



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**BİR ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNDE DÖNME HIZININ
VE KANAT SAYISININ DEĞİŞİMİNİN ISIL PERFORMANS
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

ERAY ZAĞLANMIŞ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN**

KIRIKKALE-2022

Eray ZAĞLANMIŞ tarafından hazırlanan “BİR ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNDE DÖNME HIZININ VE KANAT SAYISININ DEĞİŞİMİNİN ISIL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale
Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan : Prof. Dr. Yahya DOĞU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale
Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye : Prof. Dr. Sinan ÇALIŞKAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Hitit Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: 30/09/2022

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

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

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

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

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

Eray ZAĞLANMIŞ

30.09.2022

ÖZET

BİR ISIL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNDE DÖNME HIZININ VE KANAT SAYISININ DEĞİŞİMİNİN ISIL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ZAGLANMIŞ, ERAY

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN

Eylül 2022, 93 sayfa

Bu çalışmada enerji depolama sistemlerinde kullanılan faz değiştiren malzemelerin ısı performansını incelenmiştir. Bu malzemelerin şarj süreleri doğal konveksiyon etkilerinden dolayı uzun süreçler almaktadır. Bu etkileri gözlemlemek ve ısı transfer performansını artırmak amacıyla döner bir iç içe borulu ısı değiştiricisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla sadece iç borunun dönebileceği, sadece dış borunun dönebileceği ve iç-dış boruların birlikte dönebileceği bir ısı değiştiricisi deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu deney düzeneğinde iç boru ile dış boru arasında kalan boşluğa faz değiştiren malzeme doldurulmuştur. Isı transfer akışkanı taşıyan iç boru içerisinden su geçirilmiştir. Suyun giriş debisi 3,5 L/dk ve giriş sıcaklığı 70°C, 75°C ve 80°C olacak şekilde sabit tutulmuştur. Isı değiştiricisinin sadece iç borusunun, sadece dış borusunun ve iç-dış borularının döndürüldüğü durumlarda, dönme hızı 12,19, 25 rpm olacak şekilde değiştirilmiş ve sabit (dönmesiz) durum ile karşılaştırılmıştır. Daha sonrasında iki borunun arasında kalan bölüme 2 ve 4 adet kanat yerleştirilerek, sadece dış borunun 12, 19 ve 25 rpm hızlar ile döndüğü deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonucunda, su giriş sıcaklığı artışının ısı transferini arttırdığı görülmüştür. Sadece dış borunun döndürüldüğü modellerin ısı performansının diğer modellere oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Dönme hızının artmasının ısı transferi performansını arttırdığı ve erime süresinde azalışa sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kanatsız çalışmalar arasında en verimli modelin 75°C ve 25 rpm hız ile iç borunun sabit dış borunun ise döndürüldüğü D 2.3 modeli olduğu belirlenmiştir. D 2.3 modelinin termal iyileştirme oranı %100,7 olarak tespit edilmiştir. Kanat eklenmiş çalışmalarda ise kanat sayısının ve dönme hızının artışı ile erime süresinin kısaldığı ve ısı transfer performansının arttığı gözlemlenmiştir. Kanat eklenmiş geometrilerde, dönme hızının artırılmasının, kanat sayısının artırılmasına oranla ısı transfer performansı üzerinde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Kanatlı çalışmalar arasında en verimli modelin, 4 kanatlı sadece dış borunun 25 rpm hız ile döndüğü ve 75°C giriş su sıcaklığına sahip H 2.3 modeli olduğu belirlenmiştir. H 2.3 modelinin termal iyileştirme oranı ise %148,6 olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz değıştiren malzemeler, FDM, Döner ısı değıştiricisi, Erime, Isı transferi performansı

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CHANGE OF ROTATION SPEED AND NUMBER OF BLADES ON THERMAL PERFORMANCE IN A THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM

ZAGLANMIŞ, ERAY

Kırıkkale University

Graduate School of Natural And Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN

September 2022, 93 pages

This study investigated the thermal performance of phase change materials used in energy storage systems. The charging times of these materials take long periods due to natural convection effects. A rotary tube heat exchanger has been experimentally investigated to observe these effects and increase the heat transfer performance. For this purpose, a heat exchanger experiment setup has been prepared in which only the inner tube can rotate, only the outer tube can rotate, and the inner-outer tubes can rotate together. In this experimental setup, phase change material is filled into the space between the inner and outer pipe. Water is passed through the inner tube carrying the heat transfer fluid. The inlet flow rate of the water was kept constant at 3.5 L/min, and the inlet temperature was at 70°C, 75°C, and 80°C. In cases where only the inner tube, only the outer tube, and the inner-outer tubes of the heat exchanger are rotated, the rotational speed is changed to 12, 19, and 25 rpm and compared with the steady (non-rotating) condition. Then, 2 and 4 fins were placed in the section between the two pipes, and experiments were carried out where only the outer pipe rotated at 12, 19, and 25 rpm. The results of the experiments showed that the increase in the water inlet temperature increased the heat transfer. It was determined that the thermal performance of the models in which only the outer tube was rotated was higher than the other models.

It was concluded that the increase in rotation speed increases the heat transfer performance and causes a decrease in the melting time. It has been determined that the most efficient model among the finless studies is the D 2.3 model, in which the inner tube is fixed, and the outer tube is rotated at 75°C and 25 rpm. The thermal enhancement ratio of the D 2.3 model was determined as 100.7%. In studies with added fins, it was observed that the melting time was shortened, and the heat transfer performance increased with the increase in the number of fins and the rotation speed. It has been determined that increasing the rotational speed is more effective on the heat transfer performance than increasing the number of fins in the geometries with added fins. It has been determined that the most efficient model among the finned studies is the H 2.3 model with only the outer tube with 4 fins, which rotates at 25 rpm and has an inlet water temperature of 75°C. The thermal enhancement ratio of the H 2.3 model was determined as 148.6%.

Keywords: Phase change materials, PCM, Rotary heat exchanger, Melting, Heat transfer performance

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi hazırlarken yaptığım araştırmalar ve deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi, tecrübe ve görüşlerinden yararlandığım her türlü problemde bana yol gösteren değerli danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Tolga DEMİRCAN'a, değerli bilgi ve tecrübelerini bizimle paylaşan bu günlere gelmemde emeği bulunan başta Sayın Makine Mühendisliği Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Yahya DOĞU olmak üzere tüm Makine Mühendisliği Bölüm Hocalarıma, tezimin fikir aşamasından itibaren beni destekleyen, bilgi birikimini ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Arş. Gör. Bahadır GEMİCİOĞU'na, deney düzeneğinin kurulması aşamasında başta yazılım ve elektronik olmak üzere daha birçok konuda desteklerini esirgemeyen kıymetli elektrik-elektronik mühendisi arkadaşım Nurullah AŞCI'ya, her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür etmeyi bir borç bilir, saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
SİMGELER DİZİNİ	xxv
KISALTMALAR DİZİNİ	xxix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	11
2.1. Enerji Depolama Sistemleri.....	11
2.2. Isıl Enerji Depolama.....	11
2.2.1. Duyulur Isı Depolama	12
2.2.2. Gizli Isı Depolama	13
2.2.3. Termokimyasal Isı Depolama	15
2.3. Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)	16
2.4. Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM) İncelenmesi.....	17
2.4.1. Erime/Donma	17
2.4.2. Aşırı Soğuma.....	17
2.4.3. Çekirdekleşme.....	18
2.4.4. Isıl Çevrim Boyunca Kararlılık.....	18
2.4.5. Isıl İletkenlik	18
2.5. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması	18
2.6. Organik, İnorganik ve Ötektik Faz Değiştiren Malzemeler	19
2.6.1. Tuz Hidratları	22
2.6.2. Parafinler	22
2.6.3. Yağ Asitleri	23
2.6.4. Organik ve İnorganik Bileşiklerin Ötektikleri	24

2.7.	Isı Transferi	24
2.8.	Isı Değiştiricileri.....	25
2.9.	Borulu Isı Değiştiricileri.....	28
3.	MATERYAL VE METOT.....	29
3.1.	Deney Düzeneğinin Tanıtımı	29
3.2.	Matematiksel Bağıntılar	38
3.3.	Belirsizlik Hesabı	39
3.4.	DeneySEL Bulguların HAD Analizi ile Karşılaştırılması	41
4.	BULGULAR VE TARTIşMALAR	42
4.1.	Döndürme Modelinin Etkisi	47
4.2.	Giriş Su Sıcaklığı Değişiminin Etkisi	51
4.3.	Dönme Hızının Etkisi.....	54
4.4.	Kanatlı Model için Dönüş Hızının Etkisi	59
4.5.	Kanatlı Model için Kanat Sayısının Etkisi	63
5.	SONUÇLAR.....	71
	KAYNAKLAR	74
	EKLER	81
	ÖZGEÇMİş.....	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Duyulur ve gizli ısı depolama tekniklerinin kıyaslanması [46]	15
2.2 FDM'lerin avantaj ve dezavantajları [42,47,48,51,52]	21
2.3 Bazı yağ asitlerinin özellikleri	24
3.1 Motor güç parametreleri.....	32
3.2 Deneysel sistemi oluşturan elemanlar ve kullanım amaçları	36
3.3 Deneysel sistemi oluşturan elemanların marka ve modelleri.....	37
3.4 Parametrelerin belirsizliği	40
3.5 70 °C giriş suyu sıcaklığı için sadece dışın 25 rpm ile döndüğü deney verileri.....	40
3.6 Hesaplanan parametreler	41
4.1 Kanatsız deney konfigürasyonları.....	43
4.2 Kanatlı deney konfigürasyonları	44
4.3 Malzeme özellikleri [56,57,58]	46
4.4 Kanatsız deneylerinin termal iyileştirme oranları (Kayıpsız-Kayıplı).....	66
4.5 Kanatlı deneylerinin termal iyileştirme oranları (Kayıpsız-kayıplı).....	69
5.1 Kanatsız çoklu deney veri karşılaştırılması.....	72
5.2 Kanatlı çoklu deney veri karşılaştırılması.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Isıl enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması [40].....	12
2.2 Duyulur ve gizli ısının termal enerji-sıcaklık grafiği [44]	13
2.3 Farklı iki maddenin ısı depolama karşılaştırması [47].....	14
2.4 FDM'nin erime-katılaşma süreci [48].....	16
2.5. FDM'lerin sınıflandırılması [40,47].....	19
2.6 Organik FDM görselleri (a) parafin mumu, b) yağ asiti) [49]	20
2.7 İnorganik FDM görselleri (a) Sodyum klorür, b) Magnezyum klorür heksahidrat) [49]	20
2.8 FDM'lerin erime entalpisi - erime sıcaklığı grafiği [35]	21
2.9 Isı transfer şekline göre sınıflandırma [53]	26
2.10 Akışkan sayısına göre sınıflandırma [53]	26
2.11 Yüzey yoğunluğuna göre sınıflandırma [53]	26
2.12 Konstrüksiyonlarına göre sınıflandırma [53]	27
2.13 Akış şekline göre sınıflandırma [53].....	27
2.14 Isı transfer düzeneğine göre sınıflandırma [53]	28
3.1 Deney tesisatının şematik gösterimi	29
3.2 Deney düzeneğinin 3 boyutlu görünümü	30
3.3 Döner mafsal [59]	31
3.4 Deney düzeneği kontrol hacmi döndürme mekanizması tasarımı	31
3.5 Deney tesisatı ekipmanları a)dış şase b) deney tüpü c) kontrol hacmi d) bluetoothlu sıcaklık sensörleri gösterimi e)parafin mumu f) benmari usulü eritme yöntemi gösterimi.....	33
3.6 Sıcaklık sensörü konumlandırma a)giriş, b)çıkış	34
3.7 Sıcaklık sensörü konumlandırma ve düzeneğin ölçülendirmesi	35
3.8 Seri port utility arayüzü.....	35
3.9 Kanat konumlandırılması a) 2 kanatlı, b) 4 kanatlı.....	36
3.10 Deney düzeneği.....	38

4.1 Yapılan deney modellerinin gösterimi (a) sabit b) iç dönme c) iç-dış dönme d) dış dönme e) 2 kanatlı sabit f) 2 kanatlı dış dönme g) 4 kanatlı sabit h) 4 kanatlı dış dönme).....	43
4.2 75°C giriş suyu ve 4 farklı model için erime süreleri.....	47
4.3 75°C giriş suyu ve 3 farklı model için termal iyileştirme oranı	48
4.4 75 °C giriş suyu ve 12 rpm dönüş hızı için güç değeri.....	49
4.5 75 °C giriş suyu ve 12 rpm dönme hızı için 4 farklı model için ortalama Nusselt sayısı.....	50
4.6 70 °C giriş sıcaklığı 60. dakika için sıcaklık dağılımı (giriş-yeşil, çıkış-kırmızı)...	50
4.7 Giriş suyu sıcaklığı değişiminin ortalama sıcaklığa etkisi.....	51
4.8 Giriş suyu sıcaklığı değişiminin depolanan enerjiye olan etkisi	52
4.9 C modeli için giriş su sıcaklığı değişimiyle güç(watt) depolanan enerji (kJ) ve erime süresi (dakika) değerlerinin karşılaştırılması	53
4.10 70 °C giriş su sıcaklığı ve D modeli için dönme hızı değişiminin erime süresine olan etkisi	54
4.11 D modeli ve 70°C giriş su sıcaklığı için dönme hızı değişiminin ortalama sıcaklığa etkisi.....	55
4.12 D modeli ve 70°C giriş su sıcaklığı için dönme hızı değişiminin termal iyileştirme oranına olan etkisi	56
4.13 70°C giriş sıcaklığı için dönme hızı değişiminin Nusselt sayısına olan etkisi.....	57
4.14 Farklı giriş sıcaklıkları için sadece iç borunun dönme hızının değişiminin erime sürelerine olan etkisi	58
4.15 70°C giriş su sıcaklığı ve D modelinin 60. dakikada ki sıcaklık dağılımı (giriş-yeşil, çıkış-kırmızı)	58
4.16 4 Kanatlı modelin dönme hızının ortalama sıcaklığa etkisi	59
4.17 Kanatlı modelin dönme hızının erime süresine olan etkisi	60
4.18 4 Kanatlı modelin dönüş hızının ortalama Nusselt sayısına olan etkisi.....	61
4.19 4 Kanatlı modelin dönme hızının termal iyileştirme oranına olan etkisi	62
4.20 Dönüş hızının sıcaklık dağılımına olan etkisi (giriş-yeşil, çıkış-kırmızı)	62
4.21 Kanat sayısının ortalama sıcaklığa olan etkisi	63
4.22 Kanat sayısının erime süresine olan etkisi	64
4.23 Kanat sayısının güce olan etkisi	64
4.24 Kanat sayısının sıcaklık dağılımına etkisi (30. Dakika).....	65
4.25 Kanatsız deneylerin erime süreleri.....	65

4.26 Kanatlı deneylerinin erime süreleri68



SİMGELER DİZİNİ

β	Sıvı fraksiyon oranı	-
C_p	Özgül ısı	(J/kgK)
D	İç borunun dış çapı	(mm)
d	İç borunun iç çapı	(mm)
Δx	Alıcılar arası mesafe	(mm)
ΔH_{FDM}	Gizli ısı	(J/kg)
H_{FDM}	Fdm entalpisi	(J)
$h_{FDM,ref}$	Referans entalpi değeri	(J)
h_{FDM}	Duyulur ısı	(J/kg)
h	Isı taşınım katsayısı	(W/m ² K)
I	Motor akım şiddeti	A
k	Isı iletim katsayısı	(W/mK)
L	Özgül gizli ısı	(J/kg)
m	Kütle	(Kg)
μ	Viskozite	(kg/m.s)
Nu	Nusselt sayısı	-

$P_{\text{kayıp}}$	Döndürmek için harcanan güç	(W)
ρ	Yoğunluk	(kg/m ³)
Q_{transfer}	Güç	(J/s)
$Q_{\text{transfer,temel}}$	Sabit durumun ısı transfer enerjisi	(J/s)
q_d	Isı akısı	(W/m ²)
T_d	Isı transfer akışkanı duvar sıcaklığı	(°C)
T_s	Erime sıcaklığı	(°C)
T_k	Katılma sıcaklığı	(°C)
T_c	Alıcının sıcaklığı	(°C)
TER	Termal iyileştirme oranı	-
t_{transfer}	Isı transfer süresi	(s)
V	Motor voltajı	(V)

KISALTMALAR DİZİNİ

ADC	Analog Sayısal Dönüştürücü
FDM	Faz değiştiren malzeme
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
NTC	Negative Temperature Coefficient
TER	Termal İyileştirme Oranı

1. GİRİŞ

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumunda da belirtildiği üzere enerji var iken yok, yok iken de var edilemez, ancak bir hâlden diğer bir hâle dönüştürülebilir. Geçmişten günümüze kadar sanayinin, teknolojinin gelişmesi ve nüfusun sürekli artmasıyla enerjiye olan talebinde sürekli artmasına neden olmuştur. Özellikle sanayi devrimiyle başlayan enerji tüketimi, günümüze kadar sürekli artış göstermektedir. Günümüzde artan, bu enerji ihtiyacına cevap verebilmek için fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak bu kaynaklar sonlu bir enerji kaynağı olması sebebiyle giderek azalmakta ve doğaya, çevreye telafisi çok zor olan tahribatlar vermektedir. İçinde bulunduğumuz bu çağın en önemli ihtiyacı olan enerjinin bir şekilde karşılanabilmesi amacıyla, yeni (alternatif) enerji kaynakları bulma ve mevcut enerjiyi depolamaya olan gereklilik giderek artmaktadır. Birincil enerji kaynakları, petrol, kömür, doğal gaz, nükleer vb. iken, alternatif enerji kaynakları ise güneş enerjisi, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi vb. kaynaklar söylenebilir. Birincil enerji kaynakları genellikle sonlu tükenme tehlikesi içeren enerji kaynakları iken, alternatif enerji kaynakları ise genellikle süreklilik gösteren enerji kaynaklarıdır. Bu sebeple “yenilenebilir enerji” olarak adlandırılabilir. Bunları fosil yakıtlı enerji kaynaklarından ayıran en önemli özelliği ise çevreye zarar vermeden kullanılabilmesidir.

Yenilenemez enerji kaynaklarının yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha yoğun bir talebin olmasının en temel sebebi ihtiyaç duyulan her an fosil yakıtlardan enerji elde edilebilmesi iken, yenilenebilir enerji kaynaklarında genellikle böyle bir durum söz konusu değildir. Çünkü yenilenebilir enerji kaynakları her an aktif değildirler, kesikli hizmet vermektedirler. Bu durumu değerlendirdiğimizde enerji ihtiyacının yoğun olduğu zamanlarda, eğer yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılmıyorsa burada enerjinin temin edilememe problemi ortaya çıkmaktadır. Bu tip problemleri ortadan kaldırmak için dünyanın birçok yerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının depolaması için araştırma geliştirme çalışmaları yapılmaktadır.

En sık kullanılan enerji depolama sistemlerinin başında, enerjinin gizli ısı olarak depolandığı termal enerji depolama sistemleri gelmektedir. Bu sistemlerde yaygın olarak faz değıştiren malzemeler (FDM) kullanılmaktadır. FDM'ler yüksek gizli ısı depolama özelliğine sahip olan ve depoladıkları enerjiyi gerektiğinde istenilen ortama geri verebilen şarj-deşarj özellikli malzemelerdir. FDM'ler yüksek ısı depolama özelliğine sahip olduklarından, atık ısının depolanmasında, enerji tedariginde oluşabilecek aksaklıkların giderilmesinde, yenilenebilir enerji sistemlerinde üretimin tüketimden fazla olduğu durumlarda enerji kaybını önlemek için kullanılmaktadırlar. FDM'ler yapı malzemelerine uyumlu olması sebebiyle bina yalıtımında, tekstil sektöründe, sağlık uygulamalarında organ taşınmasında, bina ve ortam ısıtma ve soğutma işlemlerinde, elektronik parçaların soğutulmasında ve uzay teknolojisi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır.

Termal enerji depolama sistemleri üzerine yapılan literatür incelemesinde faz değıştiren malzemelerin gizli ısı enerjisi depolama sistemlerinde kullanıldığı pek çok çalışmada görülmüştür. Bu çalışmaların çoğunlukla faz değıştiren malzemelerin erime süresini kısaltmaya yönelik çalışmalar olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda özellikle akışkanın giriş sıcaklığı, ısı değıştiricisi geometrisi, kanat sayısı, kanat geometrisi, boru düzeni vb. konular üzerine odaklanıldığı söylenebilir.

Kurnia ve Sasmito [1] yaptıkları çalışmada, faz değıştiren malzemelerin erime ve katılaşma süresini düşürmeye yönelik ısı değıştiricisini hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi ile modellemişlerdir. Bu ısı değıştiricisi modelinde sabit durum ve sadece iç borunun 0,1, 0,5 ve 1 rpm hızlar ile döndüğü analizleri incelemişlerdir. Analizlerin sonucunda sabit duruma kıyasla ısı transfer performansında %25 artış sağladığını bildirmişlerdir.

Khosroshahi ve Hossainpour [2] yaptıkları çalışmada, faz değıştiren malzemelerin erime süresini düşürmeye yönelik, bir ısı değıştiricisini 2 boyutlu olarak modellemişlerdir. Bu ısı değıştiricisi modelinde dış borunun sekiz farklı senaryo ile döndüğü, farklı süre ve açılarda durup beklediği modeller oluşturmuşlardır. Analizlerin sonucunda adım adım dönmenin, sürekli dönmeye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Dukan ve arkadaşları [3] yaptıkları çalışmada, iç içe borulu bir ısı değıştiricisi deney düzeneği yapmışlardır. Bu sistemin erime süreci termokupl ve kamera ile takip

edilmiştir. Erimenin, doğal konveksiyonun etkisiyle ortadan üste doğru ilerlediğini, alt bölümde ise ısının iletim ile yayıldığını belirtmişlerdir. Erime süresinin, ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı değişiminden doğrudan etkilendiğini belirtmişlerdir.

Ali ve arkadaşları [4] yaptıkları çalışmada, çift borulu ısı değiştiricisi performansını iç boru dönüşü, eksantriklik ve reynolds sayısının etkisini incelemişlerdir. İç borunun 500 rpm dönüş hızında ve 40 mm eksantrikli olduğunda ısı transfer performansında %223'lük bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Ancak 500 rpm dönüş hızında ve 40 mm eksantrikli olduğunda basınçın %53 arttığı görülmüştür.

Koca ve Cıtlak [5] yaptıkları çalışmada, farklı sarım sayıları olan helisel kıvrılmış tüplerin farklı devir hızlarında döndüğü durumları birbirleri ile kıyaslamışlardır. Dönüş hızının 300 rpm'e kadar artışının, ısı transferi performansını artırdığını ancak 300 rpm'den sonra ısı transfer performansında düşüş olduğunu belirtmişlerdir. 5 helisli borunun 300 rpm ile döndüğü çalışmanın, ısı transferi performansını maksimum seviyede artırdığını belirtmişlerdir. En önemli sonucun yüksek devirlerde iç borunun dönmesinin kararsız bir akışa sebep olduğu ve bu sebeple ısı transferi performans artışını az etkilediğini belirtmişlerdir.

Zalba ve arkadaşları [6] yaptıkları çalışmada, termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan faz değiştiren malzemelerin uygulama yöntemlerine ve malzemelerin termal özelliklerine göre incelemişlerdir.

Saydam ve arkadaşları [7] yaptıkları deneysel çalışmada, helisel bir borulu ısı değiştiricisi modeli geliştirmişlerdir. Bu modeli farklı çalışma koşulları altında erime ve katılma performanslarını incelemişlerdir. Şarj sürecine en önemli etkinin giriş sıcaklığının olduğunu ve 5°C'lik sıcaklık artışı ile erime süresinde %35'lik bir azalışa sebep olduğunu, akış hızının yükseltilmesinin %21'e kadar şarj süresini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ancak deşarj sürecine akış hız ve yönünün etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Alshara [8] yaptığı çalışmada, yatay doldurulmuş eş merkezli silindirik bir ısı değiştiricinin de sayısal inceleme yapmıştır. Yapılan araştırma sonucunda suyun giriş sıcaklığının ve reynolds sayısının artmasının erime hızını arttırdığı, FDM'nin doldurulduğu borunun çapının küçülmesi ise daha hızlı erimeye sebep olduğunu bildirmiştir. FDM'nin başlangıç sıcaklığının erime süresi üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu belirtmiştir.

Nateghi ve arkadaşları [9] yaptıkları çalışmada, doğal konveksiyonun etkisini gidermek için sırasıyla iç borunun eksantrik olduğu, iç borunun kanatlı olduğu ve iç borunun eksantrik- kanatlı olduğu modeller oluşturmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda doğal konveksiyon etkilerini azaltan en etkili unsurun kanat olduğunu belirtmişlerdir.

Zaglanmis ve arkadaşları [10] yaptıkları çalışmada, boru sayısı ve faz değiştiren malzeme sabit tutularak iç boruların dizilim konfigürasyonlarını değiştirerek farklı debi ve giriş sıcaklıkları için analizler yapmışlardır. Bu analiz sonuçlarında debi değişiminin etkisinin olmadığı ancak giriş sıcaklığı ve boru dizilimlerinin etkili olduğunu bildirmişlerdir. Özellikle boruların aralarındaki mesafenin arttırılmasının ve borunun alt yarısına doğru kaydırılmasının erime süresini kısalttığını belirtmişlerdir.

Gasia ve arkadaşları [11] yaptıkları çalışmada, dinamik erimenin etkisini incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak su kullanmışlardır. Sistemde eriyen suyun farklı hızlarda yeniden katı faz değiştiren malzemenin üzerine pompa ile 2 l/dk ile sirkülasyon yapılması durumunda %66'ya varan ısı transfer oranında artış olduğunu belirtmişlerdir.

Rathod ve arkadaşları [12] yaptıkları deneysel çalışmada, iç içe borulu ısı değiştiricisinin iç boru ile dış boru arasında kalan bölgeyi parafin ile doldurmuşlardır. 70°C ile 85°C arasında ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı ve 0,0167 ile 0,0833 kg/s aralığında ısı transfer akışkan giriş hızları için deneyler yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda hızın ve sıcaklığın artmasının erime süresini etkilediğini ancak sıcaklığın giriş hızından daha fazla etkilediğini vurgulamışlardır.

Rathod ve Banerjee [13] yaptıkları deneysel çalışma ile erime süresini hesaplamının mümkün olmadığı faz değiştiren malzemelerden deneyler yapmışlardır. Bu deneylerden aldıkları veriler regresyon programı ile reynolds ve stefan sayına bağlı total erime süresini veren bir bağıntı elde etmişlerdir.

Feliński ve Sekret [14] yaptıkları deneysel çalışmada, parafin içeren ısı depolama sisteminin performansını araştırmışlardır. Parafin kullanımının, depolanan ısının geri kazanılmasını sağlayarak güneş enerjisi termal sisteminin çalışma süresini uzattığını gözlemlemişlerdir.

Dubovsky ve arkadaşları [15] yaptıkları çalışmada, içleri faz değiştiren malzeme ile dolu olan tüplerin üzerinden sıcak hava geçirerek erimesi ve gizli ısı depo etmesini

sağlamışlardır. Sistemin boru sayı ve konumlarına bağlı olarak analitik bağıntılar hazırlamışlardır. Nümerik sonuçlar ile karşılaştırılarak bağıntıların doğru olduğunu ve analitik çözümün ısı değiştiricilerine uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Sharma ve arkadaşları [16] yaptıkları incelemede, birçok faz değiştiren malzemenin kullanıldığı başta enerji depolama sistemleri, su ve alan ısıtma-soğutma gibi araştırmaları karşılaştırmalı incelemişlerdir.

Abhat [17] yaptığı çalışma ile 0-120°C arası düşük erime sıcaklığına sahip, gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan organik ve inorganik faz değiştiren malzemeler için fiziksel ve kimyasal davranışları hakkında araştırmalar ve yorumlamalar yapmıştır.

Liu ve Groulx [18] yaptıkları çalışmada, kanatlı bir ısı değiştiricisi deney düzeneği geliştirmişlerdir. Kanatçıkların açılı ve düz olduğu durumlar için deneyler yapmışlardır. Erime sürecinde, düz olduğu durumun daha etkin olduğu, ancak giriş sıcaklığının artmasının daha fazla etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Ancak katılma süreci için ise kanatların açılarının etkili olmadığını belirtmişlerdir.

Rathod ve Banerjee [19] yaptıkları deneysel çalışmada, boyuna kanatçıkların yerleştirilmesiyle faz değiştiren malzemelerin ısı transfer hızında önemli bir artış meydana getireceğinin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Değişen akışkan giriş sıcaklıkları ve ısı transfer akışkanının akış hızları için ısı transfer performansı artışı, erime ve katılma süresi bakımından belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar neticesinde, ısı transfer performansı artışının, ısı transfer akışkanının kütle akış hızındaki artışa kıyasla, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığındaki artışa daha duyarlı olduğunu belirlemişlerdir. Üç kanat montajı ile katılma süresinde %43,6 ya kadar düştüğünü gözlemlemişlerdir. 80°C ve 85°C giriş sıcaklıkları için kanatçıklar nedeniyle erime süresindeki azalma yüzdesinin sırasıyla %12,5 ve %24,52 olduğunu belirtmişlerdir.

Çakmak ve arkadaşları [20] yaptıkları deneysel çalışmada, hazırladıkları ısı değiştiricisinde dalgalı ve düz tüp kullanarak girdap akış oluşturmuşlardır. Çalışma kapsamında ısı transferi, sürtünme faktörü ve termal performans faktörünü deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonucunda, dalgalı borunun termal performansı sürtünme kuvveti ve ısı transferi iyileştirme faktörü düz bir borudan çok daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

Ettouney ve arkadaşları [21] yaptıkları deneysel çalışmada, dikey olarak konumlandırılmış iç içe borulu bir ısı değiştiricisi ile erime ve katılma süreçleri için

deneyler yapmışlardır. Ölçüm sonuçlarından Nusselt, Fourier, Biot, Stefan ve Rayleigh sayılarını hesaplamışlardır. Erime sürecinde ısı transfer akışkanının akış yönü yukarı yönlü olduğu durumda doğal konveksiyon etkileri gösterirken, aşağı yönlü olduğu durumda ise etkilerinin ihmal edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Katılma sürecinde ise ısı transferi akışkanının yönünün etkisinin ihmal edilebilecek seviyede az olduğunu bildirmişlerdir.

Dukkan ve arkadaşları [22] yaptıkları deneysel çalışmada, dikey ve yatay olarak konumlandırılmış iç içe borulu ısı değiştiricisinde parafin Rt-42 malzemesi kullanılarak deneyler yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde ısı transfer akışkanı sıcaklığı 60°C ile 80°C aralığında değişen deneyler yapmışlardır. Erime sürecinde dikey olarak yapılan deneylerin, yatay olarak yapılan deneylere kıyasla daha kısa sürdüğünü belirtmişlerdir. Borulu ısı değiştiricisi sisteminin dikey konumlandırılmasının, yatay konumlandırılmaya göre daha fazla enerji depoladığını belirtmişlerdir.

Hosseini ve arkadaşları [23] yaptıkları çalışmada, iç borulu bir ısı değiştiricisi içerisine farklı oranlarda bakır partikülleri karıştırıp erime süresine olan etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak partikül fraksiyonun artmasıyla daha hızlı eridiği ve erime süresini %4,6'ya kadar kısalttığını belirtmişlerdir.

Alaraji ve arkadaşları [24] yaptıkları çalışmada, FDM'lerin erime katılma süreçlerini, iç borusu dairesel ve elips şekillerinde olan ve farklı eksantriklerde yerleştirilmiş ısı değiştiricisi üzerinde incelemelerde bulunmuşlardır. Bu çalışmalar sonucunda eksantrikliğin artmasıyla erime süresinin %58'e kadar kısaldığı, katılma süreci için ise dış duvar sıcaklığının 10°C azaltılması ile katılma süresinin %17 oranında azaldığını belirtmişlerdir.

Chibani ve Merouani [25] yaptıkları çalışmada, enerji depolama ünitesinde kullanılan FDM'lerin erime sürecini kısaltmaya yönelik farklı oranlarda ve türlerde nanopartiküller kullanılarak sayısal incelemelerde bulunmuşlardır. Bu analizlerin sonucunda %1,7'lik ortalama sıcaklık artışı ve buna karşılık enerji veriminde %150 artış olduğunu belirtmişlerdir.

Pahamli ve arkadaşları [26] yapmış oldukları çalışmada, iç boru eksantrikliğinin, ısı transfer akışkan sıcaklığının ve akış hızının etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada FDM olarak Rt-50'yi kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda ısı transfer akışkan hızının önemli bir etkisinin olmadığını görmüşlerdir. Ayrıca ısı transfer

akışkan giriş sıcaklığının ve ısı transfer akışkanını taşıyan iç boru eksantrikliğinin artmasının erime sürecini hızlandırdığını görmüşlerdir.

Mat ve arkadaşları [27] yaptıkları çalışmada, iç içe üç borulu bir ısı değiştiricisinde FDM'nin erime (şarj) sürecini sayısal olarak Ansys fluent ile incelemişlerdir. Faz değiştiren malzemeyi iç, dış ve her iki tüpten eritmek amacıyla üç farklı ısıtma metodu kullanmışlardır. Ayrıca ısı transfer performansını iyileştirmek için iç, dış ve iç-dış borularda kanatların kullanıldığı durumlar üzerine de analizler yapmışlardır. Sonuç olarak en fazla ısı transfer performansı artışının, iç-dış kanatlı üç borulu ısı değiştiricisinin olduğunu belirtmişlerdir. İç-dış kanatlı üç borulu ısı değiştiricisi ile kanatsız üç borulu yapıyla kıyaslandığında erime süresinin %43,3 düştüğünü belirtmişlerdir.

Kazemi ve arkadaşları [28] yaptıkları çalışmada, FDM ile hazırladıkları ısı değiştiricisinde kanatçık sayısı, uzunluğu, konumu ve açısının değişiminin ısı transferi performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Üç kanatlı durumlar göz önüne alındığında en yüksek erime hızının, kanatlar arasındaki açının 60 derecede olduğunu ancak ilerleyen süreçte doğal konveksiyon etkisiyle erime süresinin uzadığını belirlemişlerdir. Optimum açının ise 120 derecede olduğunu belirlemişlerdir. Çift kanatçıklı durumlarda 45 derece ve üzeri açılarda doğal konveksiyon akışlarının tıkanmasına neden olduğunu, kanat açılarının 45 derecenin altına düşürülmesiyle toplam erime süresinin kısaldığını belirtmişlerdir.

Susantez ve arkadaşları [29] yaptıkları çalışmada, kanatçık dağılımı, sayısı ve kalınlığının ısı enerji depolama performansı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kanatçık sayısı artışı ile daha yüksek verim elde edildiğini belirtmişlerdir. Sık kanatçık kullanımının dengeli kanatçık dağılımına kıyasla daha düşük verim elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kanatçık kalınlığının artmasıyla FDM'ye geçen ısı miktarı artmakta ancak depolanan enerji miktarının azalmakta olduğunu belirtmişlerdir.

Joybari ve arkadaşları [30] yaptıkları çalışmada, FDM ile doldurulmuş üç borulu bir ısı değiştiricisinin Ansys ile sayısal analizlerini yapmışlardır. İç sıcak ve dış soğuk borulara farklı konumlarda kanatçıklar modellemişlerdir. Bu analizlerin sonucunda eş zamanlı şarj deşarj sisteminde en verimli olanının, bir adet üstte soğuk kanatlı diğer üçü ise altta sıcak kanatlı olan modelin doğal konveksiyon ile en uyumlu model olduğunu belirtmişlerdir.

Zhuo Li ve arkadaşı [31] yapmış oldukları çalışmada, birçok değişken kullanmış ve bunlardan bazıları ise kanatçıklı ve kanatçıksız geometri, FDM'nin saf NaNO_3 olması veya NaNO_3 genişletilmiş grafit kompoziti olması ve ısı transfer akışkanının sentetik yağ veya erimiş tuz olması gibi değişkenler için incelemelerde bulunulmuştur. Sonuç olarak kanatçık kullanımıyla birlikte kompozit kullanmanın erime ve katılma sürecini en azından %14'e kadar kısalttığını belirtmişlerdir. Kanatçıklı yapı ile birlikte ısı transfer akışkanı olarak erimiş tuz kullanmanın sentetik yağa göre erime ve katılma sürecini %10'a kadar kısalttığını belirtmişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak kompozit malzeme kullanmanın ise saf NaNO_3 'e göre %20 daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Mahdi ve arkadaşları [32] yapmış oldukları deneysel ve nümerik çalışmada, parafin mumunun erime davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları incelemede tüp ve kabuklu geometri için kanatçıksız ve kanatçıklı yapıları incelemişlerdir. Erime sürecinde kanatçıklı yapının kanatçıksız yapıya göre daha etkili olduğunu görmüşlerdir. Buna ek olarak kanatçıksız yapıda yatay eksende erime sürecinin dikey eksene göre inanılmaz derecede etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Kousha ve arkadaşları [33] yapmış oldukları deneysel çalışmada, çok borunun olduğu ısı değiştiriciler üzerine çalışmışlardır. Yapmış oldukları deneylerde FDM olarak Rt-35 kullanmışlardır. Isı transfer akışkanı giriş sıcaklıklarını 70°C , 75°C ve 80°C olarak belirlemişlerdir. Geometrileri ise bir, iki, üç ve dört borulu olacak şekilde seçmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda tüp sayısı arttıkça erime ve katılma sürecini olumlu etkilediğini görmüşlerdir.

Siyabi ve arkadaşları [34] yapmış oldukları nümerik ve deneysel çalışmada, silindirik ısı enerji depolama sisteminin erime karakteristiklerini incelemişlerdir. Dikeyden yataya üç eğim pozisyonunu dikkate almışlardır. Bunlar 0, 45 ve 90 derecedir. Erime sıcaklığı 35°C ile 37°C arasında olan parafin mumunu, faz değiştiren malzeme olarak kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda 45 derecelik eğim için FDM'nin en hızlı eridiğini belirtmişlerdir.

Longeon ve arkadaşları [35] yapmış oldukları nümerik ve deneysel çalışmada, konsantrik ısı değiştiricisinin gizli ısı enerji depolama sistemi olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Deneysel çalışmaları nümerik çalışmalarıyla uyumlu olmuştur. Çalışmaları esnasında doğal konveksiyonun çok etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Fırat ve arkadaşları [36] yapmış oldukları çalışmada, faz değiştiren malzeme içeren ısı depolama sisteminin dikey ve yatay konumlarda erime ve katılaşma sürecine olan etkisini incelemişlerdir. Faz değiştiren malzeme olarak parafin mumu kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda kanatçık sayısının artışı erime ve katılaşma sürecine olumlu etkisi olduğunu, erime süreci için 10 kanatçıklı ve dikey konumda, katılaşma süreci için ise 10 kanatçıklı ve yatay konumda olması durumunda en yüksek ısı performans gözlemlenmiştir.

Tiari ve arkadaşları [37] yaptıkları çalışmada, kanatlı ısı borusuna sahip termal enerji depolama sistemlerinde, yüksek sıcaklık faz değişim malzemesi kullanımını sayısal olarak ele almışlardır. Doğal konveksiyonun, iç borularının birbirleriyle olan aralığının, kanat uzunluğu ve sayılarının, termal enerji depolama ünitesinin termal tepkisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda doğal konveksiyonun, faz değişim malzemesinin şarj süresini yaklaşık %30 azalttığını belirlemişlerdir. Isı borusunun sayısının artırılmasının ise, erime hızının artmasına yol açtığını gözlemlenmiştir.

Borhani ve arkadaşları [38] yaptıkları sayısal çalışmada, spiral kanatlı tüp içindeki Rt-50 faz değişim malzemesini incelemişlerdir. Isı değiştiricisinin belirli açılarda tutulmasının, erime işlemi üzerine olan etkilerine odaklanmışlardır. Isı değiştiricisinin yatay düzlem ile yaptığı açının artırılmasının, erime süresini önemli ölçüde kısalttığını gözlemlenmiştir.

Görüldüğü üzere literatür detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda genellikle ısı transfer akışkanı giriş hız ve sıcaklıkları değişiminin etkisini farklı ısı değiştiricisi modelleri için deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yapılan incelemelerde çoğunlukla ısı değiştiricisi iç boru sayısı, konumu, geometrik şeklinin ısı transfer performansına etkilerini incelemişlerdir. Döner ısı değiştiricisi üzerine yapılan az sayıdaki çalışmada ise sadece iç borunun farklı hızlarda döndüğü çalışmalar tespit edilmiştir. Ancak dış borunun döndüğü ve bunların karşılaştırılmalı incelendiği çalışmalara rastlanılmamıştır. Ayrıca literatür taramasında kanat şekli, kanat sayısı ve konumu üzerine analitik ve deneysel çalışmaların olduğu ancak kanatlı ısı değiştiricisinin dönmesi üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla bir deney düzeneği tasarlanmış ve kurulmuştur. Bu sistem ile su giriş hızı ve faz değiştiren malzeme cinsi sabit tutularak, farklı dönme hızları ve farklı giriş suyu sıcaklık değerleri için incelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda

sadece iç borunun döndüğü, sadece dış borunun döndüğü ve her iki borunun da birlikte döndüğü durumlar için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler doğrultusunda bir ısı değiştiricisinde dönme hareketinin ısı transferine olan etkisi irdelenmiştir. Ek olarak dış boruya 2 ve 4 adet kanat eklenerek iki ek model daha oluşturulmuştur. Bu modellerde sadece dış borunun döndürüldüğü durum için deneyler yapılmıştır. Bu sayede döner bir ısı değiştiricisinde kanat eklentisinin ısı transfer ve termal depolama üzerindeki etkileri incelenmiştir.



2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Enerji Depolama Sistemleri

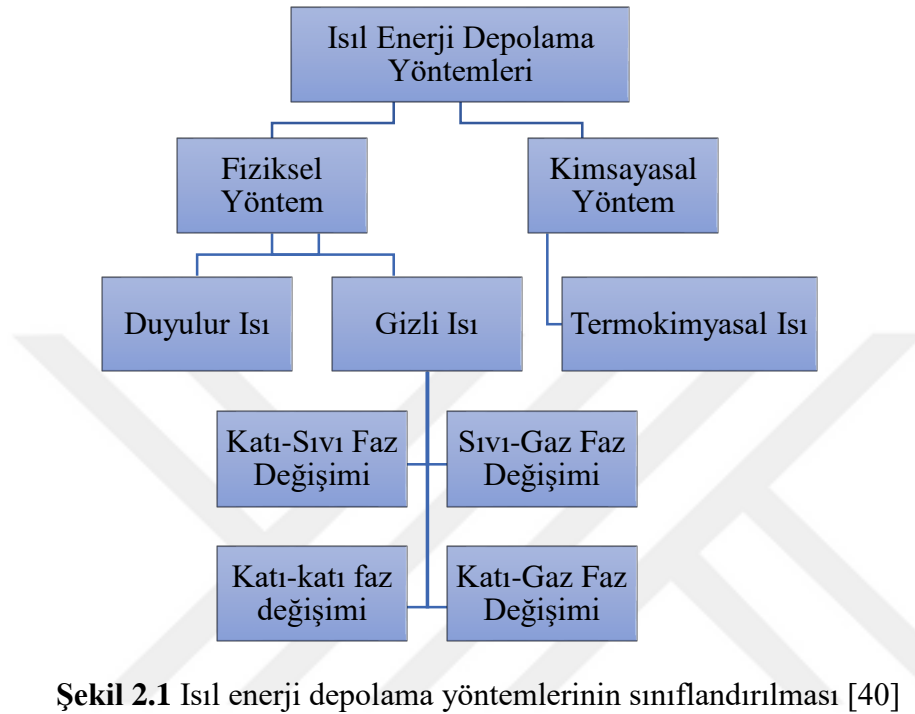
Enerjinin istendiği zaman, istenilen yerde kullanılmaya hazır olması istenir. Enerji depolama sistemlerinin amacı, enerjinin istediğimiz zaman istediğimiz yerde kullanılabilmesi için saklanmasıdır. Enerjinin depolanması için istenilen bazı özellikler bulunmaktadır. Bu özellikler; yüksek depolama kapasitesi, yüksek şarj deşarj verimi, enerji kayıplarının olmaması veya minimum seviyede olması, kullanım ömrünün uzun olması, ucuz ve bakım maliyetlerinin az olması istenir. Az hacimde yüksek enerji depolaya bilinmelidir. Enerji depolama sistemleri, farklı formlarda depolama yöntemlerine sahiptir. Bu yöntemlerden bazıları ise şunlardır; elektriksel enerji depolama, biyolojik enerji depolama, kimyasal enerji depolama, ısı enerji depolama, potansiyel enerji depolama, yerçekimi potansiyel enerjisi depolama, kinetik enerji depolama vb. yöntemler mevcuttur. Depolama yöntemlerinden birisi olan ısı enerji depolama sistemleri incelenmiştir. [39]

2.2. Isıl Enerji Depolama

Isıl enerji, maddeyi oluşturan temel yapı taşlarının titreşimi sonucunda oluşur. Enerjinin aktarımı ise sistem ile ortam arasındaki sıcaklık farkından dolayı ısı transferi yoluyla gerçekleşir. Isıl enerji depolama sistemleri elde edilen enerjinin daha verimli kullanılmasını sağlayan ve yakın gelecekte daha aktif kullanılması beklenen bir teknolojidir. Isıl enerji depolama sistemlerinin temelinde depolama sistemine enerji sağlanması, bu enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılması prensibi yatmaktadır. Yani yükleme, depolama, geri kazanma süreçlerine dayanır. Isıl enerji depolama sistemlerinin sağlayacağı bazı faydalar aşağıda verilmiştir. [40,41]

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının süreksizliğini giderir. (Güneş enerjisi, vs.).
- Elektriğin ucuz olduğu zamanlarda depolama yapılabilir.
- Yüksek ve düşük sıcaklıklardaki atık faydalanılmasına olanak sağlar.

- Enerji verimliliğini artırarak fosil yakıt tüketimini azaltır.
- Kojenerasyon santrallerinin daha verimli çalışmasını sağlar.
- Elektronik cihazların sıcaklık dengesini koruyarak uzun ömürlülüğünü sağlar [40].



Şekil 2.1 Isıl enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması [40]

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere temel olarak üç çeşit ısıl enerji depolama yöntemi mevcuttur. Bu depolama yöntemlerini birbirinden farklı kılan özellikleri birim hacimde depolayabildikleri enerji miktarlarıdır. Birim hacimdeki iç enerji değişimi fazla olan bir materyalin termal enerji depolama sisteminde kullanılması, enerjinin depolanması için gerekli olan hacmin azalmasını sağlar. Isıl enerji depolama yöntemleri aşağıda verilmiştir.

- Duyulur ısı depolama yöntemi
- Gizli ısı depolama yöntemi
- Termokimyasal ısı depolama yöntemi

2.2.1. Duyulur Isı Depolama

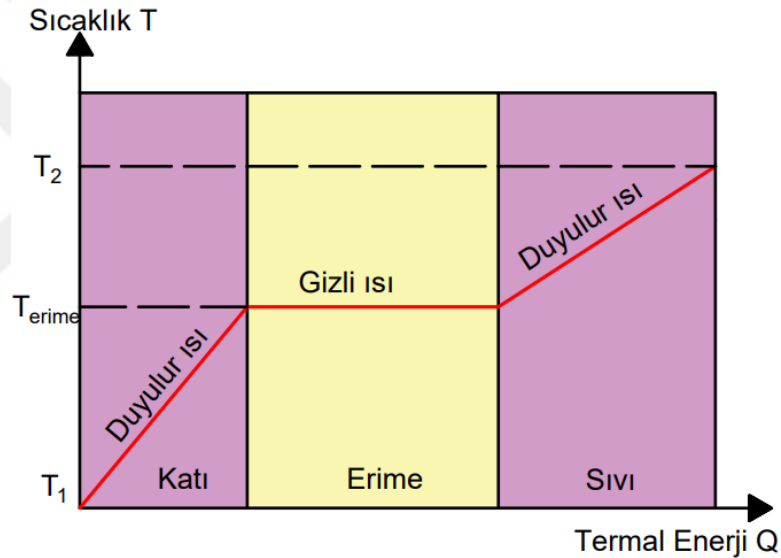
Duyulur ısı depolama, sıvı ya da katı maddenin ısı depolama kapasitesinden değişen ortam sıcaklığına bağlı olarak faydalanılması temeline dayanır. Bu yöntemde maddenin sıcaklığı artırılarak enerji depolanır. Şarj ve deşarj olayları tersinir olaylardır. Bu yüzden güvenli ve kullanım ömrü uzundur. Depolamada kullanılan

maddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmez fakat sistem enerjisi depolarken ve salarken ısı kaybetmeye elverişlidir. Bu yüzden iyi bir yalıtım gerektirebilir. Duyulur ısı depolama sistemleri, şarj ve deşarj süreçlerinde ısı dengesi oluşturur. Duyulur enerjisi depolayabilmek için büyük alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeplerden dolayı ise maliyetleri yüksektir.[41]

Duyulur ısı ile depolanan ısı miktarı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$Q = m C_p \Delta T = m C_p (T_{son} - T_{ilk}) \quad (2.1)$$

burada; “ Q ” depolanan ısı (kJ), “ m ” depolanan maddenin kütlesi (kg), “ C_p ” depolanan maddenin özgül ısı (kJ/kg°C), “ ΔT ” ilk ve son sıcaklık (°C) arasındaki değişimdir [41,42,43].



Şekil 2.2 Duyulur ve gizli ısının termal enerji-sıcaklık grafiği [44]

Şekil 2.2’de duyulur ve gizli ısının ısı enerjisi ve sıcaklık değişim grafiği gösterilmiştir. Saf maddelerde duyulur ısı sıcaklığın yükseldiği katı ve sıvı hallerinde depolanırken, gizli ısı depolama ise sıcaklığın sabit olduğu, faz değişimi esnasında depolanır.

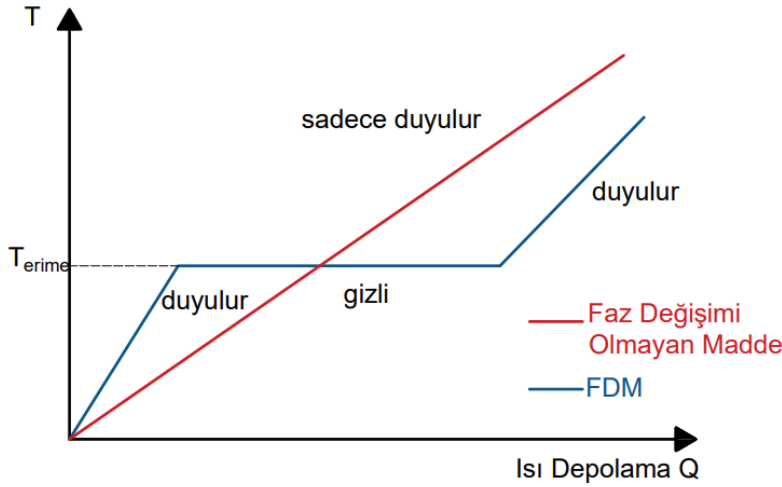
2.2.2. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama sistemlerinde maddenin iç enerjisinin değişmesi faz değişimine sebep olur. Bu esnada aldığı veya verdiği ısıya gizli ısı denir. Gizli ısı depolamalarında çoğunlukla faz değiştiren malzemelerden yararlanılmaktadır. Bu malzemeler belirli sıcaklık aralıklarında dışardan ısı alarak şarj dışarıya ısı vererek deşarj yeteneğine sahiptirler. Şarj ve deşarj işlemi esnasında saf maddelerin sıcaklıkları

değişmemektedir. Bir maddenin faz değişimi katı-katı, katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar şeklinde olmaktadır. Gizli ısı depolama sistemleri duyulur ısı depolama sistemlerine göre daha küçük depolama alanına ihtiyaç duyarlar. Gizli ısı depolama sistemlerinde sıcaklık farkı düşük ancak depo edilen enerji miktarı yüksektir. [43, 45]

Gizli ısı depolama sistemlerinde gerek duyulan depo hacmi, duyulur ısı depolama sistemlerine göre 4-5 kat daha küçüktür. Suyun gizli ısısının duyulur ısısına oranı %80'dir. Yani, 1 kg buzun erimesi için gerekli enerji miktarı 1 kg suyun sıcaklığını 1°C artırmak için gerekli ısıdan 80 kat daha fazladır. Bu durum depo tasarımında önemli bir avantajdır. Hem depolama hem de enerji dönüşümü için maliyeti de düşürür. [43, 45]

Uygulamaların genelinde katı-sıvı faz değişimine uğrayan maddelerden faydalanılır. Katı-sıvı faz değişimine uğrayan maddeler diğerlerine oranla daha az hacim değişikliği gösterirler. Bu maddeler büyük hacim değişimi olmaksızın sınırlı sıcaklık aralığında enerji depolarlar [43].



Şekil 2.3 Farklı iki maddenin ısı depolama karşılaştırması [47]

Faz değişimi olan ve olmayan iki malzemenin ısı depolama grafiği Şekil 2.3'de görülmektedir. Faz değişimi olmayan malzemenin ısı depolama enerjisini, FDM'ler faz değişimi esnasında depoladığı gizli ısı ile daha düşük sıcaklıklarda depolama imkânına sahiptir. Faz değiştiren malzemeler saf olmadığından dolayı gizli ısı ile, enerjiyi bir sıcaklık aralığında depo ederler. Bu malzemeler erime-katılaşma sıcaklığına bağlı olarak, hem ısıtma hem de soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Faz değiştiren malzemeler ile enerji depolamanın diğer yöntemlerden avantajı, çok geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir olmasıdır. Çizelge 2.1'de duyulur ısı depolama

ve gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan malzemelerin fiziksel, ekonomik, ısı transferi ve uygulama yönlerinden karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.1 Duyulur ve gizli ısı depolama tekniklerinin kıyaslanması [46]

		Duyulur ısı depolama		Gizli ısı Depolama
		Su	Kaya	FDM
Fiziksel özellikler	Sıcaklık aralığı	Sınırlı (0 °C ile 100°C)	Geniş	Geniş
	Özgül ısı	Yüksek	Düşük	Orta
	Isıl iletkenlik	Düşük	Düşük	Çok düşük
	Isıl depolama kapasitesi	Düşük	Düşük	Yüksek
	Isı döngü kararlılığı	İyi	İyi	Yetersiz veri
Ekonomik yönler	Mevcut olma durumu	Bol	Bol	Malzeme seçimine bağlı
	Malzeme maliyeti	Ucuz	Ucuz	Pahalı
Isı transferi artışı	Gerekli geometri	Basit	Basit	Karışık
	Gerekli sıcaklık farkı	Büyük	Büyük	Küçük
	Isıl katmanlaşma etkisi	Pozitif	Pozitif	Malzeme seçimine bağlı
	Eş zamanlı şarj-deşarj	Mümkün	Mümkün değil	Uygun ısı ile mümkün
Isı transferi artışı	Gerekli geometri	Basit	Basit	Karışık
	Gerekli sıcaklık farkı	Büyük	Büyük	Küçük
	Isıl katmanlaşma etkisi	Pozitif	Pozitif	Malzeme seçimine bağlı
	Eş zamanlı şarj-deşarj	Mümkün	Mümkün değil	Uygun ısı ile mümkün
Uygulama	Solar ısıtma/soğutma sistemleriyle bütünleşme	Doğrudan su sistemleriyle	Doğrudan hava sistemleriyle	Dolaylı
	Yapı malzemeleri ile korozyonu	İnhibitöre ihtiyaç var	Paslanmaz	Malzeme seçimine bağlı
	Ömrü	Uzun	Uzun	Kısa

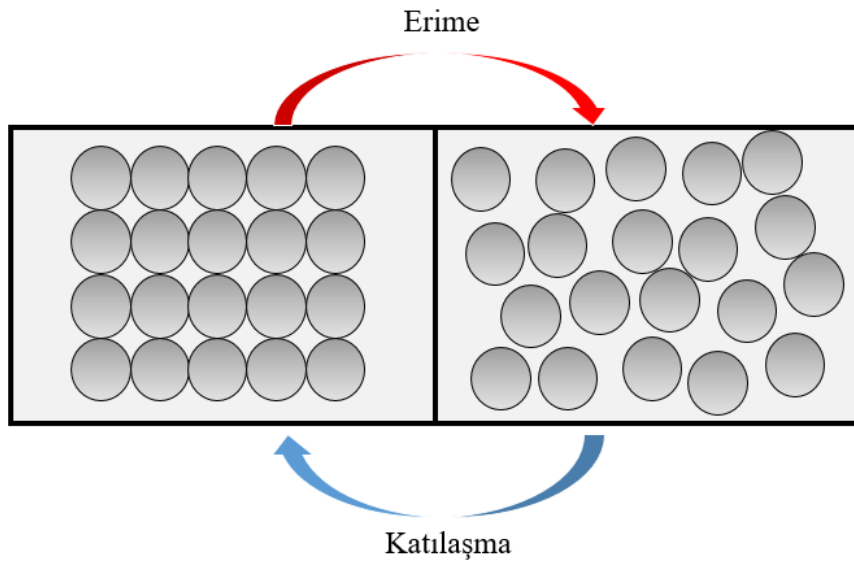
2.2.3. Termokimyasal Isı Depolama

Kimyasal reaksiyon anında ortamdan ısı alınıyorsa endotermik, ortama ısı veriyorsa ekzotermik bir reaksiyondur. Endotermik veya ekzotermik reaksiyon yardımıyla ısı depolaması söz konusuysa bu olaya termokimyasal ısı depolama denir. Termokimyasal ısı depolama sistemleri, endotermik reaksiyon ile ısı depolayıp ekzotermik reaksiyon ile geri verilmesi yöntemine dayanır. Sistem verimleri yüksektir,

ancak kimyasal tehlike barındırırlar. Bu sebeple yaygın kullanımları yoktur.[47]

2.3. Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)

Erime ve katılaşma sıcaklıkları belirli bir aralıktaki bulunan ve faz değişimi esnasında gizli ısı depolayabilen maddelere faz değiştiren malzemeler denir. FDM'lere erime sıcaklıklarının üzerinde bir sıcaklığa maruz bırakıldıklarının da endotermik bir faz değişim işlemi gerçekleştirir ve ortamdan çektiği ısıyı malzeme içerisine depolar. Bu işlem ile FDM erimiş veya řarj olmuş olur. Bu olayın tam tersi ise katılaşma veya deşarj olarak adlandırılır. Ortam sıcaklığı dūřtūęünde FDM'deki depolanan ısı çevreye doğru salınmaya başlar ve FDM enerjisini kaybeder. Faz değiştiren malzemenin erime-katılaşma dōngüsü şekil 2.4'de verilmiştir.[47,48]



řekil 2.4 FDM'nin erime-katılařma sūreci [48]

Faz değiştiren malzemelerin ısı depolama sistemlerin kullanılmasıyla birlikte araştırma çalışmaları hız kazanmıştır. FDM'lerin kullanım alanları çalışmaların artmasıyla birlikte genişlemiştir. FDM'lerin kullanım alanlarından bazıları fotovoltaiik sistemler, sıcaklığın sabit tutulması gereken elektronik cihazlar, tıbbi uygulamalar, soğutma sistemleri, trombe duvar ile pasif ısı depolama, çeşitli yapı elemanları, uzay teknolojileri, gūneř bacalarıyla elektrik üretimi, gūneř enerji depolama sistemleri ve benzerleridir. Ancak yaygın olarak gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. Faz değiştiren malzemelerin erime-katılaşma sıcaklıklarının bilinmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır. FDM'ler için ısı enerjisi depolama sistemi tasarımında ilk adım istenilen erime sıcaklığının seçilmesi'dir. İkinci adım ise termofiziksel, kimyasal ve

ekonomik parametrelerin değerlendirilmesidir. Bu parametrelerin [47,48]:

- Kullanılacak yere uygun erime sıcaklık aralığında seçilme imkânının olması,
- Gizli ısı depolama kapasitesinin yüksek olması,
- İyi ısı transferi performansına sahip olması,
- Düşük hacim değişimine sahip olması,
- Düşük buhar basıncına sahip olması,
- Sabit erime ve katılaşma davranışı göstermesi,
- Isı iletim katsayısının yüksek olması,
- Öz kütlesinin yüksek olması,
- Kimyasal olarak kararlı olup uzun ömürlü olması,
- Yapı malzemelerine karşı korozif olmaması,
- Toksik, yanıcı ve patlayıcı olmaması,
- Bol bulunabilir ve düşük maliyete sahip olması gerekmektedir.

2.4. Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM) İncelenmesi

Her malzeme içerisinde belli bir miktar ısı enerji depolama özelliği bulundurmaktadır. FDM'ler incelenirken erime/donma süreçleri, aşırı soğuma, çekirdekleşme, ısıl çevrim boyunca kararlılık gibi birçok özellik açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. [40,47]

2.4.1. Erime/Donma

Tüm malzemeler ısı depolama özelliğine sahip olsa bile, birçoğu erime/donma özelliklerinden dolayı ısı depolama sistemlerinde kullanılamamaktadır. Bazı maddeler düzensiz bir şekilde donmakta, bazılarının ise kristal oluşum hızları düşüktür. Bu problemlerin giderilmesi mümkündür. Ancak bu durum depo hacminin artmasına ve erime sıcaklık aralığında değişime sebep olmaktadır. [40]

2.4.2. Aşırı Soğuma

Aşırı soğuma, maddenin sıcaklığının donma noktasını geçmiş olmasına rağmen donma olayının gerçekleşmemiş olmasına denir. Bu da planlanan depolama sıcaklığında enerjinin depolanamayıp daha yüksek sıcaklıklarda depolanacağı anlamına gelmektedir.[40]

2.4.3. Çekirdekleşme

Erime donma ve aşırı donma problemlerine bir çözüm olan çekirdekleşmenin kullanılabilmesi için enerji depolama sisteminde kullanılan FDM ile benzer kristal örgüde çekirdekleştirici eklenerek ilgili problemleri gidermek mümkündür. Ancak çekirdekleştiricinin bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bunlar:

- Eklenecek olan sistemin en yüksek sıcaklık değerinin üzerinde bir erime sıcaklığına sahip olması,
- Hiçbir şekilde suda çözülmemeli,
- Depolama maddesi olan FDM ile kristal örgü yapısı aynı olmalı,
- Depolama maddesi olan FDM ile reaksiyon vermeme özelliğine sahip olmalıdır.[40,47]

2.4.4. Isıl Çevrim Boyunca Kararlılık

Isıl çevrimler sonucunda birçok maddenin kararlılığı kaybedilmektedir. Bu sebeple kullanım ömürleri uzun değildir.[47]

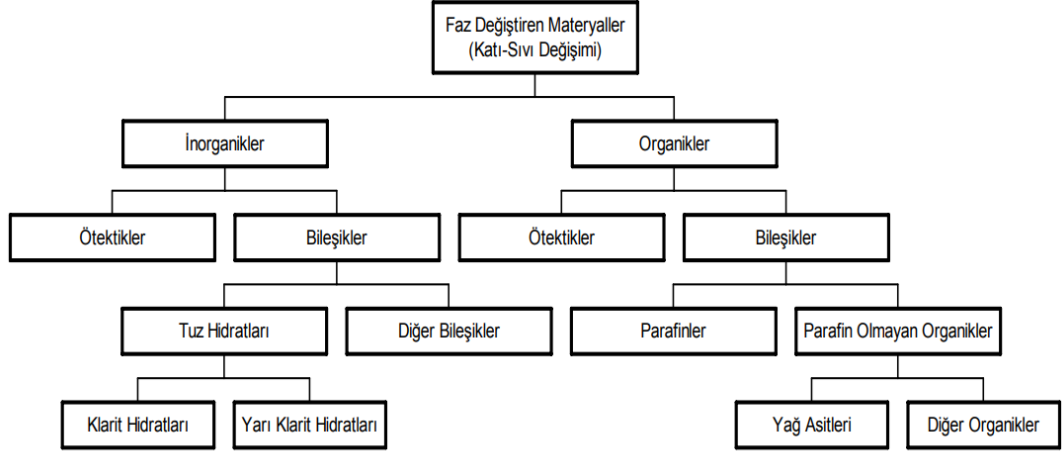
2.4.5. Isıl İletkenlik

Isı depolama malzemesi olarak seçilecek olan FDM'nin yüksek ısı iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Ancak FDM'lerin büyük bir çoğunluğu bu özellikte değildir. Bu sebeple çeşitli yöntemler ile ısı iletkenliğini artırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Yöntemlerden bazıları, FDM'leri kanatçıklı bir yapı ile ısı transfer özelliklerinin geliştirilmesi, FDM içerisine ısı transfer özellikleri daha iyi olan nanopartikül karıştırılması, FDM'nin mikrokapsüllemesi gibi yöntemlerdir. Gizli ısı depolama sistemlerinde erime sürecinde erime miktarı artıran ısı dirençten dolayı ısı akışı yavaşlamaktadır. Donma sürecinde sadece iletimle, erime süresince ise doğal konveksiyon ile ısı transferi gerçekleşir.

2.5. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması

Isıl enerji depolama sistemlerinde kullanılan FDM'lerin birçoğu ısı depolama için gerekli olan özelliklerin tamamını karşılayamamaktadır. Bu sebepten ötürü ideal ısı değiştiricisi ancak tasarım esnasında veya yapı içerisine eklenecek olan yardımcı bileşenler ile sağlanabilmektedir. Örneğin faz değiştiren malzeme yapısının içerisine metal kanatçıklar eklenmesi ile ısı iletim katsayısının düşük olmasının etkisini

azaltabilmektedir. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere FDM'ler kimyasal bileşimlerine göre organik ve inorganik FDM'ler olarak gruplandırılmıştır. Bu gruplar kendi içlerinde alt gruplara ayrılmışlardır. Şekilden de görüldüğü üzere FDM olan malzeme gruplarının çokluğu gösterilmiştir.



Şekil 2.5. FDM'lerin sınıflandırılması [40,47]

Faz değiştiren malzeme seçimi esnasında ilk önce şu parametreleri göz önünde bulundurmak gerekli;

- Erime-katılaşma sıcaklığı
- Isı kapasitesi
- Sıvı - katı termal iletkenliği
- Sıvı – katı yoğunluğu

2.6. Organik, İnorganik ve Ötektik Faz Değiştiren Malzemeler

Organik FDM'ler, genel olarak parafin ve parafin olmayan Faz Değiştiren Malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Organik FDM'ler düşük yoğunlukları sebebiyle büyük hacimlere ihtiyaç duymaktadır. Organik FDM'ler düşük ısı iletim katsayı ve yanıcı olması gibi dezavantajlara sahiptirler. Bunun yanında FDM'ler yüksek gizli ısı depolayabilme, aşırı soğumadan donabilme, geniş sıcaklık aralıklarında kullanılabilme ve katı-sıvı faz geçişini gösterme gibi avantajlara sahiptirler. Organik FDM'ler, kolay ulaşılabilmesi, diğer FDM'lere kıyasla nispeten daha ucuz olması ve kolay çalışılması nedeniyle dolayı tercih edilmektedir. [47,48]



a)

b)

Şekil 2.6 Organik FDM görselleri (a) parafin mumu, b) yağ asiti) [49]

İnorganik faz değiştiren malzemeler tuzlar, tuz hidratlar, metaller ve alaşımlar şeklinde gruplandırılabilir. İnorganik FDM'ler uygun erime katılaşma sıcaklığı, dūřuk termal genleşme ve uygun gizli ısısı sebebiyle tercih edilmektedir. Ancak aşırı soğuma, korozif ve tahriş edici olma gibi dezavantajları da bulunmaktadır. [50]

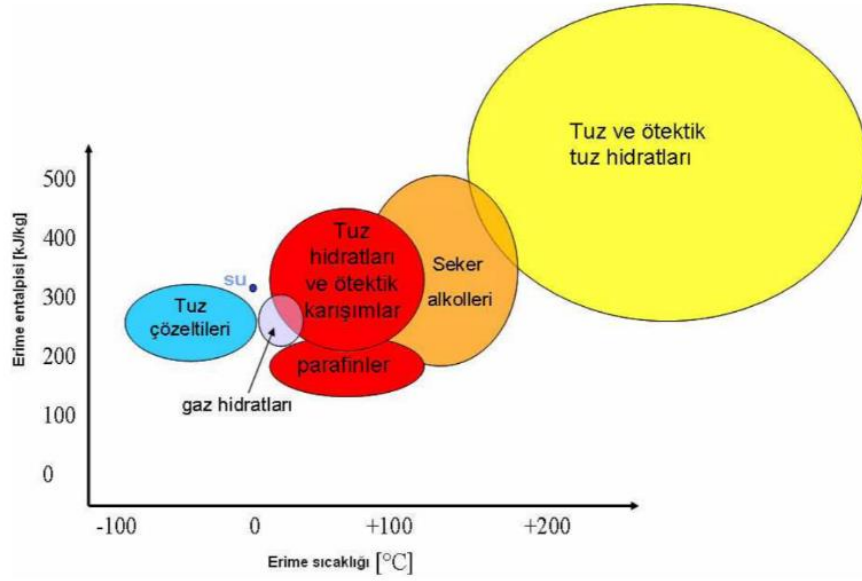


b)

b)

Şekil 2.7 İnorganik FDM görselleri (a) Sodyum klorür, b) Magnezyum klorür heksahidrat) [49]

Tuzlar ve tuz hidratlarının erime noktaları 10°C ile 900°C arasında çok geniř bir çalıřma aralıęında bulunmaktadır. Tuzlar ve tuz hidratları yūksek sıcaklıęın olduęu gūneř enerjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Erime sıcaklıęının dūřuk olduęu parafinler ve yağ asitlerinin de kullanılabilceęi uygulamalarda tercih edilmemektedir. Şekil 2.8'de erime entalpisi - erime sıcaklıęı grafięi verilmiř olup gōrūldūęu ūzere yūksek sıcaklıklarda depolamalar yapmak için tuz ve ūtektik tuz hidratlarının kullanılmasının daha uygun olacaęı gōrūlmektedir.[48]



Şekil 2.8 FDM'lerin erime entalpisini - erime sıcaklığı grafiği [35]

En az iki organik veya inorganik FDM'lerden istenilen özelliğe sahip ötektik karışımlar hazırlanabilir. Ötektik karışımlar, enerji depolama amacına uygun olarak hazırlanabilmektedirler. Malzeme özelliklerini, istenilen özelliklere uygun olarak ayarlanabilme avantajı olmasına rağmen yüksek maliyetleri sebebiyle termofiziksel özelliklerinde sınırlı veri bulunmaktadır. Maliyetleri sebebiyle kullanımları çok yaygın değildir. Çizelge 2.2'de FDM'lerin avantaj ve dezavantajları özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 FDM'lerin avantaj ve dezavantajları [42,47,48,51,52]

FDM	Avantajları	Dezavantajları
Organik FDM	<ul style="list-style-type: none"> İyi ısı kararlılık Aşırı soğuma olmadan donma Düşük buhar basıncı Özgün çekirdeklenme özelliği Reaktif ve zehirli değil Uyumlu eriyebilme Düşük hacim değişiklikleri Geleneksel yapı malzemeleri ile uyumluluk Geniş çalışma sıcaklık aralığı Geri dönüşümlü Düşük maliyet Yüksek katılma gizli ısı 	<ul style="list-style-type: none"> Sıvı FDM'nin sızması Düşük ısı iletkenliği (yaklaşık 0,2 W/mK) Yanıcı

Çizelge 2.2 FDM'lerin avantaj ve dezavantajları [42,47,48,51,52] (devamı)

İnorganik FDM	Yüksek hacimli gizli ısı depolama kapasitesi Yanıcı değil Düzensiz faz değişimi Organik FDM'lere göre yüksek ısı iletkenlik	Aşırı soğumaya eğilimli Uyumlu eriyememe Yüksek hacim değişiklikleri Metalle korozif etki gösterme Tekrarlanan faz döngüleri üzerinde faz ayrılma
Ötektik FDM	Keskin erime noktaları özellikleri özel isteklere göre yapılabilir	Yüksek maliyetli Termofiziksel özelliklerinin sınırlı veriler

FDM'leri genel olarak şu şekilde sıralayabiliriz:

- Tuz Hidratları
- Parafinler
- Parafin olmayan organikler ve ötektikleri

2.6.1. Tuz Hidratları

Tuz hidratları enerji depolama yöntemleri arasında en eski ve yaygın kullanılan maddeler arasındadır. İnorganik maddeler olup $M.nH_2O$ formülüyle gösterilir. M inorganik bileşiği ifade etmektedir. Çok geniş sıcaklık aralıklarına sahiptirler ancak 0-150°C sıcaklık aralıklarında çoğunlukla tercih edilirler. Tuz hidratlarının gizli ısı kapasitesinin yüksek olması, hacim değişimlerinin az olması, ısı iletkenliğinin organik FDM'lere kıyasla daha yüksek olması ve yanıcı olmaması avantajları olarak söylenebilir. Dezavantajları ise erime esnasında yoğunluk farkı kaynaklı faz ayrımı davranışı, aşırı soğuma davranışı ve korozif davranış göstermesi söylenebilir.

2.6.2. Parafinler

Organik faz değiştiren malzemeler grubunda olan parafinler petrol türevi olup kimyasal yapıları C_nH_{2n+1} şeklindedir. Çok sayıda alkandan oluşan karışımlardır. Karbon sayısı arttıkça alkanların erime sıcaklığı da yükselir. Karbon atomu sayısı artışına bağlı olarak erime noktası ve gizli ısısı da artar. Örneğin karbon sayıları 14-40 arasında olan alkanların erime noktası, 6°C ile 80°C aralığındadır. Ticari parafinlerin karbon atomu sayısı 8-15 arasındadır. Karbon sayıları fiziksel hallerini belirler, 5-15 arası karbon atomuna sahip olan bileşikler sıvı iken 15'den fazla karbon atomuna sahip olan bileşikler oda koşullarında mum gibi katı haldedirler. Çift sayılı karbon atomuna

sahip olan parafinler kolay bulunabilir, pahalı olmayan ve reaksiyon verme konusunda kararlı olduklarından ısı depolama sistemleri için tercih edilirler. Arıtma işleminden geçirilen parafinler toksik olmayan kokusuz ve tatsız bir madde hâline dönüşürler. Parafinlerin kullanılmasının bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Avantajları şu şekilde sıralanabilir,

- Sonsuz ömürlüdürler,
- Reaksiyon göstermezler kararlıdır,
- Erime katılma sıcaklıkları geniştir,
- Toksik ve korozif değildirler,
- Gizli ısı kapasiteleri yüksektir.
- Hacim değişimleri azdır,
- Aşırı soğuma eğilimleri yoktur,
- Ucuz ve kolay temin edilebilirler olmaları sebebiyle FDM olarak parafinler tercih edilmektedir.

Tüm bu avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da mevcuttur. Dezavantajları şu şekilde sıralanabilir,

- Isıl iletkenlikleri düşüktür,
- Sabit bir erime sıcaklığına sahip değildirler,
- Yanıcı özelliklerinin olması dezavantajları arasında gösterilebilir.

2.6.3. Yağ Asitleri

Yağ asitleri birçok yönden parafinlere benzer, organik yapılı faz değiştiren malzemelerdir. Parafinlerde olduğu gibi karbon sayılarına göre oda koşullarındaki fiziksel hâlleri değişiklik göstermektedir. Düşük karbon sayılarında sıvı hâlde bulunurken karbon sayıları arttıkça katı hâle geçer ve viskoziteleri de artar. Sıvı hâldeki yağ asitleri suda çözünürken katı hâldeki yağ asitleri suda çözünmemektedir. Bu sebeple yapı malzemelerinde katı yağ asitlerinin FDM olarak kullanımı yaygındır. Kaprik asit, Laurik Asit, Palmitik Asit ve Stearik asit yaygın olarak kullanılan yağ asitleridir. Yaygın olarak kullanılan yağ asitlerinin özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir. Yağ asitlerinin kullanılmasının bazı avantaj ve dezavantajları vardır.

Avantajları şu şekilde sıralayabiliriz.

- Erime esnasında faz ayrımı gözlenmez,
- Aşırı soğuma olmadan donma özelliğine sahiptirler,
- Gizli ısı kapasiteleri yüksektir,
- Toksik özellik göstermezler,
- Kimyasal kararlılığa sahiptirler,
- Termal genişleme özellikleri düşüktür bu özellikler sebebiyle FDM olarak tercih edilmektedirler.

En önemli dezavantajı ise maliyetlerinin yüksek olması ve yeterli araştırmanın yapılmamış olmasıdır.

Çizelge 2.3 Bazı yağ asitlerinin özellikleri

Yağ Asidi	Erime sıcaklığı (°C)	Ergime Isısı (kJ/kg)	Yoğunluk (kg/dm ³)	Özgül Isı (kJ/kgK)	Isı İletimi (W/mK)
Kaprik Asit	31,5	153	0,886	-	0,149
Laurik Asit	42-44	178	0,870	1,6	0,147
Palmitik Asit	63	187	0,847	-	0,165
Stearik Asit	70	203	0,941	2,35	0,172

2.6.4. Organik ve İnorganik Bileşiklerin Ötektikleri

Ötektik karışımlar sabit erime ve katılma noktasına sahip gizli ısı depolama maddeleridir. En az iki organik veya inorganik FDM'nin karıştırılmasıyla oluşmaktadır. Maddelerin karıştırılmasıyla erime aralığı ve gizli ısı düşmektedir. İstenilen özelliklere göre karışımlar hazırlana bilinmesi en büyük avantajı iken yüksek maliyetleri ise dezavantajıdır.

2.7. Isı Transferi

Isı transferi, sıcaklığı yüksek olan ortamdan düşük olan ortama 3 farklı yol ile ısı aktarma şeklidir. Bu yollar ısı iletimi, (kondüksiyon) ısı taşınımı (konveksiyon) ve ısı ışınımı (radyasyon) ile ısı aktarımıdır.

Isı iletimi, katı veya akışkan bir durgun ortam içerisinde ve sıcaklık farkı olması

durumunda gerçekleşen ısı transferidir.

Isı taşınımı, bir yüzey ile hareket hâlindeki bir akışkan farklı sıcaklıklarda ise aralarında sıcak olandan soğuk olana doğru bir ısı geçişi gerçekleşir. Bu olaya taşınım ile ısı transferi denir.

Isı ışıınımı, sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler elektromanyetik dalgalar hâlinde enerji yayarlar. Dolayısıyla farklı sıcaklıklarda ki iki yüzey arasında birbirlerini görmesini engel olan bir ortam yok ise gerçekleşen ısı geçişine ışıınım ile ısı transferi denir. [54]

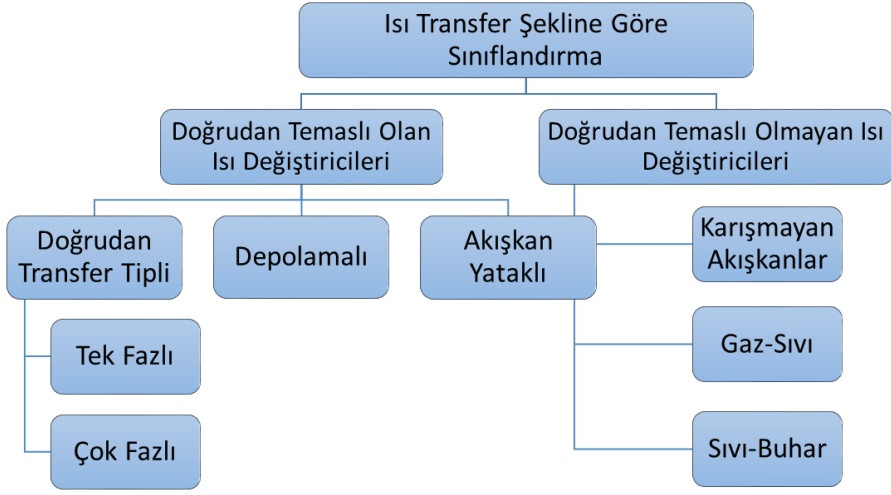
2.8. Isı Değişiricileri

Isı değiştiricileri, aralarında sıcaklık farkı bulunan en az iki akışkanın birbirlerine karışmadan ısı transferi yapabildikleri sistemlerdir. Isıtma ve soğutma amaçlı kullanılabilirler.

Birçok ısı değiştiricisi tipi olsa bile çalışma prensipleri aynıdır. Sıcaklığı yüksek olan akışkan ısısının ısı transfer yüzeyinde (seperatör /boru) toplanıp sıcaklığı daha düşük olan akışkana ısı transferi ile aktaran sistemlerdir. Isı değiştiricilerinde ısı transferi iletim ve taşınım ile gerçekleşir. [31]

Isı değiştiriciler aşağıda verildiği şekilde sınıflandırılmıştır:

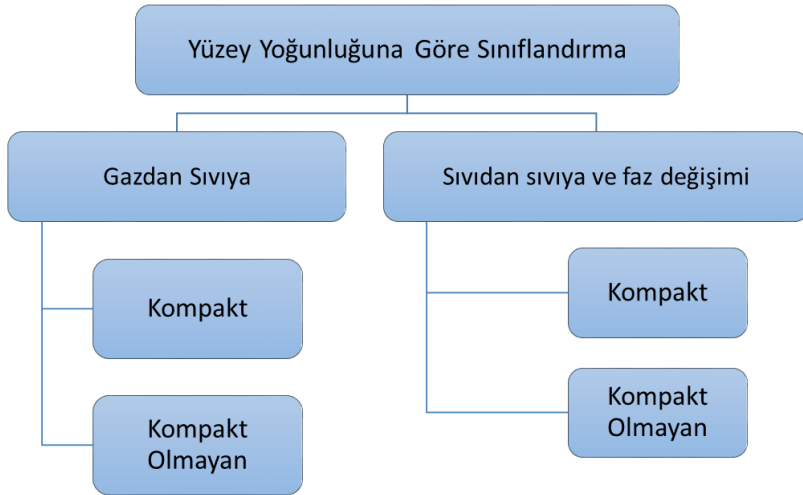
- Isı Transfer Şekline Göre Sınıflandırma
- Akışkan Sayısına Göre Sınıflandırma
- Yüzey Yoğunluğuna Göre Sınıflandırma
- Konstrüksiyonlarına Göre Sınıflandırma
- Akış Şekline Göre Sınıflandırma
- Isı Transfer Düzenine Göre Sınıflandırma



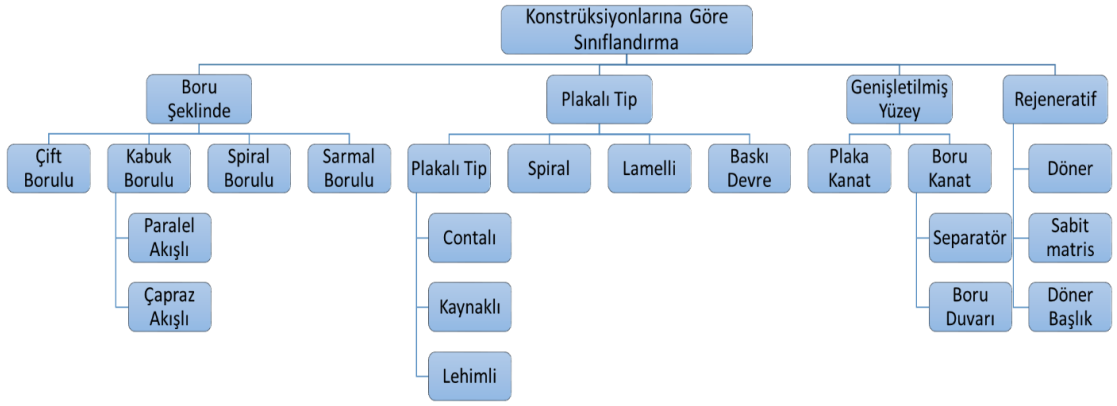
Şekil 2.9 Isı transfer şekline göre sınıflandırma [53]



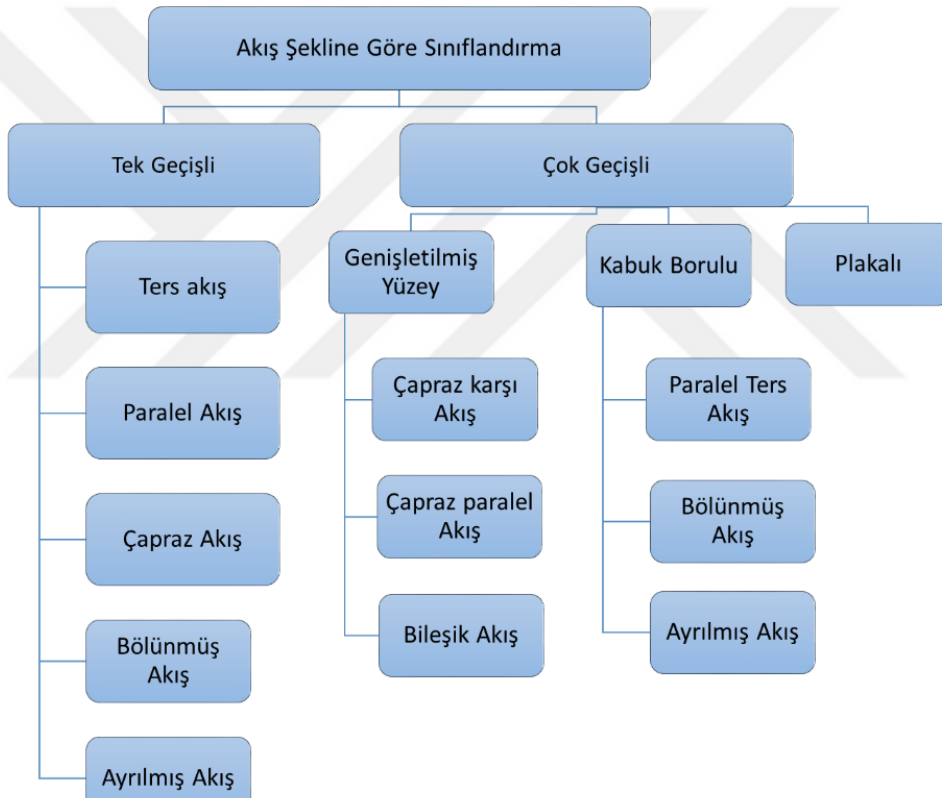
Şekil 2.10 Akışkan sayısına göre sınıflandırma [53]



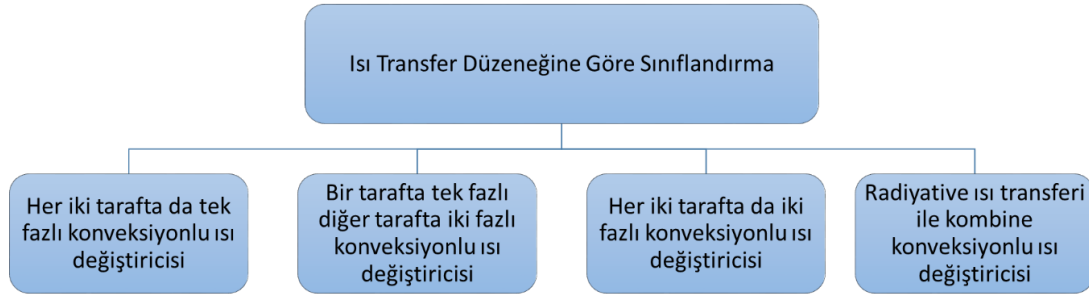
Şekil 2.11 Yüzey yoğunluğuna göre sınıflandırma [53]



Şekil 2.12 Konstrüksiyonlarına göre sınıflandırma [53]



Şekil 2.13 Akış şekline göre sınıflandırma [53]



Şekil 2.14 Isı transfer düzenine göre sınıflandırma [53]

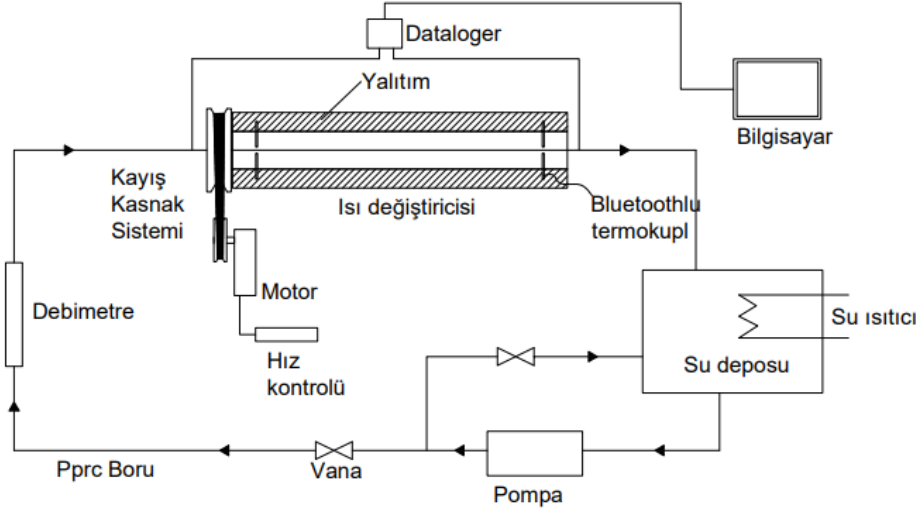
2.9. Borulu Isı Değiştiricileri

Borulu ısı değiştiricileri yüksek basınç ve sıcaklıklardaki akışkanların aralarında ısı transferi yapılması gereken durumlarda tercih edilen ısı değiştiricisi türüdür. Temel çalışma prensibi akışkanlardan birisi borunun içerisinden geçerken diğeri ise borunun dışından geçmektedir. Bu tür ısı değiştiricilerin boru konumlandırması, çap sayı ve şekilleri değiştirilebilir oldukça esnek tasarımlardır. Borulu ısı değiştiricileri sırasıyla düz borulu, gövde borulu ve spiral borulu olmak üzere 3 tipte incelenebilir.[31]

3. MATERYAL VE METOT

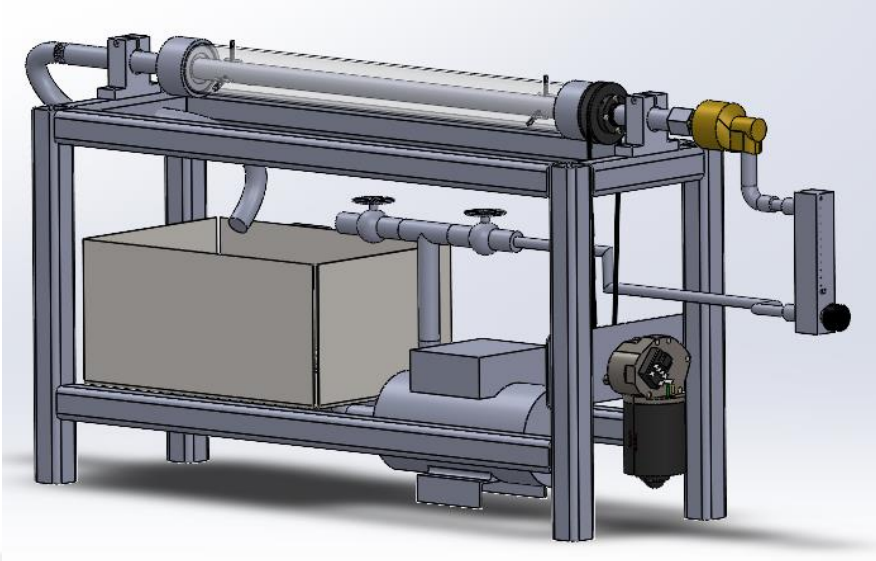
3.1. Deney Düzeneğinin Tanıtımı

Bu çalışmada iç içe borulu döner bir ısı değiştiricisinde faz değiştiren malzeme kullanımını ve ısı performansını incelemek amacıyla bir deney düzeneği tasarlanmış ve kurulmuştur. Bu deney düzeneği aracılığı ile ısı depolama sistemlerinde dönme hareketinin, dönme hızının ve giriş suyu sıcaklığının değişiminin etkileri incelenmiştir. Daha sonrasında ise aynı deney düzeneğine kanat eklenerek yeni deneyler yapılmıştır. Deney düzeneğini klasik ısı değiştiricilerinden ayıran en temel özelliği ısı değiştiricisi bileşenlerinin boru ekseninde dönme özelliğinin olmasıdır. Yapılan deneyler kapsamında farklı giriş su sıcaklıkları, dönüş hızı, dönüş modelleri ve farklı kanat sayıları için malzemenin erime süreleri belirlenerek, ısı depolama sisteminin ısı performansını ve faz değiştiren malzemenin erime davranışını deneysel olarak incelenmiştir.



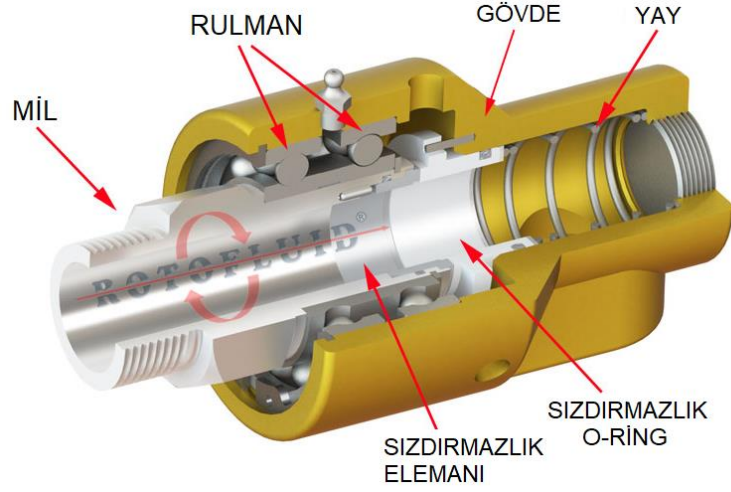
Şekil 3.1 Deney tesisatının şematik gösterimi

Şekil 3.1’de deney tesisatının şematik gösterimi verilmiştir. Kurulan deney düzeneği sıcak akışkan hattı, döndürme sistemi ve 2 farklı veri alma sistemi olmak üzere 4 farklı bağımsız yapıdan oluşmaktadır. Deney düzeneğinin 3 boyutlu görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir.



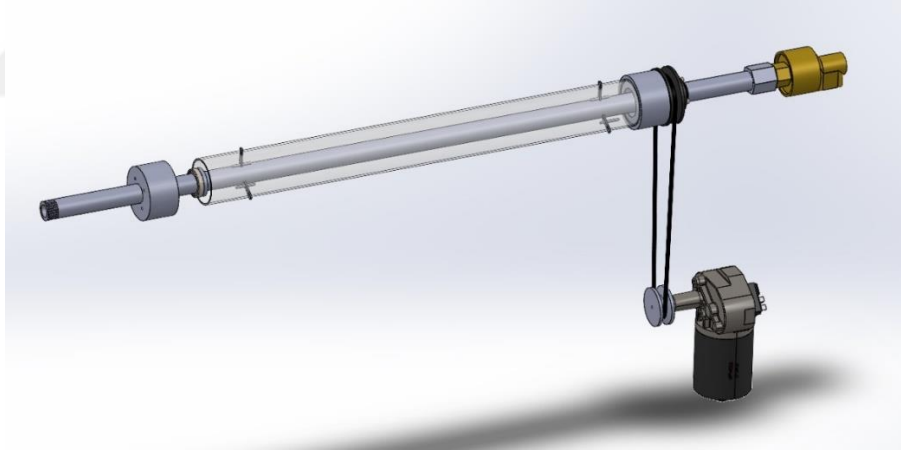
Şekil 3.2 Deney düzeneğinin 3 boyutlu görünümü

Sıcak akışkan hattı, ısı transfer akışkanı olarak kullanılan suyun bir rezistans ile kontrollü bir şekilde ısıtılarak, kapalı devre tesisata bir santrifüj pompa vasıtasıyla gönderilmesini sağlayan hattır. Kapalı devre tesisat hattında akışkanın depolandığı bir depo, suyun ısıtıldığı bir adet rezistans, suyun deney düzeneğinde devridaim yapmasını sağlayan bir adet santrifüj pompa içermektedir. Isı transfer akışkanı olan suyun, akış hız ölçümü debimetre ile yapılmaktadır. Pompadan çıkan basınçlı suyun akış hızı, T boru ve vanalar yardımıyla ayarlanabilmektedir. Debimetreden geçen su ilk olarak döner mafsaldan geçer. Döner mafsal kesit görseli Şekil 3.3’de verilmiştir. Döner mafsal, sabit bir kaynaktan gelen ısı transfer akışkanını dönen sistemlere aktarmak için kullanılan mekanik sızdırmazlık bileşenidir [59]. Döner mafsal ile Ø25 mm dış çapındaki alüminyum boru manşon yardımıyla monte edilmiştir. Bu sayede alüminyum deney düzeneğine dönme hareketi yapma imkânı sağlanmıştır. Alüminyum borunun 700 mm uzunluğunda ki bölümü faz değiştirici malzemenin doldurulduğu ve sızdırmazlığın sağlandığı alandır. Bu alandan geçen suyun sıcaklığı azalır ve soğuyan su, alüminyum borunun diğer serbest ucundan kontrollü bir şekilde ısıtma deposuna iletilmektedir.



Şekil 3.3 Döner mafsals [59]

Tasarlanan döner ısı değiştiricisi deney düzeneği üç farklı dönme durumuna göre düzenlenmiştir. Deney düzeneğinde sadece iç borunun döndüğü, iç-dış borunun birlikte döndüğü ve sadece dış borunun döndüğü durumlar incelenebilmektedir. Döner ısı değiştiricisi sistemi kayış kassak sistemi ve bir motor ile dönmektedir.



Şekil 3.4 Deney düzeneği kontrol hacmi döndürme mekanizması tasarımı

Şekil 3.4’de deney düzeneği döndürme mekanizma tasarımı görölmektedir. Şekil 3.4’de göröldüğü gibi motora monte edilen küçük kassak $\text{Ø}50$ çapındadır. Diğer kassak ise $\text{Ø}74$ çapında olup ve alüminyum boru ile eş merkezli olacak şekilde tasarlanmıştır. Alüminyum boru üzerindeki kassanın cıvatalarının sıkılıp gevşetilmesi ile dönüş modelleri arasında geçiş sağlanmaktadır. Sadece iç borunun döndüğü deneylerde, kassaktan iç boruya dik olan cıvataların sıkılması gerekmektedir. Cıvataların sıkılmasıyla iç boru ile kassak sabitlenir ve aynı hızda dönmeye başlarlar. Isı değiştiricisi dış borusunun dönmesini engellemek için ana şaseye sabitlenmesi

gerekmektedir. Sadece dış borunun döndüğü deneylerde, alüminyum iç boruya paralel olan cıvatalar sıkılarak kasnak ile döner kapak sabitlenir bu sayede dış borunun dönme hareketini yapması sağlanmaktadır. Sadece dış borunun döndüğü deneylerde ise iç borunun şase üzerinde bulunan mil tutucular tarafından sabitlenmesi gerekmektedir. İç-dış borunun birlikte dönmesi gerektiği deneylerde ise kasnak üzerindeki tüm cıvatalar sıkılır. Bu sayede dış borunun, iç borunun ve kasnağın aynı hızda dönmesi sağlanır.

Deney düzeneği üzerinde farklı dönme durumlarında birbirlerine temas eden ara yüzlerden sızma ihtimalini engellemek için döner kapak tasarımı yapılmıştır. Bu kapaklar, sistemin dönmesi ve sızdırmazlığı için önem arz etmektedir. Döner kapaklar içerisinde 1 adet skf 61805 rulman ve 1 adet 25x37x5 KK NBR yağ keçesi, aralarında da gres yağı bulunmaktadır. Bu sistemde 2 adet döner kapak kullanılmıştır. Döner kapaklar üzerinde, dış borunun geçmesi için kanal bulunmaktadır. Pleksi bu kanal içerisine sıkı geçmektedir. Döner kapakların çıkma ihtimaline karşın tijler ile döner kapaklar sıkıştırılıp sabitlenmiştir. Pleksi dış boru ile alüminyum iç boru arasında kalan boşluk ise benmari usulüyle eritilmiş parafin ile doldurulmuştur. Parafin ile doldurulan pleksi dış borunun dış yüzeyinin ortam ile ısı transferini engellemek amacıyla polietilen boru yalıtım süngeri ile yalıtılmıştır.

Sistemde 12 volt çalışma gerilimine sahip 1/10 redüksiyon oranlı bir motor kullanılmıştır. Motor kontrol ünitesi 12V besleme gerilimini ön ayarlı motor devrine göre düşürerek motorun seçilen devirde dönüşünü sağlamaktadır. Devir seçimi motor sürücü üzerinde bulunan ekran ve butonlar yardımı ile yapılmaktadır. Motorun seçilen devire göre harcadığı güç parametreleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Motor güç parametreleri

Döndürme Hızı (RPM)	Motor Akım Şiddeti (I)	Motor Voltaj Değeri (V)
0	0	0
12	1,75	12
19	1,85	12
25	2	12



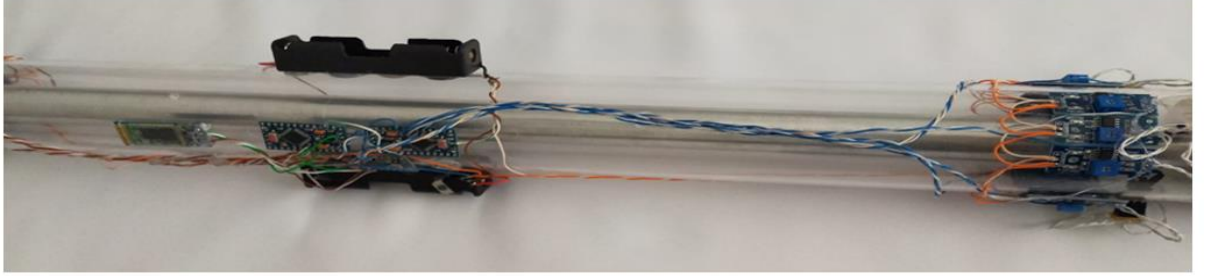
a)



b)



c)



d)



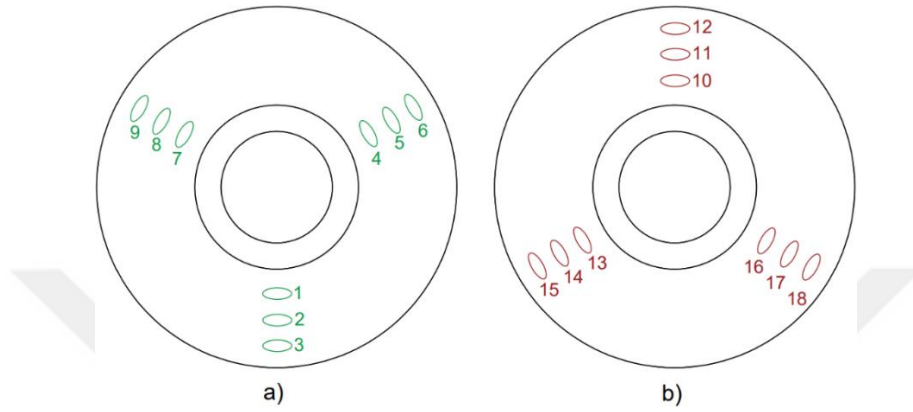
e)



f)

Şekil 3.5 Deney tesisatı ekipmanları a) dış şase b) deney tüpü c) kontrol hacmi d) bluetoothlu sıcaklık sensörleri gösterimi e) parafin mumu f) benmari usulü eritme yöntemi gösterimi

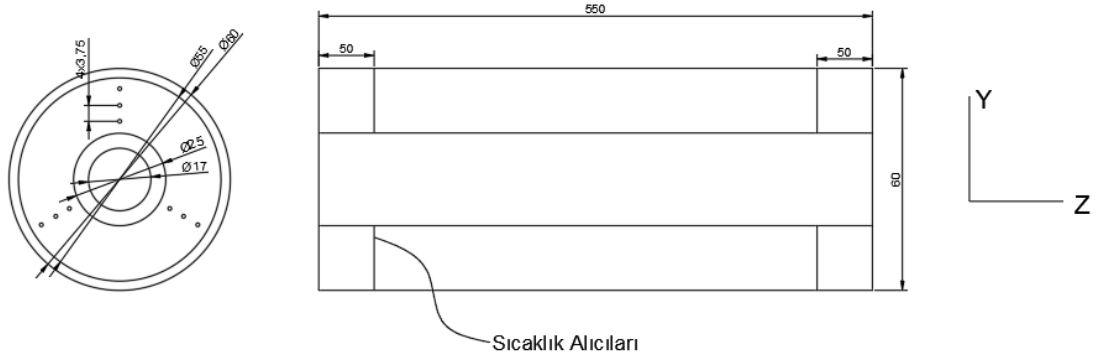
Yapılan deneylerde ısı transfer akışkanı olan suyun, debisinin ölçümü panel tip şamandıralı debimetreyle, suyun giriş çıkış sıcaklık ölçümleri K tipi termokopullar ile parafin içinden alınan veriler ise NTC sıcaklık sensörü ile ısı değiştiricisi devir ölçümleri ise takometre ile ölçülmektedir. Termostat sayesinde rezistansın devreye girmesi ve devreden çıkması sağlanmakta, bu sayede depodaki suyun sıcaklığı sabit tutulmaktadır.



Şekil 3.6 Sıcaklık sensörü konumlandırma a) giriş, b) çıkış

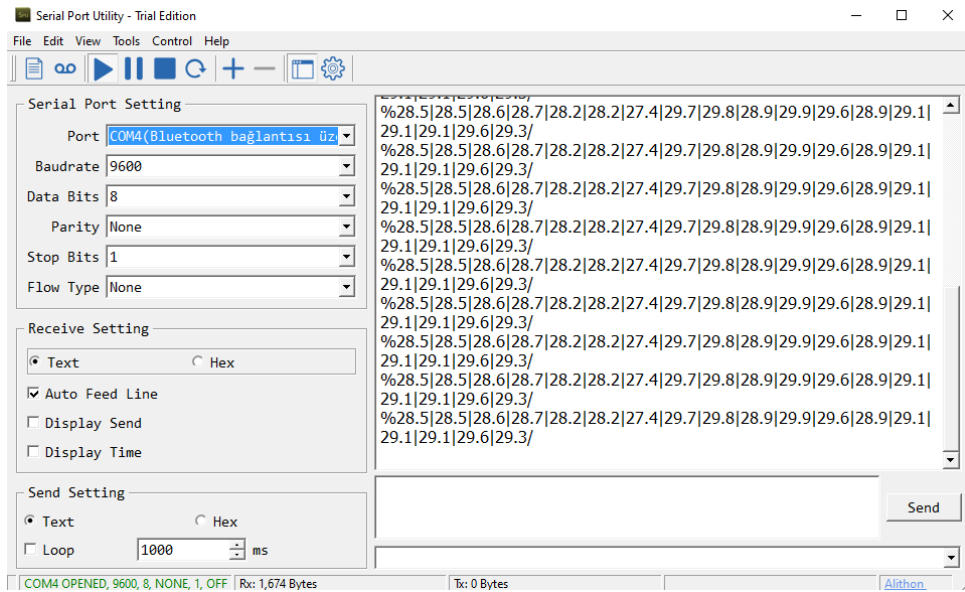
Isı değiştirici tüp 600 mm uzunluğunda ve 60 mm çapındadır. Bu tüp pleksi malzemeden imal edilmiştir. Isı değiştirici tüp üzerine toplamda 18 adet NTC tipi sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Bu sensörler 120° açılarla 3 grup olarak giriş ve çıkış kısımlarından 50 mm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca bu 3 grupta da 3'er adet NTC sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Gruplar içerisinde yer alan NTC sıcaklık sensörleri ısı transfer akışkanını taşıyan boru ile dış pleksi boru arasında eşit aralıklar ile dağıtılmıştır. 2x3x3 şeklinde yerleştirilmiş olan sensörler CAT 5 kablo ile sistem üzerine konumlandırılan kontrol kartına bağlanmıştır. Sensörlerin yerleşim konumlandırılması ve ölçülendirilmesi Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de verilmiştir.

Kontrol kartında 3 adet 16 MHz frekansında çalışan ATMEL328p işlemciyi barındıran Arduino Mini geliştirme kartı kullanılmıştır. Böylece kontrol kartının toplamda 18 kanal ADC (Analog Digital Converter – Analog Sayısal Dönüştürücü) kapasitesi sağlanmıştır. Kontrol kartında 1 adet yerleşik HC-05 Bluetooth Classic modülü bulunmaktadır. Kontrol kartına güç sağlanması için 2 adet seri bağlı Sony 18650 Lityum Polymer pil bulunmaktadır. Kontrol kartında bulunan sistem bileşenlerinin çalışma gerilimi olan 5V geriliminin sağlanması için Toshiba 7805 lineer regülatör entegresi ve entegre üzerinde oluşabilecek olası sıcaklıkları önlemek için pasif soğutucu kullanılmıştır.



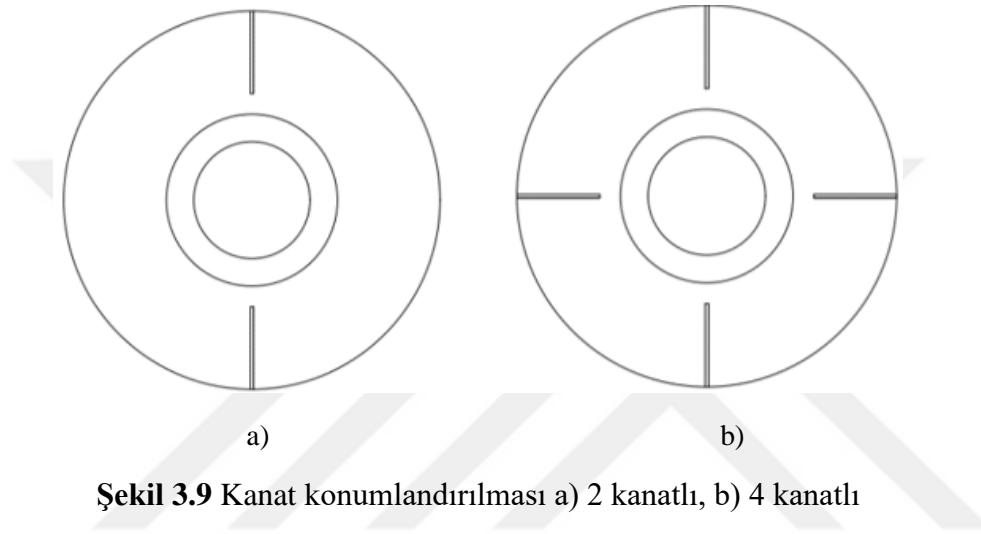
Şekil 3.7 Sıcaklık sensörü konumlandırma ve düzeneğin ölçülendirilmesi

Kontrol kartında yer alan Arduino Mini geliştirme kartlarının her birinde 6 adet ADC bulunduğu için 3 geliştirme kartına da 6 adet NTC sıcaklık sensörü bağlanmıştır. NTC sensörler yapısı gereği sıcaklığa bağlı olarak iç dirençleri değişmektedir. Bu değişim geliştirme kartına bir sabit direnç ile kurulan voltaj bölücü yardımıyla ADC girişine bağlanmıştır. ADC girişine uygulanan gerilim 0 – 1024 aralığında örneklenerek Flir One termal kamera ve K tipi termokupl ile sıcaklık kalibrasyonu yapılmıştır. Böylece NTC sıcaklık sensörlerinin 0,1°C hassasiyetinde ölçümü sağlanmıştır. Geliştirme kartlarından alınan sıcaklık verileri tek bir veri paketi olacak şekilde birleştirilerek bluetooth aracılığı ile alıcıya aktarılır. Aktarımda 115200 band genişliğinde 600 mS hızında alıcıya aktarılmaktadır. Aktarılan veriler eşleştirilen alıcı cihaz üzerinde Serial Port Utility programı ile kaydedilmiştir. Şekil 3.8’de program arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Seri port utility arayüzü

Çalışmanın ikinci aşamasında dış boru ile iç boru arasında kalan boşluk 600 mm uzunluğunda Şekil 3.9’da gösterildiği gibi sırasıyla 2 ve 4 adet özdeş alüminyum kanat yerleştirilmiştir. Kanatlar 12 mm genişliğinde 0,5 mm kalınlığında olup pleksi olan dış boruya monte edilmiştir. Ardından Çizelge 4.2’de verilmiş olan deneyler yapılmıştır. Kanatların buradaki asıl amacı dönme sebebiyle yapı içerisinde bulunan parafin moleküllerinin titreşim miktarını arttırıp ısı transferini hızlandırmaktır. Kanatlar aracılığıyla az da olsa iç boru yüzeyinin sıcaklığını dış borunun yüzeyine yakın yerlerine de iletmesi planlanmıştır.



Şekil 3.9 Kanat konumlandırılması a) 2 kanatlı, b) 4 kanatlı

Çizelge 3.2 Deneysel sistemi oluşturan elemanlar ve kullanım amaçları

Malzeme adı	Kullanım amacı
Isı transfer akışkanı deposu	Isı transfer akışkanı olan suyun toplandığı ve ısıtıldığı hazne
Termostatlı rezistans	Akışkanı ilgili sıcaklıkta tutulmasını sağlayan gerekli zamanlarda ısıtılmasını sağlamak
By-pass vanası	Akışkanın bir kısmını depoya gönderip pompanın sistem üzerindeki baskısını azaltmak
Ana vana	Akışkanın debi kontrolü
Pompa	Akışkanın sistem içinde devridaimini sağlamak
Debimetre	Akışkanın debisinin ölçülmesini sağlamak
Döner bağlantı elemanı	Sürekli veya kesintili döner sistemlerde akışkan akışını iletmek için kullanılır.
Motor	Sistemin dönmesi için gerekli olan dönme torkunu sağlayan cihaz
Kayış kasnak sistemi	Motorun döndürmesini ısı değiştiricisine ve/veya ısı değiştiricisi iç borusuna ileten sistemdir.
Devir kontrol kartı	Voltaj kontrolü yapılarak motorun hızının kontrol edildiği karttır.

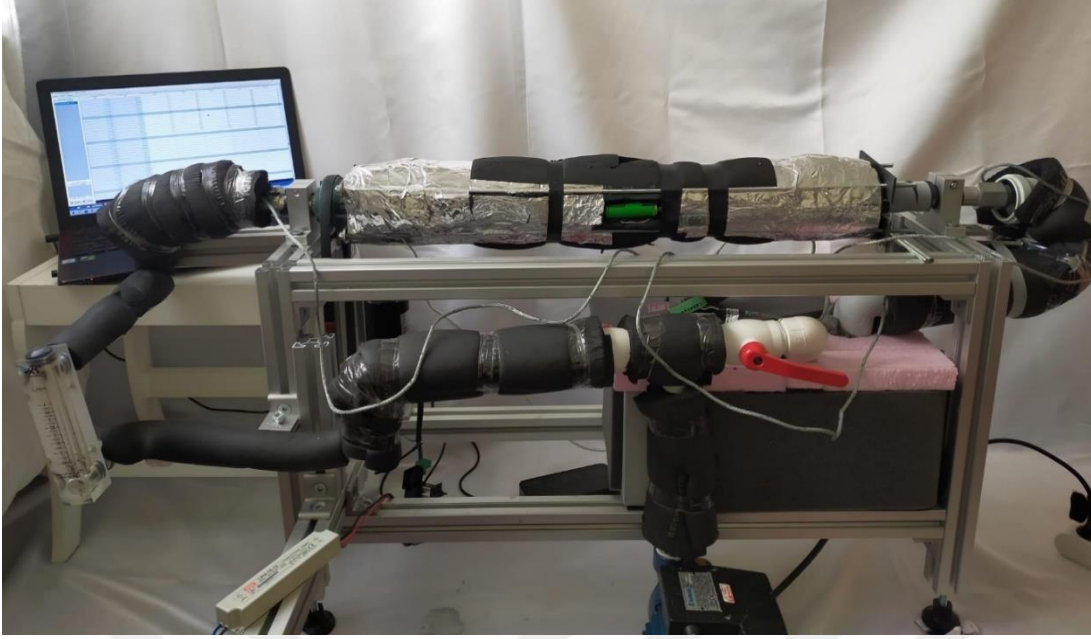
Çizelge 3.2 Deneysel sistemi oluşturan elemanlar ve kullanım amaçları (Devamı)

Alüminyum iç boru	Isı değiştiricisi içinde ısı transfer akışkanının taşındığı iç borudur.
Pleksi dış boru	Faz değiştiren malzemenin tutulacağı içinden alüminyum geçecek olan ısı değiştiricisi dış borusudur.
Alüminyum Kanatlar	Dış boruya eklenen alüminyumdan yapılmış yapı içerisinde ısı transferini artırıcı etki yapması planlanan parçalardır.
Isı değiştiricisi kapakları	Sistemin sızdırmazlığını ve döndürmesini sağlayan elemandır.
NTC sıcaklık ölçüm sistemi	NTC sıcaklık termistörleri ile faz değiştiren malzemenin sıcaklığının anlık olarak toplanıp bluetooth ile bilgisayara gönderen ölçüm sistemidir.
Termokupl	Isı değiştiricisine giren, çıkan akışkanın ve ortam sıcaklıklarının alınması
Datalogger (Veri Toplama Cihazı)	Sistemden alınan sıcaklık değerlerin toplanıp bilgisayara aktarılmasını sağlar.

Çizelge 3.2’de deney tesisatını oluşturan elemanlar sırasıyla ve yapmış oldukları fonksiyonlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Çizelge 3.3’de ise deney tesisatın oluşturan elemanların marka ve modelleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.3 Deneysel sistemi oluşturan elemanların marka ve modelleri

Ürün Adı	Marka	Model
Dataloger	Ordell	UDL100
Termokopul (Probu)	Ordell	OB02-K106-3 1K
Rezistans	Ser Resistance	1,5 inch-12 kW
Santrifüj Pompa	Sumak	SM10-S
Debimetre	XINSHENG	LZM-Z
Takometre	DT-2234C	DT-2234C
NTC Termistör Sensörü	Robotistan	13100
Termostatlı rezistans	BALÇIK	TR-1/8027
Elektronik Tartı	-	-



Şekil 3.10 Deney düzeneği

3.2. Matematiksel Bağlılıklar

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen veriler aşağıda verilen matematiksel denklemler kullanılarak irdelenmiştir. Bu sayede termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan faz değıştiren malzemelerin şarj performansını geliştirmeye yönelik yapılan döndürme işleminin ısı transfer performansına olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

$$H_{FDM} = h_{FDM} + \Delta H_{FDM} , \quad (3.1)$$

$$h_{FDM} = h_{FDM,ref} + \int_{T_{ref}}^T c_{p,FDM} , \quad (3.2)$$

$$\Delta H_{FDM} = \beta L , \quad (3.3)$$

Yukarıdaki bağıntılarda eşitlik 3.3 gizli ısı denklemi, eşitlik 3.2 ise duyulur entalpi denklemidir. Eşitlik 3.1, ise malzemenin toplam entalpisi olup eşitlik 3.2 ve eşitlik 3.3 denklemlerinin toplamıdır. [1,10]

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{eğer } T < T_k \\ \frac{T - T_k}{T_s - T_k} & \text{eğer } T_k < T < T_s , \\ 1 & \text{eğer } T > T_s \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\dot{Q}_{transfer} = \frac{H_{FDM}}{t_{transfer}} , \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.4, sıvı fraksiyon denklemdir. Modelleri birbirleriyle kıyaslamak ve sistemin dönüştürülen gücünü bulmak için eşitlik 3.5 kullanılmaktadır. [1,10]

$$Nu = \frac{h(D - d)}{k}, \quad (3.6)$$

$$h = \frac{q_d}{(T_d - T_s)}, \quad (3.7)$$

$$q_d = \frac{k(T_d - T_c)}{\Delta x}, \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8, ısı akısı denklemini olup ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında kullanılmıştır. Eşitlik 3.7’de kullanılan ısı transfer akışkanını taşıyan iç boru duvar sıcaklığı “T_d”, akışkan giriş sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Eşitlik 3.7, ısı taşınım katsayısı denklemini olup Nusselt sayısı hesaplaması için kullanılmıştır. Eşitlik 3.6, Nusselt sayısı hesaplaması için kullanılmaktadır.[3]

Nusselt sayısı ısı taşınım katsayısının ısı iletim katsayısına olan oranı olarak tanımlanabilir.

$$P_{kayıp} = \frac{VI t_{transfer}}{3600}, \quad (3.9)$$

$$TER = \frac{\dot{Q}_{transfer} - (\dot{Q}_{transfer,temel} + P_{kayıp})}{\dot{Q}_{transfer,temel}}, \quad (3.10)$$

Sistemi döndürmek için harcanan güç miktarı eşitlik 3.9 ile bulunurken termal iyileşme oranı (TER) ise eşitlik 3.10 ile bulunmuştur.[1]

3.3. Belirsizlik Hesabı

Yapılan deneyler içerisinde çeşitli ölçüm araç ve yöntemleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar kadar ölçülen değerlerin doğruluğu da önemlidir. Deneysel hatalar olarak üçe ayrılır. Bunlar sırasıyla,

- Deneyi yapan kişilerden kaynaklanan hatalar
- Sabit hatalar
- Rastgele hatalar

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

Sabit hatalar ile rastgele hataları ayırt etmek zordur. Sabit hataları uygun bir kalibrasyon katsayısı ile düzeltilebilir.

Yapılan deneylerde kullanılan ölçüm cihazından kaynaklı elde edilen ölçüm sonuçlarında bazı hatalar olabilir. Bu nedenle çalışmamızın güvenilirliği açısından belirsizlik analizi yapılmalıdır. Bu kapsamda EK-3 bölümünde eşitlik 3.11 aracılığıyla belirsizlik analizi yapılmıştır. Ölçülen parametrelerin belirsizlik miktarları Çizelge 3.4 de verilmiştir.

Çizelge 3.4 Parametrelerin belirsizliği

Değerler	Birim	Belirsizlik
Debi	m ³ /dk	$\pm 6,66 \times 10^{-7}$
Çap	m	$\pm 0,0001$
T	°C	$\pm 0,1$
Δx	m	$\pm 0,0005$
Zaman	Dakika	$\pm 2,5$
Tartı	kg	$\pm 0,02$

Çizelge 3.5 70 °C giriş suyu sıcaklığı için sadece dışın 25 rpm ile döndüğü deney verileri

Verilen Değerler (Temel Değerler)	Niceliği
\dot{m} (kg/s)	0,057020
ρ_{su} (kg/m ³)	977,5
Borunun iç çapı (mm)	17
k (w/m ² K)	0,2
T_d (K)	343,15
T_c (K)	324,15
Δx (m)	0,00375
Borunun dış çapı (mm)	25
Kütle (kg)	0,85
C_p (J/kgK)	2000
T (K)	339,60
T_{ref} (K)	296,75
L (J/kg)	170000
$t_{transfer}$ (s)	3900
$Q_{transfer,temel}$ (J/s)	22,26261

Çizelge 3.5'te 70 °C giriş suyu sıcaklığı için sadece dışın döndüğü deneyden alınan veriler ile belirsizlik analizi yapılmıştır.

Çizelge 3.6 Hesaplanan parametreler

Hesaplanan Parametreler	Belirsizlik (%)
W_{in}	1,1498
$W_{Q_{Çıkış}}$	1,639
$W_{Re_{akışkan}}$	2,996
W_{Nu}	7,298
$W_{H_{FDM}}$	0,0016048
$W_{Q_{transfer}}$	3,8446
TER	0,267728

Çizelge 3.6'de Çizelge 3.4' ve Çizelge 3.5 de verilen veriler doğrultusunda detayları Ek-3 de verilmiş işlemler yapılmıştır. Elde edilen belirsizlik değerleri Çizelge 3.6 de gösterilmiştir. Bu kapsamda elde edilen verilerin kabul edilebilir bir belirsizliğe sahip olduğunu söylemek mümkündür.

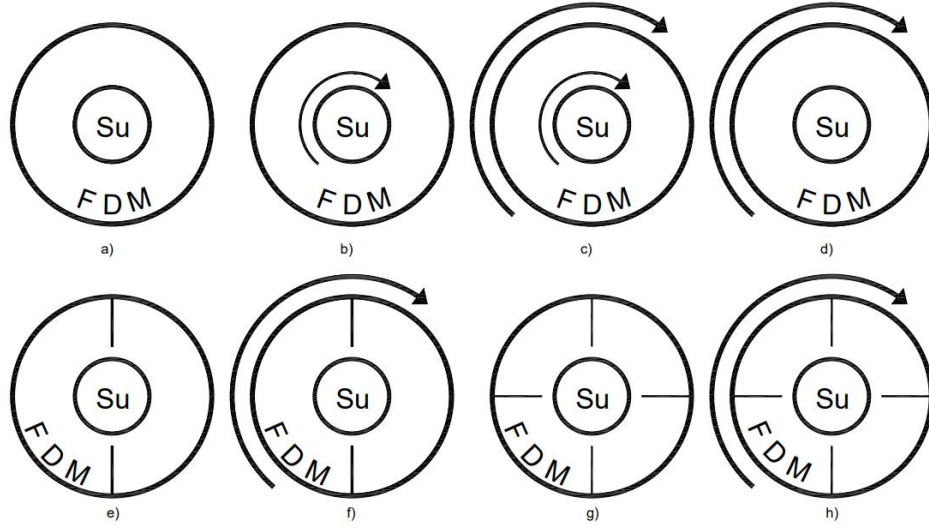
3.4. Deneysel Bulguların HAD Analizi ile Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında elde edilen örnek deneysel verilerin test edilmesi istendiği için Ansys fluent programı ile modellenmiş ve analizleri yapılmıştır. Analizler 3 farklı giriş sıcaklığı için yapılmış olup ortalama sıcaklık eğrisi ve total erime süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan tüm çalışma Ek-5 de verilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada termal enerji depolama sistemlerine yönelik iç içe borulu döner bir ısı değiştiricisi deney düzeneği hazırlanmıştır. İki aşamalı bir çalışma şekli belirlenmiş olup yapılan deneylerin birinci aşamasında dönme hız ve modeli ikinci aşamada ise kanat etkileri incelenmiştir. Deneyler sırasında ısı transfer akışkanı olarak kullanılan suyun giriş sıcaklığı 70°C, 75°C ve 80°C giriş debisi 3,5 lt/dk olarak kullanılmıştır. Faz değiştiren malzeme türü (SASOL 2792) sabit tutulmuştur. Tüm bu parametreler için farklı dönme hızları, döndürme modelleri ve kanat sayıları kullanılarak deneyler yapılmıştır. Ayrıca alıcılardan 0,6 saniye aralıklarla alınan 5 milyonun üzerinde veri işlenmiştir. Bu veriler ışığında sabit, 12 rpm, 19 rpm, 25 rpm, 2 ve 4 kanat ile saat yönünde döndürülmenin erime süresine olan etkileri ve ısı transfer performansı incelenmiştir. Yapılan deneyler için hazırlanan modellerin birbirleriyle karıştırılmaması için aşağıda belirtildiği gibi isimlendirilmiştir.

- Dönmenin ve kanatların olmadığı durum için yapılan deneyler: A
- Sadece iç borunun döndüğü ve kanatların olmadığı durum için yapılan deneyler: B
- İç-dış borunun birlikte döndüğü ve kanatların olmadığı durum için yapılan deneyler: C
- Sadece dış borunun döndüğü ve kanatların olmadığı durum için yapılan deneyler: D
- İki adet kanatın olduğu, dönmenin olmadığı durum için yapılan deneyler: E
- Sadece dış borunun döndüğü ve iki adet kanatın olduğu ve durum için yapılan deneyler: F
- Dört adet kanatın olduğu, dönmenin olmadığı durum için yapılan deneyler: G
- Sadece dış borunun döndüğü ve dört adet kanatın olduğu ve durum için yapılan deneyler: H



Şekil 4.1 Yapılan deney modellerinin gösterimi (a) sabit b) iç dönme c) iç-dış dönme d) dış dönme e) 2 kanatlı sabit f) 2 kanatlı dış dönme g) 4 kanatlı sabit h) 4 kanatlı dış dönme)

Modellerin isimlendirilmesinde kullanılan harfler Şekil 4.1’de görüldüğü gibi dönüş durumu ve kanat sayısına göre belirlenmiştir. Deneylerin isimlendirilmesinde kullanılan harften sonra ki ilk basamak giriş suyu sıcaklığını ifade etmektedir. İkinci basamak ise dönme hızını ifade etmektedir. İlk basamakta bulunan 1 numara 70°C, 2 numara 75°C, 3 numara 80°C giriş su sıcaklığını belirtmektedir. İkinci basamakta bulunan 0 numara sabit, 1 numara 12 rpm, 2 numara 19 rpm, 3 numara ise 25 rpm dönüş hızını belirtmektedir. Örneğin C 3.2 modeli 80°C giriş suyu sıcaklığına sahip 19 rpm ile iç-dış borunun birlikte döndüğü ve kanatın olmadığı deney modelidir. H 2.1 modeli 75°C giriş suyu sıcaklığına sahip 12 rpm ile sadece dış borunun döndüğü ve dört adet kanatçığın olduğu deney modelidir.

Çizelge 4.1 Kanatsız deney konfigürasyonları

Model	Dönüş Durumu	Giriş Sıcaklığı (°C)	Giriş Debisi (L/Dk)	Dönüş Hızı (Rpm)
A1.0	Sabit Durum	70	3,5	0
A2.0	Sabit Durum	75	3,5	0
A3.0	Sabit Durum	80	3,5	0
B1.1	İç Boru	70	3,5	12
B2.1	İç Boru	75	3,5	12
B3.1	İç Boru	80	3,5	12

Çizelge 4.1 Kanatsız deney konfigürasyonları (Devamı)

B1.2	İç Boru	70	3,5	19
B2.2	İç Boru	75	3,5	19
B3.2	İç Boru	80	3,5	19
B1.3	İç Boru	70	3,5	25
B2.3	İç Boru	75	3,5	25
B3.3	İç Boru	80	3,5	25
C1.1	İç-Dış Boru	70	3,5	12
C2.1	İç-Dış Boru	75	3,5	12
C3.1	İç-Dış Boru	80	3,5	12
C1.2	İç-Dış Boru	70	3,5	19
C2.2	İç-Dış Boru	75	3,5	19
C3.2	İç-Dış Boru	80	3,5	19
C1.3	İç-Dış Boru	70	3,5	25
C2.3	İç-Dış Boru	75	3,5	25
C3.3	İç-Dış Boru	80	3,5	25
D1.1	Dış Boru	70	3,5	12
D2.1	Dış Boru	75	3,5	12
D3.1	Dış Boru	80	3,5	12
D1.2	Dış Boru	70	3,5	19
D2.2	Dış Boru	75	3,5	19
D3.2	Dış Boru	80	3,5	19
D1.3	Dış Boru	70	3,5	25
D2.3	Dış Boru	75	3,5	25
D3.3	Dış Boru	80	3,5	25

Çizelge 4.2 Kanatlı deney konfigürasyonları

Model	Dönüş Durumu	Kanat sayısı	Giriş Sıcaklığı (°C)	Giriş Debisi (L/Dk)	Dönüş Hızı (Rpm)
A1.0	Sabit Durum	0	70	3,5	0
A2.0	Sabit Durum	0	75	3,5	0
A3.0	Sabit Durum	0	80	3,5	0
D1.1	Dış Boru	0	70	3,5	12

Çizelge 4.2 Kanatlı deney konfigürasyonları (Devamı)

D2.1	Dış Boru	0	75	3,5	12
D3.1	Dış Boru	0	80	3,5	12
D1.2	Dış Boru	0	70	3,5	19
D2.2	Dış Boru	0	75	3,5	19
D3.2	Dış Boru	0	80	3,5	19
D1.3	Dış Boru	0	70	3,5	25
D2.3	Dış Boru	0	75	3,5	25
D3.3	Dış Boru	0	80	3,5	25
E1.0	Sabit Durum	2	70	3,5	0
E2.0	Sabit Durum	2	75	3,5	0
E3.0	Sabit Durum	2	80	3,5	0
F1.1	Dış Boru	2	70	3,5	12
F2.1	Dış Boru	2	75	3,5	12
F3.1	Dış Boru	2	80	3,5	12
F1.2	Dış Boru	2	70	3,5	19
F2.2	Dış Boru	2	75	3,5	19
F3.2	Dış Boru	2	80	3,5	19
F1.3	Dış Boru	2	70	3,5	25
F2.3	Dış Boru	2	75	3,5	25
F3.3	Dış Boru	2	80	3,5	25
G1.0	Sabit Durum	4	70	3,5	0
G2.0	Sabit Durum	4	75	3,5	0
G3.0	Sabit Durum	4	80	3,5	0
H1.1	Dış Boru	4	70	3,5	12
H2.1	Dış Boru	4	75	3,5	12
H3.1	Dış Boru	4	80	3,5	12
H1.2	Dış Boru	4	70	3,5	19
H2.2	Dış Boru	4	75	3,5	19
H3.2	Dış Boru	4	80	3,5	19
H1.3	Dış Boru	4	70	3,5	25

Çizelge 4.2 Kanatlı deney konfigürasyonları (Devamı)

H2.3	Dış Boru	4	75	3,5	25
H3.3	Dış Boru	4	80	3,5	25

Deneyler, düzeneğin yapabileceği ve yenilik unsuru oluşturabilecek etkileri gözlemleyebilmek amacıyla belirlenmiştir. Yapılan literatür taramasında görülmüştür ki ısı transfer akışkanı sıcaklığının artmasının erime süresini düşürdüğü, debisinde ki değişikliğin ise erime süresinde fazla etkili olmadığı belirlenmiştir. İç borudan dış boruya doğru eklenen kanatların ısı transferini arttırdığı ve erime süresini düşürdüğü belirtilmiştir. Ancak dış borudan iç boruya doğru olan kanatların ısı transferine olan etkisinin az olduğu belirtilmiştir. Ancak ısı değiştiricisinin dönme konfigürasyonları, dönme hızları ve kanatların döndürülmesi ile ilgili herhangi bir bilgi olmadığından deneysel araştırma bu yönde yapılmıştır.

Yapılan deneylerde kullanılan faz değiştiren malzemenin, alüminyumun ve suyun özellikleri Çizelge 4.3 de verilmiştir.

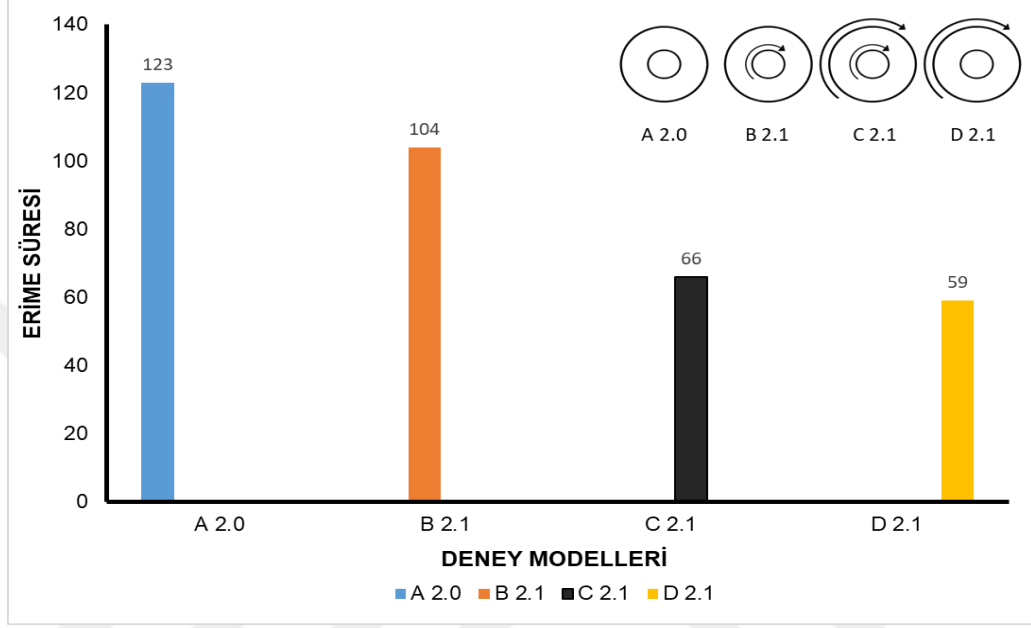
Çizelge 4.3 Malzeme özellikleri [56,57,58]

Malzeme Özellikleri	Parafin(Sasol2792)	Su	Alüminyum
$T_{katılma}$ [K]	329,15	-	-
T_{erime} [K]	331,15	-	-
ρ [kg/m ³]	770	977,5	2719
C_p [j/kgK]	2000	4190	871
k [W/mK]	0,2	0,663	202,4
μ [kg/m.s]	0,003227	0,000404	-
L [J/kg]	170000	-	-
B [1/K]	0,00014	-	-

Bu çalışma iki etapta yapılmış olup ilk etapta dönme hızı ve dönme modelinin etkileri incelenmiştir. İkinci etapta ise dönme modeli sabit tutulup kanat sayısı ve dönme hızının etkisi incelenmiştir.

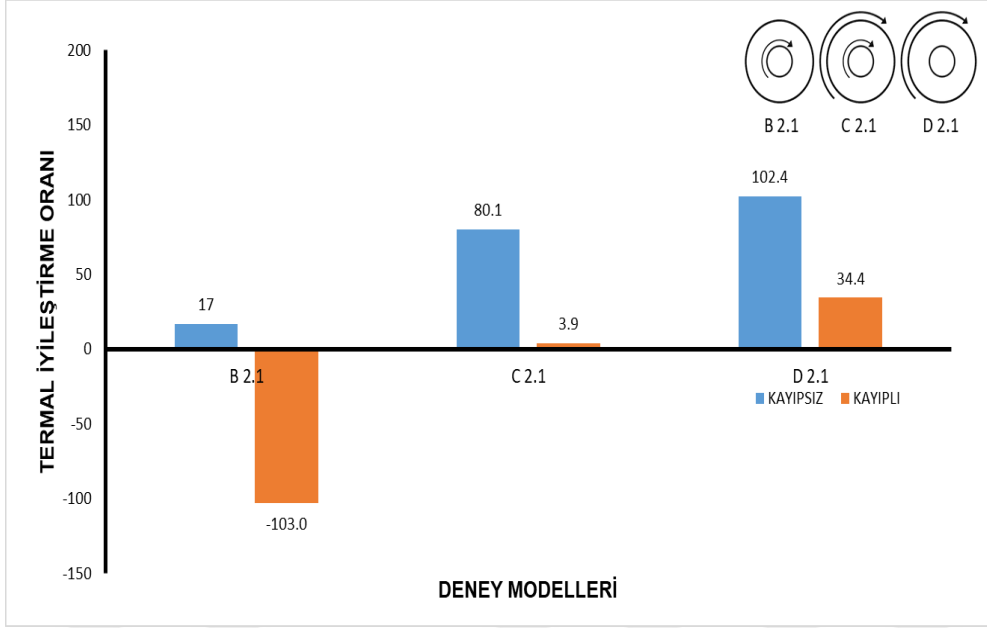
4.1. Döndürme Modelinin Etkisi

Farklı dönme modelleri için yapılan deneylerden elde edilen ölçüm sonuçları ve matematiksel bağıntılar bölümünde verilen eşitlikler yardımıyla, dönme modelinin etkisi, termal iyileştirme oranı (TER), Nusselt sayısı, toplam erime süresi ve güç sonuçları kullanılarak irdelenmiştir.



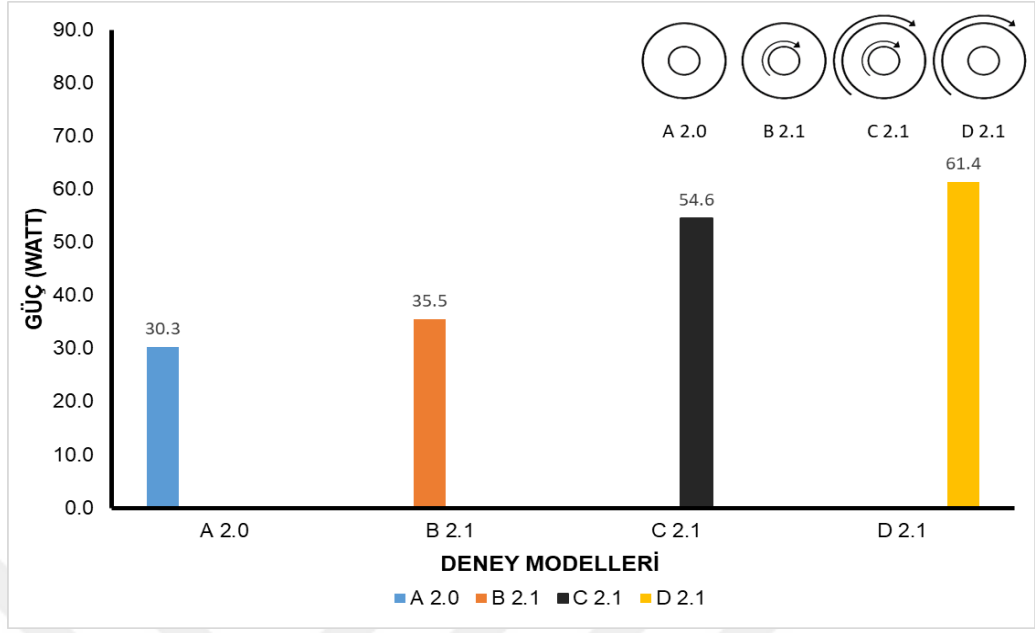
Şekil 4.2 75°C giriş suyu ve 4 farklı model için erime süreleri

Şekil 4.2 incelendiğinde, 75°C giriş su sıcaklığı ve 12 rpm dönüş hızı için, farklı dönme modelleri için erime süresinde ki değişim incelenmiştir. Şekil 4.2’de ki sütun grafiğinin azalan bir grafik olduğu görülmektedir. Dikey eksen erime süresini belirtirken yatay eksen ise yapılan deneylerin Çizelge 4.1’de verilen modelleridir. Şekil incelendiğinde tüm dönme modellerinin sabit duruma göre daha kısa sürede erimesini tamamladığı görülmüştür. Dolayısıyla dönme hareketinin ısı transferini ve erime süresini olumlu yönde etkilediği söylenebilir. D 2.1 ile C 2.1 modellerinin erime süresi arasındaki farkın az olduğu A 1.0 ve B 2.1 modellerinin C 2.1 ve D 2.1 modelleriyle olan erime süreleri arasında ki farkın fazla olduğu görülmüştür. Sadece dış borunun döndürülmesinin sadece iç borunun döndürülmesine kıyasla daha fazla ısı transferi etkinliğini artırmıştır.



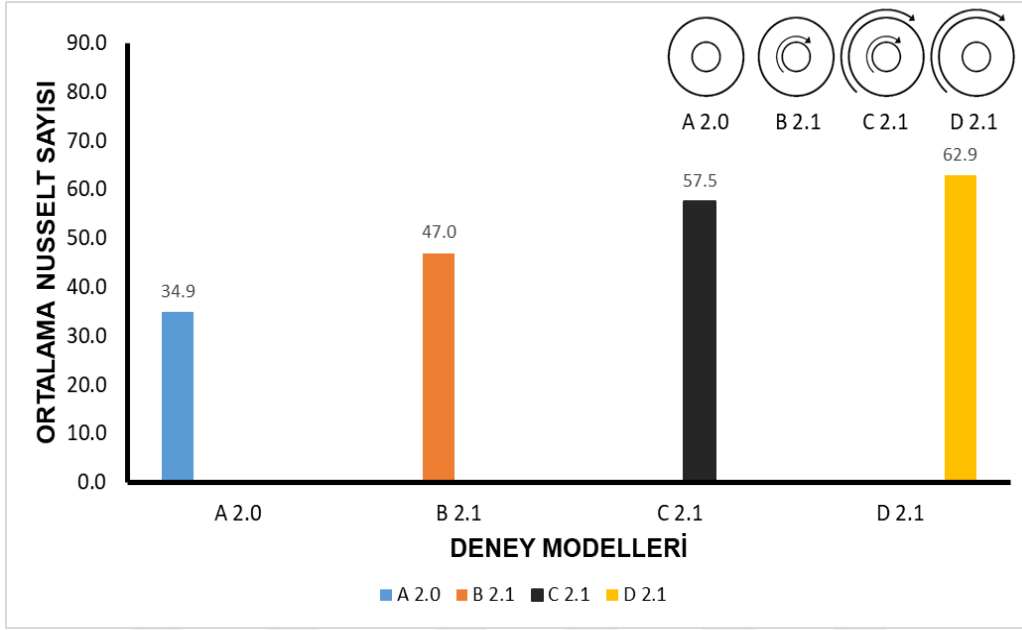
Şekil 4.3 75°C giriş suyu ve 3 farklı model için termal iyileştirme oranı

Şekil 4.3 incelendiğinde 75°C giriş su sıcaklığı ve sabit 12 rpm dönüş hızı için farklı dönme modellerinin sabit duruma göre iyileştirme oranı, kayıplı ve kayıpsız TER durumları için birlikte gösterilmiştir. Dikey eksen eşitlik 3.10 ile hesaplanan TER, yatay eksen ise deney modellerini göstermektedir. TER oranı kayıplı ve kayıpsız olmak üzere iki farklı bakış açısıyla incelenmiştir. Kayıpsız durumda sistemin döndürmek için harcadığı enerji ihmal edilmiş iken kayıplı durumda ise harcanan enerji ihmal edilmemiştir. Şekilde B 2.1 modelinde %17, C 2.1 modelinde %80 ve D 2.1 modelinde ise %102'lik bir iyileşme gerçekleşmektedir. Bu sebeple dönme hareketinin ısı transferi performansı üzerinde arttırıcı bir etki gösterdiği ve faz değiştiren malzemelerin erime süresini kısaltmaya yönelik bir etki sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak kayıpların eklenmesiyle grafiğe göre D 2.1 modelinin en verimli model olduğu B 2.1 modelinin ise en verimsiz olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla sadece dış borunun döndürülmesinin sadece iç borunun döndürülmesine oranla ısı transfer performansını daha fazla etkilediği söylenebilir.



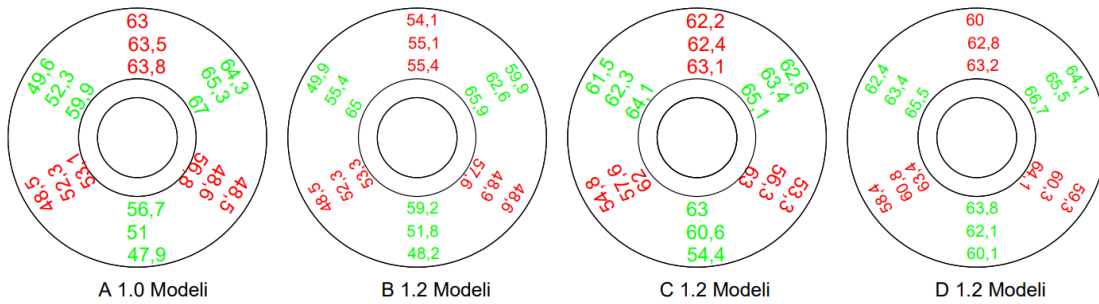
Şekil 4.4 75 °C giriş suyu ve 12 rpm dönüş hızı için güç değeri

Şekil 4.4’de 75°C giriş su sıcaklığı ve 12 rpm dönüş hızı için faz değıştiren malzemenin ısı enerjisini dönüştürdüğü güç değerleri verilmektedir. Şekil 4.4’de ki sütun grafiğinin yükselen bir grafik oluşturduğu görülmektedir. Dikey eksen ısı enerjisinin dönüştüğü güç değerlerinin eksenini belirtirken yatay eksen Çizelge 4.1’de verilen deney modelleridir. Şekilde de görüldüğü üzere toplam erime süresinin kısılması ile ısı değıştiricisinin dönüştürdüğü güç artmıştır. En fazla güç eldesi 61,4 Watt ile sadece dış borunun döndüğü (D 2.1) modelde olmuştur.



Şekil 4.5 75 °C giriş suyu ve 12 rpm dönme hızı için 4 farklı model için ortalama Nusselt sayısı

Şekil 4.5’de farklı dönme yöntemleri için ortalama Nusselt sayısı verilmiştir. Dikey eksen ortalama Nusselt sayısını belirtirken yatay eksen ise 75°C giriş su sıcaklığı ve 12 rpm dönüş hızındaki deney modellerini göstermektedir. Nusselt sayısını genel olarak ifade edecek olursak ısı taşınım değerinin iletme oranıdır. Nusselt sayısının artmasıyla iletim ile ısı transferinin azaldığı ve taşınım ile ısı transferinin de iyileştiği belirtilebilir. En yüksek ortalama Nusselt sayısının D 2.1 modelinde en düşük ise A 2.0 modelinde olması, borunun dönmesinin taşınım etkinliğini arttırdığı ve ısı transferi performansını da iyileştirdiğini söylemek mümkündür.



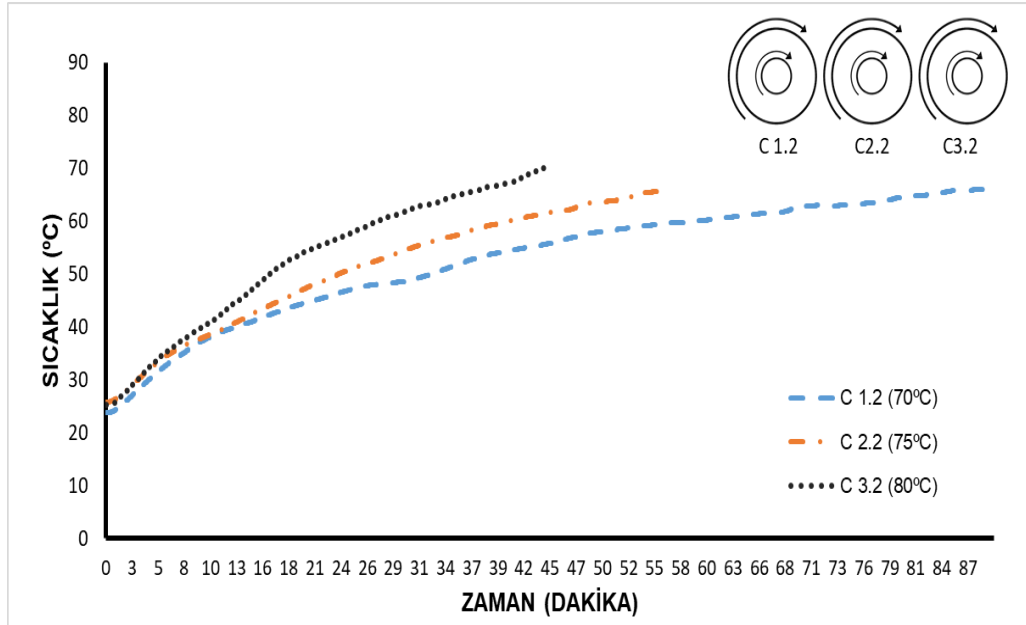
Şekil 4.6 70 °C giriş sıcaklığı 60. dakika için sıcaklık dağılımı (giriş-yeşil, çıkış-kırmızı)

Şekil 4.6’da 60. dakikada 70°C giriş su sıcaklığı için alıcılardan alınan veriler ile giriş ve çıkış kesitleri için sıcaklık dağılımı verilmiştir. Görüldüğü üzere dış borunun dönmesiyle yani C 1.2 ve D 1.2 modellerinde daha homojen bir sıcaklık dağılımının

oluştugu görülmüştür. Sadece iç borunun döndüğü ve sabit olduğu A 1.0 ve B 1.2 modellerinde, merkez sıcaklığının arttığı ancak bu artışın dışa yayılmadığı görülmektedir. Alıcılardan alınan veriler doğrultusunda A 1.0 modelinin üst yarısı alt yarısına göre daha yüksek sıcaklıklara sahiptir. Bu da doğal konveksiyondan etkilendiğinin bir göstergesidir. Sadece iç borunun döndüğü B 1.2 modelinin iç boruya yakın olan alıcılarının sabit A 1.0 modeline kıyasla daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğu, ancak bu sıcaklığın dışa iletilemediği görülmektedir. Bu duruma sebep olan B 1.2 modelini etkileyen bir merkezci kuvvet olduğu düşünülmektedir. Sadece iç borunun dönmesiyle oluşan merkezci kuvvet ile sistem içerisinde eriyen parafin, iç boru etrafında belli bir yörünge içerisinde dönmektedir. Giriş su sıcaklığının düşük olmasından dolayı erime süresini olumsuz etkilemiştir. Şekil 4.14’de detaylandırılarak açıklanmıştır.

4.2. Giriş Su Sıcaklığı Değişiminin Etkisi

Farklı giriş su sıcaklıkları ile yapılan deneylerden elde edilen ölçüm sonuçları sabit 19 rpm dönüş hızı ve iç-dış borunun birlikte döndüğü C modeli için, matematiksel eşitlikler kullanılarak giriş su sıcaklıklarının etkisi, ortalama sıcaklık, depolanan enerji, güç ve erime sonuçları irdelenmiştir.

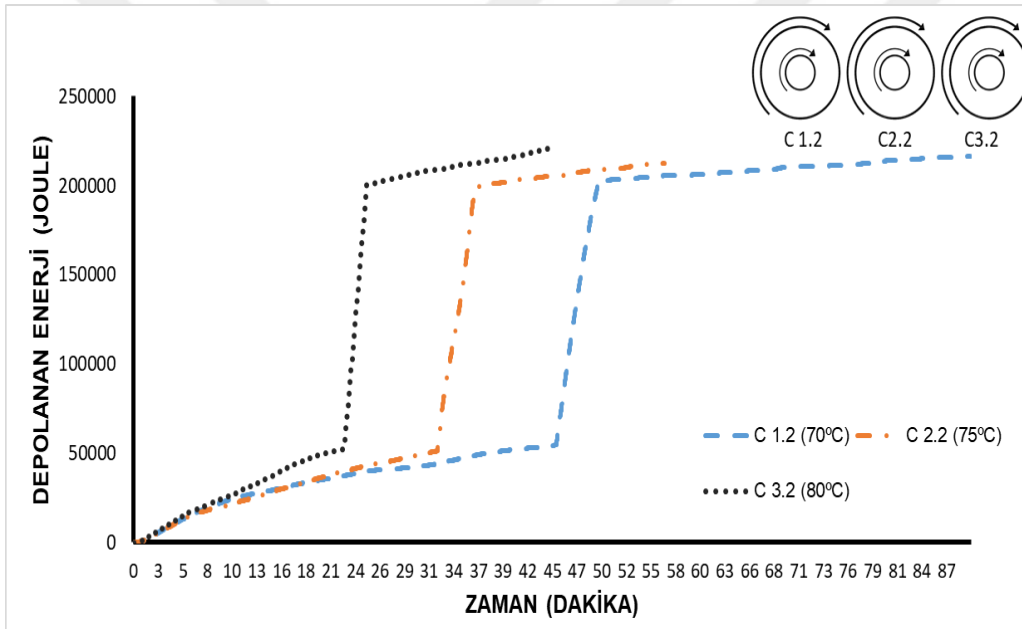


Şekil 4.7 Giriş suyu sıcaklığı değişiminin ortalama sıcaklığa etkisi

Şekil 4.7’de 70°C, 75°C ve 80°C giriş su sıcaklığı için ortalama FDM sıcaklık eğrileri verilmiştir. Dikey eksen santigrat derece cinsinden sıcaklık değerleri iken yatay eksen

zaman olarak verilmiştir. Kesikli çizgili eğri 70°C, kesikli noktalı eğri 75°C, noktalı eğri ise 80°C giriş su sıcaklığına ait deney verileridir. Şekil 4.7’de ki eğriler 19 rpm dönüş hızındaki iç ve dış boruların birlikte döndüğü C modeli deneylerine ait verilerdir. Bu grafikte görüldüğü üzere eğriler başlangıçta ilk 10 dakika boyunca birbirlerine yakın ve paralel bir şekilde ilerlemişlerdir. Daha sonrasında su giriş sıcaklığının etkisi ile birbirlerinden ayrılmışlardır. En uzun erime süresinin 70°C, en kısa erime süresinin ise 80°C olduğu görülmüştür. Literatür incelemelerinde görüldüğü üzere su giriş sıcaklığının artışı ile erime süresi kısalmıştır [7-8,12] .

C 2.2 ile C 3.2 eğrileri arasındaki fark C 1.2 eğrisi ile olan farktan oldukça azdır. Buradan sıcaklığın artışı ile dönme modeli ve dönüş hızından oluşacak olan farkların gözlemlenmesinin zorlaşacağı söylenebilir.

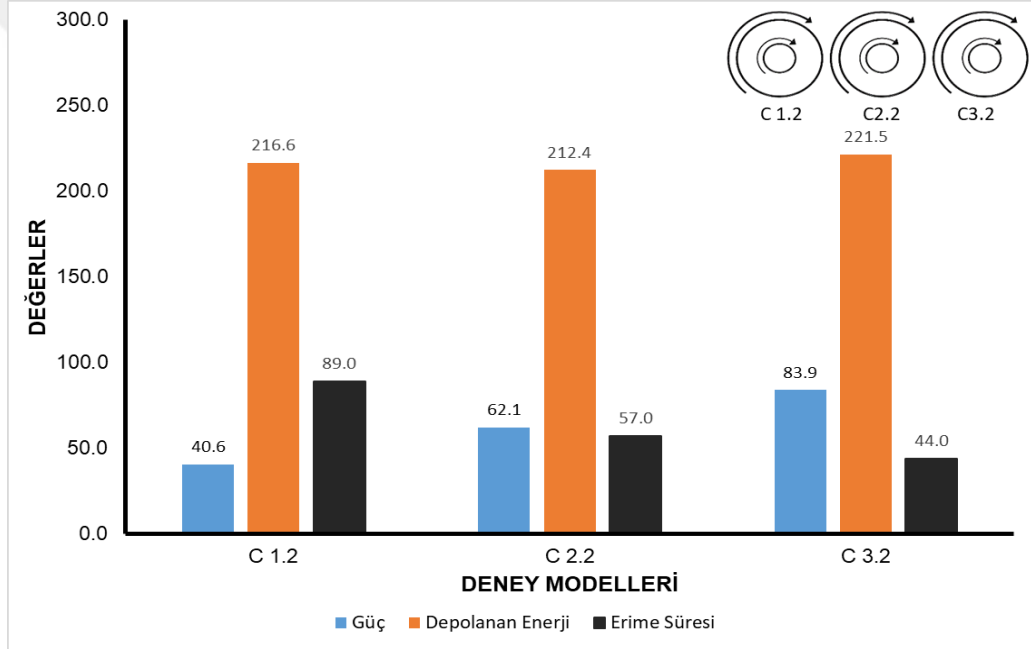


Şekil 4.8 Giriş suyu sıcaklığı değişiminin depolanan enerjiye olan etkisi

Şekil 4.8’de görülmektedir ki farklı giriş su sıcaklıklarına ait FDM’de depolanan enerji değişimi grafikleri verilmiştir. Dikey eksen depolanan enerjinin joule cinsinden karşılığının olduğu değerleri iken yatay eksen zamandır. Kesikli çizgili eğri 70°C, kesikli noktalı eğri 75°C, noktalı eğri ise 80°C giriş su sıcaklığına ait deney verileridir. Sıcaklığın değişimi ile birlikte malzeme içerisinde duyulur ısı depolamaya başlanmıştır. Şekil 4.8’in başlangıçtan kırılma anına kadar depoladığı enerji duyulur ısı enerjisidir. İlk kırılmanın olduğu yer erimenin artış gösterdiği yani gizli ısı depolamaya başladığı aşamadır. Bu aşamadan itibaren ikinci kırılmaya kadar gizli ısı depolamaya devam eder ve Şekil 4.7’de de görüldüğü üzere sıcaklık artış hızı azalır.

İkinci kırılmadan sonra eğri daha yatay ilerlemeye başlar. Faz değiştiren malzemenin eriyen bölümleri ise duyulur ısı depolamaya devam eder. Faz değiştiren malzemeler, saf malzeme olmaması sebebiyle ilk kırılmadan itibaren hem gizli ısı hem de duyulur ısı depo ederler. Bu sürecin uzun veya kısa olmasının çeşitli sebepleri olabilir. Doğal konveksiyon giriş su sıcaklığı, ısı değiştiricisi modeli vb. durumlar erime süresini etkilemektedir.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görüldüğü üzere giriş su sıcaklık değerleri arasında 5'er derecelik artış olmasına rağmen FDM'de depo edilen enerji miktarlarına bu etki yansımamıştır. Bu sebeple depo edilen enerji miktarları giriş su sıcaklığından bağımsızdır.

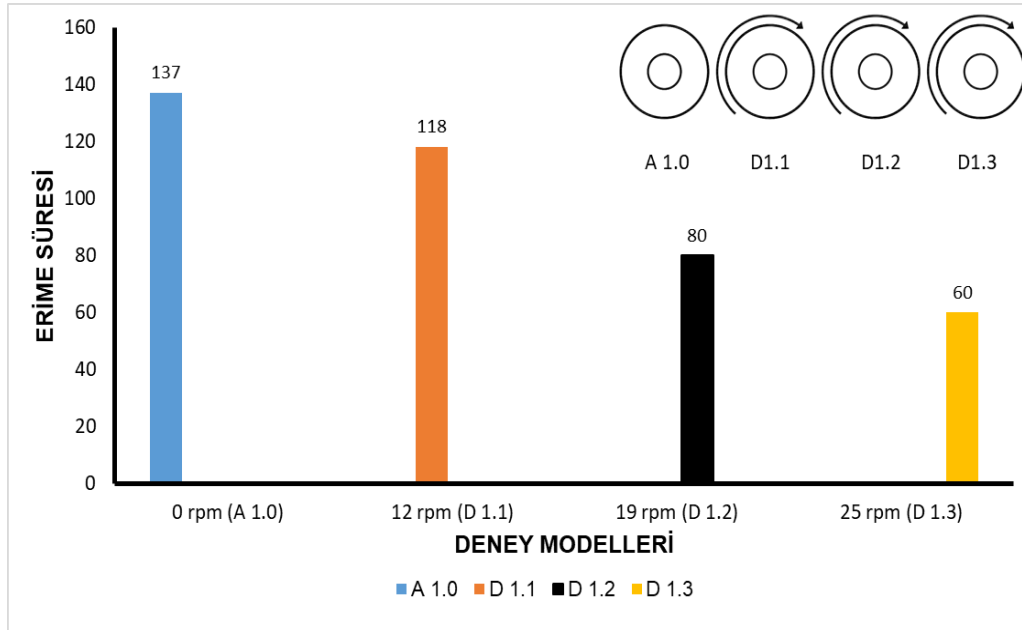


Şekil 4.9 C modeli için giriş su sıcaklığı değişimiyle güç(watt) depolanan enerji (kJ) ve erime süresi (dakika) değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.9'da giriş su sıcaklığı değişimiyle ilgili deney verilerinden alınan güç(watt), depolanan enerji (kJ) ve erime süresi (dakika) değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Dikey eksen değerlerin, yatay eksen ise deney modellerinin verildiği eksenlerdir. Şekilde görüldüğü üzere enerji miktarı giriş su sıcaklığının artışından bağımsız iken erime süresi giriş su sıcaklığının artmasıyla azalmıştır. Güç değerleri ise Şekil 4.4'de olduğu gibi erime süresine bağlı olarak artmıştır. Güç değerlerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlik 3.5'de de verilmiş olan erime süresi kısaltıkça dönüştürülen güçte buna bağlı olarak artmaktadır.

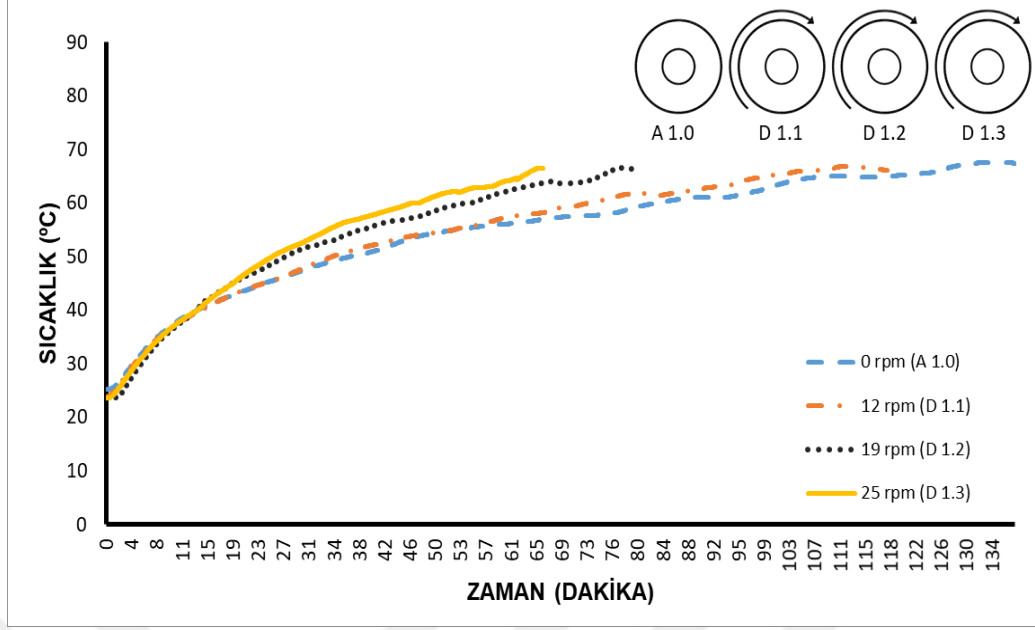
4.3. Dönme Hızının Etkisi

Farklı dönme hızları ile yapılan deneylerden elde edilen ölçüm sonuçları 70°C sabit giriş su sıcaklığı ile ve sadece dış borunun döndüğü D modeli için matematiksel bağıntılar bölümünde verilen eşitlikler yardımıyla, dönme hızının etkisini erime süresi, ortalama sıcaklık, termal iyileştirme oranı (TER) ve Nusselt sayısı sonuçları kullanılarak irdelenmiştir.



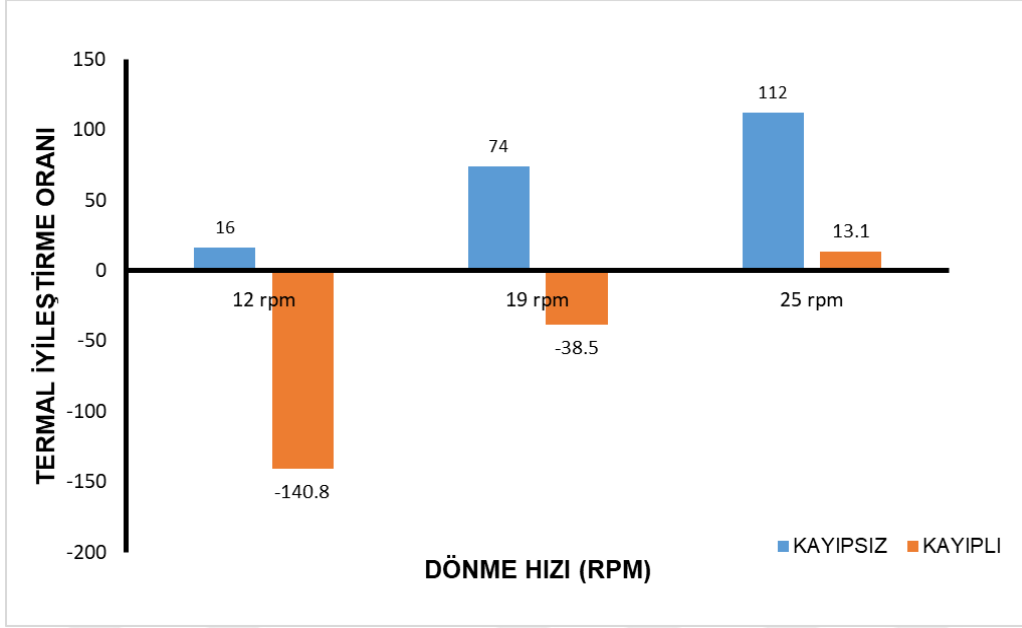
Şekil 4.10 70 °C giriş su sıcaklığı ve D modeli için dönme hızı değişiminin erime süresine olan etkisi

Şekil 4.10’da 70°C giriş su sıcaklığı için sabit ve farklı hızlarda dönen deneylerin erime süreleri verilmiştir. Dikey değer eksen deneylerin toplam erime süresi olup yatay eksen sadece dış borunun farklı hızlar ile döndüğü deney modelleridir. Literatür incelemelerinden de bilindiği üzere sabit iç içe borulu ısı değiştiricilerinde erime süresinin uzun olmasının sebebinin doğal konveksiyon olduğunu belirtmişlerdir [3,9]. Sadece dış borunun döndürülmesi ile doğal konveksiyon etkisi oldukça azalmıştır. En hızlı erimenin D 1.3 modelinde olduğu görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere dönme hızının artması ile erime süresi A 1.0 modeline göre D 1.3 modelinde %56,20 azalmıştır. Ancak erime süresinde lineer bir azalış görülmemektedir. Bu sebeple dönüş hızının artmasıyla birlikte, belirli bir dönüş hızının üzerinde erime süresine etki etmeyeceği öngörülmektedir.



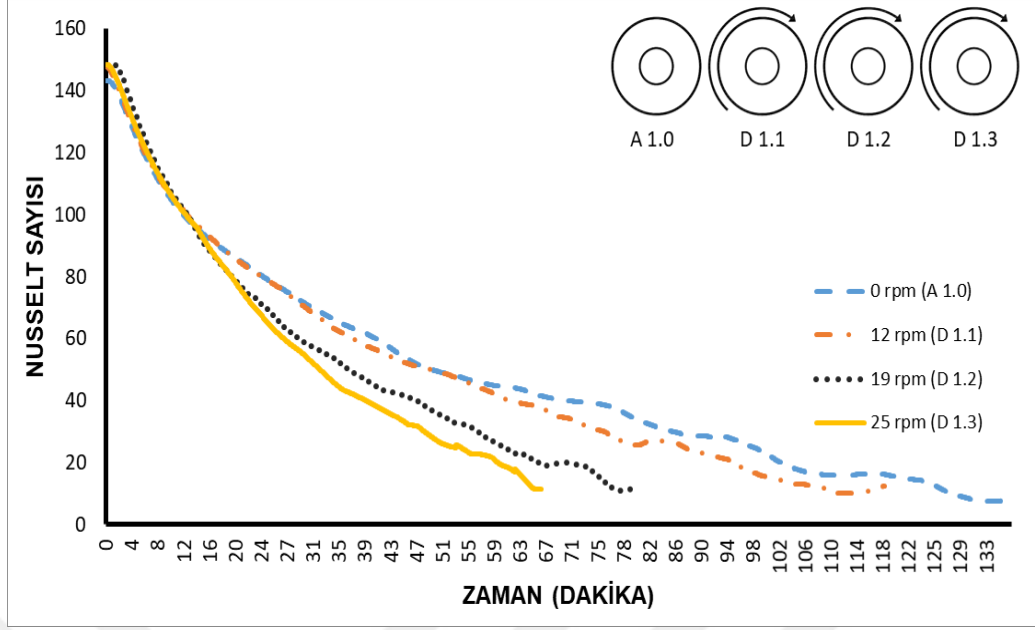
Şekil 4.11 D modeli ve 70°C giriş su sıcaklığı için dönme hızı değişiminin ortalama sıcaklığa etkisi

Şekil 4.11’de 70°C giriş su sıcaklığı için sabit ve farklı hızlarda dönen deneylerin ortalama sıcaklık eğrileri verilmiştir. Dikey değer ekseni sıcaklık ekseni iken yatay eksen zaman eksenidir. Kesikli çizgili eğri sabit durum (A 1.0), kesikli noktalı eğri 12 rpm (D1.1), noktalı eğri ise 19 rpm (D1.2), düz çizgi ise 25 rpm (D1.3) dönüş hızlarına ait deney verileridir. Şekildeki eğriler ilk 16 dakika boyunca aynı doğrultuda olup daha sonrasında ayrılmışlardır. Sabit durum ve 12 rpm dönüş hızlarına ait deneylerinin sıcaklık eğrileri birbirlerine yakındır. Bu sebeple düşük dönme hızları için dönme hareketinin ortalama sıcaklığa olan etkisi yüksek hızlarda ki dönme hareketine kıyasla daha az olmuştur. En hızlı sıcaklık artışı 25 rpm (D 1.3) modelinde olmuştur. Dönüş hızının artmasıyla birlikte deney düzeneği içerisindeki faz değiştiren malzeme taneciklerinin titreşimleri artmış ve bu sebeple erime süresi kısalmıştır.



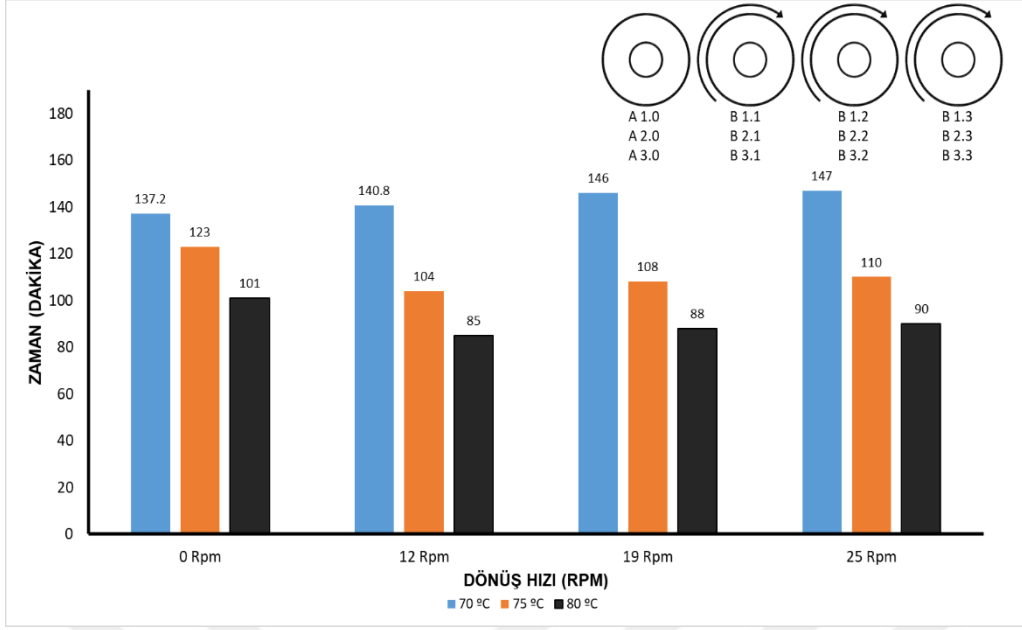
Şekil 4.12 D modeli ve 70°C giriş su sıcaklığı için dönme hızı değişiminin termal iyileştirme oranına olan etkisi

Şekil 4.12’de sabit 70°C giriş su sıcaklığı ve sadece dış borunun döndüğü modelin, kayıplı ve kayıpsız iyileştirme oranları gösterilmiştir. Dikey eksen TER oranı iken yatay eksen dönme hızları gösterilmiştir. Her dönme hızı grubunun ilk sütunu kayıpsız TER oranı, ikinci sütun ise kayıplı TER oranıdır. Şekilden de görüldüğü üzere dönme hızının artması ile TER oranının arttığı gözlemlenmiştir. 25 rpm dönme hızı için %112’lik kayıpsız TER oranı %13,1 ise kayıplı TER oranı olduğu belirlenmiştir. Dönme hızının artmasının ısı transferini artırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Şekil 4.3 ve Şekil 4.12 incelendiğinde, döndürme modelinin ve hızının ısı transferi performansına etkisinin olduğu belirlenmiştir. En verimli dönme etkisinin sadece dış borunun 25 rpm ile döndüğü durumda olduğu söylenebilir.



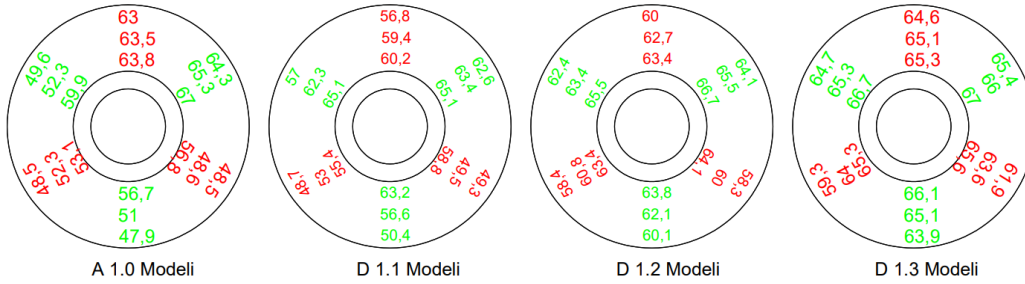
Şekil 4.13 70°C giriş sıcaklığı için dönme hızı değişiminin Nusselt sayısına olan etkisi

Şekil 4.13’de Nusselt sayısının zaman içerisindeki değişimi verilmiştir. Dikey eksen Nusselt sayısı iken, yatay eksen zaman eksenidir. Başlangıçta tüm eğriler birbirlerine yakın iken çok kısa bir süre içerisinde dramatik bir şekilde azalıp ayrılmışlardır. Şekilden de görüldüğü üzere FDM’nin erimesiyle birlikte sıvı katman kalınlığı artmıştır. Artan sıvı katman kalınlığı ısı transfer akışkanını taşıyan borudan iletilen termal enerjinin azalmasına sebep olur. Bu sebeple iletimin etkisi hızla azalır ve Nusselt sayısı düşmeye başlar. Nusselt sayısının düşmesi ise ısı transfer akışkanından, katı faz değiştiren malzemeye iletilen enerjinin azalmasına sebep olur.[3]



Şekil 4.14 Farklı giriş sıcaklıkları için sadece iç borunun dönme hızının değişiminin erime sürelerine olan etkisi

Şekil 4.14’de 70°C, 75°C ve 80°C giriş su sıcaklıklarına sahip sabit durum (0 rpm A modeli), 12, 19 ve 25 rpm dönüş hızları için sadece iç borunun döndüğü deneylerin (B modelleri) erime süreleri üzerinden irdelenmiştir. Dikey eksen zaman eksenidir. Yatay eksen dönüş hızlarının olduğu eksenidir. Her döndürme hız grubunun ilk sütunu 70°C, ikinci sütun 75°C üçüncü sütünü ise 80°C giriş su sıcaklığına ait deney verileridir. Şekil 4.10’den farklı olarak Şekil 4.14’de sadece dönüş hızının artması ile erime süresi azalmamış aksine artmıştır. Bunun sebebi iç borunun dönmesiyle birlikte oluşan merkezci kuvvetin etkisinin artmasıdır. Bu artış ile birlikte merkezci kuvvet, sıcak eriyik FDM’nin iç boru etrafında belirli bir yörüngeyi takip etmesine sebep olmuştur. Merkezci kuvvetin oluşması düşük giriş su sıcaklıklı deneylerde erime sürelerinin uzamasına sebep olurken yüksek giriş su sıcaklıklı deneyler için erime süresinin kısalmasına sebep olmuştur.



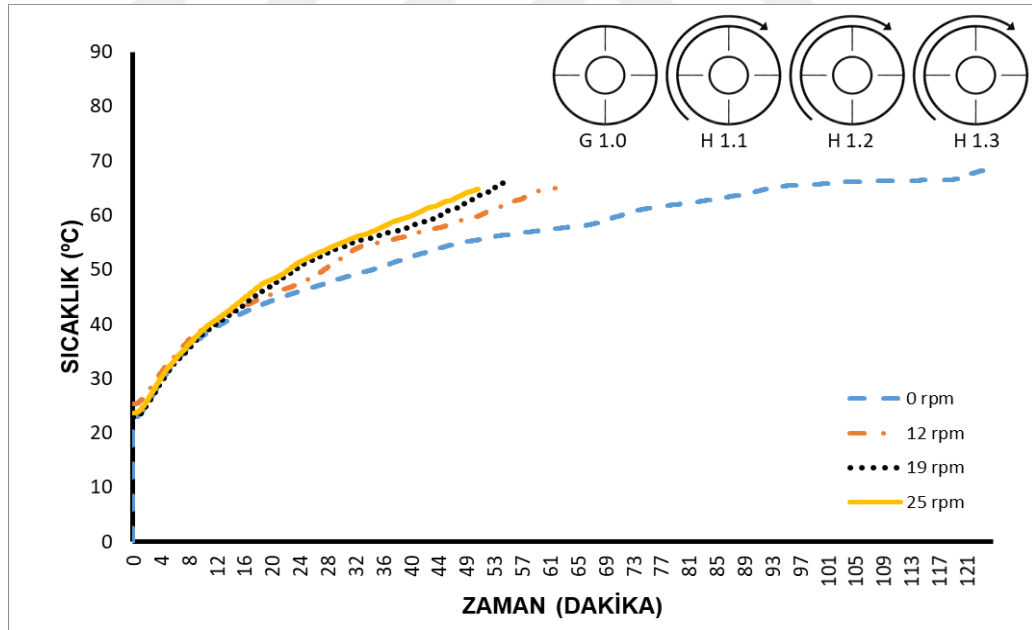
Şekil 4.15 70°C giriş su sıcaklığı ve D modelinin 60. dakikada ki sıcaklık dağılımı (giriş-yeşil, çıkış-kırmızı)

Şekil 4.15’de 70°C giriş su sıcaklığı ve D modelinin 60. dakikada ki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Dış borunun dönme hızının artmasıyla alıcıların sıcaklıkları da yükselmiştir. Hızın artmasıyla birlikte yapı içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. A modelinde ise doğal konveksiyonun etkilerini daha baskın bir şekilde görmek mümkündür.

Çalışmamızın ikinci bölümünde iç boru ile dış boru arasında kalan boşluğa Şekil 3.9’da gösterildiği şekilde alüminyum kanatlar eklenerek Çizelge 4.2 de ki deneyler yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sıcaklık ve zaman verileri ile matematiksel eşitlikler bölümündeki denklemlerden faydalanılarak kanatın etkisi irdelenmiştir.

4.4. Kanatlı Model için Dönüş Hızının Etkisi

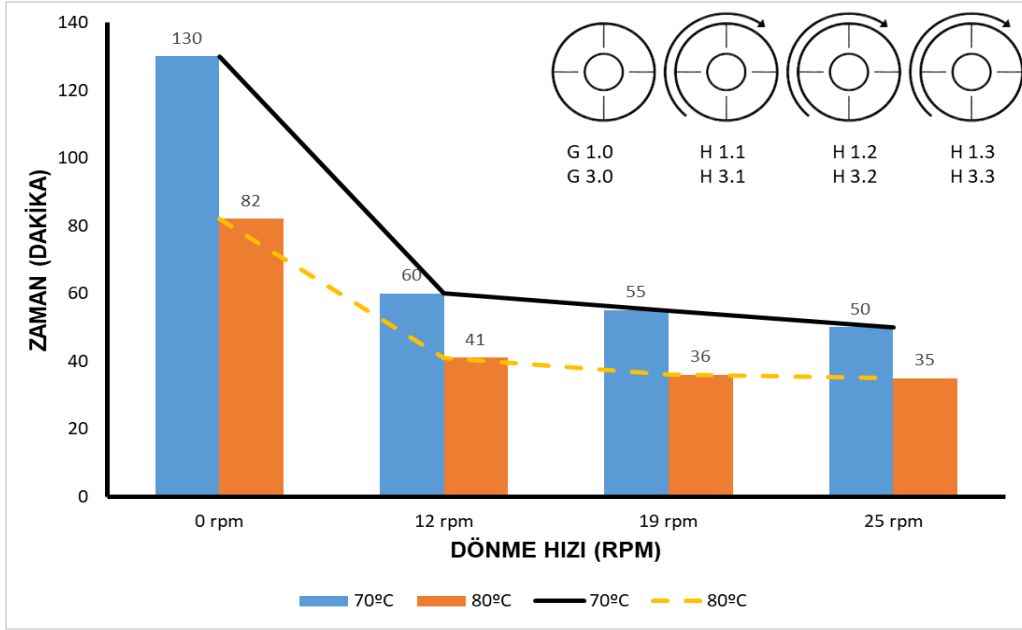
Farklı döndürme hızları ile yapılan deneylerden elde edilen ölçüm sonuçları 70°C sabit giriş su sıcaklığı ile dört adet kanatlı model için matematiksel eşitlikler kullanılarak, dönme hızı etkisini erime süresi, ortalama sıcaklık, termal iyileştirme oranı ve ortalama Nusselt sayısı sonuçları kullanılarak irdelenmiştir.



Şekil 4.16 4 Kanatlı modelin dönme hızının ortalama sıcaklığa etkisi

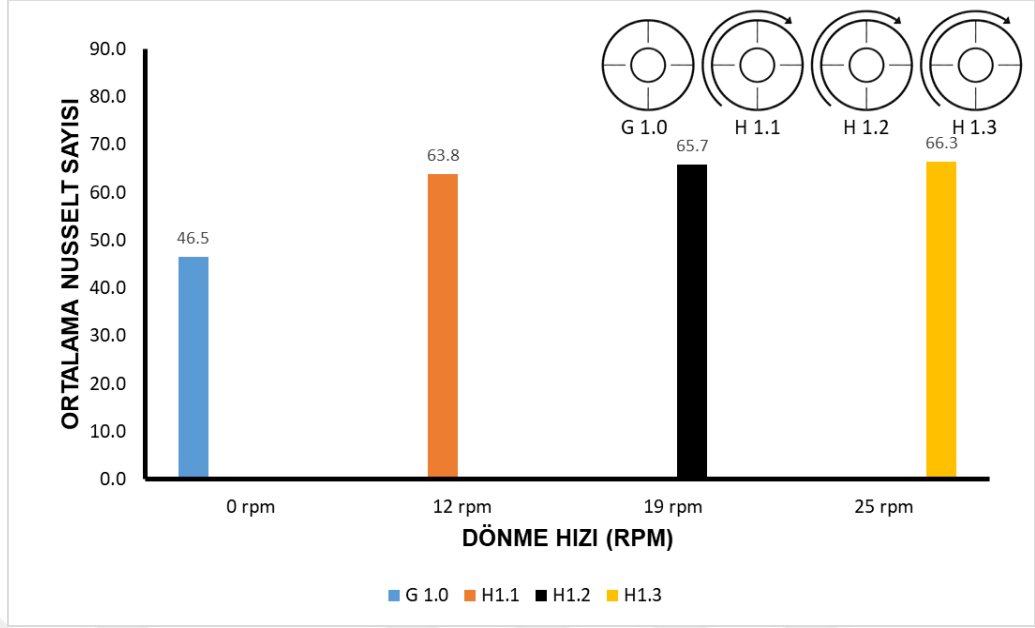
Şekil 4.16’da H modeli ve 70°C giriş su sıcaklığı için sadece dış borunun döndüğü 4 kanatlı modellerin ortalama sıcaklıkları incelenmiştir. Dikey eksen sıcaklıkların verildiği eksen, yatay eksen ise zamanın gösterildiği eksenidir. Kesikli çizgili eğri sabit durum (0 rpm G 1.0 modeli), kesikli noktalı eğri 12 rpm (H 1.1), noktalı eğri 19 rpm (H 1.2), düz çizgili ise 25 rpm (H 1.3) dönüş hızlarına ait deney verileridir. Şekilden

de görüldüğü üzere ilk 16 dakika boyunca birbirlerine yakın eğriler hâlinde ilerlerken sonrasında, dört kanatlı sabit durum (0 rpm G 1.0) eğrisi diğerlerinden ayrılmış ve daha yatay bir eğri çizdiği görülmüştür. Şekil 4.16, Şekil 4.11’den farklı olarak 12 rpm eğrisi de 19 ve 25 rpm eğrilerine yakındır. Bu sebeple kanatlı modelde ısı transferi performansına hızın etkisinin olduğu söylenebilir. Şekle göre ortalama sıcaklık ve erime süresine dönme hareketinin olmasının, kanatın olmasından daha fazla etkisinin olduğu söylenebilir.



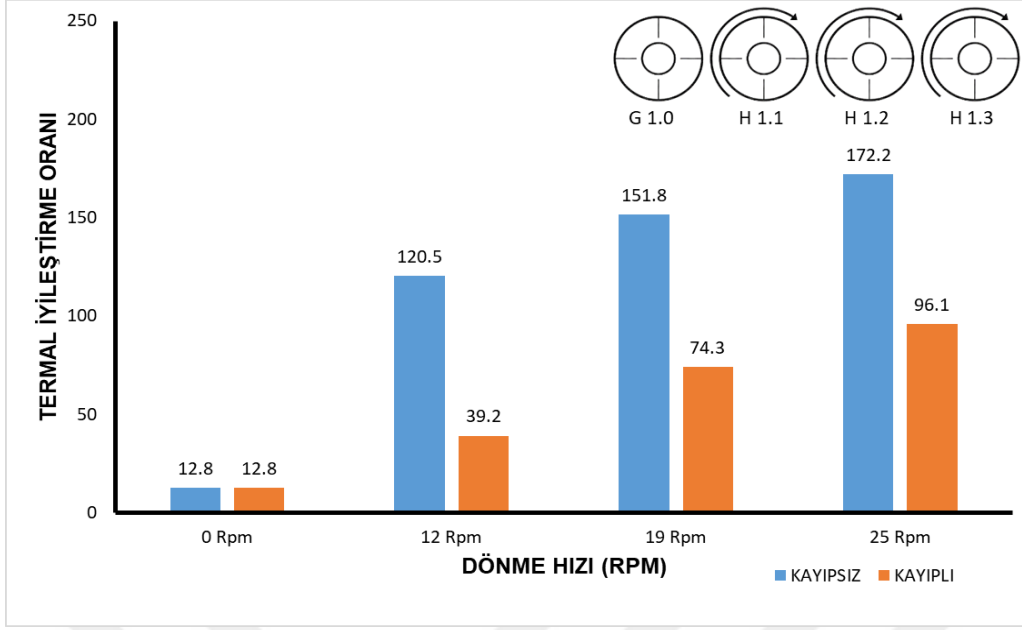
Şekil 4.17 Kanatlı modelin dönme hızının erime süresine olan etkisi

Şekil 4.17’de 70°C ve 80°C giriş su sıcaklığı için sadece dış borunun döndüğü 4 kanatlı modellerin (G ve H modelleri) toplam erime sürelerini göstermektedir. Dikey eksen zamanın verildiği, yatay eksen dönme hızlarının olduğu eksendir. Her döndürme hız grubunun ilk sütunu 70°C, ikinci sütun 80°C giriş su sıcaklıklarına ait deney verileridir. Kesikli çizgili eğri 80°C giriş su sıcaklığına ait erime sürelerini ifade ederken düz çizgili eğrisi 70°C giriş su sıcaklığı için erime süresini belirtmektedir. Düz ve kesikli çizgili erime süresini gösteren eğrilere bakılınca birbirine paralel oldukları görülmektedir. Buna göre, yataylaşmanın olduğu bölümler için erime süresinin azalış hızının düştüğü söylenebilir. Özellikle giriş su sıcaklığının 70°C’den 80°C’ye çıkması ve dönme hızının artmasıyla birlikte erime süresinin azalış hızı %2,77’lere kadar düşmüştür. Dönme hızının artmasıyla birlikte 70°C giriş su sıcaklığı için erime süresinde en fazla %61,53’lük bir azalma olduğu görülmüştür.



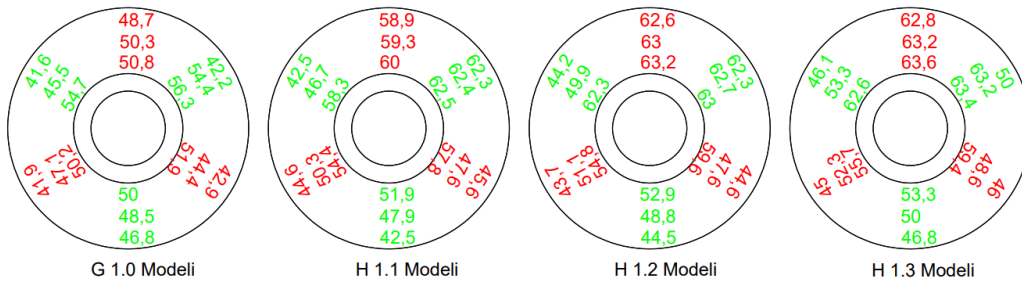
Şekil 4.18 4 Kanatlı modelin dönüş hızının ortalama Nusselt sayısına olan etkisi

Şekil 4.18’de H modeli ve 70°C giriş su sıcaklığı için dönme hızlarına göre ortalama Nusselt sayıları gösterilmiştir. Dikey eksen ortalama Nusselt sayısını belirtirken yatay eksen ise 70°C giriş su sıcaklığı ve farklı dönüş hızlarındaki 4 kanatlı deney modellerini göstermektedir. Şekil 4.18’de Şekil 4.5’den farklı olarak kanatların eklenmesiyle tüm deney modelleri içinde ortalama Nusselt sayısında bir artış olduğu görülmektedir. Bu artış ile ısı taşınım etkinliğinin de arttığı söylenebilir. Ancak şekilden de görüldüğü üzere kanatların eklenmesiyle birlikte dönme hızının artmasının ortalama Nusselt sayısına yaptığı etkinin azaldığı görülmektedir. Kanat eklenmesiyle ortalama Nusselt sayısı artış hızı azalmıştır.



Şekil 4.19 4 Kanatlı modelin dönme hızının termal iyileştirme oranına olan etkisi

Şekil 4.19’da H modeli ve 70°C giriş su sıcaklığı için termal iyileştirme oranları dönme hızlarına göre verilmiştir. Dönme hızının artmasıyla TER oranlarının da arttığı görülmektedir. Dikey eksen TER oranı iken yatay eksen dönme hızlarının olduğu eksendir. Dönme hızlarının verildiği ilk sütun kayıpsız termal iyileştirme oranı iken ikinci sütun kayıplı termal iyileştirme oranıdır. Kayıplı olan grafikler kayıpsız TER oranı içerisinde, döndürme sisteminin harcadığı enerjinin çıkarılmış hâlidir. Kayıpsız olan grafikler ise döndürme sisteminin harcadığı enerjinin ihmal edilmiş hâlidir. Şekilden de görülmektedir ki sistemi daha az enerji harcayarak döndürmemiz hâlinde daha yüksek kazanç elde etmemiz mümkündür.

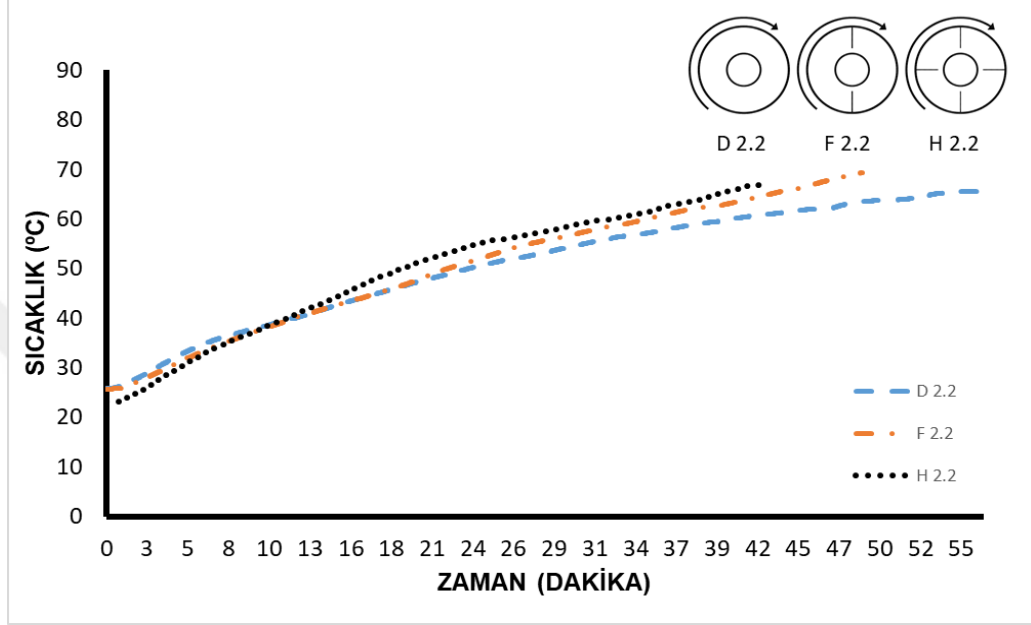


Şekil 4.20 Dönüş hızının sıcaklık dağılımına olan etkisi (giriş-yeşil, çıkış-kırmızı)

Şekil 4.20’de 70°C giriş su sıcaklığı için 4 kanatlı modellerden 30. dakikada ki FDM içi sıcaklık dağılımlarının dönüş hızlarına göre etkisi gösterilmiştir. Dönme hızının artmasıyla iç boruya yakın olan konumlarda sıcaklığın hızın artışı ile arttığı görülmüştür.

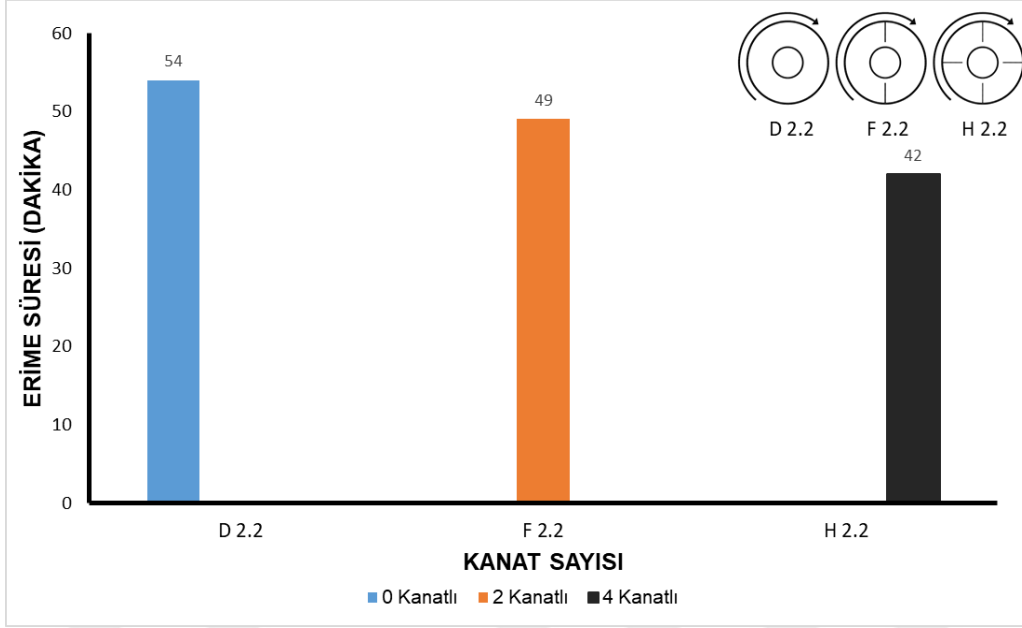
4.5. Kanatlı Model için Kanat Sayısının Etkisi

Kanat sayısının değişimi ile yapılan deneylerden elde edilen ölçüm sonuçları 75°C sabit giriş su sıcaklığı ile sadece dış borunun 19 rpm döndüğü model için matematiksel eşitlikler kullanılarak kanat sayısının etkisini erime süresi, ortalama sıcaklık, güç değerleri ve anlık sıcaklık dağılımı sonuçları kullanılarak irdelenmiştir.



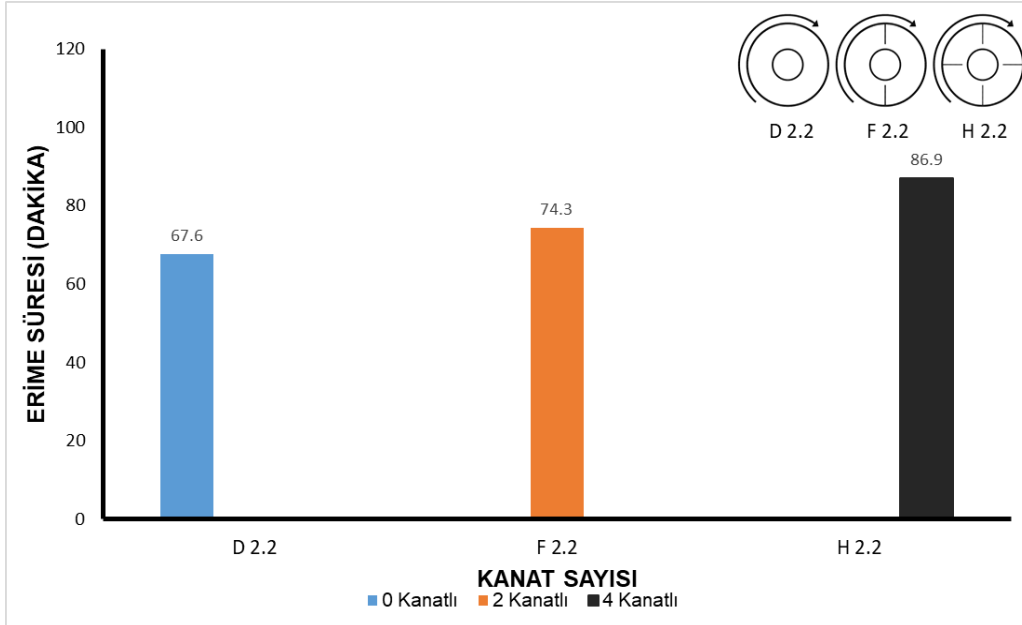
Şekil 4.21 Kanat sayısının ortalama sıcaklığa olan etkisi

Şekil 4.21’de 0, 2 ve 4 kanat sayılarına sahip 3 farklı deney modeline ait FDM’lerin ortalama sıcaklık değerlerinin zaman ile değişimleri verilmiştir. Dikey eksen sıcaklıkların verildiği, yatay eksen ise zamanın gösterildiği eksendir. Kesikli çizgili eğri kanatsız (D 2.2), kesikli noktali eğri 2 kanatlı (F 2.2), noktali eğri 4 kanatlı (H 2.2) sadece dış borunun döndüğü deneylere ait verilerdir. Şekilden de görülmektedir ki ortalama sıcaklıklarının birbirlerine çok yakın olduğu ve bu sebeple kanat sayısını arttırmanın ortalama sıcaklık artışına fazla bir etki oluşturmadığı söylenebilir.



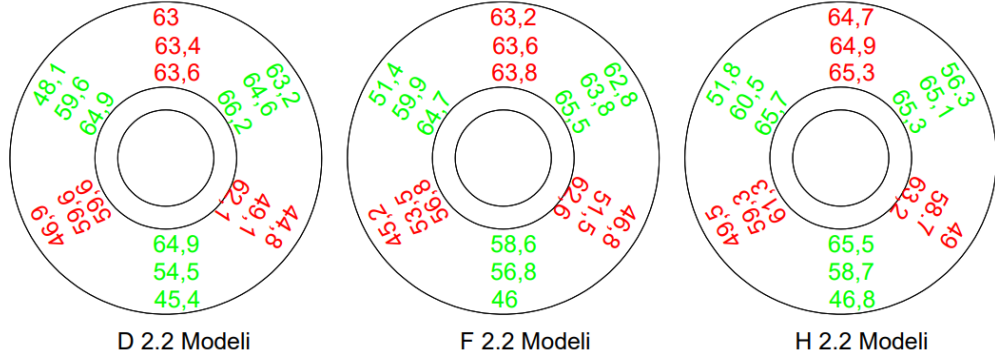
Şekil 4.22 Kanat sayısının erime süresine olan etkisi

Şekil 4.22’de 0, 2 ve 4 kanat sayılarına sahip 3 farklı deney modeline ait toplam erime süreleri verilmiştir. Dikey eksen zamanın verildiği, yatay eksen ise kanat sayısının gösterildiği eksendir. Kanat sayısının artması ile erime süresinin azaldığı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere D 2.2 modeli ile H 2.2 modelini kıyasladığımızda erime süresinde %22,22’lik azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca erime süresine, kanat sayısını arttırmanın dönmeye kıyasla daha az etki ettiği söylenebilir.



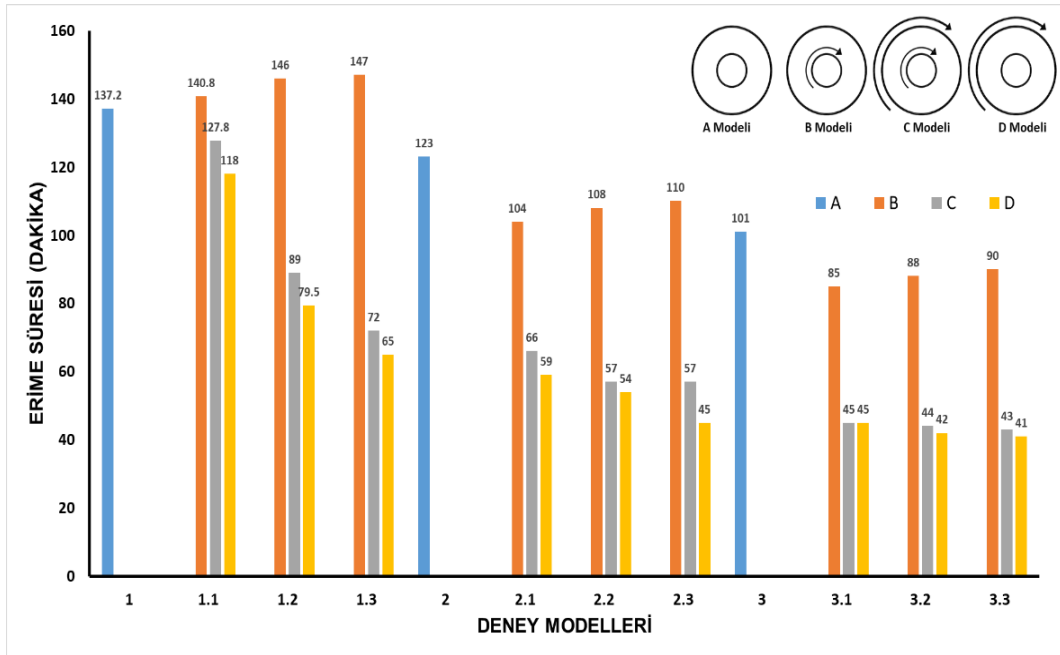
Şekil 4.23 Kanat sayısının güce olan etkisi

Şekil 4.23’de 0, 2 ve 4 kanat sayılarına sahip 3 farklı modelin elde ettiği güç değerleri verilmiştir. Dikey eksen elde edilen güç değerleri, yatay eksen ise kanat sayılarının gösterildiği eksendir. Kanat sayısının artmasıyla erime süresi azalmıştır. Bu sebeple elde edilen güç değerlerinin arttığı görülmüştür. Dört kanatlı H.2.2 modeli 86,9 watt güç eldesi ile kanatsız modele göre %28,55 daha fazla güç elde etmiştir.



Şekil 4.24 Kanat sayısının sıcaklık dağılımına etkisi (30. Dakika)

Şekil 4.24’de 75°C giriş su sıcaklığı için 0, 2 ve 4 kanatlı 19 rpm ile sadece dış borunun döndüğü modellerin 30. dakikada FDM içerisinde bulunan alıcılardan alınan veriler doğrultusunda sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekil 4.24’de görülmektedir ki kanat sayısının artmasıyla birlikte sıcaklıkların homojen bir yayılım gösterdiği, bu sebeple de kanat sayı artışının erime sürecini iyileştirdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.25 Kanatsız deneylerin erime süreleri

Kanatsız deneyler neticesinde Şekil 4.25’de verilen erime süreleri elde edilmiştir. Dikey eksen erime süresi, yatay eksen deney modelleridir. Deney modelleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Şekilde ki grafikler soldan sağa doğru azalmaktadır. En hızlı erime süresinin 41 dakika ile sadece dış borunun döndüğü D 3.3’de en yavaş erimenin ise 147 dakika ile sadece iç borunun döndüğü B 1.3 modelinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.25’e göre erime hızının modellere göre sıralaması en hızlıdan yavaşa doğru; D modeli, C modeli, B modeli ve A modeli olduğu görülmüştür. A modelinin erime süresi giriş su sıcaklığının etkisi ile azaldığı bilinmektedir. Yüksek giriş su sıcaklıklı deneyler için B modelinin A modeline göre erime süresini kısalttığı söylenebilir. B modelinde dönme hızının artmasına rağmen oluşan erime süresi artışı Şekil 4.14’de detaylı bir şekilde anlatılmıştır. C modelinin D modelinden sonra en fazla erime süresine etki ettiği görülmüştür. D 2.3 modeli A 2.0 modeline göre erime süresinde %63,41’lik bir azalış göstermiştir. Döndürmenin ısı transfer performansını en fazla arttırdığı deney modeli 75°C giriş su sıcaklığı ile D 2.3 modelidir.

Çizelge 4.4 Kanatsız deneylerinin termal iyileştirme oranları (Kayıpsız-Kayıplı)

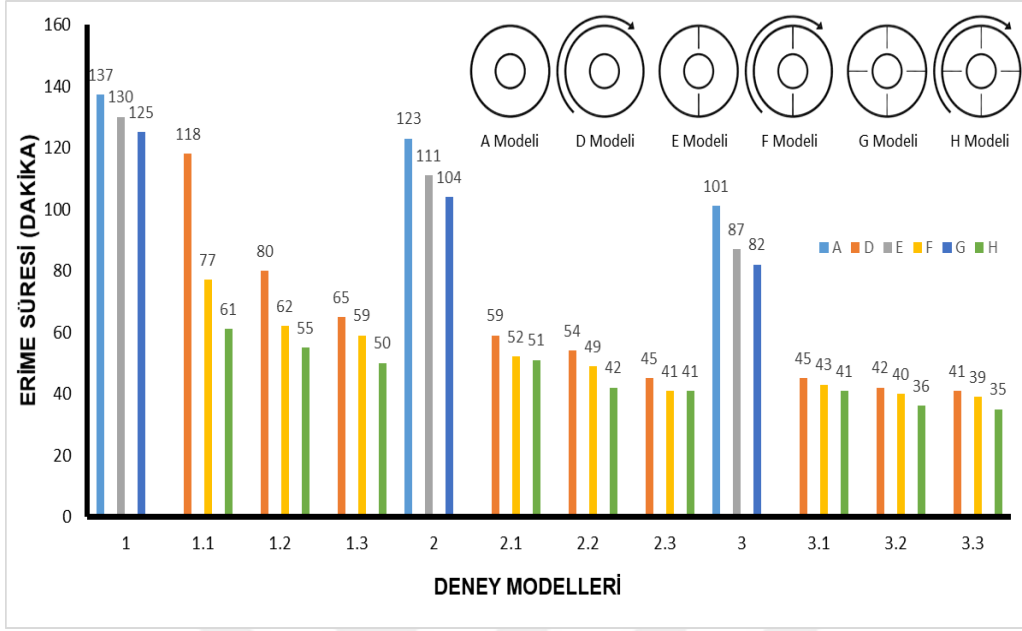
Model	Kayıpsız TER (%)	Kayıplı TER (%)
B1.1	-3	-191
B2.1	17	-103
B3.1	-21,2	-58,2
B1.2	-7	-215
B2.2	12,3	-119,4
B3.2	14,2	-72,6
B1.3	-8	-229
B2.3	9,4	-135,7
B3.3	12,4	-83,6
C1.1	3	-167
C2.1	80,1	3,9
C3.1	113,7	71,7

Çizelge 4.4 Kanatsız deneylerinin termal iyileştirme oranı (Kayıplı-kayıpsız) (Devamı)

C1.2	54	-71
C2.2	104,7	35,2
C3.2	123,8	80,4
C1.3	85	-25
C2.3	107,5	32,4
C3.3	128,2	82,3
D1.1	16	-141
D2.1	102,4	34,4
D3.1	107,4	63,5
D1.2	74	-38
D2.2	122,8	56,9
D3.2	135,8	94,3
D1.3	112	13
D2.3	160	100,7
D3.3	140,3	96,6

Yapılan deneylerde iç ve dış boruların dönmesi motorlu kayış kasnak sistemi tarafından sağlanmaktadır ve bu döndürme işlemi için enerji harcanmaktadır. Kanatsız deneylerin sonucunda elde edilen enerji dönüşümlerinden dönüştürülen gücün sabit modellerin elde ettiği güçten farkı alınarak kayıpsız değerler elde edilmiştir. Kayıplı değerlerin eldesi ise Çizelge 3.1’de ki motor güç parametreleriyle motorun döndürmek için harcadığı gücü de hesaba katarak elde edilen yüzdesel oranlardır. Daha az enerji tüketen bir döndürme sistemi ile TER oranı oldukça artar. En yüksek kazancın model D 2.3’de olduğu bu sebeple en verimli sistemin D 2.3 olduğu belirlenmiştir. Döndürmenin D modellerinde daha etkin olduğu C modellerinin ise sadece 75°C ve 80°C giriş su sıcaklıkları için verimli olduğu görülmektedir. Dönüş hızının artmasının termal iyileştirme oranına arttırıcı bir etkisinin olduğu söylenebilir. Sadece iç borunun

döndüğü B modellerinin ise verimsiz olduğu ve elde edilen kazançtan daha fazlasının harcadığı Çizelge 4.4’de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.26 Kanatlı deneylerinin erime süreleri

Kanatlı deneyler neticesinde Şekil 4.26’da verilen erime süreleri elde edilmiştir. Dikey eksen erime süresi iken yatay eksen kanatlı deney modelleridir. Deney modelleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Şekilde ki grafikler soldan sağa doğru kademeli olarak azalmaktadır. İlgili grafiğe göre en hızlı erime 4 kanatlı 80°C giriş su sıcaklığına sahip ve 25 rpm de dönme hareketi yapan H 3.3 modelinde olmuştur. En yavaş erimenin ise kanatsız 70°C giriş su sıcaklığına sahip dönmez A 1.0 modelinde olduğu belirlenmiştir. H3.3 ve A1.0 modellerinin erime süreleri kıyaslandığında aralarındaki azalma miktarı %74,48 olarak belirlenmiştir. Kanatların eklenmesiyle birlikte erime süreleri de azalmıştır. Kanatların erime süresine olan etkisi, en fazla düşük giriş su sıcaklıklı deneylerde görülmüştür. Yüksek giriş su sıcaklıklı deneylerde dönme hızının artması ile erime süresi, düşük giriş su sıcaklıklı deneylere göre daha az kısalmıştır. Kanat sayısının artması ile erime süresi azalmıştır. Giriş su sıcaklığının yüksek olduğu deneylerde kanat sayı artışı erime süresini daha az azaltmıştır. A 1.0 modeli ile H 1.3 modeli erime süreleri kıyaslandığında %63,55’lik bir azalış gerçekleşmiştir. A 2.0 modeli ile H 2.3 modeli erime süreleri kıyaslandığında %66,66’lık bir azalış meydana gelmiştir. A 3.0 modeli ile H 3.3 modeli erime süreleri kıyaslandığında %65,34’lük bir azalış meydana gelmiştir.

Çizelge 4.5 Kanatlı deneylerinin termal iyileştirme oranları (Kayıpsız-kayıplı)

Model	Kayıpsız TER (%)	Kayıplı TER (%)
D1.1	16	-141
D2.1	102,4	34,4
D3.1	107,4	63,5
D1.2	74	-38
D2.2	122,8	56,9
D3.2	138,5	94,3
D1.3	112	13
D2.3	160	100,7
D3.3	140	96,6
E1.0	4,2	4,2
E2.0	10,6	10,6
E3.0	16,8	16,8
F1.1	76,4	-26,2
F2.1	131,5	71,5
F3.1	128,8	88,7
F1.2	121,9	34,5
F2.2	145,1	85,3
F3.2	150	110,5
F1.3	129,5	39,6
F2.3	190,6	136,6
F3.3	152	110,3

Çizelge 4.5 Kanatlı deneylerinin termal iyileştirme oranları (Kayıpsız-kayıplı) (Devamı)

G1.0	12,8	12,8
G2.0	17,9	17,9
G3.0	25,2	25,2
H1.1	120,5	39,2
H2.1	137,9	79
H3.1	143,4	105,1
H1.2	151,8	74,3
H2.2	186,6	135,3
H3.2	175,4	139,9
H1.3	172,2	96,1
H2.3	195,9	141,9
H3.3	186,0	148,6

Kanatlı deneylerin kayıplı ve kayıpsız TER oranları A modellerine göre hesaplanmıştır. Dört kanatlı sadece dış borunun döndüğü H modellerinin TER oranlarının diğer modellerden daha yüksek olduğu ve bunun sebebinin ise kanat sayısının artışı ve döndürme hızının olduğu Çizelge 4.5 de açıkça görülmektedir. En verimli deney modelinin kayıplı TER için H 3.3 kayıpsız TER için ise H 2.3 olduğu görülmektedir. En verimsiz deney modelinin ise kayıplı TER için D 1.1 kayıpsız TER’ de ise E1.0 olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan içe içe borulu ısı değiştiricisi deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan deney düzeneğine iç ve dış borusuna dönuş özelliği eklenmiştir. Bu deney düzeneği aracılığı ile giriş suyu debisi 3,5 litre/dakika da sabit tutularak 70°C - 80°C aralığında sabit, sadece iç borusunun döndüğü, sadece dış borusunun döndüğü ve iç-dış borusunun birlikte döndüğü durumlar oluşturulmuş ve 12, 19 ve 25 rpm dönuş hızları için deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen veriler ışığında dış borunun dönmesinin diğer durumlardan daha etkin olduğu görölmüş ve bu doğrultuda çalışmanın ikinci aşamasına geçilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında dış boruya iki ve dört adet kanat eklenerek ısı transferine olan etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.1 - 4.2'de yapılan deney modellerini detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Deney sonucunda incelenen diğer parametreler sabit tutulurken farklı deney modelleri için ısı transfer akışkanı olan su giriş sıcaklığının artırılması, dönuş hızının artırılması (iç borunun dönuşü hariç), kanat sayısının artırılması ile ısı transferi performansı artmış ve erime süresi kısalımiştır. Çalışma kapsamında kanatsız deneylerde dört farklı model incelenmiş olup bunlar sırasıyla sabit durum, iç borunun döndüğü durum, dış borunun döndüğü durum ve iç-dış döndüğü durumlar olmuştur.

Kanatsız deneylerde sabit (dönmesiz) durum için akışkan sıcaklığının 70°C'den 80°C'ye çıkmasıyla (A 1.0 ve A 3.0) erime süresinde %26,38'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Bu azalma dış borunun döndüğü D 1.3 ve D 3.3 modelleri arasında ise %36,92 ye kadar yükselmiştir. Boruların dönmesiyle birlikte giriş suyu sıcaklığının etkinliği de artmıştır. Sadece iç boruların döndüğü B modellerinde ise düşük giriş suyu sıcaklığlarında (70°C ve altı için) merkezciil kuvvet etkisiyle erime süresinin sabit duruma göre daha uzun sürdüğü görölmüştür. Sıcaklığın artmasıyla birlikte merkezciil kuvvet etkisi ısı transferi performansını iyileştirmiştir. İç-dış ve sadece dış borunun döndüğü durumlar için böyle bir durum söz konusu değildir. A modellerine göre C ve D modelleri daha kısa sürede erimiştir. En hızlı erime sadece dış borunun döndüğü D modellerinde görölmüştür. Çalışma kapsamında boruların dönuş hızının artmasıyla (B

modelleri hariç) erime süresinin azaldığı belirlenmiştir. Çalışmanın kanatsız deneyleri arasında en hızlı erime D 3.3 modelinde gerçekleşmiştir.

Yapılan deneylerde ısı değiştiricisinin dönmesi için motorlu kayış kasnak sistemi tarafından sağlanmaktadır. Bu döndürme sistemi bir enerji harcamaktadır. Bu harcanan enerjiyi TER hesaplaması ile sistem içerisinde çıkarılması gerekmektedir. Bu farkın hesaba katıldığı sistemlerde en verimli olanının %100,7'lik bir iyileştirme oran ile D 2.3 modeli olduğu en verimsiz olanın ise %-229'luk bir oran ile B 1.3 modeli olduğu Çizelge 4.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.1 Kanatsız çoklu deney veri karşılaştırılması

Model	Erime Süresi Farkı (%)	Kayıpsız TER (%)	Kayıplı TER (%)
B 2.2	12,19	12,3	-119,4
C 2.3	53,65	107,5	32,4
D 1.3	52,62	112	13
D 2.3	63,41	160	100,7

Çizelge 5.1'de verilen değerlerin hesaplamaları giriş suyu sıcaklıkları sabit tutularak kıyaslanmıştır. Örneğin D 1.3 modeli A 1.0 modeline göre hesaplanırken, C 2.3 modeli A 2.0 modeline göre hesaplanmıştır. Hesaplama detayları Ek-4 de verilmiştir.

Kanatlı deneylerde sadece dış boruya iki ve dört adet kanat yerleştirilmiştir. Çalışmanın kanatsız deneylerde dış borunun döndürülmesinin verimli olması sebebiyle dış boruya kanat eklenmiştir. Kanatlı deneylerde irdelenen tüm deneyler Çizelge 4.2'de detaylandırılmıştır. Kanatlı deneylerde de kanatsız deneylerde olduğu gibi giriş su sıcaklığının artışı ile erime süresi azalmıştır. Şekil 4.26'da Çizelge 4.2'de belirtilen tüm deneylerin erime süreleri belirtilmiştir. Kanat sayısının artışı ile özellikle düşük giriş su sıcaklıkları için erime süreleri kısalmıştır. Kanatsız D 1.1 modeli ile 4 kanatlı H 1.1 modeli erime süreleri kıyaslandığında %48,30'luk bir azalış gerçekleşmiştir. 2 kanatlı E 2.0 sabit model ile 2 kanatlı 25 rpm ile döner F 2.3 deneyi ile kıyaslandığında erime süresinde %63,06'lık azalış olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.2 Kanatlı çoklu deney veri karşılaştırılması

Model	Erime Süresi Farkı (%)	Kayıpsız TER (%)	Kayıplı TER (%)
G1.0	8,75	12,8	12,8
E3.0	13,86	16,8	16,8
F2.3	66,66	190,6	136,6
H3.3	65,34	186,0	148,6

Çizelge 4.2 de belirtilen deneylerin termal iyileştirme oranları incelenmiştir. Kayıpsız iyileştirme oranları içerisinde en etkin olanın % 190,6 ile 4 kanatlı sadece dış borunun döndüğü ve 75°C giriş su sıcaklığına sahip H 2.3 modeli olmuştur. Kayıplı iyileştirme oranları içerisinde ise %148,6 ile 4 kanatlı sadece dış borunun döndüğü ve 80°C giriş su sıcaklığına sahip H 3.3 modeli olduğu belirlenmiştir. En verimsiz olanın ise kayıpsız TER oranı için %4,2 ile sabit 2 kanatlı ve 70°C giriş su sıcaklığına sahip E 1.0 modelinin olduğu belirlenmiştir. Kayıplı TER oranı için %-141 ile 12 rpm dönme hızına sahip 70°C giriş su sıcaklığında kanatsız D 1.1 modeli en verimsiz model olmuştur.

Faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı ısı değiştiricileri içerisine kanat eklenmesi ve eritilme (şarj) işlemi literatürde yaygın olarak kullanılan bir işlemdir. Ancak ısı değiştiricisi iç ve dış borularını farklı hızlar ile döndürmesi üzerine herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapılan çalışma kapsamında farklı dönüş modelleri için 12, 19 ve 25 rpm dönüş hızlarına sahip kanatlı ve kanatsız deneyler yapılmıştır. Dönme hızının ve kanat sayısının ısı transfer performansına yaptığı etki detaylı olarak incelenmiş ve diğer araştırmacıların bilgilerine sunulmuştur.

Gelecekte araştırmacılar bu konuda elde edilmiş veriler ışığında HAD analizi çalışmaları yapabilirler. Farklı malzemeler için döndürme hızı, döndürme modelleri, eğim açıları ve giriş suyu sıcaklıkları değiştirilerek başka deneylerde yapabilirler. Dönme işleminin deşarj sürecine olan etkisi irdelenebilir. Faz değiştiren malzemenin içerisine nanopartikül eklenerek ısı transferi performansına olan etkisi irdelenebilir. Termal iyileştirme oranına etki eden döndürme sisteminin tüketmiş olduğu güç miktarını düşürmeye yönelik farklı mekanizmalar tasarlayabilirler.

6. KAYNAKLAR

- [1]Kurnia J. C. , Sasmito A. P. , Numerical investigation of heat transfer performance of a rotating latent heat thermal energy storage., *Applied Energy*, 227, 542–554, 2018
- [2]Jaberi Khosroshahi, A., Hossainpour, S. . Investigation of storage rotation effect on phase change material charging process in latent heat thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 36, 102442 , 2021
- [3]Dukhan, W. A., Dhaidan, N. S., & Al-Hattab, T. A. Experimental Investigation of the Horizontal Double Pipe Heat Exchanger Utilized Phase Change Material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671, 012148, 2020
- [4]Ali M. A. M. , El-Maghlany W. M. , Eldrainy Y. A. , Attia A. , Heat transfer enhancement of double pipe heat exchanger using rotating of variable eccentricity inner pipe. *Alexandria Engineering Journal*. 57, 3709-3725 2018
- [5]Koca Tarkan , Citlak Aydın , Design and analysis of double-pipe heat exchanger using both helical and rotating inner pipe, *Thermal Science* 25, 1545-1559, 2021
- [6]Zalba B , Marín J. M., Cabeza L. F., Mehling H. , Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251–283. 2003
- [7]Saydam, V., Parsazadeh M., Radeef M., Duan X. , Design and experimental analysis of a helical coil phase change heat exchanger for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 21, 9–17. 2019
- [8]Alshara A.K. , Numerical Study for the Thermal Energy Storage Using PCM in Concentric Cylinders. *Int. J. Appl. Comput. Math* 4, 98, 2018

- [9]Nateghi S. K., Moghaddam M. A. E., Jahangir M. H., Ganji D. D., Individual and integrated assessment of topological parameters influencing the melting behavior of a triple concentric tube heat exchanger. *Journal of Energy Storage*, 40, 102708, 2021
- [10]Zağlanmış E., Demircan T., Gemicioğlu B., Thermal Analysis of Phase Changing Material in Heat Exchanger. *Arab J Sci Eng*, 47, 8769-8783, 2022
- [11]Gasia J., Tay N. H. S., Belusko M., Cabeza L. F., Bruno F., Experimental investigation of the effect of dynamic melting in a cylindrical shell-and-tube heat exchanger using water as PCM. *Applied Energy*, 185, 136–145. 2017
- [12]Rathod M. K., Banerjee J., Experimental Investigations on Latent Heat Storage Unit using Paraffin Wax as Phase Change Material. *Experimental Heat Transfer*, 27(1), 40–55., 2013
- [13]Rathod M. K., & Banerjee J., Development of Correlation for Melting Time of Phase Change Material in Latent Heat Storage Unit. *Energy Procedia*, 75, 2125–2130, 2015
- [14]Feliński P., Sekret R., Experimental study of evacuated tube collector/storage system containing paraffin as a PCM, *Energy*, 114, 1063–1072, 2016
- [15]Dubovsky V., Ziskind G., Letan R., Analytical model of a PCM-air heat exchanger., *Applied Thermal Engineering*, 31(16), 3453–3462, 2011
- [16]Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345, 2009,
- [17]Abhat A. , Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials, *Solar Energy*, 30(4), 313–332., 1983
- [18]Liu C., Groulx D., Experimental study of the phase change heat transfer inside a horizontal cylindrical latent heat energy storage system. *International Journal of*

Thermal Sciences, 82, 100–110, 2014

[19] Rathod M. K., Banerjee J. , Thermal performance enhancement of shell and tube Latent Heat Storage Unit using longitudinal fins, *Applied Thermal Engineering*, 75, 1084–1092, 2015

[20] Çakmak G., Yücel H. L., Argunhan Z., Yıldız C., Experimental Investigation of Thermal Performance in a Concentric-Tube Heat Exchanger with Wavy Inner Pipe, *International Journal of Thermophysics*, 33(6), 1055–1067. 2012

[21] Ettouney H., El-Dessouky H., Al-Kandari E. . Heat Transfer Characteristics during Melting and Solidification of Phase Change Energy Storage Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(17), 5350–5357, 2004

[22] Dukhan, W. A., Dhaidan N. S., Al-Hattab T. A., & Al-Mousawi, F. N., Phase-change of paraffin inside heat exchangers: an experimental study, *International Journal of Environmental Science and Technology*. 24 Nisan 2021

[23] Hosseini, S. M. J. , Ranjbar A. A. , Sedighi, K, Rahimi M., Melting of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Material inside Shell and Tube Heat Exchanger, *Journal of Engineering*, 1–8. 2013,

[24] A. Alaraji, H. Alhussein, Zohreh Asadi, D.D. Ganji, Investigation of heat energy storage of RT26 organic materials in circular and elliptical heat exchangers in melting and solidification process, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 28, 101432 Aralık 2021,

[25] Chibani, A., Merouani, S. Acceleration of Heat Transfer and Melting Rate of a Phase Change Material by Nanoparticles Addition at Low Concentrations. *Int J Thermophys* 42, 66 (2021).

[26] Y. Pahamli, M.J. Hosseini, A.A. Ranjbar, R. Bahrapoury, Inner pipe downward movement effect on melting of PCM in a double pipe heat exchanger, *Applied Mathematics and Computation*, Volume 316, Pages 30-42, January 2018,

- [27]Mat, S., Al-Abidi, A. A., Sopian, K., Sulaiman, M. Y., Mohammad, A. T., Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal–external fins., *Energy Conversion and Management*, 74, 223–236., 2013
- [28]M. Kazemi, M.J. Hosseini, A.A. Ranjbar, R. Bahrampoury, Improvement of longitudinal fins configuration in latent heat storage systems, *Renewable Energy*, Volume 116, Part A, 447-457, 2018
- [29]Susantez, Ç. , Kahveci, K. & Akyol, E. ,Faz Değiştiren Malzeme İçeren Silindirik Bir Isıl Enerji Deposunda Kanatçık Sayısı, Kalınlığı ve Üniform Olmayan Kanatçık Dağılımının Isıl Enerji Depolama Karakteristiği Üzerindeki Etkileri. ,*Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30 (2) , 225-237, 2018
- [30]Joybari, M. M., Haghghat, F., Seddegh, S., & Al-Abidi, A. A., Heat transfer enhancement of phase change materials by fins under simultaneous charging and discharging., *Energy Conversion and Management*, 152, 136–156.,2017
- [31]Zhuo Li,Zhi-Gen Wu, Analysis of HTFs, PCMs and fins effects on the thermal performance of shell–tube thermal energy storage units, *Solar Energy*, Volume 122, Pages 382-395 December 2015,
- [32]Mahdi M. S., Mahood H. B., Hasan A. F., Khadom A. A., Campbell A. N. ,Numerical Study on the Effect of the Location of the Phase Change Material in a Concentric Double Pipe Latent Heat Thermal Energy Storage Unit., *Thermal Science and Engineering Progress.*, Vol.11, pp.40-49, Haziran 2019
- [33]N.Kousha,M.Rahimi,R.Pakrouh,R.Bahrampoury,Experimental investigation of phase change in a multitube heat exchanger,*Journal of Energy Storage*, Volume 23, Pages 292-304, June 2019,
- [34]Idris Al Siyabi,Sourav Khanna,Tapas Mallick,Senthilarasu Sundaram,An experimental and numerical study on the effect of inclination angle of phase change materials thermal energy storage system,*Journal of Energy Storage*, Volume 23, Pages 57-68, June 2019

[35]Martin Longeon, Adèle Soupart, Jean-François Fourmigué, Arnaud Bruch, Phillippe Marty, Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, Applied Energy Volume 112, Pages 175-184, December 2013,

[36] Fırat, M., Okçu, M. ,Varol, Y. Bir Enerji Depolama Tankının Farklı Konumlarının Erime Ve Katılaşma Sürecine Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi . Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28 (2) , 275-281, 2016

[37]Saeed Tiari, Songgang Qiu, Mahboobe Mahdavi, Numerical study of finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material, Energy Conversion and Management, 833-842, 2015

[38]S.M.Borhani, M.J.Hosseini, A.A.Ranjbar, R.Bahrampoury, Investigation of phase change in a spiral-fin heat exchanger, Applied Mathematical Modelling 297-314, 2019

[39]Kozak, M. & Kozak, Ş, ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ, Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 4 (2) , 17-29., 2012

[40]Mazman M. Gizli ısı depolaması ve uygulamaları, Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana. 2006

[41]Yılmaz S., Soğutma Uygulamaları İçin Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolaması üzerine bir araştırma, Yüksek Lisans Tezi Çukurova Ü. Fen. Bil. Ens. Adana ,2008.

[42]Khadiran, T., Hussein, M.Z., Zainal, Z. and Rusli, R., Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 916-928, 2016

[43]Abhat A., Low temperature latent heat thermal energy storage materials, Solar Energy 30, 313-332,1983.

[44]RaşitAYTAŞ,https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/43740/mod_resource/c

ontent/0/Hafta11-Termal%20enerji%20depolama.pdf (Erişim Tarihi 19.08.2022)

[45]Sarı A. (2000). Bazı yağ asitleri ve ötektik karışımlarının enerji depolayıcı madde olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi, Doktora Tezi, Gaziosman Paşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

[46]Navarro, L., Gracia, A., Colcough, S., Browne, M., McCormack, S.J., Griffiths, P. and Cabeza, L.F. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. Active storage systems, *Renewable Energy*, 88, 526-547, 2016

[47]Acar S. ř., Faz değiştirici maddeler ve uygulamaları, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü 2014

[48]Koşan M. , Güneş enerji sistemlerinde faz değiştiren malzeme ile ısıl enerji depolamada kullanılan bir ısı değiştiricisi tasarımı ve sayısal analizi, Gazi Üniversitesi, 2017

[49]Fleischer, A.S. Thermal energy storage using phase change materials fundamentals and applications, London: Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht. (2015), 1-44.

[50]Mert M.S., Sert M., Mert H.H, Isıl enerji depolama sistemleri için organik faz değiştiren maddelerin mevcut durumu üzerine bir inceleme, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(1), 161-174, 2018.

[51]İten, M. and Liu, S., A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air- TES systems, *Energy Conversion and Management*, 77, 608-627., 2014

[52]Rathod, M.K. and Banerjee, J., Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246–258., 2013

[53]Shah, R.K., Sekulic, D.P., Fundamentals of Heat Exchanger Design, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.

[54]Incropera, P.F., Dewitt, P. D., Bergman, L. T., Lavine, S. A. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2007.

[55]Yeşil Ç., Kanatlı borulardaki dış akış ve konjuge ısı transferi mekanizmasının sayısal olarak incelenmesi., Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007

[56]Çengel, Y. A., Cimbala J. M., Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, New York, 2006.

[57]Anonim, [https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata - RT55_EN_09102020.PDF](https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT55_EN_09102020.PDF) (Erişim Tarihi 26.08.2022)

[58] Eyyublu, S. & Bükler, M. S. (2021). Alüminyum Balpeteği Soğurucu Yüzeye Sahip bir Güneş Hava Kollektörünün HAD Analizi . Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi , Ejosat Özel Sayı 2021 (RDCONF) , 484-490 .

[59]Anonim, <http://www.rotofluid.com/eng/technical-information/rotary-jointsunions/> (Erişim tarihi 26.08.2022)



7. EKLER

7.1. EK-1 Suyun termofiziksel özellik tablosu [56]

Sıcaklık T [°C]	Yoğunluk ρ [kg/m ³]	Özgül ısı c_p [J/kg°C]	Isı iletim katsayısı k [W/m°C]	Dinamik viskozite μ [kg/ms]	Kinematik viskozite $\nu = \mu/\rho$ [m ² /s]	Prandtl sayısı Pr
0	999.8	4217	0.561	1.792×10^{-3}	1.792×10^{-6}	13.5
5	999.9	4205	0.571	1.519×10^{-3}	1.519×10^{-6}	11.2
10	999.7	4194	0.580	1.307×10^{-3}	1.307×10^{-6}	9.45
15	999.1	4186	0.589	1.138×10^{-3}	1.139×10^{-6}	8.09
20	998.0	4182	0.598	1.002×10^{-3}	1.004×10^{-6}	7.01
25	997.0	4180	0.607	0.891×10^{-3}	0.894×10^{-6}	6.14
30	996.0	4178	0.615	0.798×10^{-3}	0.801×10^{-6}	5.42
35	994.0	4178	0.623	0.720×10^{-3}	0.724×10^{-6}	4.83
40	992.1	4179	0.631	0.653×10^{-3}	0.658×10^{-6}	4.32
45	990.1	4180	0.637	0.596×10^{-3}	0.602×10^{-6}	3.91
50	988.1	4181	0.644	0.547×10^{-3}	0.554×10^{-6}	3.55
55	985.2	4183	0.649	0.504×10^{-3}	0.512×10^{-6}	3.25
60	983.3	4185	0.654	0.467×10^{-3}	0.475×10^{-6}	2.99
65	980.4	4187	0.659	0.433×10^{-3}	0.442×10^{-6}	2.75
70	977.5	4190	0.663	0.404×10^{-3}	0.413×10^{-6}	2.55
75	974.7	4193	0.667	0.378×10^{-3}	0.388×10^{-6}	2.38
80	971.8	4197	0.670	0.355×10^{-3}	0.365×10^{-6}	2.22
85	968.1	4201	0.673	0.333×10^{-3}	0.344×10^{-6}	2.08
90	965.3	4206	0.675	0.315×10^{-3}	0.326×10^{-6}	1.96
95	961.5	4212	0.677	0.297×10^{-3}	0.309×10^{-6}	1.85
100	957.9	4217	0.679	0.282×10^{-3}	0.294×10^{-6}	1.75

7.2. EK -2 Kullanılan Faz Değişiren Malzemenin Özellikleri

Data sheet



RT55



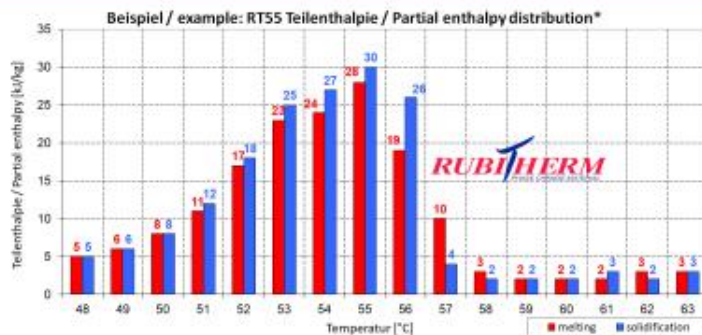
RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

Properties for RT-line:

- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -9 °C and 100 °C available

The most important data:

	Typical Values
Melting area	51-57 [°C] main peak: 55
Congeeing area	56-57 [°C] main peak: 55
Heat storage capacity ± 7,5%	170 [kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 48°C to 63°C.	48 [Wh/kg]*
Specific heat capacity	2 [kJ/kg·K]
Density solid at 15°C	0,88 [kg/l]
Density liquid at 80°C	0,77 [kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2 [W/(m·K)]
Volume expansion	14 [%]
Flash point	>200 [°C]
Max. operation temperature	90 [°C]



Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 09.10.2020

*Measured with 3-layer-calorimeter.

7.3. EK-3

7.3.1. EK-3A Kütlesel debi belirsizlik analizi hesabı

$$\rho_{su70^{\circ}\text{C}} = 977,5 \text{ kg/m}^3 \pm 2 \quad Q = 3,5 \text{ L/dk} \pm 0,04 = 0,0000583333 \text{ m}^3/\text{s} \pm 6,66 \times 10^{-7}$$

$$\dot{m} = 977,5 \times 0,0000583333 = 0,057020 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$w_{\dot{m}} = \left[\left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial \rho_{su}} w_{\rho_{su}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{m}}{\partial Q} w_Q \right)^2 \right]^{1/2} = [(977,5 \times 6,66 \times 10^{-7})^2 +$$

$$(0,0000583333 \times 2)^2]^{1/2} = \pm 0,0006556 \quad \%w_{\dot{m}} = \frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} \times 100 = \pm \frac{0,0006556}{0,057020} * 100 = \pm 1,1498$$

Yüzdece Hata=%1,1498

7.3.2. EK-3B Suyun (Akışkanın) hızının belirsizlik analizi hesabı

$$Q = 3,5 \text{ L/dk} \pm 0,04 = 0,0000583333 \text{ m}^3/\text{s} \pm 6,66 \times 10^{-7}$$

$$\dot{Q} = AV \Rightarrow V = \frac{4\dot{Q}}{\pi D^2} = \frac{0,0000583333}{\frac{\pi 0,017^2}{4}} = 0,2570 \text{ m/s}$$

$$w_V = \left[\left(\frac{\partial V}{\partial \dot{Q}} w_{\dot{Q}} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} w_D \right)^2 \right]^{1/2}$$
$$= \left[\left(\frac{4}{\pi 0,017^2} \times 6,66 \times 10^{-7} \right)^2 + \left(\frac{2 \times 4 \times 0,0000583333}{\pi 0,017^3} \times 0,0001 \right)^2 \right]^{1/2}$$
$$= 4,2131 \times 10^{-3}$$

$$w_V = \frac{4,2131 \times 10^{-3}}{0,2570} \times 100 = \%1,639$$

7.3.3. EK-3C Suyun (Akışkanın) Reynolds sayısının belirsizlik analizi hesabı

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} \Rightarrow V = 0,2570 \pm 4,2131 \times 10^{-3} \quad \rho_{su70^{\circ}\text{C}} = 977,5 \text{ kg/m}^3 \pm 2$$

$$D = 17 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm} = 0,017 \text{ m} \pm 0,0001 \quad \mu = 0,404 \times 10^{-3} \text{ (kg/ms)} \pm 0,025$$

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{977,5 \times 0,2570 \times 0,017}{0,404 \times 10^{-3}} = 10571$$

$$\begin{aligned}
w_{Resu} &= \left[\left(\left(\frac{0,2570 \times 0,017}{0,404 \times 10^{-3}} \right) \times 2 \right)^2 + \left(\left(\frac{977,5 \times 0,017}{0,404 \times 10^{-3}} \right) \times 4,2131 \times 10^{-3} \right)^2 \right. \\
&\quad + \left(\left(\frac{977,5 \times 0,2570}{0,404 \times 10^{-3}} \right) \times 0,0001 \right)^2 \\
&\quad \left. + \left(\frac{977,5 \times 0,2570 \times 0,017}{(0,404 \times 10^{-3})^2} \times 0,025 \right)^2 \right]^{1/2} \\
&= 467,8012205 + 30031,16496 + 69841,71 = 316,7659 \\
w_{Resu} &= \frac{316,7659}{10571} \times 100 = \%2,996
\end{aligned}$$

7.3.4. EK-3D Isı akısı belirsizlik analizi

$$q_W = \frac{k(T_W - T_c)}{\Delta X} \Rightarrow k=0,2 \pm 0,1 \quad T_w=343,15 \text{ K} \pm 2 \quad T_c=324,15 \text{ K} \pm 0,1 \quad \Delta x=0,00375 \text{ m} \pm 0,0005$$

$$q_W = \frac{k(T_W - T_c)}{\Delta X} = \frac{0,2 (343,15 - 324,15)}{0,00375} = 1002,66$$

$$\begin{aligned}
w_{q_W} &= \left[\left(\left(\frac{343,15 - 324,15}{0,00375} \right) \times 0,1 \right)^2 + \left(\left(\frac{0,2}{0,00375} \right) \times 2 \right)^2 + \left(\left(\frac{-0,2}{0,00375} \right) \times 0,1 \right)^2 + \right. \\
&\quad \left. \left(\frac{0,2(343,15 - 324,15)}{(0,00375)^2} \times 0,0005 \right)^2 \right]^{1/2} = 535,13 \quad w_{q_W} = \frac{535,13}{1002,66} \times 100 = \%53,37
\end{aligned}$$

7.3.5. EK-3E Isı taşınım katsayısı belirsizlik analizi

$$h = \frac{q_W}{(T_W - T_l)} \Rightarrow q_W = 1002,66 \pm 53 \quad T_w=343,15 \text{ K} \pm 2 \quad T_l=331,15 \pm 0,1$$

$$h = \frac{q_W}{(T_W - T_l)} = \frac{1002,66}{(343,15 - 331,15)} = 83,555$$

$$\begin{aligned}
w_h &= \left[\left(\left(\frac{1}{(343,15 - 331,15)} \right) \times 53 \right)^2 + \left(\left(-\frac{1002,66}{(343,15 - 331,15)^2} \right) \times 2 \right)^2 + \right. \\
&\quad \left. \left(\left(\frac{1002,66}{(343,15 - 331,15)^2} \right) \times 0,1 \right)^2 \right]^{1/2} = 14,6260 \quad w_h = \frac{14,6260}{83,555} \times 100 = \%17,50
\end{aligned}$$

7.3.6. EK-3F Nusselt sayısı belirsizlik analizi

$$Nu = \frac{h(D-d)}{k} \Rightarrow h = 83,555 \pm 17,5 ; d=17 \text{ mm} \pm 0,1\text{mm} = 0,017\text{m} \pm 0,0001 ; D=25 \text{ mm} \pm 0,1\text{mm} = 0,025\text{m} \pm 0,0001 ; k=0,2 \pm 0,1$$

$$Nu = \frac{h(D-d)}{k} = \frac{83,555(0,025-0,017)}{0,2} = 3,3422$$

$$w_{Nu} = \left[\left(\left(\frac{0,025-0,017}{0,2} \right) \times 17,5 \right)^2 + \left(\left(\frac{83,555}{0,2} \right) \times 0,0001 \right)^2 + \left(\left(-\frac{83,555}{0,2} \right) \times 0,0001 \right)^2 + \left(-\frac{0,025-0,017}{(0,2)^2} \right) \times 0,1 \right]^{1/2} = 0,243928$$

$$w_{Nu} = \frac{0,702774}{3,3422} \times 100 = \%7,298$$

7.3.7. EK-3G Duyulur ısı belirsizlik analizi

$$h_{pcm} = h_{pcm,ref} + \int_{T_{ref}}^T c_{p,pcm} \quad h_{pcm,ref}: referans pcm değeri 0 alınmıştır.$$

$$h_{pcm} = mc_{p,pcm} (T - T_{ref}) \Rightarrow m = 0,85 \text{ kg} \pm 0,02 ; c_{p,pcm} = 2000 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \pm 5 ;$$

$$T=339,60 \pm 0,1; T_{ref}=296,75 \pm 0,1$$

$$h_{pcm} = mc_{p,pcm} (T - T_{ref}) = 0,85 \times 2000 \times (339,6 - 296,75) = 72845$$

$$w_{h_{pcm}} = [(((2000(339,6 - 296,75)) \times 0,02))^2 + (((0,85 * (339,6 - 296,75)) \times 5))^2 + (0,85 * 2000 * 0,1)^2 + (-0,85 * 2000 * 0,1)^2]^{1/2} = 1740,3335$$

$$w_{h_{pcm}} = \frac{1740,3335}{72845} \times 100 = \%2,3890$$

7.3.8. EK-3H Gizli ısı belirsizlik analizi

$$\Delta H_{pcm} = m\beta L \Rightarrow m = 0,85 \text{ kg} \pm 0,02 \quad \beta = 1 \pm 0,01 ; L=170000 \text{ J/kg} \pm 1$$

$$\Delta H_{pcm} = m\beta L = 0,85 * 1 * 170000 = 144500$$

$$w_{\Delta H_{pcm}} = [(1 * 170000 * 0,02)^2 + (0,85 * 170000 * 0,01)^2 + (0,85 * 1 * 1)^2]^{1/2} = 3694,3234$$

$$w_{\Delta H_{pcm}} = \frac{3694,3234}{144500} * 100 = \%2,55$$

7.3.9. EK-3I Toplam entalpi değişimi belirsizlik analizi

$$H_{pcm} = h_{pcm} + \Delta H_{pcm}, \Rightarrow h_{pcm} = 72845 \text{ J} \pm 2,38; \Delta H_{pcm} = 144500 \text{ J}; \pm 2,55$$

$$H_{pcm} = 72845 + 144500 = 217345$$

$$w_{H_{pcm}} = [(1 * 2,38)^2 + (1 * 2,55)^2]^{1/2} = 3,488108$$

$$w_{H_{pcm}} = \frac{3,488108}{217345} * 100 = \%0,0016048$$

7.3.10. EK-3J Isı transfer hızı belirsizlik analizi

J modeli için ısı transfer hızı hesaplaması yapılmıştır.

$$\dot{Q}_{transfer} = \frac{H_{pcm}}{t_{transfer}}, \Rightarrow H_{pcm} = 217345 \text{ J} \pm 0,016048; t_{transfer} = 3900 \text{ s} \pm 150$$

$$\dot{Q}_{transfer} = \frac{H_{pcm}}{t_{transfer}} = \frac{217345}{3900} = 55,729487$$

$$w_{\dot{Q}_{transfer}} = \left[\left(\frac{1}{3900} * 0,016048 \right)^2 + \left(\frac{217348}{3900^2} * 150 \right)^2 \right]^{1/2} = 2,1434714004$$

$$w_{\dot{Q}_{transfer}} = \frac{2,1434714004}{55,729487} * 100 = \%3,8446$$

7.3.11. EK-3K Termal iyileştirme oranı belirsizlik analizi

J modeli için termal iyileştirme oranı hesaplaması yapılmıştır.

$$TER = \frac{\dot{Q}_{transfer} - (\dot{Q}_{transfer,base} + P_{load})}{\dot{Q}_{transfer,base}}, \Rightarrow P_{load}; \text{ ihmal edilmiştir.}$$

$$\dot{Q}_{transfer} = 55,729487 \pm 3,8446; \dot{Q}_{transfer,base} = 22,26261 \pm 3,8446$$

$$\begin{aligned} TER &= \frac{\dot{Q}_{transfer} - (\dot{Q}_{transfer,base})}{\dot{Q}_{transfer,base}} = \frac{55,729487 - 22,26261}{22,26261} * 100 \\ &= 150,327733361 \end{aligned}$$

$$w_{TER} = \left[\left(\frac{1}{22,26261} * 3,8446 \right)^2 + \left(-\frac{55,729487}{22,26261^2} * 3,8446 \right)^2 \right]^{1/2} = 0,40247$$

$$w_{TER} = \frac{0,40247}{150,3277} * 100 = \%0,267728$$

7.4. EK-4 Yapılan Hesaplamalar

Reynolds sayısı hesaplaması

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} \Rightarrow V = 0,2570 \pm 4,2131 \times 10^{-3} \quad \rho_{su70^\circ C} = 977,5 \text{ kg/m}^3 \pm 2$$

$$D = 17 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm} = 0,017 \text{ m} \pm 0,0001 \quad \mu = 0,404 \times 10^{-3} \text{ (kg/ms)} \pm 0,025$$

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{977,5 \times 0,2570 \times 0,017}{0,404 \times 10^{-3}} = 10571$$

Boru içi akış için $2300 < Re$ olduğundan akış türbülanslıdır.

D 1.3 modeli için farklı konumlarda bulunan 18 adet alıcıdan alınan veriler ile Nusselt sayının hesaplanması için ısı akısı ısı taşınım katsayısı ve Nusselt sayısı her alıcı için hesaplanır ve toplanır. Bu işlem 0.6 saniyelik aralıklar ile tüm alıcılar için uygulanır ve toplanır. Toplam sonucunda her adımda ortalama Nusselt sayısı elde edilir. Yapılan bu işlem ile deney süresince Nusselt sayısı elde edilir.

1 numaralı alıcının 300. saniyesindeki sonucu üzerinden Nusselt sayısı hesaplanmıştır.

$$T_{300} = 303,55 \text{ K} ; T_{su} = 343,15 \text{ K} ; k = 0,2 \text{ W/mK} ; \Delta X = 0,00375 \text{ m} \quad T_l = 331,15 ; D = 0,025 ; d = 0,017 \text{ m}$$

$$q_w = \frac{k(T_w - T_c)}{\Delta X} = \frac{0,2(343,15 - 303,15)}{0,00375} = 2133,33$$

$$h = \frac{q_w}{(T_w - T_l)} = \frac{2133,33}{343,15 - 331,15} = 177,777$$

$$Nu = \frac{h(D-d)}{k} = \frac{177,777(0,025 - 0,017)}{0,2} = 7,11$$

Entalpi değişimi hesaplaması için 18 adet alıcının ortalamaları 0,6 saniye aralıklarla alınır. Her bir adım için β hesaplanır. Duyulur ve gizli entalpi değişimleri hesaplanıp toplanır.

D1.3 Modeli için 300. saniyede ki enerji değişimi hesaplaması

$T_{ort,300}=300,567$; $T_{ort,299}=300,549$ $T_s=329,15$; $T_l=331,15$; $m_{pcm}=0,85$ kg ; $C_p=2000$; $L=170000$ $T = 3900$; $\dot{Q}_{transfer,base} = 26,26261$

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{eğer } T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{eğer } T_s < T < T_l \\ 1 & \text{eğer } T > T_l \end{cases} \Rightarrow \beta = 0$$

$$h_{pcm} = h_{pcm,ref} + \int_{T_{ref}}^T c_{p,pcm} \Rightarrow h_{pcm} = mC_{p,pcm}\Delta T = 0,85 * 2000 * (300,567 - 300,549) = 30,6$$

$$\Delta H_{pcm} = \beta L, \Rightarrow \Delta H_{pcm} = 0,85 * 0 * 170000 = 0$$

$$H_{pcm} = h_{pcm} + \Delta H_{pcm}, \Rightarrow H_{pcm} = 30,6 + 0 = 30,6$$

Duyulur enerji değişimleri ve gizli enerji değişimleri toplanarak depolanan enerji miktarı bulunabilir. Bu işlem tüm sıcaklık değişimleri için uygulanır ve toplanır.

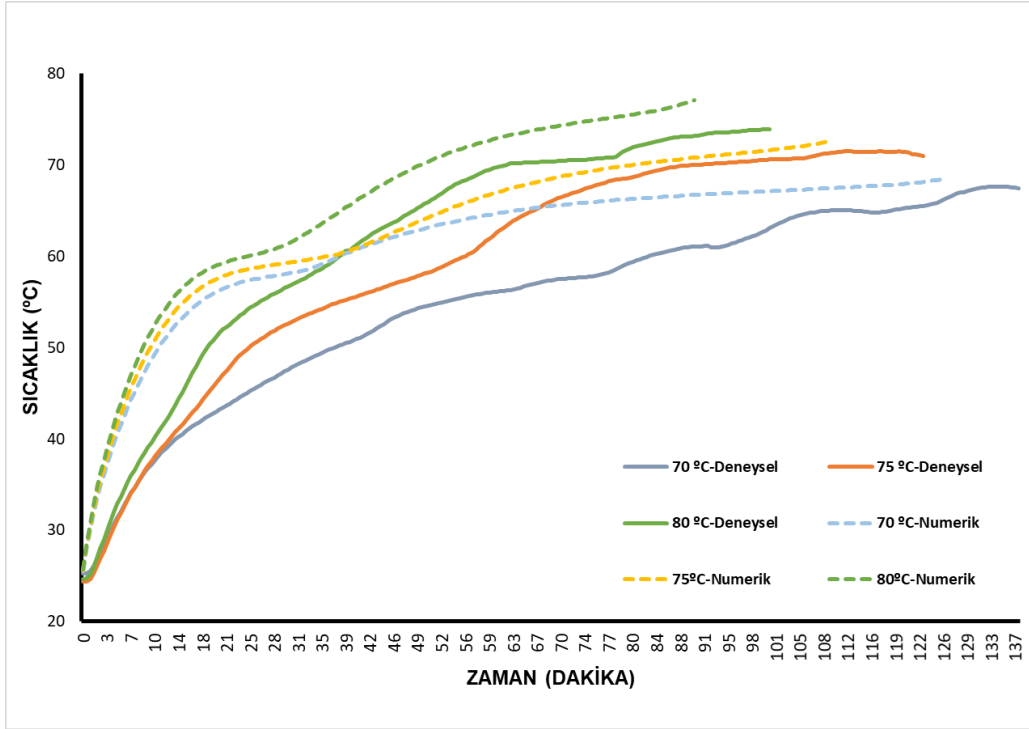
D1.3 Modeli için $H_{pcm} = 217279$ J ; $T = 3900$; $\dot{Q}_{transfer,base} = 26,26261$

$$\dot{Q}_{transfer} = \frac{H_{pcm}}{t_{transfer}} \Rightarrow \dot{Q}_{transfer} = \frac{217279}{3900} = 55,712$$

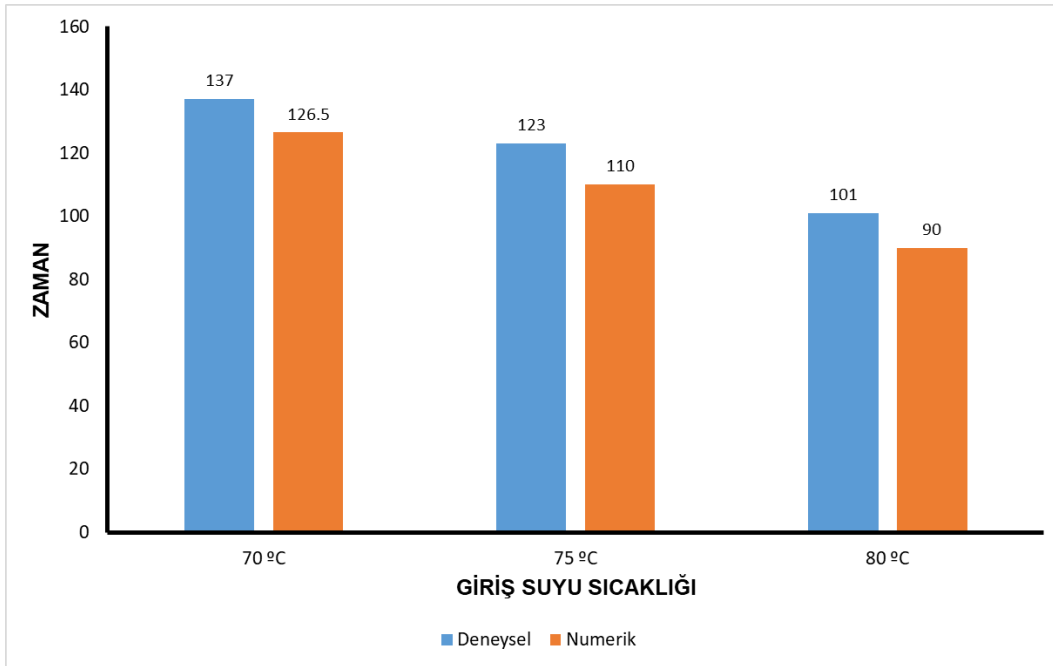
$$P_{load} = \frac{VI_{transfer}}{3600} = \frac{12*2*3900}{3600} = 26$$
 W

$$TER = \frac{\dot{Q}_{transfer} - (\dot{Q}_{transfer,base} + P_{load})}{\dot{Q}_{transfer,base}} \Rightarrow TER = \frac{55.712 - (26.26261 + 26)}{26.26261} * 100 = \%13$$

7.5. EK-5 HAD Analizi



Giriş suyu sıcaklıkları 70, 75 ve 80°C 3 farklı durum için deneysel ve numerik çalışmaların ortalama sıcaklık eğrileri verilmiştir. Kesikli çizgiler had analizi sürekli çizgiler ise deneysel çalışmalardır.



Giriş suyu sıcaklıkları 70, 75 ve 80°C 3 farklı durum için deneysel ve numerik çalışmaların toplam erime süreleri verilmiştir.

Elde edilen verilerin bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda su giriş sıcaklığını 70°C'den 75°C'ye artırılması ile erime süresinin %10,2, su giriş sıcaklığının 75 °C'den 80°C'ye artırılması ile ise %17,8 kısaldığı belirlenmiştir. Nümerik çalışmalar da ise su giriş sıcaklığını 70°C'den 75°C'ye artırılması ile erime süresinin %13 su giriş sıcaklığının 75°C'den 80°C'ye artırılması ile ise %18,2 kısaldığı belirlenmiştir.

