



**ISI BORULU HAVADAN HAVAYA ISI GERİ KAZANIM ÜNİTELERİNDE
PERFORMANSIN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Kerim MARTİN

**DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2021

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.

Kerim MARTİN

08/04/2021

TEŞEKKÜR

Gerek tez çalışmamda gerekse diğer akademik faaliyetlerde bana tecrübesiyle ışık tutan, pozitif enerjisini her zaman hissettiğim danışman hocam Sayın Prof. Dr. Kurtuluş BORAN'a, çok kıymetli bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Adnan SÖZEN'e, tez izleme komitesi toplantılarına katılarak sağladığı desteklerden sayın hocam Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK'a, özellikle deney düzeneğinin kurulması aşamasındaki yardımlarından dolayı sayın hocam Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ'ye, bilgi ve tecrübelerine başvurduğumda beni hiçbir zaman geri çevirmeyen Gazi Üniversitesi Enerji Sitemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli hocalarıma ve deneylerin yürütülmesi aşamasında vermiş olduğu desteklerden dolayı sayın hocam Öğr. Gör. Çağdaş FİLİZ'e teşekkür ederim.

Ayrıca başta eşim ve oğlum olmak üzere tez hazırlama sürecinde her an yanımda olan, bana verdikleri pozitif enerji ve gösterdikleri sabırdan dolayı tüm aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	15
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	19
3. ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMLERİ	31
3.1. Ekonomizerler	32
3.2. Reküperatörler.....	33
3.3. Plakalı Isı Değiştiriciler.....	34
3.4. Isı Tekerleği	35
3.5. Isı Borulu Isı Değiştiriciler.....	36
4. ISI BORULARI	39
4.1. Isı Borusunun Tanımı ve Çalışma Prensibi.....	39
4.1.1. Isı borularının bileşenleri	41
4.1.2. Isı borularının ısı direnç ağları.....	46
4.2. Isı Borusu Çeşitleri.....	50
4.2.1. Çevrimli ısı boruları (kılcallık etkili pompalama)	51
4.2.2. Titreşimli ısı boruları	52
4.2.3. Mikro ısı boruları	52
4.2.4. Sabit kondenser ısı boruları.....	53

	Sayfa
4.2.5. Çeşitli iletkenlikli ısı boruları	54
4.2.6. Döner ve dolanımlı ısı boruları	54
4.2.7. Yüksek sıcaklık ısı boruları (sıvı metal ısı boruları).....	55
4.2.8. Kriyojenik ısı boruları	55
4.2.9. Salınımlı ısı boruları.....	55
4.2.10. Sıvı tutucu diyet ısı boruları.....	56
4.2.11. Buhar tutucu diyet ısı boruları	57
4.2.12. Halkalı ısı borusu kavramı	57
4.2.13. Yüksek iletkenlikli plakalı ısı borusu plakaları.....	58
4.3. Isı Borularının Uygulama Alanları.....	58
4.3.1. Elektronik bileşenlerin soğutulması.....	59
4.3.2. Uzay araçları	59
4.3.3. Enerji tasarrufu.....	59
4.3.4. Isı borulu ısı değıştiriciler	59
4.3.5. Sürekli donun korunması	60
4.3.6. Kar eritme ve buz çözme	60
4.3.7. Termometre kalibrasyonu için ısı borusu ek parçaları.....	60
4.3.8. Yüksek sıcaklıklı ısı borulu fırın.....	61
4.3.9. Çeşitli ısı borusu uygulamaları	61
5. NANO PARTİKÜLLER VE NANO AKIŞKANLAR.....	63
5.1. Nano Partiküller	63
5.1.1. Farklı nano partikül tipleri	63
5.1.2. Nano partikül sentez yöntemleri	66
5.1.3. Nano partiküllerin karakterizasyon tekniķeri.....	67
5.2. Nano Akışkanlar.....	68
5.2.1. Nano akışkan hazırlama yöntemleri.....	69

	Sayfa
5.2.2. Nano akışkanlar için stabilizasyon yöntemleri	71
5.2.3. Nano akışkanların termofiziksel özellikleri	75
5.2.4. Çeşitli nano akışkan uygulamaları	79
5.2.5. Nano akışkan tipleri	81
6. MATERYAL VE METOT	85
6.1. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar.....	85
6.2. Çalışma Akışkanın Hazırlanması	87
6.2.1. Nano partiküller	87
6.2.2. Nano akışkan hazırlama	88
6.2.3. Nano akışkanların termofiziksel özelliklerinin tayini	90
6.3. Deneyin Yapılışı.....	93
6.3.1. Deneyler	93
6.3.2. Deneyin yapılışı	94
6.4. Deney Sonuçlarının Çözümlemesi	94
6.5. Deney Sonuçlarının Belirsizlik Analizi	95
6.6. Sayısal Analiz.....	96
6.6.1. Geometrinin oluşturulması.....	96
6.6.2. Ağ (Mesh) yapısının oluşturulması.....	97
6.6.3. Sınır şartlarının belirlenmesi ve sayısal çözüm.....	100
6.6.4. Analiz sonuçlarının alınması.....	102
7. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	103
7.1. Nano Akışkanların Termofiziksel Özellikleri	103
7.2. Deneysel Sonuçlar.....	103
7.2.1. Nano akışkanların ısı verim üzerindeki etkisi.....	103
7.2.2. Nano akışkanların ısı direnç üzerindeki etkisi	106
7.2.3. Nano akışkanların ısı borusu sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi	107

	Sayfa
7.2.4. Deneysel sonuçların literatürdeki bazı çalışmalarla kıyaslanması.....	109
7.2.5. Deneysel sonuçların belirsizlik analizi sonuçları.....	111
7.3. Sayısal Sonuçlar	112
7.4. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Kıyaslanması	115
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	119
8.1. Sonuçlar.....	119
8.2. Öneriler	120
KAYNAKLAR	121

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Bazı akışkanların ısı borusunda uygun çalışma aralıkları	42
Çizelge 4.2. Bazı akışkanların maksimum termosifon merit sayıları	44
Çizelge 4.3. Bazı malzemelerin ısı iletkenlik değeri	45
Çizelge 4.4. Bazı fitil yapılarının etkin ısı iletkenlikleri.....	50
Çizelge 5.1. Ölçü birimleri.....	63
Çizelge 5.2. Bazı sıvı ve katıların ısı iletim katsayıları	68
Çizelge 6.1. Nano partiküllerin termofiziksel özellikleri.....	87
Çizelge 6.2. Ultrasonik banyonun özellikleri	90
Çizelge 6.3. Yapılan deneylerin listesi	93
Çizelge 6.4. Çarpıklık değerlerine göre eleman kalitesi tanımları.....	99
Çizelge 6.5. Oluşturulan ağ yapısının değerlendirme kriterleri	100
Çizelge 7.1. Nano akışkanların termofiziksel özellikleri	103
Çizelge 7.2. Deneysel sonuçların literatürdeki bazı çalışmalarla kıyaslanması	109

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Endüstriyel uygulamalarda meydana gelen ısı kayıpları	31
Şekil 3.2. Ekonomizlerdeki akışkan akımları	32
Şekil 3.3. Çeşitli ekonomizler türleri a) duman borulu, b) helezon ve spiral borulu, c) kanatlı borulu, d) düz veya firkete borulu	33
Şekil 3.4. Atık ısı geri kazanım reküperatörü	34
Şekil 3.5. Plakalı ısı değiştirici (contalı)	34
Şekil 3.6. Isı tekerleğinin çalışma prensibi	36
Şekil 3.7. a) Isı borusu grubu, b) Bir ısı borusunun kısımları.....	37
Şekil 4.1. Isı borusu çalışma prensibi	39
Şekil 4.2. Isı borusunun farklı bölgelerinde meydana gelen ısı transfer olayları	40
Şekil 4.3. Termosifon çalışma prensibi.....	41
Şekil 4.4. Bir ısı borusunda ısı tranfer limitleri.....	43
Şekil 4.5. Bazı akışkanların klasik ısı borusu merit sayıları	44
Şekil 4.6. Bazı fitil kesitleri	46
Şekil 4.7. Termosifona ait ısı direnç ağı	47
Şekil 4.8. Klasik ısı borusuna ait ısı direnç ağı.....	49
Şekil 4.9. Çevrimli ısı borusu	51
Şekil 4.10. Titreşimli ısı borularının şematik gösterimi	52
Şekil 4.11. Mikro ısı borusunun yapısı	53
Şekil 4.12. Sabit kondenser ısı borularının eksenel oluklu fitil yapısı.....	54
Şekil 4.13. Döner ısı borusu şematik gösterimi	55
Şekil 4.14. Salınlımlı ısı borusu şematik görünümü	56
Şekil 4.15. Sıvı tutucu diyet ısı borusu şematik gösterimi	57
Şekil 4.16. Buhar tutucu diyet ısı borusu şematik gösterimi	57
Şekil 4.17. Halkalı ısı borusu şematik gösterimi	58

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. Yüksek iletkenlikli plakalı ısı borusu plakaları	58
Şekil 5.1. CuO nano partikülüne ait SEM görüntüsü.....	64
Şekil 5.2. Kübik demir oksit nano partikülüne (9-20 nm) ait TEM görüntüsü.....	65
Şekil 5.3. Nano partikül sentezleme yöntemleri	66
Şekil 5.4. Nano malzeme sentez yöntemleri	67
Şekil 5.5. Nano partikül karakterizasyonunda kullanılan bazı teknikler	68
Şekil 5.6. Nano akışkan üretiminde tek adımlı yöntem	70
Şekil 5.7. Nano akışkan üretiminde çift adımlı yöntem.....	71
Şekil 5.8. Yüksek basınçlı homojenleştirici.....	72
Şekil 5.9. Ultrasonik işlem için kullanılan cihazlar	73
Şekil 5.10. İki adımlı yöntem ile hazırlanmış siyah karbon/su nano akışkanına uygulanan fiziksel işlemlerden sonra elde edilem TEM görüntüleri (ölçek çubuğu: 200nm).....	73
Şekil 5.11. Nano partiküllerin Brownian hareketi	76
Şekil 5.12. Nano partikül, baz akışkan ve katı-sıvı ara yüzünde nano katman içeren nano akışkan yapısı	77
Şekil 5.13. Nano akışkanların çeşitli kullanım alanları	80
Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü ve parçaları	85
Şekil 6.2. a) Isı borularının yerleşimi (üstten görünüş), b) Isı boruları üzerindeki ara vana ve manometreler	86
Şekil 6.3. Elektrikli rezistansların tam çalışma hali	86
Şekil 6.4. Nano partiküllerin partikül boyut dağılım grafikleri a) Demir, c) Bakır oksit ve SEM görüntüleri b) Demir, d) Bakır oksit	88
Şekil 6.5. Nano akışkanın hazırlanması	89
Şekil 6.6. Ultrasonik banyo görünümü	89
Şekil 6.7. Hazırlanan nano akışkanlar	90
Şekil 6.8. Nano akışkanların yoğunluk ölçümü	91
Şekil 6.9. Sıcak hava kanalının 2 boyutlu geometrisi (üstten görünüş)	97

Şekil	Sayfa
Şekil 6.10. Sıcak hava kanalının ağ yapısı.....	97
Şekil 6.11. En-boy oranı 1 ve 20 olan üçgenler	99
Şekil 6.12. Farklı çarpıklık değerlerindeki şekiller.....	100
Şekil 7.1. Kullanılan akışkana bağlı olarak elde edilen ısı verim değerlerinin ve verimlerdeki iyileşme oranlarının kanal içi Re sayılarına göre değişimi (Deneysel)	105
Şekil 7.2. Kullanılan akışkana bağlı olarak elde edilen ısı direnç değerlerinin ve ısı dirençlerdeki iyileşme oranlarının kanal içi Re sayılarına göre değişimi (Deneysel).....	107
Şekil 7.3. Isıl verimlerdeki en yüksek iyileşme oranlarının elde edildiği deneylerde ısı borusu boyunca olan sıcaklık dağılımları (Deneysel)	108
Şekil 7.4. Kullanılan akışkana bağlı olarak elde edilen ısı verim değerlerinin ve verimlerdeki iyileşme oranlarının kanal içi Re sayılarına göre değişimi (sayısal)	112
Şekil 7.5. Sayısal analizde en yüksek verimin elde edildiği soğuk kanal Re sayısı 7000 ve sıcak kanal Re sayısı 16600 iken kanal içlerinde oluşan a) sıcaklık ve b) hız konturları.....	113
Şekil 7.6. Sayısal analizde en yüksek verimin elde edildiği soğuk kanal Re sayısı 7000 ve sıcak kanal Re sayısı 16600 iken kanal içlerinde oluşan hız akış çizgileri.....	115
Şekil 7.7. Deneysel ve sayısal sonuçların akışkanlara göre karşılaştırılması a) Saf su, b) CuO/Saf su, c) CuO+Fe/Saf su	117

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
ΔT	Sıcaklık Farkı
σ	Yüzey Gerilimi (MPa)
φ	Partikül Konsantrasyonu
η	Verim
μ	Viskozite (kg/ms)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
A_c	Kondenser Bölgesinin Alanı (m ²)
A_e	Evaporatör Bölgesinin Alanı (m ²)
c	Kondenser
c_p	Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK)
D	Difüzyon Sabiti
D	Partikül Çapı (nm)
D_h	Hidrolik Çap (m)
e	Evaporatör
G_t	Gigaton
h	Isı Transfer Katsayısı (W/m ² K)
k	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
k_B	Boltzmann Sabiti
l	Uzunluk (m)
M_{ib}	Merit Sayısı (Isı borusu)
M_t	Merit Sayısı (Termosifon)
q	Transfer Edilen Isı Miktarı
R	Isıl Direnç (K/W)
r	Yarıçap (m)
$\dot{Q}_e$	Evaporatörde Sıcak Havanın Kaybettiği (W)
$\dot{Q}_k$	Kondenserde Soğuk Havanın Aldığı Isı (W)
$\dot{m}$	Kütleli Debi (g/s)

Simgeler**Açıklamalar****Re**

Reynolds Sayısı

T

Sıcaklık (K)

V

Hava Hızı (m/s)

Kısaltmalar**Açıklamalar****AFM**

Atomic Force Microscope

BTU

British Thermal Unit

CFD

Computational Fluid Dynamics

DLS

Dynamic Light Scattering

DSC

Differential Scanning Calorimetry

FT-IR

Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre

HVAC

Heating Ventilating and Air Conditioning

LMTD

Logarithmic Mean Temperature Difference

NTU

Number of Transfer Units

RNG

Renormalizasyon Grup

SDBS

Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate

SEM

Scanning Electron Microscope

TEM

Transmission Electron Microscopy

TGA

Thermo Gravimetric Analysis

VOF

Volume-of-Fluid

XRD

X-Ray Diffraction

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin ve teknolojinin hızla gelişiyor olması dünya genelinde tüketilen enerji miktarında da ciddi bir artış dalgası oluşturmaktadır. Enerji üretim ve kullanımı sırasında çevreye salınan CO₂, başta küresel ısınma olmak üzere çeşitli çevre sorunlarına neden olmaktadır. Şu günlerde yaşanmakta olan COVID-19 salgınından dolayı 2020 yılında bir önceki yıla göre CO₂ salınımında azalma sağlanmış olsa da Uluslar Arası Enerji Ajansının (IEA) yayımladığı rapora göre 2020 yılında enerji kaynaklı CO₂ salınımı miktarı 31,5 Gt (Gigaton) olarak gerçekleşmiştir. Aynı raporda bu rakamın 2019 yılında 33,4 Gt olarak gerçekleştiği görülmektedir [1]. Bu değerler oldukça yüksek değerlerdir. Salgının bitmesiyle birlikte enerji kullanımının artması ve enerji kaynaklı CO₂ salınımının tekrardan daha yüksek bir ivmeyle artışa geçmesi muhtemeldir.

2018 yılında global nihai enerji tüketiminin % 50'sine tekabül eden ısı enerjisi en büyük nihai enerjidir ve küresel CO₂ salınımında % 40'lık bir paya sahiptir. Ayrıca üretilen ısı enerjisinin % 50'si sanayide, % 46'sı binalarda ve geri kalan kısmı da özellikle sera ısıtması olmak üzere tarımda kullanılmaktadır [2]. Isı enerjisinin üretildiği ya da tüketildiği tüm işlemlerde bir atık ısı söz konusudur. Küresel bazda endüstriyel kuruluşlarda kullanılan enerjinin yaklaşık 1/4'ünün atık ısı olarak kaybedildiği düşünülmektedir [3]. Oluşan bu atık ısının geri kazanılması ile ciddi anlamda bir enerji verimliliği sağlanabilir ve çevreye verilen olumsuz etki azaltılabilir.

Atık ısı geri kazanım yöntemleri, atık ısının bir gaz veya sıvı içeren bir prosesten yakalanmasını ve ekstra enerji kaynağı olarak sisteme geri aktarılmasını içerir. Eğer geri kazanılacak olan atık ısı kaynağının sıcaklığı 400°C'tan daha fazla ise sistem yüksek sıcaklık, kaynak sıcaklığı 400°C ile 100°C arasında ise orta sıcaklık ve kaynak sıcaklığı 100°C'ın altında ise düşük sıcaklık atık ısı geri kazanımı adını almaktadır [4]. Genellikle, yüksek sıcaklık aralığındaki atık ısının çoğu doğrudan yanma işlemlerinden, orta aralıkta yanma ünitelerinin egzozundan ve düşük sıcaklık aralığında ise parçalardan, ürünlerden ve proses birimlerinin ekipmanlarından gelmektedir [4].

Uygulamada kullanılan çeşitli ısı geri kazanım üniteleri mevcuttur. Bunlar arasında reküperatör ve rejeneratörleri de kapsayan hava ön ısıtıcılar, ısı tekerleği, rejeneratif ve reküperatif yakıcılar, ısı borulu ısı değiştiriciler, plakalı ısı değiştiriciler, ekonomizerler, atık

ısı boylerleri gibi üniteler sayılabilir. Bu üniteler temelde aynı mantıkla çalışmaktadır. Yani ısıyı yakalama, geri kazanma ya da dönüştürme işlemleri yapmaktadırlar [4].

Atık ısı geri kazanımında ısı borularının kullanımı hem enerji verimliliği hem de küresel ısınmanın engellenmesi açısından oldukça uygun bir yöntemdir. Isı borusu içeren havadan havaya ısı geri kazanım üniteleri hem ticari hem de endüstriyel uygulamalarda verimli ısı değiştiriciler olarak değerlendirilmektedir. Isı borulu ısı değiştiricilerde atık gazın ve taze havanın karışmaması bu ekipmanların en önemli özelliğidir [5]. Isı borulu havadan havaya ısı geri kazanım üniteleri geçmişten günümüze kurutma uygulamaları [6], [7], iklimlendirme sistemleri [8], [9], bina uygulamaları [10], [11], hastanelerde ameliyat odalarının ısıtılması [12] ve otomobillerin ısıtılması [13] gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Isı boruları ve fitilsiz olarak imal edilen, yer çekiminin etkisiyle çalışan termosifon tipi ısı boruları basit yapıları, imalat kolaylığı, ekonomikliği ve işletme kolaylığı bakımından avantajlı bir durumdadır. Bu cihazlar kabaca evaporatör, kondenser ve adyabatik bölge olarak adlandırılan 3 kısımdan oluşmaktadır. İçerisine koyulan akışkanın buharlaşması ve yoğunlaşması prensibine göre çalışırlar. Isı borularına akışkan şarjı yapılmadan önce vakumlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece hem akışkan şarj işlemi kolaylıkla yapılabilen hem de akışkanın kaynama noktası atmosfer basıncındaki kaynama noktasından daha düşük bir sıcaklığa çekilmektedir. Dolayısıyla ısı borusunun çalışma sıcaklığı düşmektedir. Isı borusunun (Termosifonun) evaporatör kısmı ısıtılarak içine şarj edilmiş olan akışkanın buharlaşması sağlanmaktadır. Buradaki ısıtıcı kaynağı sistemin kullanılacağı yere göre değişmekle birlikte elektrikli ısıtıcı, su, hava vb. bir kaynak olabilmektedir. Evaporatörü ısıtmak için ihtiyaç duyulan bu ısı enerjisi, dışardan herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan sağlanabilirse sistemin toplam verimi artacaktır. Evaporatörde gaz fazına geçen akışkan yoğunluk farkından dolayı kondenser kısmına doğru hareket eder. Adyabatik bölgede herhangi bir ısı alışverişi söz konusu değildir. Kondenser kısmında akışkan yoğunlaşır ve tekrar sıvı faza geçer. Yoğuşan çalışma akışkanı evaporatör kısmına klasik ısı borularında fitil üzerinden dönerken termosifon tipi ısı borularında yer çekiminin etkisiyle döner. Evaporatör ve kondenser arasında belirli bir sıcaklık farkı olduğu sürece bu çevrim devam eder.

Isı borularının performansını ve çalışma koşullarını belirleyen en önemli parametre kuşkusuz çalışma akışkanıdır. Isı borularında çalışma akışkanı olarak geleneksel

akışkanların (ör: saf su, etilen glikol vb.) yanı sıra ilk defa 1995 yılında Choi [14] tarafından “nano akışkan” olarak adlandırılan çalışma akışkanları da kullanılmaktadır. Nano akışkan hazırlarken literatürde sıklıkla karşımıza çıkan iki temel yöntem vardır. Bunlar tek ve çift adımlı yöntemlerdir. Tek adımlı yöntemde nano partikül ve nano akışkan tek seferde üretilirken iki adımlı yöntemde önce nano partikül üretilir. Ardından belirlenen bir baz akışkan içine nano boyutta partiküller süspansiyon edilerek nano akışkan hazırlanmış olur. Bu yöntemde akışkanın kararlılığının artırılması için karışıma bir de yüzey aktifleştirici kimyasal bir madde konur. Katıların ısı özellikleri sıvılara nazaran daha iyidir. Dolayısıyla nano akışkanların ısı özelliklerinin de baz akışkana göre daha iyi olması beklenen bir durumdur.

Baz sıvı içinde askıda kalması sağlanan nano partiküller sıvının yüzey alanını ve ısı kapasitesini artırmaktadır. Bu partiküller ayrıca akışkanın etkin ısı iletkenliğini de artırmaktadır. Nano akışkanlar sayesinde, nano partiküller, akışkan ve akış geçiş yüzeyi arasındaki çarpışma ve etkileşimin de artması sağlanmaktadır. Bunlara ek olarak sıvı içindeki nano partiküller ile dalgalanma ve sıvının türbülansı da artırılmaktadır [15]. Böylece nano akışkanlar baz akışkanlara göre daha etkin bir ısı transferi sağlayabilmektedir.

Bu çalışmada havadan havaya ısı borulu ısı geri kazanım ünitesinde nano akışkan kullanımının ısı performans etkisi hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Literatür incelendiğinde ısı borularında nano akışkan kullanımının ısı performans üzerinde olumlu etkisinin olduğu birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. Isı borulu havadan havaya ısı geri kazanım üniteleri üzerine de çeşitli çalışmalar mevcuttur. Ancak bu ünitelerde nano akışkan kullanarak ısı performansın nasıl etkilendiğinin değerlendirildiği sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu çalışmada, ısı borulu havadan havaya bir ısı değiştiricisinde çalışma akışkanı olarak daha önce hiç kullanılmamış olan ağırlıkça % 2 partikül konsantrasyonuna sahip CuO/ Saf Su ve CuO+Fe/Saf Su nano akışkanları kullanılarak ısı performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Ayrıca sistem 2 boyutlu olarak ANSYS 19 programında modellenmiş ve deneysel analizin yanı sıra sayısal olarak da çözümleme yapılmıştır. Sayısal çözümlemede, her deney için deneysel çalışmada elde edilen hava giriş sıcaklıkları ve ısı borusu duvar sıcaklıkları programa girilmiş ve hava çıkış sıcaklıkları program tarafından hesaplanmıştır. Her iki analizden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın özgün tarafı metal oksitlerle birlikte saf Fe nano partikülleri ile hazırlanan hibrit nano akışkanın ısı borulu havadan havaya bir ısı değıştiricisinde kullanılmasıdır. Fe nano partiküller yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasına rağmen kararlı nano akışkan üretme konusunda yeterli değildir. Öte yandan CuO nano partiküller ise kararlı nano akışkanlar üretebilirken ısı iletkenlik konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, hem ısı iletkenlik yönünden hem de kararlılık yönünden avantajlı durumda olan CuO+Fe hibrit nano akışkanı kullanılarak ısı geri kazanım ünitesinin ısı performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çalışmanın bu bölümünde literatürde yer alan ısı boruları, nano akışkanlar ve ısı geri kazanım üniteleri üzerine yapılan çalışmaların bir kısmı özet olarak sunulmuştur.

Menlik ve arkadaşları (2015) MgO/Su nano akışkanı kullanımının çift fazlı termosifon tipi ısı borusunun ısı performansını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmada ısı borusunun farklı çalışma koşullarındaki performansını gözlemlemek için 3 farklı ısıtma gücü (200W, 300W ve 400W) ve 3 farklı soğutma suyu debisinde (5; 7,5; 10 g/s) deneyleri tekrarlamışlardır. Araştırmacılar ısı borusunun verimliliğinde en yüksek iyileşme oranını %26 olarak 200 W ısıtma gücü ve 7,5 g/s soğutma suyu debisinde elde etmişlerdir [16].

Mroue ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada termosifon tipi bir ısı borulu ısı değiştiricisinin deneysel ve analitik incelemesini yapmış ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Deneylerde ve analizde 2 m uzunluğunda 6 adet karbon çeliğinden yapılmış termosifon tipi ısı borulu ısı değiştiricisi ve çalışma akışkanı olarak su kullanmışlardır. Çalışmada 100-250 °C sıcaklık ve 0,05-0,14 kg/s debide değişen hava kullanılmıştır. Çalışma hem deneysel hem de bilgisayar ortamında CFD analizi olarak yapılmıştır. Sonuçların birbirine yakın çıktığı gözlenmiştir. Mroue ve arkadaşları deneysel ve nümerik olarak şu sonuçları elde etmişlerdir: yüksek hava giriş sıcaklığı ve kütleli debilerde yüksek ısı transfer oranları elde edilmiştir, etkinlik hava giriş sıcaklığıyla doğru, hava kütleli debisiyle ters orantılı olmuştur, en büyük etkinlik en düşük hava debisi – en yüksek hava giriş sıcaklığında %29 olarak elde edilmiştir, deneysel ve nümerik sonuçlar uyum içindedir [17].

Sözen ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada çift fazlı kapalı termosifon tipi bir ısı borusunda uçucu kül ve alümina nano akışkanlarının ısı borusunun ısı performansını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Kullanılan uçucu kül Yatağan termik santralinden temin edilmiş ve içeriğinde çeşitli (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO) metal oksitler yer almaktadır. Çalışmada kullanılan ısı borusu bakır boru olup çapı 13 mm dir. ısı borusunun %33,3'ü nano akışkan ile doldurularak çalışmalar yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada karşılaştırma yapabilmek için 3 farklı çalışma sıvısı, 3 farklı ısıtma gücü ve 3 farklı soğutma suyu debisi kullanılmıştır. 400 W ısıtıcı gücü ve 5 g/s

soğutma suyu debisinde yapılan çalışmada ısı dirençte, uçucu kül kullanıldığında %30,1 ve alümina kullanıldığında ise %5,2 azalma gözlenmiştir[18].

Sadeghinezhad ve arkadaşları (2016) grafen partiküller kullanarak hazırladıkları nano akışkan ile deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma farklı grafen konsantrasyonu, farklı ısı borusu açısı ve farklı ısıtma gücü kullanılmıştır. Isıl dirençte maksimum azalma kütlece %0,1 grafen içeren nano akışkan kullanımında saf suya kıyasla %48,4 azalma olarak elde edilmiştir. Maksimum etkin ısıl iletkenlik artışı %0,1 grafen konsantrasyonu ve 60° açıda 20, 40, 60 ve 80 W ısıtma gücünde yatay duruma kıyasla sırasıyla %23,4; %29,8; %37,2 ve %28,3 olarak elde edilmiştir. Sadeghinezhad ve arkadaşları bu çalışmada grafen nano partikülleri ile hazırlanan nano akışkanın ısı borularında kullanılmanın onun ısı performansını artıracığı ve aynı şartlardaki su kullanımına göre daha küçük boyutlarda aynı sonucun alınabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca Sadeghinezhad ve arkadaşları kullanılan nano partikülün, evaporatör kısmında sinterlenmiş fitil yüzeyinde ince bir kaplama meydana getirdiğini ve bu sayede yüzeyin ıslanabilirliğinin ve ısı borusunun ısı performansının iyileştirildiğini belirtmişlerdir[19].

Devendiran ve Amirtha (2016) nano akışkanların hazırlanışı, karakterizasyonu, özellikleri ve kullanım alanları ile alakalı bir derleme çalışması yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada oksit nano partikülleri için iki adımlı üretim şeklinin daha iyi olduğu ancak metal partiküller için o kadar iyi olmadığı, metal partiküller için tek adımlı üretim şeklinin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Literatürde yaygın karakterizasyon teknikleri olarak SEM, TEM, XRD, FT-IR, DLS, TGA, Zeta potansiyel analizinin kullanıldığını ve bu tekniklerin nano akışkanın kristal yapısını, partikül boyutunu, yüzey fonksiyonelliğini ve yüzey yükünü belirlemede etkili olduğunu görmüşlerdir. Nano akışkanın ısıl iletkenliğinin, nano partikül boyutuna, şekline, hacimsel oranına, baz akışkan ve nano partikül tipine, nano akışkanın pH değerine ve partikül kaplamanın tipine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Düşük sıcaklıklarda nano akışkanların özellik ve davranışlarının araştırılmasının gerektiği belirtilmiş ve bunun araştırmalara yeni bir rota olabileceği söylenmiştir. Yapılan çalışmada nano akışkanların dayanıklılığının pH değerine, sonikasyon zamanına, nano partiküllerin şekillerinin farklı tip ve boyutlarına, farklı baz akışkanlarına, nano akışkan hazırlama metoduna, hacim oranı ve surfaktanlarına bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak daha iyi dayanıklılık ve daha az topaklanma sağlayacak optimum partikül boyutu ile alakalı bir veriye rastlamamışlardır. Çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç ise nano akışkan hazırlamada

teknolojisi kanıtlanmış olan tek nano partikül kullanmak yerine aynı baz sıvı içinde iki ya da daha fazla türden nano partikül kullanımının nano akışkanların ısı ve taşıma özelliklerini daha ileriye taşıyabileceğidir [20].

Gedik (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmada çalışma akışkanı olarak 3 farklı (su, etanol ve etilen glikol) akışkan kullanmıştır. Bu 3 sıvı ile farklı eğim açıları, farklı ısıtma güçleri ve farklı soğutma suyu debilerinde deneyler yapmıştır. Termosifonun verimi her sıvı için farklı koşullarda %30 ile %95 arasında değişen değerlere ulaşmıştır. Çalışmada en iyi verimleri 200 W ısıtıcı gücünde ve 10 L/h soğutma suyu debisinde su, 200 W, 30 L/h debide etilen glikol ve 600 W, 10 L/h debide etanol sağlamıştır [21].

Mohideen ve Kumar (2016) çift fazlı kapalı termosifonda zirkonyum di oksit nano akışkanı kullanarak ısı performans analizi yapmışlardır. Isı borusu bakırdan yapılmış olup dış çapı 8 mm ve uzunluğu 800 mm dir. Nano akışkan konsantrasyonu %3 ile %4 arasında değişmiştir. Deneyler farklı operasyon koşullarında yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Mohideen ve Kumar bu çalışmalarında nano akışkan kullanımının tüm deney koşullarında ısı borusunun ısı performansını üzerinde pozitif etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Isı borusunun ısı veriminde %22,8'e kadar iyileşme kaydetmişlerdir. Çalışmada ayrıca nano partikül konsantrasyonunun artması ile ısı dirençte azalma sağlandığı belirtilmiştir [22].

Jafari ve arkadaşları (2017) yaptıkları deneysel çalışmada çift fazlı termosifon tipi ısı borularında buharlaşma ve yoğunlaşma ısı transferlerini incelemişler ve literatürde yer alan bazı bağıntılarla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında akışkan olarak su kullanmışlardır. Isı borularının evaporatör kısmının doldurma oranları %8 den %100 e kadar yapılmıştır. Kullanılan ısı borusunun uzunluğu 500 mm ve iç çapı 33 mm'dir. Bu 500 mm'nin 150 mm'lik kısmı evaporatör, 200 mm'lik kısmı adyabatik bölge ve son 150 mm'lik kısmı da yoğunlaşma bölgesi olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler seçilen bağıntılarla %30'luk bir toleransla benzer sonuçlar vermiştir [23].

Sözen ve arkadaşları (2018) çift fazlı termosifon tipi ısı borusunda yaptıkları deneysel çalışmada nano akışkan kullanımının ısı borusunun ısı performansına etkisini gözlemlemişlerdir. Yapılan bu çalışmada nano partikül olarak TiO_2 kullanmışlardır. Yüzey aktifleştirici olarak ise iki farklı kimyasal kullanmışlar ve bu kimyasalların ısı borusunun ısı performansına etkisini incelemişlerdir. Nano akışkanlara ağırlıkça %0,5 oranında ayrı ayrı

Triton X-100 ve sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) ilave etmişler ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar bu yüzey aktifleştiricilerin akışkanın yüzey gerilimini azalttığını ve çökeltme olayını önlediğini belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada ısı dirençteki maksimum iyileşme oranı %43,26 olarak 200 W ısıtma gücü, 7,5 soğutma suyu debisi ve TiO_2 +saf su+ SDBS nano akışkanı kullanıldığında elde edilmiştir [24].

Abdun ve arkadaşları (2018) soğutma amaçlı kullanılmak üzere bakır borulardan yapılmış bir ısı değiştiricisinde CuO/Su nano akışkanının performans etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmada nano akışkan kullanımının ısıyı daha iyi taşıdığı ve soğutma performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Nusselt sayısında da iyileşme sağlanmıştır. Nano akışkan kullanarak ısı iletkenlikte % 5,83 lük bir iyileşme, ısı transfer katsayısında % 61,888'lik bir iyileşme, ısı transfer oranında % 49 ve nusselt sayısında % 25,7'lik iyileşme elde etmişlerdir [25].

Mohammad Hossein Ahmadi ve arkadaşları (2018) ısı transferi iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan nano akışkanlar üzerine 2018 yılında bir derleme çalışması yapmışlardır. Yapılan çalışmada konu ile alakalı deneysel ve teorik çalışmalara yer verilmiştir. Mohammad ve arkadaşları çok sayıda geleneksel ve hibrit nano akışkanı incelemişler ve birkaç parametrenin akışkanın ısı iletkenliğinde etken rol oynadığını görmüşlerdir. Bu parametrelerin en etkilileri sıcaklık, katı faz konsantrasyonu, nano partiküllerin boyutu ve şeklidir. İncelenen çalışmalardan şu sonuçları çıkarmışlardır; Sıcaklıktaki artış Brownian hareketini artırmasından dolayı daha yüksek ısı iletkenlik sağlamıştır. Katı faz konsantrasyonu da nano akışkanın ısı iletkenliğini iyileştirmiştir. Ayrıca çalışmada hibrit nano akışkan kullanımı gibi bazı özgün fikirlerin nano akışkanlar hakkında daha uygun özelliklerin elde edilmesine olanak sağlayabileceği belirtilmiştir. Son olarak Mohammad ve arkadaşları gelecek çalışmalarda çeşitli nano akışkanların partikül şekli üzerine yoğunlaşılması gerektiğini ve ek olarak hibrit nano akışkanların yapılarının araştırılmaya açık bir konu olduğunu vurgulamışlardır [26].

Wang ve arkadaşları (2018), yaptıkları çalışmada çift fazlı kapalı termosifon ısı borusunun CFD analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma CFD modellemenin Geyser kaynaması esnasında ısı transfer davranışının incelenmesi üzerinedir. Çalışmada VOF modeli kullanılmıştır. Çalışmada yaygın olarak kullanılan Rankine-Hugoniot atlama durumu, Schrage modeli ve Lee modeli olmak üzere 3 adet CFD faz değişim modelinden

bahsedilmiştir. Ayrıca Wang ve arkadaşları bu modeller arasından Lee modelinin termosifonlar için en uygun model olduğu belirtmiş ve çalışmada kullanılan modelin Lee modeli baz alınarak geliştirildiğini söylemişlerdir. Sonuçları Lee modeli ile kıyaslamışlardır. Sonuçlar aynı zamanda deneysel sonuçlar ile de karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma ile kıyaslandığında geliştirilmiş Lee modelinin sonuçları doğru tahmin etmede daha etkin olduğu gözlemlenmiştir [27].

Kujawska ve diğerleri (2019) yaptıkları deneysel çalışmada, çift fazlı kapalı termosifonda farklı nano akışkanların geyser kaynamasına etkisini gözlemlemeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar sonuçları incelemek için referans akışkanlar olarak saf su ve saf su + sodium dodecyl sulphate akışkanlarını kullanmışlardır. Bunların yanı sıra farklı nano akışkanlar da kullanılmıştır. Çalışmada performans göstergeleri olarak transfer edilen ısı miktarı, ısı direnci ve çalışma akışkanının sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Performans kıyaslaması için bunların yanı sıra geyser frekansı ve iç ortam basıncının zamana göre değişimi de takip edilmiştir. Kujawska ve arkadaşlarının elde ettiği en önemli sonuçlardan biri geyser kaynamasının sadece nano partiküllerden değil aynı zamanda kimyasal stabilizatörlerden de etkilendiğidir. Bu çalışmada deneysel olarak çalışma akışkanlarının geyser kaynamasını bazı durumlarda azalttığı hatta tamamen ortadan kaldırdığı gösterilmiştir. Ayrıca araştırmacılar su yerine diğer akışkanların kullanımının çalışma sıcaklığı seviyesini ve transfer edilen ısı miktarını değiştirerek termosifonun çalışma noktasını değiştirdiğini gözlemlemişlerdir [28].

Maddah ve arkadaşları (2019) sinir ağlarıyla yaptıkları çalışmada ısı borulu ısı değiştiricisinde CuO/Su nano akışkanı kullanımının ısı performansına etkisini tahmin etmişlerdir. Yaptıkları analizde nano partiküller ısı borusunun duvar sıcaklıklarını düşürdüğü ve aynı zamanda evaporatör ve kondenser arasındaki sıcaklık farkını azalttığını gözlemlemişlerdir. Böylece CuO/Su nano akışkanı ile ısı borusunun ısı gücü artarken ısı direnci de azalmıştır [29].

Dehaj ve Mohiabadi (2019) ısı borulu güneş kolektöründe CuO/Su nano akışkanı ile deneysel bir çalışma yapmışlardır. Nano akışkan ile elde ettikleri sonuçları saf su ile kıyaslamışlardır. Sonuçlar nano akışkan kullanımının solar kolektörün performansını artırdığını göstermiştir [30].

Kaya ve arkadaşları (2019) CuO/Metanol nano akışkanı kullanarak yaptıkları deneysel çalışmada vakum tüplü ısı borulu bir havalı güneş kolektörü kullanmışlardır. Farklı hava debilerinde deneyleri tekrarlamışlardır. Yapılan çalışmada nano akışkan kullanımının ısı özellikleri iyileştirdiği sonucuna varılmıştır [31].

Sarafraz ve diğerleri (2019) termosifon tipi bir ısı borusunda deneysel çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada zirkonyum/aseton nano akışkanı kullanmışlar ve değerlendirme kriteri olarak ısı borusunun ısı transfer katsayısını, ısıl direncini ve ısıl performansını kullanmışlardır. Isı borusu bakırdan yapılmış olup, 10,7 mm iç çapa, 12 mm dış çapa ve 280 mm uzunluğa sahiptir. Deneylerde 1-250 kW/m² ısı akısı, %20- %70 doldurma oranı, 5°-70° eğim açısı ve kütlece %0,025-%0,1 değerlerinde nano partikül konsantrasyonu kullanarak deneyler yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; yüksek ısı akılarında ve nano akışkan kullanıldığında toplam ısıl direnç azalırken ısı transfer katsayısı artmıştır. Zirkonyum/aseton nano akışkanı kaynama ısı transferini ve geyser kaynamasını iyileştirmiş ve %0,1 partikül konsantrasyonunda saf asetona göre ısı transfer katsayısında %36,3 lük bir artış sağlamıştır. En yüksek ısı transfer katsayısının elde edildiği doldurma oranı ve eğim açısı sırasıyla %60 ve 65° olmuştur [32].

Sardarabadi ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada kendilerinin tasarladığı özgün bir termosifon tipi ısı değiştiricisinde baz sıvısı saf su olan, çok duvarlı karbon nano tüp kullanarak hazırladıkları nano akışkan ile farklı ısıtıcı güçlerinde deneyler yapmışlardır. Termosifonun ısıl performansını gözlemlemek için ısıl direnç ve ısı verim değerlerini hesaplamışlardır. Elde ettikleri sonuca göre nano akışkan kullanımı düşük ısıl direnç ve yüksek ısı verim sağlamıştır. Ayrıca Sardarabadi ve diğerleri saf suya kıyasla, termosifonda nano akışkan kullanıldığında sistemin daha yüksek ısıtıcı güçlerinde çalışabildiğini ortaya koymuşlardır [33].

Zufar ve arkadaşları (2020) 4 kıvrımlı titreşimli tip ısı borusunda Al₂O₃-CuO/Su ve SiO₂-CuO/Su hibrit nano akışkanları kullanarak hem deneysel hem de teorik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada en küçük ısıl direnç SiO₂-CuO/Su kullanılan deneylerde elde edilmiştir. Isıl iletkenlik ve viskozitenin en yüksek olduğu akışkan ise Al₂O₃-CuO/Su nano akışkanı olmuştur. Suyla kıyaslandığında hibrit nano akışkanlar başlangıç titreşim değerine daha erken bir zamanda ulaşılmasını sağlamıştır. Yani nano akışkan kullanımında daha küçük ısıtma güçlerinde titreşim başlama değerine ulaşılabilmiştir. Düşük ısıtma güçlerinde

evaporatör sıcaklıkları arasında (hibrit nano akışkanlar ve saf su için) dikkate değer bir farklılık gözlemezken yüksek ısıtma güçlerinde sıcaklık farkı dikkate değerdir [34].

Xu ve diğerleri (2020) yaptıkları deneysel çalışmada çift fazlı kapalı termosifon tipi bir ısı borusunda iki farklı nano akışkan kullanmışlardır. Hazırlanan akışkanların baz sıvısı saf su olup nano partiküller ise farklı oranlarda kullanılan Al_2O_3 , TiO_2 'dir. (%75 Al_2O_3 + %25 TiO_2 , %50 Al_2O_3 + %50 TiO_2 , ve %25 Al_2O_3 + %75 TiO_2) Termosifon 500 mm uzunluğundadır. Ayrıca 16 mm iç çapa ve 20 mm dış çapa sahiptir. Isıtma gücü değerleri 200 W'tan 400 W'a kadar 50 W aralıklarla değişmektedir. Deneylerde 3 farklı soğutma debisi ve 3 farklı doldurma oranı söz konusudur. Çalışmada %25 Al_2O_3 + %75 TiO_2 - H_2O ve TiO_2 - H_2O nano akışkanları ile en iyi ısı transferi performansına ulaşılmıştır. 400 W ısıtma gücü, % 50 doldurma oranı ve 0,4 L/dk soğutma suyu debisinde ısı direnç %25 Al_2O_3 + %75 TiO_2 - H_2O için %26,8, TiO_2 - H_2O için %22,8 azalmış ve benzer şekilde ısı transfer katsayısı sırasıyla %25,78 ve %21,62 oranında artmıştır. Ayrıca ısı verim sırasıyla %10,6 ve %9,2 oranında artış göstermiştir [35].

Zhang ve arkadaşları (2020) yaptıkları deneysel çalışmada pompa destekli kapalı çevrim bir ısı borusu sisteminde amonyak kullanarak ısı performans analizi yapmışlardır. Isı borusunda kavitasyon oluşmaması için amonyak tercih edilmiş ve bu akışkana uyumlu olması için ısı borusunun malzemesi de paslanmaz çelik olarak seçilmiştir. Kullanılan ısı borusu çevriminde toplamda 2320 mm'lik bir etkin ısı transfer uzunluğu söz konusudur. Farklı pompa güçleri ve ısıtıcı sıcaklıklarında deneyler yapılmıştır. Çalışmada 4 W pompa gücü ve 80 °C'nin altında bir ısıtıcı sıcaklığında 370 W'lık ısı dağıtımı elde edilmiştir. Zhang ve arkadaşları çevrimin yaklaşık 5 dakikada dengeye ulaştığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca düşük ısıtıcı gücü ve yüksek pompalama gücünde sistemin hedef sıcaklığı küçük değerlerde kalmıştır. Isı yükünün artması ile evaporatör ısı direncinde keskin bir düşüş sağlanmış ve sonrasında yavaş olarak arttığı gözlenmiştir. Araştırmacılar aynı zamanda, ısı direnç üzerinde soğutucu sıcaklığının borusundan düşük evaporatör ısı direnci 0,174 K/W olmuştur. Son olarak, bu sistemde amonyakın metanole göre daha iyi bir sonuç verdiği belirtilmiştir [36].

Khajepour ve diğerleri (2020) yaptıkları deneysel çalışmada L şeklinde bir ısı borusunda SiO_2/Su nano akışkanı kullanarak performans kıyaslaması yapmışlardır. Çalışmada nano partikül boyutu (11–14 nm ve 60–70 nm), ağırlıkça partikül konsantrasyonu (%0,1 ve %0,5),

ısı borusu eğim açısı (0° ve 90°), evaporatör dolum oranları (%80- %90- %100) ve ısıtıcı güçleri (5W-10W-15W) gibi parametreler dikkate alınmıştır. Çalışma sonunda nano partikül konsantrasyonunun artmasıyla ısı dirençte azalma olduğu gözlemlenmiştir. Isıl dirençteki en yüksek azalma %24 olarak, 11-14 nm partikül boyutu, 10W ısıtıcı gücü, %0,5 partikül konsantrasyonu, 90° eğim açısı ve %100 evaporatör doluluk oranında gerçekleşmiştir [37].

Alshehri ve arkadaşları (2020) yaptıkları nümerik çalışmada 4 bileşenli hibrit nano akışkanlar kullanarak nümerik bir çalışma yapmışlardır. Kullanılan nano partiküller Al_2O_3 ve TiO_2 iken baz sıvılar da saf su ve etilen glikoldür. Nano akışkanlar tek fazlı akışkanlar olarak modellenmiştir. Karışım oranları ise % 2,5 Al_2O_3 – % 1,5 TiO_2 ve % 5 Al_2O_3 – % 3 TiO_2 olacak şekilde ayarlanmıştır. Baz sıvı 70:30 oranında saf su ve etilen glikol karışımıdır. Çalışmada akış tipi türbülanslı olup çalışma sıcaklığı 293 K'dir. Re sayısı 7800 ile 20000 arasında değişmiştir. Simülasyonda sabit ısı akısı uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacılar ısıl iletkenlikte % 24 ve % 11'lik iyileşmeler elde etmişlerdir. Ayrıca elde edilen en yüksek iyileşme oranı da % 52 olmuştur [38].

Zadeh ve Nakhjavani (2020) yer çekiminin etkisinde çalışan bir ısı borusu deney düzeneğinde zirkonyum/aseton nano akışkanı kullanarak ısıl performans incelemesi yapmışlardır. Kullandıkları baz sıvı hacimce %40 aseton % 60 etilen glikol içermektedir. Partikül konsantrasyonu ise %0,05 ile % 0,15 arasında değişmektedir. Deney sonuçlarına göre maksimum sıcaklık azaltımı %0,15'lik akışkan ile sağlanmıştır. En yüksek ısı transfer katsayısına da yine %0,15'lik nano akışkan kullanımında, 0,65 doldurma oranında ve $60-65^\circ$ 'lik eğim açısında ulaşılmıştır. Doldurma oranının artması, başlangıçta ısı transfer katsayısını artırsa da 0,65 ten sonra negatif yönde bir etki yapmıştır [39].

Ghorabae ve arkadaşları (2020) yaptıkları deneysel çalışmada termosifon tipi ısı borusunda 3 farklı akışkan kullanarak ısıl performans değerlendirmesi yapmışlardır. Bu akışkanlar saf su, titanyum-oksit + saf su ve titanyum-oksit + saf su + triton X-100 olarak seçilmiştir. Deneyler 100, 150 ve 200 W ısıtma gücü, $45, 60$ ve 90° eğim açılarında yapılmıştır. Triton X-100 kullanımı evaporatör ve kondenser arasındaki sıcaklık farkının azalmasını sağlayarak ısı borusunun ısıl performansını artırmıştır. Bütün akışkanlar 200 W ısıtıcı gücünde en iyi performanslarını göstermiştir. Araştırmacılar en iyi eğim açısının saf su için 60° , nano akışkanlar için 90° olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada 90° eğim açısı ve 200 W ısıtıcı gücünde yapılan deneyde ısı verim, ortalama ısı transfer katsayısı ve ısıl dirençteki en

yüksek iyileşme oranları sırasıyla % 20; % 74,5 ve % 43,5 olarak gerçekleştiği belirtilmiştir [40].

Sadeghinezhad ve arkadaşları (2020) modifiye edilmiş yüksek dayanımlı grafen nano plakacıklar ile hazırlanan nano akışkanın bir ısı borusunun ısı özelliklerine nasıl etki ettiğini gözlemlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Modifiye edilmiş nano partiküllerin kullanımı nano akışkanın ısı iletkenliğini %17 ye kadar artırmıştır. 480 saat sonra maksimum %16'lık bir çökme görülmüştür. Nano akışkan 840 saate kadar stabil kalabilmiştir. % 30 dan % 40'a kadar olan doldurma oranlarında yüzey sıcaklığı azalırken % 60 doldurma oranında yüzey sıcaklığı artmıştır. Ortalama ısı transfer katsayısı maksimum değerine 50° eğim açısında ulaşmıştır. Yapılan çalışmada sonuç olarak modifiye edilmiş grafen nano plakacıklarının ısı borusunun ısı verimini artırdığı ve daha büyük ısı yükleri için uygun olduğu söylenmiştir [41].

Jouhara ve diğerleri (2021) hem deneysel hem de olarak yaptıkları çalışmada sudan havaya ısı borulu çok geçişli bir ısı değiştirici kullanmışlardır. Isı borusunda kullanılan çalışma akışkanı saf sudur. Bu ısı borularının evaporatör kısmı sıcak gaz ile ısıtılmakta iken kondenser kısmı su ile soğutulmaktadır. Çalışmada Re sayısının etkisinin gözlemlenebilmesi için evaporatör kısmındaki havanın geçiş sayısı ve soğutma suyunun debisi değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Re sayısı ile ısı değiştiricinin performansı arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğunu göstermiştir. Geçiş sayısı 1'den 5'e çıkarıldığında performansta %25'lik bir artış sağlanmıştır. Isı değiştiricinin ortalama performansı logaritmik sıcaklık farkı (LMTD) ve etkinlik NTU (ϵ -NTU) metoduyla tahmin edilmiştir. Bu tahmin deneysel çalışmayla doğrulanmıştır. LMTD metodu $\pm$ % 15,5'lik bir hata payına sahipken ϵ -NTU metodu maksimum %19'luk bir hata orana sahip olmuştur. Ayrıca hem hava devresinin hem de su devresinin çıkış sıcaklıkları $\pm$ 0,7 °C'lik bir toleransla tahmin edilmiştir [42].

Sukarno ve arkadaşları (2021) COVID-19 pandemisinde virüsün hastalara ve sağlık çalışanlarına yayılmasını engellemek için hayati önem taşıyan izolasyon odalarının HVAC sistemlerine ısı borulu ısı değiştirici ekleyerek sistemin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Isı borularındaki çalışma akışkanı su olup doldurma oranı % 50 olarak belirlenmiştir. Deneyler taze hava giriş sıcaklıkları 30 °C ve 45 °C arasında değişirken hava hızları da 1,5 m/s ile 2,5 m/s arasında değişmiştir. Sisteme ilave edilen ısı borulu ısı değiştirici soğutma cihazına

girecek olan havayı havasını maksimum 9,4 °C kadar önceden soğutarak enerji tüketimini azaltmayı başarmıştır. Elde edilen en yüksek enerji geri kazanım miktarı 0,080 m³/s hava hacminde 767 W olarak sağlanmıştır ki bu değer HVAC sisteminin %46'sına denk gelmektedir. Bu çalışmada araştırmacılar sonuç olarak hastanenin mevcut HVAC sistemine entegre edilen bir ısı borulu ısı değiştiricinin enerji tüketimini azaltmada yararlı olacağını ortaya koymuşlardır [43].

Gürtürk ve diğerleri (2021) yaptıkları deneysel çalışmada uygulama bölgesine bağlı olarak fazladan enerji harcamadan kısmı ya da tam soğutma yapmayı amaçlamışlardır. Bu amaç için sudan havaya ısı borulu bir sistem kurmuşlar, 25 mm ve 40 mm çapa sahip iki farklı ısı borusu tasarlamışlardır. Isı borularında çalışma akışkanı olarak R-134a kullanılmıştır. 25 mm çapında olan ısı borusu daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu ısı borusuyla evaporatör kısmında elde ettikleri ısı transfer katsayıları 10, 20, 30 ve 40°C için sırasıyla 389,511; 383,024; 366,9 ve 325,632 W/m²K olmuştur. Kondenser bölgesinde elde edilen ısı transfer katsayıları ise 10.94 ile 11.36 W/m²K arasında değişmiştir. Kondenser bölgesinde elde edilen ısı transfer katsayılarında iki ısı borusu için dikkate değer bir fark oluşmamıştır [44].

Shuoman, Abdelaziz ve Samad (2021) yaptıkları çalışmada çift borulu çift faz kapalı termosifonun ısı performans analizini hem deneysel hem de sayısal olarak araştırmışlardır. Deneylerde kullanılan akışkanlar saf su ve Al₂O₃ + Saf su nano akışkanıdır. Araştırmacılar alümina nano akışkanı ile 1000 W ısıtma gücünde yaptıkları deneylerde hacimsel partikül konsantrasyonları % 0,5; % 1; % 1,5 ve % 2 olduğunda etkin ısı iletkenlik değerleri sırasıyla % 66,6; % 133,3; % 166,6 ve % 183,3 oranlarında artırılmıştır. Shuoman ve arkadaşları, kararlı hal koşullarında % 2 partikül konsantrasyonlu alümina nano akışkanı kullanıldığında ısı borusunun ortalama ısı transfer katsayısının 90 kW/m²C'tan 300 kW/m²C'a yükseldiğini gözlemlemiştir [45].

Somasri ve Meena (2021) yapmış oldukları deneysel çalışmada kapalı çevrim titreşimli çek valfli ısı borusunda titanyum di oksit kullanımının ısı performansına etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada 60 °C ile 80 °C arasında değişen sıcaklıklarda ve 0 ° ile 45 ° arasında değişen eğim açılarında deneyler yapılmıştır. Somasri ve Meena çalışma akışkanı olarak titanyum di oksit kullandıkları, 80 °C çalışma sıcaklığı ve 45 ° eğim açısında yaptıkları deneyde en yüksek ısı transferine 297,76 W, en yüksek ısı akısına 2887,09 W/m², en yüksek ısı transfer

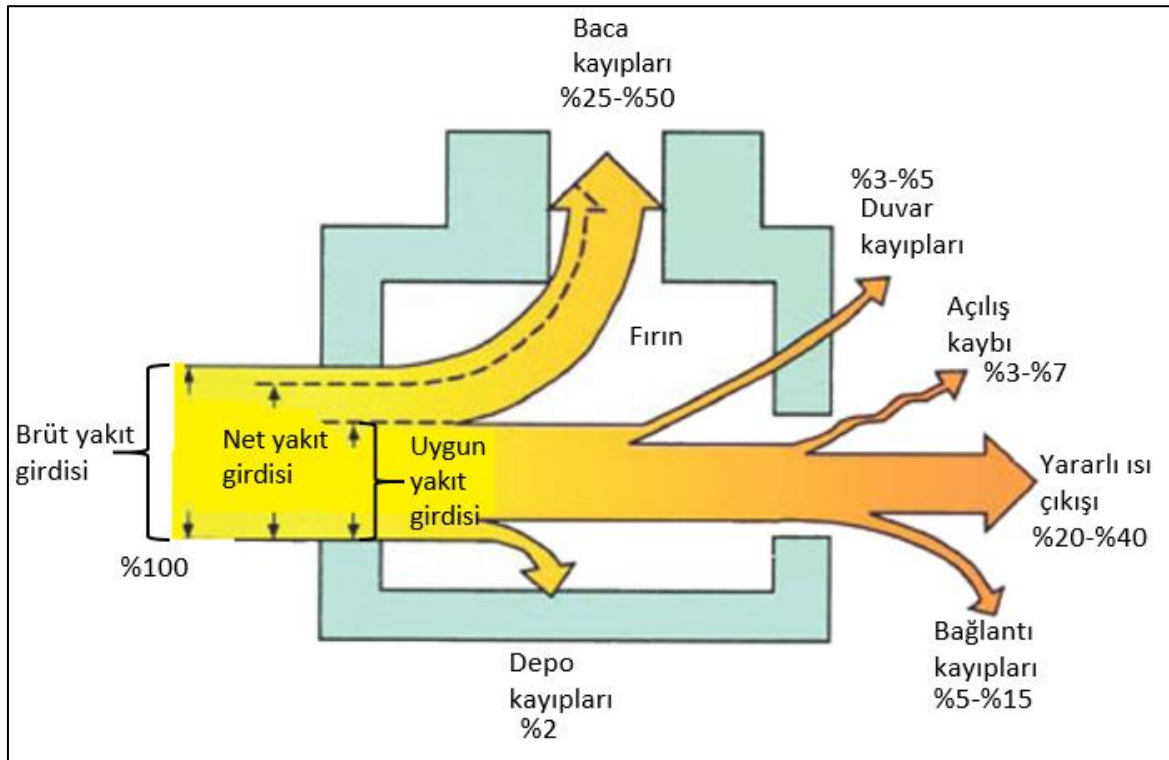
katsayısına $1547,53 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, en yüksek ısı verime 0,17 ve en düşük ısı dirence $0,26 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ olarak ulaşmışlardır [46].





3. ATIK ISI GERİ KAZANIM SİSTEMLERİ

Endüstride birçok uygulamada ısı enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Isının kullanıldığı proseslerde ısı kayıplarının olması kaçınılmazdır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi endüstriyel ısıtma proseslerinde geri kazanılma potansiyeli olan fazla miktarda ısı kayıpları söz konusudur.



Şekil 3.1. Endüstriyel uygulamalarda meydana gelen ısı kayıpları [47]

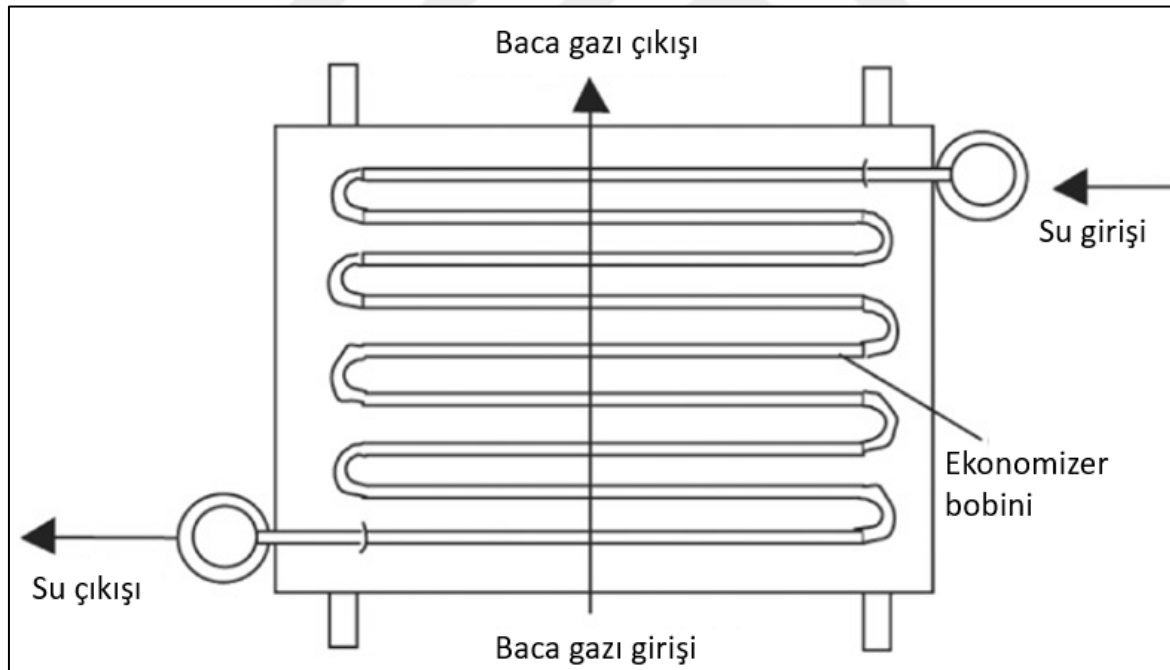
Atık ısı endüstriyel işlemlerde üretilen, pratik bir kullanıma sokulmayan ve çevreye atılan enerjidir [4]. Bu enerji sıvı ya da gaz fazında bir akışkan vasıtasıyla çevreye atılmaktadır. Söz konusu akışkanların sıcaklıkları atmosfer sıcaklığından daha yüksektir. Bu sıcaklık ne kadar yüksekse geri kazanılma potansiyeli de o kadar yüksektir. Atık ısının geri kazanılması hem ekonomik olarak hem de çevresel olarak büyük önem arz etmektedir.

Atık ısının geri kazanılmasında ısı-ısı, ısı-iş ve ısı-güç olmak üzere 3 temel yaklaşımdan söz edilebilir. Isı-ısı geri kazanımı yaklaşımı basittir ve basit ısı değiştiriciler ile kolayca gerçekleştirilerek yüksek geri kazanım verimliliği sağlamaktadır. İkinci yaklaşımdaki iş, mekanik enerjiyi kast etmekte olup Rankine ya da Kalina çevrimleri gibi Carnot çevriminden dönüştürülen geleneksel çevrimler vasıtasıyla uygulanmaktadır. Üçüncü yaklaşım ise ısının,

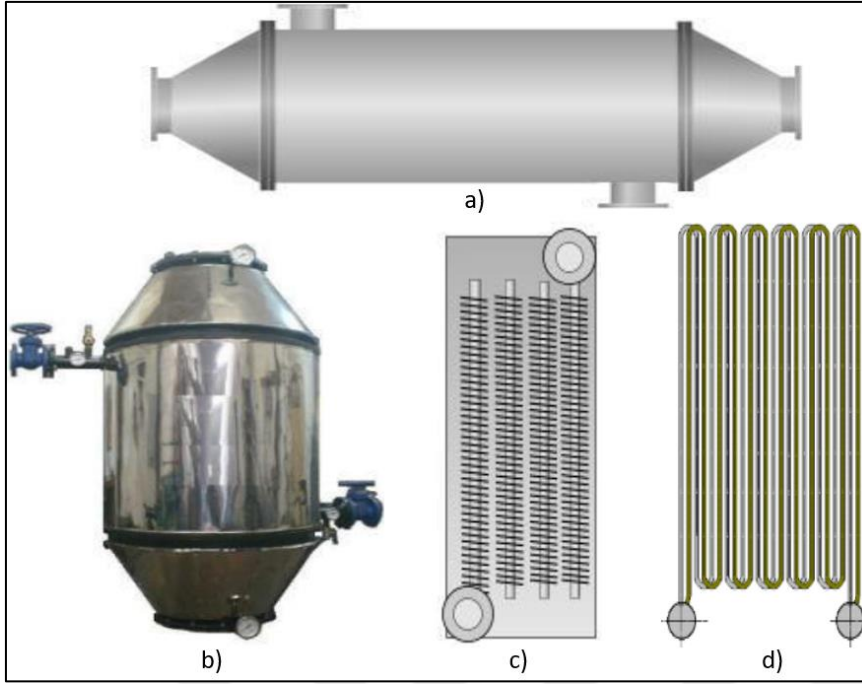
yüksek kalitede ve sıklıkla kullanılan elektrik enerjisi gibi enerjilere dönüştürülmesidir [48]. Bu kısımda yukarıda bahsedilen ısı-ısı yaklaşımı olan akışkanlar arasındaki ısı transferi prensibine dayanan ısı geri kazanım ünitelerinden bahsedilmiştir.

3.1. Ekonomizerler

Ekonomizerler, kazanlarda yanma sonucu meydana gelen ve bacadan atmosfere atılacak olan yüksek sıcaklıktaki atık gazın sahip olduğu ısı enerjisinin bir kısmının kazanda dolaşan su ya da havaya aktararak geri kazanıldığı ve böylece kazan veriminin artırılmasını sağlayan makinelerdir [49]. Ekonomizerler yardımıyla baca gazı sıcaklığının her 5°C azaltılması verimde %1 civarında bir artış olarak karşımıza çıkmaktadır. Cihaz %5- %10 seviyesinde bir yakıt tasarrufu sağlayarak geri ödeme süresinin 2 yılı aşmayacağı yapılan çalışmalarla belirlenmiştir [50]. Şekil 3.2’de bir ekonomizerdeki akışkan akımları, Şekil 3.3’de ise çeşitli uygulamalarda kullanılan ekonomizer çeşitleri görülmektedir.



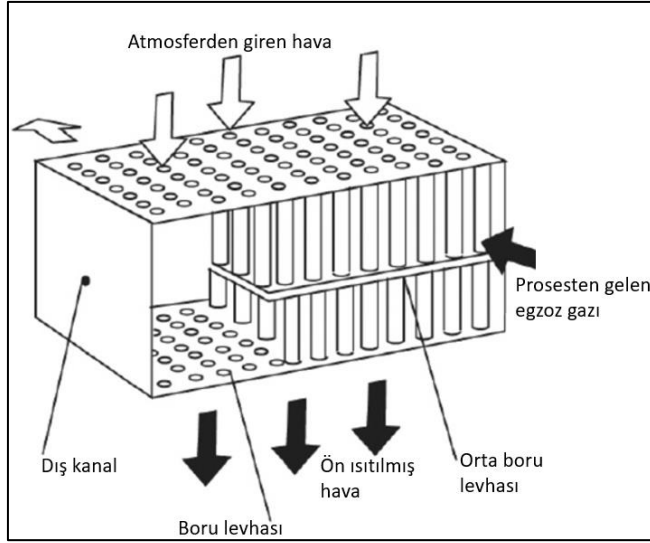
Şekil 3.2. Ekonomizerdeki akışkan akımları [47]



Şekil 3.3. Çeşitli ekonomizer türleri a) duman borulu, b) helezon ve spiral borulu, c) kanatlı borulu, d) düz veya firkete borulu [50]

3.2. Reküperatörler

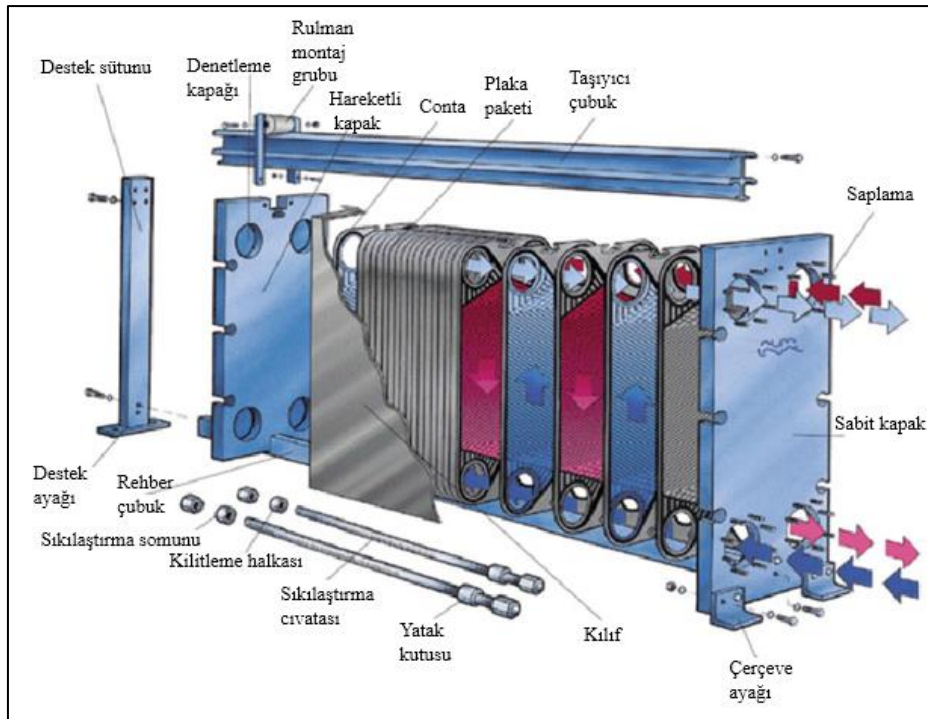
Reküperatörler uygulama alanlarına göre genellikle metalik ya da seramik malzemeden yapılmış bir ısı değiştirici ünitesidir. Orta ve yüksek sıcaklıktaki egzoz gazlarından ısı geri kazanımı sağlar [4]. Bu ekipmanlar yanma havasının yanmaya gitmeden önce ön ısıtmasının yapılması amacıyla kullanılmaktadır. Metalik ısıtım reküperatörü, konvektif reküperatör, hibrit reküperatör ve seramik reküperatör gibi reküperatör çeşitleri mevcuttur [47]. Şekil 3.4'te atık ısı geri kazanımında kullanılan bir reküperatör görülmektedir.



Şekil 3.4. Atık ısı geri kazanım reküperatörü [47]

3.3. Plakalı Isı Değiştiriciler

Plakalı ısı değiştiriciler bir akışkandan diğer bir akışkana ısı transferi sağlamak için kullanılırlar. Bu ısı değiştiriciler paralel olarak istiflenmiş, kaynatılmış ve çukur metalik bir kabın içine yerleştirilmiş birkaç plakadan oluşur [4]. Contalı tip bir plakalı ısı değiştiricinin içyapısı ve parçaları Şekil 3.5'te görülmektedir.



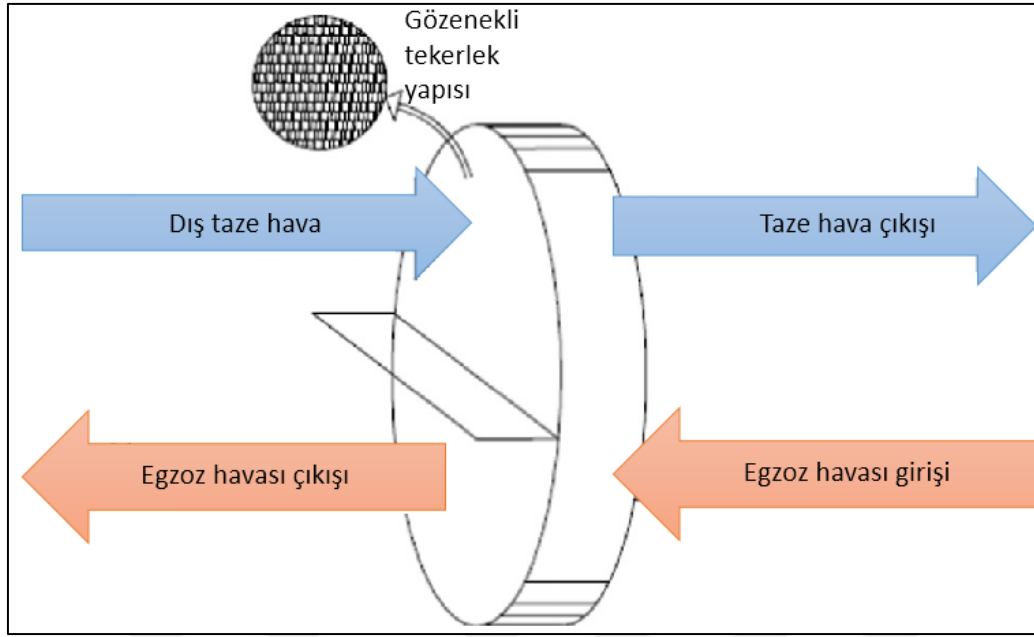
Şekil 3.5. Plakalı ısı değiştirici (contalı) [51]

Plakalı ısı değıştircilerin sahip olduğu avantajlar řu şekilde sıralanabilir [52].

- Plakaların yüzey dalgaları çeşitli mekanizmalar (girdap ve vorteks akımı, sınır çizgilerinin bozulması ve yeniden bağlanması, küçük hidrolik çap akış geçişleri artırılmış etkin ısı transfer alanı) sayesinde iyileştirilmiş ısı transferi sağlar
- Yüksek ısı transfer katsayıları sayesinde çok daha küçük boyutlara sahiptir
- Yüksek ısı transfer katsayısı ve doğru karşıt akış planı sayesinde çok yakın sıcaklık yaklaşımlarında çalışabilir
- Yüksek viskoziteyle akışkanlar için oldukça uygundur.
- Contalı tip plakalı ısı değıştircilerin sökölüp takılması kolaydır. Bu sayede bakımları, temizliğı ve conta değışimi rahatlıkla yapılmaktadır
- Aynı üniteye 2 ya da daha fazla akışkanın ısıtılması ve soğutulması mümkündür.

3.4. Isı Tekerleğı

Döner ısı tekerleğı mekanik bir ısı geri kazanım ekipmanıdır. Döner gözenekli metal bir tekerlek ısıyı bir hava akımından diğerine her akış ile dönüşümlü bir şekilde etkileşim yaparak aktarır [53]. Bu sistemde sıcak ve soğuk akışları içeren iki paralel kanal, yüksek termal kapasiteli bir malzemeden yapılmış bir döner disk veya ısı tekerleğı üzerine yerleştirilir. Tekerlek sıcak kanaldan ısı alır ve depolar. Daha sonra döner ve aldığı ısıyı soğuk kanaldan akan havaya aktarır. Isı tekerleğı orta seviyede sıcaklıklarda çalışmaya daha uygundur. Bunun sebebi yapısal gerilmeler ve iki kanal arasındaki yüksek sıcaklık farkından oluşabilecek aşırı genleşme ve deformasyonlardır. Sistemin en büyük dezavantajı sıcak ve soğuk havanın birbirine karışma durumudur [4]. Sıcak gaz ve soğuk hava arasında duyulur ısı transferi %85 civarında bir ortalama verim ile aktarılabilmektedir [47]. Şekil 3.6'da ısı tekerleğinin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmiştir.



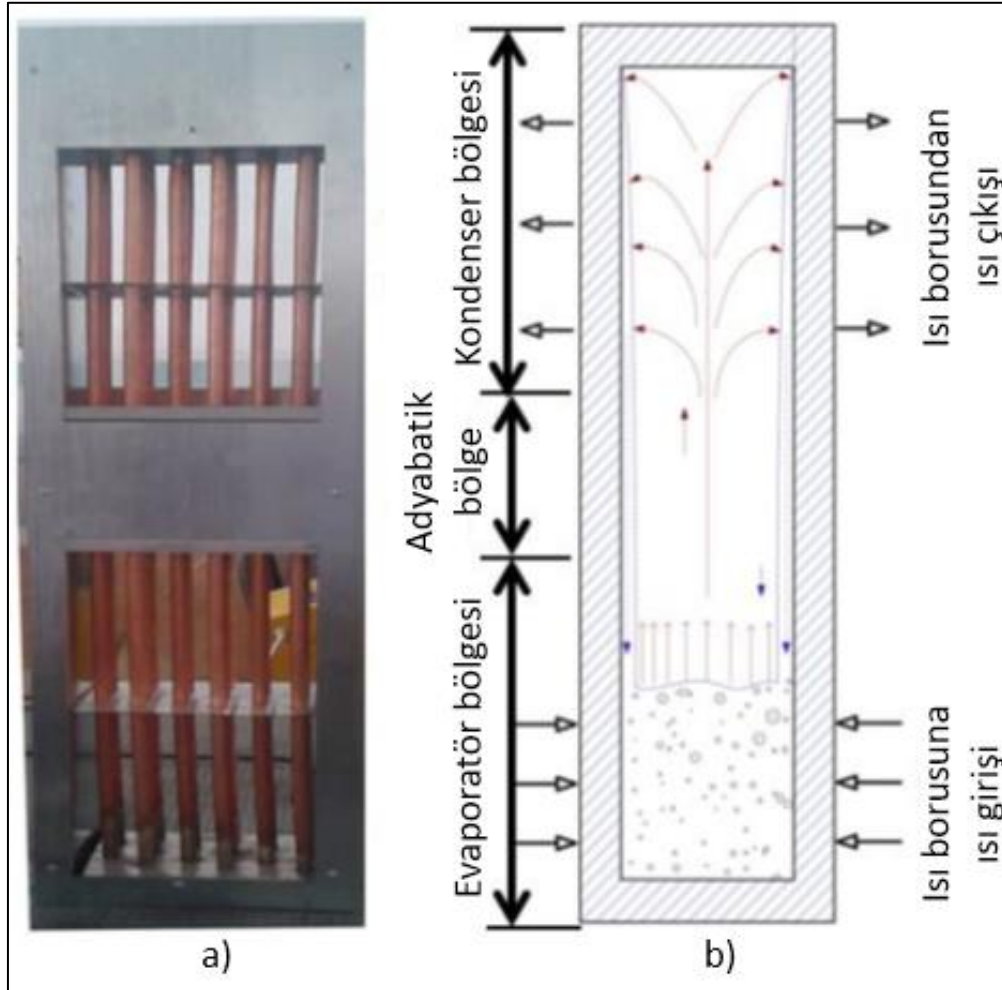
Şekil 3.6. Isı tekerleğinin çalışma prensibi [53]

3.5. Isı Borulu Isı Değiştiriciler

Isı borulu ısı değiştiriciler, üst üste (termosifon uygulamaları) ya da yan yana (fitilli ısı borusu uygulamaları) yerleştirilmiş iki hava kanalı ve bu hava kanallarının ortasında yer alan bir ısı borusu grubundan oluşmaktadır. Bu ısı borusu grubundaki boru sayısı sistemin tasarımına göre farklılık gösterebilmektedir. Kanal içine sabit bir şekilde yerleştirilen boruların sıcak kanal tarafında kalan kısmı evaporatör, soğuk kanal tarafında kalan kısmı da kondenser olarak isimlendirilir. Evaporatör ve kondenser arasında ısı transferinin olmadığı kısım da adyabatik bölgedir.

Sistemin çalışması, ısı boruları içerisine şarj edilen çalışma akışkanının buharlaşıp yoğunlaşması prensibine dayanmaktadır. Evaporatör kısmından geçmekte olan sıcak atık gazın enerjisiyle ısı borusu içindeki akışkan buharlaşarak kondenser kısmına geçer. Burada soğuk taze havayla karşılaşan gaz fazındaki akışkan, enerjisini havaya aktararak yoğunlaşır ve evaporatör kısmına geri döner. Burada evaporatörün ısıtılması kadar kondenserin soğutulması da önem arz etmektedir. Çünkü evaporatör yeterince ısıtılmadığı zaman buharlaşmanın olmayacağı gibi, eğer kondenser yeteri kadar soğutulamazsa yoğunlaşma olmayacak ve dolayısıyla ısı boruları düzgün çalışmayacağı için sistemden verim alınamayacaktır. Bu sistemde dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da ısı borularının vakumlanmasıdır. Isı boruları içindeki vakumlu ortam sayesinde akışkan atmosfer

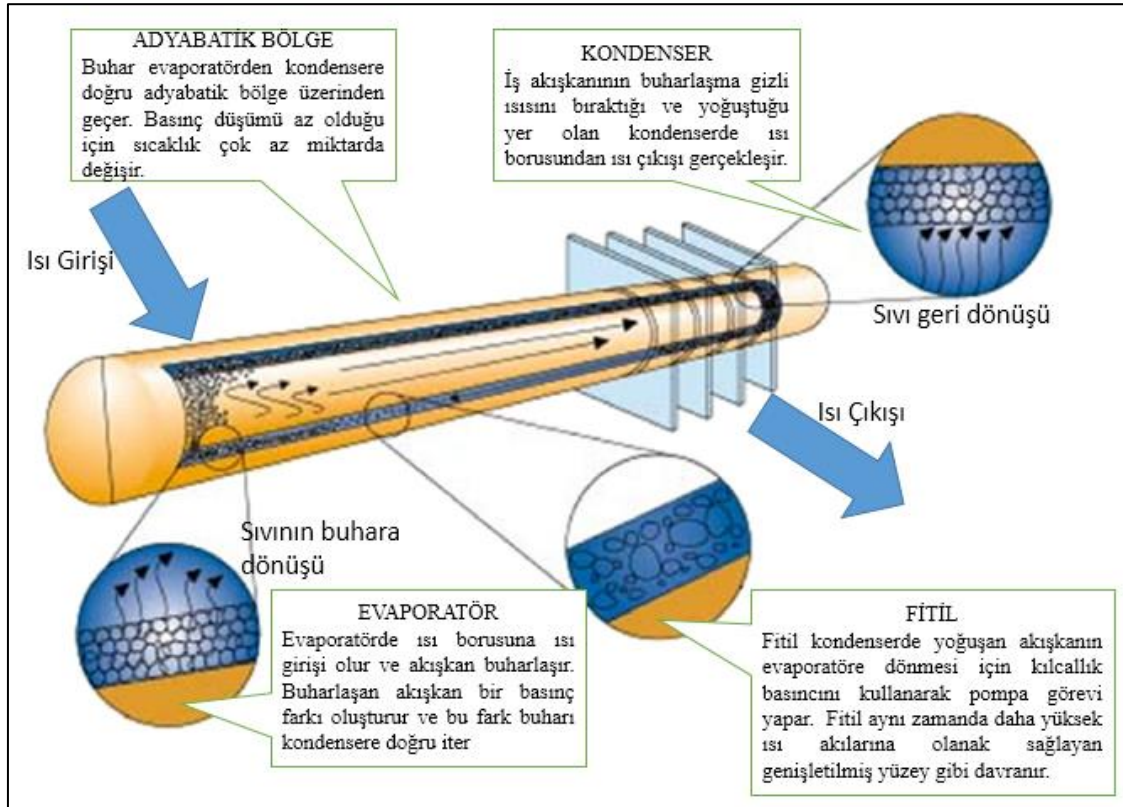
basıncındaki kaynama sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta kaynamaktadır. Vakum olmadığı takdirde ısı boruları düzgün çalışmayacaktır. Şekil 3.7’de ısı borulu havadan havaya bir ısı değiştiricisinde kullanılan ısı borusu grubu (a) ve tek bir ısı borusunun kısımları ile ısı giriş çıkışları (b) görülmektedir.



Şekil 3.7. a) ısı borusu grubu, b) Bir ısı borusunun kısımları [54]

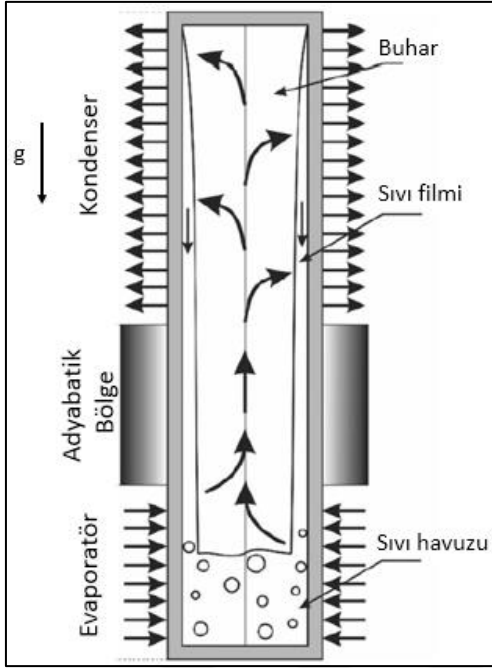


Isı boruları üç kısımdan oluşur. Bu kısımlar evaporatör, adyabatik bölge ve kondenser olarak adlandırılır. Evaporatör kısmında, akışkan ısı alarak buharlaşır ve oluşan basınç farkından dolayı buhar kondenser bölgesine doğru hareket eder. Kondenser bölgesinde ısınıyı bırakan buhar yoğunlaşarak ısı borusunun iç kısmındaki fitil üzerinden kılcallık etkisiyle evaporatör bölgesine geri döner (Şekil 4.2). Bu çevrim evaporatör ve kondenser bölgeleri yeteri kadar ısıtılıp soğutulduğu sürece devam eder.



Şekil 4.2. Isı borusunun farklı bölgelerinde meydana gelen ısı transfer olayları [61]

Yaygın olarak kullanılan ısı borusu tiplerinden biri de klasik ısı borularına oldukça benzeyen termosifonlardır. Termosifonların çalışma prensibi Şekil 4.3' de görülmektedir. Termosifon ile klasik ısı borusu arasındaki fark borunun iç yüzeyindeki fitilin olmamasıdır. Termosifonlarda kondenser kısmında yoğunlaşan buharın geri dönüşünde yer çekimi kuvveti etkilidir.



Şekil 4.3. Termosifon çalışma prensibi [60]

4.1.1. Isı borularının bileşenleri

Isı borularının üç temel bileşeni aşağıdaki şekilde sıralanabilir [62];

- Çalışma akışkanı
- Boru malzemesi
- Fıtıl ya da kılcallık yapısı (Klasik ısı boruları için)

Çalışma akışkanının ve boru malzemesinin seçimi klasik ısı boruları ve termosifonlar için en kritik adımlardan biridir. Öncelikli olarak çalışma akışkanı çalışma sıcaklığına göre seçilir. Boru malzemesi de çalışma sıvısı ve çevre ile uyumlu olacak şekilde seçilir. Geometri, güvenilirlik ve güvenlik konuları da ayrıca dikkate alınmalıdır [60].

Çalışma akışkanı

Çalışma akışkanının belirlenmesinde dikkate alınması gereken ilk parametre çalışma buharı sıcaklık aralığıdır. Belirlenen bir sıcaklık aralığında birkaç akışkan uygun olabilir [62]. Çizelge 4.1’ de bazı akışkanların ısı borusundaki çalışma aralıkları verilmiştir.

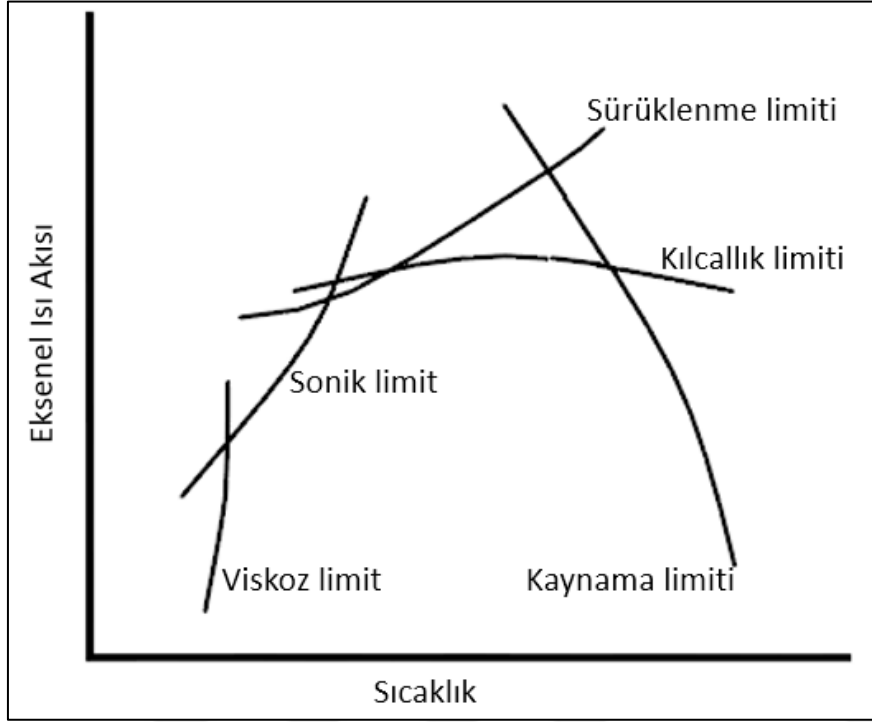
Çizelge 4.1. Bazı akışkanların ısı borusunda uygun çalışma aralıkları [62]

Akışkan	Erime Noktası (°C)	Atmosfer Basıncındaki Kaynama Noktası (°C)	Uygun Aralık (°C)
Helyum	-271	-261	-271-(-269)
Azot	-210	-196	-203-(-160)
Amonyak	-78	-33	-60-100
Pentan	-130	28	-20-120
Aseton	-95	57	0-120
Metanol	-98	64	10-130
Flutec PP2 ¹	-50	76	10-160
Etanol	-112	78	0-130
Heptan	-90	98	0-150
Su	0	100	30-200
Toluen	-95	110	50-200
Flutec PP9 ¹	-70	160	0-225
Thermex ²	12	257	150-350
Cıva	-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

Doğru bir çalışma akışkanı belirlemek için bazı özelliklerin incelenmesi gerekmektedir;

- Fitol ve boru malzemesi ile uyumluluk
- İyi ısı stabilite
- Fitol ve boru malzemelerinin ıslanabilirliği
- Çalışma sıcaklığı aralığının üzerinde, buhar basıncının çok yüksek ya da düşük olmaması
- Yüksek gizli ısı
- Yüksek ısı iletkenlik
- Düşük sıvı ve buhar viskoziteleri
- Yüksek yüzey gerilimi
- Kabul edilebilir donma ya da akma noktası

Akışkan seçiminde yukardaki özelliklerin yanı sıra termodinamik olarak hesaba katılması gereken Şekil 4.4’de görülen viskoz, sonik, kaynama, kılcallık ve sürüklenme (taşma) gibi bazı sınırlamalar vardır [61].



Şekil 4.4. Bir ısı borusunda ısı transfer limitleri [59]

İş akışkanlarını hızlı bir şekilde karşılaştırmak için Merit sayısı kullanılabilir. Klasik ısı borusu ve termosifon için merit sayısının hesaplanmasında küçük farklılıklar vardır. Termosifon ve klasik ısı borusu merit sayıları sırası ile denklem 4.1 ve denklem 4.2 yardımıyla bulunur [60].

$$M_t = \left(\frac{hk^3 \rho^2}{\mu} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.1)$$

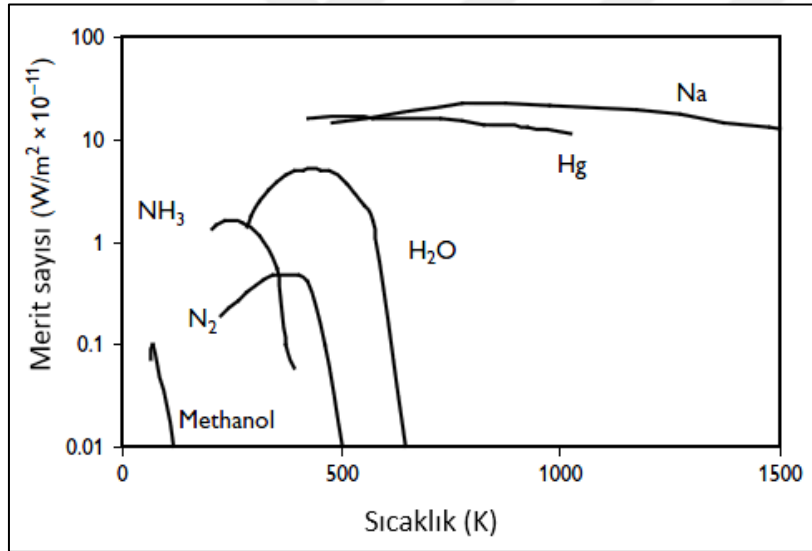
Burada h sıvının buharlaşma entalpisi, k ısı iletim katsayısı, ρ yoğunluk ve μ viskozite değerleridir. Buradaki merit sayısının birimi ise $\frac{kg}{(K)^{\frac{3}{4}}(s)^{\frac{5}{2}}}$ ’dir. Bazı akışkanların maksimum merit sayıları Çizelge 4.2’ de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Bazı akışkanların maksimum termosifon merit sayıları [59]

Akışkan	Sıcaklık(°C)	Maksimum merit sayısı ($\text{kg/K}^{3/4}\text{s}^{5/2}$)
Su	180	7542
Amonyak	-40	4790
Metanol	145	1948
Aseton	0	1460
Toluen	50	1055

$$M_{tb} = \frac{\rho \sigma h}{\mu} \quad (4.2)$$

Burada h sıvının buharlaşma entalpisi, σ yüzey gerilimi, ρ yoğunluk ve μ viskozite değerleridir. Buradaki merit sayısının birimi ise W/m^2 'dir. Bazı akışkanların klasik ısı borusundaki merit sayıları Şekil 4.5' de görülmektedir.



Şekil 4.5. Bazı akışkanların klasik ısı borusu merit sayıları [59]

Boru malzemesi

Borunun amacı çalışma akışkanını dış çevreden izole etmektir. Bu nedenle sızdırmaz olmalı, duvarı boyunca olan basınç farkını koruyabilmeli ve çalışma akışkanın ısı transfer mekanizmalarına olanak sağlamalıdır. Isı borusu malzemesinin seçiminde birçok parametre söz konusudur. Bu parametreler aşağıda sıralanmıştır;

- Hem çalışma akışkanına hem de dış ortama uyumluluk

- Sertlik / ağırlık oranı
- Isıl iletkenlik
- Kaynak, işlenebilirlik ve süneklik dahil olmak üzere imalat kolaylığı
- Gözeneklilik
- Islanabilirlik

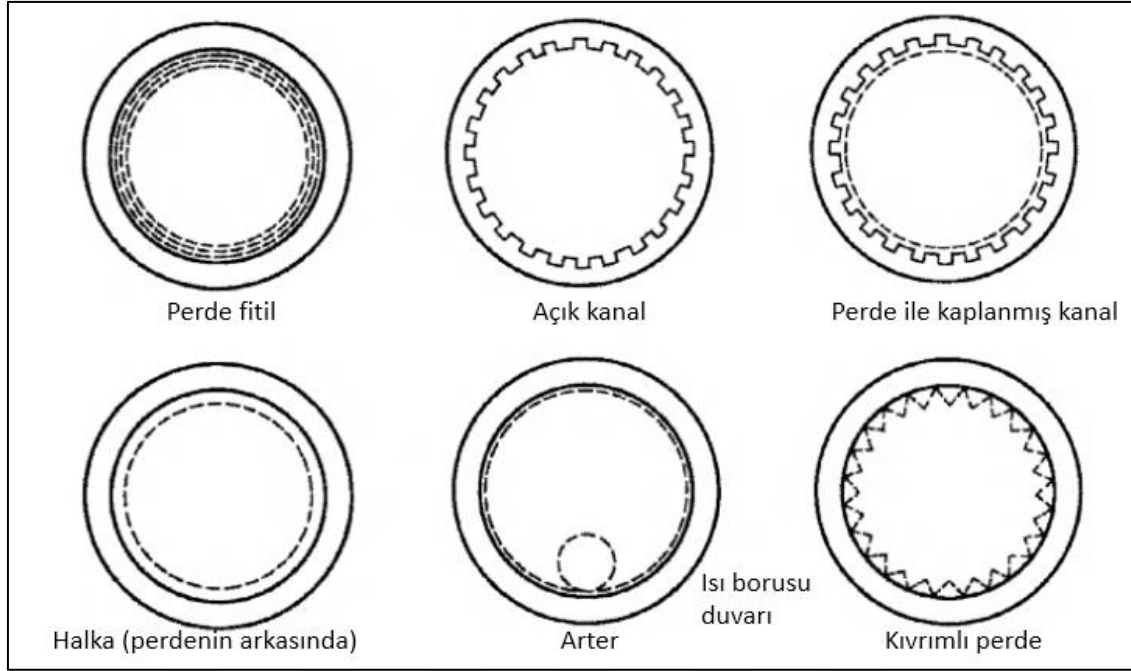
Yukardaki özellikler gayet açıktır. Sertlik/ ağırlık oranının yüksek olması uzay aracı uygulamalarında daha önemli olmaktadır. Buhar difüzyonu için malzeme gözeneksiz olmalıdır. Yüksek ısı iletkenlik ısı kaynağı ve fitil arasında en küçük sıcaklık farkını sağlayacaktır [61]. Bazı boru ve fitil malzemelerinin ısı iletkenlik değerleri Çizelge 4.3’ de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Bazı malzemelerin ısı iletkenlik değerleri [62]

Malzeme	Isıl İletkenlik (W/m°C)
Alüminyum	205
Pirinç	113
Bakır (0- 100 °C)	394
Cam	0,75
Nikel (0-100 °C)	88
Magnezyum	156
Düşük Karbonlu Çelik	45
Paslanmaz Çelik	17,3
Teflon	0,17

Fitil ya da kılcallık yapısı

Fitiller çeşitli gözenek boyutlarında çelik, alüminyum, nikel veya bakır gibi malzemelerden yapılmış gözenekli yapılardır. Metal köpükler veya keçeler kullanılarak imal edilir. Keçe kullanımı daha yaygındır. Seramik gibi lifli malzemeler de fitil üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramikler genellikle daha küçük gözeneklere sahiptir. Seramik liflerinin en büyük dezavantajı, çok az sertliğe sahip olmaları ve genellikle bir metal ağ ile sürekli bir desteğe ihtiyaç duymalarıdır [61]. Isı borularında kullanılan bazı fitillerin kesit görünüşleri Şekil 4.6’ da görülmektedir.



Şekil 4.6. Bazı fitil kesitleri [62]

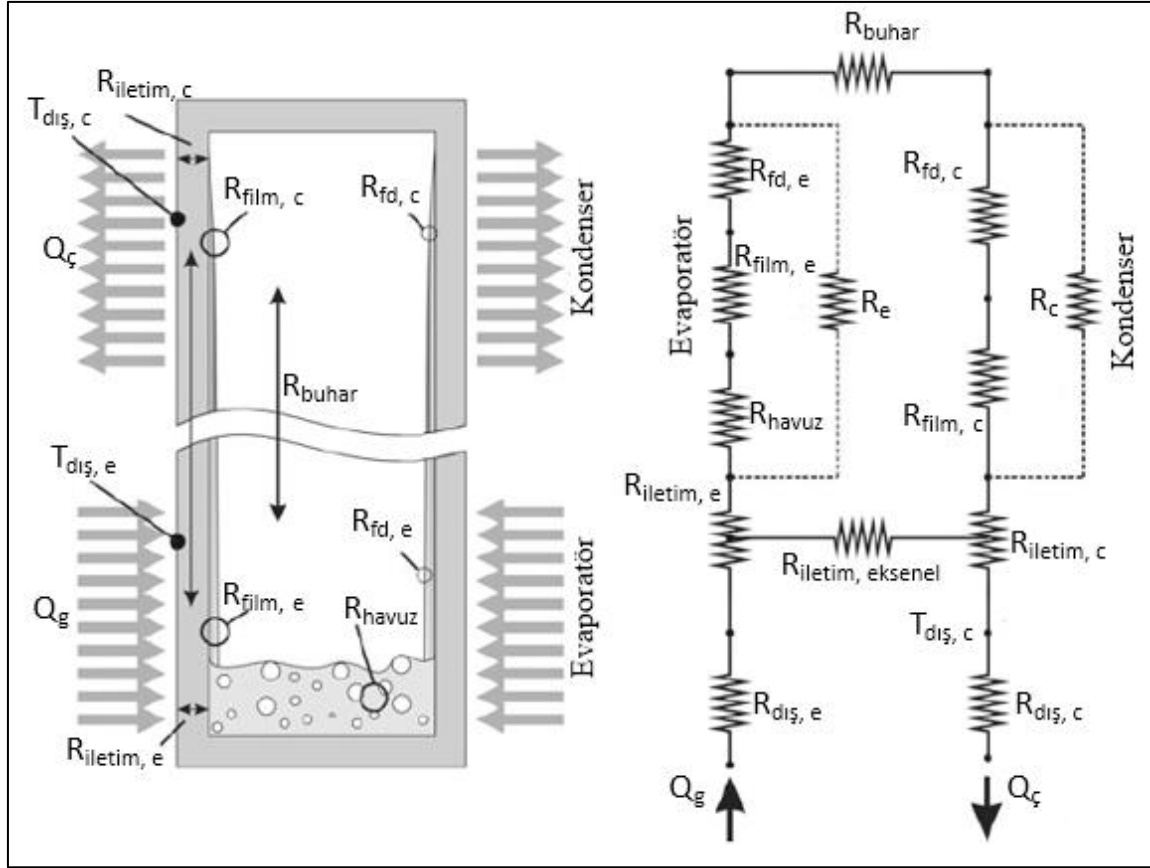
4.1.2. Isı borularının ısı direnç ağları

Isı borularının sıcaklık çalışma seviyeleri aslında ısı taşıma kapasitesinin bir sonucudur. Bu ifadenin tersi de doğrudur. Sıcaklık farkı ve transfer edilen ısı arasındaki bu ilişki ısı direnç olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (4.3)$$

Diğer ısı uygulamalarda olduğu gibi, elektrik ve ısı devreleri arasındaki paralellik, termosifonlar için bir modelleme aracı olarak kullanılabilir. Bu teknik, termosifonlarda olduğu gibi tek boyutlu davranış gösteren ve sabit durum koşullarında çalışan cihazlar için çok basit ve güçlü bir tekniktir.

Toplam ısı direnç termosifonun ısı transferine karşı göstermiş olduğu zorluk olarak tanımlanabilir. Sabit miktarda bir ısı için ısı direnç ne kadar büyük olursa sıcaklık farkı da o kadar büyük olur [60]. Termosifonlar için oluşturulan ısı direnç ağı Şekil 4.7' de görülmektedir.



Şekil 4.7. Termosifona ait ısıl direnç ağı [60]

Dış ısıl dirençler

Isı, termosifona evaporatör duvarından girip kondenser duvarından çıkar. Burada gerçekleşen ısı transferi iletim, taşınım, radyasyon, faz değişimi veya bunların birleşimi şeklinde olabilir. Evaporatör ve kondenser bölgelerindeki ısı transfer katsayılarının bilinmesiyle dış ısıl dirençler denklem 4.4 ve 4.5 ile hesaplanabilir [60].

$$R_{dış,e} = \frac{1}{h_{dış,e} A_e} \quad (4.4)$$

$$R_{dış,c} = \frac{1}{h_{dış,c} A_c} \quad (4.5)$$

Burada $h_{dış,e}$ ve $h_{dış,c}$ sırasıyla evaporatör ve kondenser bölgeleri ısı transfer katsayılarıdır. A_e ve A_c sırasıyla evaporatör ve kondenser bölgelerinin yüzey alanlarıdır.

İletim ısıl dirençleri

Isı, evaporatör (ya da kondenser) yüzeyine ulaştığında, ısı borusu malzemesi üzerinde merkeze doğru radyal ve ısı borusu boyu boyunca aksel olarak iletilir. İletim ısıl dirençleri denklem 4.6, 4.7 ve 4.8 yardımıyla bulunabilir.

$$R_{iletim,e} = \frac{\ln\left(\frac{r_{dış}}{r_{iç}}\right)}{2\pi k l_e} \quad (4.6)$$

Burada $R_{iletim,e}$ ısı borusunun evaporatör bölgesindeki radyal iletim direnci, l_e ısı borusunun evaporatör uzunluğu, $r_{dış}$ ve $r_{iç}$ ise sırasıyla ısı borusunun dış ve iç yarıçaplarıdır. Kondenser bölgesinde meydana gelen radyal ısıl direnç de benzer şekilde denklem 4.7 ile bulunur.

$$R_{iletim,c} = \frac{\ln\left(\frac{r_{dış}}{r_{iç}}\right)}{2\pi k l_c} \quad (4.7)$$

$$R_{iletim,eksel} = \frac{l_{et}}{k\pi(r_{dış}^2 - r_{iç}^2)} \quad (4.8)$$

Burada l_{et} etkin ısı borusu boyudur. Borularda aksel direnç radyal dirençten 3 kat kadar daha büyüktür. Bu yüzden burada aksel yönde iletilen ısı miktarı radyal yöndekine göre çok düşüktür ve ihmal edilebilir. Dolayısıyla aksel direnç, direnç açısından çıkarılabilir [60].

Evaporatör havuzu ve film ısıl dirençleri

Evaporatör havuzunda, evaporatör iç yüzeyinde ve kondenser iç yüzeyinde oluşan film ısıl dirençleri R_{havuz} ve $R_{film,e}$ ve $R_{film,c}$ değerleri ısı transfer katsayılarının (h_{havuz} , $h_{film,e}$ ve $h_{film,c}$) bilinmesiyle denklem 4.4 ve 4.5'teki gibi hesaplanabilir.

Faz değişimi ve buhar ısıl dirençleri

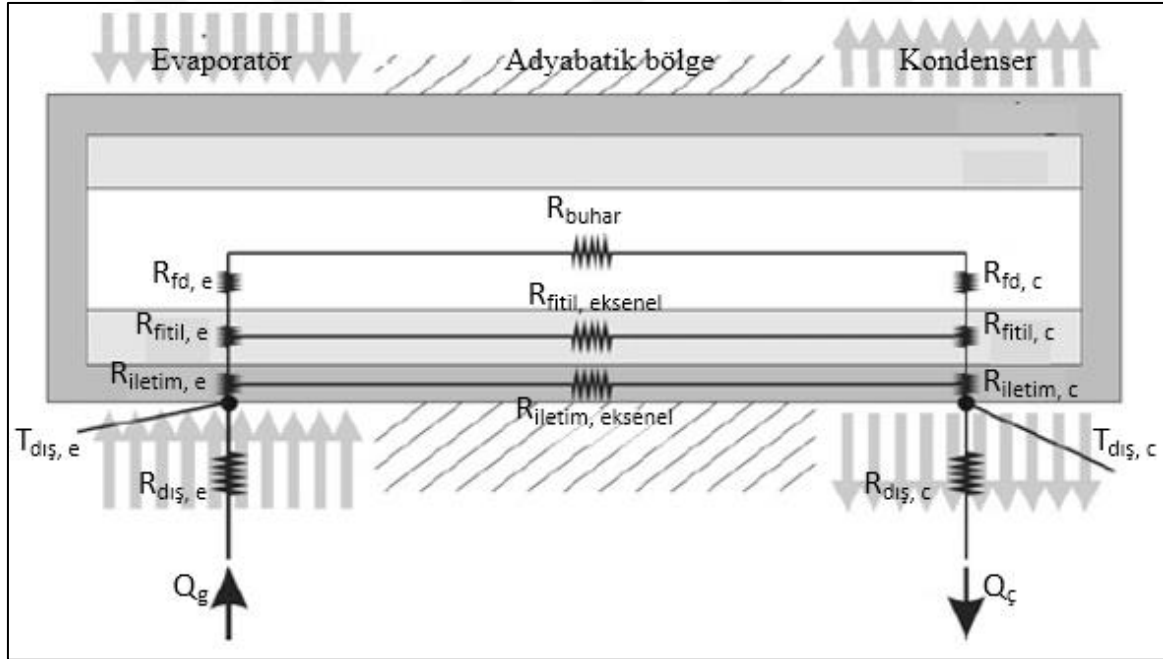
Termosifonlarda buharlaşma ve yoğuşma olaylarıyla ilişkili olan sıvı-buhar ara yüzünde meydana gelen ısıl dirençler $R_{fd,e}$ ve $R_{fd,c}$ çok küçük değerlere sahip olup ($\approx 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/W}$) genellikle ihmal edilir. Buharın yer değiştirmesiyle ilişkili olan ısıl direnç değeri de oldukça

düşüktür. ($\approx 10^{-8}$ °C/W). Dolayısıyla bu üç direnç değeri toplam ısı direnç tahmininde çok küçük hatalar ile ısı direnç ağından çıkarılabilir [60].

Toplam ısı direnç

Toplam ısı direnç ağıdaki ısı dirençlerin toplamı olarak elde edilebilir. Toplam ısı direncin bulunmasında faz değişiminden, buhar akışından ve ısı borusunda eksenel yönde oluşan ısı dirençler hesaba katılmayıp, evaporatör ve kondenser bölgelerinde radyal yönde oluşan ısı dirençler eşit kabul edilirse denklem 4.9 elde edilir.

$$R_T = R_{dış,e} + 2R_{iletim} + R_e + R_c + R_{dış,c} \quad (4.9)$$



Şekil 4.8. Klasik ısı borusuna ait ısı direnç ağı [60]

Klasik ısı borusunda oluşan ısı dirençler Şekil 4.8’ de görülmektedir. Termosifonlarda olduğu gibi burada da faz değişimi, buhar akışı ve eksenel iletimlerden kaynaklanan ısı dirençler ihmal edilip diğer değerler aynı şekilde hesaplanmaktadır. Fitol yapısında meydana gelen eksenel ve radyal dirençler de aynı şekilde hesaplanmaktadır. Ancak hesaba katılacak olan ısı iletim katsayıları fitil malzemesi ve çalışma akışkanı dikkate alınarak Çizelge 4.4 ‘ten yararlanılarak hesaplanabilir.

Çizelge 4.4. Bazı fitil yapılarının etkin ısı iletkenlikleri [60]

Fitil Yapısı	Etkin k Değeri
Gözenekli ortam ve sıvı (seri)	$\frac{k_{sıvı}k_{fitil}}{\varepsilon k_{fitil} + (1 - \varepsilon)k_{sıvı}}$
Gözenekli ortam ve sıvı (paralel)	$\varepsilon k_{fitil} + (1 - \varepsilon)k_{sıvı}$
Üst üste kablo koyulmuş perde	$\frac{k_{sıvı}[(k_{sıvı} + k_{fitil}) - (1 - \varepsilon)(k_{sıvı} - k_{fitil})]}{(k_{sıvı} + k_{fitil}) + (1 - \varepsilon)(k_{sıvı} - k_{fitil})}$
Paketli küre	$\frac{k_{sıvı}[(2k_{sıvı} + k_{fitil}) - 2(1 - \varepsilon)(k_{sıvı} - k_{fitil})]}{(2k_{sıvı} + k_{fitil}) + (1 - \varepsilon)(k_{sıvı} - k_{fitil})}$
Dikdörtgen oluk	$\frac{w_f k_{sıvı} k_{fitil} h + w k_{sıvı} (0.185 w_f k_{fitil} + h k_{sıvı})}{(w + w_f)(0.185 w_f k_{fitil} + h k_{sıvı})}$
Dairesel oluk	$\varepsilon k_l + (1 - \varepsilon) \left(\frac{k_{sıvı} k_{fitil} D_g}{0.185 (k_{fitil})(s - w) + k_{sıvı} D_g} \right)$

Burada: $k_{sıvı}$ sıvının ısı iletkenliği, k_{fitil} fitil malzemesinin ısı iletkenliği, w oluk genişliği, w_f oluk kanat kalınlığı (oluklar arasındaki duvarın kalınlığı), h oluk derinliği, s oluklar arasındaki adım, D_g oluk çapıdır.

4.2. Isı Borusu Çeşitleri

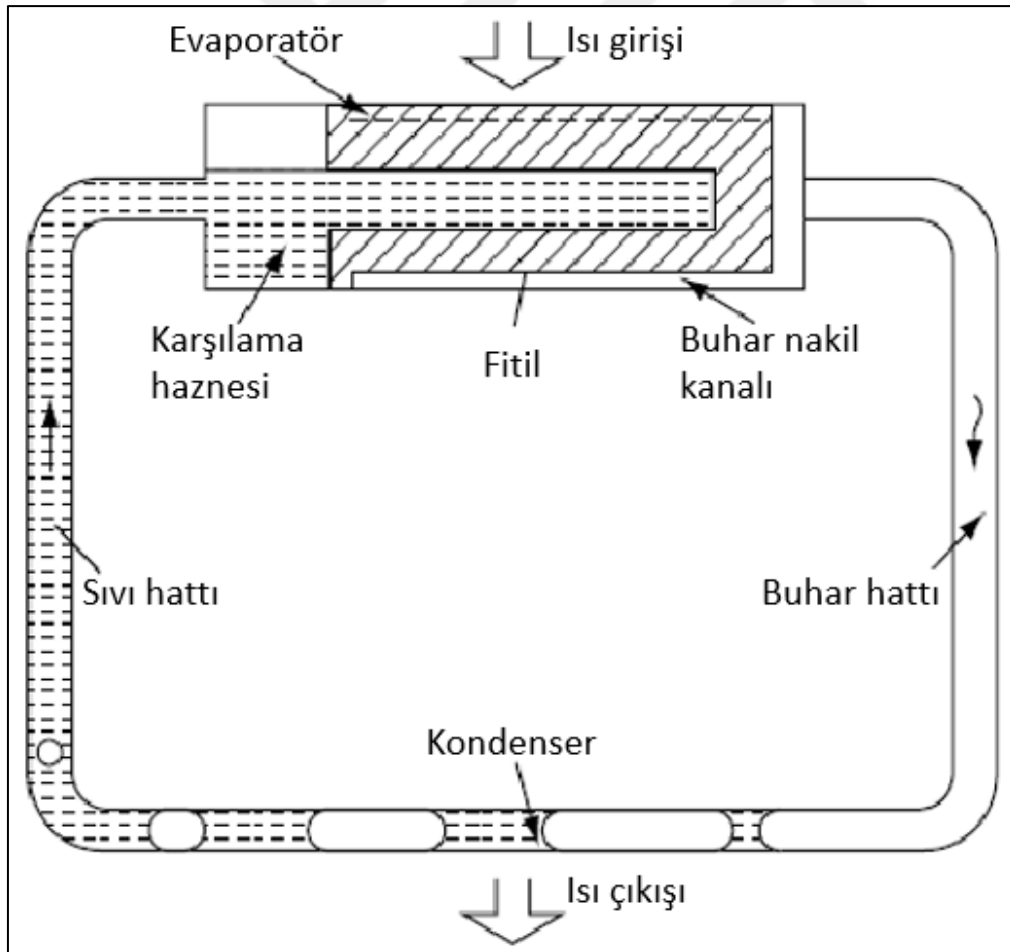
Bazı farklı ısı borusu tipleri Zohuri (2020) tarafından aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- Değişken kondenserli ısı borusu
- Isıl diyetler
- Titreşimli ısı boruları
- Çevrimli ısı boruları (kılcallık etkili pompalama)
- Mikro ısı boruları
- Elektro kinetik kuvveti kullananlar
- Çok yönlü tipler
- Soğurmalı ısı boruları
- Manyetik akışkanlı ısı boruları [61]

4.2.1. Çevrimli ısı boruları (kılcallılık etkili pompalama)

Çevrimli ısı boruları tamamen pasiftir. Bükülebilir, esnek ve yönlendirilebilen çift faz ısı transfer cihazlarıdır. Şekil 4.9’da çevrimli ısı borusunun şematik görünümü verilmiştir. Bu tip ısı borularının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [61];

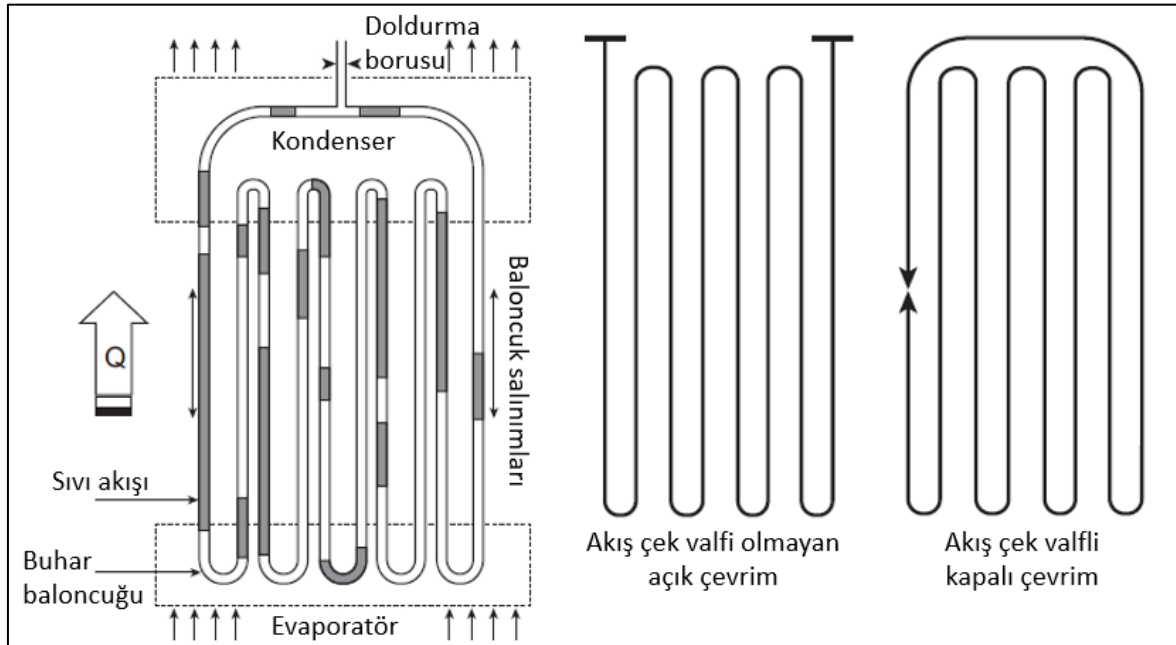
- Tamamen pasif cihazlardır. (Dışardan bir enerji girdisine ihtiyaç yoktur)
- Isıyı 23 m yüksekliğe kadar taşıyabilir.
- Kriyojenik uygulamalardan yüksek sıcaklık uygulamalarına oldukça geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilir.
- Esnektir ve esneme yorulmasına direnci vardır.
- Yerçekimine, şoka, titreşime, donmaya ve çözölmeye karşı dirençlidir.
- Geniş bir ısı yükü aralığına sahiptir.



Şekil 4.9. Çevrimli ısı borusu [59]

4.2.2. Titreşimli ısı boruları

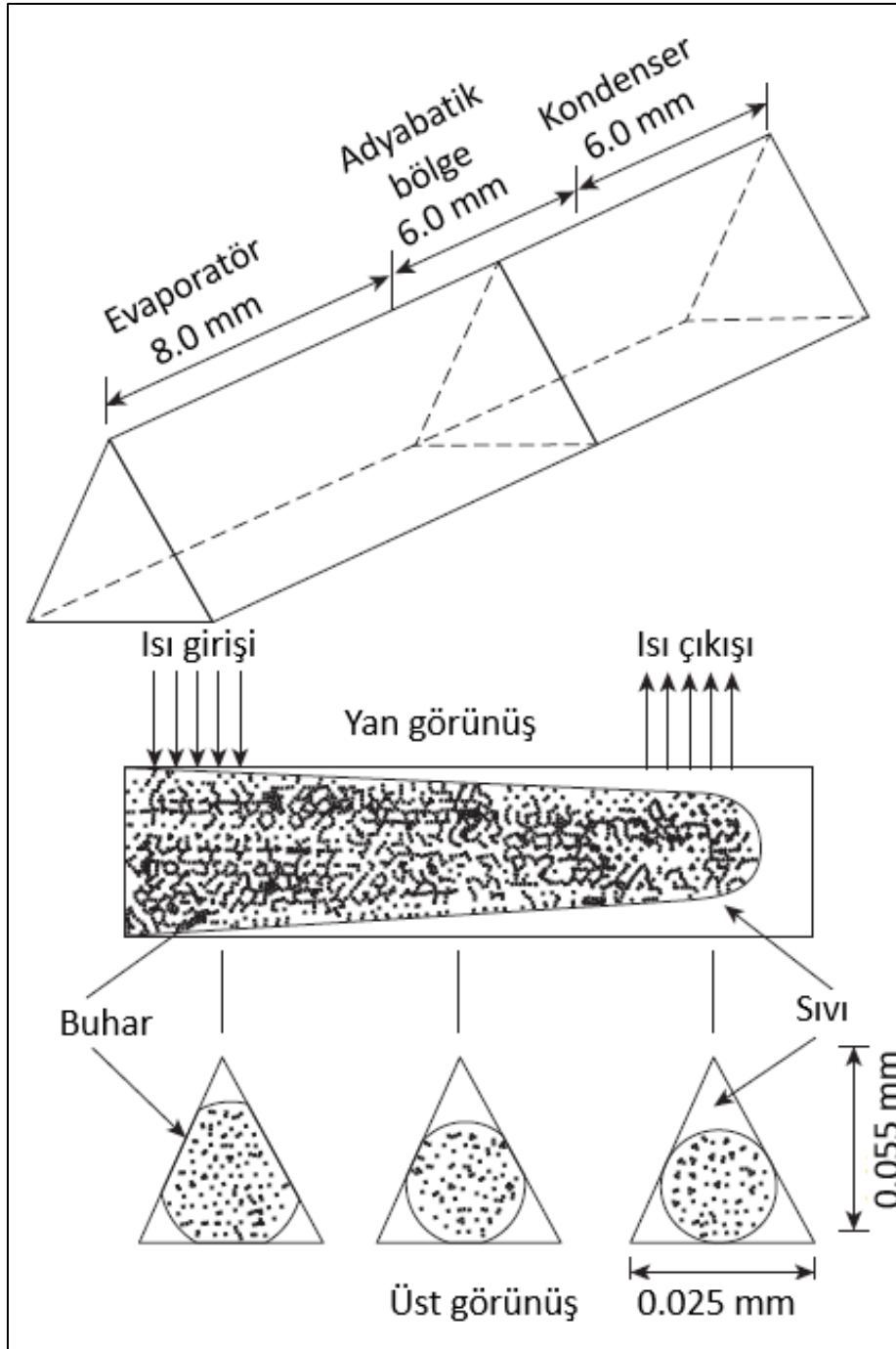
Titreşimli veya salınımlı ısı boruları Şekil 4.10’da görüldüğü gibi, boşaltılmış ve çalışma sıvısı ile kısmen doldurulmuş kılcal çapta bir boru içerir. Kılcal boru veya evaporatör borusunun bir ucu ısıtıldığında, çalışma akışkanı buharlaşır ve buhar basıncını artırır, böylece evaporatör bölgesindeki baloncukların büyümesine neden olur. Bu, sıvıyı kondensere doğru iter. Kondenserin soğutulması, buhar basıncında bir azalmaya ve ısı borusunun bu bölümünde kabarcıkların yoğuşmasına neden olur. Evaporatör ve kondenser bölümündeki kabarcıkların yükselmesi ve çökmesi, boru içinde salınımına sebep olur [61].



Şekil 4.10. Titreşimli ısı borularının şematik gösterimi [61]

4.2.3. Mikro ısı boruları

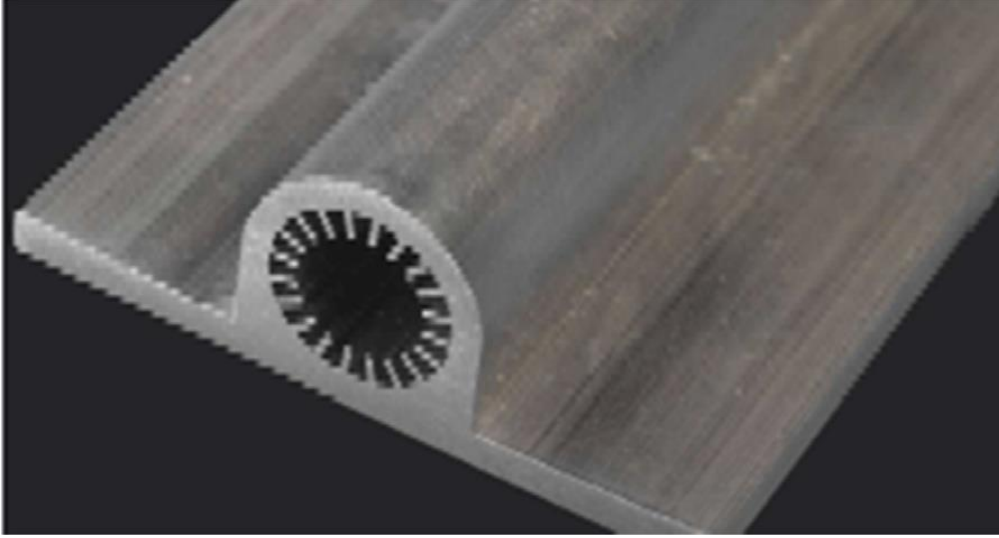
Mikro ısı boruları Şekil 4.11’ de görüldüğü gibi, 100 μ hidrolik çapa ve birkaç cm uzunluğa sahip küçük ölçekli cihazlardır. Bu tip ısı borularında genellikle yoğuşan akışkanın buharlaştırıcı kısmına dönmesine yardımcı olacak fitil yapısı yoktur. Bunun yerine akışkan, ısı borusunun keskin köşelerinde oluşan kılcallık etkisiyle buharlaştırıcı bölgesine geri döner [61].



Şekil 4.11. Mikro ısı borusunun yapısı [61]

4.2.4. Sabit kondenser ısı boruları

Sabit kondenser ısı boruları aynı zamanda sabit iletkenlikli ısı boruları olarak da adlandırılır. Bu tip ısı boruları çok küçük sıcaklık farklarında ısıyı iletebilirler. Şekil 4.12’de görülen aksenal oluklu kılcal fitil yapıları, imalat kolaylığı ve uzay aracı ve aletlerindeki kanıtlanmış geçmişi nedeniyle ısı kontrol uygulamalarındaki kullanılmaktadır.



Şekil 4.12. Sabit kondenser ısı borularının aksenal oluklu fitil yapısı [61]

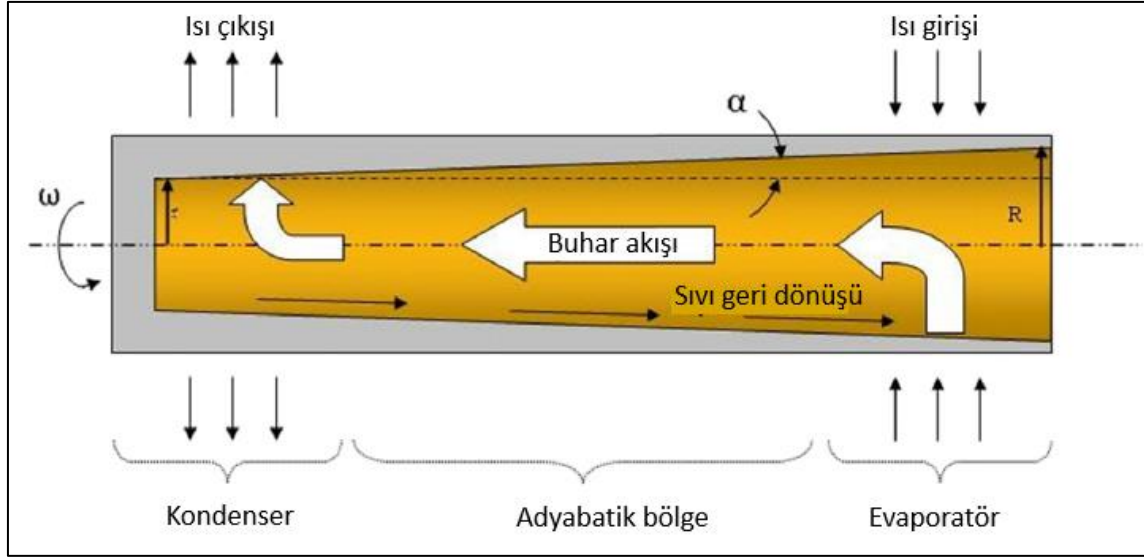
4.2.5. Çeşitli iletkenlikli ısı boruları

Prensip olarak, değişken bir ısı borusu iletkenliği, toplam iletkenliği oluşturan tek tek iletkenlerin herhangi biri veya bir kaçının modülasyonu ile elde edilebilir. Değişken iletkenlik elde etmek için aşağıdaki 4 teknikten söz edilebilir [61];

- Gaz yüklenmiş ısı borusu
- Aşırı sıvı ısı borusu
- Sıvı akışı kontrolü
- Buhar akışı kontrolü

4.2.6. Döner ve dolanımlı ısı boruları

Döner ve dolanımlı ısı borularında yoğunlaşan akışkan merkezkaç kuvveti ile evaporatöre döner ve kılcal fitile gerek yoktur. Bu tip ısı boruları, türbin bileşenlerini ve elektrik motorları için armatürleri soğutmak için kullanılır. Isı borusunun evaporatör iç çapı kondenser iç çapından daha büyüktür ve dolayısıyla ısı borusunun içinde konik bir yapı söz konusudur [61]. (Şekil 4.13)



Şekil 4.13. Döner ısı borusu şematik gösterimi [61]

4.2.7. Yüksek sıcaklık ısı boruları (sıvı metal ısı boruları)

Yüksek sıcaklıklı ısı boruları, okyanus tabanından jeosenkron yörüngeye kadar çok çeşitli uygulamalarda ve çalışma koşullarında kullanılmaktadır. Bu yüksek sıcaklıklı ısı boruları, cam yapımı kadar sıradan, kaya petrolü çıkarma kadar endüstriyel ve epitaksiyel biriktirme kadar yüksek teknolojidir [61].

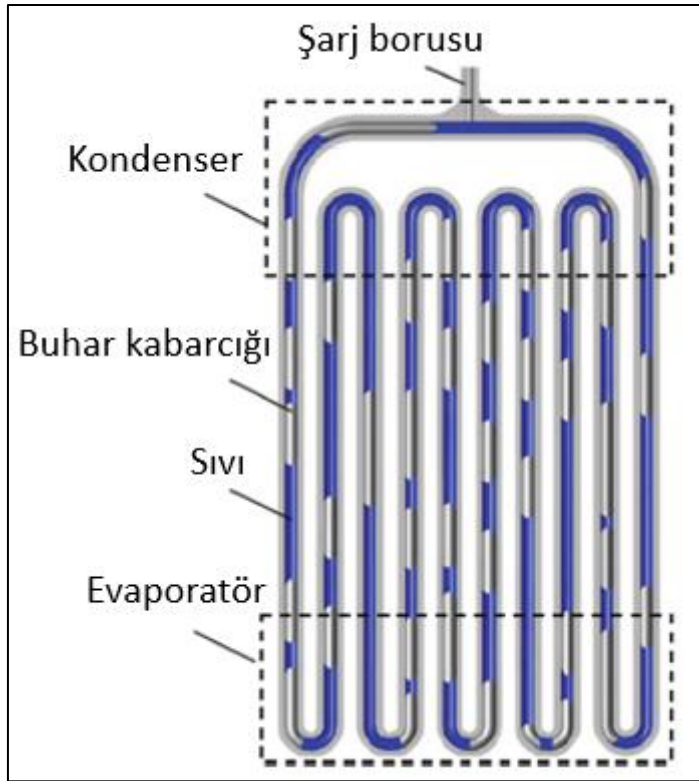
4.2.8. Kriyojenik ısı boruları

Uydu kızılötesi tarama sistemlerinde soğutma detektörlerine ihtiyaç duyulmasıyla, kriyojenik ısı boruları özel ilgi görmeye başladı. Bu ısı borularındaki en yaygın çalışma sıvısı, 77 ve 100K arasındaki sıcaklık aralıkları için kabul edilebilir olan nitrojendir. Bu sıcaklık aralığı için sıvı oksijen de kullanılmaktadır. Kriyojenik ısı borularının çalışma aralığı, kritik ve üçlü noktalar arasındaki nispeten küçük sıcaklık aralığı ile sınırlıdır. Bu nedenle, kriyojenik bir ısı borusunun fitili, oldukça etkili ısıl iletkenliğe ve borunun iç duvarı ile iyi ısıl temasa sahip olmalıdır [61].

4.2.9. Salınlımlı ısı boruları

Salınlımlı ısı borusu bilimi ve teknolojisi son 20 yılda önemli ölçüde değer kazanmıştır. Bir salınlımlı ısı borusundaki ısı transfer süreçleri çok karmaşıktır ve sıvı buhar ara yüzey olgusunu, yüzey kuvvetlerini, termal olarak uyarılmış mekanik titreşimi, buharlaşma ve

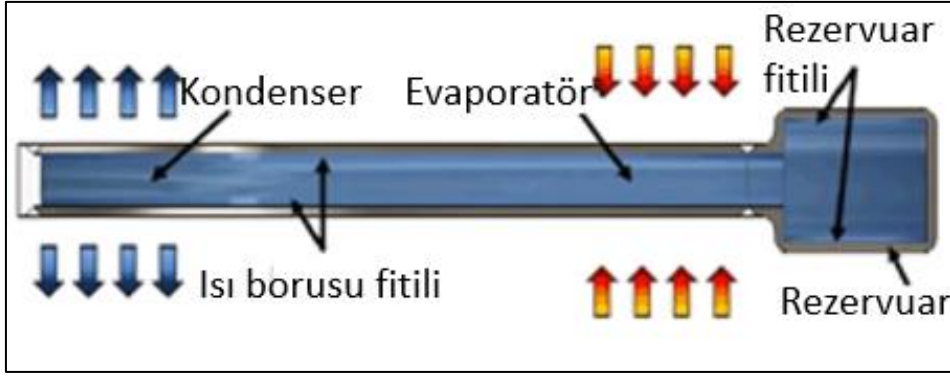
yoğunlaşma ısı transferini, salınımlı zorlanmış konveksiyon ve ısı iletimini içerir. Salınımlı ısı borusunun şematik gösterimi Şekil 4.14’ te görülmektedir. Salınımlı ısı boruları kısmen bir çalışma sıvısı ile doldurulur. İç çapı, sıvının buhar kabarcıklarıyla ayrılabilmesi için yeterince küçük olmalıdır. Geleneksel ısı borularının aksine bu tip ısı boruları, fitil olmadan çalışabilir ve üretimi kolaydır [61].



Şekil 4.14. Salınımlı ısı borusu şematik görünümü [61]

4.2.10. Sıvı tutucu diyet ısı boruları

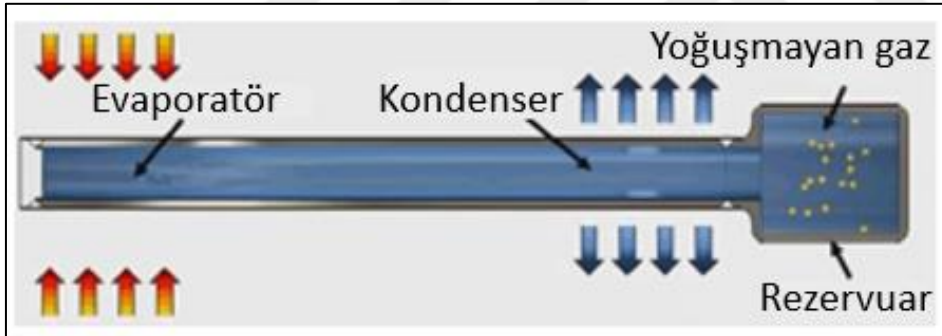
Bir sıvı tutucu diyet, ısı borusunun evaporatör ucunda bulunan fitilli bir hazneye sahiptir (Şekil 4.15). Isı borusu ve rezervuardaki fitiller birbirleriyle iletişim kuramayacak şekilde tasarlanmıştır. Normal çalışma sırasında, ısı borusu standart bir ısı borusu gibi davranır. Evaporatöre ve hazneye uygulanan ısı, sıvının buharlaşmasına neden olur. Buhar, kondensere gider ve ısı borusu fitilindeki kılcal hareket, yoğunlaşan sıvıyı evaporatöre geri döndürür. Haznenin fitili ana fitile bağlı olmadığından, hazne hızla kurur ve inaktif hale gelir. Kondenser evaporatörden daha sıcak olduğunda evaporatör ve Kondenserin rolleri değişir. Sıvı kondenserde buharlaşır ve evaporatöre gider. Burada fitiller ayrık olduğu için geri dönemez ve tüm sıvı rezervuarda birikir. Daha sonra tekrar evaporatör kondenserden sıcak duruma geldiğinde ısı borusu normal çalışmasına geri döner [61].



Şekil 4.15. Sıvı tutucu diyot ısı borusu şematik gösterimi [61]

4.2.11. Buhar tutucu diyot ısı boruları

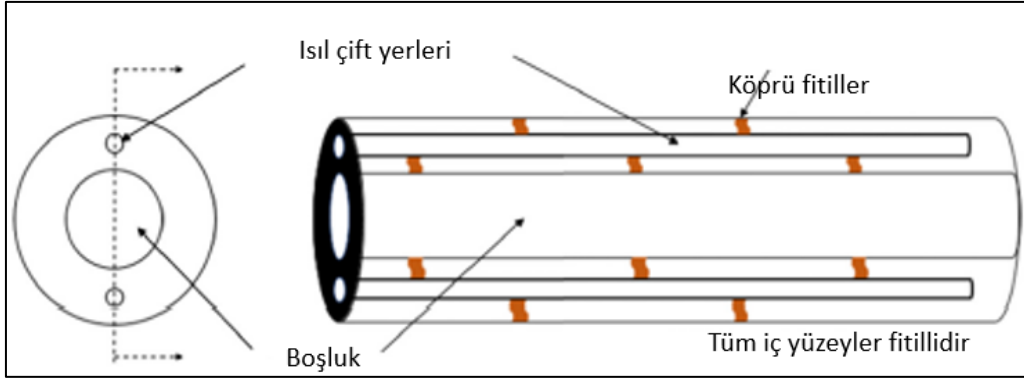
Buhar tutucu diyot çeşitli iletkenlikli ısı borularına benzer şekilde üretilir. Sıvı tutucu diyotun aksine, buhar tutucu diyotun kondenserinin sonunda bir buhar rezervuarı vardır (Şekil 4.16) [61]. Çalışma prensibi sıvı tutucu diyotlara benzemektedir.



Şekil 4.16. Buhar tutucu diyot ısı borusu şematik gösterimi [61]

4.2.12. Halkalı ısı borusu kavramı

Çoğu standart ısı borusu, çok yüksek etkin ısı iletkenliği ile ısıyı bir yerden diğerine iletmek için kullanılır. Bunun aksine, halkalı ısı boruları, en yaygın olarak çok yüksek derecede eş sıcaklık sağlamak için kullanılır. Tüm iç yüzeyler fitildir. Köprü fitilleri, sıvının içten dışa dönmesini sağlamak için ısı borusunun iç ve dış silindirlere birbirine bağlar (Şekil 4.17) [61].



Şekil 4.17. Halkalı ısı borusu şematik gösterimi [61]

4.2.13. Yüksek iletkenlikli plakalı ısı borusu plakaları

Standart ısı boruları ısıyı yalnızca ısı borusunun ekseni boyunca aktarır, bu nedenle ayrık ısı kaynaklarını soğutmak için uygundur. Yüksek iletkenlikli plakalar veya buhar odaları, daha geniş alan kaynaklarından ısıyı toplamak ve ısıyı yaymak veya soğutma için soğuk bir raya iletmek için kullanılır (Şekil 4.18) [61].



Şekil 4.18. Yüksek iletkenlikli plakalı ısı borusu plakaları [61]

4.3. Isı Borularının Uygulama Alanları

Isı boruları, kullanım amaçlarına bağlı olarak 4 ile 3000 K sıcaklık aralığında çalışabilir. Bütün durumlar için uygulamaları üç ana kategoriye ayırmak mümkündür: ısı kaynağı ile ısı alıcısının ayrılması, sıcaklık eşitleme ve sıcaklık kontrolü [55].

4.3.1. Elektronik bileşenlerin soğutulması

Günümüzde ısı boruları en büyük kullanım alanını, transistörler, diğer yarı iletken cihazlar ve entegre devre paketleri gibi elektronik bileşenlerin soğutulmasında bulmaktadır. Bu anlamda ısı borularının kullanmanın iki muhtemel yolu vardır:

- Bileşeni doğrudan ısı borusuna monte etmek
- Bileşeni, içine ısı borularının yerleştirildiği bir plaka üzerine monte etmek [55].

4.3.2. Uzay araçları

Isı boruları, uzay aracı uygulamalarıyla ilgili gelişmelerden diğer herhangi bir alandan daha fazla değer kazanmıştır. Değişken iletkenlikli ısı borusu, bu "teknolojik yansıma" nin en önemli örneğidir. Literatürde aşağıdaki uygulama türleri hakkında ayrıntılar bulunabilir:

- Uzay aracı sıcaklık eşitlemesi
- Bileşen soğutma, sıcaklık kontrolü ve radyatör tasarımı
- Uzay nükleer güç kaynakları [55].

4.3.3. Enerji tasarrufu

Isı boruları, ısı transferindeki etkinliği sayesinde, enerji tasarrufu uygulamaları için birincil adaydır. Isı geri kazanım sistemlerinde ve enerji dönüştürme cihazlarında avantaj sağlamak için kullanılmaktadır. Yakıt maliyeti arttıkça ve rezervler azaldıkça enerji tasarrufu giderek daha önemli bir hale gelmekte ve ısı borusu, enerji tasarrufu ile ilişkili çok sayıda uygulamada etkili bir araç konumundadır [55].

4.3.4. Isı borulu ısı değiştiriciler

Egzoz havasından, gaz akışlarından veya sıcak su akışlarından ısının geri kazanılması için çok sayıda teknik vardır. Endüstriyel ısı geri kazanım uygulamalarında kullanılan ısı borularını öne çıkaran özellikler şunlardır;

- Hareketli parça ve harici güç gereksinimi yoktur, bu da yüksek güvenilirlik anlamına gelir

- Sıcak ve soğuk akışkan akımları arasındaki katı duvar nedeniyle çapraz kirlenme tamamen ortadan kaldırılır
- Kolay temizlenme
- Kompakt bir yapıya sahip olması, çok çeşitli boyalarda üretilebilmesi ve çoğu uygulama için uygun olması
- Isı borusu ısı değiştiricisi tamamen tersine çevrilebilir; yani ısı her iki yönde de aktarılabilir.

Isı borulu ısı değiştiricilerin uygulaması üç ana kategoriye ayrılabilir;

- ✓ Aynı işlemde veya başka bir işlemde yeniden kullanım için işlemlerden atık ısının geri kazanılması, örneğin yanma havasının ön ısıtılması. Bu uygulama alanı çok çeşitlidir ve çok çeşitli sıcaklıklar söz konusu olabilir
- ✓ Alan ısıtma için ön ısıtma havasının bir prosesden atık ısının geri kazanılması
- ✓ Normalde nispeten düşük sıcaklıklar içeren klima sistemlerinde ısı geri kazanımı [55].

4.3.5. Sürekli donun korunması

Bu birimlerin işlevi, boru hattının yükseltilmiş bölümleri için boru destekleri etrafındaki sürekli donun çözülmesini önlemektir. Kullanılan ısı borularının çapları 5 ve 7.5 cm, uzunlukları 8 ile 18 m arasında değişmektedir. McDonnell Douglas tarafından geliştirilen sistem, çalışma sıvısı olarak amonyak kullanır, ısı yerden, yer seviyesinin üzerinde bulunan bir radyatöre yukarı doğru iletilir [55].

4.3.6. Kar eritme ve buz çözme

Bu uygulama alanı özellikle Japonya'da yaygın olarak kullanılmaktadır. Isı borusu kar eritme (veya buz çözme) sisteminin çalışma prensibi, ısı borularının buharlaştırıcılarına ısı girdisi olarak zeminde depolanan ısının kullanılmasına dayanır [55].

4.3.7. Termometre kalibrasyonu için ısı borusu ek parçaları

Isı boruları normal olarak geleneksel bir borulu fırın içinde çalıştırılır. Yerleşik muhafazalar, sıcaklık sensörü kalibrasyonu için gerekli bir ön koşul olan izotermal koşulları sağlar.

İzotermal çalışma alanları, sabit noktalı hücre ısıtması, kristal büyütme ve tavlama gibi sıcaklığa duyarlı işlemler için de kullanılabilir [55].

4.3.8. Yüksek sıcaklıklı ısı borulu fırın

Bu ısı borusu ailesinin sunduğu avantajlardan bazıları aşağıda listelenmiştir:

- Yüksek güçlü ısı transfer yetenekleri ($> 25\text{kW}$)
- Yüksek ısı akısında soğutma yeteneği ($> 100\text{kW/cm}^2$)
- Yüksek hassasiyetli sıcaklık kontrolü ve hızlı sıcaklık geri kazanımı
- Yüksek sıcaklıkta izotermalite (yani eşit veya sabit sıcaklıklar)
- Düzgün malzeme kristal büyümesi
- Termalden elektriğe enerji dönüşümü enerji tasarrufu

Günümüzün modern teknolojileri, uygulamalarının gerektirdiği performansı sağlamak için yüksek sıcaklıklı ısı borularına ihtiyaç duyar [55].

4.3.9. Çeşitli ısı borusu uygulamaları

Bir dizi başka ısı borusu uygulaması aşağıda listelenmiştir [55]:

- Banyo zeminlerini ısıtmak için ısı borusu panelleri (Japonya)
- Motosiklet motor yağını soğutmak için ısı borusu soğutmalı seviye çubuğu (Japonya)
- Uzak hava istasyonu ekipmanının pasif soğutması (Kanada)
- Matkapların soğutulması (Rusya)
- Termoelektrik jeneratörlerin termal kontrolü (ABD)
- Gaz türbini kanatlarının soğutulması (Çek Cumhuriyeti)
- Elektrikli depolamalı ısıtıcıların ısı kontrolü (Beyaz Rusya, İngiltere)
- Yarı otomatik kaynak ekipmanının soğutulması (Rusya)
- Balık çiftlikleri ve süs havuzlarının buzunu çözme (Romanya)
- Ağır petrolün büyük tanklarda ısıtılması (Romanya)
- Havya ucunun soğutulması (İngiltere)
- Acil durum besleme su pompaları için yatakların soğutulması (İngiltere)
- Partikül hızlandırıcılarda hedeflerin soğutulması (İngiltere)

- Biyo reaktörlerin izotermalizasyonu (Çin)
- Sentetik elyaf endüstrisinde fren pimlerinin soğutulması (İngiltere)
- Elektrikli pil nem alma cihazlarında ısı kontrol (ABD)
- Araba yolcu bölmesi ısıtması
- Ev tipi sıcak hava ısıtıcıları (ABD)



5. NANO PARTİKÜLLER VE NANO AKIŞKANLAR

Nano teknoloji, atomik veya moleküler ölçekte 1-100 nm boyutunda işlevsel sistemlerin mühendisliğidir. Bir nanometre (nm), bir metrenin milyarda biri veya 10^{-9} 'u olarak tanımlanır (Çizelge 5.1). Nano boyutun anlamının daha iyi anlaşılması için şu örnekler yararlı olacaktır; tipik karbon-karbon bağı uzunlukları veya bir moleküldeki bu atomlar arasındaki boşluk 0,12-0,15 nm aralığındadır, bir kırmızı kan hücresi yaklaşık 7 nm genişliğinde, bir su molekülü yaklaşık 0,3 nm ve bir DNA çift sarmalının çapı yaklaşık 2 nm' dir [63].

Çizelge 5.1. Ölçü birimleri [63]

Faktör	Sembol	Ön ek	Faktör	Sembol	Ön ek
10^{-18}	A	Atto	10^1	Da	Deka
10^{-15}	F	Femto	10^2	H	Hekto
10^{-12}	P	Piko	10^3	K	Kilo
10^{-9}	N	Nano	10^6	M	Mega
10^{-6}	μ	Mikro	10^9	G	Giga
10^{-3}	M	Mili	10^{12}	T	Tera
10^{-2}	C	Santi	10^{15}	P	Peta
10^{-1}	D	Desi	10^{18}	E	Exa

5.1. Nano Partiküller

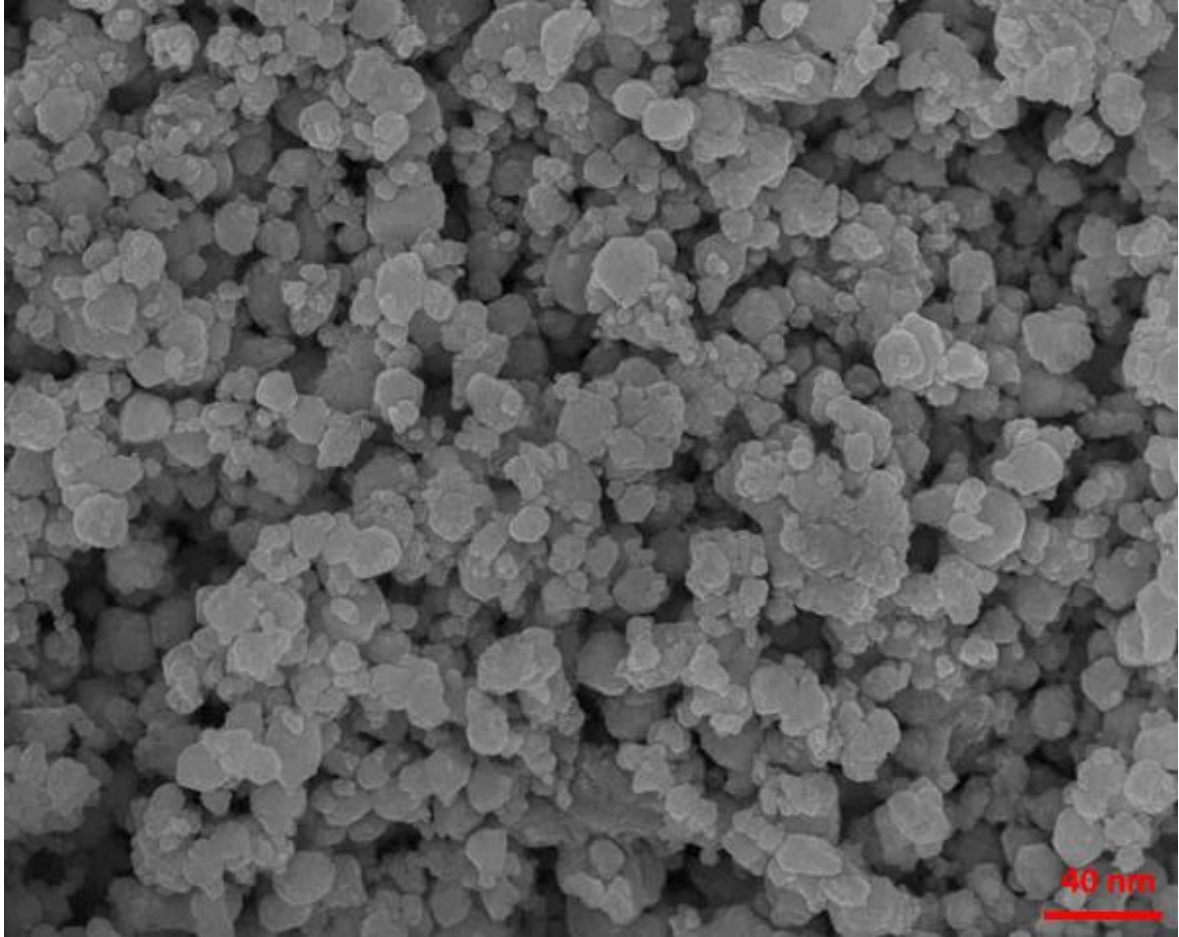
Yapısal olarak malzemeler uzunluk, genişlik ve yükseklik olmak üzere üç boyuta sahiptir. Bu boyutlardan en az biri nano teknoloji ölçeğinde (1 100 nm) ise, bu malzeme nano yapılı bir malzemedir. Nano teknolojinin ilgi çeken yönü nano ölçekli malzemelerin makro ölçekli malzemelerden tamamen farklı özelliklere sahip olmasıdır. Makroskopik ölçeğin tüm fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri nano ölçekte büyük oranda değişebilir. Bu özellikler ısı ve elektriğin iletkenliği, manyetik özellikler, optik özellikler, malzemelerin fiziksel gücü, reaktivite ve reaksiyon hızı gibi özelliklerdir [64].

5.1.1. Farklı nano partikül tipleri

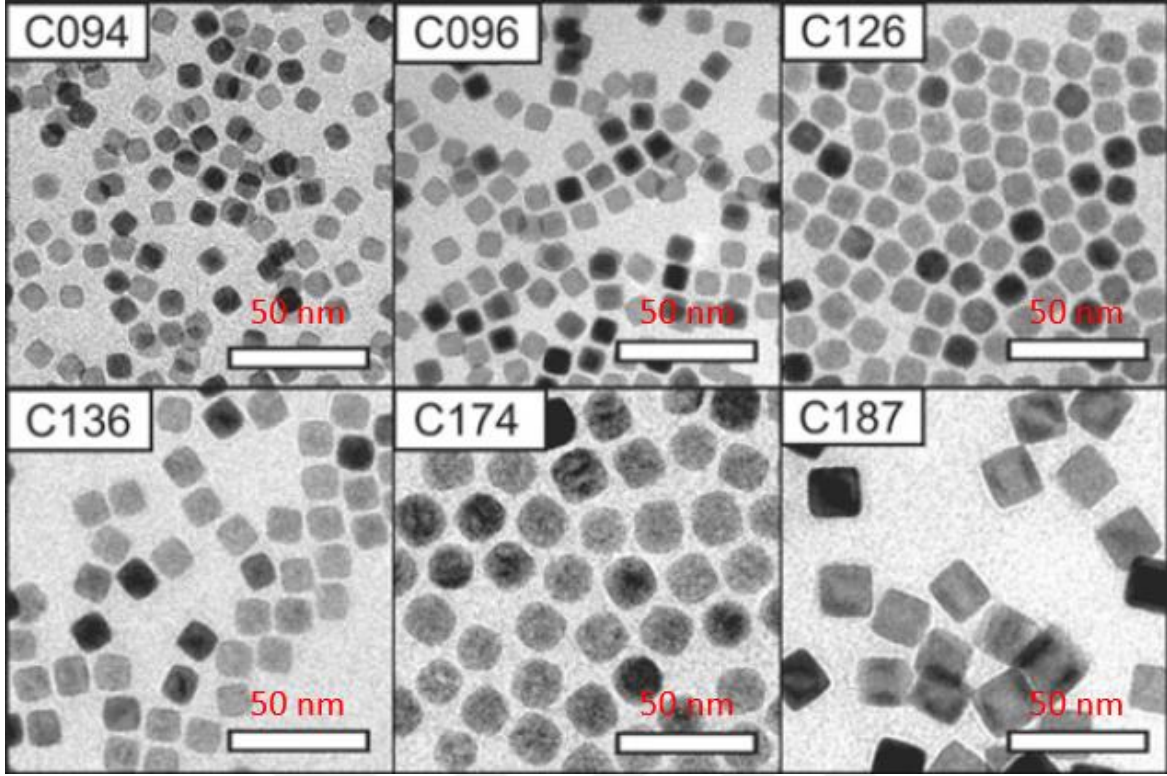
Nano partiküllerin sınıflandırılması yüzey morfolojisine ve malzeme tipine göre yapılabilir [65].

Yüzey morfolojisine göre nano partiküller

Bu sınıflandırmada nano partiküller şekil, boyut ve yapı bazında farklı türlere ayrılabilir. Şekiller dairesel, kübik, dörtgensel olabilir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), dinamik ışık saçılması (DLS), X-ışını kırınımı, zeta potansiyeli vb. gibi nano partiküllerin şeklini ve boyutunu ölçmek için çeşitli teknikler vardır. SEM, malzemelerin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi, boyutu ve yapısı hakkında bilgi edinmek için kullanılır. TEM, bir numunenin partikül boyutu dağılımı, şekli ve kristalliği hakkındaki bilgileri incelemek için kullanılır [65]. SEM ve TEM görüntülerine örnek olarak Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 deki görüntüler verilebilir.



Şekil 5.1. CuO nano partikülüne ait SEM görüntüsü [66]



Şekil 5.2. Kübik demir oksit nano partikülüne (9-20 nm) ait TEM görüntüsü [65]

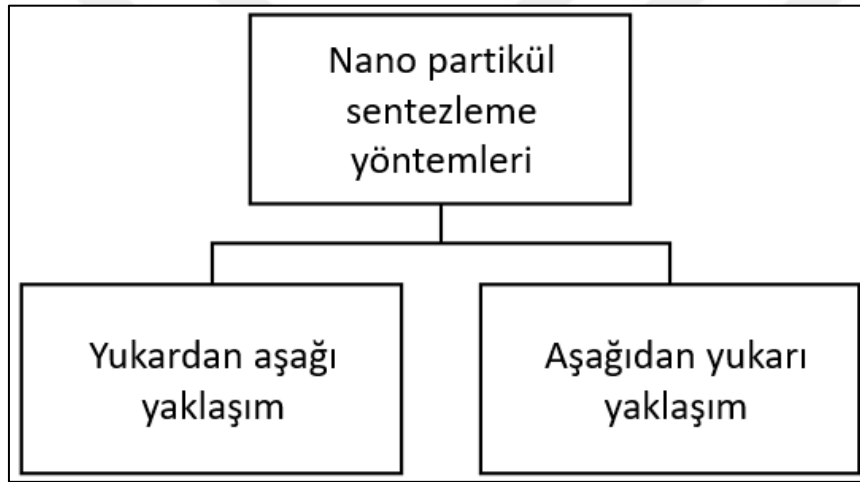
Malzeme tipine göre nano partiküller

Nano partiküller, malzeme türlerine göre metaller, metal oksitler, seramikler, karbon malzemeler gibi farklı kategorilere ayrılabilir. Metal tipi nano partiküller arasında altın, gümüş, bakır bulunurken metal oksitler arasında alüminyum oksit, titanyum oksit, demir oksit, silikon oksit, çinko oksit vb bulunur. Karbon bazlı malzemeler arasında ise elmas, karbon nano tüp, grafit vb. bulunur. Metalik nano partiküller, Rayleigh saçılımını iyileştirme, güçlü plazma absorpsiyonu gibi bazı avantajlara sahiptir. Fakat termodinamik olarak kararlı değildirler ve değişikliğe uğrayabilirler. Ayrıca bu nano partiküllerin hazırlanması oldukça zordur. Metal oksit nano partikülleri, yüksek yoğunlukları ve yüzeydeki sınırlı köşe-kenar boyutları sayesinde benzersiz özelliklere ve uygulama alanına sahiptir. Al_2O_3 , ZnO , CuO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , TiO_2 , MgO , AgO , CeO_2 , ZrO_2 ve SiO_2 , metal oksit nano partiküllerinin bazı örnekleridir. Bunların arasından Fe_3O_4 , manyetik özellikler sergileyen özel bir metal oksit nano partikül türüdür. Bu tür nano partiküller, manyetik alan varlığında davranışlarını değiştirir ve sadece mühendislikte değil, aynı zamanda tıp veya biyoloji alanında da çeşitli alanlara uygulanabilir. Karbon bazlı nano partiküller, olağanüstü özelliklerinden dolayı birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir. Bu tür nano

partiküllerin yüksek ısı iletkenliği, enerji transfer alanlarında uygulanabilmelerini sağlar [65].

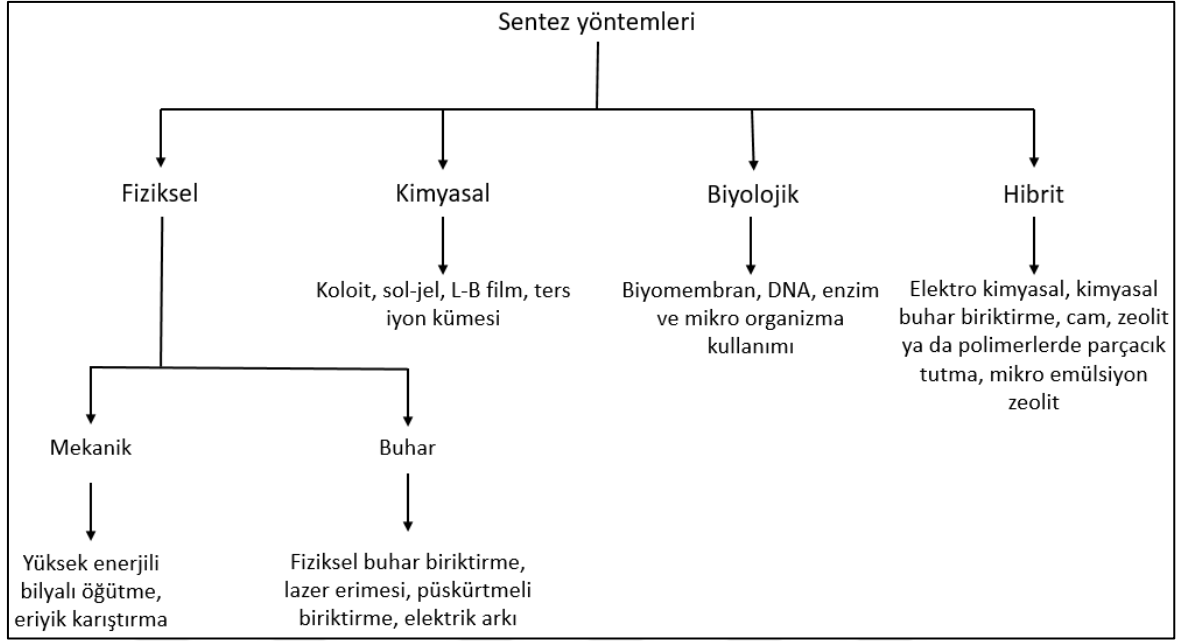
5.1.2. Nano partikül sentez yöntemleri

Nano partikül sentezlemek için çok sayıda yöntem vardır ve bunlar iki kategoriye ayrılabilir: bunlardan biri yukarıdan aşağıya yaklaşım, diğeri ise aşağıdan yukarıya yaklaşım (Şekil 5.3). Yukarıdan aşağıya yaklaşım, büyük malzemelerden nano boyutlu partiküllerin elde edildiği yaklaşımır. Aşağıdan yukarıya yaklaşımır, atom seviyesindeki elemanların düzeninde değişiklik yapılarak nano boyutlu partiküller oluşturulur [65].



Şekil 5.3. Nano partikül sentezleme yöntemleri [65]

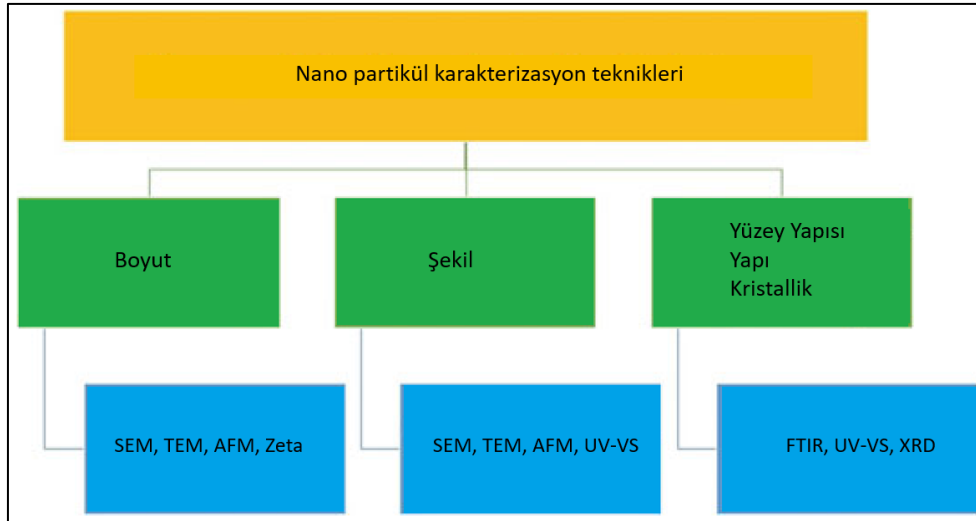
Bu iki grup sentez yöntemini çeşitlendirmek mümkündür. Nano malzemenin türüne göre çok sayıda sentez yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler fiziksel, kimyasal, biyolojik ve hibrit yöntemler olmak üzere 4 başlık altında toplanabilir (Şekil 5.4). Kullanılacak olan teknik, malzemeye, nano malzemenin türüne, yani sıfır boyutlu (0-D), tek boyutlu (1-D) veya iki boyutlu (2-D) olmasına, boyutlarına ve miktarına bağlıdır [67].



Şekil 5.4. Nano malzeme sentez yöntemleri [67]

5.1.3. Nano partiküllerin karakterizasyon teknikleri

Yaygın olarak kullanılan nano partikül karakterizasyon teknikleri Şekil 5.5’de özetlenmiştir. Bu tekniklerden X-ışını kırınımı (XRD), numunelerin x-ışını modelini analiz ederek kristalliğin tanımlanması için kullanılır. SEM ve TEM nano partiküllerin şeklini ve boyutunu belirlemede kullanılır. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), her tür yüzeyin görüntülenmesi için kullanılır ve nano partiküllerin şekil ve boyutu hakkında fikir verir. UV – VS nano partiküllerin şeklini ve boyutunu belirlemek için kullanılır. Zeta boyutlandırıcı, nano paracıkların boyutunu ve elektroforetik hareketliliğini ölçmek için kullanılır. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) organik, polimerik ve inorganik malzemelerin tanımlanması için kullanılır [65].



Şekil 5.5. Nano partikül karakterizasyonunda kullanılan bazı teknikler [65]

5.2. Nano Akışkanlar

Isı transferi birçok mühendislik uygulamasında önemli bir rol oynar. Isı bu uygulamalarda, ısı değiştiriciler, kondenserler, evaporatörler gibi cihazlar tarafından aktarılır. Bu cihazları daha verimli, kompakt tasarımlı ve düşük maliyetli hale getirmek için ısı transfer özelliklerinin iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Isı transfer oranının iyileştirilmesinde, genişletilmiş yüzeyler, jet çarpması ve manyetik alan uygulaması gibi çok sayıda teknikten söz edilebilir. Bunun yanı sıra çalışma akışkanının ısı iletkenliğinin artırılması yöntemi de bu teknikler arasındadır. Nano teknoloji ısı transfer oranının iyileştirilmesinde etkili bir teknik olmuştur [68]. Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi geleneksel ısı transfer sıvıları, metallere ve hatta metal oksitlere göre zayıf termal özelliklere sahiptir. Nano boyutta eklenecek olan katı partiküller sayesinde bu akışkanların ısı özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür.

Çizelge 5.2. Bazı sıvı ve katıların ısı iletim katsayıları [64]

Isıl İletkenlik (W/mK)	Malzeme
0,613	Su
0,289	Gliserol
0,145	Motor yağı
0,141	Pompa yağı
0,252	Etilen glikol
237	Alüminyum
40	Alüminyum oksit
401	Bakır
148	Silikon

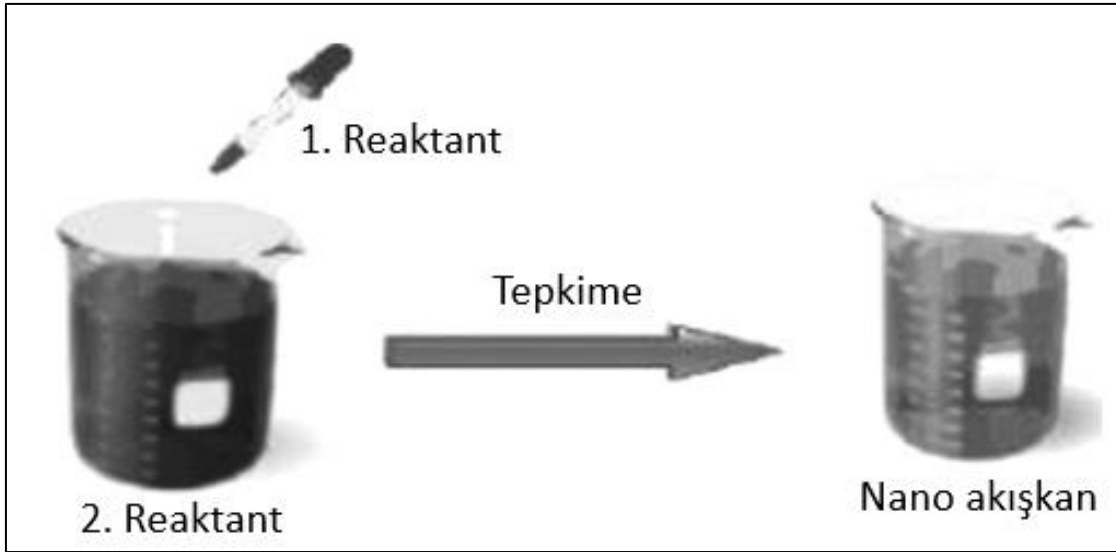
İlk defa Choi vd. [14] nano boyuttaki katı partikülleri sıvı içinde dağıtarak bir süspansiyon oluşturmuş ve bu süspansiyonu “nano akışkan” olarak isimlendirmiştir. Bu araştırma ve sonuçları, akışkanların termofiziksel özelliklerini iyileştirmek için nano partiküllerin kullanılmasının başlangıç noktası olarak düşünülebilir. Metal nano partiküller (alüminyum, gümüş, bakır, nikel vb.), metal oksitler (alüminyum oksit, bakır oksit, demir oksit, silikon oksit, titanyum oksit vb.) veya grafen, karbon nano tüp ve benzerleri gibi polimerler sıvıların içine nano ölçekli eklentiler olarak kullanılabilir. Su, etilen glikol, propilen glikol, yağ gibi sıvılar da temel akışkan olarak kullanılabilir [64].

5.2.1. Nano akışkan hazırlama yöntemleri

Nano akışkan hazırlamak için tek adımlı ve çift adımlı yöntemler olmak üzere 2 yöntem kullanılmaktadır. Nano partiküllerin topaklanması her iki yöntem için sorun teşkil etmektedir ki bu, nano partikül içeren tüm teknolojilerde önemli bir sorundur. Bu nedenle, sıvılar içinde neredeyse topaklaşmayacak veya homojen dağılacak nano partiküllerin sentezi ve süspansiyonu, nano sıvıların termal özelliklerinde artış sağlamak için en önemli faktörler arasında yer almaktadır [69].

Tek adımlı yöntem

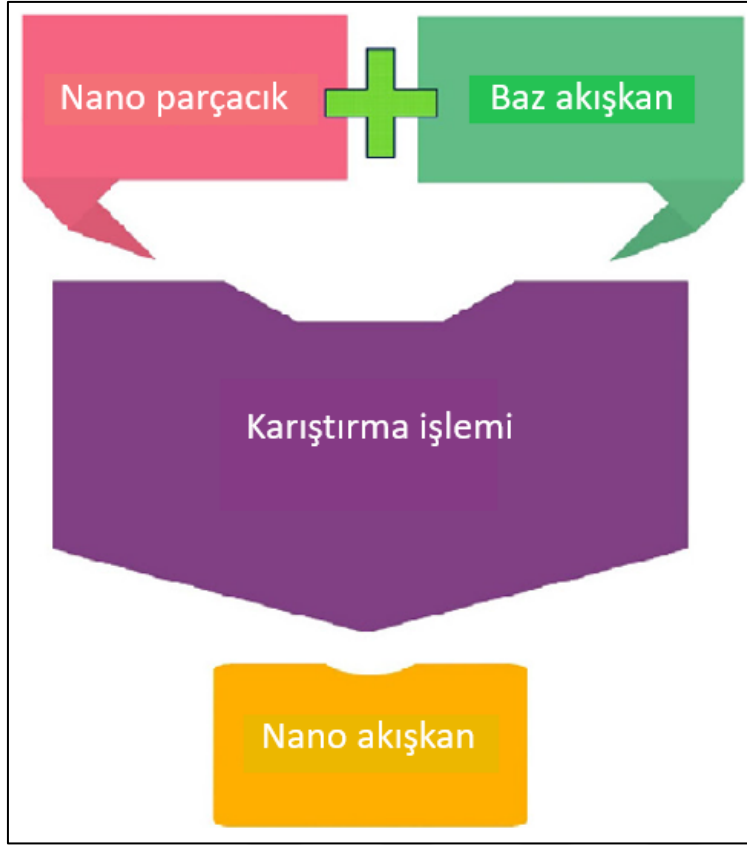
Tek adımlı yöntemde nano partiküller ve nano akışkanlar tamamen tek adımda hazırlanır (Şekil 5.6). Yüksek dayanıklılık, akışkanın homojenliği ve partikül kümelenmesinin olmaması bu yöntemin avantajlarıdır. Bu avantajları sağlayan etken nano partikül ve nano akışkanın aynı anda üretilmesidir ki bu durum nano partikülün taşınması ve korunması işlemlerini ortadan kaldırmaktadır. Bu yöntemin dezavantajından biri akışkan üretimindeki düşük hızdır. Çünkü tek adımlı yöntem yavaş bir işlem hızına sahiptir. Bu, aynı zamanda yüksek maliyete sebep olmaktadır. Sadece düşük basınç akışkanlarının üretilmesi ve düşük hacim oranlarında akışkan üretilmesine izin vermesi tek adımlı yöntemin diğer dezavantajlarından [64].



Şekil 5.6. Nano akışkan üretiminde tek adımlı yöntem [68]

Çift adımlı yöntem

Nano akışkan hazırlamanın başka bir yöntemi de çift adımlı yöntemdir (Şekil 5.7). Düşük maliyetli olmasından dolayı bu yöntem tek adımlı yöntemle göre daha çok tercih edilmektedir. Bu yöntemde tek aşamalı yöntemin aksine nano partiküller ve nano akışkanlar iki ayrı parça halinde üretilmektedir.



Şekil 5.7. Nano akışkan üretiminde çift adımlı yöntem [64]

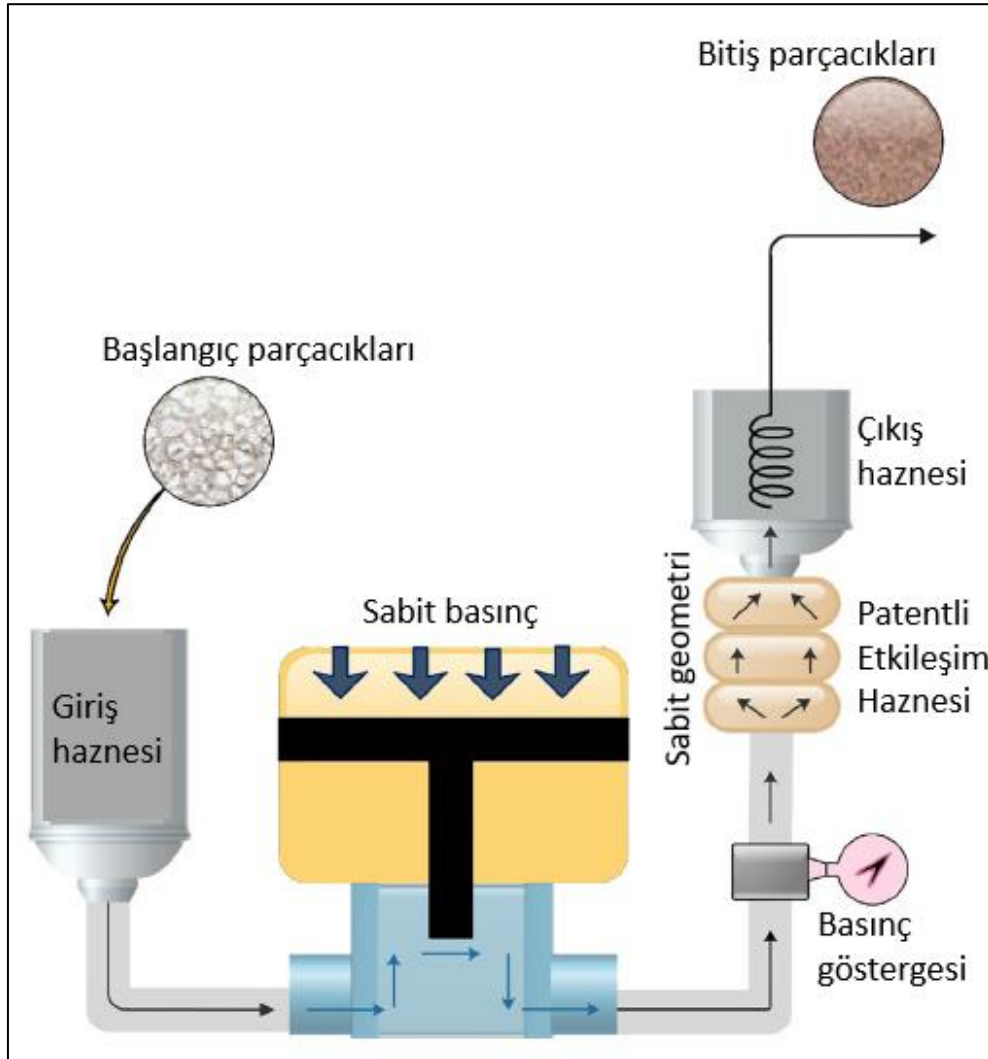
Çift adımlı yöntemde nano akışkan üretim hızı diğer yöntemlere göre daha yüksektir ve üretilen nano akışkan miktarı daha fazladır. Ayrıca yüksek konsantrasyonlarda nano akışkan üretimi de mümkündür. Bu yöntemde nano partiküller önceden üretilmek zorundadır (1. Adım). Daha sonra nano partikül ile baz akışkan karıştırılarak nano akışkan üretilmektedir (2. Adım). Bu yöntemin temel sorunu bu adımda ortaya çıkmaktadır. Partikül kümeleşmesi olmadan uygun kararlılığa sahip homojen bir nano akışkan hazırlamak zordur. Nano partiküllerin taşınması ve depolanması sırasında partiküllerin birbirine yapışması ve nano partiküllerin yüksek yüzey enerjisinden dolayı homojen ve kararlı bir nano akışkan hazırlamak çift adımlı yöntemde önemli bir zorluktur [64].

5.2.2. Nano akışkanlar için stabilizasyon yöntemleri

Yüksek basınç / kesme homojenizasyon yöntemi

Bu yöntem, kavitasyon ve yüksek kesme kuvvetinin birlikte etkisi nedeniyle nano akışkan içindeki nano partikül kümelenmesini kırmada ultrasonik işleme göre daha etkilidir. Şekil

5.8’de görülen yüksek basınçlı homojenleştirici, bir sıvı akışını ikiye bölen iki mikro kanaldan oluşmaktadır. Etkileşim haznesine kadar 3 mm çapındaki bir kanaldan akan sıvı akışkan etkileşim haznesinde 75 μm ’ lik iki kanalda akmaya zorlanır. Mikro kanal içinden akan süspansiyonun akış hızı Bernoulli teoremine göre ~ 1600 kata kadar artırılır ve aynı anda kavitasyon olayı dikkate değer bir şekilde meydana gelir. Bu yüksek akış rejiminde partikül yığılmaları giderilmiş olur ve homojen nano akışkanlar elde edilebilir [70].

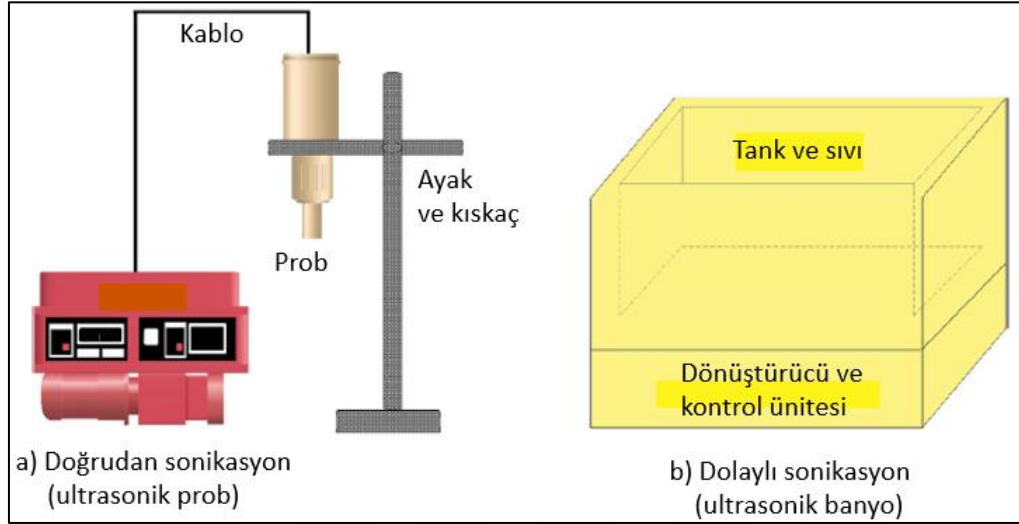


Şekil 5.8. Yüksek basınçlı homojenleştirici [64]

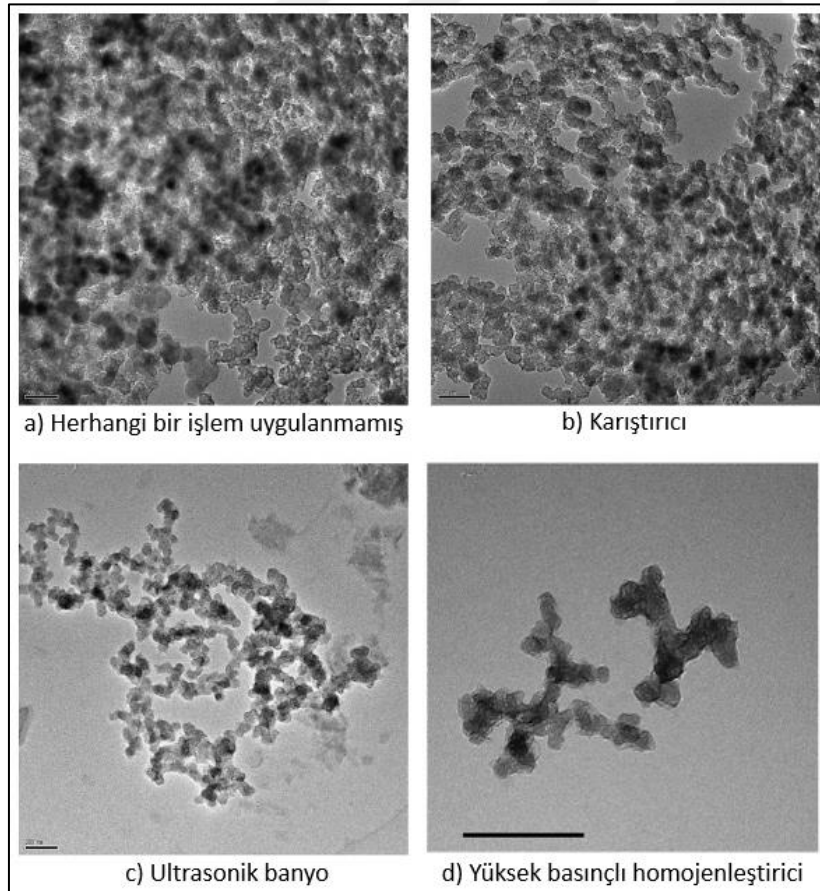
Ultrasonik işlem

Stabilizasyon tekniklerinden bir diğeri de ultrasonik işlemdir. Bu işlem, nano partiküller arasındaki zayıf yüzey bağlarını ortadan kaldırır ve böylece kümelenmeyi azaltır ve nano

akışkan stabilitesini artırır. Ultrasonik işlemler için kullanılan iki cihaz Şekil 5.9’da görülmektedir [64].



Şekil 5.9. Ultrasonik işlem için kullanılan cihazlar [64]



Şekil 5.10. İki adımlı yöntem ile hazırlanmış siyah karbon/su nano akışkanına uygulanan fiziksel işlemlerden sonra elde edilecek TEM görüntüleri (ölçek çubuğu: 200nm) [70]

Şekil 5.10'da Hwang vd. tarafından yapılan bir çalışmaya ait TEM görüntüleri görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi hiçbir fiziksel işlem uygulanmayan nano akışkanda partiküllerdeki kümelenme oldukça fazladır. Mekanik karıştırma uygulandıktan sonra bu kümelenme az da olsa azalmıştır. Ultrasonik banyonun etkisi de dikkate değerdir. Ancak en etkili yöntem yüksek basınçlı homojenleştirici olmuştur [70].

Yüzey aktifleştirici madde ilavesi

Nano akışkanlara yüzey aktif madde eklemek, akışkanların kararlılığını artırmak için basit ve ekonomik bir yöntemdir. Yüzey aktif maddeler, sistemin yüzey karakteristiğini önemli ölçüde etkiler [64]. Yüzey aktif maddeler ve nano partiküller arasındaki etkileşimler genellikle van der Waals, hidrojen bağı, hidrofobik ve $\pi - \pi$ etkileşimleri gibi kovalent olmayan etkileşimlerdir [68].

Yüzey aktif maddeler hidrofilik bileşimlerine göre iyonik olmayan yüksüz, negatif yüklü, pozitif yüklü ve hem pozitif hem de negatif yüklü olabilen dört kategoriye ayrılır. Genel olarak nano akışkanın baz akışkanı polar çözücü ise suda çözünen yüzey aktifleştirici madde seçilir, aksi halde yağda çözünen yüzey aktif madde seçilmelidir [71].

Bu maddeleri kullanılırken dikkatli olunmalıdır. Çünkü bu maddelerin nano akışkan içerisindeki varlığı nano akışkan özelliklerini değiştirir, kütle ve ısı transferini etkiler. Yüzey aktif maddelerin kullanımı nano akışkan kararlılığını iyileştirmek için yaygın yöntemlerden biri olmasına rağmen, bu materyallerin nano akışkanlara eklenmesi, köpüklenme ve nano akışkanların ısı iletkenliğini azaltma gibi sorunlara neden olabilir. Ayrıca, 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda yüzey aktif madde ile nano partiküller arasındaki bağı tahrir olması nedeniyle nano akışkan kararlılığını kaybeder [64].

pH kontrolü

İzoelektrik nokta pH 'ta, yüzey yük yoğunluğu, yığın çözeltinin yük yoğunluğuna eşittir ve zeta potansiyeli sıfırdır. Bu nedenle bu katmandaki yük yoğunluğu sıfırdır. Bu pH 'ta, baz akışkanda asılı nano partiküller arasındaki itici kuvvetler sıfır olduğundan, nano akışkan kararsız hale gelir. Çözeltinin pH'ı partiküllerin izoelektrik noktasından uzaklaştıkça, zeta potansiyeli büyür ve nano partiküller daha kararlı hale gelir [68].

5.2.3. Nano akışkanların termofiziksel özellikleri

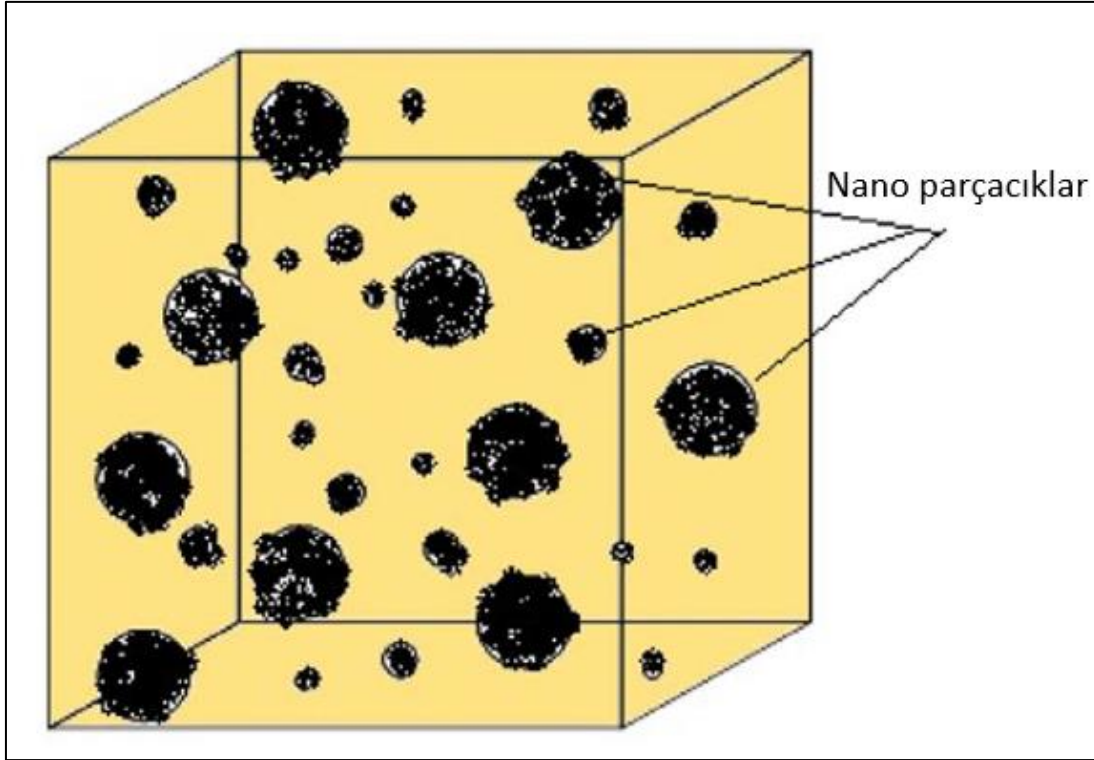
Nano akışkanları geleneksel ısı transfer akışkanlarından üstün kılan özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Katı metallerin ısı iletkenlikleri sıvılarınkinden yüksek olduğu için baz akışkana eklenen ince katılar akışkanın ısı iletkenliğini artırır.
- Çalışma akışkanına eklenen katı partiküller akışkanın yüzey alanını ve ısı kapasitesini artırır.
- Partikül süspansiyonları etkin ısı kapasitesini artırır.
- Partiküller arasındaki etkileşimler ve çarpışmalar, akışkan ile akış kanalı arasındaki temas yüzeyini artırır.
- Nano partiküller sıvının karışmasını ve türbülansını artırır.
- Nano partiküllerin dağılımı, sıvının yatay sıcaklık farkının düzleşmesine neden olur[72].

Nano partiküllerin bir ısı transfer akışkanına eklenmesi, akışkanın termofiziksel özelliklerinin değişmesine neden olur. En önemli özellikler ısı iletkenlik, viskozite, yoğunluk ve özgül ısıdır [73].

Isıl iletkenlik

Nano akışkanların ısı iletkenliğindeki değişimi araştırmak için çok sayıda deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Çalışmalar göstermiştir ki nano partiküllerin geleneksel bir akışkana eklenmesi ısı iletkenliği artırmaktadır. Bunun birinci nedeni, nano partiküllerin termal davranışını kontrol eden anahtar mekanizma olan Brownian hareketidir (Şekil 5.11) [74].



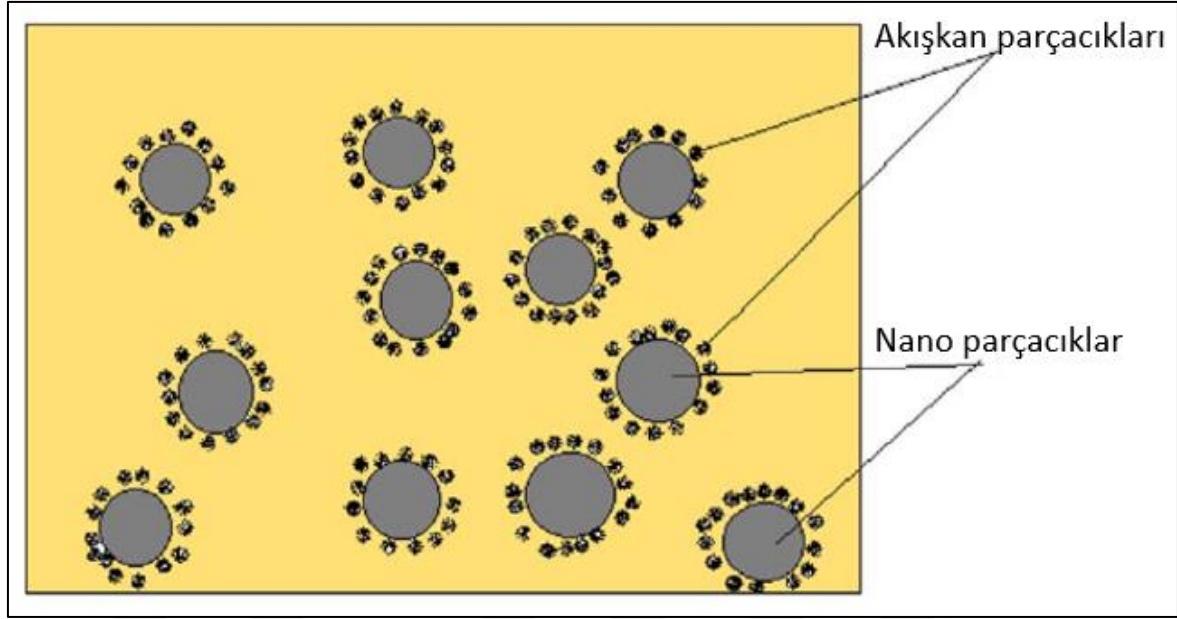
Şekil 5.11. Nano partiküllerin Brownian hareketi [74]

Brownian hareketinin etkisi, Stokes – Einstein formülü ile verilen difüzyon sabiti D olan bir difüzyon sürecidir:

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\eta d} \quad (5.1)$$

Burada; k_B Boltzmann sabiti, T sıcaklık, η akışkanın viskozitesi, d ise partikül çapıdır. Buradan görüleceği gibi yüksek sıcaklık demek yüksek difüzyon yeteneği demektir. Bu da ısı iletimin yüksek olacağı anlamına gelir [75].

Nano akışkanların ısı iletkenliklerinin yüksek olmasındaki ikinci mekanizma ara yüzey tabakasının oluşmasıdır. Katı partikül yüzeyine yakın sıvı moleküller katmanlı yapılar oluşturur. Bu katmanlı yapılar, nano partiküller ile baz sıvı arasında bir termal köprü görevi görür ve termal iletkenliği artırır (Şekil 5.12) [74].



Şekil 5.12. Nano partikül, baz akışkan ve katı-sıvı ara yüzünde nano katman içeren nano akışkan yapısı [74]

Isıl iletkenliğin belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında geçici sıcak tel, sabit hal, silindirik hücre, sıcaklık salınımı, 3-omega yer almaktadır. Bunlar arasından geçici sıcak tel yöntemi en yaygın kullanılan tekniktir. Bu yöntemin en önemli avantajı nano akışkandaki doğal taşınımın sebep olduğu hataları ortadan kaldırmasıdır [73].

Viskozite

Viskozite akışkanların ısı uygulamalarında önemli bir parametredir. Basınç düşümü ve pompalama gücü akışkanın viskozitesine bağlıdır. Dahası taşınım ısı transfer katsayısı viskoziteden etkilenir. Dolayısıyla viskozite ısı iletkenlik kadar önemsenmelidir. Nano akışkanların viskoziteleri temel olarak nano partikül konsantrasyonunun artması ile artarken sıcaklığın artması ile azalır. Farklı çalışma prensiplerine sahip çeşitli viskozimetreler mevcuttur. Bunlar arasında kılcal boru viskozimetresi, titreşim viskozimetresi, döner akış ölçer, bilye/piston düşürmeli viskozimetre, piston tipi akış ölçer ve kap tipi viskozimetre sayılabilir. Döner akış ölçer, piston tipi akış ölçer ve kılcal boru viskozimetresi nano akışkanların viskozitesini ölçmede en çok kullanılan aparatlardır [73].

Yoğunluk

Yoğunluk önemli bir termodinamik özelliktir ve nano akışkanların ısı transfer performanslarını değerlendirmek için önemli bir rol oynar. Reynolds sayısını, sürtünme faktörünü, basınç kaybını ve Nusselt sayısını doğrudan etkiler [74].

Özgül ısı

Özgül ısı önemli özelliklerden biridir ve nano akışkanların ısı transfer miktarını etkilemede önemli bir rol oynar. Özgül ısı, bir gram nano akışkanın sıcaklığını bir santigrat derece yükseltmek için gereken ısı miktarıdır [74]. Katıların özgül ısıları genellikle sıvılarınkinden düşüktür. Dolayısıyla baz akışkana eklenen katı nano partiküller özgül ısının bir miktar düşmesine sebep olacaktır. Nano akışkanların özgül ısıları kalorimetreler ile ölçülür. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), bilinen bir değer ile karşılaştırarak numunenin özgül ısı değerini belirleyen en etkili cihazdır [73].

Nano akışkanların ısı iletkenliğini etkileyen parametreler

Isıl iletkenlik ve viskozite nano akışkanların en önemli iki termodinamik özelliğidir. Bu iki özellik birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörler arasında hacimsel partikül konsantrasyonu, partikül boyutu, partikül şekli, sıcaklık, pH, partikül malzemesi, baz akışkan tipi yer almaktadır [73]. Aşağıda bu faktörlerin etkileri detaylandırılmıştır.

Araştırmalar partikül konsantrasyonunun artmasının ısı iletkenliği de artırdığını ortaya koymuştur. Ancak konsantrasyon artışıyla birlikte viskozite de artmaya ve kararlılık azalmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalarda partikül konsantrasyonu belli bir limitin altında tutulmuştur. Bu limit genelde %10'un altındadır. Partikül boyutunun ısı iletkenliğe etkisindeki genel kanı, partikül boyutunun azalmasının ısı iletkenliği artırdığı yönündedir. Küresel ve silindirik nano partiküller çoğunlukta olmakla birlikte çeşitli partikül şekillerine sahip nano partiküller kullanılmaktadır. Silindirik partiküllerin küresel partiküllere göre daha yüksek ısı iletkenlik sağladığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak silindirik partiküllerin sahip olduğu yüksek en-boy oranı gösterilmektedir. En-boy oranı bir partikülün uzunluğunun genişliğine oranını ifade eder. Yüksek en-boy oranına sahip olan partiküller ısıyı daha hızlı iletirler. Ancak silindirik partiküller akışkanın viskozitesini küresel

partiküllere göre daha fazla artırır ki bu da pompalama gücünde artışa sebep olur. Çalışmalar nano akışkanların ısı iletkenliğinin sıcaklıkla arttığını ortaya koymuştur. Nano akışkanların pH değerleri ısı iletkenliği ve viskoziteyi etkileyen önemli parametrlerden biridir. Optimum pH değerlerinde ısı iletkenlik maksimize edilebilirken viskozite de minimize edilebilmektedir. Ancak pH'ın asidik ya da bazik koşullarda seyretmesi ısı transfer yüzeylerine zarar verebilir ya da partiküllerin baz sıvı içinde çözünmesine sebep olabilir. Bu yüzden akışkanın pH değerinin nötr olması tercih edilmektedir [73].

5.2.4. Çeşitli nano akışkan uygulamaları

Birçok uygulamada nano teknoloji, daha temiz, daha verimli enerji kaynakları ve kullanımları sağlamak amacıyla kullanılmış veya algılanmıştır. Bu uygulama alanlarının çoğu, enerji aktarımını doğrudan etkilemese bile, her biri güç iletim sistemi tarafından kullanılacak olan elektrik, benzin veya gaz yakıtında azaltma kapasitesine sahiptir. Nano akışkanların çeşitli uygulama alanları Şekil 5.13'de gösterilmiştir. Bu uygulamalardan bazıları bu bölümde incelenecektir.

Elektronik uygulamalar

Gelişmiş elektronik cihazların ısı yönetimi, bu cihazlar yüksek ısı enerjisi ürettiği için zor olacaktır ve ayrıca mevcut yüzey alanı azaltılmalıdır, bu da maliyeti artıracaktır. Bu cihazların soğutulmasında optimum geometri bulunarak ya da ısı transfer özelliği iyileştirilerek ısı yönetimi yapılabilir. Nano akışkanlar sayesinde ısı transfer oranı artırılarak bu tip cihazların soğutulması sağlanmaktadır [68].

Taşıma alanındaki uygulamalar

Motor soğutma sıvısı genelde su ve etilen glikol karışımından oluşmaktadır. Nano partiküller motor soğutma sıvısına eklenirse, motor soğutma hızı artacak ve sistemin boyutu daha küçük ebatlarda tasarlanabilecektir. Bu da yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bir etilen glikol nano akışkanının düşük basınçta çalışması ve tek fazlı soğutmayı sürdürmek adına yararlı olan yüksek kaynama noktası nano akışkan esaslı soğutma sıvısını motor soğutmada daha kullanışlı hale getirmektedir [68].



Şekil 5.13. Nano akışkanların çeşitli kullanım alanları [76]

Endüstriyel soğutma

Nano akışkanlar endüstriyel soğutma sisteminde kullanılarak hem enerji tasarrufu sağlanmakta hem de çevreye salınan CO₂ miktarı ciddi anlamda azaltılmaktadır. Örneğin Amerika'da 2008 yılında sunulan bir projeye göre, Amerikan endüstrisinin soğutma ve ısıtma sıvılarını nano akışkanlar ile değiştirerek 1 trilyon BTU değerinde bir enerji tasarrufu sağlayabileceği ortaya koyulmuştur. Aynı projede, elektrik güç santrallerindeki kapalı döngü soğutma çevrimlerinde nano akışkan kullanılarak 10-30 trilyonluk BTU değerinde tasarruf edilebileceği de belirtilmiştir. Bu enerji miktarı 50000-150000 konutun yıllık enerji ihtiyacına eşdeğer bir enerjidir. Bu tasarruf ile azaltımı yapılacak olan emisyon değerleri ise yaklaşık 5,6 milyon ton CO₂, 8600 ton nitrojen oksit ve 21000 ton sülfür di oksite karşılık gelmektedir [77].

Konut ısıtması ve kirliliğin azaltılması

Nano akışkanlar soğuk bölgelerde bina ısıtma sistemlerinde kullanılabilir. Nano akışkanların kullanımı, daha küçük ısıtma sistemlerine ihtiyaç duyar ve bu da daha büyük ısıtma sistemleri ile aynı ısı enerjisi daha düşük maliyet ile sağlayabilir. Nano akışkan maliyeti

dışında, ilk yatırım maliyeti oldukça düşüktür. Daha küçük ısıtma üniteleri daha az güç ve daha az akışkan kullandığından çevre kirliliği de azaltılmış olur [68].

Uzay ve savunma sistemleri

Nano akışkanlar, askeri araçlar, denizaltılar ve yüksek güçlü lazer diyotları içeren askeri sistemlerde uzay ve savunmada kullanılmaktadır [68].

Diğer kullanım alanları

Nano akışkanlar, faz değiştiren malzemeler olarak etkin bir ısı enerji depolama potansiyeline sahiptir. Güneş kolektörlerinin verimi nano akışkan kullanılarak artırılabilir. Nano akışkanlar, verimli soğutma sağlayarak hastanın hayatta kalma şansını artıran ve organ hasarı riskini azaltan cerrahi alanlarda da kullanılabilir. Demir bazlı nano akışkanlar, kanser hastalarında ilaç veya radyasyon uygulaması için araç olarak kullanılabilir. Nano akışkanlar, yüksek kaynama noktası, viskozitesi ve iletkenliği nedeniyle hidrolik fren sistemlerinde de kullanılabilir. Nano akışkanlar, bir ürün veya sürecin kalitesinden, miktarından ve maliyetinden ödün vermeden ısı transfer oranını artırmak için en iyi kaynaktır [68].

5.2.5. Nano akışkan tipleri

Bakır, gümüş gibi metalleri içeren, bakır oksit, alüminyum oksit gibi metal oksitleri içeren karbon içeren çeşitli nano akışkanlar mevcuttur. Ayrıca bu nano partiküllerin belli oranlarda karıştırılmasıyla hibrit nano akışkanlar da üretilebilmektedir [73].

Seramik nano akışkanlar

Al_2O_3 , CuO , TiO_2 gibi seramik nano partiküller oksidasyona olan dirençleri sayesinde karışımlarda kimyasal olarak daha kararlı oldukları için tercih edilirler. Ayrıca bu tip nano partiküller daha düşük yoğunluğa sahiptir ve partikül çökme problemi daha az beklenir. CuO nano akışkanları diğer metal oksit nano akışkanlarına göre daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Literatürde su, etilen glikol, motor yağı gibi farklı baz akışkanlar ile hazırlanan çok sayıda CuO nano akışkan uygulaması mevcuttur. Alümina olarak da adlandırılan alüminyum oksit (Al_2O_3) nano partiküllü nano akışkanlar soğutma uygulamaları için en iyi tercih olarak gösterilmektedir. Titanyum di oksit (TiO_2) nano partikülü sağlık tehlikelerinden uzak

olmasının yanı sıra, fiziksel ve kimyasal olarak karalı oluşu, düşük maliyeti ve ticari uygunluğu sayesinde önemli avantajlara sahiptir. Çinko oksit (ZnO) nano partikülleri katalitik, elektriksel, fotokimyasal ve optoelektronik özellikleri için yaygın olarak kullanılmaktadır [73].

Manyetik nano akışkanlar

Manyetik nano akışkanlar, manyetik nano partiküllerin bir tür koloidal süspansiyonlarıdır. Bu manyetik nano partiküller Co ve Fe gibi metalleri, Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $CoFe_2O_4$ gibi metal oksitleri temsil etmektedir. Bu nano akışkanlar elektronikler, makine mühendisliği, uzay ve biyo mühendislik gibi çeşitli alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir. Manyetik nano akışkanların ısı transfer performansları dışardan manyetik alan uygulanarak kontrol edilebilir [73].

Metalik nano akışkanlar

Bakır, yüksek ısı iletkenliği sayesinde tercih edilen nano partiküller arasındadır. İki adımlı yöntemde bakırın okside olma ihtimalinden dolayı bakır içeren nano akışkan hazırlamak için tek adımlı yöntem tercih edilmektedir. Altın ve gümüş ise yüksek maliyetleri nedeniyle daha az uygulama alanına sahiptir.

Karbon nano tüp içeren nano akışkanlar

Karbon nano tüpler 1991 yılında keşfinden sonra eşsiz özellikleri sayesinde büyük ilgi toplamıştır. Karbon nano tüpler ısı iletkenlik bakımından tüm metalik ve metal oksit nano partiküllerinden daha üstündür. Fakat topaklanmaya karşı yatkınlığı nedeniyle baz sıvı içindeki dağılımı zordur. Bu nano akışkanların kararlılığı ve ısı özellikleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yüzey aktifleştirici olarak akasya zımkı ile birlikte sonikasyon uygulandığında su bazlı karbon nano tüp nano akışkanların kararlılığı daha uzun süreli olmaktadır [73].

Hibrit nano akışkanlar

Aynı anda iki tür nano partikül içeren akışkanlara hibrit nano akışkan denir. Hibrit nano akışkanlar geleneksel akışkanlara ve tek nano partikül içeren nano akışkanlara göre daha iyi

bir ısı iletkenlik sağladıkları için tercih edilmektedir. Her nano partikül farklı özelliklere sahiptir. Örneğin alüminyum oksit gibi metal oksit nano partiküller baz akışkanda süspanse edildikten sonra dikkate değer ve çok faydalı kimyasal kararlılık ve difüzyon sergilerken ısı iletkenlik gibi ısı özellikleri iyileştirmede çekici değildir. Öbür tarafta ise alüminyum, bakır ve gümüş gibi metal nano partiküller dikkate değer bir şekilde ısı iletkenliği artırırken karalı bir nano akışkan elde etmede yetersizdir. Metal nano partiküller metal oksit ve seramik nano partiküller ile birleştirilerek hem kararlı hem de yüksek ısı iletkenliğe sahip nano akışkanlar hazırlanabilir. Ancak hazırlanan her hibrit nano akışkanın ısı iletkenliği ya da başka bir özelliğinin kendini oluşturan nano partiküllerin özelliklerinden daha iyi olacağının bir garantisi yoktur. Literatürde bununla alakalı çalışmalar da mevcuttur [64].

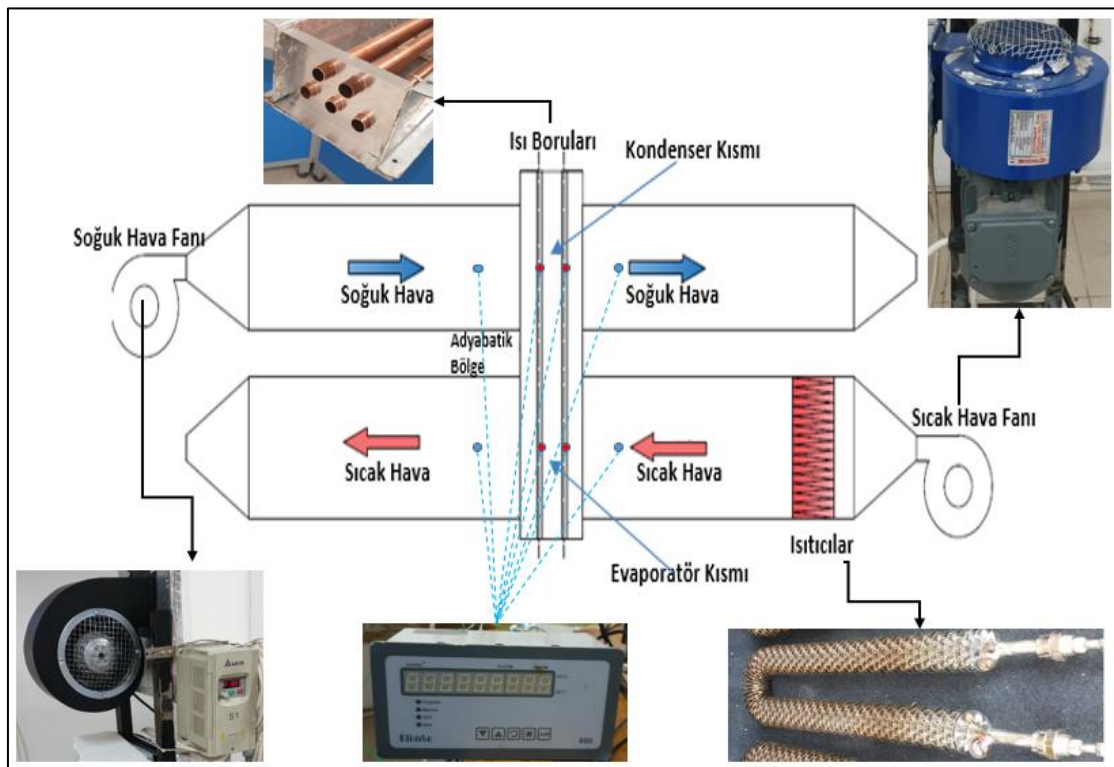




6. MATERYAL VE METOT

6.1. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar

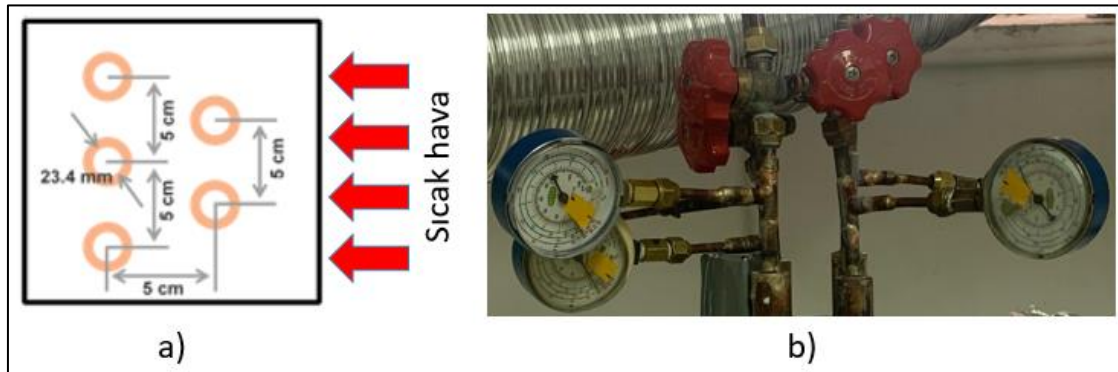
Deney düzeneğinin şematik görünümü ve üzerine yerleştirilmiş olan ekipmanlar Şekil 6.1’de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi, deney düzeneği iki adet hava kanalından oluşmaktadır. Kanallar dikdörtgen kesitli olup her biri 1,2 m uzunluğunda olan 4 parçadan oluşmaktadır.



Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü ve parçaları

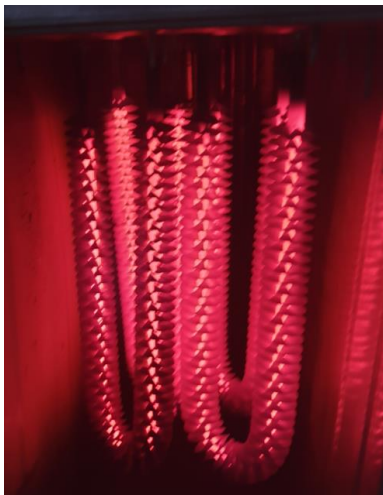
Üst üste yerleştirilmiş olan iki hava kanalının tam ortasında 5 adet ısı borusundan oluşan bir ısı borusu grubu yer almaktadır. Isı borularının malzemesi bakır olup iç çapları 23,4 mm, et kalınlıkları 1mm ve boyları 1m’dir. Isı borularının yerleşimi Şekil 6.2 (a)’da görüldüğü gibi merkezler arasında 5 er cm’lik mesafe olacak şekilde saptırmalı olarak yerleştirilmiştir. Böylece her ısı borusunun hava ile doğrudan teması sağlanmıştır. Isı borularının alt kanalda kalan 45 cm’lik kısmı evaporatör bölgesi, üst kanaldaki 40 cm’lik kısmı kondenser bölgesi ve iki kanal arasındaki 15 cm’lik kısım da herhangi bir ısı transferinin gerçekleşmediği adyabatik bölge olarak tanımlanmaktadır. Bölgelerin adlarından da anlaşılacağı gibi evaporatör bölgesinde çalışma akışkanına bir ısı girdisi olmakta ve akışkan

buharlaşmaktadır. Buharlaşan akışkan kondenser bölgesinde üst kanaldan geçen soğuk hava ile soğutulmakta ve yoğunlaşmaktadır. Bu döngü sıcak ve soğuk hava arasında belli bir sıcaklık farkı olduğu sürece devam etmektedir. Isı borularına akışkan şarj edilmeden önce boruların vakumlanması gerekmektedir. Vakumlama işleminin yapılabilmesi ve devamında akışkan şarjı için ısı borularının üst kısımlarına ara vanalar yerleştirilmiştir. Uygulanan vakumun kontrolü ve deney sırasında takibi için her bir ısı borusuna ara vanaların hemen altına manometreler yerleştirilmiştir (Şekil 6.2 (b)).



Şekil 6.2. a) Isı borularının yerleşimi (üstten görünüş), b) Isı boruları üzerindeki ara vana ve manometreler

Bu deney düzeneği ile havadan havaya bir ısı geri kazanım ünitesinin çalışma koşulları simüle edilmektedir. Sisteme sıcak hava sağlamak için deney düzeneğinin alt kanalına 4 adet 1000'ler watt'lık elektrikli rezistans yerleştirilmiştir. Rezistansların tam çalışma durumundaki görünüşleri Şekil 6.3'te görülmektedir. Rezistanslar ayrı ayrı devreye alınabilecek şekilde elektrik bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 6.3. Elektrikli rezistansların tam çalışma hali

Kanallardaki hava akışları kanal girişlerindeki iki adet salyangoz fan ile sağlanmaktadır. Bu fanlar motor sürücülerini sayesinde farklı frekanslarda çalıştırılabilmektedir. Böylece kanal içinde farklı hız ve debilerde deney yapma imkânı vardır. Kanallardaki hava hızlarının ölçülmesinde dijital anemometre kullanılmıştır. Ayrıca deneyler sırasında ortamın aşırı ısınmasını önlemek için kanalların çıkışları dış ortama verilmiştir.

Isı transfer çözümlerlerinin yapılabilmesi için gerekli olan sıcaklık değerleri, K tipi ısı çiftleri ile ölçülerek Elimko firmasının 16 kanallı E-680 model numaralı veri kaydetme cihazı üzerinden bilgisayara aktarılmış ve kaydedilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde, sıcak ve soğuk kanal giriş-çıkışlarında 4 adet, ısı borularının evaporatör ve kondenser kısımlarında 10 adet olmak üzere toplamda 14 adet ısı çifti kullanılmıştır.

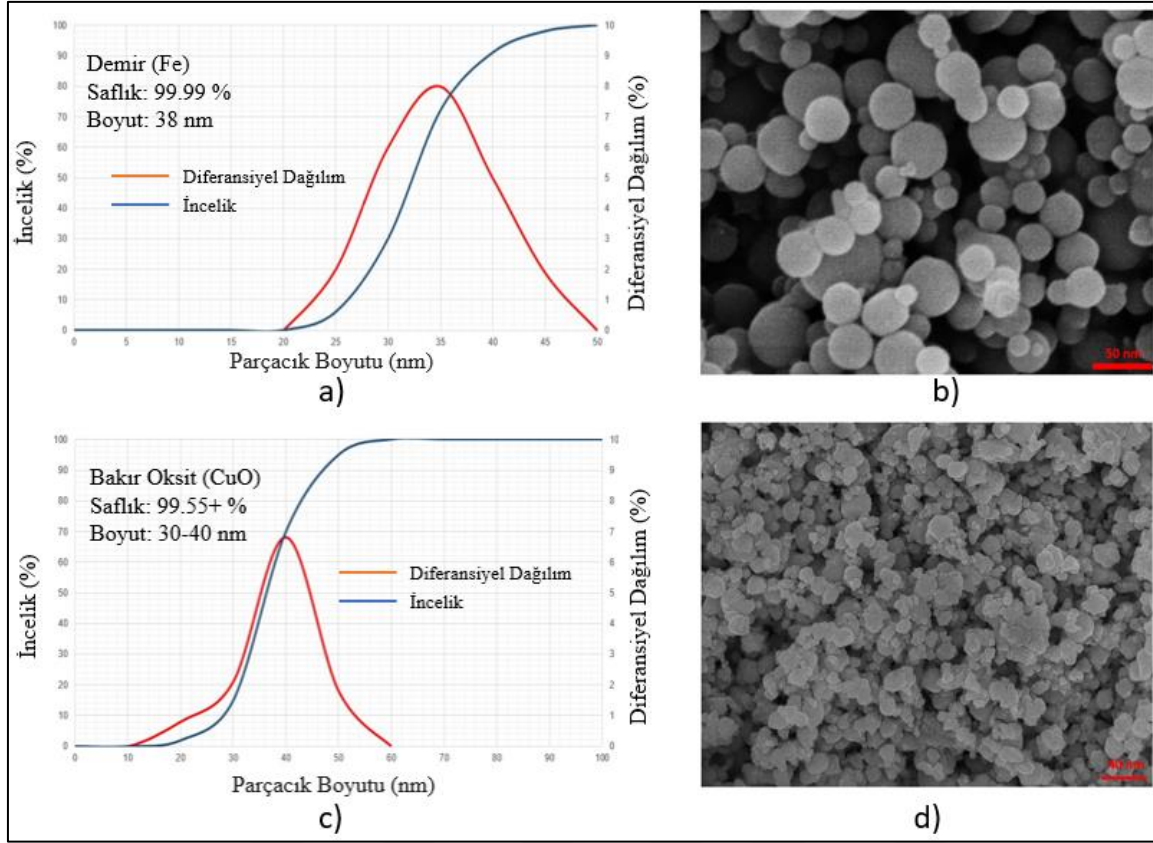
6.2. Çalışma Akışkanının Hazırlanması

6.2.1. Nano partiküller

Nano akışkan hazırlamak için kullanılan CuO (bakır oksit) ve Fe (demir) nano partiküller toz halde Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir. Bu partiküllerin termofiziksel özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Nano partiküllerin SEM görüntüleri ve Partikül boyut dağılımları Şekil 6.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Nano partiküllerin termofiziksel özellikleri

Nano Partikül	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Öz Isı (J/kg K)
Bakır Oksit (CuO)	6320	32,9	531
Demir (Fe)	7800	76,2	440

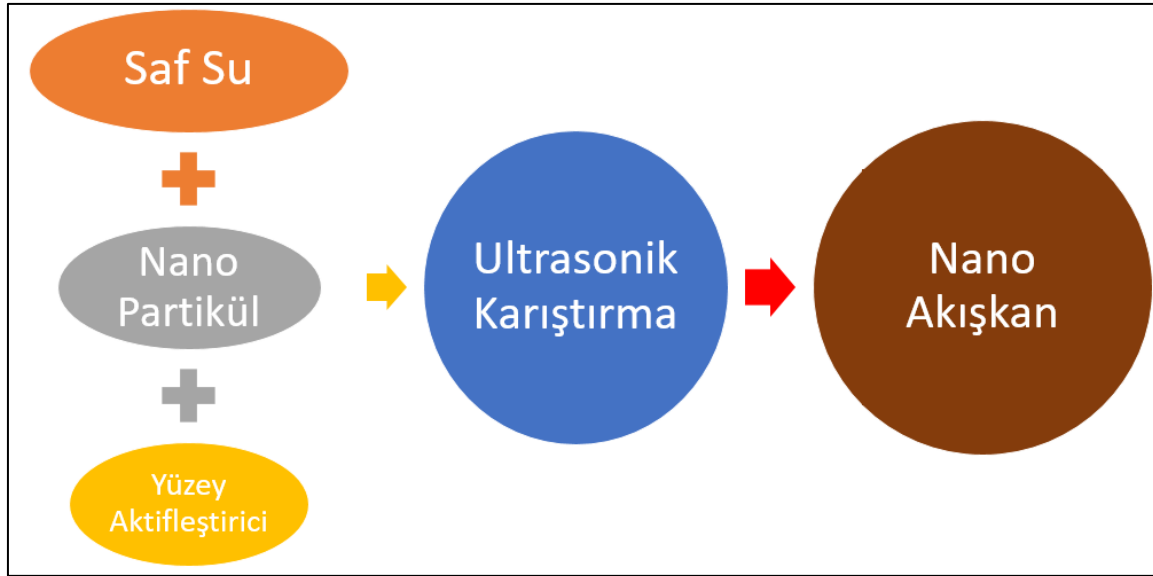


Şekil 6.4. Nano partiküllerin partikül boyut dağılım grafikleri a) Demir, c) Bakır oksit ve SEM görüntüleri b) Demir, d) Bakır oksit

6.2.2. Nano akışkan hazırlama

Nano akışkan hazırlamada iki adımlı yöntem olarak bilinen, önce nano partiküllerin üretilip sonra nano akışkanın üretildiği yöntem tercih edilmiştir. Nano partiküller tedarikçi firmadan nano boyutlarda tedarik edildiği için doğrudan ikinci adım uygulanarak nano akışkanlar hazırlanmıştır (Şekil 6.5).

Nano partikül konsantrasyonunun artması nano akışkanın ısı özelliklerini iyileştirmektedir. Fakat yüksek konsantrasyon başta çökeltme sorunu olmak üzere bazı sorunlara neden olmaktadır [78]. Literatür incelenerek optimum konsantrasyon oranının kütlece % 2 olduğuna karar verilmiş ve nano akışkanlar kütlece % 2 partikül konsantrasyonunda hazırlanmıştır. Ayrıca Şekil 6.5’de de görüldüğü gibi saf su ve nano partikülün yanı sıra karışıma bir de yüzey aktifleştirici madde ilave edilmiştir. Burada amaç çökelmelerin minimize edilmesidir. Yüzey aktifleştirici madde olarak kimyasal formülü $C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$ olan Triton X-100, ağırlıkça % 0,2 oranında karışıma eklenmiştir.



Şekil 6.5. Nano akışkanın hazırlanması

Oluşturulan karışımın kararlılığının artırılması için 6 saat süreyle Şekil 6.6’da görülen ultrasonik banyoda bekletilmiştir. Banyonun özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Ultrasonik banyonun haznesindeki su ultrasonik titreşimlerin etkisiyle zamanla ısınmaktadır. 60 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda yüzey aktifleştirici madde ile nano partiküller arasındaki bağın tahrip olacağı ve kararlılığının bozulacağı dikkate alınarak belli aralıklarla banyonun suyu değiştirilmiş ve böylece su sıcaklığının artmasına engel olunmuştur.



Şekil 6.6. Ultrasonik banyo görünümü

Çizelge 6.2. Ultrasonik banyonun özellikleri [79]

Sıcaklık aralığı	+5°C-+80°C
Hacim	6L
Ultrasonik güç	180 W
Frekans	40 Hz
Isıtıcı gücü	300 W
Zaman ayarı	1-60 dk

Yukarıda anlatılan yöntem ile iki farklı nano akışkan hazırlanmıştır. Bu akışkanlardan biri CuO/Saf su nano akışkanı diğeri de CuO+Fe/Saf su hibrit nano akışkanıdır. Hazırlanan hibrit nano akışkan ağırlıkça 1:1 oranında CuO ve Fe nano partikülleri içermektedir. Nano akışkanların görünümü Şekil 6.7’de görülmektedir.



Şekil 6.7. Hazırlanan nano akışkanlar

6.2.3. Nano akışkanların termofiziksel özelliklerinin tayini

Kullanılan nano partiküllere göre çalışma akışkanının termofiziksel özelliklerinde değişiklikler olabilmektedir. Bu akışkanların termofiziksel özelliklerinin doğru belirlenmesi yapılacak olan çözümlemelerde önemli rol oynamaktadır.

Yoğunluk

Nano partiküllerin yoğunluk tayini deneysel olarak yapılmıştır. Akışkan hazırlama işleminden hemen sonra belli miktarda akışkan, darası önceden alınmış olan şırıngaya çekilerek tartılmıştır (Şekil 6.8). Kütle /hacim oranı bulunarak akışkanın yoğunluğu tespit edilmiştir. Bu işlem art arda 3 kez tekrarlanarak bulunan yoğunluk değerlerinin ortalaması nihai yoğunluk olarak kayıt altına alınmıştır.



Şekil 6.8. Nano akışkanların yoğunluk ölçümü

Viskozite

CuO/Saf su ve CuO+Fe/Saf su nano akışkanlarının viskoziteleri sırasıyla denklem 6.1 [80] ve 6.2 [81] kullanılarak hesaplanmıştır. Burada μ_{nf} nano akışkanın viskozitesi, μ_{bf} baz sıvının viskozitesi, ϕ_{np} nano akışkanın konsantrasyonunu göstermektedir.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\phi_{np})^{2.5}} \quad (6.1)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 32.795\phi - 7214\phi^2 + 714600\phi^3 - 0.1941\phi^4) \quad (6.2)$$

Özgöl ısı kapasitesi

Özgöl ısı kapasitesi değeri akışkanlar için önemli özelliklerden biridir. Hazırlanan nano akışkanların özgöl ısı değerleri literatürde sıklıkla kullanılan bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Denklem 6.3 [80] ve 6.4 [82] sırasıyla CuO/Saf su ve CuO+Fe/Saf su nano akışkanlarının özgöl ısı kapasitelerinin belirlenmesi için kullanılmıştır.

$$c_{p,nf} = (1 - \varphi_{np})c_{p,bf} + \varphi_{np}c_{p,np} \quad (6.3)$$

$$c_{p,hnf} = \frac{\varphi_{np1}\rho_{np1}c_{p,np1} + \varphi_{np2}\rho_{np2}c_{p,np2} + (1 - \varphi_{np1} - \varphi_{np2})\rho_{bf}c_{p,bf}}{\rho_{hnf}} \quad (6.4)$$

Denklem 6.3'teki $c_{p,nf}$ nano akışkanın özgöl ısı kapasitesi, $c_{p,bf}$ baz sıvının özgöl ısı kapasitesi, $c_{p,np}$ nano partikülün özgöl ısı kapasitesidir. Denklem 6.4 'teki $c_{p,hnf}$ hibrit nano akışkanın özgöl ısı kapasitesini, φ_{np1} ve φ_{np2} iki nano partikülün karışım içindeki konsantrasyonlarını, ρ_{bf} baz akışkanın yoğunluğunu, $c_{p,bf}$ baz akışkanın özgöl ısısını, ρ_{hnf} de hibrit nano akışkanın yoğunluğunu göstermektedir.

Isı iletim katsayısı

CuO/Saf su nano akışkanının ısı iletim katsayısı denklem 6.5 [83], CuO+Fe/Saf su hibrit nano akışkanının ısı iletim katsayısı ise denklem 6.6 [81] kullanılarak hesaplanmıştır. Burada k_{statik} , k_f ve k_p sırasıyla nano akışkanın statik ısı iletim katsayısı, baz sıvının ısı iletim katsayısı ve nano partikülün ısı iletim katsayısını göstermektedir. k_{nf} , hibrit nano akışkanın ısı iletim katsayısını, k_{bf} baz akışkanın ısı iletim katsayısını, φ_p de nano partikül konsantrasyonunu göstermektedir.

$$\frac{k_{statik}}{k_f} = 1 + \frac{3\left(\frac{k_p}{k_f} - 1\right)\varphi}{\left(\frac{k_p}{k_f} + 2\right) - \left(\frac{k_p}{k_f} - 1\right)\varphi} \quad (6.5)$$

$$k_{nf} = k_{bf} \left(\frac{0.1747 \cdot 10^5 + \varphi_p}{0.1747 \cdot 10^5 - 0.1498 \cdot \varphi_p + 0.1117 \cdot 10^7 \cdot \varphi_p^2 + 0.1997 \cdot 10^8 \cdot \varphi_p^3} \right) \quad (6.6)$$

6.3. Deneyin Yapılışı

6.3.1. Deneyler

Sistemin farklı sıcaklık ve hava hızlarındaki performansının ve optimum çalışma şartlarının belirlenmesi için 2 farklı ısıtma gücü, 3 farklı sıcak hava hızı ve 2 farklı soğuk hava hızında deneyler yapılmıştır. İki nano akışkan ve 1 saf su olmak üzere toplamda 3 akışkan için deneyler tüm koşullarda tekrarlanmıştır. Yapılan deneylerin listesi Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi tüm akışkanlar için 12 ayrı deney yapılmıştır.

Çizelge 6.3. Yapılan deneylerin listesi

Deney no	Isıtıcı gücü (W)	Sıcak hava hızı (m/s)	Soğuk hava hızı (m/s)
1	1000	0,555	0,437
2	1000	0,555	0,751
3	1000	0,702	0,437
4	1000	0,702	0,751
5	1000	0,985	0,437
6	1000	0,985	0,751
7	2000	0,555	0,437
8	2000	0,555	0,751
9	2000	0,702	0,437
10	2000	0,702	0,751
11	2000	0,985	0,437
12	2000	0,985	0,751

Deney adımları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Akışkan hazırlama
- Akışkanın yoğunluk ölçümü
- Isı borularının vakumlanması
- Isı borularına akışkan şarjı
- Deneyin başlatılması

İş akışkanları önceki bölümde anlatıldığı gibi iki adımlı yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Isı borularına akışkan şarjından önce akışkanların yoğunluk tespiti kütle/hacim oranına

dayalı olarak belirlenmiştir. Vakumlama işlemi en kritik adımlardan birisidir. Çünkü ısı borularının vakum miktarı çalışmasını doğrudan etkilemektedir. O yüzden vakumlama işlemi doğru yapılmalıdır. Deneylere başlamadan önce her bir ısı borusu 30 dakika süreyle vakumlanmıştır. Yapılan vakum miktarı ısı borularının üst kısmında yer alan manometrelerden deneyler boyunca takip edilebilmektedir. Isı borularına akışkan şarjı bir şırınga yardımıyla yapılmıştır. Kullanılan şırınganın ucunda supap bağlantısına uyumlu bir aparat yer almaktadır. Her bir ısı borusuna 65'er ml akışkan şarjı yapılmıştır. Bu değer ısı borusunun evaporatörünün üçte birlik kısmına tekabül etmektedir. Akışkan şarjı tamamlandıktan sonra ilk deney koşulu ile deneye başlanmıştır.

6.3.2. Deneyin yapılışı

Sıcak havanın elde edilmesi için sıcak hava kanalına yerleştirilen 4 adet ısıtıcı rezistanstan biri ya da ikisi çalıştırılarak ilgili deney koşulunun ısıtma şartı sağlanır. Fanlar da ilgili deney koşulunun gerektirdiği konumlara getirilerek deneye başlanır. Deney düzeneğinin her iki kanalının da çıkışı dış ortama verilmiştir. Bu sayede ortamın ısınmasından kaynaklanabilecek farklılıkların önüne geçilmiştir. Ayrıca soğuk hava kanlının emiş ucu da dışarıya bağlanmıştır. Sonuçlar 16 kanallı veri kaydedici ile bilgisayar ortamına aktarılıp kaydedilmektedir. Sonuç değerlerinin alınması için sıcaklıkların dengeye gelmesi beklenmiştir. Sıcaklıklar yaklaşık 30 dakikada dengeye gelmektedir. Sonuçlar kaydedildikten sonra diğer koşula geçilmeden önce sistem soğutularak tüm deneylerin eşit şartlarda yapılması sağlanmıştır. Her akışkan için toplamda 12 koşulda deney yapılmıştır. 12. deneyin sonunda diğer bir akışkan için tüm adımlar tekrarlanarak deneyler 3 akışkan için tamamlanmıştır.

6.4. Deney Sonuçlarının Çözümlemesi

Havadan havaya ısı geri kazanın ünitesi ısı boruları sayesinde alt kanaldan aldığı ısıyı üst kanala aktarmaktadır. Sistemin verimi soğuk havanın kazandığı enerjinin sıcak havanın kaybettiği enerjiye oranı olarak hesaplanmıştır (denklem 6.7). Burada $\dot{Q}_k$ kondenserde soğuk hava tarafından alınan ısı enerjisi miktarıdır. $\dot{Q}_e$ ise evaporatörde sıcak havanın kaybettiği enerji miktarıdır. Soğuk havanın kazandığı ısı miktarı denklem 6.8 ile, sıcak havanın kaybettiği ısı miktarı da denklem 6.9 ile hesaplanmıştır [84]. Bu denklemlerde yer alan $\dot{m}$ havanın kütleli debisini, c_p havanın özgül ısısını, T ise sıcaklık değerlerini göstermektedir.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_e} \quad (6.7)$$

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_{soğuk\ hava} c_{p,soğuk\ hava} (T_{soğuk\ çıkış} - T_{soğuk\ giriş}) \quad (6.8)$$

$$\dot{Q}_e = -\dot{m}_{sıcak\ hava} c_{p,sıcak\ hava} (T_{sıcak\ çıkış} - T_{sıcak\ giriş}) \quad (6.9)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q_e} \quad (6.10)$$

$$Re = \frac{\rho_{hava} V_{ort} D_h}{\mu} \quad (6.11)$$

Isı borularının ısıl direnç değerleri evaporatör ve kondenser bölgeleri arasındaki ortalama sıcaklık farklarının evaporatörde sistemin aldığı enerji miktarına oranı olarak denklem 6.10 [84] yardımıyla bulunmuştur. Kanal içlerindeki akışın tipinin belirlenmesi için Re sayısı denklem 6.11 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada ρ havanın yoğunluğunu, V_{ort} kanal içindeki ortalama hava hızını, D_h hidrolik yarıçapı ve μ de havanın dinamik viskozitesini göstermektedir. Re değerleri ayrıca sonuçların grafiksel olarak ifade edilmesinde de kullanılmıştır.

6.5. Deney Sonuçlarının Belirsizlik Analizi

Elde edilen verilerde deney cihazlarından veya diğer bazı koşullardan kaynaklanan sapmalar söz konusudur. Bu sapmaların kabul edilebilir değerler arasında olup olmadığını anlamak için verilerin belirsizlik analizinin yapılması gerekmektedir. Bu sapmalar ölçüm aletlerinin kalibrasyonundan, okuma hatalarından veya cihaz ve malzeme seçiminden kaynaklanabilir [85]. Belirsizlik hesabı denklem 6.12 ile yapılabilir [86].

$$U_s = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial x_3} U_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial S}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]} \quad (6.12)$$

Burada $x_1, x_2, \dots, x_n$ bağımsız değişkenlerdir. S, bu bağımsız değişkenlere bağlı bir fonksiyondur. U_s , sonuçların toplam belirsizliğidir. U_1, U_2, U_n şeklinde gösterilen ifadeler ise bağımsız değişkenlerin belirsizlikleridir.

6.6. Sayısal Analiz

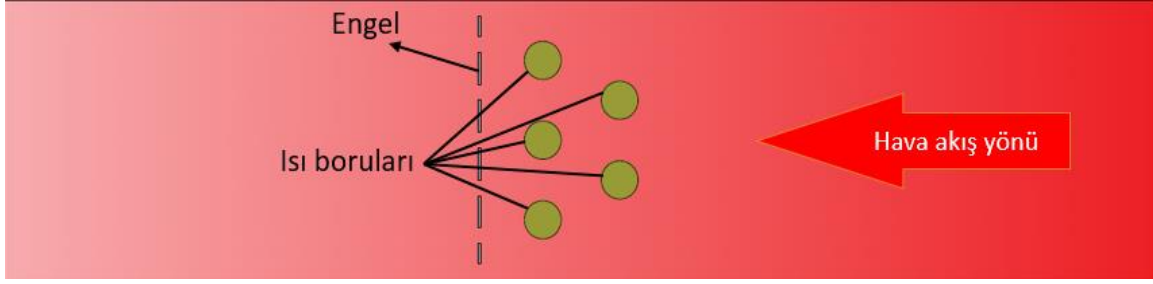
Mühendislik problemlerinin çözülmesinde, deneysel, teorik ve sayısal analizler olmak üzere üç ana yöntem mevcuttur. Problemin durumuna göre bu yöntemlerden biri ya da bir kaç kullanılabilmektedir. Deneysel yöntem ile en doğru sonuçlara ulaşmak mümkün olsa da zaman bakımından kısıtlı problemlerde kullanımı uygun olmayabilir. Ayrıca deneysel sistemlerin maliyeti ve uygulama güçlüğünden kaynaklanan dezavantajları da vardır. Bu nedenlerden ötürü deneysel çözümün mümkün olmadığı problemlerde diğer yöntemlerden biri tercih edilmek durumunda kalınabilir. Teorik yöntemde daha önceki çalışmalar dikkate alınarak bazı bağıntılar mevcut problemin çözümünde kullanılabilir. Sayısal analiz ise belirlenen bir çözüm alanında problemin gerçek şartlarına en uygun matematiksel modelin denklem sistemleri yardımıyla çözülmesidir. Sayısal analiz yöntemleri birçok probleme uygulanabilirliği ve gerçeğe oldukça yakın sonuçlar vermesi dolayısıyla çokça kullanılmaktadır. Ayrıca deneysel sonuçların doğrulanması için de sayısal analiz yöntemlerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Ancak sayısal analiz yöntemlerinin, çözümün belli bir alan için elde edilmesi ve kesme-yuvarlama gibi hataları gibi dezavantajları da vardır [87].

Sayısal analiz yönteminde çözüm yapılırken aşağıdaki adımlar takip edilmiştir;

- Geometrinin oluşturulması
- Ağ yapısının oluşturulması
- Sınır şartlarının belirlenmesi
- Problemin çözdürülmesi
- Sonuçların alınması

6.6.1. Geometrinin oluşturulması

Sayısal analizin birinci adımı geometrinin oluşturulmasıdır. Çözümün doğru olabilmesi için oluşturulan geometrinin gerçek şartlara en uygun şekilde olması hayati önem taşımaktadır. Deney düzeneğinin 2 boyutlu geometrisi AutoCAD 2020 (Student Version) programı kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 6.9).

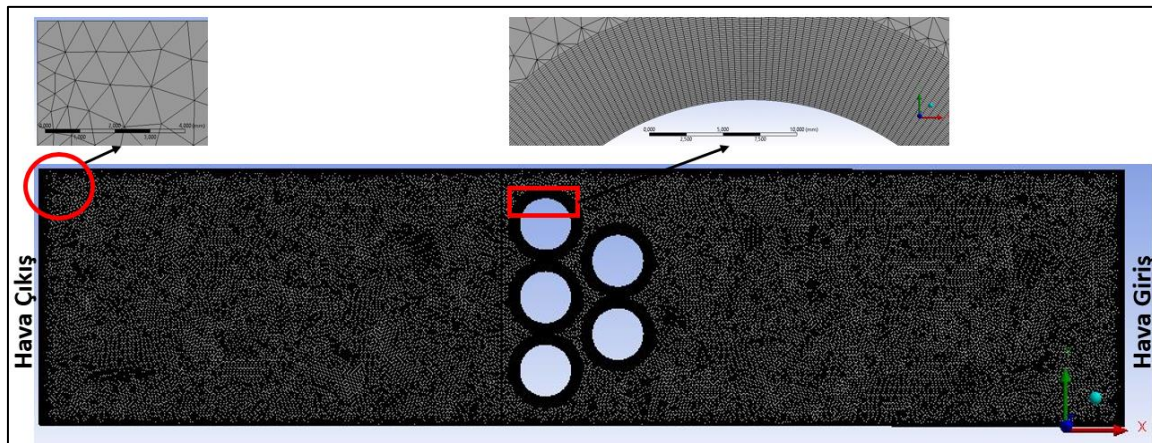


Şekil 6.9. Sıcak hava kanalının 2 boyutlu geometrisi (üstten görünüş)

AutoCAD programı ile oluşturulan bu geometriyi ANSYS 19.2 programında açabilmenin çeşitli yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden biri, kapalı alanları “Region” komutu ile bölgelere ayırıp daha sonra “Export” işlemi ile, sat uzantılı ACIS formatında kaydetmektir. Böylece ANSYS 19.2 programının iki tasarım modülünden biri olan “Design-Modeler” aracılığı ile akış hacmi oluşturulabilmektedir. Bunun için “Boolean” komutundan yararlanılmıştır.

6.6.2. Ağ (Mesh) yapısının oluşturulması

Problemin doğru çözülebilmesi oluşturulan ağ yapısıyla doğrudan ilgilidir. Ağ yapısı ne kadar kaliteli olursa problem o kadar gerçeğe yakın sonuçlar verecektir. Sıcak hava kanalının ağ yapısının detayı Şekil 6.10’ da görülmektedir. Soğuk hava kanalının yapısı da benzer şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 6.10. Sıcak hava kanalının ağ yapısı

Ağ yapısı (mesh) oluşturmak için ANSYS programının MESHİNG modülü kullanılmıştır. Doğru bir çözüm yapabilmek için optimum ağ yapısının oluşturulması esastır. Çözümün

süresini ve doğruluğunu etkileyen parametrelerden biri oluşturulan ağ yapısının eleman sayısıdır. Eleman sayısı çok az olduğu takdirde çözüm yüzeysel olacaktır ve doğruluktan uzak olacaktır. Eleman sayısının aşırı fazla olması da çözümü zorlaştıracak ve oldukça fazla zaman alacaktır. Çözümlemede kullanılan ağ yapısının eleman sayısı 156835 (sıcak kanal için) olup düğüm sayısı da 121185 'dir. Bu değerlere karar verilmeden önce farklı eleman sayısı ve düğüm sayılarında oluşturulan ağlar ile çözümler yapılmış ve gerçek değerlere en yakın sonuç bu ağ yapısında elde edilmiştir.

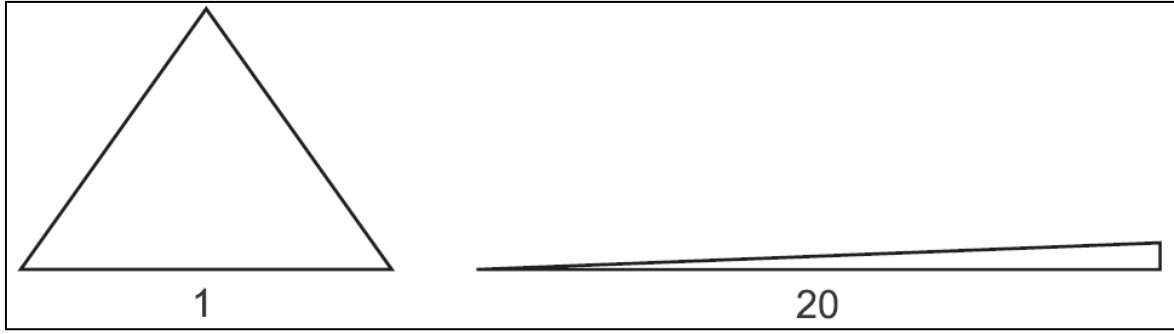
Ağ kalitesinin değerlendirilmesi

Oluşturulan ağ yapısının kalitesinin değerlendirilmesi için birkaç parametreye bakılması gerekmektedir. Bunlar;

- Eleman kalitesi (Element Quality)
- En-Boy oranı (Aspect Ratio)
- Jakobi oranı (Jacobian Ratio)
- Eğrilme faktörü (Warping Factor)
- Paralel sapma (Parallel Deviation)
- Maksimum köşe açısı (Maximum Corner Angle)
- Çarpıklık (Skewness)
- Diklik kalitesi (Orthogonal Quality)

Eleman kalitesi her bir eleman için hesaplanan ve değeri 0 ile 1 arasında değişen bir sayıdır. Eleman hacminin kenar uzunluğuna oranı olarak tanımlanır. Eleman kalitesi (Element Quality) değerinin 1 olması şeklin mükemmel küp ya da kare olduğunu ifade eder [88]. Yani bu değer 1 e yaklaştığında oluşturulan ağ yapısının kalitesi yüksek demektir.

En-boy oranı ağ yapısındaki elemanların kalitelerini değerlendirmek için diğer bir kriterdir. Bu değer 1 e yakın olması istenir. Örnek olarak en-boy oranı 1 olan ve 20 olan üçgenler Şekil 6.11'de verilmiştir.



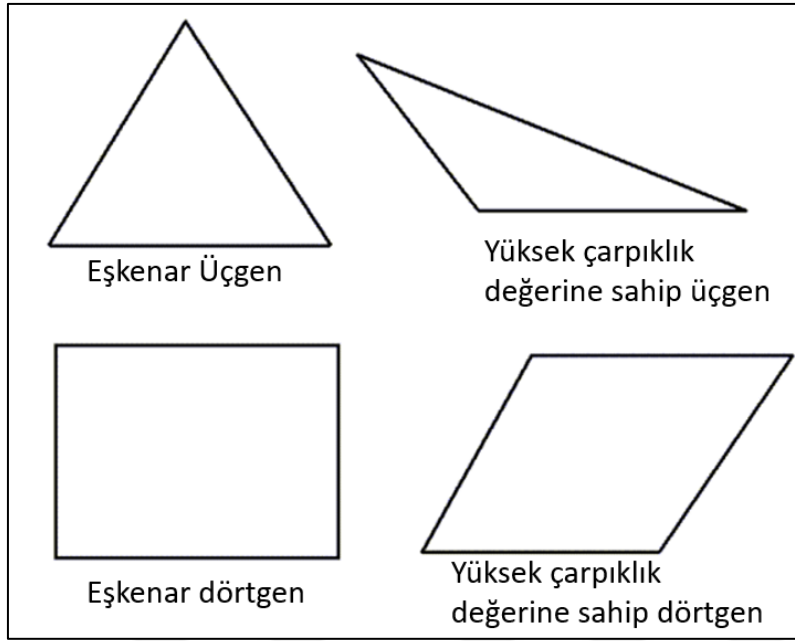
Şekil 6.11. En-boy oranı 1 ve 20 olan üçgenler [88]

Oluşturulan ağın kalitesini değerlendirmek için kullanılan öncelikli kriterlerden biri de elemanların çarpıklık değerleridir. Çarpıklık değerleri 0 ile 1 arasında değerler alır ve 0'a yaklaştıkça ağ yapısının kalitesi artar. Bir elemanın çarpıklık değeri denklem 6.13 ile hesaplanmaktadır. Bazı çarpıklık değerleri ve eleman kalite tanımları Çizelge 6.4'te verilmiştir [88]. Şekil 6.12'de çarpıklık değeri 0 olan ve 1'e yakın olan üçgen ve dörtgen şekiller gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Çarpıklık değerlerine göre eleman kalitesi tanımları

Çarpıklık Değeri	Eleman Kalitesi
1	Çok kötü
0,9-1	Kötü
0,75-0,9	Zayıf
0,5-0,75	Vasat
0,25-0,5	İyi
>0-0,25	Mükemmel
0	Eşkenarlı Şekil

$$\text{Çarpıklık} = \frac{\text{Optimum Eleman Boyutu} - \text{Mevcut Eleman Boyutu}}{\text{Optimum Eleman Boyutu}} \quad (6.13)$$



Şekil 6.12. Farklı çarpıklık değerlerindeki şekiller [88]

Diğer bir ağ yapısı değerlendirme kriteri olan diklik kalitesi değeri 0 ile 1 arasında değerler alır. Diklik kalitesinin değer aralığı 0 ile 1 arasındadır. 0 değeri en kötü değer iken 1 değeri en iyi değerdir [88]. Oluşturulan ağ yapısına ait değerlendirme kriterlerinden bazıları Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Oluşturulan ağ yapısının değerlendirme kriterleri

Ağ Yapısı Değerlendirme Kriterleri				
	Eleman Kalitesi	En-Boy Oranı	Çarpıklık	Diklik Kalitesi
Maksimum	1	6,2227	0,93226	1
Minimum	0,30075	1,0004	0,00000034	0,30315
Ortalama	0,72029	2,5074	0,04	0,98154
Standart Sapma	0,23201	1,2462	0,06	0,04

6.6.3. Sınır şartlarının belirlenmesi ve sayısal çözüm

Sınır şartlarının belirlenmesi işlemi de sonucu doğrudan etkileyen faktörlerden biridir. ANSYS MESHING modülünde ağ yapısının oluşturulmasının yanı sıra sınır şartlarının girilebilmesi için bazı tanımlamaların da yapılması gerekmektedir. Bu tanımlamalar, havanın giriş ve çıkış yerlerinin belirlenmesi, akış hacminin ve sınırlarının tanımlanması, ısı borusunun ve ısı borusu önünde yer alan engelin katı duvar olarak tanımlanmasıdır. Bu

tanımlamalardan sonra ANSYS FLUENT modülüne geçilerek bazı ayarlamalar yapılmıştır. Gerçekleşen ısı transferinin hesaplanabilmesi için enerji denklemi açık konuma getirilmiştir. Kanal içindeki akış türbülanslı olduğu için k-ε RNG türbülans modeli seçilmiştir. Standart k-ε modeli yüksek Re sayıları için daha uygun iken RNG modeli düşük Re sayılarına daha uygundur [87]. Çözümleme, deneylerde elde edilen hava giriş sıcaklıklarının programa girilerek çıkış sıcaklıklarının belirlenmesi şeklinde yapılmıştır. Bunun için hava giriş şartı sıcaklık giriş (temperature inlet) şeklinde tanımlanmış ve her koşul için deneyde elde edilen sıcaklık ve hava hızı değerleri programa girilmiştir. Kanalın çıkış ağzı atmosfere açık olduğu için çıkış şartı basınç çıkış (pressure outlet) olarak ayarlanmıştır. Akış hacminin duvarlarından dışarıya herhangi bir ısı transferi söz konusu değildir. Isı borusunun yüzeyleri ve engel de katı duvar olarak tanımlanmıştır. İterasyon sayısı 4000 olarak girilmiş ve çözümleme işlemi başlatılmıştır. Bu işlemler deneysel koşulların her biri için tekrarlanmıştır.

Sayısal analiz işlemlerinde kullanılan momentum, enerji ve kütle korunum denklemleri ile k-ε denklemleri sırasıyla denklem 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19'da verilmiştir [86].

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (6.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho v_j c_p T - k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \left[\mu \left(\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (6.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - \alpha \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6.18)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.19)$$

Bu denklemlerde kararlı halin söz konusu olduğu, akışın sürekli ve sıkıştırılamaz olduğu, akışkanların fiziksel özelliklerinin değişmediği ve yer çekimi etkisinin olmadığı kabul edilmiştir.

6.6.4. Analiz sonuçlarının alınması

Yapılan analizin sonuçları ANSYS programının SONUÇLAR modülü kullanılarak incelenmiştir. Burada kanal boyunca olan sıcaklık ve hız dağılım konturları ile hız akış çizgileri oluşturularak kanal içinde nasıl bir akış rejiminin olduğu görsel olarak irdelenmiştir.



7. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Nano Akışkanların Termofiziksel Özellikleri

Nano akışkan hazırlamak için kullanılan CuO ve Fe nano partiküllerinin özellikleri 6. bölümde açıklanmıştır. Hazırlanan nano akışkanların yoğunluk değerleri kütle/hacim yöntemi kullanılarak deneysel olarak belirlenmiş, diğer termofiziksel özellikleri de literatürde sıklıkla kullanılan bazı bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Nano akışkanların termofiziksel özellikleri çizelge 7.1’ de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde CuO/Saf Su ve CuO+Fe/Saf Su nano akışkanlarının ısı iletkenlik katsayılarında saf suya kıyasla sırasıyla %10’luk ve %15’lik artış oranlarının olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.1. Nano akışkanların termofiziksel özellikleri

Nano Akışkan	Yoğunluk (kg/m ³)	Viskozite (kg/ms)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK)
CuO/Saf Su	1006,3	0,000937	0,66598	4107,02
CuO+Fe/Saf Su	1010,0	0,001231	0,70318	4095,56

7.2. Deneysel Sonuçlar

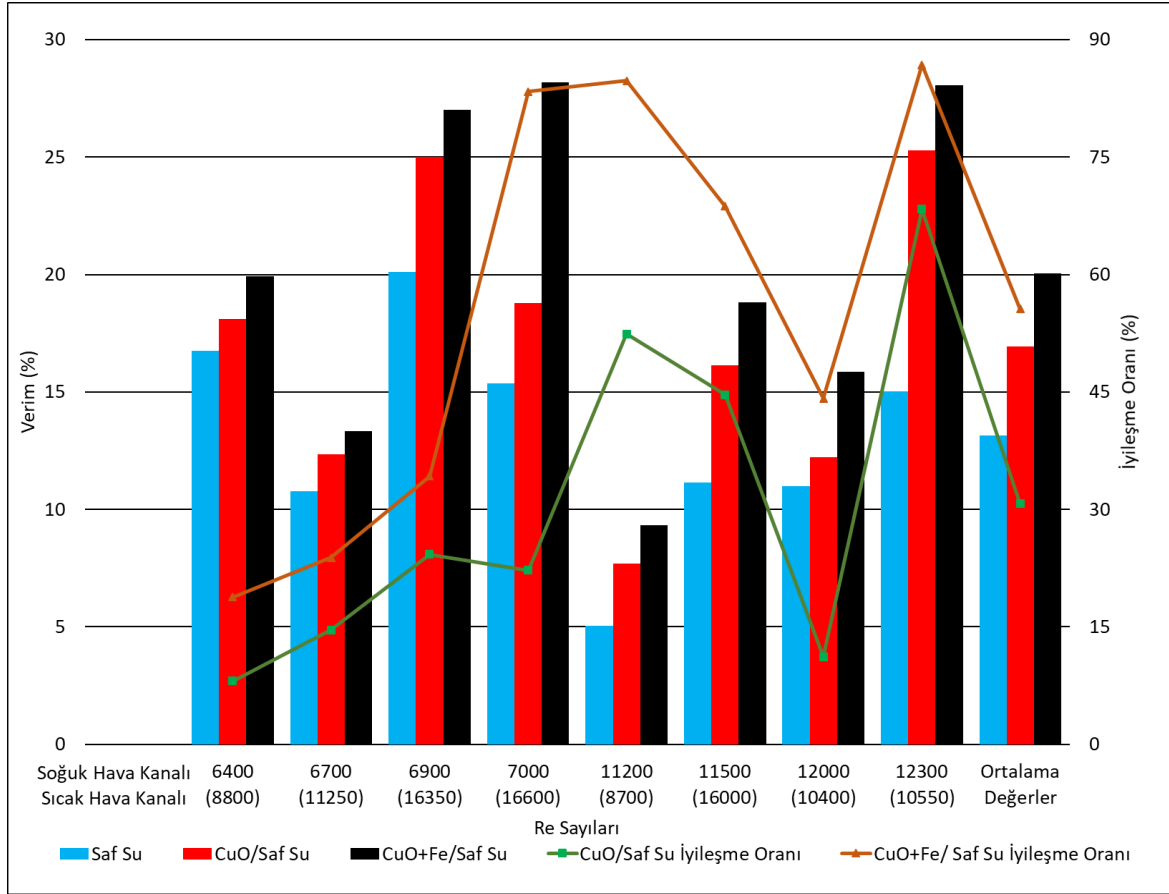
Sonuçların değerlendirilmesinde ve kıyaslanmasında 3 unsur dikkate alınmıştır. Bunlar ısı verim, ısı direnç ve ısı borusu boyunca olan duvar sıcaklıklarının dağılımıdır. Kıyaslama kanallardaki Re sayılarına göre yapılmıştır. Deney koşullarına bağlı olarak kanal içlerindeki hava sıcaklıkları oldukça farklı olmuştur. Dolayısıyla hava hızlarının aynı olduğu deneylerde bile Re sayılarında bir miktar farklılıklar söz konusudur. Grafik çizimlerinde her üç akışkan için hava kanallarında hesaplanan Re sayılarının ortalamaları kullanılmıştır.

7.2.1. Nano akışkanların ısı verim üzerindeki etkisi

Şekil 7.1’deki grafik soğuk ve sıcak kanalların kanal içlerindeki Re sayılarına göre elde edilen verim ve saf su yerine nano akışkan kullanıldığında verimlerde meydana gelen iyileşme oranlarını yüzde (%) olarak göstermektedir. Çizelge 6.3’te belirtildiği gibi deneylerde 2 farklı soğuk hava hızı (0,437 m/s ve 0,751 m/s) ve 3 farklı sıcak hava hızı (0,555 m/s, 0,702 m/s ve 0,985 m/s) kullanılmıştır. Buna bağlı olarak soğuk kanalda 6400

ile 7000 arasında ve 11200 ile 12300 arasında değişen 2 farklı Re sayısı grubu söz konusudur. Benzer şekilde sıcak kanal içinde ise 3 farklı (8700-8800/10400-11250/16000-16600) Re sayısı grubu oluşmuştur. Şekil 7.1'deki grafik soğuk kanaldaki artan Re sayılarına göre çizilmiştir. Parantez içlerinde yazılan sıcak kanal Re sayısı değerleri de o deney koşulu için sıcak kanalda hesaplanan Re sayılarıdır.

Havadan havaya ısı geri kazanım ünitesinin en önemli performans göstergesi ısı verim değerleridir. Grafik incelendiğinde ısı borularında nano akışkan kullanımının tüm deney koşullarında saf suya göre daha yüksek verim sağladığı görülür. Saf suyun kullanıldığı deneylerde %5 ile %20,1 arasında değişen değerlerde verimler elde edilmiştir. Isı borularında saf su yerine CuO/Saf Su nano akışkanı kullanıldığında verim değerleri %7,7 ile 25,3 arasında değişmiştir. Saf su yerine CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanı kullanıldığında ise verimler %9,3 ile %28,2 arasında olmuştur. Bütün deney koşulları için $\eta_{\text{CuO+Fe/Saf Su}} > \eta_{\text{CuO/Saf Su}} > \eta_{\text{Saf Su}}$ ifadesi elde edilmiştir. Yani CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanı hem CuO/Saf Su nano akışkanına göre hem de saf suya göre daha verimli sonuçlar ortaya koymuştur. En yüksek verim değeri olan % 28,2 değerine CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanının kullanıldığı, soğuk ve sıcak kanal Re sayıları sırasıyla 7000 ve 16600 olan deneyde ulaşılmıştır. Bu koşulda soğuk kanal içindeki hava hızı 0,437 m/s iken sıcak kanaldaki hava hızı 0,985 m/s dir. Yani soğuk kanal hava hızı minimum, sıcak kanal hava hızı maksimum değerde iken en yüksek verime ulaşılmıştır. CuO/Saf Su nano akışkanının kullanıldığı deneylerde en yüksek verim değerine soğuk kanal Re sayısı 12300 ve sıcak kanal Re sayısı 10550 iken % 25,3 olarak ulaşılmıştır. Bu koşulda hava hızları ise soğuk ve sıcak kanal için sırasıyla 0,751 m/s ve 0,702 m/s olmuştur.



Şekil 7.1. Kullanılan akışkana bağlı olarak elde edilen ısı verim değerlerinin ve verimlerdeki iyileşme oranlarının kanal içi Re sayılarına göre değişimi (DeneySEL)

Verimlerdeki iyileşme oranları incelendiğinde ise en yüksek iyileşme oranının yine CuO+Fe /Saf Su hibrit nano akışkanının kullanıldığı deneylerde elde edildiği görülür. İyileşme oranları saf suyun verimine göre hesaplanmıştır. En yüksek iyileşme oranı % 86,8 olarak, CuO+Fe / Saf Su hibrit nano akışkanının kullanıldığı, soğuk kanal Re sayısının 12300, sıcak kanal Re sayısının 10550 olduğu deneyde elde edilmiştir. Bu koşul aynı zamanda CuO/Saf su nano akışkanının da en yüksek iyileşme oranı olan % 68,3 değerine sahip olduğu koşuldur.

Sistemin en uygun çalışma koşulunun belirlenmesi için akışkan, verim ve iyileşme oranlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Sadece verim değerlerine bakılarak yapılacak bir değerlendirme doğru olmayacaktır. Örneğin her iki nano akışkan için de yüksek sayılabilecek verim değerlerinin elde edildiği soğuk kanal Re sayısının 6900 olduğu koşulda, saf suyun da verimi yüksek çıktığı için iyileşme oranı nispeten düşük olmuştur. Diğer yandan soğuk kanal Re sayısının 11200 olduğu koşulda iyileşme oranları her iki nano akışkan için de ortalamanın üzerinde olmasına rağmen bu koşulda tüm akışkanlar için en

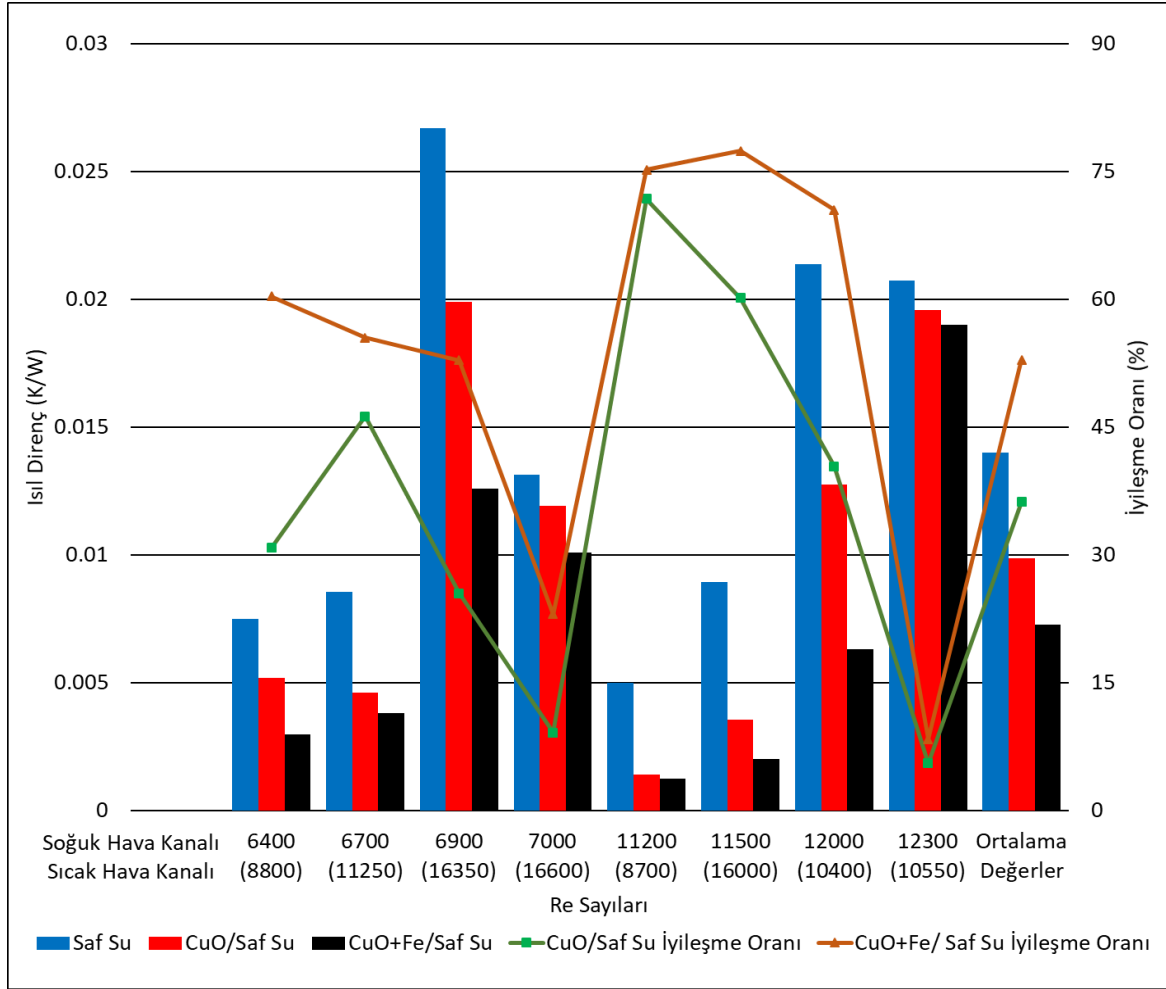
düşük verim değerleri söz konusudur. Bu yüzden verim ve iyileşme oranı değerleri göz önüne alınarak yapılacak olan bir değerlendirme daha doğru olacaktır. Bu şekilde bir değerlendirme yapılacak olursa, her iki akışkan için de soğuk kanal Re sayısının 12300 ($Re_{sıcak}=10550$) olduğu deneylerin en uygun çalışma koşulu olduğu söylenebilir.

Bir başka kıyaslama da ortalama değerler üzerinden yapılabilir. Grafiğin en sağ sütunları verimlerin ve iyileşme oranlarının ortalama değerlerini göstermektedir. Elde edilen ortalama verim değerleri Saf Su, CuO/Saf Su ve CuO+Fe/Saf Su akışkanları için sırasıyla %13,2; %16,9 ve %20,1 olmuştur. Ortalama iyileşme oranları da CuO/Saf Su ve CuO+Fe/Saf Su nano akışkanları için sırasıyla % 30,7 ve % 55,6 olmuştur. Buradan da yine CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanının CuO/Saf Su nano akışkanına ısı verimin artırılmasında daha etkin olduğu söylenebilir.

7.2.2. Nano akışkanların ısı direnç üzerindeki etkisi

Isı borularının ısı dirençleri denklem 6.10 kullanılarak hesaplanmış ve soğuk kanal Re sayılarının artan değerlerine göre Şekil 7.2’de verilmiştir. Saf su yerine nano akışkan kullanılarak evaporatörde ısı borusuna verilen enerjiden daha etkin bir biçimde yararlanılmış ve transfer edilen ısı miktarı daha fazla olmuştur. Isı transferinin fazla olması evaporatör sıcaklığının daha düşük olmasına neden olmuştur. Dolayısıyla evaporatör ve kondenser sıcaklıkları arasındaki fark ve neticede ısı direnç azalmıştır. Isıl direnç değerlerindeki azalma daha fazla bir ısı transferinin gerçekleştiğinin bir göstergesi olarak düşünülebilir.

Şekil 7.2’deki grafik incelendiğinde tüm deney koşullarında CuO+Fe/ Saf Su hibrit nano akışkanının hem CuO/Saf Su nano akışkanına hem de saf suya göre ısı dirençleri azaltmada daha etkin olduğu görülmektedir. En düşük ısı direnç değerlerine her üç akışkan için soğuk kanaldaki Re sayısı 11200 iken ulaşılmıştır. Bu koşuldaki ısı dirençlerdeki azalma (iyileşme) oranları CuO+Fe/Saf Su ve CuO/Saf Su nano akışkanları için sırasıyla % 75,2 ve % 71,8 olmuştur. En yüksek iyileşme oranı ise CuO+Fe /Saf Su hibrit nano akışkanının kullanıldığı, soğuk kanal Re sayısının 11500 olduğu deneyde % 77,4 olarak sağlanmıştır. Soğuk kanal Re sayısının 12300 ($Re_{sıcak}= 10550$) olduğu deney koşulunda üç akışkan da yüksek ısı dirençler meydana getirmiş ve ısı dirençlerdeki azalma oranları da en düşük seviyede gerçekleşmiştir.



Şekil 7.2. Kullanılan akışkana bağlı olarak elde edilen ısıl direnç değerlerinin ve ısıl dirençlerdeki iyileşme oranlarının kanal içi Re sayılarına göre değişimi (Deneysel)

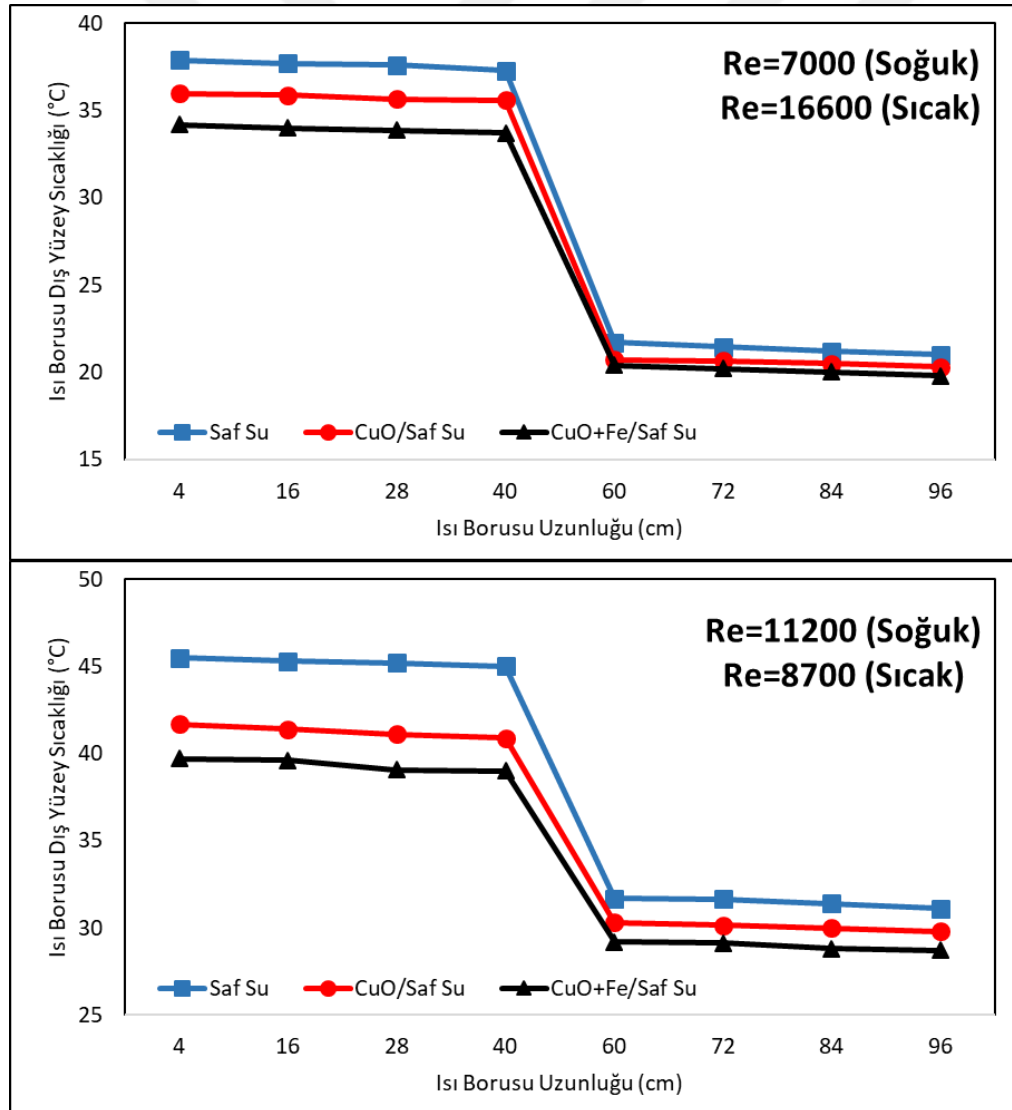
Şekil 7.2'deki grafiğin en sağında yer alan sütunlar ortalama ısıl direnç ve ısıl dirençlerdeki iyileşme oranlarını göstermektedir. Ortalama değerler göz önüne alındığında saf su, CuO/Saf Su nano akışkanı ve CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanlarının meydana getirdiği ortalama ısıl direnç değerleri sırasıyla 0,0140 K/W; 0,0099 K/W ve 0,0073 K/W olmuştur. ısıl dirençlerdeki ortalama iyileşme oranları ise CuO+Fe/Saf Su ve CuO/Saf Su nano akışkanları için sırasıyla %52,9 ve %36,2 olmuştur.

7.2.3. Nano akışkanların ısı borusu sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi

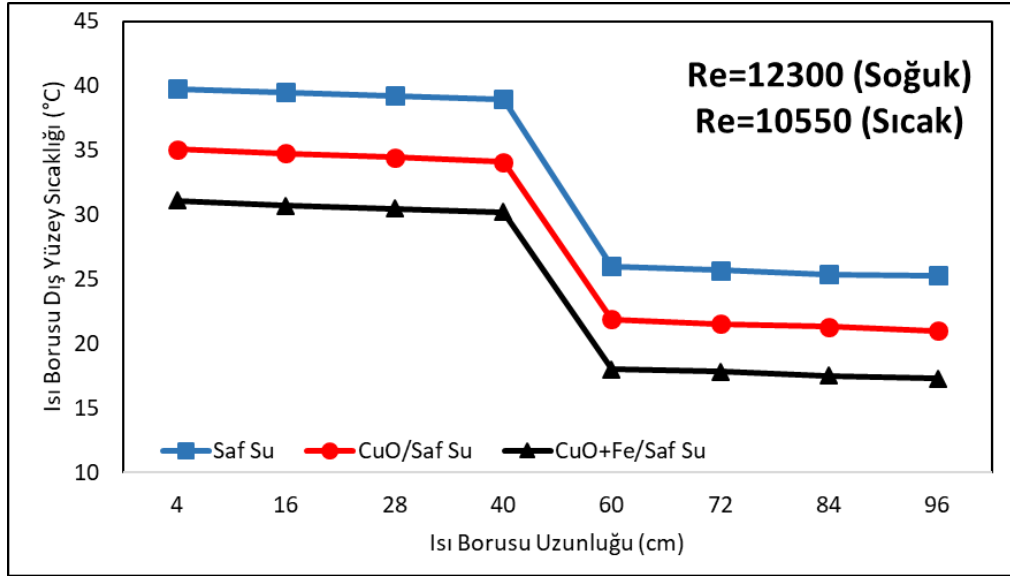
Şekil 7.3'te ısı verimlerinde en yüksek iyileşme oranlarının elde edildiği 3 koşul için çizilen ısı borusu boyunca olan sıcaklık dağılımları grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerden de görüleceği gibi ısı borularında saf su yerine nano akışkan kullanımı ısı borularının kondenser

bölgelerinde ciddi bir fark oluşturmazken evaporatör bölgelerinde önemli sayılabilecek bir fark oluşturmuştur. Nano akışkan kullanımı evaporatör sıcaklıklarının daha düşük seviyelerde kalmasına neden olmuştur. Böylece ısı borularının ortalama evaporatör ve kondenser sıcaklıkları arasındaki fark azalmıştır. Bu farkın azalması ısı borularının ısıl dirençlerinin düştüğü anlamına gelmektedir. Isıl dirençlerin düşük olması da daha iyi bir ısı transferinin gerçekleştiğini göstermektedir.

Grafikler incelendiğinde ısı borularının ortalama evaporatör ve kondenser sıcaklıkları arasındaki farkın saf su deneylerinde maksimum iken CuO+Fe /Saf Su hibrit nano akışkanı deneylerinde minimum olduğu görülmektedir. CuO/Saf Su deneylerinde ise ortalama sıcaklık farkları diğer iki akışkanın ortalarında seyretmiştir.



Şekil 7.3. Isıl verimlerdeki en yüksek iyileşme oranlarının elde edildiği deneylerde ısı borusu boyunca olan sıcaklık dağılımları (DeneySEL)



Şekil 7.3. (devam) Isıl verimlerdeki en yüksek iyileşme oranlarının elde edildiği deneylerde ısı borusu boyunca olan sıcaklık dağılımları (DeneySEL)

7.2.4. DeneySEL sonuçların literatürdeki bazı çalışmalarla kıyaslanması

Deneylerden elde edilen sonuçlar literatürde yer alan ısı borulu ısı değiştiricilerle yapılan bazı çalışmalarla kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama Çizelge 7.2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar diğer araştırmacıların sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Çizelge 7.2. DeneySEL sonuçların literatürdeki bazı çalışmalarla kıyaslanması

Yazar	Yıl	Akışkan	Isı borusu özellikleri	Sonuç
H. Hagens vd. [89]	2007	R-134a	Uzunluğu 1,5 m ve dış çapı 16 mm olan 0.8 mm et kalınlığına sahip 4 sıra (her sırada 13 ya da 14 adet ısı borusu bulunmaktadır) bakır ısı borusu kullanılmıştır.	% 19 ile % 59 arasında değişen doldurma oranlarında deneyler yapılmıştır. Akış hızının artması performansı artırmıştır. Re sayısının artması da performansı artmasını sağlamıştır. Ayrıca yüksek doldurma oranı da ortalama ısı transfer katsayısının yüksek olmasını sağlamıştır.
Mostafa Ahmed Abd El-Baky ve Mousa Mohamed Mousa [90]	2014	R-11	Uzunluğu 500 mm, iç çapı 10,2 mm olan 25 adet bakır ısı borusu grubu kullanılmıştır.	Sistem taze havanın soğutulması için kurulmuştur. Taze hava debisi 0,4 kg/s’de sabit tutulurken dönüş havasının debisi 0,4 kg/s; 0,6 kg/s ve 0,933 kg/s olarak deneyler yapılmıştır. Taze hava ve geri dönüş soğuk havasının sıcaklıkları taze havanın artan giriş sıcaklığıyla artmıştır. Evaporatör ve kondenser verimleri taze hava giriş sıcaklığının artmasıyla artmıştır. Taze hava giriş sıcaklığının artırılmasıyla ısı geri kazanımında % 85 'e varan artışlar sağlanmıştır.

Çizelge7.2. (devam) Deneysel sonuçların literatürdeki bazı çalışmalarla kıyaslanması

Mohan Jagadeesh Kumar Mandapati vd. [91]	2014	Saf Su	Uzunluğu 650 mm, iç çapı 11,7 mm olan 22 adet alüminyum ısı borusu grubu kullanılmıştır.	0,23 kg/s ile 0,54 kg/s arasında değişen hava debileri kullanılmıştır. Evaporatör giriş sıcaklığı 80 °C ile 150 °C arasında değişmiştir. Hava hızının artırılması evaporatör ve kondenser çıkışlarındaki sıcaklık farkının düşmesine neden olmuştur. Debi arttıkça ısı direnç azalış gösterse de çok fazla azalma olmamıştır. Transfer edilen gerçek ısı miktarı hava hızının artmasıyla azalmıştır.
Tushar Tiwatane ve Shivprakash Bhagwatrao Barve [92]	2015	CuO+Al ₂ O ₃ /Saf Su nano akışkanı	İki adet hava kanalının ortasına yerleştirilmiş ısı borusu grubu kullanılmıştır.	Isı değiştiricinin performansı saf su yerine CuO+Al ₂ O ₃ /Saf su hibrit nano akışkanı kullanılarak artırılmıştır. Kaynak sıcaklığının artmasıyla ısı değiştiricinin performansı artmıştır. Maksimum etkinlik değeri 0,25 olarak elde edilmiştir. Nano akışkanın ısı iletkenliğinin saf suya göre yüksek olması nedeniyle ısı değiştiricinin etkinliğinin arttığı vurgulanmıştır. Ayrıca bu çalışmada Isı borulu ısı değiştiricinin düşük sıcaklıklı kaynaklar için uygun olduğu da belirtilmiştir.
Abdulsalam D.Mohamed vd. [93]	2016	Saf su	Uzunluğu 950 mm, iç çapı 9,5 mm ve dış çapı 10 mm olan 4 sıra ve her sırada 12 adet bakır ısı borusu olan ısı borusu grubu kullanılmıştır.	0,12 kg/s ile 0,37 kg/s arasında değişen hava debilerinde ve farklı sıcaklıklarda deneyler yapılmıştır. Evaporatör tarafındaki hava debisi en küçük değerde sabit tutulduğunda kondenser hava debisinin artması etkinliği artırmıştır. Evaporatör debisinin en yüksek değerde sabit tutulup kondenser debisinin artırılması etkinliği azaltıcı yönde etki yapmıştır. Ayrıca debilerin oranı 1 olacak şekilde debi değerlerinin 1 den küçük olduğu durumda debi ile etkinlik ters orantılı iken 1 den büyük değerlerde doğru orantılı olmuştur.
Ahmet ÖZTÜRK vd. [54]	2018	Al ₂ O ₃ /Saf su nano akışkanı	Uzunluğu 1000 mm, iç çapı 10,5 mm ve dış çapı 12 mm olan 15 adet bakır ısı borusu grubu kullanılmıştır.	25 ° C ile 90 °C arasında değişen sıcaklık ve 40 g/s ile 84 g/s arasında değişen hava debilerinde deneyler hem saf su ile hem de Al ₂ O ₃ /Saf su nano akışkanı ile yapılmıştır. En yüksek verim %59 olarak Al ₂ O ₃ /Saf Su nano akışkanının kullanıldığı deneyde elde edilmiştir.

Çizelge7.2. (devam) Deneysel sonuçların literatürdeki bazı çalışmalarıyla kıyaslanması

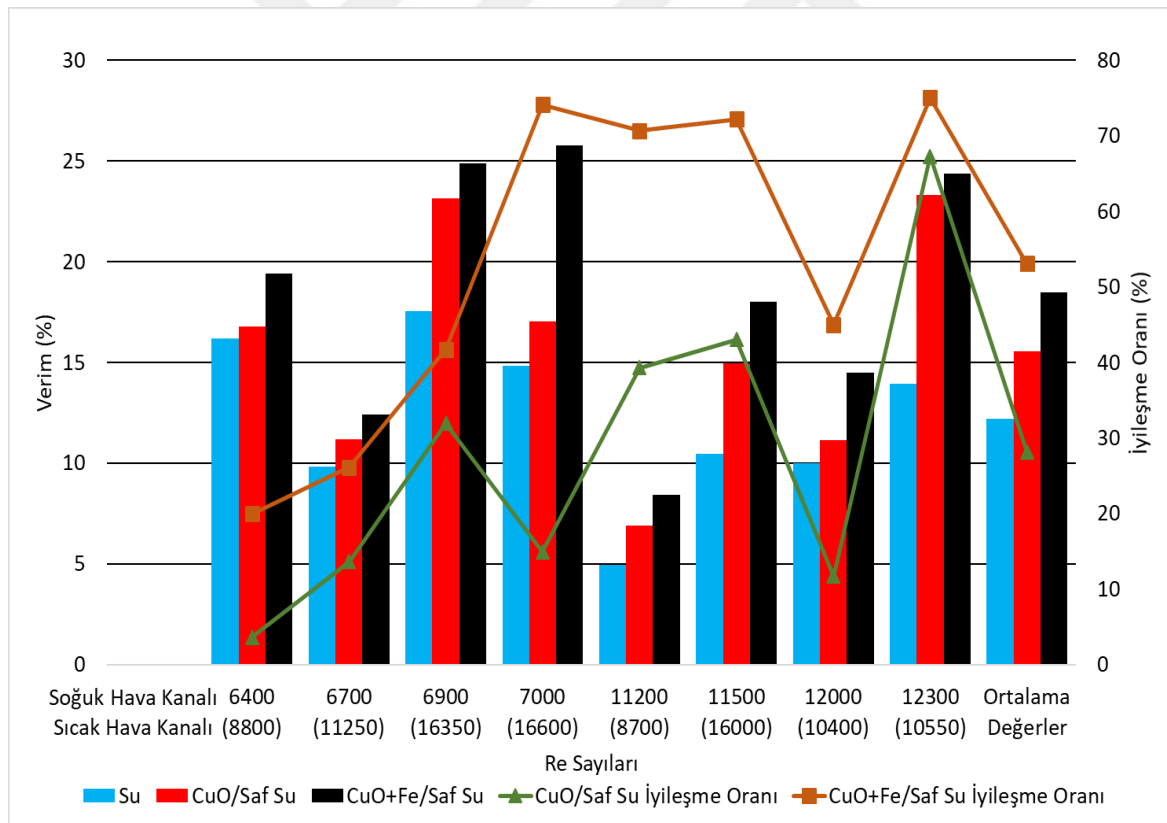
Sakil Hossen vd. [94]	2019	Saf su	Uzunluğu 558 mm, iç çapı 13 mm ve dış çapı 15 mm olan 38 adet bakır ısı borusu grubu kullanılmıştır.	40°C ile 70°C arasında değişen evaporatör havası sıcaklığı ve %25 ile %75 arasında değişen ısı borusu doldurma oranlarında deneyler yapılmıştır. Doldurma oranı %45 olduğunda en yüksek ısı iletkenlik değerine ulaşılmıştır. (18400 W/m °C) Isı transfer oranı hava debisinin artmasıyla artmıştır.
Bu Çalışma	2021	CuO/Saf Su, CuO+Fe/Saf Su ve Saf Su	Uzunluğu 1000 mm olan iç çapı 23,4 mm ve et kalınlığı 1 mm olan 5 adet bakır ısı borusu kullanılmıştır.	3 farklı sıcak hava debisi 2 farklı soğuk hava debisi ve 2 farklı ısıtma gücünde deneyler yapılmıştır. Isı boruları doldurma oranı evaporatörün 1/3'ü olacak şekilde seçilmiştir. Sonuçların kıyaslaması saf suyun kullanıldığı deneylere göre yapılmıştır. Performans göstergeleri olarak verim ve ısı direnç değerleri her akışkan için hesaplanmıştır. En yüksek verim değerine CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanının kullanıldığı deneylerde elde edilmiş olup ulaşılan en yüksek verim değeri % 28,2 olarak gerçekleşmiştir.

7.2.5. Deneysel sonuçların belirsizlik analizi sonuçları

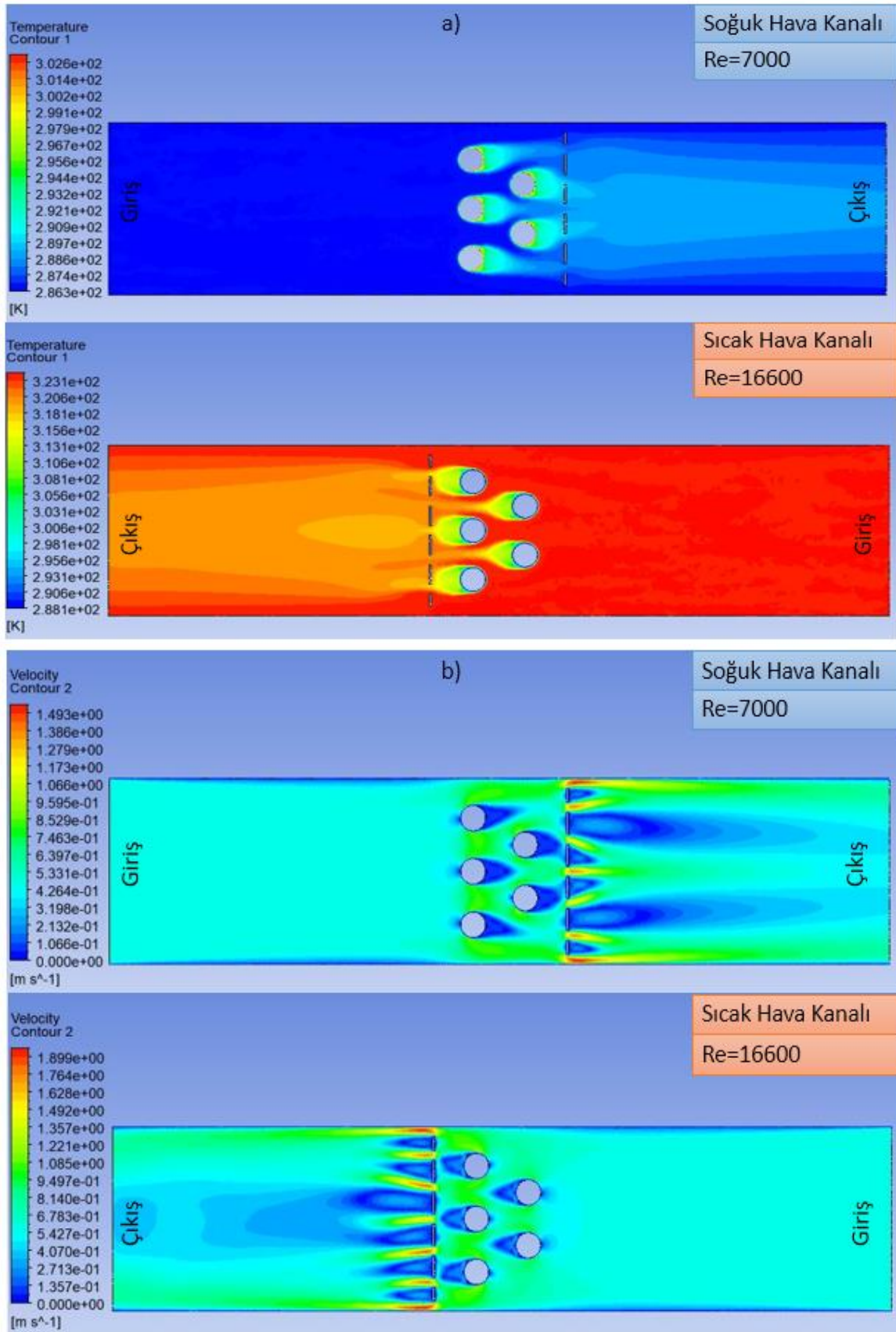
Deneysel çalışmalarda ölçülen büyüklüklerin doğruluğuna etki eden ölçüm aletlerinin hassasiyeti, ölçüm noktasının yeri ve değerlerin okunması gibi bazı durumlar söz konusudur. Bu gibi durumların hangi boyutta olduğunun anlaşılması için belirsizlik analizi yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada sıcaklık değerleri hassasiyetleri $\pm 0,5^\circ\text{C}$ olan ısı çiftleri ile alınmıştır. Bu ısı çiftlerinin yerleşim hassasiyeti 0,8, okuma hassasiyeti ise 0,6 olarak dikkate alınmış ve denklem 6.12 kullanılarak sıcaklık ölçümündeki belirsizlik değeri $1,12^\circ\text{C}$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, ölçülen hava debilerindeki belirsizlikler de 0,81 g/s olarak hesaplanmıştır. Bu belirsizlik değeri hesaplanırken hava hızının ölçüldüğü anemometrenin hassasiyeti $\pm 0,1$ m/s, ölçüm yerinin hassasiyeti 0,7 ve kanal alanının belirlenmesindeki hassasiyet 0,4 olarak hesaba katılmıştır. Burada bulunan belirsizlik değerleri literatürdeki benzer çalışmalarla uyumludur [95], [96].

7.3. Sayısal Sonuçlar

Deneysel sonuçların doğrulanması için yapılan sayısal çözümlemeden elde edilen sonuçlar Şekil 7.4’de verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi deneysel sonuçlara benzer şekilde, nano akışkanların kullanıldığı deneylerde tüm Re sayılarında verim değerleri daha yüksek çıkmıştır. İki nano akışkan kıyaslanacak olursa, yine CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanının CuO/Saf Su nano akışkanına göre daha yüksek ısı verime sahip olduğu gözlemlenir. Sayısal analiz sonucunda elde edilen maksimum verim değeri CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanı için %25,8 olarak sıcak ve soğuk Re sayıları sırasıyla 16600 ve 7000 değerinde iken oluşmuştur. En yüksek iyileşme oranı ise %75 olmuştur. Ortalama değerler dikkate alındığında saf su, CuO/Saf Su ve CuO+Fe/Saf Su akışkanları için ısı verimleri sırasıyla %12,2; %15,6 ve %18,5 olmuştur. Saf suya göre ortalama iyileşme oranları ise CuO/Saf Su nano akışkanı için %28,2 iken CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanı için %53,1 olmuştur.



Şekil 7.4. Kullanılan akışkana bağlı olarak elde edilen ısı verim değerlerinin ve verimlerdeki iyileşme oranlarının kanal içi Re sayılarına göre değişimi (sayısal)

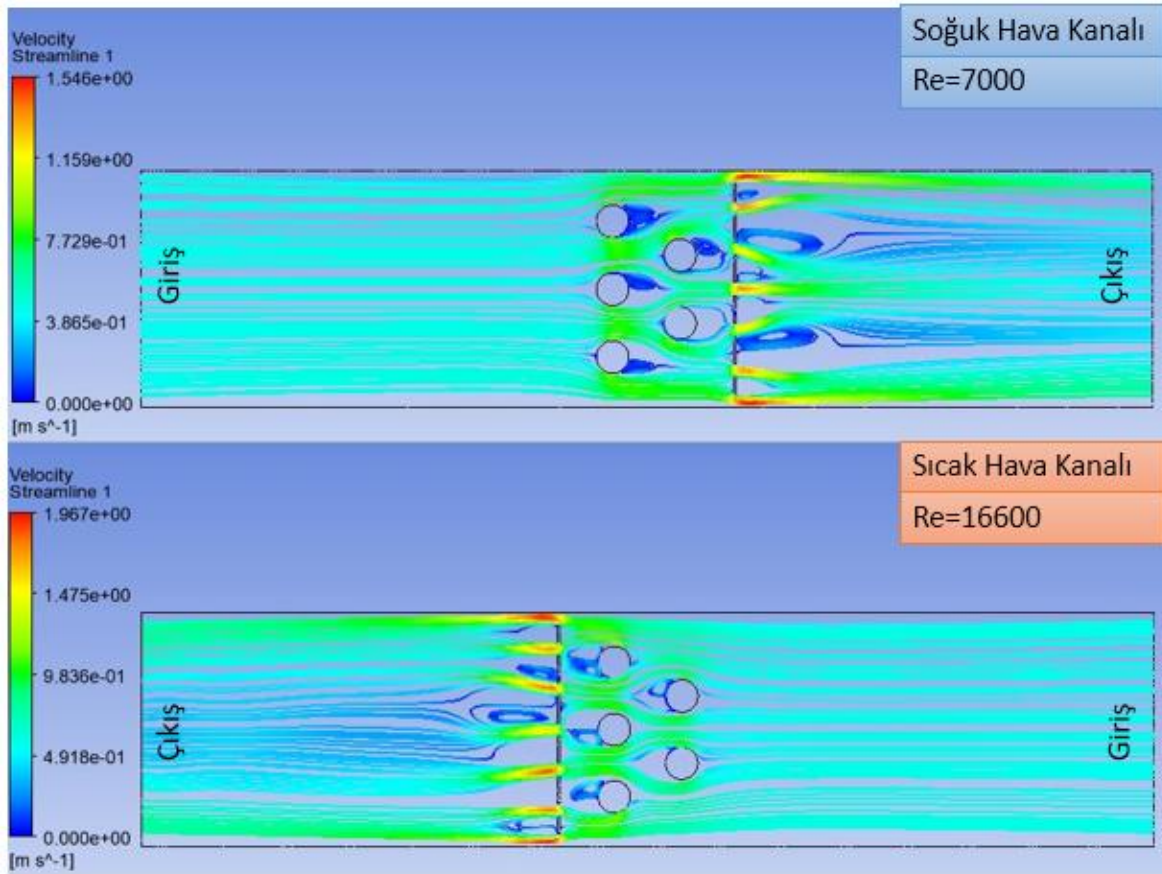


Şekil 7.5. Sayısal analizde en yüksek verimin elde edildiği soğuk kanal Re sayısı 7000 ve sıcak kanal Re sayısı 16600 iken kanal içlerinde oluşan a) sıcaklık ve b) hız konturları

Sayısal analiz sonuçlarının görsel olarak değerlendirilebilmesi için her deney koşuluna ait sıcaklık ve hız konturları ile hız akış çizgileri oluşturulmuştur. Söz konusu hız ve sıcaklık değerleri birbirlerine yakın oldukları için kontur ve akış çizgilerinde görsel olarak aşırı bir farklılık meydana gelmemiştir. En yüksek verimin elde edildiği koşullarda kanal içlerinde meydana gelen sıcaklık ve hız konturları ile hız akış çizgileri yukarıdaki şekillerde verilmiştir.

Şekil 7.5 a'daki sıcaklık dağılımları incelendiğinde kanalların giriş kısımlarından ısı borusu grubuna kadar olan bölgede düzenli bir sıcaklık dağılımının olduğu görülmektedir. Daha sonra bu dağılım bozulmaktadır. Soğuk kanal tarafında ısı borularının sıcaklığı soğuk kanal giriş sıcaklığından yüksek olduğu için burada ısı borularından havaya bir ısı transferi söz konusudur. Dolayısıyla hava ısı borularından aldığı ısı ile sıcaklığını bir miktar artırmıştır. Sıcak tarafta ise tam tersi bir durum söz konusudur. Yani havanın giriş sıcaklığı ısı borularının sıcaklığından daha yüksek olduğu için havadan ısı borularına bir ısı transferi söz konusudur. Hava ısı kaybettiği için sıcaklığı bir miktar düşmüştür. Her iki kanalda da hava ısı borularını geçtikten sonra kanal içine yerleştirilmiş olan engelle temas etmektedir. Burada amaç havanın ısı borularının bulunduğu bölgede daha fazla vakit geçirmesini sağlayarak gerçekleşen ısı transfer miktarının artırılmasıdır.

Şekil 7.5 b'deki hız konturları ve Şekil 7.6'daki akış çizgileri incelendiğinde her iki kanalda da ısı borularına kadar olan bölgede hız dağılımının düzenli olduğu ısı borularını ve engeli geçerken akışın bozulduğu gözlemlenmektedir. Isı borularının arka taraflarında hava hızı iyice düşerek neredeyse sıfır olmuştur. Aynı şekilde engelin delik olmayan kısımlarının arka tarafında da düşük hava hızları söz konusudur. Bu bölgelerde Şekil 7.6'dan da görüleceği gibi girdaplar oluşmuştur. Engelin boşluklarından geçerken havanın hızı neredeyse iki katına çıktığı yine bu şekillerden görülebilmektedir. Soğuk kanalda Re sayısının 7000 olduğu deneylerde kanal içi hava hızı en düşük değerinde (0,437 m/s) iken sıcak kanalda Re sayısının 16600 olduğu deneylerde ise hava hızı en yüksek (0,985 m/s) değerdedir. Dolayısıyla bu şekillerde verilen görseller en düşük ve en yüksek hava hızlarının olduğu koşulları temsil etmektedir.



Şekil 7.6. Sayısal analizde en yüksek verimin elde edildiği soğuk kanal Re sayısı 7000 ve sıcak kanal Re sayısı 16600 iken kanal içlerinde oluşan hız akış çizgileri

7.4. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Kıyaslanması

Deneysel ve sayısal sonuçların kıyaslanması yapılırken her akışkan kendi içinde ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar çıkış sıcaklıkları üzerinden kıyaslandığında çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın %10'un altında olduğu görülmüştür. Örneğin saf suyun kullanıldığı, sıcak hava hızının 0.985 m/s ve hava giriş sıcaklığının 59°C olduğu deneyde deneysel ve sayısal olarak hesaplanan çıkış sıcaklıkları sırasıyla 46,7°C ve 51,3°C olmuştur. Bu iki değer arasındaki fark ise %9,9'dur.

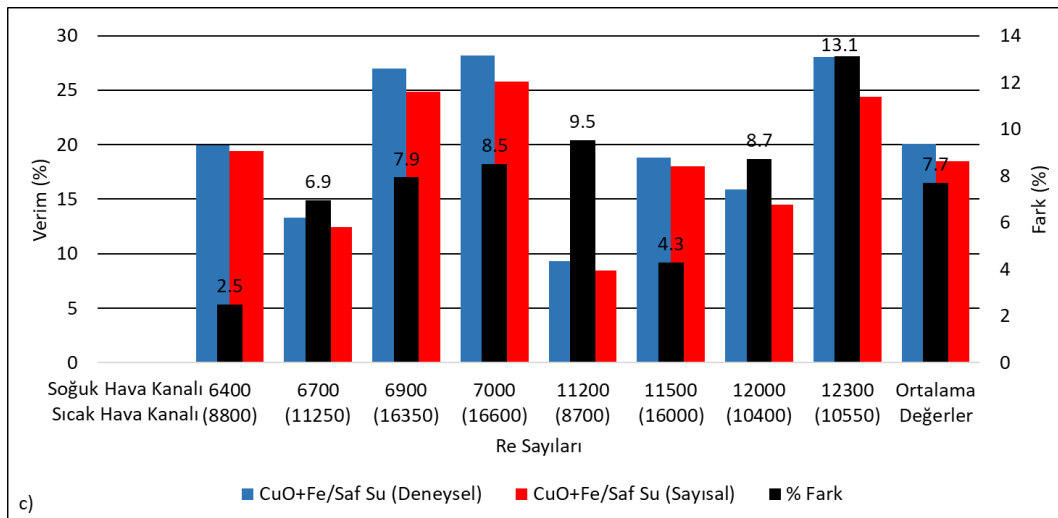
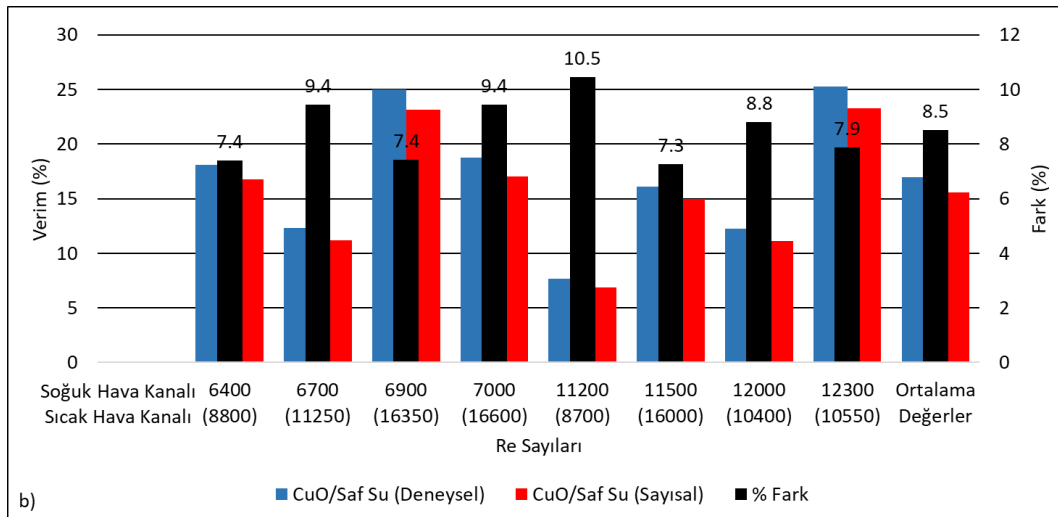
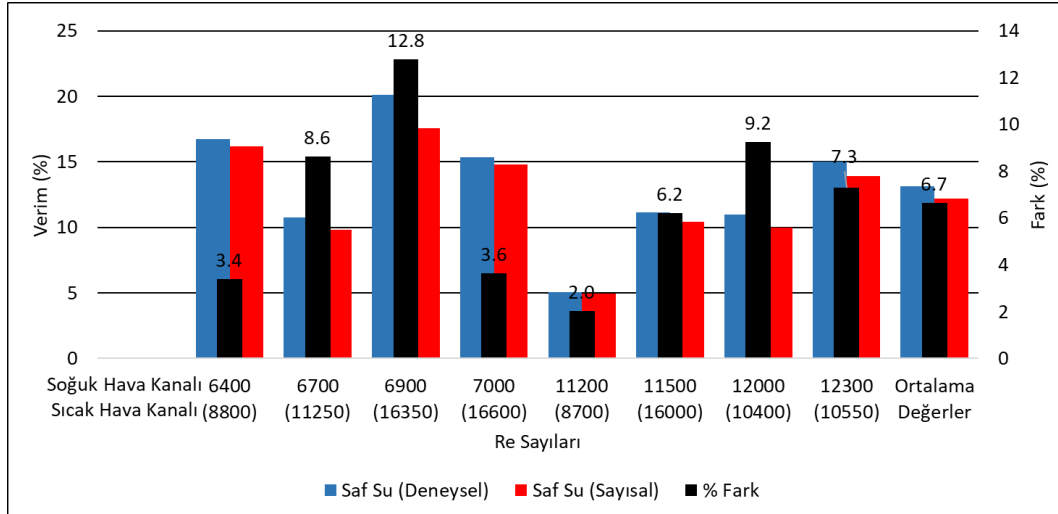
Sonuçlar ısı verimleri üzerinden karşılaştırıldığında ise iki sonuç arasında maksimum %13,1'lik bir fark meydana gelmiştir. Tüm akışkanlarda deneysel olarak elde edilen verim değerleri daha yüksek çıkmıştır.

Şekil 7.7 a'daki grafikte saf suya ait sonuçlar verilmiştir. Grafik incelendiğinde iki sonuç arasında oluşan minimum ve maksimum farkların sırasıyla %2,0 ve %12,8 olduğu

görülmektedir. Verimler arasındaki maksimum fark değeri soğuk kanaldaki Re sayısı 6900 (sıcak kanaldaki Re sayısı 16350) iken oluşurken, minimum fark değeri soğuk kanaldaki Re sayısı 11200 (sıcak kanaldaki Re sayısı 8700) iken oluşmuştur. Grafiğin en sağ kısmında yer alan ortalama değerler dikkate alındığında iki verim değeri arasındaki ortalama farkın % 6,7 olduğu görülmektedir. Bu değer literatürde kabul edilen değerler arasındadır.

Şekil 7.7 b'deki grafik CuO/Saf Su nano akışkanına aittir. Grafik analiz edildiğinde verim değerleri arasındaki maksimum fark soğuk kanaldaki Re sayısı 11200 (sıcak kanaldaki Re sayısı 8700) iken %10,5 olarak oluşmuştur. İki verim arasındaki minimum fark ise soğuk kanaldaki Re sayısı 11500 (sıcak kanaldaki Re sayısı 16000) iken %7,3 olarak meydana gelmiştir. Yine ortalama değerlere bakılacak olursa deneysel ve sayısal verimler arasında ortalama %8,5'lik bir farkın olduğu gözlemlenir ki bu değer de kabul edilebilir değerler arasındadır.

Son olarak Şekil 7.7 c'deki grafik ise CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanının kullanıldığı deneylere ait sayısal ve deneysel analiz sonucu elde edilen verim değerleri ve bu iki verim arasında oluşan % farklılığı göstermektedir. Grafiğe göre deneysel ve sayısal olarak hesaplanan verimler arasında %2,5 ile %13,1 arasında değişen değerlerde farklılıklar oluşmuştur. En düşük ve en yüksek % fark değerlerine soğuk kanaldaki Re sayısı sırasıyla 6400 ve 12300 olduğunda ulaşılmıştır. Bu koşullar için sıcak kanaldaki Re sayıları ise 8800 ve 10550'dir. CuO+Fe/Saf Su nano akışkanı kullanılan deneylerde oluşan verimler arasındaki ortalama fark değeri % 7,7'dir. Bu değer de literatürde kabul edilen değerler arasında yer almaktadır.



Şekil 7.7. Deneyisel ve sayısal sonuçların akışkanlara göre karşılaştırılması a) Saf su, b) CuO/Saf su, c) CuO+Fe/Saf su



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ısı borusu içeren havadan havaya ısı geri kazanım ünitesinde saf su yerine CuO/Saf su ve CuO+Fe/Saf Su nano akışkanlarının kullanımının ısı performans etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Hazırlanan nano akışkanlar ağırlıkça %2 partikül konsantrasyonuna sahiptir. Nano akışkan hazırlamada yüzey aktifleştirici madde olarak Triton X-100 kullanılmıştır. Performans göstergeleri olarak verim, ısı direnç ve ısı borusu boyunca olan sıcaklık dağılımı dikkate alınmıştır. Ayrıca sistemin 2 boyutlu sayısal modellemesi yapılarak tüm koşullar için sayısal çözümleme de yapılmıştır. Deneysel sonuçlar hem literatürdeki benzer çalışmalarla hem de yapılan sayısal analiz çalışmasıyla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

8.1. Sonuçlar

- Isı borularında saf su yerine nano akışkan kullanımı tüm deney koşullarında daha etkin bir ısı performans göstermiştir.
- CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanı tüm deney koşullarında CuO/Saf Su nano akışkanına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Yani Fe nano partikülleri CuO nano partiküllerinin baz akışkan içinde gösterdiği ısı özelliklerini iyileştirmiştir.
- Saf suyun kullanıldığı deneylerde verim değerleri %5 ile %20,1 arasında değişmiştir. %20,1 değerine soğuk ve sıcak kanallardaki Re sayıları sırasıyla 6400 ve 8800 olduğunda ulaşılmıştır.
- CuO/Saf Su nano akışkanı kullanıldığında verim değerleri %7,7 ile %25,3 arasında değişmiştir. %25,3 verim değeri, soğuk ve sıcak kanal Re sayıları sırasıyla 12300 ve 10550 iken elde edilmiştir.
- CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanı kullanıldığında ise verimler %9,3 ile %28,2 arasında olmuştur. %28,2 değeri tüm verimler arasında ulaşılan en yüksek verim olup bu değere soğuk ve sıcak kanal Re sayıları sırasıyla 7000 ve 16600 olduğunda ulaşılmıştır.
- Verimlerdeki iyileşme oranları (saf suya göre) dikkate alındığında, en yüksek iyileşme oranının CuO+Fe/Saf Su nano akışkanının kullanıldığı, soğuk kanal Re sayısının 12300 olduğu deneyde %86,8 olarak elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Nano akışkanlar kullanarak ısı geri kazanım ünitesinin verimi artırılmış olmasına rağmen kanal içinde oluşan Re sayıları ile verim değerleri arasında lineer bir ilişki oluşmamıştır.

- Saf su yerine nano akışkan kullanımı ısı borularının ısı dirençlerini azaltma konusunda da oldukça etkili sonuçlar vermiştir.
- Yine CuO+Fe/Saf Su hibrit nano akışkanı CuO/Saf Su nano akışkanına göre ısı direncin azaltılmasında daha etkili olmuştur.
- Soğuk kanaldaki Re sayısı 11200 (sıcak kanal Re sayısı 8700) iken en düşük ısı dirençlere ulaşılmıştır. Bu koşulda ısı dirençlerdeki azalma oranı her iki akışkan için de nispeten en yüksek değerleri almıştır.
- Saf su yerine nano akışkan kullanımı ısı borularının evaporatör sıcaklıklarında azalma sağlamıştır. Yani nano akışkan kullanarak ısı borularının evaporatör kısmında meydana gelen ısı transfer miktarı artırılmıştır.
- Sayısal çözümleme ile ulaşılan sonuçlar deneysel sonuçlar ile paralellik göstermiştir.
- Sayısal analiz sonucunda elde edilen verim değerleri, tüm deney koşulları ve tüm akışkanlar dikkate alındığında deneysel sonuçlara göre %2,0 ile %13,1 arasında değişen oranlarda daha küçük olmuştur. Bu aralık literatürde kabul edilebilir düzeydedir.

8.2. Öneriler

Sonraki çalışmalar için bazı tavsiyeler aşağıda sıralanmıştır;

- Kullanılan nano akışkanların partikül konsantrasyonu değiştirilerek sistemin performans analizi yapılabilir.
- Farklı nano partiküller ya da baz akışkanlar ile deneyler yapılabilir.
- Deney koşullarında yapılacak değişiklikler ile sistemin çalışma aralığı genişletilebilir.
- Sistemde yer alan ısı borusu sayısı artırılarak yeni araştırmalar yapılabilir.
- Sistemin 3 boyutlu modellemesi yapılarak sayısal çözümleme yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: IEA, Global energy review: CO2 Emissions in 2020, Paris. URL: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>, 2021, Son Erişim Tarihi: 19.03.2021
2. İnternet: IEA, Renewables 2019, Paris, URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>, 2019, Son Erişim Tarihi: 19.03.2021
3. Tokgöz, N. ve Özgün, Ö. (2019). Atık ısı geri kazanım sistemlerine yönelik literatür araştırması ve sanayiden örnek vaka incelemesi a review on waste heat recovery systems and a case study from industry. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34, 57–72.
4. Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A. and Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 268–289.
5. Srimuang, W. and Amatachaya, P. (2012). A review of the applications of heat pipe heat exchangers for heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4303–4315.
6. Rittidech, S., Dangeton, W. and Soponronnarit, S. (2005). Closed-ended oscillating heat-pipe (CEOHP) air-preheater for energy thrift in a dryer. *Applied Energy*, 81(2), 198–208.
7. Meena, P., Rittidech, S. and Poomsa-ad, N. (2007). Closed-loop oscillating heat-pipe with check valves (CLOHP/CVs) air-preheater for reducing relative humidity in drying systems. *Applied Energy*, 84(4), 363–373.
8. Yau, Y. H. and Ahmadzadehtalatapeh, M. (2010). A review on the application of horizontal heat pipe heat exchangers in air conditioning systems in the tropics. *Applied Thermal Engineering*, 30(2–3), 77–84.
9. Martínez, F. J. R., Álvarez-Guerra Plasencia, M. A., Velasco Gómez, E., Díez, F. V. and Martín, R. H. (2003). Design and experimental study of a mixed energy recovery system, heat pipes and indirect evaporative equipment for air conditioning. *Energy and Buildings*, 35(10), 1021–1030.
10. Riffat, S. B. and Gan, G. (1998). Determination of effectiveness of heat-pipe heat recovery for naturally-ventilated buildings. *Applied Thermal Engineering*, 18(3–4), 121–130.
11. Mardiana-Idayu, A. and Riffat, S. B. (2012). Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1241–1255.
12. Noie-Baghban, S. H. and Majideian, G. R. (2000). Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger (HPHE) for surgery rooms in hospitals. *Applied Thermal Engineering*, 20(14), 1271–1282.

13. Yang, F., Yuan, X. and Lin, G. (2003). Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for heating automobile using exhaust gas. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 367–372.
14. Choi, S. U. S. and Eastman, J. A. (1995). *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*. In International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, ASME, San Francisco, 1-8.
15. Xuan, Y. and Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58–64.
16. 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..
17. Mroue, H., Ramos, J. B., Wrobel, L. C. and Jouhara, H. (2015). Experimental and numerical investigation of an air-to-water heat pipe-based heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 78, 339-350..
18. Sözen, A., Menlik, T., Gürü, M., Boran, K., Kılıç, F., Aktaş, M. and Çakır, M. T. (2015). A comparative investigation on the effect of fly-ash and alumina nanofluids on the thermal performance of two-phase closed thermo-syphon heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 96, 330-337.
19. Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Rosen, M. A., Akhiani, A. R., Latibari, S. T., Mehrali, M. and Metselaar, H. S. C. (2016). Experimental investigation of the effect of graphene nanofluids on heat pipe thermal performance. *Applied Thermal Engineering*, 100, 775-787..
20. Devendiran, D. K. and Amirtham, V. A. (2016). A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 21-40.
21. Gedik, E. (2016). Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosyphon at different operating conditions. *Energy and Buildings*, 127, 1096-1107.
22. Tharves, M. S. I. and Suresh, K. R. (2016). An experimental investigation of the thermal performance of two-phase closed thermosyphon using zirconia nanofluid. *Thermal Science*, 20(5), 1565-1574.
23. Jafari, D., Di Marco, P., Filippeschi, S. and Franco, A. (2017). An experimental investigation on the evaporation and condensation heat transfer of two-phase closed thermosyphons. *Experimental thermal and fluid science*, 88, 111-123.
24. Sözen, A., Gürü, M., Menlik, T., Karakaya, U. and Çiftçi, E. (2018). Experimental comparison of Triton X-100 and sodium dodecyl benzene sulfonate surfactants on thermal performance of TiO₂-deionized water nanofluid in a thermosiphon. *Experimental Heat Transfer*, 31(5), 450-469.

25. Bin-Abdun, N. A., Razlan, Z. M., Shahriman, A. B., Voon, C. H., Wan, W. K., Zunaidi, I., Albzeirat, M. K. and Rani, M. F. H. (2018). The comparison between the performance of water and CuO/Water nanofluid in improving the heat transfer of small spaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 429(1), 012073.
26. Ahmadi, M. H., Mirlohi, A., Nazari, M. A., ve Ghasempour, R. (2018). A review of thermal conductivity of various nanofluids. *Journal of Molecular Liquids*, 265, 181-188.
27. Wang, X., Wang, Y., Chen, H. and Zhu, Y. (2018). A combined CFD/visualization investigation of heat transfer behaviors during geyser boiling in two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 121, 703-714.
28. Kujawska, A., Zajackowski, B., Wilde, L. M. and Buschmann, M. H. (2019). Geyser boiling in a thermosyphon with nanofluids and surfactant solution. *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 195-216.
29. Maddah, H., Ghazvini, M. and Ahmadi, M. H. (2019). Predicting the efficiency of CuO/water nanofluid in heat pipe heat exchanger using neural network. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 104, 33-40.
30. Dehaj, M. S. and Mohiabadi, M. Z. (2019). Experimental study of water-based CuO nanofluid flow in heat pipe solar collector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(6), 2061-2072.
31. Kaya, M., Gürel, A. E., Ağbulut, Ü., Ceylan, İ., Çelik, S., Ergün, A. and Acar, B. (2019). Performance analysis of using CuO-Methanol nanofluid in a hybrid system with concentrated air collector and vacuum tube heat pipe. *Energy Conversion and Management*, 199, 111936..
32. Sarafraz, M. M., Pourmehran, O., Yang, B. and Arjomandi, M. (2019). Assessment of the thermal performance of a thermosyphon heat pipe using zirconia-acetone nanofluids. *Renewable Energy*, 136, 884-895.
33. Sardarabadi, H., Heris, S. Z., Ahmadpour, A. and Passandideh-Fard, M. (2019). Experimental investigation of a novel type of two-phase closed thermosyphon filled with functionalized carbon nanotubes/water nanofluids for electronic cooling application. *Energy Conversion and Management*, 188, 321-332.
34. Zufar, M., Gunnasegaran, P., Kumar, H. M. and Ng, K. C. (2020). Numerical and experimental investigations of hybrid nanofluids on pulsating heat pipe performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118887.
35. Xu, Q., Liu, L., Feng, J., Qiao, L., Yu, C., Shi, W., Ding, Y., Zang, Y., Chang, C., Xiong, Y. and Ding, Y. (2020). A comparative investigation on the effect of different nanofluids on the thermal performance of two-phase closed thermosyphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149, 119189.
36. Zhang, H., Jiang, C., Zhang, Z., Liu, Z., Luo, X. and Liu, W. (2020). A study on thermal performance of a pump-assisted loop heat pipe with ammonia as working fluid. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115342.

37. Khajepour, E., Noghrehabadi, A. R., Nasab, A. E. and Nabavi, S. H. (2020). Experimental investigation of the effect of nanofluids on the thermal resistance of a thermosiphon L-shape heat pipe at different angles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 113, 104549.
38. Alshehri, F., Goraniya, J. and Combrinck, M. L. (2020). Numerical investigation of heat transfer enhancement of a water/ethylene glycol mixture with Al₂O₃-TiO₂ nanoparticles. *Applied Mathematics and Computation*, 369, 124836.
39. Abdolhossein Zadeh, A. and Nakhjavani, S. (2020). Thermal analysis of a gravity-assisted heat pipe working with zirconia-acetone nanofluids: An experimental assessment. *Archives of Thermodynamics*, 41(2), 65–83.
40. Ghorabae, H., Emami, M. R. S. and Shafahi, M. (2020). Effect of nanofluid and surfactant on thermosiphon heat pipe performance. *Heat Transfer Engineering*, 41(21), 1829-1842.
41. Sadeghinezhad, E., Akhiani, A. R., Metselaar, H. S. C., Latibari, S. T., Mehrali, M. and Mehrali, M. (2020). Parametric study on the thermal performance enhancement of a thermosiphon heat pipe using covalent functionalized graphene nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115385.
42. Jouhara, H., Almahmoud, S., Brough, D., Guichet, V., Delpech, B., Chauhan, A., Ahmad, L. and Serey, N. (2021). Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchanger. *Energy*, 219, 119624.
43. Sukarno, R., Putra, N., Hakim, I. I., Rachman, F. F. and Mahlia, T. M. I. (2021). Utilizing heat pipe heat exchanger to reduce the energy consumption of airborne infection isolation hospital room HVAC system. *Journal of Building Engineering*, 35, 102116.
44. Gürtürk, M., Kale, C. and Kok, B. (2021). Investigation of the performance of a new thermosiphon heat pipe design for applications heat transfer from liquid to gas. *Applied Thermal Engineering*, 186, 116520.
45. Shuoman, L. A., Abdelaziz, M. and Abdel-Samad, S. (2021). Thermal performances and characteristics of thermosiphon heat pipe using alumina nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, 1-13.
46. Somasri, S. and Meena, P. (2021). Heat transfer of a heat pipe using titanium dioxide as working fluid. *Journal of Physics: Conference Series*, 1719(1), 012036.
47. Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., Hosenuzzaman, M., Saidur, R., Mahbubul, I. M. and Rashid, M. M. (2012). Energy savings in the combustion based process heating in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 4527-4536.
48. Olabi, A. G., Elsaid, K., Sayed, E. T., Mahmoud, M. S., Wilberforce, T., Hassiba, R. J. and Abdelkareem, M. A. (2021). Application of nanofluids for enhanced waste heat recovery: A review. *Nano Energy*, 105871.
49. Çıtır, H. (2013). *Endüstriyel tav fırınında ekonomizer tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-50.

50. Özağdaş, E. (2020). *Bölgesel ısıtma sisteminde ekonomizer tasarımı ile enerji geri kazanım potansiyelinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kafkas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kars, 12-15.
51. Zohuri, B. (2017). *Compact heat exchangers; selection, application, design and evaluation*. Albuquerque: Springer International Publishing, 63-70.
52. Wang, L., Sundén, B. and Manglik, R. M. (2007). *Plate heat exchangers: Design, applications and performance*. Boston: WIT Press, 6-10
53. O'Connor, D., Calautit, J. K. S. and Hughes, B. R. (2016). A review of heat recovery technology for passive ventilation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1481-1493.
54. Öztürk, A., Özalp, M. and Sözen, A. (2018). Experimental Investigation of an Al₂O₃/Distilled Water Nanofluid Used In the Heat Pipes of Heat Exchangers. *Gazi University Journal of Science*, 31(2), 616-626..
55. Zohuri, B. (2016). *Heat Pipe design and technology: Modern applications for practical thermal management*. Albuquerque: Springer International Publishing, 335-394.
56. Gaugler, R. S. (1944). *Heat transfer device*. US Patent, Ohio, US Patent No. 2350348.
57. Grover, G. M. (1963). *Evaporation-condensation heat transfer device*, US Patent, New Mexico, US Patent No. 3229759.
58. Grover, G. M., Cotter, T. P. and Erickson, G. F. (1964). Structures of very high thermal conductance. *Journal of Applied Physics*, 35(6), 1990-1991.
59. Reay, D. and Kew, P. (2006). *Heat pipes; theory, design and applications*. Burlington: Butterworth-Heinemann, 5-145.
60. Barbosa, M. and Mantelli, H. (2021). *Thermosyphons and heat pipes : theory and applications*. Santa Catarina: Springer, 111-135.
61. Zohuri, B. (2020). *Functionality, advancements and industrial applications of heat pipes*. New Mexico: Academic Press, 25-238.
62. Reay, D., Kew, P. and McGlen, R. (2014). *Heat pipes; theory, design and applications*. Waltham: Butterworth-Heinemann, 65-239.
63. Sharon, M. (2019). *History of nanotechnology from pre-historic to modern times*. Beverly: Scrivener Publishing, 2-19.
64. Ali, H. M. (2020). *Hybrid nanofluids for convection heat transfer*. Dhahran: Academic Press, 10-91.
65. Kumar, A. and Subudhi, S. (2021). *Thermal characteristics and convection in nanofluids*. Roorkee: Springer, 25-43.
66. İnternet: Nanografi, Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. URL: nanografi.com.tr, Son Erişim Tarihi: 25.01.2021.

67. Kulkarni, S. K. (2015). *Nanotechnology: Principles and practices*. Pune: Springer, 55-109.
68. Subramanian, K. R. V., Rao, T. N. and Balakrishnan, A. (2019). *Nanofluids and their engineering applications*. Boca Raton: CRC Press, 1-56.
69. Das, S., Choi, S. U. S., Yu, W. and Pradeep, T. (2008). *Nanofluids: Science and technology*. New Jersey: Wiley Interscience, 39-100.
70. Hwang, Y., Lee, J. K., Lee, J. K., Jeong, Y. M., Cheong, S. I., Ahn, Y. C. and Kim, S. H. (2008). Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids. *Powder Technology*, 186(2), 145-153.
71. Yu, W. and Xie, H. (2012). A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 1-18.
72. Sözen, A., Menlik, T., Gürü, M., Irmak, A. F., Kılıç, F. and Aktaş, M. (2016). Utilization of fly ash nanofluids in two-phase closed thermosyphon for enhancing heat transfer. *Experimental Heat Transfer*, 29(3), 337-354.
73. Sezer, N., Atieh, M. A. and Koç, M. (2019). A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. *Powder Technology*, 344, 404-431.
74. Gupta, M., Singh, V., Kumar, R. and Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638-670.
75. Bianco, V., Manca, O., Nardini, S. and Vafai, K. (2015). *Heat transfer enhancement with nanofluids*. Boca Raton: CRC press, 1-44.
76. Aglawe, K. R., Yadav, R. K. and Thool, S. B. (2021). Preparation, applications and challenges of nanofluids in electronic cooling: A systematic review. *Materials Today: Proceedings*, 43 (1), 366-372.
77. Wong, K. V. and De Leon, O. (2010). Applications of nanofluids: current and future. *Advances in Mechanical Engineering*, 2, 519659.
78. Khedkar, R. S., Sonawane, S. S. and Wasewar, K. L. (2014). Heat transfer study on concentric tube heat exchanger using TiO₂–water based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 163-169.
79. İnternet: İnterlab. İnterlab Laboratuvar Ürünleri San. ve Tic. A.Ş. [Online]. URL: <https://katalog.interlab.com.tr/#125/z>, Son Erişim Tarihi: 09.02.2021.
80. Aramesh, M., Pourfayaz, F., Haghir, M., Kasaeian, A. and Ahmadi, M. H. (2019). Investigating the effect of using nanofluids on the performance of a double-effect absorption refrigeration cycle combined with a solar collector. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A Journal of Power and Energy*, 1(1), 1–32.
81. Huminic, G. and Huminic, A. (2018). Hybrid nanofluids for heat transfer applications—a state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 82-103..

82. Babar, H. and Ali, H. M. (2019). Towards hybrid nanofluids: preparation, thermophysical properties, applications, and challenges. *Journal of Molecular Liquids*, 281, 598-633.
83. Sheikholeslami, M. and Ganji, D. D. (2015). Nanofluid flow and heat transfer between parallel plates considering Brownian motion using DTM. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 283, 651-663.
84. Sözen, A., Filiz, Ç., Aytaç, İ., Martin, K., Ali, H. M., Boran, K. and Yetişken, Y. (2021). Upgrading of the performance of an air-to-air heat exchanger using graphene/water nanofluid. *International Journal of Thermophysics*, 42(3), 1-15.
85. Aytaç, İ., Sözen, A., Martin, K., Filiz, Ç. and Ali, H. M. (2020). Improvement of Thermal Performance using Spineloxides/Water Nanofluids in the Heat Recovery Unit with Air-to-Air Thermosiphon Mechanism. *International Journal of Thermophysics*, 41(11), 1-22.
86. Khanları, A. (2018). *Plakalı ısı değıştircilerin deneysel ve sayısal analizi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri, Ankara, 44-49.
87. Çiftçi, E. (2020). *Nanoakışkanların kaynama-yoğuşma ısı transferi karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 67-75.
88. Ansys, *Ansys Meshing User's Guide*. 2013.
89. Hagens, H., Ganzevles, F. L. A., Van der Geld, C. W. M., ve Grooten, M. H. M. (2007). Air heat exchangers with long heat pipes: experiments and predictions. *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2426-2434.
90. Abd El-Baky, M. A. and Mohamed, M. M. (2006). Experimental study of heat pipes heat exchanger for heat recovery in air. *Cairo*, 40(4), 1119-1136.
91. Kumar, M. J. M., Kaushik, S. C. and Garg, S. N. (2014). Thermodynamic performance evaluation of an air-air heat pipe heat exchanger. *Thermal Science*, 18(4), 1343-1353.
92. Tiwatane, T. and Barve, S. B. (2015). Recovery using heat pipe heat exchanger with hybrid nanofluid. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 1(6), 474-478.
93. Mohamed, A. D., Al-Dabagh, A. M., and Diab, D. A. (2016). Experimental and theoretical study of the thermal performance of heat pipe heat exchanger. *International Journal of Mechanical Engineering & Technology*, 7(3), 102-111.
94. Hossen, S., Morshed, A. M., Tikadar, A., Salman, A. S. and Paul, T. C. (2019). *Experimental investigation of heat pipe heat exchanger (Hphe) for waste heat recovery application*. In 4th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC), Las Vegas, 843-851.
95. 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.

96. Sözen, A., Gürü, M., Khanlari, A. and Çiftçi, E. (2019). Experimental and numerical study on enhancement of heat transfer characteristics of a heat pipe utilizing aqueous clinoptilolite nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 160, 114001.





GAZİ GELECEKTİR..