



**NANO- FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN
TERMAL YAPI ANALİZİ VE ÖRNEK UYGULAMA**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Gizem İNAL

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Alper ERGÜN**

**NANO- FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN TERMAL YAPI ANALİZİ
VE ÖRNEK UYGULAMA**

Gizem İNAL

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Alper ERGÜN**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ekim 2023**

Gizem İNAL tarafından hazırlanan “NANO- FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN TERMAL YAPI ANALİZİ VE ÖRNEK UYGULAMA” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Alper ERGÜN

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 04/10/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Alper ERGÜN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur KARAAĞAÇ (SÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Gizem İNAL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NANO- FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN TERMAL YAPI ANALİZİ VE ÖRNEK UYGULAMA

Gizem İNAL

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Alper ERGÜN

Ekim 2023, 40 sayfa

Ekonomik kalkınmanın hızlı olduğu ülkelerde enerji talebi ve fosil yakıt tüketimi hızla artmaya devam etmektedir. Son yıllarda artan enerji ihtiyacı sebebiyle küresel enerji krizi 1970’lerde olduğu gibi günümüzde tedbir alınması gereken seviyeye ulaşmıştır. Bu nedenle enerjinin kullanıma hazır olarak depo edilmesi önemli bir hal almıştır. Bu bağlamda ısı (termal) enerji depolama, enerjinin korunumu için önemli bir teknolojidir. Enerji tasarrufunun sağlanabilmesi için, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanarak faz değiştiren maddelerde (FDM) termal enerji depolayan araştırmalar yapılmaktadır. Bu depolama şeklinin ısıtma ve soğutma uygulamaları için uygun olması en önemli avantajlarından biridir. Isıl enerjiyi depolamada en verimli yöntemlerden biri Faz Değiştiren Maddelerin (FDM) kullanımınıdır. Isıl enerji depolamada en çok incelenen FDM’lerin başında ise parafin gelmektedir.

Enerji depolamada yaygın olarak kullanılan maddelerden parafinin düşük ısı iletkenliğe sahip olması önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu problemi çözme yöntemlerinden biri parafinde nanopartiküllerin kullanılmasıdır. Nanopartiküller yüksek ısı iletkenliğine sahiptirler.

Bu tez çalışmasında nano-faz değiştiren malzemelerin termal yapı analizi için örnek bir uygulama yapılmıştır. FDM olarak kullanılan parafine kütlece %5 oranında termal iletkenliği yüksek olan Al_2O_3 nanopartikülü eklenmiştir. Çalışmanın sonunda karışımın erime noktasında %2 artış ve termal enerji depolama kapasitesinde %5,8 oranında düşüş meydana gelmiştir. Ancak katkılama sonucunda parafinin ısı iletim katsayısı %18 oranında artırılmıştır.

Anahtar Sözcükler : FDM, TED, Nanopartikül, Isı Depolama

Bilim Kodu : 92807

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THERMAL STRUCTURE ANALYSIS AND EXAMPLE APPLICATION OF NANO-PHASE-CHANGING MATERIALS

Gizem İNAL

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Energy System Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Alper ERGUN

October 2023, 40 pages

In countries with rapid economic development, energy demand and fossil fuel consumption continue to increase rapidly. Due to the increasing energy need in recent years, the global energy crisis has reached a level where precautions must be taken, as it was in the 1970s. For this reason, storing energy ready for use has become important. In this context, thermal energy storage is an important technology for energy conservation. In order to achieve energy savings, research has been carried out in recent years to store thermal energy in phase change materials (PCM) by utilizing renewable energy sources. One of the most important advantages of this storage method is that it is suitable for heating and cooling applications. One of the most efficient methods of storing thermal energy is the use of Phase Change Materials (PCM). Paraffin is one of the most studied PCMs in thermal energy storage.

The low thermal conductivity of paraffin, one of the materials widely used in energy storage, emerges as an important problem. One of the methods to solve this problem is the use of nanoparticles in paraffin. Nanoparticles have high thermal conductivity.

In this thesis study, an example application was made for the thermal structure analysis of nano-phase changing materials. Al_2O_3 nanoparticles with high thermal conductivity were added to the paraffin used as PCM at the rate of 5% by mass. At the end of the study, there was a 2% increase in the melting point of the mixture and a 5.8% decrease in the thermal energy storage capacity. However, as a result of doping, the heat conduction coefficient of paraffin was increased by 18%.

Key Word : PCM, TES, Nanoparticle, Heat Storage

Science Code : 92807

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasında yardımlarını esirgemeyen ve alıőmanın bu hale gelmesinde büyük emeği olan sayın hocam Do. Dr. Alper ERGÜN'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Yorumlama deneylerinin yapılmasında benimle tecrübelerini paylaşan, Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakóltesi Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur KARAAĞAÇ'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalıőmamın gerçekleşmesi için destek sağlayan Karabük Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri (BAP) birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

eyrek asırlık ömrümde her düőtüğümde kaldıran annem ve babama, sırtımı koőulsuz yaslayabildiğim kardeőlerime, bana koőulsuz güvenen sevgili eőime ve bana güç veren eőimin anne ve babasına sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Teőekkürlerin en büyüğü ise canım kızım Gökçe içindir.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
BÖLÜM 3	11
ENERJİ DEPOLAMA	11
3.1. ENERJİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ.....	11
3.2. ENERJİ DEPOLAMANIN ÇEŞİTLERİ.....	12
3.2.1. Mekanik Enerji Depolama	12
3.2.2. Kimyasal Enerji Depolama	13
3.2.3. Elektrik ve Magnetik Enerji Depolama.....	13
3.2.4. Termal (Isıl) Enerji Depolama	13
3.2.4.1. Termokimyasal Enerji Depolama	15
3.2.4.2. Duyulur Isı Enerjisi Depolama	15
3.2.4.3. Gizli Isı Enerjisi Depolama.....	16
3.3. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER	16
3.4. FDM'LERİN SINIFLANDIRILMASI	19
3.4.1. Organik FDM.....	19

3.4.1.1. Parafinler.....	19
3.4.2. İnorganik FDM.....	20
3.4.3. Ötektik FDM.....	20
3.5. FDM'LERİN TERMAL ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ AMACIYLA NANOPARTİKÜL İLAVESİ.....	20
BÖLÜM 4.....	22
MATARYEL YÖNTEM.....	22
BÖLÜM 5.....	27
SİSTEMİN PERFORMANS ANALİZİ.....	27
BÖLÜM 6.....	31
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	31
BÖLÜM 7.....	35
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	35
KAYNAKLAR.....	36
ÖZGEÇMİŞ.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Termal enerji depolamanın kümülatif kapasitesi.....	3
Şekil 3.1. Termal enerji depolama malzeme sınıfları	15
Şekil 3.2. FDM'nin çalışma prensibi	17
Şekil 4.1. Kararlı bir nano-FDM numunesi hazırlanması	22
Şekil 4.2. Plakalı ısıtıcı ve karıştırıcı ve nano-FDM numunesi	23
Şekil 4.3. Ultrasonik banyoda nano-FDM numunesi hazırlanması	23
Şekil 4.4. Al ₂ O ₃ Katkılı Parafin.....	24
Şekil 4.5. Saf parafin ve Al ₂ O ₃ parafin numuneleri	24
Şekil 4.6. Deney düzeneği.....	26
Şekil 5.1. Bazı madde sınıfları için termal iletkenlik değerleri.....	28
Şekil 6.1. Saf parafin (referans) DSC ölçüm grafiği.....	32
Şekil 6.2. Al ₂ O ₃ katkılı parafin DSC ölçüm grafiği.	32
Şekil 6.3. Saf parafin ve Al ₂ O ₃ katkılı parafin numunelerin alt sıcaklıklarının zamana bağlı grafiği.	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Enerji Depolama Çeşitleri.....	12
Çizelge 4.1. DSC analiz cihazının teknik özellikleri ve ısıl analiz şartları.	25
Çizelge 4.2. Isıl analiz şartları.	25
Çizelge 6.1. Parafin termal özellikleri.	33
Çizelge 6.2. Sıcaklık zaman grafiğinin eğri uydurulması sonuçları.	34

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- $^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
- μm : micrometre
- c : Maddenin özgül ısı (kJ/kg.K)
- c_k : Katı haldeki özgül ısı (kJ/kg.K)
- c_p : Sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kg.K)
- c_s : Sıvı haldeki özgül ısı (kJ/kg.K)
- V : Maddenin hacmi, (m^3)
- ρ : Maddenin yoğunluğu, (kg/m^3)
- E : Depolanan enerji, (J)
- Al : Alüminyum
- H_e : Erime gizli ısı (kJ)
- m : Kütleli debi (kg/s)
- T_e : Erime sıcaklığı (K)
- T_k : Katılma sıcaklığı (K)
- T_{ep} : Erime pik sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
- T_d : Donma sıcaklığı (K)
- T_i : İlk sıcaklık (K)
- T_s : Son sıcaklık (K)
- Q_s : Depolanan ısı enerjisi miktarı (kW)
- ΔH : Entalpi değişimi (kJ)
- ΔT : Sıcaklık farkı (K)

KISALTMALAR

- FDM : Faz Değiştiren Madde
MFDM: Mikrokapsüle Edilmiş Faz Değiştiren Malzeme
TGA : Termogravimetrik Analiz
DSC : Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
FT-IR : Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
IED : Isıl Enerji Depolama
Al₂O₃ : Alüminyum Oksit
TED : Termal Enerji Depolama
SHS : Duyulur ısı depolama
LHS : Gizli Isı Depolama

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde, özellikle ekonomik kalkınmanın hızlı olduğu ülkelerde enerji talebi ve fosil yakıt tüketimi hızla artmaya devam etmektedir. Bu artışla beraber büyük çevresel sorunlar meydana gelerek, üretilen enerjinin en verimli şekilde kullanılmasının gerekliliğini artırmıştır. Enerji piyasasını dengelemek ve taleplerin karşılanmasını sağlamak için yenilenebilir nitelikli kaynakların geliştirilmesi ve sürdürülebilirliği ekonomik kalkınma için gereklidir.

Enerji tüketimindeki artışa paralel olarak, atmosferik kirliliğinde arttığı ve iklim değişikliğine sebep olduğu görülmektedir. Sera gazı emisyonları iklim değişikliğinin başlıca etkeni olarak dikkat çekmektedir ve binalar tüm sera gazının %40'ını oluşturmaktadır. İklim krizi kapsamında, küresel ısınmanın sınır hedefini 1,5°C'de tutmak için çeşitli gelişmiş ülkelerce, 2050'ye kadar yerine getirilmesi taahhüt edilen “net sıfır karbon” uygulaması dünya için önemli bir hedef olmuştur [1].

Mevcut enerjinin devamlılığı, depo edilmesi ve depo edilen enerjinin ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilirliği günümüz şartlarında çok önemlidir. Bu sebeple enerji depolamadaki verimin artırılması gereklidir. Bunun için en uygun dönüşümün geliştirilmesi gereklidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekliliği olmadığından kaynağa ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmesi için depolanması gereklidir ve bu da ancak enerjinin bir formdan başka bir forma evrilmesi ile gerçekleşebilir.

Genel olarak bakılacak olursa; toplam tükettiğimiz enerjinin %40'a yakın bir oranı bina kaynaklı olup, %30'a yakın oranı sanayide, kalanı ise ulaşım ve tarım olmak üzere temel tüketim alanlarında kullanıldığını görüyoruz. Bina kaynaklı enerji tüketiminin %80'i ise ısıtma-soğutma için harcanmaktadır. Binalarda enerji israfının önüne geçilmesi, enerjinin verimli kullanılması ile mümkündür. Binaların enerji

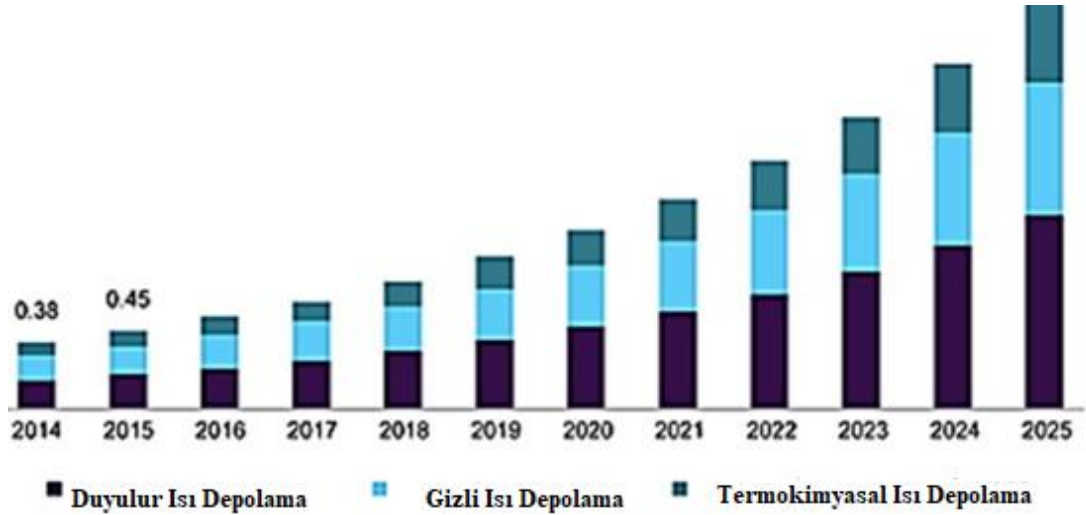
tüketimleri kontrol altına alınması amacıyla enerji kimlik belgesi verilmektedir ve bu şekilde binalarda enerji kullanımının azaltılması hedeflenmektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji sistemlerinin kullanılması teşvik edilmeye çalışılmaktadır.

Binalarda kullanılan ısı yalıtım malzemeleri, enerji tasarrufu sağlayarak bu amaç için iyi bir seçenek olabilmektedir[2]. Bu bağlamda termal enerjinin depolanarak kullanılması da binalarda enerji tüketimini azaltacaktır. Yalıtım malzemeleri, ısı kaybını azaltarak bina içindeki sıcaklığı kontrol altında tutmaya yardımcı olur. Bu nedenle, yalıtım malzemeleri, binalarda enerji tasarrufu sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır. Yalıtımı olmayan bir bina veya tesiste ısı enerjisi depolamanın önemi artmaktadır.

Enerjinin depolanması, sürece uygun dönüştürülmesi ve var olan enerji kaynaklarının korunması büyük önem arz etmektedir. Daha verimli enerji dönüşümü için yeni nesil enerji depolama malzemelerinin geliştirilmesi üzerine son yıllarda yapılan araştırmalar artmıştır. Bunun için yapılan çalışmaların bazıları, faz değişim malzemelerinin (FDM) geliştirilmesi ve güçlendirilmesi konusunda olmuştur [3–6].

Binalarda faz değiştiren malzemelerin yapı malzemeleri veya elemanları ile birlikte, doğru şekilde kullanımı halinde ısıtma ve soğutma yükleri azaltılabilir, bu sayede de bina performansı artırılabilir. Faz değiştiren malzemeler faz değişim sırasında, sabit bir sıcaklık aralığında enerji depolayabilen malzemelerdir. Kısa süreli ya da dönemsel enerji depolama için faz değiştiren malzeme kullanımı oldukça yaygındır [2].

Son yıllarda enerji depolama teknolojileri alanında yapılan yenilikçi çalışmalar ile “katkılı faz değiştiren malzemeler” konusu üzerinde yoğunlaşmaktadır. Şekil 1.1’de termal enerji depolamanın kümülatif kapasitesini göstermektedir. Tüm formlardaki termal enerji depolama hızla artmaktadır ve önümüzdeki yıllarda daha da artması beklenmektedir.



Şekil 1.1. Termal enerji depolamanın kümülatif kapasitesi [7].

Faz değıştiren malzemelerin termal iletkenliğini artırmak için kullanılan farklı yöntemleri karşılaştırmak için literatürde çalışmalar bulunmaktadır [8-11]. Bir parafinin tamamen şarj veya deşarj olması için gereken süre, termal iletkenliğine bağlıdır. Literatürde, genellikle şekil stabilizasyon malzemeleri olarak kabuklar veya destekleyici malzemeler (gözenekli malzemeler) kullanarak mikroenkapsüle FDM (mFDM) ve kompozit FDM (cFDM) oluşturmak için termal iletkenliği artırmaya odaklanan çeşitli teknikler sunulmuştur ve incelenmiştir. Parafinin termal iletkenliğini artırmak için kullanılan diğer yöntemler arasında nano boyutlu katkı maddeleri (nanopartikül) kullanımı, örneğin alümina nano katkı maddeleri yer almaktadır[12].

Faz değıştiren malzemeler bina yapılarında iki temel kullanım amacı vardır. Bunlar gündüz vakti güneşin yaydığı enerjinin kullanılması veya gece boyunca var olan soğüğün soğutma için kullanılmasının yanında ısıtma soğutma ekipmanları gibi ikincil kaynakların veriminin artırılmasıdır. Temel olarak, bir binayı FDM kullanarak ısıtmanın veya soğutmanın üç farklı yolu vardır;

1. Yapı duvarlarında FDM'ler
2. Diğer yapı bileşenlerinde FDM'ler
3. Sıcak ve soğuk depolama bileşenlerinde FDM'ler

İlk iki seçenek, iç veya dış ortam sıcaklığı FDM'nin erime noktasının üzerine çıktığında veya altına düştüğünde depolanan gizli ısı enerjisinin otomatik olarak gerçekleştirildiği pasif sistemlerdir. Üçüncü seçenekte ise, depolanan ısının veya soğğun yalıtımla ısı olarak binadan ayrı bir yerde bulunduğu aktif bir sistem söz konusudur. Bu nedenle ısıtma veya soğutma otomatik olarak değil sadece talep üzerine gerçekleştirilir [13]. FDM, bina kabuğunun ana bileşenlerinin termal kütlelerinin artmasına yardımcı olur ve özellikle yoğun dönemlerde (pik enerji ihtiyacı) dış ortam ile binalar arasındaki ısı transfer etkisinin azalmasını sağlar. Böylece bir binanın en pik zamanlarda yüksek ısıtma veya soğutma yüklerinin azaltılmasına katkı sağlanır [14]. Bu nedenle, oda sıcaklığının bina sakinlerinin termal konfor aralığında tutulmasında etkin bir yöntemdir.

Yapılan bu tez çalışmasında faz değıştiren malzeme olarak saf parafin kullanılmıştır. Bu parafine termal iletkenliği arttırmak için nanopartikül eklenmiştir. Hazırlanan numunelerin termal analizi yapılmak üzere DSC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İlk numune olarak saf parafinin termal özellikleri belirlenmiştir. İkinci numunede ise %5 oranında termal iletkenliği yüksek Al_2O_3 eklenerek sistemlerin performansları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bu tez kapsamında, nano katkılı faz değışim malzemesi kullanarak daha verimli bir yalıtım malzemesi üretilmesi hedeflenmiştir.

Tezin ilk bölümü enerji tüketimi, binalarda enerjinin verimli kullanılması için termal enerji depolama ve yapılan tez çalışması hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

Bölüm ikide ise literatürdeki benzer tezlerin/çalışmaların özetlerine yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde enerji depolamanın önemi, çeşitleri hakkında bilgilendirme yapılmıştır ve Faz Değıştiren Malzemeler hakkında bilgilendirme yapılmıştır.

Dördüncü bölümde kullanılan ölçüm aletleri, araç gereçler, numunelerin hazırlanması, deney düzeneği hakkında bilgilendirilmeye yer ayrılmıştır.

Beşinci bölüm sistemin performans analizinin incelenmesi yapılarak kullanılacak formüllere yer verilmiştir.

Altıncı bölüm ise yapılan DSC ölçümlerinin grafiklerine yer verilmiştir. Deneysel sonuçlar ve tartışma bölümü olarak yer verilmiştir.

Yedinci ve son bölümde ise tezin sonuçlarından ve önerilerden bahsedilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapılan bu çalışmada, termal enerji depolamak amacıyla, faz değıştiren malzeme ve nanoparçacık kullanılarak bir sistem tasarlanmıştır. Hazırlanan numunenin termal analizi yapılmak üzere DSC ölçümleri yapılmıştır. Bu doğrultuda, termal enerji depolama ile ilgili çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma yapılmıştır. Aşağıda konu ile ilgili bazı çalışmalar verilmiştir.

Canım ve Kalfa (2020) yaptığı çalışmada literatürde mevcut olan teorik, uygulama ve deneysel çalışmaları incelemiştir. Farklı tipteki FDM'lerin ısı performans özelliklerine ve uygulama yöntemlerine bakarak, avantajlarının ve dezavantajlarının karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda, inceledikleri bilimsel yayınlardan FDM'ler ile ilgili olarak en çok tercih edilen kullanım yerinin duvar bileşenleri olduğunu tespit etmişlerdir. En fazla tercih edilen FDM'nin parafin olduğunu ve birleştirme tekniği olarak ise genellikle mikro kapsülleme yönteminin tercih edildiğini tespit etmişlerdir. Literatür de en çok çalışma tipinin deneysel ve simülasyon tercih edildiği ve simülasyon programı olarak en fazla EnergyPlus programının tercih edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca FDM hakkında deneysel çalışma sayısının artırılması gerekliliğini vurgulamışlardır [15].

Temel ve Çiftçi (2018) yaptıkları çalışmada organik FDM içerisine nanopartikül katkısı ile termal iletkenliğin iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Kullanılan nanopartiküllerin tip, boyut ve şeklinin, termal özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bunun için ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında Al_2O_3 , TiO_2 , MgO , ZnO , MWCNT, grafen nanoplatelet gibi nanopartiküller kullanılmıştır. DSC analizleri yapılarak ısı iletkenlik ölçümlerini almışlardır. Öncelikle nanoparçacık boyutunun ısı iletkenlik üzerindeki etkisini incelemek için farklı boyutlarda kompozitler hazırlamışlardır. Bu durumda nanoparçacık boyutunun artmasıyla ısı

iletkenlikte daha fazla artışın elde edildiği gözlemlenmiştir. Karbon tabanlı nanopartiküllerle katkılanmış kompozitlerin termal iletkenliklerindeki artış metal tabanlı nanopartikül ilaveli FDM'lere göre önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmüştür. Ağırlıkça %5 oranında GNP katkılanan FDM kompozitinin termal performansında %23,6'lık artış sağlanmıştır. Genel olarak katkılanan metal oksit veya karbon tabanlı nanoparçacık oranına bağlı olarak gizli ısılarda %20'ye varan bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın ZnO nanoparçacık katkılı kompozitde gizli ısı değerinin %30-55 arasında gelişme gösterdiği tespit edilmiştir. Tüm kompozitlerden ise ilave edilen nanoparçacığa bağlı olarak erime-donma sıcaklığında maksimum değişimin %1,5'tan az olduğu tespit edilmiştir [16].

Ülker (2021) yaptığı çalışmada FDM olarak seçilen parafin içerisine Al_2O_3 , ZnO, MgO, SiO_2 , Fe_2O_3 , Cu_2O ve Grafen olmak üzere 7 farklı nanopartikül türünü ağırlıkça %2,5 oranında ilave ederek nanopartikül katkılı malzemeler hazırlamıştır. Bu nanopartiküllerin parafinin içinde homojen dağılabilmesi amacıyla yüzey aktif maddelerden oleik asit (OA) seçilmiştir. Oleik asit yüzey aktif madde/nanopartikül oranı 1:3, 2:3 ve 3:3 olacak şekilde numunelere ilave edilmiştir. Daha sonra SEM analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, OA'sız numunelerin metal nanopartiküllerin yüksek yoğunluklarından ötürü birbirlerine yapışarak topaklandığı tespit etmişlerdir. Oleik asit ilavesi ile daha homojen bir dağılımın elde etmişlerdir. Şarj/deşarj döngüleri sonucunda ise nanopartikül ilaveli parafinin saf parafine göre erime/donma sürelerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca OA katkılı numunelerin erime/donma sürelerindeki azalma OA'sız numunelere göre daha fazla olmuştur. Sonuç olarak nanopartikül katkılı malzemelerin tamamında termal iletkenlik değerinin PW'ye göre arttırıldığı tespit edilmiştir. DSC analizi sonucunda hem OA'sız hem de OA'lı tüm numunelerin erime/katılma faz değişim entalpileri PW'ye göre azalmıştır. TGA analizi ile tüm numunelerin termal kararlılıklarının PW'ye göre iyileştirildiği tespit edilmiştir. 7 farklı nanopartikül türleri içerisinde Cu_2O , Fe_2O_3 ve GN en iyi termal davranışı sergilediğini belirtmişlerdir. Yapılan tüm analizler sonucunda parafine nanopartikül ilave edilmesiyle ısıl iletkenlik ve termal davranışlarının iyileştirildiği belirlenmiştir [17].

Şahan (2013) yaptığı çalışmada TED sistemlerinde, parafinin nano kompozitleri hazırlamıştır ve termal özelliklerini araştırmıştır. Nano kompozit hazırlamada kolay ve ekonomik şekilde hazırlanması bakımından sol-jel tekniği kullanmıştır. Nano magnetit (Fe_3O_4) ve karbon nanotüpler ile FDM-nano kompozit hazırlamıştır. SEM analizleri sonucunda magnetit nano partiküllerin 25-650 nm arasında boyutlarının değiştiğini görmüştür. Yüzey aktif madde olarak kullanmış olduğu oleik asit ile stabilizasyonu sonucunda ise 4-9 µm aralığında olduğunu SEM görüntülerinde görmüştür. DSC analizine göre parafin ile kütlece %10 magnetit nano partikül katkılı malzemede, kompozitin gizli ısı değerindeki artış %1,7 olduğunu gözlemlemiştir. Karbon nanotüplü kompozit için %23 gizli ısı değerinde artış elde etmiştir. Faz değişim aralıklarında ise ciddi bir değişiklik gözlemlenmediğini belirtmiştir [18].

Arslan ve İlbaş (2021) yaptıkları çalışmada saf parafin ve kütlece %10 Al_2O_3 katkılı nanopartiküllü parafinin, erime işlemini dikdörtgen bir muhafaza içerisinde gerçekleştirmiş olup, erime süreçlerini sayısal olarak araştırmışlardır. Erime sıcaklığı 50 °C olan saf parafini ve nanopartikül katkılı parafin için dikdörtgen alanın duvar sıcaklığını sırasıyla 65 °C, 70 °C ve 75 °C'ye arttırarak toplam erime süresine olan etkisini incelemişlerdir. ANSYS Fluent yazılımı ile sayısal analizleri tespit etmişlerdir. Sonuç olarak Al_2O_3 nanopartikül katkılı parafinin ısı transfer hızını artmış olduğunu tespit etmişlerdir [19].

Ülker ve ark. (2020) yaptıkları uygulamalı çalışmada parafine %1, %2,5 ve %5 oranında MgO, ZnO ve SiO_2 nanopartikülleri eklemişlerdir. Böylelikle parafinin şarj-deşarj işlemlerini incelemişlerdir. Bu işlem sonucunda %1 nanopartikül katkısının parafinde önemli bir fark ortaya çıkarmadığını tespit etmişlerdir. %2,5 nanopartikül ilave edilen şarj işleminde; ZnO katkılı parafin için sıcaklık artışının daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. %2,5 SiO_2 katkılı parafinin deşarj işleminde; diğerlerinden önce donduğunu ve donmadan sonra da sıcaklığının daha fazla düştüğünü gözlemlemişlerdir. %5 katkılı şarj işleminde ise erimede SiO_2 nanopartikülünün, erime ve erime sonrasında ise MgO ve ZnO nanopartiküllerinin birbirlerine yakın davranış gösterdiğini görmüşlerdir. %5 katkılı deşarj işleminde ise donma öncesi MgO ve ZnO nanopartikülünün yakın davranış gösterdikleri ve SiO_2 göre daha yüksek performans gösterdikleri gözlemlenmiştir. ZnO ilaveli parafinin tüm

oranlarda diğerk iki numuneden daha önce donmaya başladığını gözlemlemişlerdir. ZnO nanopartikülün parafinde şarj ve deşarj işlemlerinde daha yüksek performans gösterdiği ve %2,5 kütle oranının daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir [20].

Lin ve Al-Kayiem (2016) yaptıkları çalışmada Cu-FDM nanokompozitlerini sentezlemek için parafin içine 20 nm bakır nanopartikülleri eklemişlerdir. Elde edilen nanokompozitlerin termal özelliklerini araştırmak için 5 ayrı numune hazırlamışlardır. Oluşturulan nanopartikül katkılı parafinin faz değişim esnasında daha iyi bir ısı transferi gerçekleştirdiğini gözlemlemişlerdir. Parafin mumuna %1 bakır nanopartikülleri eklendiğinde verimliliğin %1,7 oranında arttığını gözlemlemişlerdir [21].

Mert ve ark. (2018) kapsüllenmiş organik faz değıştiren malzemelerde termal iletkenliğin artırılması hakkında yapılan araştırmaların sonuçlarını incelemişlerdir. İncelemeler sonucunda yüksek ısı depolama kapasitesi nedeniyle en fazla tercih edilen maddenin parafin olduğunu ve literatürde n-oktadekanın ısıtma-soğutma uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir gizli ısı depolama malzemesi olarak öne çıktığını gözlemlemişlerdir. Literatürdeki diğerk çalışmalar değılendirildiğinde nanopartikül ilave edilen FDM'lerin ısı transferini arttırdığı sonucuna varıldığını söylemişlerdir [22].

Mirmahmutoğulları (2022) yaptığı bir çalışma; düşük maliyetli kapsüllemenin çeşitli kavramlarının incelenmesini içermektedir. 5 ayrı deney gerçekleştirerek karakterizasyon testleri uygulamıştır ve kapsülleme verimi belirlenmiştir. FDM olarak, organik FDM'lerden; parafin mumu, parafin mumu ile palmitik asit, hegzadekan, oktadekan ve hindistan cevizi yağıyla çalışılmıştır. Kabuk malzemesi olarak, arap zankı ile jelatin, kitosan ile PVA (polivinil alkol) kabuklarıyla çalışmıştır. Numunelere mikrokapsüllerin kabuk oluşumu ve faz değıştiren malzeme varlığı tespiti için FT- IR (Fourier Transform Infrared Spektrofotometresi) analizi yapılmıştır. İlk 3 deneye ait numunenin (Deney-1, Deney-2 ve Deney-3) incelendiğinde jelatin ve arap zankına ait pikin yer almadığı görülmüştür ve kapsül malzemesine ait pikin olmayışıyla kapsülasyon başarısız gerçekleşmiştir. Deney-4 numunesine ait FT-IR analizini incelediğinde gözlemlenen pikler Hekzadekan'ın

mikrokapsüllerin yapısındaki varlığını kanıtladığını söylemiştir. Dene-4 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsünde, mikrokapsül formlarının düzensiz yapıda olduğu görülmektedir. Dene-4 numunesinin FDM'si hegzadekana ait DSC analizine bakılarak, ısıtma ve soğutma eğrileri incelenmiştir. Yapılan tüm bu analiz sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen Dene-4'e ait MFDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin 95,0023 J/g mikrokapsülleme oranının ise %44,7 olduğu görülmüştür. Dene-5 numunesine ait FT-IR analizini incelediğinde gözlenen piklerin varlığı, hindistan cevizi yağının mikrokapsüllerin yapısındaki varlığını kanıtladığını söylemiştir. Dene-5 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsünde, mikrokapsül formlarının düzensiz yapıda olduğu görülmektedir. Dene-5 numunesinin FDM'si Hindistan cevizi yağın ait DSC analizine bakılarak, ısıtma ve soğutma eğrileri olmak üzere iki adet pik görülmektedir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen Dene-5'e ait MFDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin 59,64 J/g mikrokapsülleme oranının ise %72 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak Dene-4 ve Dene-5 numunelerinin FT-IR sonuçları ve bunu destekleyen Stereo mikroskop, DSC ve TGA analizlerine göre kapsülleme başarıyla gerçekleşmiştir [23].

Gümüş (2019) yaptığı bir çalışmada termal enerji depolama uygulamalarında kullanılabilir, n-oktadekan ve n-hegzadekandan oluşan ötektik FDM'ler hazırlamıştır. Dene kapsamında stiren kabuk kullanmıştır. Çapraz bağlayıcı olarak ise divinilbenzen (DVB) kullanmıştır. Başlatıcı madde olarak 2,2'-azobisisobütironitril (AIBN) kullanmıştır. Emülsiyon yapıcı madde olarak ise setil trimetilamonyum bromür (CTAB) kullanmıştır. Hazırlanmış olduğu mikrobeyutta kapsüle edilen numunede gerçekleştirmiş olduğu termal ve morfolojik özelliklerinin analizleri neticesinde en iyi gizli ısı depolama kapasitesini 88 kJ/kg olarak bulmuştur. Hacimce çekirdek kabuk oranı en yüksek 2/1 ve en düşük emülgatör oranını 45 mmol/L olarak elde etmiştir. Numuneye ait en yüksek kapsülasyon oranı %56,77 olarak bulmuştur. Çalışmanın sonucunda 18-30°C aralığında çalışan düşük sıcaklıklı TED uygulamalarında, elde edilen bu mikrokapsüllemiş FDM'lerin kullanılabilir malzemeler olduğunu göstermiştir [24].

BÖLÜM 3

ENERJİ DEPOLAMA

3.1. ENERJİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ

Enerjinin formlarına baktığımızda temel olarak ısı, elektrik ve mekanik olarak üç formda diyebiliriz. Enerji şekli ne olursa olsun enerjinin üretimi, enerjinin üretildiği yerden kullanılacak yere kadar iletimi, iletdikten sonra son kullanıcıya kadar ulaşabilmesi için dağıtımını ve daha etkin kullanılabilmesi için depolanması olarak enerji alanlarını tanımlayabiliriz. Burada enerjinin üretim aşamalarından başlayarak son kullanıcıya kadar ulaştırılması olan sürecinde verimliliğin artırılması, israfın önlenmesi, enerji yoğunluğunun düşürülmesi, üretimin sürekliliği gibi faktörler günümüz şartlarında üzerine çalışılan en önemli konulardan olmuştur. Özellikle 2008’de yaşanan geniş çaplı ekonomik kriz sonrası görülüyor ki enerji darboğazı ve enerji pahalılığı nedeniyle enerji depolama sistemlerinin günümüz için daha da önemli bir hale gelmiş bulunmaktadır. Enerji ısı, elektrik, kimyasal ve mekanik enerji gibi farklı biçimlerde depolanabilir. Bunun için enerjinin depolanabilmesi üzerine çalışılmış sistemler ve makaleler literatürde mevcuttur.

Mevcut tüketim verileri dikkate alındığında bina yaşam döngüsünün toplam enerjinin %80’i kadarına denk geldiği tespit edilmiş durumdadır. Bina kullanım sürecinin verimliliği ise bina tasarımı, kullanılan malzemeler ve binanın tüketim şartları etkilemektedir. Yapılan uygulamalar binalarda alınacak enerji verimliliği önlemleriyle bina enerji tüketiminin ortalama %50 oranında azaltılabileceğini göstermektedir. Özellikle son yıllarda, yeşil ve doğa uyumlu evler giderek artmış durumdadır. Binaların ısı konfor şartlarını yerine getirmek amacıyla ısıtılması ve soğutulması için harcanan enerji yükü çok fazladır. Bu sebeple yeşil bina uygulamalarında ısı enerjisinin depolanarak kullanılmasıyla bina enerji tüketimini azaltarak enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır.

Bir enerji depolama sisteminde istenilen özellikler şu şekildedir; yüksek depolama kapasitesinin olması, yüksek şarj/deşarj veriminin olması, kendiliğinden boşalmanın ve kapasite kayıplarının mümkün oldukça en az olması, uzun ömürlü olması, ucuz olması ve enerji yoğunluğu olmasıdır [25].

3.2. ENERJİ DEPOLAMANIN ÇEŞİTLERİ

Enerji depolama; mekanik enerjinin depolanması, kimyasal enerjinin depolanması, elektrik ve magnetik enerjinin depolanması ve ısıl enerjinin depolanması gibi çeşitli yöntemler aracılığıyla gerçekleştirilebilir [26].

Çizelge 3.1. Enerji Depolama Çeşitleri [27].

Mekanik Enerji Depolama	Kimyasal Enerji Depolama	Elektirik ve Magnetik Enerji Depolama	Isıl Enerji Depolama
a) Potansiyel Depolama	a) Sentetik yakıtlar	a) Elektriksel Kapasitör İçinde Depolama	a) Duyulur Isı Depolama
b) Kinetik Depolama	b) Termokimyasal	b) Elektromagnetlerde Depolama	b) Gizli Isı Depolama
c) Sıkıştırılmış Gaz İçinde Depolama	c) Elektrokimyasal	c) Süperiletken Bobinler Ve Magnetlerde Depolama	c) Termokimyasal Depolama
	d) Fotokimyasal		

3.2.1. Mekanik Enerji Depolama

Yararlı iş yapabilen hareket enerjisi, mekanik enerji anlamına gelmektedir. Mekanik enerji depolama, doğrusal veya dönme hareketinin kinetik enerjisi, yükseltilmiş bir nesnedeki potansiyel enerji, elastik bir malzemenin sıkışma veya gerinim enerjisi veya bir gazın sıkıştırma enerjisi olarak depolanabilir. Büyük miktarlarda enerjiyi doğrusal hareket halinde depolamak zordur ancak dönme kinetik enerjisinin depolanması daha kolaydır. İnsan tarafından kullanılan enerji depolamanın belki de ilk biçimi olan çanak çömlek çarkı birkaç bin yıl önce geliştirilmiş ve halen kullanılmaktadır. Üç ana mekanik depolama türü vardır: potansiyel, kinetik ve sıkıştırılmış gaz içinde depolamadır.

3.2.2. Kimyasal Enerji Depolama

Enerji, kimyasal bileşikler oluşturmak üzere reaksiyona girdiklerinde enerjiyi serbest bırakan veya emen bir veya daha fazla kimyasal bileşikten oluşan sistemlerde depolanabilir. Birçok kimyasal reaksiyon endotermiktir. Kimyasal enerji depolamada bazen bir katalizör kullanmak gerekebilir. En çok kullanılan metotlar; amonyak ve hidrojen iledir. Gaz depolanabilmektedir ve taşınabilmektedir [28].

Üretilmesi en basit kimyasalın hidrojen olduğu kabul edilir. Hidrojen, suyun elektrolizi yoluyla elektrokimyasal olarak üretilebilir. Günümüzde kullandığımız hidrojen gazı büyük oranda fosil yakıt eldesidir. Bununla birlikte yaygınlaşmakta olan uygulamaysa yakıt pilleri aracılığıyla hidrojen enerjisi depolamak ve kullanmaktır. Pillerde depolanan enerjiye sıklıkla elektrokimyasal enerji denir, çünkü pildeki kimyasal reaksiyonlar elektrik enerjisinden kaynaklanır ve ardından elektrik enerjisi üretilir.

3.2.3. Elektrik ve Magnetik Enerji Depolama

Enerji geri dönüştürülebilir bir şekilde elektrik alan içerisinde kapasitör adı verilen cihazlarda depolanabilmektedir [29]. Günümüzde büyük miktarlarda enerji depolayabilen süperkapasitörler gün geçtikçe daha çok talep almaktadır.

Mutlak sifıra yakın sıcaklıklarda, bazı metallerin neredeyse hiç elektrik direnci yoktur ve bu nedenle büyük akımlar neredeyse hiç kayıp olmadan yapıların içlerinden geçerilebilir. Bu yöntem süperiletken manyetik enerji depolama yöntemidir. Bu depolama da verimliliğin %80-90 olması beklenir.

3.2.4. Termal (Isıl) Enerji Depolama

Termal (ısı) enerji; bir sistemde ısı tarafından aktarılan enerjidir. Maddenin atom veya moleküllerin titreşimiyle oluşan potansiyel ve kinetik enerjilerinin toplamıdır.

Termal enerji miktarları sıcaklıkta farklılık gösterir. Bir maddenin sıcaklığı arttıkça enerji içeriği de artar. V hacimde bir maddeyi T_1 sıcaklığından T_2 sıcaklığına ısıtmak için gereken enerji 'E' şu şekilde verilir;

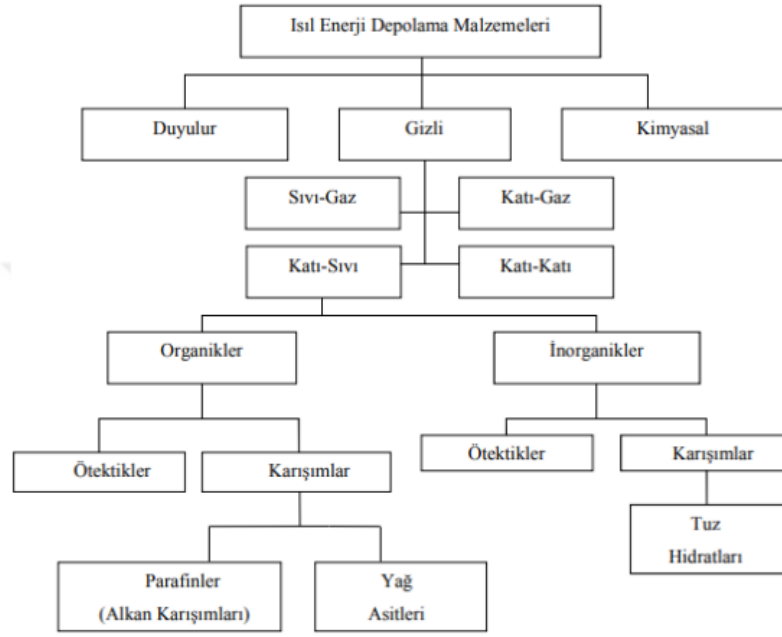
$$E = m C (T_2 - T_1) = \rho V C (T_2 - T_1) \quad (3.1)$$

Burada C maddenin özgül ısıdır. Depolanacak enerji; maddenin ısı kapasitesiyle (sıcaklığı arttırarak), maddenin erime gizli ısıyla (sabit sıcaklıkta) depolanmaktadır. Isı enerjisini sıvılarda, katılarda, mevsimsel, kimyasal ve faz değişimli maddelerde depolama olarak kullanabiliriz. Yapılacak işleme göre depolama için uygun ortam seçilmelidir. Pasif ısıtma sistemine dayalı ısıtılan binaların ısı enerjisinin bina duvarlarında depolanması gerekmektedir.

Termal enerji depolama yöntemlerinden hangisinin kullanılacağı belirlenmesinde ısı depolama süresine (günlük veya mevsimsel), uygulanabilirliğine, ekonomikliğine ve işletme koşullarına bakılmaktadır. Depolama sisteminin seçiminde ise birim hacimdeki depolama kapasitesine, çalışma sıcaklık aralığına, güç tüketimine, dış malzemenin dış ortam sıcaklığına uygunluğuna, maliyetine, ısı kayıplarının önlenmesine bakılarak seçilmektedir.

Termal enerji üç farklı şekilde depolanabilir. Bunlar duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolamadır. Kimyasal bir maddede ısının sabit bir sıcaklıktaki faz geçişi halinde gizli ısı depolaması diğer depolama metotlarına göre daha caziptir [30].

Duyulur ısı depolama maddenin sıcaklığındaki değişimi sonucu ortaya çıkar. Gizli ısı depolamada maddenin faz değişimi esnasında enerjinin soğurulması ya da salınması sonucu ortaya çıkar. Termokimyasal depolama metodunda ise tersinir reaksiyona giren bileşiğin bağ enerjisi olarak depolanabilir.



Şekil 3.1. Termal enerji depolama malzeme sınıfları [31].

3.2.4.1. Termokimyasal Enerji Depolama

Bu depolama tekniği kimyasal reaksiyonlar içerir. Kimyasal dönüşüm aşamasında kaynak madde ve ara kademe elemanları yer alır. Ürünler kayıp olmaksızın oda sıcaklığında sürekli depolanır. Ürünler gerektiği zaman termal enerjiyi serbest bırakarak, yeniden kimyasal bir reaksiyon oluşturular.

3.2.4.2. Duyulur Isı Enerjisi Depolama

Bu depolama metodunda maddenin ısı kapasitesinin büyük olması, temin edilebilir ve de ucuz olması istenmektedir. Ayrıca yanıcı madde olmaması ve maddenin uzun süre özelliklerini koruması, zehirli ve korozif olmaması istenir. Genellikle çakıl taşı ve su kullanılmaktadır. Ayrıca, yaygın seramik bazlı bazı malzemeler (çimento, beton, vb.), mermer, granit, kil gibi bazı doğal taşlar, kumtaşı ve polimerler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, uygun termofiziksel özelliklere sahip çeşitli endüstriyel işlemlerden kaynaklanan atık malzemeler, duyulur ısı depolama için kullanılmak üzere uygun adaylar haline gelmektedir [32].

3.2.4.3. Gizli Isı Enerjisi Depolama

Maddenin miktarının ve sıcaklığının önemli oranda artması veya azalması faz değişimine sebep olur. Bir maddenin bir fazdan diğerine değişmesi sırasında meydana gelen ısı transferine gizli ısı denir. Gizli ısı geçişinde transfer edilen enerji miktarı duyulur ısıya göre daha fazladır. Ancak gizli ısı depolamada düşük ısıl iletkenlik, faz ayrılması, aşırı soğuma, düzensiz erime, hacim değişimi ve yüksek maliyet gibi nedenlerden ötürü pratikte pek çok sorunla karşılaşmaktadır. Gizli ısı depolamanın yaygın olarak kullanılabilmesi için bu sorunların teknik olarak çözülmesi gerekmektedir. Depolanan enerji miktarı malzemenin kütlesine ve gizli füzyon ısısına bağlıdır. Matematiksel olarak; $E=m.L$ olarak ifade edilir. Burada m maddenin kütlesi L ise gizli füzyon ısısıdır.

Gizli ısı depolamak için faz değiştirici maddelerden faydalanılır. Faz değişimleri katı-katı, katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar şeklinde gerçekleşebilir. Bu depolama şekli yüksek enerji yoğunluğu gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Gizli ısı depolamada katı-sıvı faz değişimi en fazla yararlanılan değişimdir. Çünkü hacim değişikliği en az bu fazda görülür. Sıvı-buhar faz değişiminde ise, basınç sabitken hacmin çok artması yada hacim sabitken basıncın çok artması nedeniyle gizli ısı depolama da fazla tercih edilmezler [33].

Maddenin katıdan sıvıya faz değişiminde depolanan gizli ısı miktarı şu şekilde bulunur;

$$Q_d = m c_{pk} (T_e - T_k) + m h_{ks} + m c_{ps} (T_k - T_e) \quad (3.2)$$

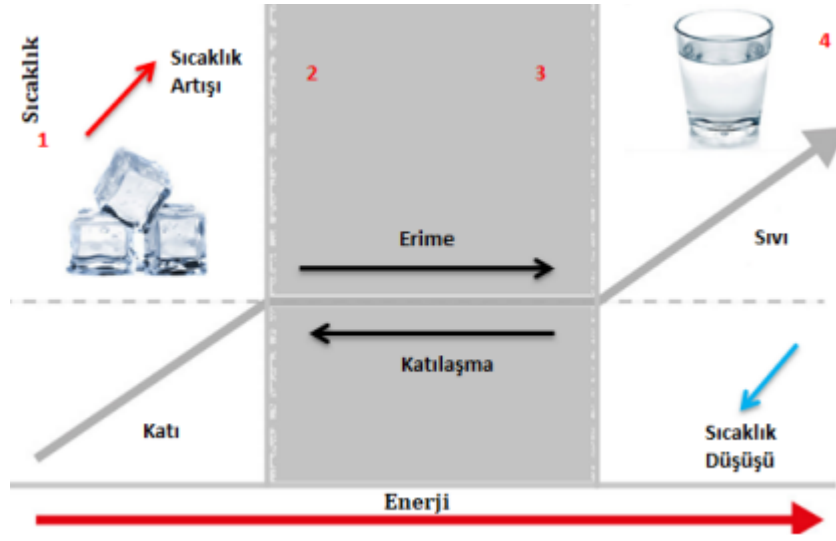
T_e , erime sıcaklığı, T_k katılaşma sıcaklığı, m kütlesi, h_{ks} erime gizli ısısıdır.

3.3. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER

1960'lı yıllardan itibaren faz değiştiren malzemeler araştırılan geliştirilen bir grup kimyasaldır. Bu kimyasalların 500'den fazla çeşidi bulunmaktadır. Uygun bir sıcaklık aralığında bir fazdan başka bir faza geçebilen bu malzemeler özellikle temiz

enerjiye geçiş uygulamalarında son derece dikkat çekmiştir. Gizli ısıyı depolayan maddeler olan FDMlerden en fazla kullanılanı parafin olmuştur. Bu çalışmada organik FDM sınıfına ait parafin ile örnek bir uygulama yapılmıştır.

Faz dönüşümünün dört türü vardır; katı-katı, katı-sıvı, sıvıgaz ve katı-gaz. Gizli ısı depolama, bu faz dönüşümleri vasıtasıyla gerçekleşmektedir. Bu dönüşümler arasında yüksek erime gizli ısısına sahip olan katı-buhar ve sıvı-buhar faz değişimleri için önemli unsur dönüşüm sırasında meydana gelen büyük hacim değişimleridir. Büyük hacim değişimleri yüksek basınçlı kapları gerektirdiğinden ısı depolamaya uygun değildir. Bu durum aynı zamanda maliyetide arttırmaktadır. Bu dönüşümlerden katı-katı ve katı-sıvı dönüşümleri daha çok tercih edilmektedir. Yapılabilirliği açısından literatürde en çok tercih edilen ve çalışılan dönüşüm katı-sıvı dönüşümleridir.



Şekil 3.2. FDM'nin çalışma prensibi [34].

FDM'lerin basit bir çalışma prensibi vardır. Sıcaklık arttıkça malzeme katı formdan sıvı forma doğru faz değiştirir. Reaksiyon endotermik olduğu için, FDM ısıyı emer. Çekirdek maddenin fazı sıvıdan katıya yine aynı şekilde, sıcaklık düştüğünde ise dönüşmektedir. Bu durumda tepkime ekzotermik olduğundan, çekirdek malzeme ısıyı dışarıya atar.

Bir gizli ısı depolama sistemi tasarlarırken; istenilen sıcaklık aralığında erime noktasına sahip faz değiştiren madde, ısı değişim yüzeyi ve FDM için gerekli koşullarda muhafaza edilebilen muhafaza ortamı olması gereklidir. Faz değiştiren malzemeler organik ve inorganik olarak iki grupta incelenmektedir. Organik faz değiştiren malzemeleri; parafinler ve parafin olmayanlar olarak, inorganik faz değiştiren malzemeleri de; tuz hidratları, metalikler, tektikler olarak gruplandırabiliriz.

Yaygın olarak faz değiştiren malzemeler; parafinler, su-buz, tuz hidratlar ve sulandırılmış tuz hidratlar, polimerler, kafes yapılı karışımlar ve karbondioksit olarak gösterilebilir.

Uygulama da ideal bir FDM için taşıması gereken özellikler şyledir;

Uygun faz geçiş sıcaklığı olmalı, yüksek füzyon gecikmesine sahip olmalı, malzemenin ısı iletkenliği yüksek olmalı, faz değişim sırasında hacim değişikliğinin en az olmalı, malzeme faz ayrışması göstermemeli, malzemenin faz değişimi sırasında kimyasal özellikleri değişmemeli, ekonomik olmalı, korozif olmamalı, yanıcı ve patlayıcı olmamalı, zehirli olmamalıdır.

Faz değişimi yeni bir fikir değildir, yeni olan 2000'lerde uygulaması yapılmaya başlanan FDM'lerin binalarda kullanılabilmesi ve çok uzun sure stabil kalmasıdır. Bazı üreticiler faz değiştiren al levhayı geliştirmişlerdir. Al levha arasına parafin mumu koyarak bu al levhaları duvarlara yerleştirip hem ısı yalıtımı hemde ısı deposu olarak kullanmışlardır.

FDM retimi sırasında yapı malzemelerine (beton, al, sıva gibi) doğrudan karıştırılabilir. Daldırma yönteminde ise tuğla, köpük beton, al levha gibi gözenekli yapı malzemeleri erimiş FDM'nin içine daldırılarak uygulanmaktadır.

İdeal bir ısı depolama ortamı için gerekli tüm özelliklere sahip olmayan FDMlerin zelliklerinin iyileştirilmesi adına örneğin ısı iletkenliği arttırılması için nanoteknoloji kullanılarak üretilen nano partiküllerin ilavesi yapılabilir.

Nanopartiküller yüksek ısı iletkenliğine sahiptirler. Nanopartiküller kullanılarak ısı transferinde iyileşmelerin görüldüğü birçok çalışma literatürde mevcuttur.

3.4. FDM'LERİN SINIFLANDIRILMASI

Abhat 1983'te FDM'leri kimyasal bileşimlerine göre genel olarak üç grupta sınıflandırmıştır. Bunlar inorganik, organik ve bunların ötektik karışımlarıdır. Organik FDM'ler genellikle parafin ve yağ asitlerinden oluşur. İnorganikler ise tuz hidratlar ve metallere oluşmaktadır. Ötektik maddeler ise, iki veya daha fazla sayıdaki FDM'lerin karışımlarıdır [22].

3.4.1. Organik FDM

Organik FDM'ler yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahiptirler. Ancak ısı iletkenliği düşüktür. Organik FDM'ler genellikle orta ve düşük sıcaklıktaki uygulamalar için tercih edilmektedir. Parafin ve parafin olmayan olarak sınıflandırılır ve örnek olarak parafin mumu, polietilen glikol, polietilen, stearik asit ($C_{18}H_{36}O_2$) verilebilir.

3.4.1.1. Parafinler

Parafinlerin hammaddesi petroldür. Kokusuzdur. Yarı beyaz yarı saydam olarak tanımlanabilir. Enerji depolamada en yaygın kullanım alanına sahip faz değıştiren malzemedir. Kimyasal formülü C_nH_{2n+2} olan parafinlerin, karbon atomlarının sayısı arttıkça erime sıcaklığı ve gizli füzyon ısısı artmaktadır. Parafinler kararlıdır, faz değışim sırasında küçük hacim gösterirler, faz ayrımı göstermezler ve aşındırıcı değildirler. Sıvı veya wax halinde katı olabilirler. En çok kullanılan ticari ısı depolama maddesi olarak Parafin wax gelmektedir. Parafin FDM'ler aynı zamanda düşük ısı iletkenliğine sahiptir, bu nedenle yeterli bir iletim yolunun tasarlanması, tasarımda göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. Hammaddesi petrol olduğu için pahalıdır.

3.4.2. İnorganik FDM

İnorganik FDM'ler tuzlar, tuz hidratlar, metaller ve alaşımlar şeklinde gruplandırılabilir. Yüksek gizli ısı depolama ve yüksek ısıl iletkenliği özelliğine sahiptirler. Yanıcı değildir ve ucuzdur. Ancak korozyon ve faz bozunmasına uğrarlar. Saf halde veya ötektik karışım şeklinde kullanılabilirler [30]. En çok kullanılan Tuz hidratlara örnek olarak $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (kalsiyumklorit heksahidrat), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (sodyumsülfat dekahidrat), $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ (sodyumkarbonat dekahidrat) verilebilir. Isıl iletkenlikleri çok iyi olan metallerin ise, maliyetleri yüksektir ve FDM olarak pek kullanılmazlar.

3.4.3. Ötektik FDM

Birden fazla maddenin içerdiği bir bileşenin gösterdiği birden fazla faz değişim durumu olabilir. Faz ayrımı olmadan hal değişiminin olabilmesi için aynı anda ve sıcaklıkta değişim göstermesi gerekmektedir. Ötektik karışımlar ile bu durum mümkündür. Ötektik FDM'ler farklı sıcaklıklarda termal enerji depolamak için yaygın olarak kullanılır. Ötektik FDM'ler iki veya daha fazla FDM'lerin karışımından elde edilmektedir. Organik-organik, organik-inorganik veya inorganik-inorganik olabilmektedir. Bu karışımlar çoğunlukla faz ayrımı olmadan dönüşümü gerçekleştirir.

3.5. FDM'LERİN TERMAL ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ AMACIYLA NANOPARTİKÜL İLAVESİ

Organik faz değiştiren malzemelerin düşük ısıl iletkenliklerinin pratikte etkin olarak kullanılabilmesi için artırılması gerekmektedir. Son on yılda, farklı boyutlarda (<100 nm) ve tiplerde nanomateryallerin sentezi, organik FDM'lerin termal iletkenliğini arttırmak için daha yenilikçi bir yöntemin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu yöntem, nanopartiküllerin organik FDM'ye dahil edilmesiyle yeni bir nano-faz değiştiren malzemeler oluşturulmasına dayanmaktadır. Sentetik veya doğal kaynaklı olabilen

makromoleklden oluşan nanopartiküller ışıl iletkenliğin arttırılması için FDM'lere eklenmesinin etkisini araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

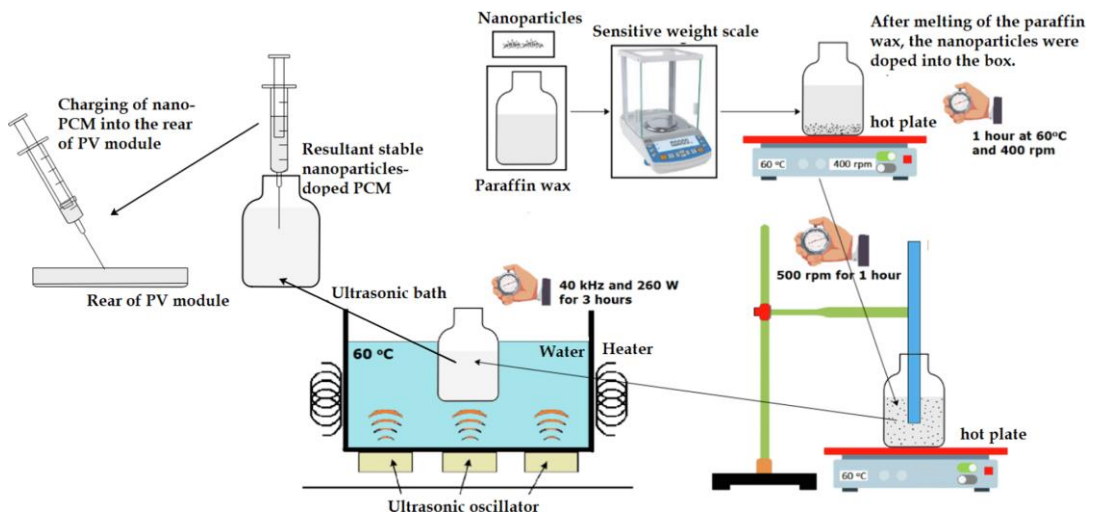
Nanopartiküller farklı kimyasal yapıdaki materyallerden elde edilebilir. Nanopartiküllerin elde edilme yöntemi temelde iki yaklaşıma dayanır. Bunlar aşağıdan yukarıya yaklaşımı (bottom-up) ve yukarıdan aşağıya yaklaşımı (top-down) yaklaşımlarından elde edilir. Bilinen diğer üretim yöntemleri ise; gaz yoğuşumu, mekanik aşındırma ve kimyasal çöktürmedir. Nano parçacıkların diğer yöntemlere göre daha temiz bir ortamda retilbilmesi ve parçacıkların yüzeylerinin farklı maddelerle kaplanmaması sebebiyle en avantajlısı gaz yoğuşturma yöntemidir [35].

Günlük hayatımızda kullandığımız birçok ürünün geliştirilmesinde nanopartiküllerle her gün karşılaşmaktayız. Nanopartiküller genel boyutları nano ölçekte, yani 100 nm'nin altında olan malzemelerdir. Yapılan bu çalışmada parafın waxın termal özelliklerinin iyileştirilmesi için ışıl iletkenliği yükseltmek amacıyla, nanopartiküller kullanılmıştır. rnek bir uygulama ile nanopartikül katkılı malzeme hazırlanmış ve termal özellikleri incelenmiştir.

BÖLÜM 4

MATARYEL YÖNTEM

Binalarda termal enerji depolama yöntemleri ile fosil yakıtların daha az kullanımı sağlanabilir ve çevreye duyarlı ve çevre ile dost iklimlendirme tekniklerinin geliştirilme olanağını sunmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan depolama malzemelerinin geliştirilmesiyle çok verimli sistemler tasarlanabilir. TED uygulaması ise yapı malzemelerinde kullanılan FDM'ler binaların ısıtma ve soğutma yükünü azaltabilir. Bu çalışmada yeni yüksek performanslı yalıtım malzemelerinin geliştirilmeye için önemli bir adım atılmış ve ülkemiz için en kritik konu olan enerji tasarrufu sağlanmasına odaklanılmıştır. Bu çalışmayı gerçekleştirirken termal enerjiyi kolay depolanabilen, temini kolay, toksik olmayan madde olması sebepleriyle organik FDM olan parafin referans olarak tercih edilmiştir. Ancak termal iletkenliğinin düşük olması dezavantajdır, bunun için termal iletkenliği artırıcı olarak termal iletkenliği yüksek olan Al_2O_3 nanopartikülü %5 oranlarda ilave ederek karşılaştırması yapılmıştır. Bunun için kullanılacak yöntem Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Nanopartikül ve FDM malzemesi hassas bir teraziyle ± 0.01 g doğrulukta tartılmıştır.



Şekil 4.1. Kararlı bir nano-FDM numunesi hazırlanması [36].

Daha sonra FDM malzemesi 60 °C'deki ısıtıcı plakada 1 saat boyunca eritildi ve FDM'nin eritilmesinden sonra nanopartiküller eriyen FDM' ye kütlece %5 oranında katıldı. Bu aşamadan sonra, nanopartiküllerin- FDM karışımı iyice karışabilmesi için plakalı ısıtıcı ve karıştırıcıda 1 saat boyunca 60 °C ve 400 rpm'de karıştırıldı. Bu işlemden sonra aynı sıcak plakada karıştırıcı kapatılıp onun yerine mekanik bir parçalayıcı karıştırıcı yardımıyla 60 °C ve 500 rpm'de sıcak bir plakada 1 saat boyunca karıştırılmaya devam edildi. Bu işleme ait görsel Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



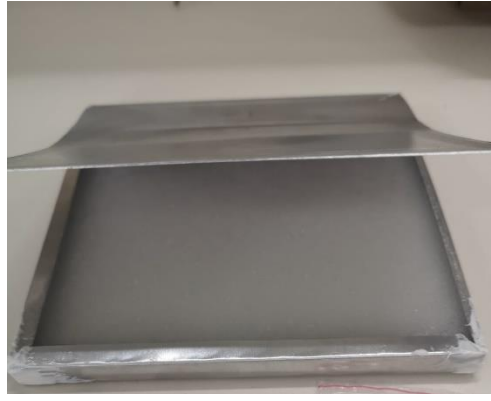
Şekil 4.2. Plakalı ısıtıcı ve karıştırıcı ve nano-FDM numunesi

Ardından Şekil 4.3'te gösterildiği gibi özelliklerinin iyileştirilmesi için, 60 °C'de ultrasonik banyoda 260 W güçte 3 saat boyunca 40 kHz frekansa maruz bırakılır. Daha sonra, sonuçta stabil nanopartiküller içeren bir FDM malzemesi elde edilir.

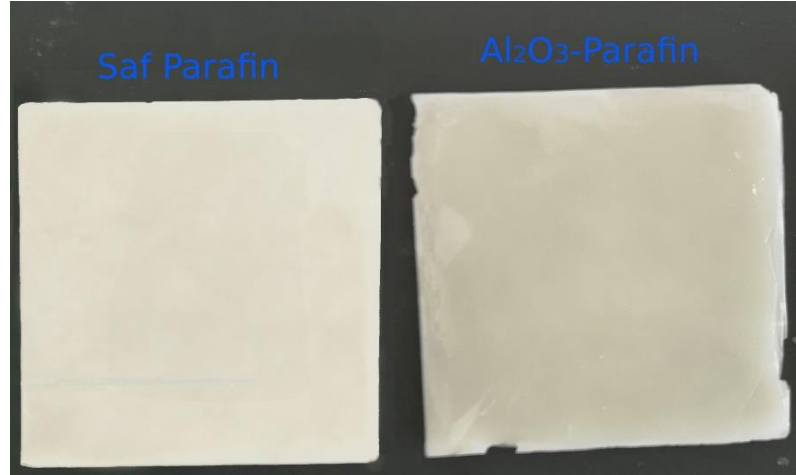


Şekil 4.3. Ultrasonik banyoda nano-FDM numunesi hazırlanması

Bu aşamada, örnek hala sıvı fazdadır ve dolayısıyla metal plakadan yapılmış kalıbın içine hazırlanan nano-FDM numunesi enjekte edilmiştir. Metal plakaya enjekte edilmiş numune ait görsel Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Kalan numuneden bir miktarda ayrılarak DSC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Son adımda, laboratuvar koşullarında (~ 20 °C) soğutulur ve kalıp içinde numunenin katılaşması beklenmiştir. Deneyler için stabil nanopartiküller içeren bir FDM'li yalıtım malzemesi elde edilir. Kalıptan çıkarıldıktan sonra elde edilen 10x15 boyutlarındaki numunelere ait görseller Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Al₂O₃ Katkılı Parafin



Şekil 4.5. Saf parafin ve Al₂O₃ parafin numuneleri

Hazırlanan numunenin termal analizi yapılmak üzere DSC ölçümü yapılır. DSC analiz metodunda, önceden belirlenmiş bir programa göre numune ve referans malzemelerin sıcaklığı kontrollü bir şekilde değiştirilirken, numune ve referans malzeme arasındaki enerji farkının, sıcaklık veya zamana bağlı fonksiyon olarak

incelenmesinden oluşan bir termal analiz yöntemidir. Bundan sebepten yöntemin adı diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi olarak belirtilir. Elde edilen bilgiler ile numunenin nicel enerji değişimleri belirlenebilir.

DSC analizi yönteminde numune ve referans malzeme arasında sıcaklık farkı oluşumu önlenmektedir. Bu nedenle DSC, numune sıcaklığı ve referans sıcaklığının aynı olması için numuneye veya referansa uygulanan enerjiyi ölçer. Analizde kullanılan DSC cihazına ait özellikler ve analiz koşulları Çizelge 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. DSC analiz cihazının teknik özellikleri ve ısıl analiz şartları.

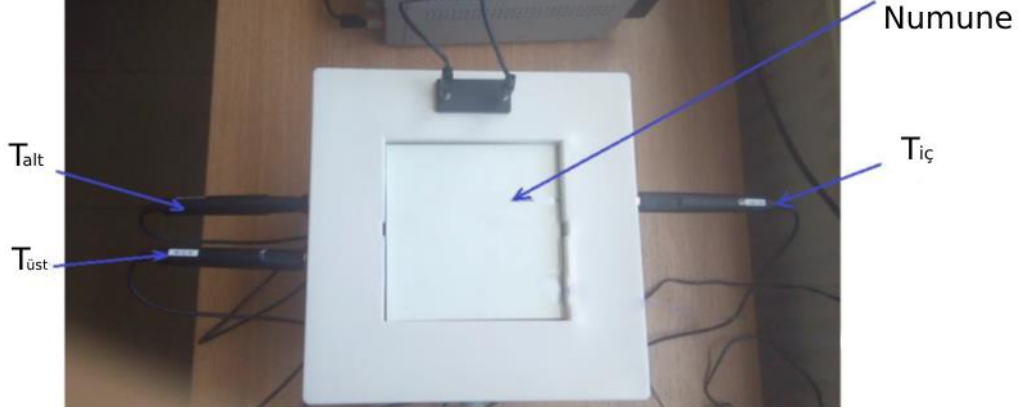
DSC cihazına ait teknik özellikleri	
Marka	HITACHI DSC7020
Sıcaklık aralığı	-150 ~ 725°C
Numune kapları	Alüminyum
Ölçüm aralığı	±350mW
RMS hassasiyet	0,2 µW
Tarama oranı	0,01-100 °C

Çizelge 4.2. Isıl analiz şartları.

Isıl Analiz Şartları	
Numune miktarı	8,514 mg
Ölçüm ortamı	Azot Atmosferi
Isıtma hızı	2 °C /dk.
Isıtma aralığı	25-80 °C

DSC ölçümünden sonra numune örnek bir uygulamada, çift cidarlı ve arası uygun yalıtım malzemeli olan yalıtımlı bir kutu içerisinde saf parafin malzemesinin ve Al₂O₃ katkılı parafin malzemesinin yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği için sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu uygulamada üst tarafına hazırlanan numuneler yerleştirilmiş ve kutu içerisine de elektrikli ısıtıcı bağlanarak güç verilmiştir. Yapılan deneyin şematik görüntüsü Şekil 4.6’da gösterilmiştir. T_{üst} sıcaklığı deney sistemine konulan numunenin üst tarafının sıcaklığı, T_{alt} deney sistemine konulan numunenin alt tarafının sıcaklığı ve T_{iç} deney sistemine konulan numunenin iç tarafının sıcaklığını göstermektedir. Bu sıcaklık T_{üst} sıcaklığı deney boyunca sabit -2 ile +4 °C

arasında tutulmaya çalışılmıştır. Böylece deneyde ısı akısı daha doğru bir şekilde gözlemlenebilir ve daha doğru bir ısı iletim katsayısı hesaplanabilir.



Şekil 4.6. Deney düzeneği.

Kabın içindeki ısıtıcı açıldıktan hemen sonra sistem termal dengede değildir. Termal dengedeki sıcaklık farkını elde edebilmek için sıcaklıklar 1 saat boyunca izlenir ve kaydedilir.

BÖLÜM 5

SİSTEMİN PERFORMANS ANALİZİ

Elde edilen numuneler tek düzlemde bina malzemesinin ısı iletkenliğini belirlemek için yapılan bir ısı transferi deneyidir. Bir malzemenin ısı iletkenliği, ısıyı iletebilme yeteneğini gösterir. Bu özellik, binalardaki enerji verimliliği ve ısı yalıtımı açısından önemlidir. Bu deney numunesinin alt tarafı bir ısı kaynağı ile ısıtılırken diğer yüzeyi 0 °C gibi bir düşük sıcaklıkta sabit tutulmaya çalışılır. Burada ısı sıcak yüzey olan alt plakadan soğuk olan üst plakaya doğru akar. Numune üzerindeki sıcaklık farkı ölçülerek ve numunenin boyutları ile uygulanan ısının bilinmesiyle ısı transfer hızı ve dolayısıyla numunenin ısı iletkenliği hesaplanabilir.

Termal sistemlerin analizi ve iyileştirilmesi için termodinamik analizlerin yapılması son derece önemlidir. Bir sistemdeki verimsizliklerin sebebi ve bu verimsizliklerin etkileri doğru analiz edilmelidir. Kapalı bir sistemde toplam enerji, çevresiyle sadece ısı veya iş etkileşimi sonucunda değişebilir. Bu nedenle kapalı bir sistemin hal değişimi sırasındaki toplam enerji değişimi, sistem sınırlarında gerçekleşen net ısı ve iş geçişine eşittir [37].

Bu sistemde kullanılan parafin için sıcaklık-entalpi ilişkisi Eşitlik 5.1 ve 5.2 aracılığı ile gösterilebilir.

$$h_s = \int_T^{T_m} c_s dT \quad T \leq T_m, \text{ Katı faz} \quad (5.1)$$

$$h_L = \int_{T_m}^T c_L dT \quad T > T_m, \text{ Sıvı faz} \quad (5.2)$$

Parafin tarafından sisteme aktarılan toplam termal enerji ise Eşitlik 5.3 ile tanımlanır.

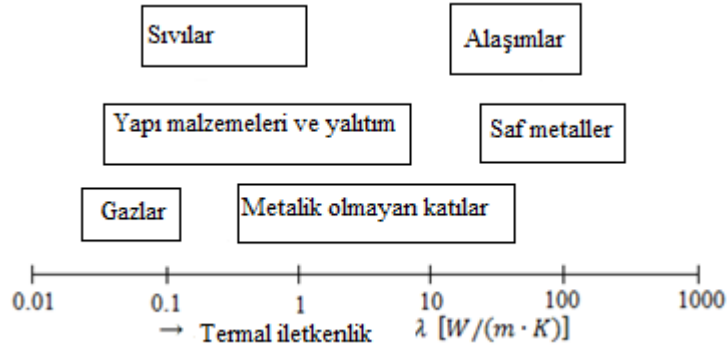
$$\dot{Q}_{pw,total} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_{LT} + \dot{Q}_L \quad (5.3)$$

Eşitlikte \dot{Q}_s parafinin katı fazı için termal enerji kazancı, \dot{Q}_{LT} faz değişimi süresince termal enerji kazancı ve \dot{Q}_L parafinin sıvı fazı için termal enerji kazancıdır [37].

Bir malzeme arasında sıcaklık farkı uygulandığında, ısı akısı gerçekleşir bu olaya termal iletim olarak adlandırılır. Termal iletkenlik, malzemelerin ısıyı iletebilme yeteneğini gösteren bir özelliktir. Malzemenin çevreyle olan ısı alışverişini ısı yalıtımı uygulamaların önemlidir. Bu nedenle malzemenin termal özelliklerini bilmek önemli bir konudur. İletimle ısı transferi sıcaklık farklarının bulunduğu bir termal alanda gerçekleştiğinden çoğu malzeme için termal iletkenliğin sıcaklıkla olan bağıntısı aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\lambda = \lambda_0 [1 + C_1 (T - T_0)] \text{ W/(m.K)} \quad (5.4)$$

Burada, λ T sıcaklığındaki termal iletkenlik, λ_0 referans sıcaklıktaki termal iletkenlik ve C_1 her bir malzemeye özgü sabittir. Normal basınç ve sıcaklıkta bazı madde sınıfları için termal iletkenlik değerleri (gazlar, sıvılar ve katılar) Şekil 5.1'de verilmiştir [36].



Şekil 5.1. Bazı madde sınıfları için termal iletkenlik değerleri [38].

Bina malzemeleri ve yalıtımlar için, termal iletkenlik değerleri 0,02- 3 W/mK aralığında olup bu değer malzeme yapısı, gözeneklilik ve nem düzeyine bağlıdır. Ayrıca bu değerler malzemenin sıcaklığın artmasıyla veya yoğunluğun artmasıyla birlikte artar. Eğer ısı transfer süreci sabit durumdaysa (durağan durum), düz bir duvarın her bir n tabakasından geçen ısı akısı birbirine eşit kabul edilir.

Tek düzlemde yöntemi, bir bina malzemesi örneğinin kalınlığı d ve yüzey alanı A olan termal iletkenliğini (λ) doğrudan sıcaklık farkını ve termal akısı $\frac{\Delta Q}{\Delta T}$ ölçerek belirlenir. Yani, Fourier'nin Isı İletimi Yasasına göre tek düzlemden geçen ısı akısı denklem aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \lambda \frac{A}{d} \Delta \vartheta \quad \text{veya} \quad \lambda = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \frac{d}{A} \frac{1}{\Delta \vartheta} \quad (5.5)$$

Isı akısının yapı malzemesi numunesinden homojen bir şekilde geçmesi ve başka yollarla ısının kaybolmaması (çevreye ısı transferi) ölçüm için önemlidir. Kalorimetrik deney düzeyinde ise çevresine olan ısı kaybını önlemek için iyi bir şekilde yalıtılmıştır. Hazırlanan yapı malzemesi numunesinden geçen ısı akışı için kap içi elektrikle ısıtılır ve numunenin üst yüzeyi doğrudan buz yerleştirilir. Termal dengede, yani sıcaklığın her noktada zaman içinde sabit olduğu durağan durumda kabın içerisindeki elektrik ısıtıcının gücü tam olarak ısı akı ile eşleşir ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (5.6)$$

$$P \cdot t = W = Q \quad (5.7)$$

Burada W içeriye giren elektrik enerjisi, yapı malzemesi numunesinden akan termal enerji olan Q 'ya eşittir. Böylece hazırlanan numunenin termal iletkenliği aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$\lambda = P \frac{d}{A} \frac{1}{\Delta \vartheta} \quad (5.8)$$

Alt sıcaklığın zaman içindeki değişimi yani sıcaklık artışı bir sabit ile orantılıdır ve aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\Delta \vartheta}{\Delta t} = a \cdot \vartheta + b \quad (5.9)$$

Bu denklemin zamanın fonksiyonu $\vartheta(t)$ olarak sıcaklık için çözümü gösterilmiştir.

$$\vartheta(t) = \vartheta_{TE} - \vartheta_{DIFF} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.10)$$

Burada T_{TD} , ΔT_{fark} , τ sırasıyla termal dengedeki iç sıcaklık, termal denge sıcaklığı ile numunenin başlangıç sıcaklığı arasındaki fark ($\Delta T_{fark} = T_{TD} - T_0$) ve zaman sabitini ifade etmektedir. Bu denklem deney boyunca kaydedilen zamana bağlı alt sıcaklık grafiğinin uyarlanmasıyla aşağıdaki denklem gibi yazılabilir.

$$f(x) = A - B * \exp(-x/C) \quad (5.11)$$

Uyarlanan bu denklemdeki A parametresi elde etmek istediğimiz termal denge sıcaklık (T_{TD}) değerine karşılık gelmektedir. Numunenin üst tarafına konulan buz dış sıcaklığı düşük ve mümkün olduğunca sabit tutar. Yine de küçük sıcaklık dalgalanmaları olabileceğinden, Üst sıcaklık değerlerinin ortalaması alınır ve ardından bu ortalama sıcaklık farkının hesaplanmasına dahil edilir ve termal ısı iletim katsayısı hesaplanabilir.

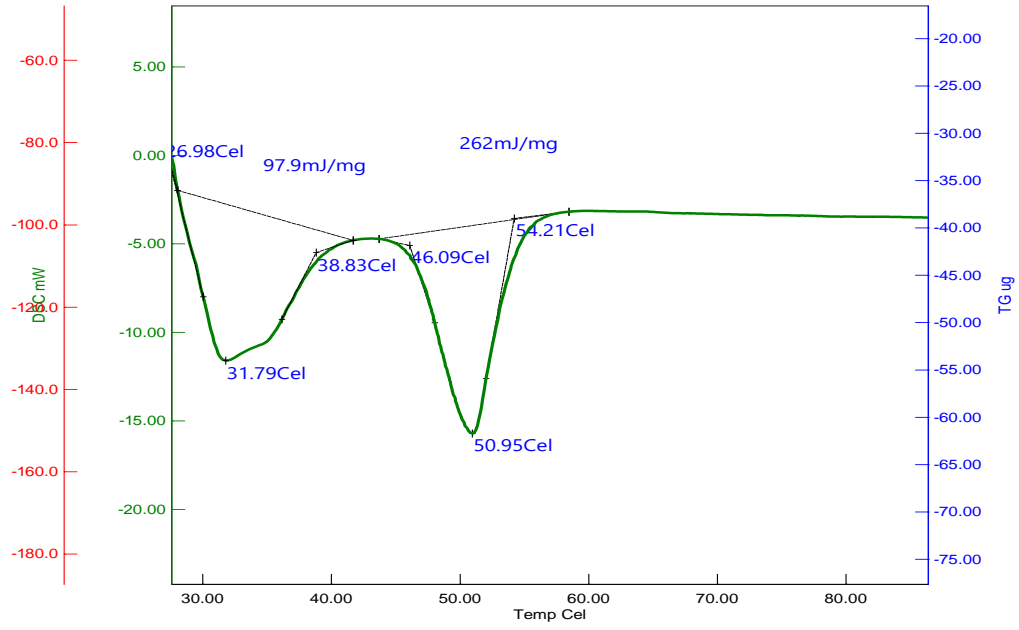
$$\Delta T_{fark} = (T_{TD} - T_{üst}) \quad (5.12)$$

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

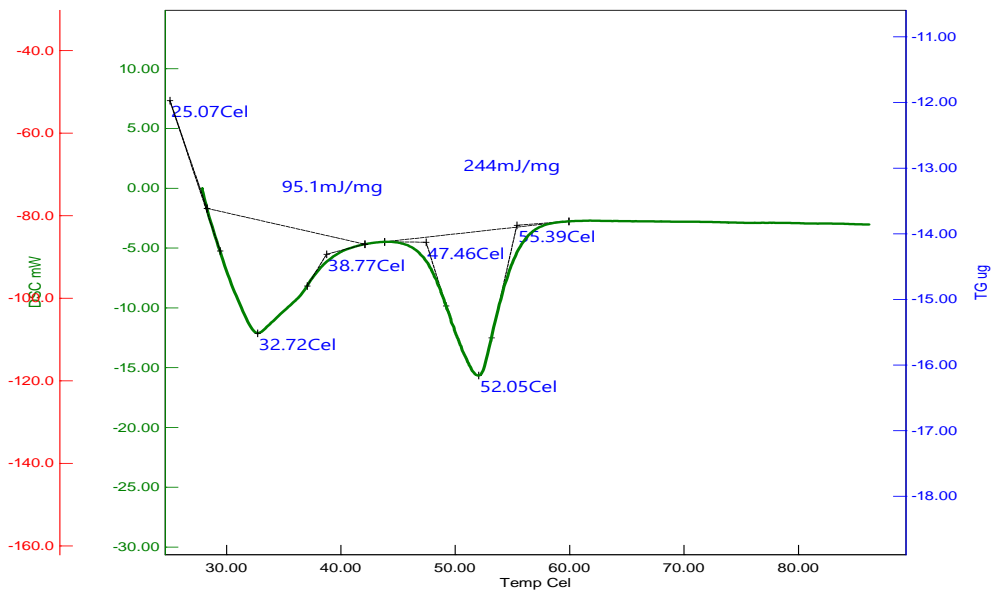
Binalarda enerjinin verimli kullanılması için enerji tüketiminin azaltılması gerekmektedir. Birçok verimlilik artırıcı önlemler vardır. Bunlar bina yalıtımı, verimi yüksek ev aletlerinin kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının binalarda uygulanması gibi önlemlerdir. Ayrıca ısı enerjisinin depolanarak kullanılması da bina enerji tüketimi azaltmaktadır. Faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanımı, bina performansını artırabilir, enerji verimliliğini artırabilir ve sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlayabilir. Bu çalışmada, parafin malzemesinin binalarda kullanımının araştırılmıştır. Parafinin düşük termal iletkenliği nedeniyle zayıf bir ısı transfer hızına neden olur. Bu durum için yapılan birçok çalışmada nanopartikül eklenmiş ve parafinde termal iletkenliğin artmış olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmayla parafin malzemesinin termal iletkenliğini artırmak için içine Al_2O_3 nano partikül ilavesi yapılarak daha yüksek enerji depolama kapasitesi ve daha hızlı şarj/deşarj özellikleri sunan yenilikçi bir termal enerji depolama (TED) malzemesi geliştirilmek istenilmiştir. Bu tür bir yalıtım malzemesi, geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olabilir ve içerisine katılan Al_2O_3 nano partikülleriyle ısıyı daha hızlı bir şekilde absorbe ederek termal konforu artırabilir. Ayrıca elde edilen sonuçlarla inşaat sektöründe sürdürülebilir ve verimli yalıtım çözümlerinin geliştirilmesine katkıda bulunarak, enerji tüketiminin azaltılması ve çevresel etkilerin minimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Referans numune olan parafin ile Al_2O_3 katkılı parafin için yapılan DSC ölçümlerinin sonuçları Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Ayrıca bu eğriden elde edilen termal bulgular Çizelge 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Saf parafin (referans) DSC ölçüm grafiği.

Şekil 6.1’de görülen saf parafin grafiğinde ilk tepe noktası 31,79 °C iken Al_2O_3 katkılı parafinin 23,72 °C olarak belirlenmiştir. Burada katı-katı hal değişimi meydana gelmiş ve sırasıyla 97,9 kJ/kg ve 95,1 kJ/kg gizli ısı enerjisi bulunmuştur. Saf parafin ikinci tepe noktası 50,95 °C iken Al_2O_3 katkılı parafinin 52 °C olarak belirlenmiştir. Burada katı-sıvı hal değişimi (erime) meydana gelmiş ve sırasıyla 262 kJ/kg ve 244 kJ/kg gizli ısı enerjisi bulunmuştur.



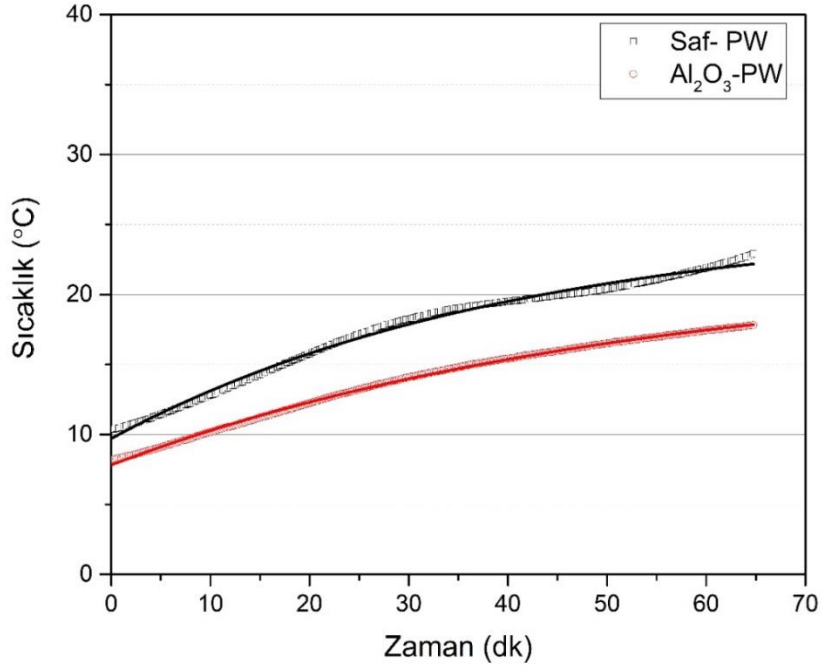
Şekil 6.2. Al_2O_3 katkılı parafin DSC ölçüm grafiği.

Parafin nano Al₂O₃ katkılama yapıldığında erime noktası %2 artış meydana gelmiştir. Saf parafin ve katkılı parafinin toplam gizli enerji depolama kapasiteleri ise sırasıyla 360 kJ/kg ve 339 kJ/kg olarak bulunmuştur. Ayrıca nano Al₂O₃ katkılı parafin saf parafine göre termal enerji depolama kapasitesinde %5,8 oranında düşüş meydana gelmiştir. Birinci tepe noktasına (katı-katı hal değişimi) bakıldığında ise katkılı parafinin %2,9 artış olduğu bulunmuştur.

Çizelge 6.1. Parafin termal özellikleri.

Özellik	Saf Parafin	Al ₂ O ₃ Katkılı Parafin
Birinci Tepe Noktası (Te), °C	31,79	32,72
İkinci Tepe Noktası (Te), °C	50,95	52
Toplam Gizli ısı (L), (kJ/kg)	360	339

Deney, bina malzemesinin (tek levha) düz ve homojen bir örneğini, iki sıcaklık kontrollü plaka arasına yerleştirerek gerçekleştirilir. Bir plaka bilinen bir sıcaklığa ısıtılırken, diğer plaka daha düşük ve sabit bir sıcaklıkta tutulur. Isı daha sonra örnekten sıcak plakadan soğuk plakaya doğru akar. Sabit deney ortamı koşullarında gerçekleştirilen tek düzlemde ısı transfer değişiminin zamana bağlı alt numune sıcaklığı grafiği Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Saf parafin ve Al₂O₃ katkılı parafin numunelerin alt sıcaklıklarının zamana bağlı grafiği.

Sıcaklık zaman grafiğinin termal denge sıcaklığını elde etmek için uyarlanması sonucunda elde edilen bulgular Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Saf parafin için termal denge sıcaklığı 25,37 °C olarak hesaplanırken, Al₂O₃ katkılı parafin için termal denge sıcaklığı 21,98 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2. Sıcaklık zaman grafiğinin eğri uydurulması sonuçları.

Denklem	$y=A_1*\exp(-x/t_1) + y_0$	
Plot	Saf parafin	Al ₂ O ₃
y₀	25.37177±0.19601	21.98187±0.10345
A₁	-15.66489±0.16596	-14.15459±0.09236
t₁	40.72484±1.03346	52.60604±0.67537
R-Square(COD)	0.99379	0.999

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada organik FDM olan parafinin referans numune olarak tercih edilmiş ve ısı iletim katsayısı artırılmak amacıyla Al_2O_3 nano partikülü ilaveli katkılı parafin malzemesi önerilerek elde edilmiştir. Bu doğrultuda analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen bu malzemenin saf parafinden farkları ortaya konmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Saf parafin ve Al_2O_3 nanopartikül katkılı parafin erime sıcaklıkları sırasıyla 50 °C, 95 °C ve 52 °C olarak bulunmuştur. Parafin malzemesine Al_2O_3 nano partikülleri ilave edildiğinde erime noktası %2 artış meydana gelmiştir.
- Saf parafin ve katkılı parafinin toplam gizli enerji depolama kapasiteleri ise sırasıyla 360 kJ/kg ve 339 kJ/kg olarak bulunmuştur. Al_2O_3 katkılı parafinin saf parafine göre termal enerji depolama kapasitesinde %5,8 oranında düşüş meydana gelmiştir.
- Yapılan ısı iletim deneyi sonucunda saf parafinin ve Al_2O_3 katkılı parafinin ısı iletim katsayısı sırasıyla 0,22 W/m°C ve 0,26 W/m°C olarak hesaplanmıştır. Saf parafine kıyasla katkılı parafin %18 daha iyi ısı iletim katsayısına sahip olduğu bulunmuştur.

Bu çalışma yapılan katkılı parafinin termal enerji depolama kapasitesinde %5,8 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Ancak katkılama sonucunda parafinin ısı iletim katsayısı %18 oranında artırılmıştır. Böylece Katkılı parafin dış kaynaktan ısı enerjisini daha hızlı bir şekilde bünyesine alabilirken enerji depolama kapasitesi büyük oranda korunmuş olacaktır. Bu çalışmanın sonucunda daha hızlı şarj-deşarj olabilen Al_2O_3 katkılı yeni bir malzeme elde edilmiş ve daha hızlı ısı transferinin gerekli olduğu yerlerde kullanılabileceği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

1. Scheepers, M., Gamboa Palacios, S., Janssen, G., Moncada Botero, J.; van Stralen, J., Machado dos Santos, C. O., Uslu, A., West, K., "Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050-Scenrio update and analysis of heat supply and chemical and fuel production from sustainable feedstocks", *TNO Report*, P10162 (2022).
2. YILMAZOĞLU, M. Z., "Isı enerjisi depolama yöntemleri ve binalarda uygulanması", *Politeknik Dergisi*, 13 (1): 33–42 (2010).
3. Salgado-Pizarro, R., Martín, M., Svobodova-Sedlackova, A., Calderón, A., Haurie, L., Fernández, A. I., and Barreneche, C., "Manufacturing of nano-enhanced shape stabilized phase change materials with montmorillonite by Banbury oval rotor mixer for buildings applications", *Journal Of Energy Storage*, 55: 105289 (2022).
4. Martín, M., Villalba, A., Inés Fernández, A., and Barreneche, C., "Development of new nano-enhanced phase change materials (NEPCM) to improve energy efficiency in buildings: Lab-scale characterization", *Energy And Buildings*, 192: 75–83 (2019).
5. Kant, K., Anand, A., Shukla, A., and Sharma, A., "Heat transfer study of building integrated photovoltaic (BIPV) with nano-enhanced phase change materials", *Journal Of Energy Storage*, 30: 101563 (2020).
6. Ma, Z., Lin, W., and Sohel, M. I., "Nano-enhanced phase change materials for improved building performance", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 58: 1256–1268 (2016).
7. Chavan, S., Rudrapati, R., and Manickam, S., "A comprehensive review on current advances of thermal energy storage and its applications", *Alexandria Engineering Journal*, 61 (7): 5455–5463 (2022).
8. Amaral, C., Vicente, R., Marques, P. A. A. P., and Barros-Timmons, A., "Phase change materials and carbon nanostructures for thermal energy storage: A literature review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 79: 1212–1228 (2017).
9. Liu, L., Su, D., Tang, Y., and Fang, G., "Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 62: 305–317 (2016).

10. Bose, P. and Amirtham, V. A., "A review on thermal conductivity enhancement of paraffinwax as latent heat energy storage material", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 65: 81–100 (2016).
11. Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., and Fang, G., "Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 82: 2730–2742 (2018).
12. Fukai, J., Kanou, M., Kodama, Y., and Miyatake, O., "Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers", *Energy Conversion And Management*, 41 (14): 1543–1556 (2000).
13. Haghghat, F., "Applying Energy Storage in Building of the Future Best Practice for Architects and Engineers", *Concordia University* (2015).
14. Song, M., Niu, F., Mao, N., Hu, Y., and Deng, S., "Review on building energy performance improvement using phase change materials", *Energy And Buildings*, 158: 776–793 (2018).
15. Canım, D., Kalfa, S., " Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Kabuğunda Kullanımı", *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12(2):355-371 (2021).
16. Temel, Ü. N., Çiftçi, B. Y., " Determination Of Thermal Properties Of A82 Organic Phase Change Material Embedded With Different Type Nanoparticles" *Isı Bilimi ve Tekniğı Dergisi*, 38-2:75-85 (2018).
17. Ülker, N., " Nanopartikül Katkılı Parafinin Isıl Performansının Deneysel Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa (2021).
18. Şahan, N., " Faz Değiştiren Maddelerin Nano Malzemelerle Kullanımının Araştırılması" *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29-4:24-31 (2013).
19. Arslan, B., İbaş M., " Al₂O₃ Nanopartiküllü ve Nanopartikülsüz Parafinin Erime Davranışları Üzerine Sayısal Bir Çalışma" *Politeknik Dergisi*, 24 (3): 1243–1248 (2021).
20. Ülker, N., Bulut, H., Demirtaş, Y., Demircan, G., " Parafine Eklenen Farklı Nanopartiküllerin Isıl Performans Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi " *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5(2):134-145 (2020).
21. Lin S. C., and Al-Kayiem H. H., "Evaluation of copper nanoparticles – Paraffin wax compositions for solar thermal energy storage", *Solar Energy*, 132: 267-278 (2016).
22. Mert, M. S., Sert, M., Mert, H.H., " Isıl Enerji Depolama Sistemleri İçin Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine Bir İnceleme ", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6 (1): 161–174 (2018).

23. Mirmahmutoğulları, E., “Bina Yapı Elemanlarında Kullanıma Uygun Faz Değiştiren Dolgulu Mikrokapsüllerin Sentezi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul, (2022).
24. Gümüş, C., "Isıl Enerjinin Faz Değiştiren Maddeler Kullanılarak Depolanması" Yüksek Lisans Tezi, *Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Ens.*, Yalova (2019)
25. Kozak, M., Kozak, Ş., "Enerji Depolama Yöntemleri", *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2):17-29 (2012).
26. Dincer, I. and Rosen, M. A., "Thermal Energy Storage: Systems and Applications", *John Wiley & Sons*, (2011).
27. Arslan, Ö., “Enerjinin faz değişimi ile tuz hidratlarda depolanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1993).
28. Boztepe, M., “Enerji Depolama”, *EES 487 Yeni Enerji Kaynakları*, (2006).
29. Turan, D., Yönetken, A., "Enerji Depolama Sistemlerinin Araştırılması ve Analizi", *KÜ FEMÜBİD*, 16: 113–121 (2016).
30. Paul, J., Pandey, A. K., Mishra, Y. N., Said, Z., Mishra, Y. K., Ma, Z., Jacob, J., Kadirgama, K., Samykano, M., and Tyagi, V. V., "Nano-enhanced organic form stable PCMs for medium temperature solar thermal energy harvesting: Recent progresses, challenges, and opportunities", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 161: 112321 (2022).
31. Abhat, A., "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials ", *Solar Energy* ,313–332 (1983).
32. Gracia, A., Cabeza, L., "Phase Change Materials and Thermal Energy Storage for Buildings", *Energy And Buildings*, 103: 414–419 (2015).
33. Özönur, Y.,. " Düşük Sıcaklıkta Termal Enerji Depolamasına Uygun Faz Değiştiren Maddelerin Mikrokapsüllenmesi " Yüksek Lisans Tezi, *Ç.Ü. Fen Bilimleri Ens.*, Adana (2004)
34. İnternet: Climator,; <https://www.climator.com/en/pcm-climsel> (2023).
35. Eyiñç, H., " Nanopartikül Ve Faz Değiştiren Malzemeli Bir Fotovoltaik Termal Sistemin Deneysel Analizi " Yüksek Lisans Tezi, *K.B.Ü. Fen Bilimleri Ens.*, Karabük (2018)
36. Karaağaç, M. O., Ergün, A., Ağbulut, Ü., Gürel, A. E., and Ceylan, İ., "Experimental analysis of CPV/T solar dryer with nano-enhanced PCM and prediction of drying parameters using ANN and SVM algorithms", *Solar Energy*, 218: 57–67 (2021).

37. Karaağaç, M. O., " Kombine Doğalgaz Çevrim Santralinin Performans Analizi ", *Politeknik Dergisi*, 22 (2): 319–325 (2019).
38. Janna, W. S., "Engineering heat transfer, 2nd ed." *CRC Press LLC, US*, 9-10 (2000).

ÖZGEÇMİŞ

Gizem İNAL ilk ve orta öğrenimini Kocaeli’nde tamamladı. Sarısu Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2013 yılında Karabük Üniversite Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2018 yılında mezun oldu. 2018-2021 yılları arasında Kocaeli’nde ailesinin şirketinde yarı zamanlı çalışmakta olup, 2021 yılında İstanbul’da Provent Termomekanik firmasında Satış Destek Mühendisi olarak göreve başladı. 2021 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği’nde başlamış olduğu yüksek lisans programına 2023 yılında tamamladı. 2022 yılında evlenerek Karabük’e yerleşti.