenmiştir.

Deneye başlarken öncelikle, çinko spinel (ZnOAl_2O_3) ve çinko oksit (ZnO) nano partikülleri Nanografi Nano Teknoloji Bil İml ve Dan Ltd Şti firmasından tedarik edilmiştir. Firma, deneyde kullanılmaya uygun hale getirilmesi amacıyla parçacıkların boyutunu gerekli düzeyde hazırlamıştır. Nanografi Nano Teknoloji Bil İml ve Dan Ltd Şti firmasından gelen ZnO ve ZnOAl_2O_3 nano parçacıkları için parçacık boyutu dağılım eğrisi sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4' de verilmiştir. Bunun için, SPEX-8000M tipi kırıcı ve bilyeli öğütücü ile yüksek enerji çarpımlı üç boyutlu çalkalama mekanik alaşımlama yöntemi kullanılmıştır (Resim 6.1). İşlenmeden önce boyutu 5-50 nm olan nano parçacıkların boyutu küçültülmüştür ve üniform nanopartiküller elde edilmiştir. Baz akışkan içinde %2 kütleli derişimde karıştırılmak üzere ZnO ve ZnOAl_2O_3 nano parçacıklarının boyutları sırasıyla 18 nm ve 30-40 nm olarak son haline getirilmiştir. Baz sıvı içindeki nanoparçacık oranının artması, nanoakışkanın termal performansının da artmasına olanak verir. Fakat, bu artışın basınç düşüşü, çökelmeye sebep olma vb. problemlere yol açabilmesinden dolayı çeşitli partikül oranları test edilerek optimum partikül oranı %2 olarak belirlenmiştir [56].



Resim 6.1. Spex-8000M bilyalı öğütücü

Hazırlanan bu çözeltiye, olası çökelmeleri engellemek amacıyla yüzey aktif özelliği olan ve $C_{14}H_{22}O$ (C_2H_4O)_n kimyasal formülüne sahip Triton X-100, yüzey aktifleştirici madde göreviyle %0,2 oranında eklenmiştir. Yüzey aktif madde; temas açılarını azaltarak, nano partiküllerin dış bölgelerinin daha kolay ıslanmasına olanak sağlar, aynı zamanda yüzey gerilimini de azaltmaya yardımcı olur. Çözeltiye eklenecek Triton X-100 oranı çeşitli denemelerden sonra %0,2 olarak belirlenmiştir. Nanoakışkanların kararlılık seviyeleri nano parçacıkların zeta potansiyeli değerleri ile belirlenmiştir.

Baz akışkanın içinde nano malzemenin daha homojen ve kararlı bir şekilde karışabilmesi amacıyla kullanılan nanoakışkan, ultrasonik banyoda (Resim 6.2) 5 saat bekletilmiştir. Bu arada periyodik olarak, yüzey aktif maddenin buharlaşmasını engellemek amacıyla ultrasonik banyodaki su değiştirilerek soğutulmuştur. Ayrıca buharlaşmanın neden olacağı akışkan miktarındaki azalmalar da kabın çok iyi bir şekilde kapatılmasıyla engellenmiştir. Kullanılan ISOLAB marka ultrasonik banyonun teknik özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir



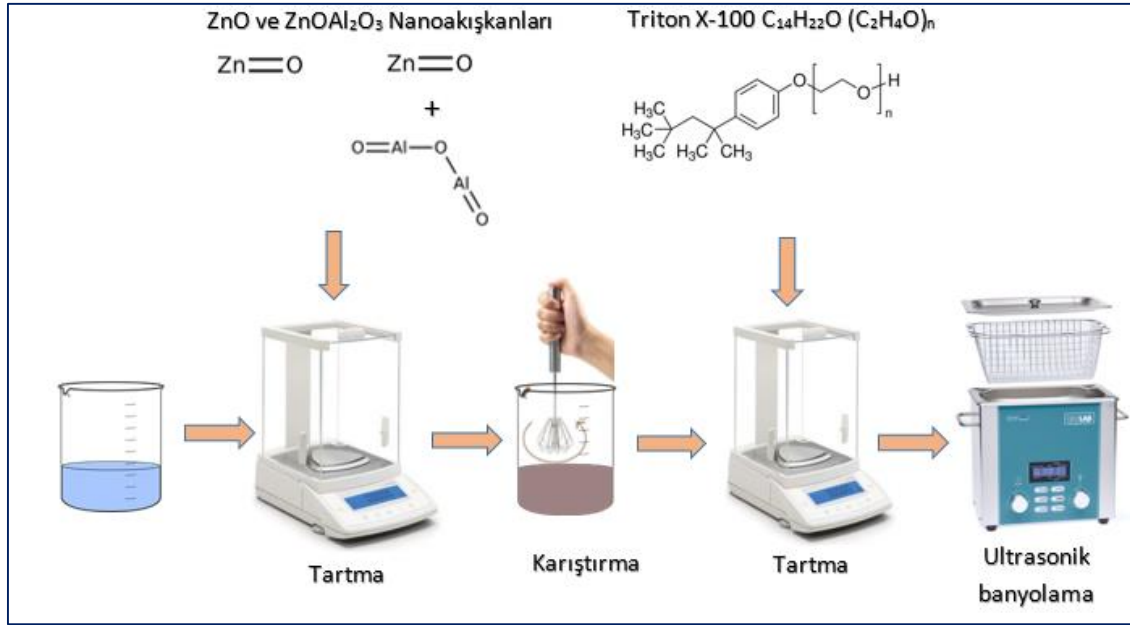
Resim 6.2. ISOLAB Ultrasonik banyo ve nanoakışkan hazırlama görüntüleri

Çizelge 6.2. Ultrasonik banyonun özellikleri

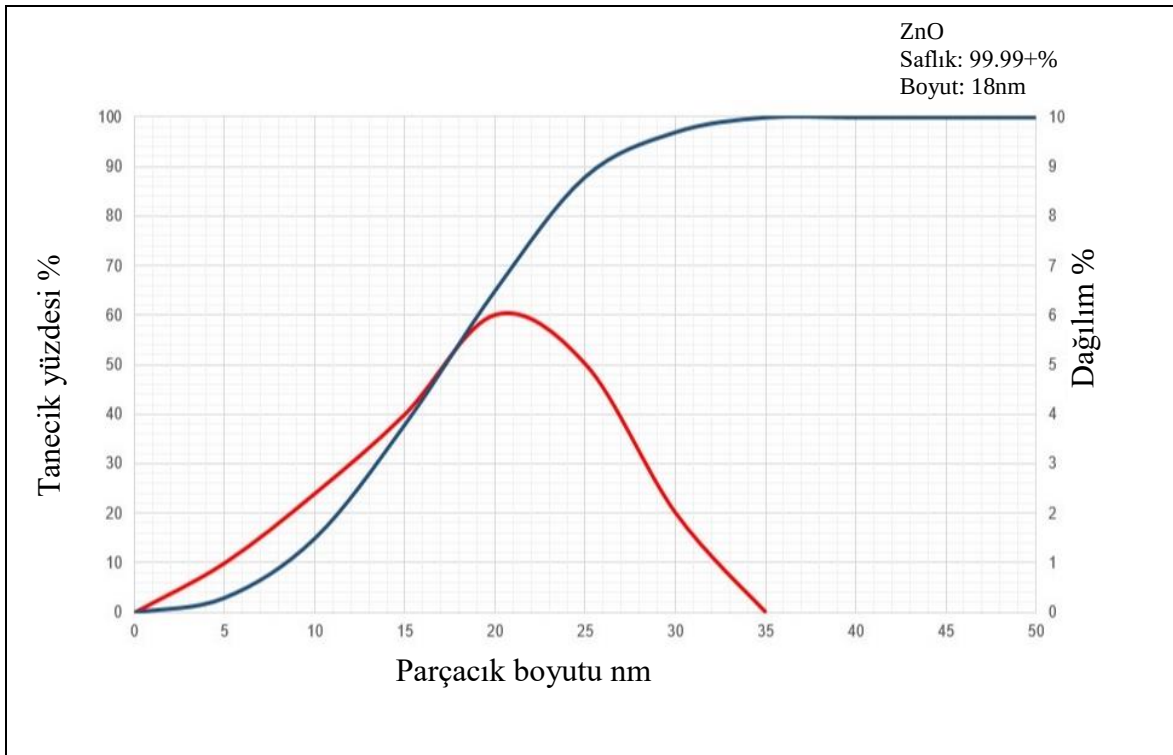
Özellik	Değer
Voltaj (V/ Hz)	230/50
Ultrasonik güç (Peak/W)	600/300
Ultrasonik frekans (kHz)	28

Sonuç olarak deneylere başlamadan önce nanoakışkanlar sırasıyla,

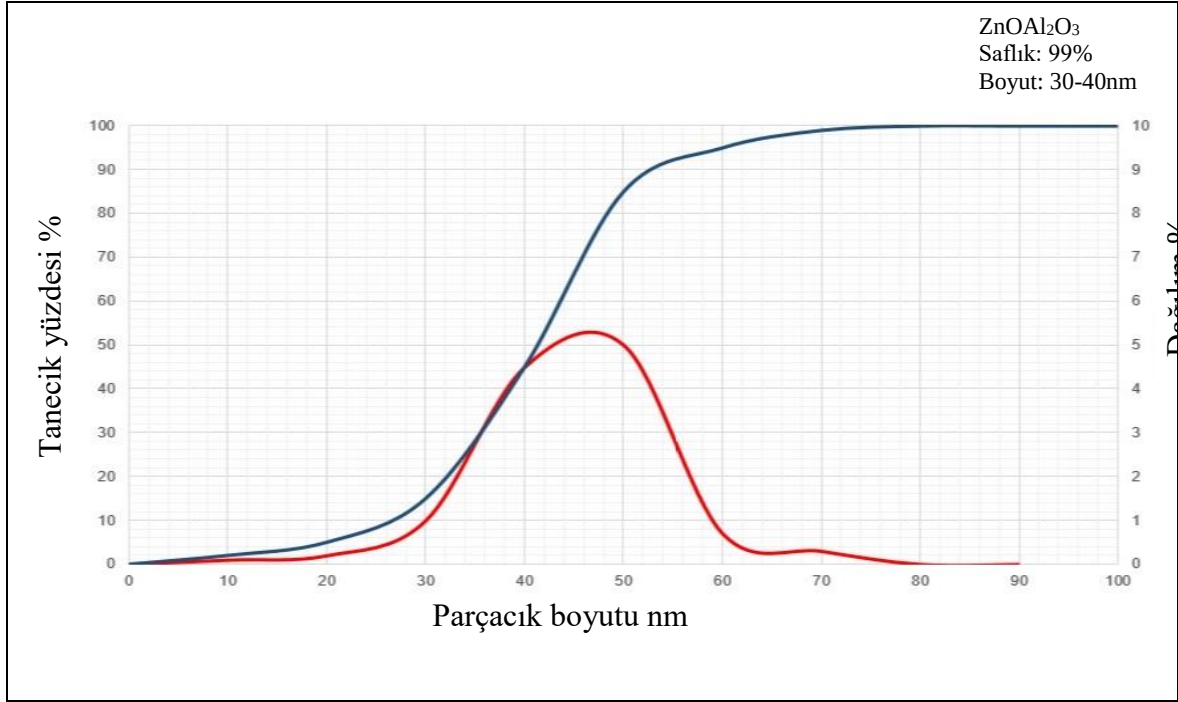
- Yüksek enerjili Spex-8000 bilyeli öğütücü kullanılarak parçacık boyutu istenilen düzeye getirilmiştir,
- Sırasıyla; önce saf su miktarı belirlenip behere doldurulmuş, daha sonra nanoakışkan miktarı belirlenip tartılarak saf suya katılmış ve karıştırılmıştır,
- Yüzey aktif madde olan Triton X-100 miktarının tartılıp eklenmesiyle yüzey gerilimi azaltılmıştır,
- Ultrasonik banyo yöntemiyle akışkanın daha homojen ve daha kararlı bir hal alması sağlanmış ve deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.2).
- Deneysel çalışmalara başlarken, ısı boruları vakumlandıktan sonra evaporatör hacimlerinin 1/3' lük kısımları önceden hazırlanan çalışma akışkanları ile doldurulmuştur.



Şekil 6.2. Nanoakışkan hazırlama şeması



Şekil 6.3. ZnO parçacık boyutu dağılım eğrisi



Şekil 6.4. ZnOAl₂O₃ parçacık boyutu dağılım eğrisi

6.1.2. Nanoakışkanların ısı geri kazanım ünitesi performansına etkisinin incelenmesi

Bu deneysel çalışmada kullanılan termosifon tipi, vakumlanmış bakır ısı borusu demeti içine şarj edilen çalışma akışkanı, uygulanan sıcaklığın etkisiyle buharlaşıp-yoğunlaşarak ısıyı taşımaktadır. Isı borusu; kondenser bölgesi, evaporatör bölgesi ve adyabatik bölge olmak üzere üç bölümden meydana gelmiştir. Buharlaşma ısısı düşük çalışma akışkanlarının kullanılması ile sıvı fazdan buhar fazına geçiş olur ve ısı enerjisi bir yerden bir yere taşınır. Sisteme olan ısı girdisi devam ettikçe işlem periyodik bir şekilde sürer. Kısaca; su, nanoakışkan gibi çalışma akışkanlarının faz değişiminden yararlanarak, ısının bir bölgeden başka bir bölgeye taşındığını söylemek mümkündür. Isı borularına sıcaklıkları ölçmek amacıyla 10 adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Deneyler esnasında ısı çiftlerinden alınan sıcaklık değerleri bir veri kaydedici (ELİMKO) yardımıyla kaydedilmiştir. Farklı konsantrasyonlardaki ZnO ve ZnOAl₂O₃ nanoakışkanlarının verime etkileri belirlenmiştir.

6.2. Deneysel Yöntem ve Ekipmanlar

6.2.1. Deney düzeneği

Havadan havaya ısı geri kazanım ünitelerinde farklı çalışma akışkanları kullanarak, ısı geri kazanım performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Nanoakışkanların ısı transferini iyileştirerek ısı performansın da iyileşmesini sağlaması ve sistemin ısı transferi kapasitesinde artış sağlanmasından yola çıkarak kurulan deney düzeneğinde, belirli sıcaklık aralıklarında, farklı ısı güçlerinde, farklı soğutma havası debilerinde ve farklı evaporatör bölgesi giriş sıcaklığındaki değişik hava hızlarında kullanılan sıvılar arasındaki verimlilik karşılaştırmaları gözlemlenmiştir. Deneysel veriler her bir hız kademesindeki çalışmalar sonucunda elde edilmiştir.

Deneysel çalışma beş aşamadan oluşmaktadır:

- Teorik analizler; çalışma akışkanı temini ve miktarı, hava hızları, debileri sıcaklık aralıkları vb. parametrelerin belirlenmesi,
- Deney düzeneğinin tasarımı, malzemelerin temini,
- Deney düzeneğinin deneysel çalışmaya uygun olarak kullanımı için son haline getirilmesi,
- Çalışma akışkanının deneyde kullanılmak üzere aşama aşama hazırlanması,
- Deneylerin yapılıp, deneysel verilerin kaydedilmesi ve gerekli analizlerin yapılarak sonuca ulaşılması.

Resim 6.3' te deney düzeneği ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Düzenekte; iki tane uzun hava kanalı ve bu kanalların başlarında yer alan iki adet fan, ortada ısı borularını barındıran dik ve daha kısa olan bir başka kanal içermektedir.



Resim 6.3. Deney düzeneği ile ilgili genel bilgiler

Alt ve üstte bulunan iki adet hava kanalının uzunlukları yaklaşık olarak 3 m' dir. Kanallar aynı doğrultuda olmakla birlikte aralarında 15 cm boşluk vardır. Her bir kanal, ısı borularının sağında ve solunda 130 cm uzunluğundadır. Bu kanalların başlarında ve zıt yönlerde yer alan konik kanalların uzunlukları 80 cm' dir. Konik kanalların girişine farklı hava hızları elde etmek için fan motorları yerleştirilmiştir. Altteki kanalda konik bölgeden önce elektrik rezistansı yerleştirilmiştir. Termokuplların yerleştirildiği yerler ve bunlardan elde edilen verilerin toplandığı datalogger Resim 6.9' da gösterilmiştir.

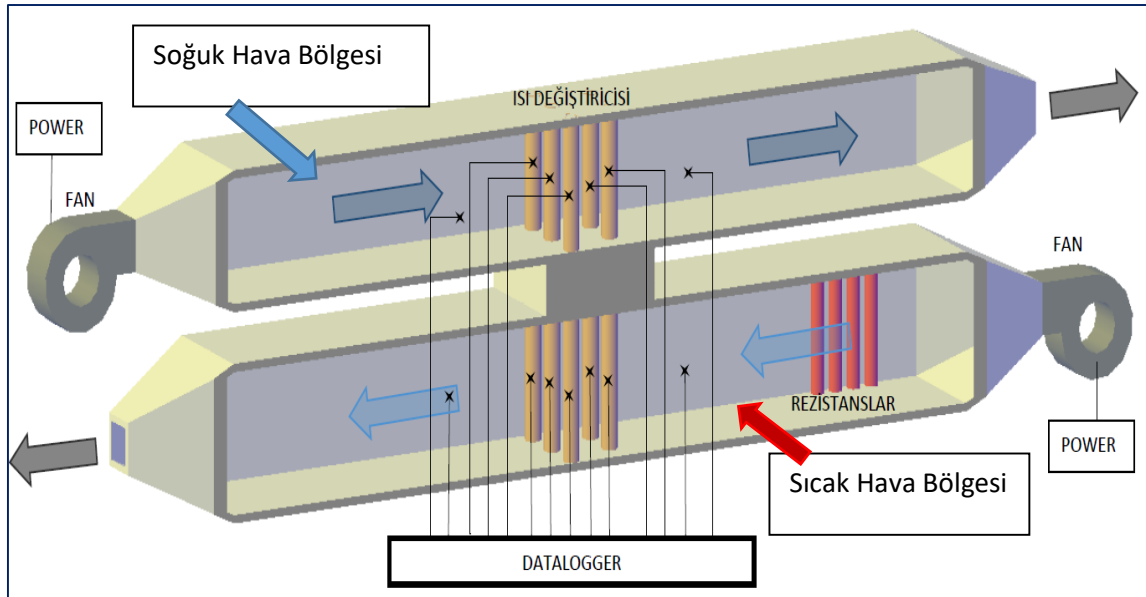
Resim 6.4'de görüldüğü gibi; ısı borularının evaporatör bölgesindeki havayla daha fazla temas edip, buharlaşması gereken akışkan miktarının da daha fazla olabilmesi için alt kanalın kesit alanı üst kanaldan daha büyüktür.

Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 6.5' te verilmiştir. Sistemin farklı atık ısı sıcaklıklarından yararlanabilmesi amacıyla giriş havası farklı sıcaklıklarda ısıtılmaktadır. Deneyin başında; fan sayesinde rezistansa yönlendirilen hava burada ısınır, ısınan hava ısı değiştiricisine ulaştığında evaporatör bölgesinde bulunan akışkanın buharlaşmasını sağlar. Buharlaşan akışkan kondenser bölgesine hareket eder. Fan yardımıyla üst kanaldan gelen soğuk hava kondenser bölgesindeki bu akışkana temas eder ve akışkan yoğunlaşır.

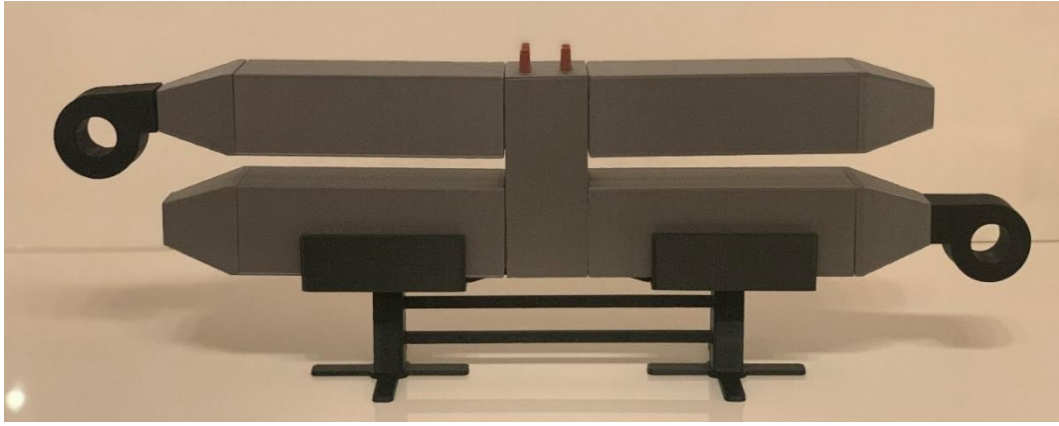
Datalogger'a bağı bulunan termokuplların bilgisayara verileri aktarmasıyla da sıcaklık değeri okunup kaydedilir. Şekil 6.6' da deney düzeneğinin ve ısı değıştiricisinin üç boyutlu yazıcıdan çıkartılmış modelinin farklı açılardaki görünümü verilmiştir.



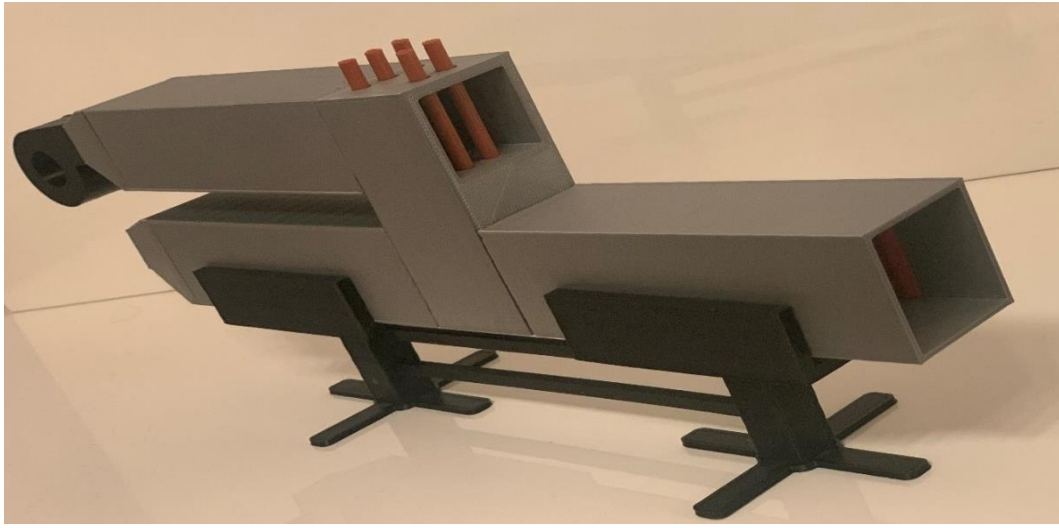
Resim 6.4. Deney düzeneğinin genel görüntüsü



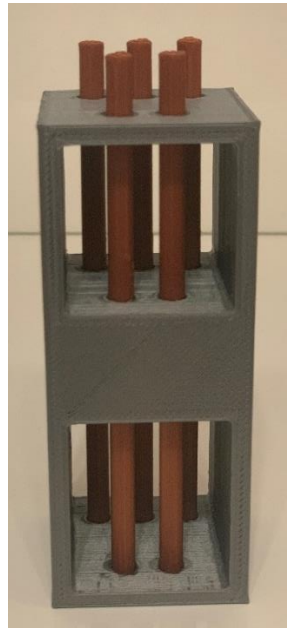
Şekil 6.5. Deney düzeneğinin şematik görünümü



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.6. Deney düzeneğinin ve ısı değiştiricisinin üç boyutlu yazıcıdan çıkartılmış modelinin görüntüleri

6.2.2. Isı değiştiricisi tasarımı

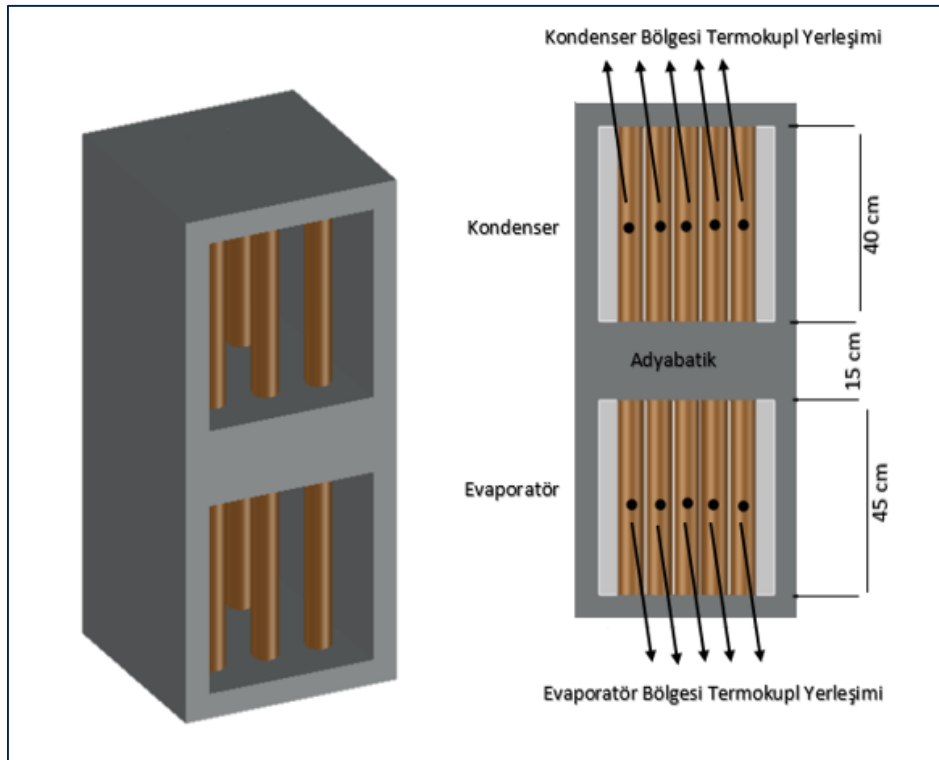
Mühendislik uygulamalarında kullanılan, sıcaklıkları birbirinden farklı, temas halindeki iki veya daha fazla akışkan veya bir katı ve bir akışkan ya da katı parçacıklar ile akışkan arasında termal enerji (entalpi) geçişini sağlayan cihazlar vardır. Bu tür enerji aktarımının gerçekleştiğı cihazlar, ısı değiştiricisi olarak adlandırılmaktadır. Isı değiştiriciler, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkanın birbirleri arasında ısı alışverişi sağlamak için kullanılan cihazlardır. Isı değiştiricilerde, akışkanlar birbirleri ile karışmadan ve genelde metal katı bir yüzey ile ayrılmış olarak tasarlanıp üretilirler. Isı değiştiriciler, ısı transferinin gerektiğı her ortamda kullanılmak için tasarlanmıştır. Kullanım yerlerine göre çeşitli tasarım ve özelliklere göre birbirlerinden ayrılmalarına rağmen temelinde, bir yüzey üzerinden ısı transferi sağlanmak amaçlanmaktadır. Günümüzde yaşam alanlarımızda; buzdolaplarında, kullandığımız araçların karbüratörlerinde, iklimlendirme sistemlerinde ve buna benzer birçok yerde, endüstride ise; kazanlarda, ısıtma–soğutma–havalandırma sistemlerinde evaporatör ve kondenserlerde, kimya alanında damıtıcılarda, yakıt sistemlerinde, ısı geri kazanım ünitelerinde, atık ısı uzaklaştırma, re jeneratörler gibi birçok alanda da bu cihazlar giderek daha çok tercih edilmektedir. Kullanılan ısı değiştirici türleri, bulundukları yerin ortam koşullarına, dış çevreye, kullanım amaçlarına vb. özelliklere bağılı olarak farklı boyut ve şekillerde tasarlanıp kullanılabilir. Dünyada, hızla artan çevre kirliliğini azaltmak ve önlemek için yapılan verimlilikle ilgili çalışmalarda ısı değiştiricilere olan ilgi de artmış ve bu alandaki gelişmelere önem verilmiştir.

Bu çalışmada ısı borularından oluşan borulu tip ısı değiştiricisi kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan beş adet ısı borusundan oluşturulan ısı değiştiricisi demeti Resim 6.5’ de verilmiştir. Bakır ısı boruları birbirlerinden bağımsızdır, sızdırmazdır ve vakumlanmıştır. Boruların dış çapı 25,4 mm, iç çapı 23,4 mm ve uzunlukları 1 m’ dir. Isı değiştiricisindeki evaporatör bölgesinin yüksekliğı 450 mm, adyabatik bölgenin yüksekliğı 150 mm ve kondenser bölgesinin yüksekliğı 400 mm olarak tasarlanmıştır. Kullanılan beş borunun üzerinde; her birinin evaporatör ve kondenser bölgelerinde birer termokupl olmak üzere toplam 10 adet termokupl konumlandırılmıştır. Isı borularından oluşan ısı değiştiricisi demetinin şematik gösterimi Şekil 6.7’ de gösterilmiştir.



Resim 6.5. Isı borularından oluşan ısı değıştircisi demetinin farklı açılardan gösterimi



Şekil 6.7. Isı borularından oluşan ısı değıştircisi demetinin şematik gösterimi

6.2.3. Deneylerde kullanılan yardımcı araç ve gereçler

Deney düzeneğini oluşturan bileşenler;

- Isı değıştircisini oluşturan 5 adet, 1m uzunluğunda, 25,4 mm dış çap ve 23,4 mm iç çapındaki fitilsiz bakır ısı boruları,

- Havanın kütle ve hacim debilerini ölçmek üzere 1 adet anemometre,
- Sıcaklık ölçmek adına 14 adet termokupl diğer adıyla ısı çifti,
- 2 adet 45 cm x 130 cm ve 2 adet 40 cm x 130 cm boyutlarında hava kanalları,
- 2 adet radyal fan,
- Elektrik rezistansları,
- Datalogger,
- Bilgisayar ünitesidir.

Anemometre

Anemometre; gaz halindeki bir akışkanın özellikle havanın atmosferdeki akış hızını ölçmeye yarayan ayardır. Deneylerde, kanallardan geçen havanın kütle ve hacim debisini ölçebilmek için hem dijital gösterge hem de pervaneli sensörün bulunduğu bir cihaz kullanılmıştır (Resim 6.6). LYK 8902 marka anemometre kullanılmıştır. Bilgisayara USB ile bağlanarak, ekrandan anlık hava debisi, sıcaklık ve hava hızı gibi değerler takip edilebilmektedir. Teknik özellikleri Çizelge 6.3' te verilmiştir.



Resim 6.6. Anemometre

Çizelge 6.3. Anemometre teknik özellikleri

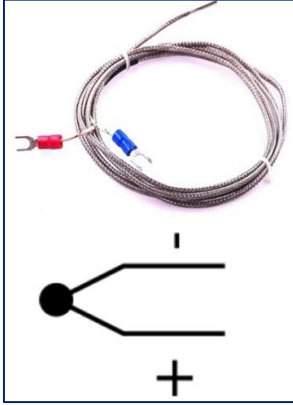
Hava Hızı Ölçüm Aralığı: 0,3 . . . 45 m/s
Hava Hızı Hassasiyeti: $\pm 3\% \pm 0.1 \text{ dgts}$
Hava Hızı Çözünürlüğü: 0,1 m/s
Hava Hızı Ölçtüğü Birimler: m/s,...km/h,...ft/min,...MPH,...knots
Hava Sıcaklığı Ölçüm Aralığı: $0^{\circ}\text{C} . . . 45^{\circ}\text{C}$
Hava Sıcaklığı Hassasiyeti: $\pm 2^{\circ}\text{C}$
Hava Sıcaklığı Çözünürlüğü: 0,2 $^{\circ}\text{C}$
Hava Sıcaklığı Ölçtüğü Birimler: $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$
Hava Debisi Ölçüm Aralığı: 0 . . . 999900 m ³ /min
Hava Debisi Çözünürlüğü: 0,001 m ³ /min
Hava Debisi Ölçtüğü Birimler: CMM (m ³ /min), CFM(ft ³ /min)
Pervane Çapı: 5 cm
Kayıt Hafızası: 500 adet
Ekran: Geniş LCD ekran
Ekran Işığı: Var
Hold Özelliği: Var
Max/Min Özelliği: Var
Boyutları: Cihaz: (77 x 36 x 163,5 mm), Sensör: (65 x 29 x 172 mm)
Ağırlık: 330 gr
Güç Kaynağı: 4 adet 1.5V AAA pil
Batarya Ömrü: Devamlı kullanımda 20 saat

Termokupl

Termokupl ya da ısı çifti; basit yapılı, geniş sıcaklık aralığı, doğruluk ve düşük maliyetli yapıda olmalarının etkisiyle endüstride çok sık kullanılan sıcaklık ölçüm sensörleridir (Resim 6.7). İki farklı iletken telin uç kısımlarının beraber olarak kaynatılmasıyla bir termokupl oluşturulur. Kaynatılan uç sıcak noktadır, açık kalan diğer uç soğuk noktadır. Soğuk noktaya referans noktası da denir. Isıl çift, bu sıcak ve soğuk noktalar arasındaki sıcaklık farkından oluşmaktadır. Soğuk nokta uçlarında mV değerinde üretilen gerilim de bu sıcaklık farkına orantılıdır.

Sıcak noktadaki sıcaklık sabit kalmak şartıyla, soğuk nokta sıcaklığı değişince farklı sıcaklıklar okunduğu için, mV tablolarındaki değerlerde belirli standardı sağlamak için ölçülen sıcaklıklar karşılığı mV değerleri soğuk noktanın 0°C 'de tutulması ile sağlanmıştır. Örnek olarak, 200°C ' ye karşılık gelen mV değeri, ısı çiftin sıcak noktası 200°C ' deyken, soğuk nokta 0°C 'deyken uç noktada ölçülen mV değeridir.

Deneylerde, 5 adet ısı borusunun her birinin evaporatör ve kondenser bölgelerinin uzunluklarının orta noktalarında ve iki uzun hava kanalının hava giriş ve çıkış bölgelerinde ölçüm yapmak üzere toplam 14 adet K tipi termokupl kullanılmıştır (Resim 6.8).



Resim 6.7. K tipi termokupl (ısıl çift)



Resim 6.8. Soğuk hava kanalı giriş ve çıkışındaki termokupl bağlantıları gösterimi

Datalogger

Datalogger; belirlenmiş verileri, istenilen süre boyunca, aralıklı olarak sayısal değerlerde bilgisayar ortamına aktararak kaydeden cihazlardır. Nem, sıcaklık, su seviyesi, basınç gibi çeşitli fiziksel veriyi kaydedebilirler. Isıtma, soğutma, havalandırma testleri, kalite kontrol çalışmaları gibi alanlarda kullanılmaktadırlar. Resim 6.9’ da deneyde kullanılan Elimko E 680 marka Datalogger ve termokuplların bağlantı görünümü verilmiştir. Cihazın teknik özellikleri Çizelge 6.4’ te verilmiştir.



Resim 6.9. Datalogger ve termokuplların bağlantı görüntüsü

Çizelge 6.4. Elimko E 680 Datalogger teknik özellikleri

Giriş Tipleri	Termokupl: B,E,J,K,L,N,R,S,T,U Rezistans Termometre: Pt-100, CUST Gerilim: 0-50 mV, 0-1 V, 0.2-1 V 0-10 V (Lineer) Akım: 0-20 mA, 4-20 mA (Lineer)
Alarm Çıkışı	SPST- NO 250 V AC 3A röle
Gösterge Ayırımı	1/9999
Gösterge	9 dijit, 14 mm 7 parçalı gösterge
Doğruluk Sınıfı	Termokupl: (Gösterilen değerin $\pm$ %0,5' i ya da $\pm$ 1°C) $\pm$ dijit maks. Pt-100: (Gösterilen değerin $\pm$ %0,5' i ya da $\pm$ 1°C) $\pm$ 1 dijit maks. Gerilim/Akım: $\pm$ %0,5 FS $\pm$ 1 dijit maks.
Analog Sayısal Çevirici	16 bit
Sayısal Analog Çevirici	12 bit
Giriş Seçme Aralığı	0,2-9,9 sn
Gösterge Tarama Aralığı	1-99 sn
Gürültü Bastırması	120 dB 50 Hz'de
Çalışma Ortam Sıcaklığı	-10°C, 55°C (14°F, 131°F) (Yoğunlaşma ve buzlanma olmadan)
Depolama Sıcaklığı	-25°C, 65°C (-13°F, 149°F) (Yoğunlaşma ve buzlanma olmadan)
T/C Ortam Sıcaklık Kompanzasyonu	0°C-50°C
Çalışma Gerilimi	85-265 V _{AC} / 85-375 V _{DC} 20-60 V _{AC} / 20-85 V _{DC}
Güç Tüketimi	4 W (7VA)
Koruma Sınıfı	IP 66 Ön Panel (NEMA 4X) IP 20 Arka Panel
Kontak Kapasitesi	NA Kontak 250 V _{AC} 3 A
Rölelerin Mekanik Ömrü	10 000 000 açma-kapama
Rölelerin Elektriksel Ömrü	1 000 000 açma-kapama (1/10 yükte)
Bellek	EEPROM maksimum 10 ⁵ yazma
Ağırlık	650 gr

Elektrik rezistansları

Rezistanslar, elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştüren direnç telleridir. Direnç, her iki ucuna gerilim uygulanan bir maddenin elektrik akımına gösterdiği karşı koyma gücüdür. Rezistanslar, yüksek ısılara karşı direnç gösterirler. Rezistanslarda; nikel, demir, krom ve alüminyum alaşımları bulunur. Isınma teknolojisi, ev aletleri, termostatlar vb. yerlerde kullanılırlar. Kullanım alanlarına göre çeşitlendirilirler. Isıl dayanımları yüksektir (1400°C). Krom (Cr), alüminyum (Al) ve nikel (Ni) bulunan, demir (Fe) alaşımlarından oluşturulmuş rezistanslar krom-nikel tel olarak adlandırılır. Krom-nikel tel alaşımının içindeki krom, rezistans tarafından oluşturulan ısıya karşı dayanımını artırır. Alüminyum (Al), havanın oksijeninin teli paslandırmasını engeller. Nikel, kimyasal etkilere karşı dayanıklılığa yardımcı olur. Deneylerde kullanılan hava kanalı içine konumlandırılmış 4 adet 1 kW' lık rezistanslar Resim 6.10' da verilmiştir.



Resim 6.10. Elektrikli rezistansların çalışma durumları

Radyal salyangoz fanlar ve motor kontrol sürücüleri

Deneyler için kullanılan ısı geri kazanım ünitesi hava kanallarında, taze hava ve egzoz havası tarafı olan emme ve basma için radyal fan kullanılmıştır. Radyal fanda, basınç farkı ile oluşan hava etkisi, eksenel yönde değil, santrifüj (merkezkaç) kuvveti doğrultusunda işlevsellik sergiler. Soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Bu çalışmada, deney düzeneğine Resim 6.11' de gösterilen radyal salyangoz fanlar kullanılmıştır. Fanların teknik özellikleri Çizelge 6.5'te verilmiştir.



Resim 6.11. Motor kontrol sürücüsü bağlantısı ve radyal salyangoz fan

Çizelge 6.5. Radyal salyangoz fan teknik özellikleri

Ağırlık:	2,3 kg
Akım:	0,4 A
Debi:	275 m ³ /h
Devir:	2450 d/d
Frekans:	50 Hz
Güç:	90 W
Kondansatör:	2,5
Ses Seviyesi:	46 dB (A)
Voltaj:	230V

Motor hız kontrol sürücüler, bir motorun elektronik olarak hızını kontrol eden cihazlardır. Standart indüksiyon motorlarının hız ve torkunun kontrolü için kullanılmaktadırlar. Deney düzeneğinde radyal fanlar için, hız ayarının kolay olması, alandan tasarruflu, basit kablo bağlantılı olması, kullanışlı ve dayanıklı olması sebebiyle motor kontrolü ABB ACS 150 (Resim 6.12) tarafından sağlanmıştır. Bu cihazlar sayesinde radyal fan devirlerinin değiştirilmesiyle, kanallardan geçen havanın kütesel ve hacimsel debisi istenilen düzeye ayarlanabilmiştir. Motor kontrol sürücüsünün teknik özellikleri Çizelge 6.6’da verilmiştir.



Resim 6.12. ABB ACS 150 motor kontrol sürücüsü

Çizelge 6.6. ACS 150 motor kontrol sürücüsü teknik özellikleri

Şebeke bağlantısı	
Gerilim ve güç aralığı	1 fazlı, 200 – 240 V $\pm$ %10 0,37 – 2,2 kW (0,5 - 3 hp) 3 fazlı, 200 – 240 V $\pm$ %10 0,37 – 2,2 kW (0,5 - 3 hp) 3 fazlı, 380 – 480 V $\pm$ %10 0,37 – 4 kW (0,5 - 5 hp)
Frekans	48 to 63 Hz
Güç faktörü	0,98
Motor bağlantısı	
Gerilim	3-faz, 0 - Ukaynak arası
Frekans	0 - 500Hz
Hızlanma süresi	0,1 – 1800 s arası
Yavaşlama süresi	0,1 – 1800 s arası
Frenleme	Dahili fren kıyıcısı standart donanımdır
Çevresel limitler	
Ortam sıcaklığı	-10 – 40°C (14 – 104 F), donma olmaz, 50°C (122 F) için %10 değer kaybı
Yükseklik	0 – 1 000 m arası nominal akım kullanılabilir,
Çıkış akımı	1 000 m – 2 000 m arası her 100m için %1 değer kaybı olur
Bağıl nem	%95’ ten düşük (yoğuşmasız)
Koruma sınıfı	IP20 / İsteğe bağlı NEMA 1 muhafaza

Çizelge 6.6. (devam) ACS 150 motor kontrol sürücüsü teknik özellikleri

Programlanabilir kontrol bağlantıları	
Bir analog giriş	0 (2) – 10 V, $R_{in} > 312 \text{ k}\Omega$
Gerilim sinyali	0 (4) – 20 mA, $R_{in} = 100 \Omega$
Akım sinyali	10 V $\pm$ 1% maks. 10 mA, $R < 10 \text{ k}\Omega$
Çözünürlük	0,1%
Hassasiyet	$\pm$ 2%
Yardımcı gerilim	24V DC $\pm$ 10%, maks. 200mA
Beş dijital giriş	12 – 24 V DC dahili veya harici güç kaynaklı, PNP and NPN, pulse train 0 Ω 16 kHz
Giriş empedansı	2,4 kW

6.3. Deneyin Yapılışı

Bu deneysel sistemi oluşturan parametrelerde; her biri 90°'lik açıda konumlandırılmış beş adet, dış ve iç çapları sırasıyla 25,4 mm ve 23,4 mm olan, fitilsiz ve havası alınmış, bakır ısı borusu demetinden oluşan ısı değiştiricisi bulunmaktadır. Bu ısı borularının ve ısı borusu demetinden oluşan ısı değiştiricisinin fiziksel özellikleri Çizelge 6.7'de verilmiştir. Ayrıca, iki adet sıcak ve soğuk havanın geçtiği hava kanalları ve bu hava kanallarının uçlarına yerleştirilmiş olan, kullanılacak alanlara göre ihtiyaç duyulacak farklı hava debilerinin de ayarlanabildiği iki adet salyangoz fan bulunmaktadır. Taze hava kanalı girişinde 1 kW'lık 4 adet rezistans bulunmaktadır. Bu rezistanslar deneyler sırasında, ısı değiştiricisinin evaporatör bölgesinde isteğe bağlı olarak farklı ısı değerlerinde ısı akışını sağlamışlardır. Beş ısı borusundan her birinin hem evaporatör hem de kondenser bölgelerinde birer tane olmak üzere toplam 10 adet termokupl ve her bir hava kanalının giriş-çıkışında olmak üzere 4 adet termokupl kullanılmıştır. Toplamda 14 adet K tipi termokupl kullanılarak elde edilen sıcaklık değerleri datalogger aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Deneylere başlanmadan önce bütün ısı boruları 30 dakika vakumlanıp, borulardaki vakum miktarı anlık olarak üzerlerinde bulunan manometreler ile takip edilmiştir. Hazırlanan çalışma akışkanlarının şarj miktarları 65 ml olarak belirlenip, ısı borularının evaporatör bölgesinin hacimlerinin 1/3' lük kısmı kadar doldurulmuştur.

Çizelge 6.7. Isı borularının fiziksel özellikleri

Isı Borusu Malzemesi	Bakır
Isı Borusu Uzunluğu	1 m
Evaporatör Bölge Uzunluğu	450 mm
Kondenser Bölge Uzunluğu	400 mm
Adyabatik Bölge Uzunluğu	150 mm
Eğim Açısı	90°
Isı Borusu Sayısı	5 adet
Isı Borusu Dış Çap	25,4 mm
Isı Borusu İç Çap	23,4 mm

Deneyler sistemin farklı koşullardaki performansının incelenmesi için önceden belirlenen, evaporatör bölgesindeki üç farklı sıcak hava ve kondenser bölgesindeki iki farklı soğuk hava hızlarında ve evaporatör bölgesine uygulanan iki farklı ısıtma gücünde yapılmıştır. Deneyler öncelikle saf su kullanılarak daha sonra %2 oranında ZnO ve ZnOAl₂O₃ nano parçacıkları süspansiyon edilmiş baz akışkanı saf su olan nanoakışkanlar kullanılarak, sonuçlar kararlı hale gelene kadar her biri yaklaşık 25 dakika kadar yapıp, her akışkan için toplamda 12 deneyden elde edilen veriler kaydedilmiştir. Evaporatör bölgesinden sisteme değerleri 1 kW ve 2 kW olarak değişen ısı enerjileri sağlanmıştır. Isı borularının konumu bütün deneylerde 90° açıdadır. Çizelge 6.8’ de sıcak ve soğuk hava hız ve debi değerleri verilmiştir. Deney sonuçları alındığında; tüm koşullardaki veriler değerlendirilip, verimler hesaplanıp, karşılaştırmalar yapılmıştır, optimum değerlere ulaşılmıştır.

Çizelge 6.8. Deneylerde kullanılan hava hızları ve debileri

Sıcak Hava Fanı			
Sıra No	Frekans (Hz)	Ortalama Hız (m/s)	Kütlesel Debi (g/s)
1	40	0,555	50
2	50	0,702	70
3	70	0,985	90
Soğuk Hava Fanı			
Sıra No	Frekans (Hz)	Ortalama Hız (m/s)	Kütlesel Debi (g/s)
1	10	0,437	30
2	20	0,751	60

6.3.1. Termofiziksel özelliklerin hesaplanması

Deneylere başlanmadan önce kullanılacak nanoakışkanların termofiziksel özellikleri hesaplanmıştır.

Isıl iletkenlik değerinin hesaplanmasında küresel parçacıklar için Maxwell tarafından geliştirilen model kullanılmıştır (Eş. 5.1).

Viskozite değerinin hesaplanmasında Brinkman tarafından geliştirilen model kullanılmıştır (Eş. 5.7).

Özgül ısı ve yoğunluk hesabında Pak ve Cho tarafından geliştirilen ve yaygın olarak kullanılan modellerden faydalanılmıştır (Eş. 5.8 ve Eş. 5.9)

Deneylerde kullanılan nanoakışkanlara ait termofiziksel özellikler Çizelge 6.9’ da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Nanoakışkanların termofiziksel özellikleri

Nanoakışkan	Yoğunluk (kg/m ³)	Viskozite (kg/ms)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kgK)
ZnOAl ₂ O ₃ /su	1060,81	0,000936	0,634	4115,31
ZnO/su	1084,806	0,000936	0,633	4111,67
Saf su	994,7	0,00089	0,6	4185,5

6.3.2. Teorik analiz ve hesaplamalar

Deneyler sonucunda kaydedilen veriler kullanılarak, ısı borusunun performansı, ısıl dirençleri, Reynolds sayıları ve verimleri karşılaştırılmıştır.

Yoğuşturucu kısmından elde edilen ısı miktarını hesaplayabilmek için ihtiyacımız olan kütleli debi formülü Eş. 6.1’ de verilmiştir.

$$\dot{m} = \rho_{bg} \times V_{bg} \times A \quad (6.1)$$

Isı transferi miktarı; sıcaklık farkına, debisine ve özgül ısıya bağlı olarak Eş. 6.2 ile tanımlanmaktadır.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \text{ [Watt]} \quad (6.2)$$

Isı borusunun performansını değeri lenmede ısı l direnç hesabı da önemli rol oynamaktadır.

Isıl direnç:

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right] \quad (6.3)$$

Yoğ uşturucu kısmından çekilen ısı miktarının buharlaşt ırıcı kısmına uygulanan ısı miktarına oranı, ısı borusunun performansını yani ısı l verimi ifade eder ve aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_E} = \frac{\text{Kondenserden sistemden çekilen ısı}}{\text{Evaporatörden sisteme verilen ısı}} \quad (6.4)$$

Reynolds sayısı genel formülü:

$$\text{Re} = \frac{u \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (6.5)$$

Soğ uk kanaldaki havanın aldığı ısı; havanın kütle sel debisi, akış kanın (havanın) o sıcaklıktaki özgül ısı s ve kanal giriş-ç ıkış sıcaklıkları kullanılarak Eş. 6.6 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_{\text{soğ uk hava}} c_{p,\text{soğ uk hava}} (T_{\text{soğ uk çıkış}} - T_{\text{soğ uk giriş}}) \quad (6.6)$$

Sıcak kanaldan geçen havanın verdiği ısı; havanın kütle sel debisi, akış kanın (havanın) o sıcaklıktaki özgül ısı s ve kanal giriş-ç ıkış sıcaklıkları kullanılarak Eş. 6.7 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{\text{sıcak hava}} c_{p,\text{sıcak hava}} (T_{\text{sıcak çıkış}} - T_{\text{sıcak giriş}}) \quad (6.7)$$

Burada;

$\dot{Q}_K$ = Kondenser bölgesinden ısı transfer miktarı (W)

$\dot{Q}_E$ = Evaporatör bölgesinden ısı transfer miktarı (W)

$\dot{m}$ = Akışkan kütleli debisi (kg/s)

ρ = Akışkanın yoğunluğu (kg/m³)

V_{bg} = Hava hızı (m/s)

A = Kanal alanı (m²)

C_p = Özgöl ısı (kcal/kg°C)

ΔT = Sıcaklık farkı (°C)

$T_{sıcak\ giriş}$ = Hava kanalına giriş sıcaklığı (°C)

$T_{sıcak\ çıkış}$ = Hava kanalından çıkış sıcaklığı (°C)

u = Akışkanın hızı (m/s)

D = Boru çapı (m)

μ = Akışkanın dinamik viskozitesi (kg/ms)

6.3.3. Deney düzeneğindeki ölçme belirsizlikleri

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre belirsizlik analizi uygulanmalıdır. Deneyler yapılırken meydana gelen çeşitli hatalar yüzünden deney sonuçlarında orantısızlık oluşabilmektedir. Dikkatsizlik, sıcaklık ölçmede kullanılan termokuplların ve diğer cihazların kalibrasyonlarındaki yanlışlar, okuma hataları, cihaz, donanım ve malzeme seçimindeki uyumsuzluklar gibi hatalar bunlara örnektir [57].

Deney düzeneğindeki her türlü akışkan sıcaklıkları K-tipi ısı çiftleri ile ölçülmüştür. Ölçüm sırasında her akışkanın tüm sıcaklık değerleri ve akış debileri, kararlı hale gelinceye kadar beklenip ölçülmüştür. Tüm sistem, ısı kaybını en az düzeyde tutmak için yalıtılmıştır. Nanoakışkanların ısı transferi değerlerini hesaplamadan önce, deney sistemi defalarca saf su ile test edilerek kontrol edilmiştir. Deney sonuçlarında belirsizlikler meydana gelmiştir. Bu

belirsizliklerin matematiksel analizini yapmak için, ölçülen sıcaklık değerlerinin sapma oranları Eş. 6.8 kullanılarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri 3 kez ölçülerek ortalama değerleri alınmıştır. Termal iletkenlikteki belirsizlikler en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmıştır. Cihaz ve ölçüm aletlerinin hatalarını ölçebilmek için belirsizlik analizi yönteminde ulaşılması istenilen büyüklük F ve bu büyüklüğe etki eden n tane bağımsız değişkene de $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ denildiğinde;

$F = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ise, toplam hata oranı;

$$W_F = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} W_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} W_2\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_3} W_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} W_n\right)^2\right]} \quad (6.8)$$

şeklinde gösterilir ve $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ ise bağımsız değişkenlerin hata oranıdır [58].

Termokuplların hassasiyeti, ölçümlerdeki bağlantı noktaları ve dataloggerdan okunan sonuçlardaki hatalar, deneyler süresince ölçülen sıcaklık değerlerindeki toplam belirsizlik değerini oluşturmaktadır. Deneyler sırasındaki sıcaklık ölçümlerinden oluşan hatalar;

A= Termokuplların hata oranı = $\pm 0,25-0,5^\circ\text{C}$,

B= Dataloggerın okuma hatası = $\pm 0,20$,

C= Bağlantı noktalarının hata oranı = $\pm 0,1^\circ\text{C}$,

D= Isı değiştiricisi giriş bölgesi sıcaklık ölçülmesinde okunacak ortalama hata = $\pm 0,25^\circ\text{C}$,

E= Isıtıcı (rezistans) çıkışı sıcaklığın ölçülmesinde okunacak ortalama hata = $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ise,

T_{KG} = Isı değiştiricisi kondenser girişi hava sıcaklığı,

$T_{KÇ}$ = Isı değiştiricisi kondenser çıkışı hava sıcaklığı,

T_{IG} = Isıtıcı çıkışındaki havanın sıcaklığı,

T_{EG} = Isı değiştiricisi evaporatör giriş hava sıcaklığı,

$T_{KÇ}$ = Isı değiştiricisi evaporatör çıkışı hava sıcaklığı,

WT_{KG} = Isı değiştiricisi kondenser girişi hava sıcaklığı ölçülmesinde oluşabilecek toplam hata,

$WT_{KÇ}$ = Isı değiştiricisi kondenser çıkışı hava sıcaklığı ölçülmesinde oluşabilecek toplam hata,

$WT_{IÇ}$ = Isıtıcı çıkışı hava sıcaklığı ölçülmesinde oluşabilecek toplam hata,

WT_{EG} = Isı değiştiricisi evaporatör girişi hava sıcaklığı ölçülmesinde oluşabilecek toplam hata,

$WT_{EÇ}$ = Isı değiştiricisi evaporatör çıkışı hava sıcaklığı ölçülmesinde oluşabilecek toplam hata,

$$WT_{KG} = \pm \sqrt{[(A)^2 + (B)^2 + (C)^2 + (D)^2]} \quad (6.9)$$

$$WT_{KG} = \pm \sqrt{[(0.25)^2 + (0.10)^2 + (0.10)^2 + (0.25)^2]} = \pm 0,380^{\circ}\text{C}$$

$$WT_{KÇ} = \pm 0,380^{\circ}\text{C}$$

$$WT_{EG} = \pm 0,380^{\circ}\text{C}$$

$$WT_{EÇ} = \pm 0,380^{\circ}\text{C}$$

$$WT_{IÇ} = \pm 0,580^{\circ}\text{C}$$

Ölçülen verilerdeki tüm belirsizlikler dikkate alındığında, sıcaklık ölçmedeki toplam hata değerlerinin %0-2 aralığında olması ile kabul edilebilir olduğu açıkça görölmüştür. Daha önce de belirtildiği gibi hesaplamalardaki değerler, ortalama sıcaklık değerleridir [59].

6.3.4. İyileşme yüzdesi

Deneyler önceden belirlenmiş olan evaporatör ve kondenser bölgelerindeki farklı sıcak ve soğuk hava hızlarında, farklı debilerde ve evaporatör bölgesine uygulanan farklı kW değerlerindeki ısı enerjisinde yapılmıştır. Belirlenen parametrelere göre deneyler önce saf su ile yapılarak verim değerleri (η_l, s_u) elde edilmiştir. Daha sonra nano akışkanlarla deneyler

tekrarlanmış ve verim değerleri ($\eta_{I, Nanoakışkan}$) hesaplanmıştır. Eşitlik 6.10 kullanılarak iyileşme yüzdesi veya iyileşme oranı hesaplanmıştır.

$$\Delta\eta = \frac{(\eta_{I, Nanoakışkan} - \eta_{I, Su})}{\eta_{I, Su}} \times 100 \quad (6.10)$$

Eş. 6.4 ile hesaplanan verim değeri, ısı borularının belirli kesit arasındaki ısıyı taşıma kapasitesi hakkında bilgi vermektedir. Ancak her bir akışkanın diğerine göre ne kadar üstün olduğunu, Eş. 6.10 ile hesaplanan değerler kullanılarak çizilen grafik ile gözlemleyebiliriz. İlerleyen bölümlerde; saf su ile alınan veriler baz alınarak değerlendirilen her iki nanoakışkan için, Re değerlerine bağlı olarak değişme gösteren iyileşme oranlarının ve verim değerlerinin, grafiksel gösterimi ve yorumlanması yapılmıştır.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışmada, ısı değiştiricisi olarak ısı boruları kullanılan havadan havaya bir ısı geri kazanım ünitesinin ısıl performansının iyileştirilmesi, böylelikle çalışma sıcaklıkları aralığının genişletilmesi amacıyla kurulan deney düzeneği üzerinde uygulamalı olarak bir çalışma yapılmıştır. Bu deneysel çalışmayı özgün kılan; ısı borulu ısı değiştiricisine sahip havadan havaya ısı geri kazanım ünitesinde, ısıl sistemin performansını artırmak için son zamanlarda yaygın olarak kullanılan nanoakışkanların tercih edilmesidir.

ZnO (çinko oksit) /su ve $ZnOAl_2O_3$ (çinko spinel) /su nanoakışkanları, ısı borusunda çalışma akışkanı olarak kullanılmış ve temel akışkan olan saf suya göre ısı geri kazanım ünitesinin ısıl performansındaki iyileşme oranları deneysel olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan ısı boruları; 1 m uzunluğunda, iç çapı 23,4 mm ve dış çapı 25,4 mm olan 5 adet fitilsiz 90°' lik dik açılı termosifon tipi bakır borulardır. Isı borularının 450 mm' lik kısımları buharlaşma bölgelerini, 400 mm' lik kısmı yoğuşma bölgelerini geriye kalan 150 mm' lik kısımları ise adyabatik bölgeyi oluşturmaktadır. Isı borularının evaporatör bölgesi hacimlerinin 1/3' lük kısmı (65 ml) iş akışkanı ile doldurulmuştur. Kondenser bölümünden çekilen ısıyı hesaplamak amacıyla 2 farklı soğutma havası debisi (30 g/s, 60 g/s), 3 farklı ısıtma havası debisi (50 g/s, 70 g/s ve 90 g/s) ve evaporatör bölgesi için 2 farklı ısıtıcı gücü (1 kW, 2 kW) uygulanarak her bir akışkan için 12'ser adet olacak şekilde deneyler tamamlanmıştır. Deneysel veriler her bir hız kademesindeki 30 dakikalık çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Deneyler; saf su ve ZnO/su, $ZnOAl_2O_3$ /su nanoakışkanları için ayrı ayrı yapılmış olup elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Evaporatör bölgesinde ısı borusuna verilen ısı ve kondenser bölgesinde soğuk kanaldan geçen havanın aldığı ısı; havanın kütleli debisi, havanın o andaki sıcaklığına bağlı özgül ısı ve kanaldaki havanın giriş-çıkış sıcaklıkları yardımıyla hesaplanmıştır. Isı borusunun verimi, kondenser bölgesinde havanın aldığı ısı, evaporatör bölgesinde havanın verdiği ısıya oranlanması ile bulunmuştur. Isı borusunun ısıl direnci evaporatör ve kondenser bölgelerindeki ortalama sıcaklık farkının evaporatör kısmında ısı borusunun aldığı ısıya bölünmesiyle hesaplanmıştır. Kanallardaki Reynolds sayıları; akışkanın yoğunluğu, akışkanın hızı, boru çapı ve dinamik viskozite değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler yardımıyla ortaya çıkan bu değerlerin grafiksel gösterimi ve buna bağlı olarak ulaşılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

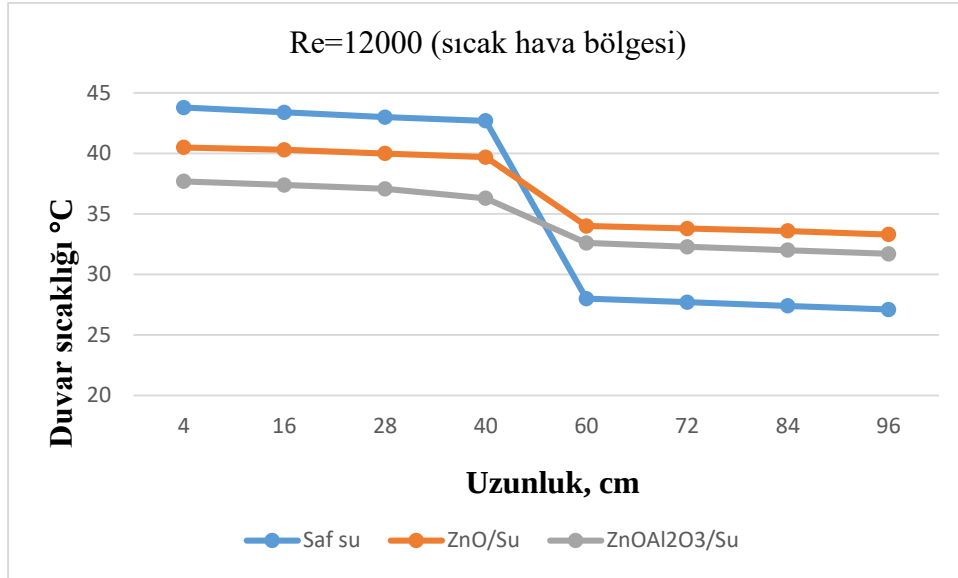
7.1. Isı Geri Kazanım Ünitesi Isı Değiştiricisinin Isıl Performansları

Isı değiştiricisi olarak 90°' lik açılarla konumlandırılmış termosifon tipi ısı boruları kullanılan havadan havaya ısı geri kazanım ünitesinin çalışma sıcaklıkları aralığının genişletilerek ısıl performansının iyileştirilmesi amacıyla kurulan deney düzeneğinde; saf su ve ZnO/su, ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanları kullanıldığında ısı borusu boyunca duvar sıcaklıkları ölçülmüştür.

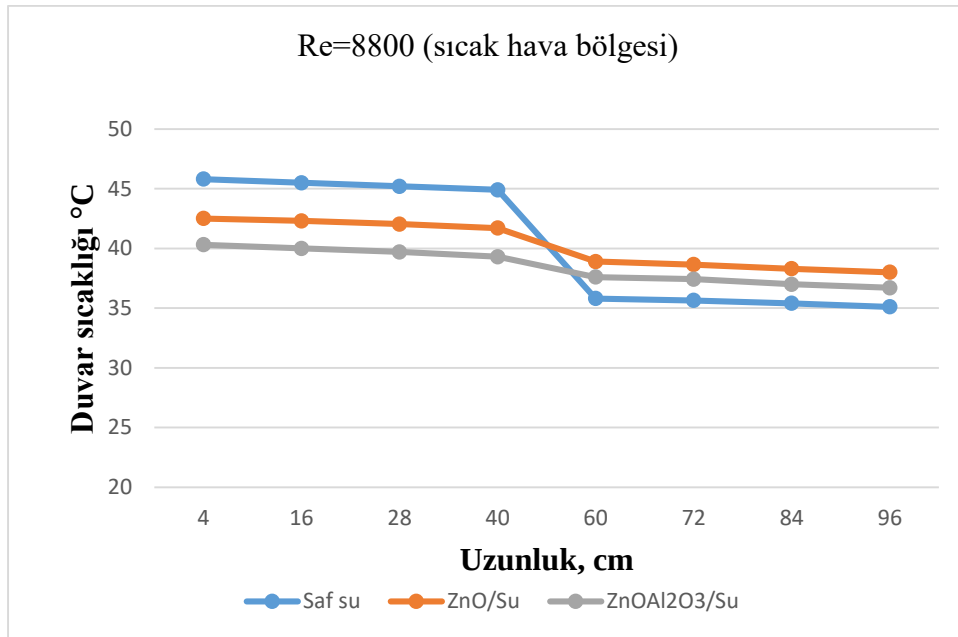
Aşağıda, üç farklı çalışma akışkanı için, ısı borusunun evaporatör ve kondenser bölgelerindeki farklı hava hızlarına dolayısıyla farklı Re değerlerine göre değişen ısı borusu boyunca sıcaklık dağılım grafikleri verilmiştir. Şekil 7.1' de, Re değeri 12000 ve ısı borusu evaporatör bölgesi kanal içi hava hızı 0,702 m/s olan, Şekil 7.2' de Re değeri 8800 ve ısı borusu evaporatör bölgesi kanal içi hava hızı 0,555 m/s olan grafikler verilmiştir. Şekil 7.3' te, Re değeri 11500 ve ısı borusu kondenser bölgesi kanal içi hava hızı 0,751 m/s olan, Şekil 7.4' de ise Re değeri 6500 ve ısı borusu kondenser bölgesi kanal içi hava hızı 0,437 m/s olan grafikler ayrıntılı olarak görülmektedir.

Şekiller incelendiğinde, üç çalışma akışkanı için de evaporatör bölümünden kondenser bölümüne doğru ısı borusu duvarındaki sıcaklık dağılımında kademeli bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Saf su yerine nanoakışkanların çalışma sıvısı olarak kullanılması, ısı borusu duvarının ortalama sıcaklığını önemli ölçüde azaltmıştır. Isı borularında önemli olan evaporatör ve kondenser sıcaklıkları arasındaki fark sıcaklığıdır. Bu sıcaklık ısı borusu direncine ve ısı borusu performansına doğrudan etkilidir.

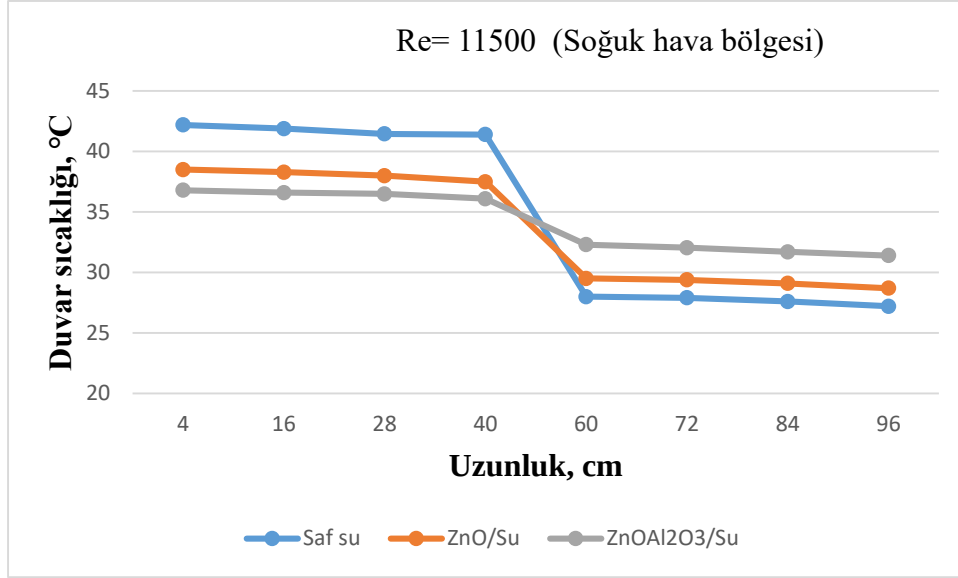
Grafikler incelendiğinde, en iyi performanslar sırasıyla ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanı, ZnO/su nanoakışkanı ve saf su olarak sıralanmaktadır. ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanının kullanıldığı deneylerde evaporatör ve kondenser bölgeleri arasındaki sıcaklık farkının diğer çalışma akışkanlarına oranla daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, iş akışkanı olarak saf su yerine ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanı kullanılması durumunda kondenser bölgesine diğer çalışma akışkanlarına göre daha fazla ısıнын transfer edildiğini göstermektedir. Evaporatör ve kondenser bölgeleri arasındaki sıcaklık farkının düşük olması ısı borusunun ısıl direncinin de düşük olduğu anlamına gelmektedir. Böylece nanoakışkan kullanımının, ısı transferi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ısı borularının veriminde önemli ölçüde bir iyileştirme yapabileceğini göstermektedir.



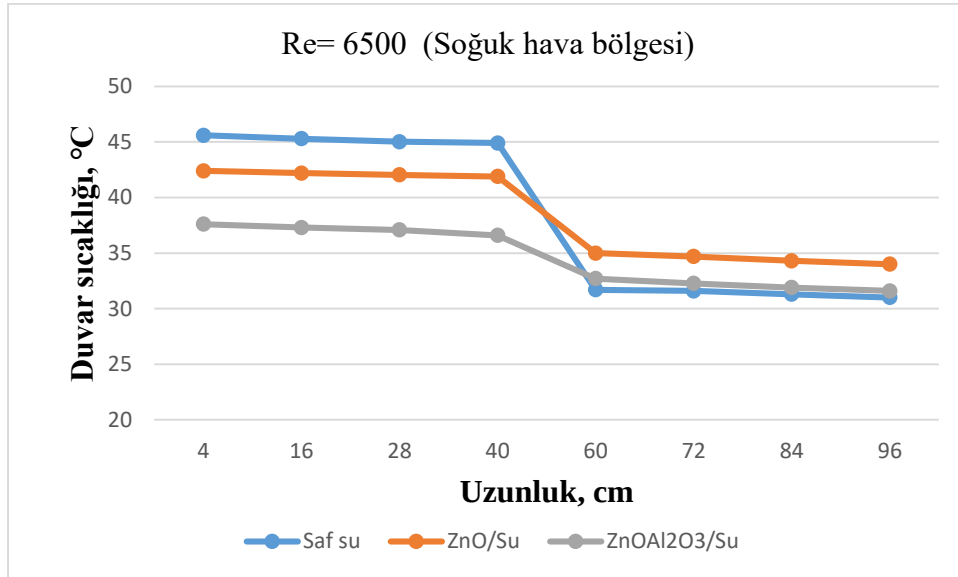
Şekil 7.1. $Re_{sıcak}=12000$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları



Şekil 7.2. $Re_{sıcak}=8800$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları



Şekil 7.3. $Re_{soğuk}=11500$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları



Şekil 7.4. $Re_{soğuk}=6500$ iken üç farklı akışkan için ısı borusu boyunca ölçülen duvar sıcaklıkları

7.2. Isı Geri Kazanım Ünitesi Performans Deney Sonuçları

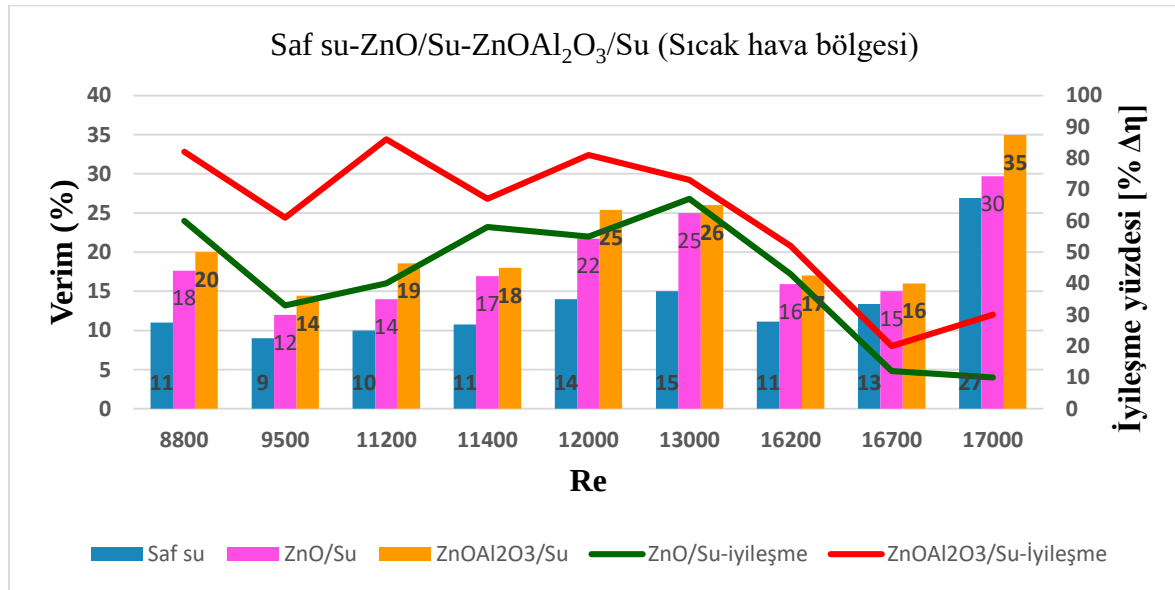
Tasarlanan havadan havaya ısı borulu ısı geri kazanım ünitesine, sıcak akışkan eldesi için farklı güç değerlerine ayarlanabilen ısıtıcılar yerleştirilmiştir. Böylece sistemin farklı atık ısı şartlarında temiz havaya verebileceği ön ısıtma miktarının belirlenmesi amaçlanarak sistemin kullanım sıcaklık aralığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Isı değiştiricisi olarak her birinin dış çapı 25,4 mm, iç çapı 23,4 mm ve uzunlukları 1m olan 5 adet, 90°' lik dik açılı

termosifon tipi bakır ısı boruları kullanılmıştır. Bu ısı borularının içlerinde saf su ve saf suyun temel akışkan olarak kullanıldığı ZnO ve ZnOAl₂O₃ nano parçacıkları ile elde edilen nanoakışkanlar kullanılmıştır.

Isı borusunun performansındaki iyileştirmeler saf su, ZnO/su ve ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanları kullanılarak belirlenmiştir. Her iki sıcak ve soğuk hava kanalı için ayrı ayrı Reynolds sayıları hesaplanmış olup deneyler türbülanslı akış türünde yapılmıştır.

7.2.1. Sıcak akışkan bölgesi (evaporatör bölgesi) akışların performansa etkisi

Evaporatör bölgesinde (sıcak hava bölgesi) üç farklı hava akış hızlarında ve dolayısıyla farklı Reynolds sayılarında, ısı geri kazanım ünitesi ısı performansının üç farklı ısı değiştiricisi çalışma sıvısına bağlı olarak elde edilen sonuçlar ile performanstaki ısıl iyileşme oranlarını gösteren değişim grafiği Şekil 7.5’ te verilmiştir.



Şekil 7.5. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdelерinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi

Şekil 7.5 incelendiğinde, evaporatör (sıcak hava) bölgesindeki farklı Reynolds sayıları için en iyi performanslar sırasıyla ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanı, ZnO/su nanoakışkanı ve saf su olarak sıralanmaktadır. ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanında temel akışkana (saf suya) göre ısı performanstaki en yüksek iyileştirme %86 (Re=11200, sıcak hava hızı 0,702 m/s), en düşük iyileşme ise %20 (Re=16700, sıcak hava hızı 0,985 m/s) oranında elde edilmiştir. Aynı

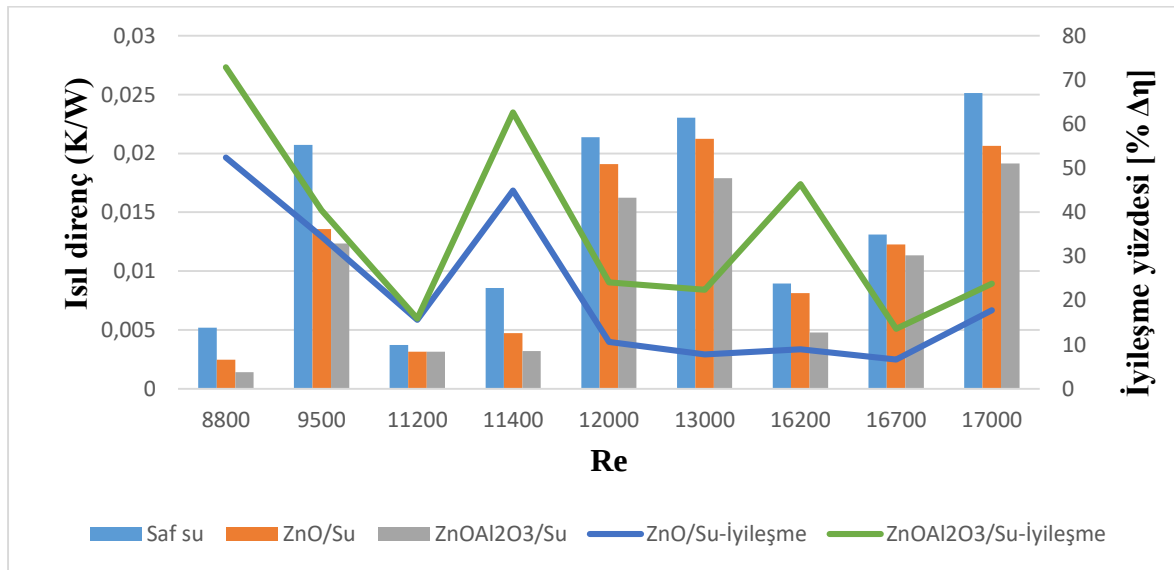
şekilde ZnO/su nanoakışkanını ele aldığımızda; ısı performanstaki iyileştirme oranı %67 ($Re=13000$, sıcak hava hızı $0,702$ m/s) ile maksimum, %10 ($Re=17000$, sıcak hava hızı $0,985$ m/s) ile minimum olarak elde edilmiştir.

ZnOAl₂O₃/Su nanoakışkanında, sıcak hava hızının $0,702$ m/s ve $Re=11200$ olduğu koşulda, %86 değerinde verimde en yüksek iyileşme elde edilmiştir. Aynı Re değerindeki ZnO/Su nanoakışkanının iyileşme yüzdesi ise %40'tır.

ZnO/Su nanoakışkanında en iyi iyileşme oranı %67 olarak, $Re=13000$ değerinde ve sıcak hava hızının $0,702$ m/s olduğu koşulda elde edilmiştir. Yine aynı Re değerindeki ZnOAl₂O₃/Su nanoakışkanın iyileşme yüzdesi ise %73 olarak görülmektedir.

Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdelерinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişim grafiğine göre, optimum sıcak hava hızının $0,702$ m/s olduğu gözlemlenmiştir.

Evaporatör bölgesinde (sıcak hava bölgesi) üç farklı hava akış hızlarında ve dolayısıyla farklı Reynolds sayılarında, ısı geri kazanım ünitesi ısı direncinin üç farklı ısı değiştiricisi çalışma sıvısına bağlı olarak elde edilen sonuçlar ile dirençteki ısı iyileşme oranlarını gösteren değişim grafiği Şekil 7.6' da verilmiştir.



Şekil 7.6. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı direnci ve iyileşme yüzdelерinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi

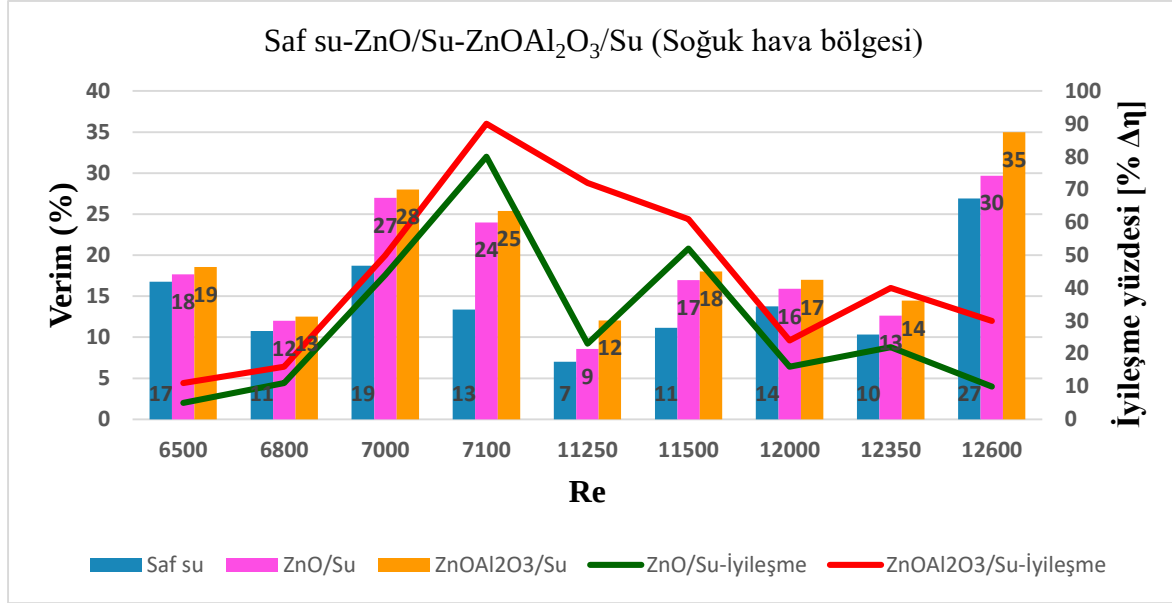
Şekil 7.6' daki ısı borularının evaporatör (sıcak hava) bölgesinden elde edilen verilere ait grafik genel olarak analiz edildiğinde, her bir Re değerindeki $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanının ısı dirençteki iyileştirme oranının ZnO/su nanoakışkanına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Grafiğe bakıldığında, yapılan deneyler sonucunda evaporatör bölgesinde nanoakışkan kullanımı ile tüm deneylerde ısı dirençte belirli bir miktarda azalma sağlandığı görülmektedir. Isı direncin azalması ısı transferinin iyileşmesine yardımcı olmuştur.

Şekil 7.6 incelendiğinde, evaporatör (sıcak hava) bölgesindeki farklı Reynolds sayıları için sıcak hava hızı 0,555m/s ve $\text{Re}=8800$ olduğunda, temel akışkana (saf suya) göre $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve ZnO/su nanoakışkanları için ısı dirençte maksimum iyileşmeler elde edilmiştir. $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanında temel akışkana (saf su) göre ısı dirençteki en yüksek iyileştirme %72,9 ($\text{Re}=8800$, sıcak hava hızı 0,555 m/s), en düşük iyileşme ise %13,6 ($\text{Re}=16700$) oranında elde edilmiştir. Aynı şekilde ZnO/su nanoakışkanını ele aldığımızda; ısı dirençteki iyileştirme oranları %52,4 ($\text{Re}=8800$, sıcak hava hızı 0,555 m/s) ile maksimum, %6,6 ($\text{Re}=16700$, sıcak hava hızı 0,985 m/s) ile minimum olarak elde edilmiştir.

Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı direnç ve iyileşme yüzdelерinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişim grafiğine göre, her iki nanoakışkan için de optimum Re değerinin 8800 ve sıcak hava hızının 0,555 m/s olduğu gözlemlenmiştir.

7.2.2. Soğuk akışkan bölgesi (kondenser bölgesi) akışların performansa etkisi

Kondenser bölgesinde (soğuk hava bölgesi) iki farklı hava akış hızlarında ve dolayısıyla farklı Reynolds sayılarında, ısı geri kazanım ünitesi ısı performansının üç farklı ısı değiştiricisi çalışma sıvısına bağlı olarak elde edilen sonuçlar ile performanstaki ısı iyileşme oranlarını gösteren değişim grafiği Şekil 7.7' de verilmiştir.

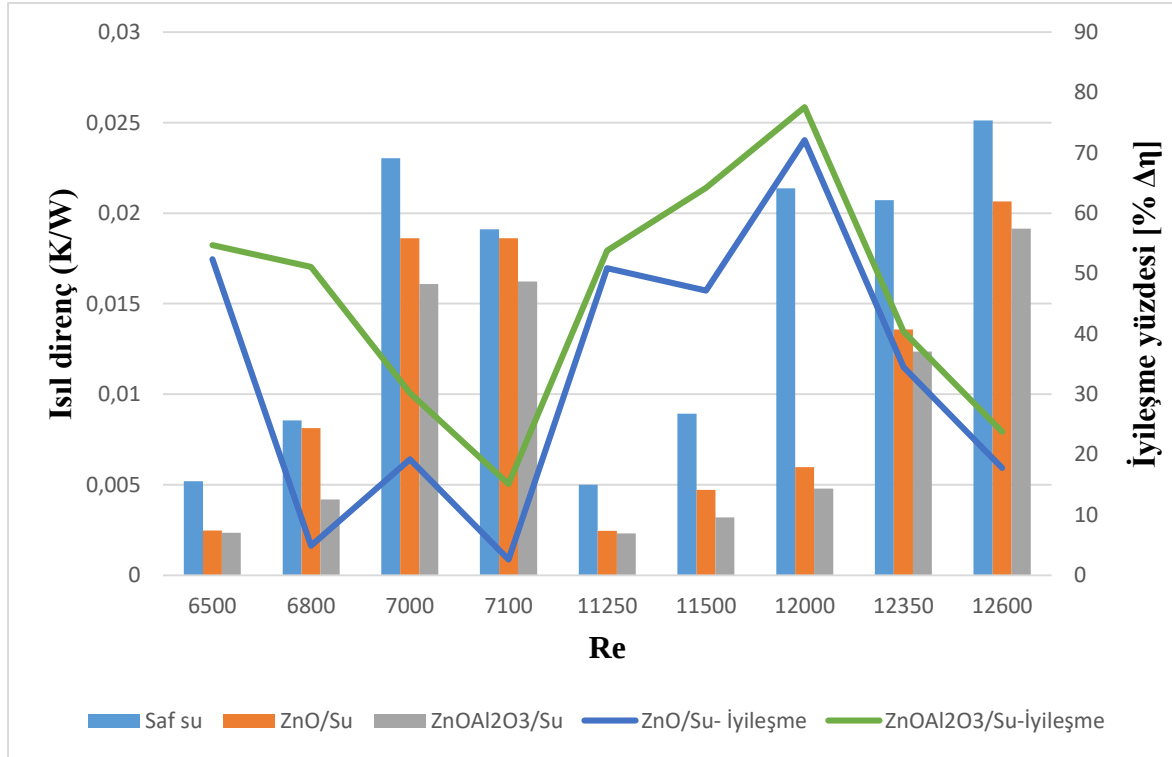


Şekil 7.7. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdesinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi

Şekil 7.7’ deki ısı borularının kondenser (soğuk hava) bölgesinden elde edilen verilere ait grafik genel olarak analiz edildiğinde, her bir Re değerindeki $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanının ısı performansını iyileştirme oranının ZnO/su nanoakışkanına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Kondenser bölgesinde (soğuk hava bölgesinde) soğuk hava hızı $0,437\text{ m/s}$ ve $\text{Re}=7100$ olduğunda, temel akışkana (saf suya) göre $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve ZnO/su nanoakışkanları için maksimum verimde iyileşmeler elde edilmiştir. $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanında temel akışkana (saf su) göre ısı performansındaki en yüksek iyileştirme %90 ($\text{Re}=7100$, soğuk hava hızı $0,437\text{ m/s}$), en düşük iyileşme ise %11 ($\text{Re}=6500$) oranında elde edilmiştir. Aynı şekilde ZnO/su nanoakışkanını ele aldığımızda; ısı performansındaki iyileştirme oranları %80 ($\text{Re}=7100$, soğuk hava hızı $0,437\text{ m/s}$) ile maksimum, %5 ($\text{Re}=6500$) ile minimum olarak elde edilmiştir.

Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdesinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişim grafiğine göre, optimum Re değerinin 7100 ve soğuk hava hızının $0,437\text{ m/s}$ olduğu gözlemlenmiştir.

Kondenser bölgesinde (soğuk hava bölgesi) iki farklı hava akış hızlarında ve farklı Reynolds sayılarında, ısı geri kazanım ünitesi ısı direncinin üç farklı ısı değiştiricisi çalışma sıvısına bağlı olarak elde edilen sonuçlar ile dirençteki ısı iyileşme oranlarını gösteren değişim grafiği Şekil 7.8’te verilmiştir.



Şekil 7.8. Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısıl direnç ve iyileşme yüzdelерinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişimi

Şekil 7.8’ deki ısı borularının kondenser (soğuk hava) bölgesinden elde edilen verilere ait grafik genel olarak analiz edildiğinde, her bir Re değerindeki ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanının ısıl dirençteki iyileştirme oranının ZnO/su nanoakışkanına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Grafiğe bakıldığında, yapılan deneyler sonucunda kondenser bölgesinde, nanoakışkan kullanımı ile tüm deneylerde ısıl dirençte belirli bir miktarda azalma sağlandığı görülmektedir. Isıl direncin azalması ile ısı transferinin iyileşme gösterdiği görülmüştür.

Şekil 7.8 incelendiğinde, kondenser (soğuk hava) bölgesindeki farklı Reynolds sayıları için soğuk hava hızı 0,751m/s ve Re=12000 olduğunda, temel akışkana (saf suya) göre ZnOAl₂O₃/su ve ZnO/su nanoakışkanları için ısıl dirençte maksimum iyileşmeler elde edilmiştir. ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanında temel akışkana (saf suya) göre ısıl dirençteki en yüksek iyileştirme %77,6 (Re=12000, soğuk hava hızı 0,751 m/s), en düşük iyileşme ise %15,1 (Re=7100) oranında elde edilmiştir. Aynı şekilde ZnO/su nanoakışkanını ele aldığımızda; ısıl dirençteki iyileştirme oranları %72,1 (Re=12000, soğuk hava hızı 0.751 m/s) ile maksimum, %2,6 (Re=7100, soğuk hava hızı 0,437 m/s) ile minimum olarak elde edilmiştir.

Üç farklı akışkan için IGK ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısı direnç ve iyileşme yüzdelерinin Reynolds sayısına bağı olarak değışim grafiğine göre, optimum Re değıerinin 12000 ve soğuk hava hızının 0,751 m/s olduğı gözlemlenmiştir.

8. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Atık ısı geri kazanım üniteleri; endüstride ve çoğu atık ısı tesisinde ihtiyaç duyulan temiz havanın ön ısıtılmasında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Tasarlanan bu havadan havaya ısı borulu ısı geri kazanım ünitesinde sıcak akışkan elde edebilmek için, farklı güçlere ayarlanabilen ısıtıcılar yerleştirilerek sistemin farklı atık ısı şartlarında temiz havaya verebileceği ön ısıtma miktarının belirlenmesi amaçlanmış olup sistemin kullanım sıcaklık aralığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tasarlanan düzende beş adet, dış ve iç çapları sırasıyla 25,4 mm ve 23,4 mm olan, her biri 90°'lik açıda konumlandırılmış fitilsiz ve havası alınmış, bakır ısı borusu demetinden oluşan ısı değiştiricisi bulunmaktadır. Taze hava kanalı girişinde 1 kW'lık 4 adet rezistans bulunmaktadır. Bu rezistanslar deneyler sırasında, ısı değiştiricisinin evaporatör bölgesinde isteğe bağlı olarak farklı ısı değerlerinde ısı akışını sağlamışlardır. Sistemin farklı koşullardaki performansını görmek amacıyla deneyler, 3 farklı sıcak hava hızında, 2 farklı soğuk hava hızında ve 2 farklı ısıtma gücünde (1 kW ve 2 kW) yapılmıştır. Isı borularında hem saf su hem de ZnO/su ve ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanları kullanılarak deneyler tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ağırlıkça %2 konsantrasyona sahip nanoakışkanların kullanımının ısı borusu performansına etkisi incelenmiştir. Bu karşılaştırmalar soğuk hava ve sıcak hava kanalı içindeki farklı Reynolds sayılarında elde edilen ısı verim, ısı borusu boyunca ortalama sıcaklık dağılımı ve ısı direnç değerleri kullanılarak yapılmıştır. Deney sonuçlarından aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır;

- ✓ Isı borusu duvarı boyunca ölçülen sıcaklık dağılımları grafikleri incelendiğinde, en iyi performanslar sırasıyla ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanı, ZnO/su nanoakışkanı ve saf su olarak sıralanmaktadır. Çalışma akışkanı olarak ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanının kullanıldığı deneylerde evaporatör ve kondenser bölgeleri arasındaki sıcaklık farkının diğer çalışma akışkanlarına oranla daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışma akışkanı olarak ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanı kullanılması durumunda kondenser bölgesine diğer çalışma akışkanlarına göre daha fazla ısının transfer edildiğini göstermektedir.
- ✓ Kanal içindeki akışların türbülanslı olması Reynolds sayıları ile performanstaki ısıl iyileşme arasında doğrusal bir ilişkinin kurulmasına engel olmuştur. Ancak yine de Saf su yerine nanoakışkanların kullanılması ile bütün Reynolds sayılarında ısıl performansta iyileşme sağlanmıştır. Her bir Re değerindeki ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanının ısıl

performansı ve ısı direnci iyileştirme oranının ZnO/su nanoakışkanına kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür.

- ✓ Üç farklı akışkan için ısı borulu ısı geri kazanım ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdelerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişim grafiğine göre, optimum sıcak hava hızının 0,702 m/s olduğu gözlemlenmiştir. Sıcak hava hızı 0,702 olduğu koşulda $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanında, Re değeri 11200 iken %86 değerinde verimde en yüksek iyileşme elde edilirken, ZnO/su nanoakışkanında Re değeri 13000 iken en iyi iyileşme oranı %67 olarak belirlenmiştir.
- ✓ Üç farklı akışkan için ısı geri kazanım ünitesinin sıcak hava bölgesindeki ısı dirençteki iyileşme oranlarının Reynolds sayısına bağlı olarak değişim grafiğine göre, her iki nanoakışkan için de optimum Re değerinin 8800 ve sıcak hava hızının 0,555 m/s olduğu gözlemlenmiştir. Bu koşulda, temel akışkana (saf suya) göre $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve ZnO/su nanoakışkanları için maksimum dirençte iyileşmeler elde edilmiştir. Bu değerler; $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanında %72,9 ve ZnO/su nanoakışkanında ise %52,4' tür.
- ✓ Üç farklı akışkan için ısı geri kazanım ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısı performans ve iyileşme yüzdelerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişim grafiğine bakıldığında, optimum Re değerinin 7100 ve soğuk hava hızının 0,437 m/s olduğu belirlenmiştir. Bu koşulda, temel akışkana (saf suya) göre $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve ZnO/su nanoakışkanları için maksimum verimde iyileşmeler elde edilmiştir. Bu değerler; $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanında %90, ZnO/su nanoakışkanında ise %80' dir.
- ✓ Üç farklı akışkan için ısı geri kazanım ünitesinin soğuk hava bölgesindeki ısı direnç ve iyileşme yüzdelerinin Reynolds sayısına bağlı olarak değişim grafiğine göre, optimum Re değerinin 12000 ve soğuk hava hızının 0,751 m/s olduğu gözlemlenmiştir. Bu koşulda, temel akışkana (saf suya) göre $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ ve ZnO/su nanoakışkanları için maksimum dirençte iyileşmeler elde edilmiştir. Bu değerler; $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanında %77,6 ve ZnO/su nanoakışkanında ise %72,1' dir.
- ✓ $\text{ZnOAl}_2\text{O}_3/\text{su}$ nanoakışkanındaki bu iyileştirmelerin en büyük nedeni nanoakışkan içerisinde yer alan ZnOAl_2O_3 nano parçacıklarının çalışma akışkanının yüzey alanını, dolayısıyla ısı transfer alanını diğer akışkanlara oranla daha fazla arttırmasıdır. Nanoakışkanların kullanımı sonucu artan ısı iletkenlik, bu çalışma akışkanları ile daha yüksek verimler alındığını deneysel olarak gözler önüne sermiştir.
- ✓ Sistemin düşük sıcaklık aralıklarında çalışabilirliği test edilmiştir.
- ✓ Sıcak ve soğuk kanallardan geçen havanın birbiriyle karışmaması bu sistemin atık ısı tesislerinde temiz havanın ön ısıtılmasında kullanılabilirliğini göstermektedir.

- ✓ Bu çalışmadaki deneysel ve teorik uygulamalar sonucunda elde edilen verilere göre, ısı değiştiricisi ısı borulu olan havadan havaya ısı geri kazanım ünitelerinde yapılmak istenen yeni çalışmalar için aşağıdaki öneriler verilebilir;
- ✓ Farklı türde nanoakışkanlar ve değişik baz akışkanlar kullanılarak ısıl performansta iyileşmeler gözlemlenebilir.
- ✓ Nano partikül boyutunun ısıl performansa etkisi ayrıntılı olarak incelenebilir.
- ✓ Isı borusu sayısına, boyutuna ve eğim açısına bağlı olarak değişen ısıl performans analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54.
2. Manay, E., Şahin, B., Akyürek, E. F. ve Çomaklı, Ö. (2012, Nisan). Mikrokanallarda nanoakışkanların kullanımı. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(627), 38-42.
3. Murugesan, C. and Tamilkolundu, S. (2012). *Mechanism of forced convective heat transfer in Al₂O₃/water nanofluid under laminar and turbulent flow*. 2nd International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences, Singapore, 28-29.
4. Xuan, Y. and Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58-64.
5. Wang, X., Xu, X. and Choi, S. U. S. (1999). Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 13(4), 474-480.
6. Alizad, K., Vafai, K. and Shafahi, M. (2012). Thermal performance and operational attributes of the startup characteristics of flat-shaped heat pipes using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 140-155.
7. Han, D., He, W. and Asif, F. Z. (2017). Experimental study of heat transfer enhancement using nanofluid in double tube heat exchanger. *Energy Procedia*, 142, 2547-2553.
8. Anoop, K., Cox, J. and Sadr, R. (2013). Thermal evaluation of nanofluids in heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 49, 5-9.
9. Sözen, A., Variyenli, H. İ., Özdemir, M. B., Gürü, M. and Aytaç, İ. (2015). Heat transfer enhancement using alumina and fly ash nanofluids in parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers. *Journal of the Energy Institute*, 89(3), 414-424.
10. Tiwari, A. K., Ghosh, P. and Sarkar, J. (2013). Performance comparison of the plate heat exchanger using different nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 141-151.
11. 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.
12. Ardekani, A. M., Kalantar, V. and Heyhat, M. M. (2019). Experimental study on heat transfer enhancement of nanofluid flow through helical tubes. *Advanced Powder Technology*, 30(9), 1815-1822.
13. Hung, Y. H., Teng, T. P. and Lin, B. G. (2013). Evaluation of the thermal performance of a heat pipe using alumina nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 504-511.
14. Teng, T. P., Hsu, H. G., Mo, H. E. and Chen, C. C. (2010). Thermal efficiency of heat pipe with alumina nanofluid. *Journal of Alloys and Compounds*, 504(1), 380-384.

15. 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.
16. Hassan, M. I., Alzarooni, I. A. and Shatilla, Y. (2015). The effect of water-based nanofluid incorporating Al_2O_3 nanoparticles on heat pipe performance. *Energy Procedia*, 75, 3201-3206.
17. Moraveji, M. K. 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.
18. Huminic, G. and Huminic, A. (2011). Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphons using nanofluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(3), 550-557.
19. Venkatachalapathy, S., Kumaresan, G. and Suresh, S. (2015). Performance analysis of cylindrical heat pipe using nanofluids – An experimental study. *International Journal of Multiphase Flow*, 72, 188-197.
20. Naphon, P., Thongkum, D. and Assadamongkol, P. (2009). Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant–nanoparticles mixtures. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 772-776.
21. Gürü M., Sözen A., Karakaya U. and Çiftçi E. (2019). Influences of bentonite-deionized water nanofluid utilization at different concentrations on heat pipe performance: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*, 148, 632-640.
22. Arya, H., Sarafraz, M. M., Pourmehran, O. and Arjomandi, M. (2020). Performance index improvement of a double-pipe cooler with MgO /water-ethylene glycol (50:50) nano-suspension. *Propulsion and Power Research*, 9(1), 75-86.
23. Anitha, S., Thomas, T., Parthiban, V. and Pichumani, M. (2019). What dominates heat transfer performance of hybrid nanofluid in single pass shell and tube heat exchanger?, *Advanced Powder Technology*, 30(12), 3107-3117.
24. Onyiriuka, E., Ighodaro, O., Adelaja, A., Ewim, D. and Bhattacharyya, S. (2019). A numerical investigation of the heat transfer characteristics of water-based mango bark nanofluid flowing in a double-pipe heat exchanger. *Heliyon*, 5(9), e02416.
25. Ebrahimi-Moghadam, A., Kowsari, S., Farhadi, F. and Deymi-Dashtebayaz, M. (2020). Thermohydraulic sensitivity analysis and multi-objective optimization of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{H}_2\text{O}$ nanofluid flow inside U-bend heat exchangers with longitudinal strip inserts. *Applied Thermal Engineering*, 164, 114518.
26. Pourhoseini, S. H., Naghizadeh, N. and Hoseinzadeh, H. (2018). Effect of silver-water nanofluid on heat transfer performance of a plate heat exchanger: An experimental and theoretical study. *Powder Technology*, 332, 279-286.
27. Dunn, P. and Reay, D. (1994). *Heat pipe* (Fourth edition). Great Britain: Elsevier, 348.

28. Özsoy, A. ve Acar, M. (2005). Yerçekimi destekli bakır-su ısı borusu için deneysel bir çalışma. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 90, 13-18.
29. Reay, D. and Kew, P. (2007). *Heat pipes* (Fifth edition). England: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 1-30.
30. ASHRAE. (2008). *Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment* (I-P Edition). Atlanta: ASHRAE, 888.
31. Dunn, P. D. and Reay, D. (2013). *Heat pipes* (3rd Edition). Oxford: Pergamon, 318.
32. Yüksel, T. (1998). *Soğutucu akışkanların kullanıldığı ısı borulu güneş kolektörünün kullanılabilirliğinin deneysel ve teorik olarak araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 21-30.
33. Jouhara, H., Chauhan, A., Nannou, T., Almahmoud, S., Delpech, B. and Wrobel, L. (2017). Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy*, 128, 729-754.
34. Alt, N. (2010). *Tek kanallı ısı borusu ile çok kanallı ısı borusu verimlerinin karşılaştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 30-38.
35. Çıkın, A. (1988). *Isı boruları*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 43-50.
36. Shabgard, H., Allen, M. J., Sharifi, N., Benn, S. P., Faghri, A. and Bergman, T. L. (2015). Heat pipe heat exchangers and heat sinks: Opportunities, challenges, applications, analysis, and state of the art. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 138-158.
37. ANSI/ASHRAE. (2009). *Methods of testing for rating electrically driven unitary air-conditioning and heat pump equipment* (Standard 37). USA: ANSI/ASHRAE, 2-29.
38. Şahan, M. A. (2005). *Hvac uygulamalarında ısı geri kazanımı*. VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 151-153.
39. ASHRAE. (2012). *HVAC systems and equipments, American society of heating, refrigerating and air conditioning engineers* (SI Edition). Atlanta: ASHRAE, Chapter 26.
40. Köse, D. (2013). *Manyetik nanopartikül destekli katalizör*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 90.
41. Goharshadi, E. K., Ahmadzadeh, H., Samiee, S. and Hadadian, M. (2013). Nanofluids for heat transfer enhancement-A review. *Physical Chemistry Research*, 1(1), 1-33.
42. Wang, C., Zhang, X. and Su, M. (2017). Synthesis and thermal stability of Field's alloy nanoparticles and nanofluid. *Materials Letters*, 205, 6-9.
43. Tawfik, M. M. (2017). Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1239–1253.

44. Murshed, S., Leong, K. ve Yang, C. (2005). Enhanced thermal conductivity of TiO_2 —water based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(4), 367-373.
45. Ali, N., Teixeira, J. A. and Addali, A. (2018). A review on nanofluids: Fabrication, stability, and thermophysical properties. *Journal of Nanomaterials*, 2018, 33.
46. Tsai, C., Chien, H., Ding, P. and Chen, P. (2004). Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance. *Materials Letters*, 58(9), 1461-1465.
47. 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.
48. Sharma, B., 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, 202-212.
49. Şahin, F. and Namlı, L. (2018). Nanoakışkanlarda kararlılığın ısı transferini iyileştirme açısından önemi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 880 - 898.
50. Ghadimi, A., Saidur, R. and Metselaar, H. (2011). A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(17–18), 4051-4068.
51. Kong, L., Sun, J. and Bao, Y. (2017). Preparation, characterization and tribological mechanism of nanofluids. *Royal Society of Chemistry Advances*, 7(21), 12599-12609.
52. Wole-Osho, I., Okonkwo, E. C., Kavaz, D. and Abbasoglu, S. (2020). An experimental investigation into the effect of particle mixture ratio on specific heat capacity and dynamic viscosity of Al_2O_3 -ZnO hybrid nanofluids. *Powder Technology*, 363, 699-716.
53. Azizian, R., Doroodchi, E. and Moghtaderi, B. (2016). Influence of controlled aggregation on thermal conductivity of nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 138(2), 021301.
54. Sureshkumar, R., Mohideen, S. T. and Nagachari, N. (2013). Heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 397-410.
55. Paul, G., Chopkar, M. K., Manna, I. and Das, P. (2010). Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1913-1924.
56. Khedkar, R. S., Sonawane, S. S. and Wasewar, K. L. (2014). Heat transfer study on concentric tube heat exchanger using TiO_2 —water based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 163-169.
57. Balcıoğlu, B. (2014). *Alumina nano akışkan kullanımının ısı borusu performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 69.

58. Çiftçi, E., Sözen, A. ve Karaman, E. (2016). TiO₂ içeren nanoakışkan kullanımının ısı borusu performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 19(3), 367-376.
59. Öztürk, A. (2018). *Hvac ünitelerinde kullanılan ısı borulu ısı geri kazanım ünitesi performansının deneysel ve teorik incelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 98.
60. Dirlik, A. (2018). *Nanoakışkanlarda doğal tainımla ısı transferinin sayısal olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul, 17-31.
61. Choi, S.U.S., Zhang, Z.G. and Yu F.E. (2001). Grulke, Anomalous Thermal Conductivity Enhancement Nanotube suspensions. *Applied Physics Letters*, 79, 2252-2254.
62. Mishra P. C., Mukherjee S., Nayak S. K. and Panda A., (2014). A brief review on viscosity of nanofluids. *International Nano Letters*, 4, 109–120.
63. 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.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AYTAÇ, İpek
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 02.10.1989, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 05365797644
 e-mail : ipekaa@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği	2014
Lisans	Başkent Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2011
Lise	Gazi Koleji Fen Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Türk Hava Kurumu Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Sözen, A., Variyenli, H. İ., Özdemir, M. B., Gürü, M. and Aytaç, İ. (2016). Heat transfer enhancement using alumina and fly ash nanofluids in parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers. *Journal of the Energy Institute*, 89(3), 414-424.
2. Aytaç, İ., Sözen, A. (2020, baskıda). Isı borulu-ısı geri kazanım ünitesinde ZnO/su ve ZnOAl₂O₃/su nanoakışkanları kullanılarak performansın iyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*.

Hobiler

Resim, Spor



GAZİ GELECEKTİR..