

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYA ANABİLİM DALI

KARBON TABANLI KOMPOZİT FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN  
ÜRETİMİ KARAKTERİZASYONU VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seçil SARI

ARALIK 2024

TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYA ANABİLİM DALI**

**KARBON TABANLI KOMPOZİT FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN  
ÜRETİMİ KARAKTERİZASYONU VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Seçil SARI**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"YÜKSEK LİSANS (KİMYA)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 / 11 / 2024**

**Tezin Savunma Tarihi : 17 / 12 / 2024**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sedat KELEŞ**

**Trabzon 2024**

## ÖNSÖZ

“Karbon Tabanlı Kompozit Faz Değişim Malzemelerinin Üretimi Karakterizasyonu ve Isıl Enerji Depolama Özelliklerinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Kimya Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sedat KELEŞ’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Ahmet SARI’ya, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan HEKİMOĞLU’na ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Turgay KAR’a teşekkür ederim.

Doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan anneme, babama, kardeşime teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Son olarak bana taşı toprağı altın olan bir vatan, medeniyet, özgürlük, seçme ve seçilme hakkını veren Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK’e teşekkür ediyor, saygı, sevgi ve özlemlerimi sunuyorum.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Seçil SARI  
Trabzon 2024

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Karbon Tabanlı Kompozit Faz Değişim Malzemelerinin Üretimi Karakterizasyonu ve Isıl Enerji Depolama Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım

Prof. Dr. Sedat KELEŞ’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

17/12/2024

Seçil SARI

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	II
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Enerji Depolama Çeşitleri .....	2
1.1.1. Isıl Enerji Depolama (IED) .....	5
1.1.1.1. Duyulur Isıl Enerji Depolama (DIED) .....	6
1.1.1.2. Gizli Isıl Enerji Depolama (GIED) .....	7
1.1.1.3. Kimyasal Enerji Depolama .....	9
1.2. FDM'lerin Dezavantajlarını Azaltmak İçin Bilinen Çözüm Yolları .....	9
1.2.1. Erime/Donma .....	9
1.2.2. Aşırı Soğuma .....	9
1.2.3. Çekirdekleşme .....	10
1.2.4. Faz Ayrımı .....	10
1.2.5. Düşük Isıl İletkenlik .....	10
1.2.6. Isıl Çevrim Boyunca Kararlılık .....	11
1.2.7. Paketleme ve Sistemin Diğer Bileşenleriyle Uyumluluk .....	11
1.3. Faz Değişim Malzemelerin Sınıflandırılması .....	12
1.3.1. Organik Faz Değişim Maddeleri .....	12
1.3.1.1. Parafinler .....	13
1.3.1.2. Parafin Olmayan Organik Faz Değişim Malzemeleri .....	14
1.3.1.3. Yağ Asitleri ve Yağ Asidi Türevleri .....	14
1.3.1.4. Polietilen Glikoller (PEG) .....	17
1.3.1.5. Ötektik Karışımlar .....	17
1.3.2. İnorganik Faz Değişim Maddeleri .....	18
1.3.2.1. Tuz Hidratlar .....	18
1.3.2.2. Metalikler .....	19

1.4. Faz Değişim Malzemesi Olarak Yağ Asidi Kompozitleri .....	19
1.4.1. Karbon Bazlı Faz Değiştiren Malzemeler .....	20
1.4.2. Grafit Bazlı Yağ Asidi Faz Değişim Malzemeleri .....	20
1.4.3. Karbon Fiber Bazlı Yağ Asidi Faz Değişim Malzemeleri .....	24
1.4.4. Karbon Nanotüp Bazlı Yağ Asidi Faz Değişim Malzemeleri .....	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	28
2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler .....	28
2.2. Kaprik-Stearik Ait Ötektik Karışımın (KA-SA) Hazırlanması .....	28
2.3. Yapıca Kararlı Kompozitlerin Hazırlanması .....	30
2.4. Isıl İletkenlikleri Artırılmış YKK-FDM'lerin Hazırlanması .....	32
2.5. Üretilen YKK-FDM'lerin Karakterizasyonu .....	34
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
3.1. Sızdırmazlık Test Sonuçları .....	38
3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu ( SEM ) Analiz Sonuçları .....	40
3.3. FT-IR Analiz Sonuçları .....	43
3.4. DSC Analiz Sonuçları .....	51
3.5. TGA Analizleri .....	55
3.6. Termal Kamera Sonuçları .....	59
4. SONUÇLAR.....	66
5. ÖNERİLER.....	69
6. KAYNAKLAR .....	70
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

## ÖZET

# KARBON TABANLI KOMPOZİT FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN ÜRETİMİ KARAKTERİZASYONU VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Seçil SARI

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Kimya Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Sedat KELEŞ  
2024, 94 Sayfa

Faz değişim malzemelerinin (FDM), gizli ısı depolama özellikleri ile gözenekli destek materyallerine uygun şartlarda ve uygun oranlarda emdirerek enerjiyi daha sonradan kullanmak üzere depolayan kompozit malzemeler hazırlamak için kullanılmaktadır. Amaç enerjiye ihtiyaç duyulduğu anda kullanılmak üzere depolama prensibine dayanmaktadır. Bu uygulama enerji tasarrufu açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. FDM'nin yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip olması, ısı iletiminin yüksek olması, yapının kimyasal olarak kararlı olması, yanıcı, yakıcı, korozif olmaması aranan en temel özelliklerdir. Bu çalışmada FDM olarak stearil alkol (SA), oktadekan (OD) ve stearik/kaprik asit ötektik karışımı (KA-SA); gözenekli destek materyali olarak hindistan cevizi kabuğundan elde edilmiş aktif karbon (HCK), atık araç lastiğinden elde edilmiş aktif karbon (AAL); ısıl iletkenlik arttırıcı malzeme olarak karbon nanofiber (KNF) ve genişletilmiş grafit (GG)'den oluşan kompozitler üretilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin kimyasal yapıları FT-IR, morfolojik yapıları SEM, termal özellikleri ise DSC ve TGA analiz teknikleriyle, GG ve KNF ilavesiyle ısıl iletkenliğindeki değişimleri de termal kamera ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre hazırlanan kompozitlerin yapıca kararlı oldukları ve ısıl enerji depolama sistemlerinde kullanılmak üzere seçilebileceğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Faz değiştiren malzemeler (FDM), gizli ısıl enerji depolama

Master Thesis

**SUMMARY**

**PRODUCTION CHARACTERIZATION OF CARBON-BASED COMPOSITE PHASE  
CHANGE MATERIALS AND INVESTIGATION OF THEIR THERMAL ENERGY  
STORAGE PROPERTIES**

Seçil SARI

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
**Chemistry Graduate Program**  
Supervisor: Prof. Dr. Sedat KELEŞ  
2024, 94 Pages

Phase change materials (PCM), with their latent heat storage properties, are used to prepare composite materials that store energy for later use by impregnating porous support materials under suitable conditions and in appropriate proportions. The aim is based on the principle of storing energy to be used when it is needed. This application has a very important place in terms of energy saving. The most basic features of FDM are that it has high energy storage density, high heat conduction, chemical stability of the structure, and is not flammable, caustic or corrosive. In this study, PCM was used as stearyl alcohol (SA), octadecane (OD) and stearic/capric acid eutectic mixture (KA-SA); Activated carbon (HCK) obtained from coconut shell, activated carbon (AAL) obtained from waste vehicle tires as porous support material; Composites consisting of carbon nanofiber (CNF) and expanded graphite (GG) were produced as thermal conductivity enhancing materials. The chemical structures of the prepared composites were analyzed by FT-IR, the morphological structures by SEM, the thermal properties by DSC and TGA analysis techniques, and the changes in thermal conductivity with the addition of GG and CNF were analyzed by thermal camera. According to the analysis results, it has been shown that the prepared composites are structurally stable and can be selected for use in thermal energy storage systems.

**Key Words:** Phase change materials (PCM), latent heat energy storage

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.	FDM'ler için faz değiştirme geçişinin şematik diyagramı ..... 7
Şekil 2.	GIED için kullanılan FDM'lerin sınıflandırılması ..... 11
Şekil 3.	Farklı gruplara ayrılan FDM'lerin erime entalpileri ve erime sıcaklıkları..... 12
Şekil 4.	Termal iletkenliği artırma stratejisi..... 19
Şekil 5.	GG'in, ötektik karışımın ve kompozitin SEM görüntüleri ..... 21
Şekil 6.	KA-MA-PA ve KA-MA-PA/5%-10% GG kompozitlerinin DSC eğrileri..... 22
Şekil 7.	KA-MA-PA ve KA-MA-PA/5%-10% GG kompozitlerinin ısı iletkenlikleri ..... 23
Şekil 8.	Erime esnasında PA-SA ve (PA-SA) / KNT'lerin DSC eğrileri ..... 26
Şekil 9.	Katılaşma esnasında PA-SA ve (PA-SA) / KNT'lerin, DSC eğrileri..... 26
Şekil 10.	(PA-SA) / KNT kompozitinin ısı iletkenlikleri..... 27
Şekil 11.	Ötektik bilemişin oluşturulmasında kullanılan sıcaklık-bileşim faz diyagramı ..... 29
Şekil 12.	KA-SA karışımının kütlece % bileşimine ait erime sıcaklığı ..... 30
Şekil 13.	Kompozitlerin hazırlanma prosedürü ..... 31
Şekil 14.	Numunelerin SEM cihazında ölçümleri için hazırlık aşamaları ..... 34
Şekil 15.	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi ..... 34
Şekil 16.	DSC Cihazı ..... 35
Şekil 17.	Tipik bir DSC termogramında karakteristik değerlerin belirlenmesi ..... 35
Şekil 18.	Termal döngü cihazı..... 36
Şekil 19.	TGA cihazı ..... 36
Şekil 20.	HCK ve 3 farklı FDM ile hazırlanan kompozitlerin sızdırmazlık test sonuçları..... 38
Şekil 21.	AAL ve 3 farklı FDM ile hazırlanan kompozitlerin sızdırmazlık test sonuçları..... 39
Şekil 22.	SEM görüntüleri a) Saf HCK b) HCK/10%GG c) HCK/10%KNF..... 40
Şekil 23.	a) Saf HCK b) HCK/SA c) HCK/10%GG/SA d) HCK/10%KNF/SA..... 41
Şekil 24.	a) Saf HCK b) HCK/OD c) HCK/10%GG/OD d) HCK/10%KNF/OD ..... 41
Şekil 25.	a) Saf HCK b) HCK/(KA-SA) c) HCK/10%GG/(KA-SA) ..... 41
Şekil 26.	a) Saf AAL b) AAL/SA c) AAL/10%GG/SA d) AAL/10%KNF/SA..... 42

Şekil 27.	a) Saf AAL b) AAL/OD c) AAL/10%GG/OD d) AAL/10%KNF/OD .....	42
Şekil 28.	a) Saf AAL b) AAL/(KA-SA) c) AAL/10%GG/(KA-SA).....	42
Şekil 29.	Saf HCK, AAL, GG ve KNF için elde edilen FT-IR spektrumları .....	44
Şekil 30.	Saf HCK, SA, GG ve KNF bileşenli kompozitlerin FT-IR spektrumları ....	45
Şekil 31.	HCK / SA kompozitlerinin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları .....	45
Şekil 32.	Saf AAL, SA, GG ve KNF bileşenli kompozitlerin FT-IR spektrumları.....	46
Şekil 33.	AAL / SA kompozitlerinin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları .....	46
Şekil 34.	Saf HCK, OD, GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları .....	47
Şekil 35.	HCK / OD kompozitlerinin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları .....	47
Şekil 36.	Saf AAL, OD, GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları .....	48
Şekil 37.	AAL / OD kompozitlerin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları.....	48
Şekil 38.	Saf HCK, (KA-SA), GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları .....	49
Şekil 39.	HCK / (KA-SA) kompozitlerin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları .....	49
Şekil 40.	Saf AAL, (KA-SA), GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları .....	50
Şekil 41.	AAL / (KA-SA) kompozitlerin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları .....	50
Şekil 42.	HCK / SA kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları .....	52
Şekil 43.	HCK / OD kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları .....	52
Şekil 44.	HCK / (KA-SA) kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları .....	53
Şekil 45.	AAL / SA kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları .....	53
Şekil 46.	AAL / OD kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları .....	54
Şekil 47.	AAL / (KA-SA) kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları .....	54
Şekil 48.	HCK kompozitlerinin TGA spektrumları .....	56
Şekil 49.	AAL kompozitlerinin TGA spektrumları.....	58
Şekil 50.	Isı iletimi artırılmış HCK / SA kompozitlerin termal kamera görüntüleri.....	60
Şekil 51.	Isı iletimi artırılmış HCK / OD kompozitlerin termal kamera görüntüleri.....	61

Şekil 52.	Isı iletimi artırılmış HCK / (KA-SA) kompozitlerin termal kamera görüntüleri.....	62
Şekil 53.	Isı iletimi artırılmış AAL / SA kompozitlerin termal kamera görüntüleri.....	63
Şekil 54.	Isı iletimi artırılmış AAL / OD kompozitlerin termal kamera görüntüleri.....	64
Şekil 55.	Isı iletimi artırılmış AAL / (KA-SA) kompozitlerin termal kamera görüntüleri.....	65



## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1.	Enerji depolama çeşitleri..... 2
Tablo 2.	Faz değiştiren malzemelerde nanoteknoloji..... 4
Tablo 3.	Bazı parafinlerin erime sıcaklıkları ve erime gizli ısıları..... 14
Tablo 4.	FDM olarak araştırılan bazı yağ asitleri..... 15
Tablo 5.	Faz değiştiren bir materyal olarak yağ asidine genel bakış ..... 15
Tablo 6.	Polietilen glikolün molekül ağırlığına bağlı olarak erime sıcaklıkları..... 17
Tablo 7.	Bazı ötektik FDM örneklerinin gizli ısıları ve erime noktaları..... 18
Tablo 8.	Literatürde yer alan bazı FKK-FDM'lerin ısı iletkenlikleri ..... 20
Tablo 9.	Grafit ve yağ asidi faz değişim malzemelerine genel bakış..... 23
Tablo 10.	KNT / Yağ asidi FDM'lerin özellikleri ve uygulamaları ..... 27
Tablo 11.	Kullanılan FDM'lerin bazı fiziksel özellikleri..... 28
Tablo 12.	HCK/FDM ve AAL/FDM'den oluşan YKK-FDM'lerin listesi..... 32
Tablo 13.	Tez kapsamında hazırlanan tüm YKK-FDM'lerin listesi ..... 33
Tablo 14.	Üretilen kompozitlerin en yüksek FDM emme oranları ..... 39
Tablo 15.	Kompozit bileşenlerinin ve kompozitlerin DSC verileri ..... 55

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

FDM	: Faz değişim malzemesi
YKK-FDM	: Yapıca kararlı kompozit faz değişim malzemesi
SA	: Stearil alkol
OD	: Oktadekan
KA-SA	: Kaprik asit-Stearik asit ötektik karışımı
HCK	: Hindistan cevizi kabuğu
AAL	: Atık araç lastiği
GG	: Genişletilmiş grafit
KNF	: Karbon nanofiber
KNT	: Karbon nanotüp
IED	: Isıl enerji depolama
DIED	: Duyulur ısıl enerji depolama
GIED	: Gizli ısıl enerji depolama
PEG	: Polietilen glikol
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
TGA	: Termogravimetrik analiz

## 1. GENEL BİLGİLER

1860-1914 yıllarını kapsayan, kas gücünün yerini buhar makinelerinin aldığı, teknoloji devrimi olarak da bilinen birinci sanayi devriminin başlamasıyla beraber insan refahı da artmıştır. Bu refah artışı nüfusun artmasına, nüfus artışı ise daha fazla enerji ihtiyacına sebep olmuştur. İnsanoğlunun enerji talebi çoğunlukla fosil yakıtlar olarak da bilinen yenilenemez enerji kaynakları tarafından karşılanmaktadır. Fosil yakıtların, yenilenemez enerji kaynağı olarak isimlendirilmesinin sebebi; oluşumları için canlı organizmalarının öldükten sonra oksijensiz ortamda milyonlarca yıl parçalanma, bozulma reaksiyonlarıyla oluşması ve bu oluşumun sürekli olmamasından kaynaklanmaktadır. Oluşumları milyonlarca yıl süren bu kaynaklarının hızlı bir şekilde tüketilmesiyle yakın gelecekte evrensel bir enerji kaynağı sıkıntısı yaşanacağı aşikardır. Peki neden yenilenebilir enerji kaynakları arıyoruz sorununun cevabını ise; fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmesinin yanında bu yakıtların kullanılmasıyla CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> ve su buharı ana bileşenlerinden oluşan sera gazının atmosferdeki derişiminin artmasıyla telafisinin neredeyse imkansız olduğu her türlü canlıyı olumsuz etkileyecek küresel ısınma, ozon tabakasının delinmesi ve bunlara bağlı olarak güneşten gelen zararlı ışınların canlıların yaşamı üzerine olumsuz etkisi ile bizi karşı karşıya bırakmaktadır. Bu olumsuz şartlar araştırmacıları temiz, sürdürülebilir enerji kaynağı arayışına yönlendirmiştir. Güneş enerjisi, Rüzgar enerjisi, Hidrojen yakıtlar, Biyolojik atıklar, Jeotermal enerji kaynakları ve Su gücü yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak gerçekleştirilen enerji üretiminde, hem var olan yenilenemez enerji kaynaklarının miktarlarını hem de dünyanın yaşam için sürdürülebilirliğini korumak amaçlanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla çevreye verdiği zarar, yenilenemez enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında önemli miktarda az olması ve yenilenebilir enerji kaynakların neredeyse hiç çevre kirliliği oluşturmaması da çalışmaların yönünü yenilenebilir enerji kaynaklarına çevirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesikli bir üretim prosesine sahip olması dezavantajından kaynaklı, enerji ihtiyacının gerek duyulduğu anlarda, istenilen miktarlarda ulaşılabilir olması için yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanma ihtiyacını oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi üzerinden neden kesikli bir proses olduğunu özetleyecek olursak, günün her saati ve her mevsim aynı oranda enerji güneşten temin edilememektedir.

Güneşten elde ettiğimiz enerji miktarı sabah ve akşam saatlerinde en az miktarda iken, enerji tüketim talebimiz ise oldukça fazla miktardadır.

Güneşten elde ettiğimiz enerjinin en yoğun olduğu öğle saatlerinde ise enerji tüketim ihtiyacımız en az miktardadır. Hem mevsimsel olarak hem de gün içerisinde bile güneşten aynı enerji miktarının alınamaması gibi önemli bir enerji tedarik sorunundan kaynaklı, yenilenebilir enerjiyi daha sonra kullanmak üzere depolama ihtiyacını doğurmaktadır (Leungtongkum vd., 2023; Patel vd., 2022; Shabtay & Black, 2014; Sun vd., 2022; Venkateswarlu & Ramakrishna, 2022).

### 1.1. Enerji Depolama Çeşitleri

Enerji depolama metotları enerjinin depolanma şekline göre; Mekanik enerji depolama, Kimyasal enerji depolama, Biyolojik enerji depolama, Manyetik enerji depolama ve Isıl enerji depolama olarak 5'e ayrılmaktadır (Baylin, 1979). Bu depolama yöntemleri, enerjinin daha sonradan ihtiyaç doğrultusunda kullanmak üzere güvenli bir şekilde enerjinin depolanması, depolandığı koşulda uzun müddet muhafaza edilmesi ve en az kayıpla ya da hiç kayıp olmadan tekrar kullanılmasını amaçlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarını depolayarak da aynı zamanda ekonomiye katkı sağlamak ve dünya üzerinde yaşayan tüm canlı sistemlerinin sağlığına zarar vermeden enerji üretmek ve tüketmekte diğer önemli amaçlar arasındadır.

Tablo 1. Enerji depolama çeşitleri

<b>Elektrik ve Manyetik Enerji Depolama</b>	<b>Kimyasal Enerji Depolama</b>
Elektriksel kapasitör içinde depolama,	Sentetik yakıtlarla depolama,
Elektro mıknatıslar ile depolama,	Termokimyasal depolama,
Süper iletken bobinler ve magnetlerde depolama	Elektrokimyasal depolama,
	Fotokimyasal depolama
<b>Isıl Enerji Depolama (IED)</b>	<b>Mekanik Enerji Depolama</b>
Duyulur ısı depolanma,	Potansiyel depolama,
Gizli ısı depolanma,	Kinetik depolama,
Kimyasal enerji depolama	Sıkıştırılmış gaz içinde depolama

Isıl enerji depolamayı, yukarıda sayılan 5 farklı enerji depolama metotlarından ayıran özellikleri; uygulama kolaylığı ve uygun maliyet gibi avantajlarına sahip olmasıdır. Faz değişim yoluyla enerji depolayan sistemler için çalışmalar, daha çok yeni faz değişim maddelerinin bulunması, geliştirilmesi ve iyileştirilmesine yöneliktir. Faz değiştiren maddeler (FDM), kullanılacağı alan için gerekli sıcaklık aralığında erime sıcaklığına sahip olan, bu sıcaklık aralığında faz değişimini gerçekleştiren ve faz değişim sırasında önemli bir miktar ısının absorplanmasını ve desorplanmasını sağlayan malzeme türüdür (Sharif vd., 2015). Kullanılacak FDM'lerin yüksek özgül ısı kapasitelerine sahip olmaları istenmektedir. Seçilen FDM'lerin, faz değişim esnasında hacim değişiminin 10%'un altında olması istenmektedir (Weng vd., 2019). Faz değişim (erime/donma) döngüsünün çok olması ve bu döngüler boyunca kimyasal olarak kararlılıklarını sürdürmeleri istenir. FDM'lerin, prosesin çalışması için seçilmiş sıcaklık aralığında faz dönüşümlerini gerçekleştirmeleri gerekmektedir. FDM'lerde aranan diğer önemli özellikler ise aşırı soğuma davranışı göstermemeleridir. Termal iletkenliklerinin yüksek olması istenir eğer değilse termal iletkenliklerini artıracak iyileştirmeler yapılır. Bu şekilde FDM'lerin iletkenlikleri artırılarak şarj/deşarj süresinin azaltılması ve ısı depolama verimliliklerinin artırılması amaçlanır (Rathod & Banerjee, 2013). Düşük ısı iletkenliğe sahip olan FDM'lere, metal oksit nano dolgu, karbon nanofiber, grafen, karbon nanotüp, kumaş ve pul pul dökülmüş grafit, yardımıyla FDM'lerin ısı transferini artırmak için çeşitli seçenekler bulunmaktadır (Döğüşcü vd., 2021; Goli vd., 2014; Khodadadi vd., 2013; Salaün vd., 2010; Sedeh & Khodadadi, 2013; Xiang & Drzal, 2011; Xiong vd., 2013).

Tablo 2. Faz değiştiren malzemelerde nanoteknoloji

Faz Değişim Malzemelerinin Türü	Dolgu türleri	Notlar	Referanslar
Su bazlı nanoakışkan	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoparçacığı	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nanoparkiküller, FDM'lerin termal özelliklerine odaklanır; nanopartiküller şarj / deşarj süresini azaltır.	(Altohamy vd., 2015)
Deiyonize su (DI) bazlı	Çok duvarlı karbon nanotüpler	Çok duvarlı karbon nanotüpler, çekirdekleştirici bir ajan olarak görev yaparak enerji tasarrufu sağlar.	(Altohamy vd., 2015)
Biyo-bazlı kompozit	Silika dumanı ve pul pul dökülmüş grafit nanoplateletler	Silika dumanı ve pul pul dökülmüş grafit nanoplateletler ile biyo-bazlı FDM'lerin termal iletkenliğinde artış sağlanır.	(Kang vd., 2015)
Saf su	Nano ölçekli Cu parçacıkları	Cu nanopartikülleri, su bazlı soğutucunun termal iletkenliğini artırmaya yardımcı olur.	(Kang vd., 2015)
Su	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kullanılarak sürtünme faktörü güçlendirilir. Ancak uzun vadede istikrarın, topaklanmanın önemli bir sorun olduğu görölmektedir.	(Ho vd., 2010)
Parafin (n-oktadekan)	Emülsifiye edici alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) nanopartikülleri	Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) nanopartikülleri, parafinin termal iletkenliğini artırır.	(Ho vd., 2010)
Poliüretan	Karbon nanotüp sünger	Hızalanmış karbon nanotüpler (KNT'ler) ağ yapısı sayesinde enerjinin şarj/deşarj süresini azaltarak verimi artırır.	(Aftab vd., 2019)
Poliüretan	Grafen oksit	Faz değişim davranışı GO'nun boyutuna göre değişmektedir.	(Aftab vd., 2019)
Soya ve parafin mumu	Karbon nanofiber (KNF) ve karbon nanotüp (KNT)	KNF veya KNT yüklemesinin artırılması, FDM'nin termal iletkenliğini azaltır, buna rağmen KNF, termal iletkenlik açasından KNT'den daha mükemmel bir dolgu maddesidir.	(Cui vd., 2011)
Parafin	Grafit nanolifler	Grafit fiberin termal etkisi balıksırtı, şerit veya trombosit gibi fiberin türüne bağlıdır.	(Weinstein vd., 2008)
Organik ester	Gümüş-titanyum hibriti	Gümüş-titanyum hibritinin takviye edilmesi viskozite, termal kararlılık ve ısı depolamada iyileşme olmuştur.	(Weinstein vd., 2008)
Kaprik asit / stearik asit / palmitik asit karışımı	Karbon silikon dioksit	Nano-silikon dioksit, 500 ısıtma/soğutma döngüsü boyunca yüksek gizli ısı değeri, mükemmel kimyasal ve termal kararlılık gösterdi.	(Weinstein vd., 2008)

Parafin	Çok duvarlı karbon nanotüpler	Çok duvarlı karbon nanotüpün çapı gizli ısıyı etkileyebilir, bu şekilde daha küçük çaplı çok duvarlı karbon nanotüpler, nanoakışkanın daha düşük gizli ısısına ulaşılmasına yol açar. Daha küçük çap, termal iletkenliği artırabilir.	(Zabalegui vd., 2014)
Oktadekanoik asit (Stearik asit)	Üç boyutlu grafen aerojel	Üç boyutlu grafen aerojel, mükemmel termal iletkenlik ve yüksek ısı depolama kapasitesinin elde edilmesine yardımcı olur.	(Zabalegui vd., 2014)
Su	Titanyum dioksit nanopartiküller	Faz geçiş sıcaklığı, faz geçiş süresi de nanoakışkanın entalpisi ile ilgili olarak değişmektedir.	(Jia vd., 2013)
Oktadekanoik asit (Stearik asit)	Grafen ile kaplanmış $Al_2O_3$	Grafen ile kaplanmış stearik asit $Al_2O_3$ , termal iletkenliği artırır ve stearik asidin arayüzey termal direncini azaltır.	(Zhou vd., 2014)
1-oktadekanol (stearil alkol)	Grafen	Nanomalzemeler kıyaslandığında grafen ısı iletimi daha iyi artırmaktadır.	(Yavari vd., 2011)
Parafin	Nanomagnetit	Nanomagnetit dahil edilmesi, parafinin depolama kapasitesini, ısı transfer özelliklerini ve termal iletkenliğini geliştirmiştir.	(Şahan vd., 2015)
Tetradekanol	Bakır nanoteller	Bakır nanotelin katılanması termal iletkenliği artırmıştır. Bakır nanoteller ise faz değişim entalpisini azaltmıştır.	(Zeng vd., 2012)
Palmitik asit	Azot katkılı grafen	Azot katkılı grafen takviyeli nanokompozitlerin ısı iletkenliği, elektriksel iletkenliğini, termal güvenilirliğini kimyasal kararlılık artmıştır.	(Mehrali vd., 2014)
Palmitik asit / Polivinil bütiral	Genişletilmiş grafit	GG, FDM'lerin sızıntı problemini azaltmasının yanı sıra termal iletkenliği artırmaya da yardımcı olur.	(Lin vd., 2018)
Parafin mumu	Hibrit grafen aerojel	Parafin'in ısı iletkenliği, yüksek termal enerji depolama yoğunluğu, mükemmel termal güvenilirliği ve kimyasal kararlılığı, hibrit grafen aerojel ile elde edilmiştir.	(J. Yang vd., 2018)

### 1.1.1. Isıl Enerji Depolama (IED)

Isıl enerji depolama sistemleri; ısının gerektiği zaman geri alınabilmesi için tamamen tersinir bir proses olarak oluşturulan depolama sistemidir. Depolama malzemelerine ve ısının depolanma prosesine bağlı olarak kendi içinde 3'e ayrılmaktadır. Bunlar; proses

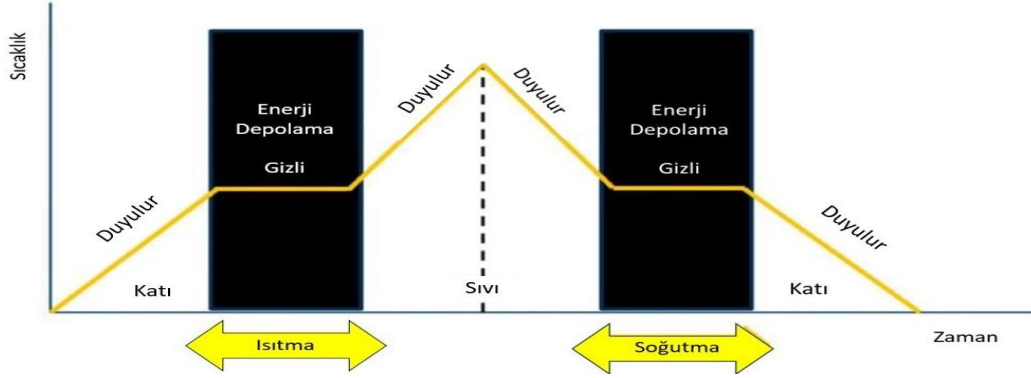
sırasında faz değişiminin olmadığı katı veya sıvı bir ortamın kullanılmasıyla, ısının depolandığı duyulur ısı enerji depolama, proses sırasında faz değişiminin gerçekleşmesiyle ısının depolandığı gizli ısı enerji depolama ve tersine çevrilebilir kimyasal bir tepkime sonucunda ısının depolandığı kimyasal enerji depolamadır.

Duyulur ısı enerji depolama (DIED) 'da tek fazlı katı veya sıvı bir ortam kullanılır. Diğer bir değişle faz değişimi gerçekleşmez. Katı veya sıvı olabilen bu ortama dışarıdan ısı vererek kinetik enerjisi artırılır, faz değişimi olmaksızın dışarıdan aldığı ısıyı, enerji olarak depolar. Sistemin bulunduğu çevrenin sıcaklığının düşmesiyle, sistemden çevreye önceden aldığı ısıyı geri verme prensibine dayanmaktadır. (m: kütle (kg), Cp: sabit basınç altındaki özgül ısı (kJ/kg.K), Ts: Son sıcaklık (K), Ti: İlk sıcaklık (K))

$$Q = \int_{T_i}^{T_s} mC_p dt \quad (1)$$

$$Q = mC_p(T_s - T_i) \quad (2)$$

1. ve 2. denklemlerden de anlaşılacağı gibi duyulur ısı enerji depolamada, depolanan enerjinin miktarı, depolama maddesinin özgül ısısına ve kütlesine bağlı olarak değiştiiği görülmektedir. Duyulur ısı ile enerji depolamanın bazı dezavantajlarından dolayı pek tercih edilmemektedir. Bu dezavantajların başında, en önemli sorunlardan biri enerji depolama yoğunluğunun düşük olmasıdır. Bu ana sorunun çözümü için daha fazla madde kullanılması hacmi artıracak bu da kontrolü zorlaştırarak maliyeti artıracaktır. Birim miktar maddenin sıcaklığını artırmak için gerekli enerji ne kadar büyükse depolanan enerji de o kadar büyük olacağından dolayı özgül ısı değeri yüksek olan FDM'ler seçilerek daha az miktar FDM kullanılmasıyla enerji depolama yoğunluğu artırılmaktadır. Duyulur ısı enerji depolama malzemesi olarak kullanılacak maddelerde aranan bazı özellikler vardır. Bu özellikler büyük ısı kapasitelerine sahip olmaları, yanıcı ve yakıcı olmamaları, malzemelerin uzun yıllar boyunca yapıca kararlılıklarını korumaları, zehirli ve korozif olmamaları, ekonomik olmaları ve kolay temin edilebilmeleridir. Duyulur ısı enerji depolama sıvı fazdaki malzemeye örnek olarak suyu, katı fazdaki malzemeye örnek olarak çakıl taşları veya tuğla verilmektedir.



Şekil 1. FDM'ler için faz değiştirme geçişinin şematik diyagramı (Du vd., 2018)

Gizli ısı enerji depolama (GIED), termal enerji depolama metotlarından ikincisidir. Uygun maliyeti ve termal enerji depolama verimin diğer metotlara göre daha yüksek olmasından dolayı avantajlı konumdadır. Gizli ısı enerji depolamada ısı depolayacak madde çevreden ısıyı absorplayarak, atomların ve moleküllerin titreşimsel iç enerjisindeki artışıyla enerjiyi depolarlar, faz değişim sıcaklığına kadar sıcaklığı yükselir, faz değişim sıcaklığına ulaştıklarında ise (erime boyunca) sıcaklıkları sabit kalır. Bu süreçte atomik bağlar gevşer, malzeme katıdan sıvıya geçerek enerjiyi depolar (Du vd., 2018). Endotermik bir süreç olan bu durum sonucunda katı madde eriyerek sıvı faza geçer. Gizli ısı enerji depolama, ısının enerji olarak depolanması ve istenilen zamanda kullanılmak üzere geri alınması prosesine dayanmaktadır (Venkateswarlu & Ramakrishna, 2022). GIED'e, DIED'ya göre üstün tarafı; GIED'e daha yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip olmasıdır. Ayrıca GIED'de, faz değişimi esnasında sıcaklığın sabit kalması da prosesin kontrolünü kolaylaştırmaktadır (H. Zhang, Baeyens, vd., 2016). Aşağıda verilen eşitlikler ile gizli ısı enerji depolama sistemlerinin enerji depolama kapasiteleri hesaplanmaktadır. (Cpk: Katı fazın sabit basınçtaki özgül ısı değeri kJ/kg.K, Cps: Sıvı fazın sabit basınçtaki özgül ısı değeri kJ/kg.K, T<sub>0</sub>: Başlangıç sıcaklığı (K), T<sub>1</sub>: Erime sıcaklığı (K), T<sub>2</sub>: Buharlaşma sıcaklığı (K), λ<sub>e</sub>: Erime gizli ısısı kJ/kg)

$$Q = \int_{T_0}^{T_1} mCpk dT + m\lambda_e + \int_{T_1}^{T_2} mCps dT \quad (3)$$

$$Q = m[Cpk(T_1 - T_0) + \lambda_e + Cps(T_2 - T_1)] \quad (4)$$

Gizli ısı enerji depolamada beş tür faz değişimi vardır. Bunlar; katı-katı faz değişimleri, katı-sıvı faz değişimleri, katı-gaz faz değişimleri, sıvı-sıvı faz değişimleri ve

son olarak sıvı-gaz faz değişimleridir. Yukarıda belirtilen faz değişim türleri sahip oldukları avantajlar ve dezavantajlar değerlendirilerek, gizli ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılır. Katı-katı geçişinde bir kristal formdan başka bir kristal forma geçiş sırasında enerji depolanmaktadır (X. Wang vd., 2000). Katı fazdan gaz faza ve sıvı fazdan gaz faza geçiş esnasında istenilen bir özellik olan yüksek enerji depolama kapasitelerine sahip olma avantajlarının yanında faz değişiminden kaynaklı büyük hacim değişimleri dezavantajı bu tür malzemelerin ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılmasını kısıtlamaktadır (Abhat, 1983). Katı fazdan sıvı faza geçiş ile depolanan enerji yoğunluğu diğer faz değişimlerine göre daha azdır. Bu dezavantajın yanında hacim değişimlerinin ihmal edilebilecek kadar az olması tasarlanacak kapların, yüksek basınca dayanıklı kaplar olmasını gerektirmez. Böylece maliyet azalır ve uygulanabilirlik kolaylaşır. Katı-sıvı FDM'lerin ısı iletim değerleri de genellikle düşüktür. Gizli ısı enerji depolamada kullanıldıklarında ısı kaynakları ve FDM'ler arasında ısı iletimini sağlayacak malzemeler gerekmektedir. Tez içerisinde bu bölümden itibaren "gizli ısı enerji depolama (GIED)" ve "faz değişim malzemesi (FDM)" terimleri sadece katı-sıvı faz değişimlerini ifade etmek için kullanılmıştır. Termal enerji depolama sistemlerinde kullanılacak FDM'lerde aranması gereken birtakım özellikler mevcuttur. Bu özellikler termokimyasal, kinetik, kimyasal ve ekonomik özellikler olarak dört başlık altında sınıflandırılmaktadır (Buddhi & Sawhney, 1994; Hale vd., 1971; Luo vd., 2022)

- Termal Özellikler ; FDM'ler çalışma sıcaklığı olarak seçilen sıcaklıkta eriyebilmeli, kısaca uygun faz değişim sıcaklığına sahip olmalı, istenilen termo-fiziksel özelliklere sahip olmalı, erime gizli ısı yüksek olmalı, yüksek özgül ısıya sahip olmalı, ısı iletkenliği yüksek olmalı, uygun yoğunlukta olmalı, faz değişimi süreci boyunca hacim değişimi göstermemeli ya da ihmal edilebilir düzeyde olmalı, düzenli erime katılaşma davranışı göstermeli, depolama kabına herhangi bir zarar vermemelidir.
- Kinetik Özellikler; FDM'ler sıvı faz aşırı soğuma davranışı göstermemeli, faz ayrımı göstermemeli, kristal oluşum hızı yüksek olmalıdır.
- Kimyasal Özellikler; FDM'ler yüksek verim ile uzun süreli kullanımı için erime katılaşma döngüsü tamamen tersinir olmalı, erime katılaşma döngüleri boyunca kimyasal kararlılığını sürdürebilmeli, depolandığı alan ister bulunduğu kap ister yapı malzemeleri olsun korozif özelliğe sahip olmamalı, toksik, yanıcı, yakıcı, patlayıcı olmamalı.

- Ekonomik Özellikler; FDM'ler uygun maliyetli olmalı, kolay temin edilebilir olmalı, kolay imha edilebilir olmalı, sürekliliği olmalıdır (Cao vd., 2015; Parameshwaran vd., 2010; S. D. Sharma, 1999).

Kimyasal enerji depolama metodu, kimyasal bir tepkimenin gerçekleşmesi esnasında ortaya çıkan ısının, enerji olarak depolanması ve salınmasına dayanmaktadır. Teknik ve ekonomik zorluklardan dolayı pek tercih edilmemektedir.

## 1.2. FDM'lerin Dezavantajlarını Azaltmak İçin Bilinen Çözüm Yolları

### 1.2.1. Erime/Donma

FDM'lerin bazıları düzensiz erime/donma davranışı gösterirken, bazılarının kristal oluşum hızları oldukça düşüktür. Bu dezavantajı giderebilmek için uygun çekirdekleştiriciler eklenebilir. Fakat bu çekirdekleştirici ilavesi sistemin hacmini artırır ve erime/donma sıcaklığının değişmesine sebep olabilir.

### 1.2.2. Aşırı Soğuma

Tuz hidratlarda donma olayı, erime noktasından daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşebilmektedir. Bu durum FDM'lerin çalışma sıcaklığını değiştirerek sisteminin verimini düşürmektedir. Isıl enerjiyi, örgü enerjisi olarak depolayan bu sistemlerde molekül ağırlığının artması ile aşırı soğuma davranışının da artmakta olduğu bilinmektedir. Organik FDM'lerde aşırı soğuma davranışı birkaç derece ile sınırlı kalırken, inorganik tuz hidratlarda önemli miktarlarda sıcaklık değişimleri göstermektedir. Aşırı soğuma davranışı, koligatif özelliklerden safsızlığa bağlı olmadan da gerçekleşebilmektedir. Aşırı soğuma davranışı; ısıl iletkenliğinin düşük olmasına bağlansa da bu durum tamamıyla açıklanamamıştır.

### 1.2.3. Çekirdekleşme

Aşırı soğuma davranışını giderebilmek için FDM'ler ile benzer kristal örgüye sahip bir çekirdekleştirici ilave edilebilir. Eklenecek çekirdekleştirici aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- i. Erime sıcaklığı, FDM'lerin erime sıcaklığının üzerinde olmalıdır,
- ii. Hidratlı yapılar varlığında suda kesinlikle çözünmemelidir,
- iii. Hidratlı yapılar ile çökmemelidir,
- iv. Birlikte kullanılacağı FDM'ler ile aynı ya da benzer kristal örgüye sahip olmalıdır,
- v. Kullanılacağı FDM'ler ile kimyasal tepkimeye girmemelidir (da Cunha & de Aguiar, 2020).

#### 1.2.4. Faz Ayrımı

Tek bir bileşene sahip olan FDM'ler faz ayrımı göstermezler. İnorganik tuz hidratlar ve ötektik karışım olan FDM'ler, iki veya daha fazla bileşenden oluştukları için erime sırasında faz ayrımı gösterebilir ve erime/donma sürecinde bu faz ayrımından dolayı homojenlik sağlanamayabilir.

#### 1.2.5. Düşük Isıl İletkenlik

Metal tabanlı FDM'ler yüksek termal iletkenliğe, diğer bütün FDM'ler ise düşük termal iletkenliğe sahiptir. Bu nedenle metal tabanlı FDM'ler hariç diğer FDM'lerde ısı değiştirici ve ısı transfer akışkanı arasında etkin bir aktarım (taşıma) yapamamaktadır. Bu sorunu gidermek için ısı iletkenliklerinin artırılması gerekmektedir (Cabeza vd., 2002; Fukai vd., 2002; Py vd., 2001). GIED sisteminde katı-sıvı faz değişimi sırasında FDM, ısı transfer yüzeyinden uzaklaşır ve ısı akışı düşer. Donma sırasında ısı sadece konveksiyon (iletim) yoluyla aktarılır ve bu aktarım genellikle düşüktür. Erimeye konveksiyon (doğal taşınım) yoluyla ısı aktarılır. Bu durumda ısı aktarımının erimede, donmaya göre daha hızlı olmasına neden olur ama bu hız dahi sistemin etkin çalışması için yeterli değildir. Sisteminin yüksek verimlilik ile doğru çalışabilmesi için uygun yöntemler kullanılmalıdır. Görüldüğü gibi GIED sistemlerinde en önemli sorun; kullanılan FDM'lerin düşük ısı iletkenliklerinden kaynaklı ısı şarj ve deşarj sürelerindeki artış ve buna bağlı olarak ısı depolama veriminin düşmesidir. Sisteme metal plakalar eklenilerek, FDM'leri metal bir yapı içine eklenilerek, FDM'lerin içine yüksek ısı iletkenliğe sahip toz maddeler ilave edilerek, FDM-grafit karışımları hazırlanılarak ısı iletimi artırılabilir (Arslan, 1993; Fu vd., 2015; Fukai vd., 2002; Özonur vd., 2003; Py vd., 2001).

### 1.2.6. Isıl Çevrim Boyunca Kararlılık

Bazı FDM'lerin erime/donma çevrimi sonucunda renklerinde ve erime sıcaklıklarında değişim göstererek kimyasal kararlılıklarını sürdürmemektedir. GIED sistemlerinde, FDM'lerin ısıl döngü sayısının çok olması istenmektedir. Bu durumda ısıl çevrim boyunca, ısıl kararlılık göstermeleri ile anlaşılabilir.

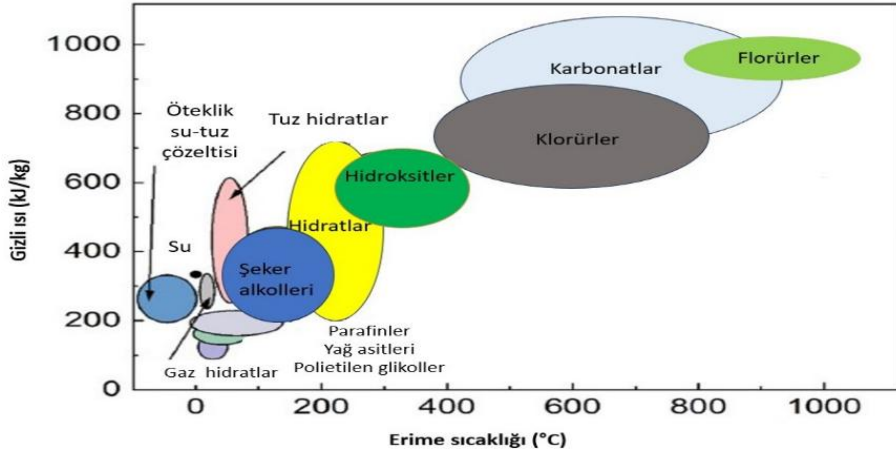
### 1.2.7. Paketleme ve Sistemin Diğer Bileşenleriyle Uyumluluk

Hazırlanan katı veya sıvı FDM'ler; faz değişim esnasında akma (sızma) davranışı gösterebilmektedirler. Bu sorunu çözebilmek için FDM'lerin sisteme uygun şekilde paketlenmesi gerekmektedir. FDM'lerin saklanacağı alan ile tepkimeye girmemesi aranan en temel özelliklerdendir. FDM'lerin paketlenmesi için; uygun kaplar, esnek paketleme filmleri, tüpler ya da jeller kullanılarak FDM'ler hapsedilebilir.

### 1.3. Faz Değişim Malzemelerin Sınıflandırılması



Şekil 2. GIED için kullanılan FDM'lerin sınıflandırılması (Zalba ve ark., 2003)



Şekil 3. Farklı gruplara ayrılan FDM'lerin erime entalpileri ve erime sıcaklıkları (P. Zhang vd., 2016)

Şekil 2 ve 3'te de görüldüğü gibi birçok (organik, inorganik ve ötektik karışım) FDM mevcut olmasına rağmen istenilen çalışma aralığındaki (0°C-100°C) FDM'ler sınırlıdır. Bu alanda yer alan FDM'ler yukarıda belirtilen özelliklerden kaynaklı istenilen depolama ortamını sağlayamamaktadır. Bu yüzden sistem tasarlanırken mevcut durumların iyileştirilmesi gerekmektedir.

### 1.3.1. Organik Faz Değişim Maddeleri

Organik FDM'ler; parafin ve parafin olmayanlar olarak iki grup halinde ayrılmaktadır. Organik FDM'ler genellikle korozif özellik göstermeyen, ihmal edilir düzeyde aşırı soğuma davranışı gösteren, bir başlatıcı olmadan kendi kendine kristallenebilen, ısı depolama kapasitesinde bir değişiklik olmadan erime ve donma döngüsünü tekrarlayabilen maddelerdir. Organik FDM'ler; polietilen glikol, parafin mumları, yağ asitleri ve bunların türevleridir (R. K. Sharma vd., 2015). Belirli sıcaklıklarda büyük miktarlarda gizli ısıyı emebilen ve geri salabilen, katı-katı faz değişimi özelliğine sahip olan polialkoller ve polietilenler gibi çeşitli maddeler, organik faz değişim malzemeleri arasında önemli bir yer tutmaktadır (Peng vd., 2015). Organik faz değişim malzemeleri ile çeşitli gereksinimlerin karşılanması gerekir. Bu gereksinimler, yüksek kapasitede ısı depolama yoğunluğuna sahip olmalıdır ki bu özelliği sergileyebilmeleri için özgül ısı kapasitesinin yüksek olması gerekmektedir. Ayrıca faz dönüşümü esnasında çok az hacim değişikliği, ısıtma ve soğutma çevrimlerinin geçişi sırasında ısıl kararlılık, faz değişiminin tekrarlanabilirliği, yanıcı olmaması, kimyasal olarak kararlılık, toksik

olmaması, aşındırıcı olmaması, maliyetinin uygun olması ve kolayca erişebilirlik gereksinimlerini de karşılayabilmelidir (De Gracia & Cabeza, 2015; Pielichowska & Pielichowski, 2014; Sarier & Onder, 2012). Literatürde organik FDM'lerin bazı dezavantajları bahsedilmiştir. Bunlar düşük ısıl iletkenlik, düşük şarj ve deşarj oranlarıdır. Ayrıca faz değişim malzemelerinin sızıntısını önlemek için gözenekli depolama materyaline ihtiyaç duyulması, bu dezavantajların bir kısmıdır (Al-Shannaq vd., 2015).

Parafinler  $C_nH_{2n+2}$  kapalı formülüne sahip düz alkanlar olarak da bilinen doymuş hidrokarbonlardır. Karbon sayıları 5 ile 15 arasında ise sıvı fazda geriye kalanlar katı yağ kıvamındadır. Parafin yağ en çok kullanılan ticari organik ısı depolama maddesidir (Hale vd., 1971; Lane & Lane, 1983). Parafinlerde hidrokarbon zinciri artıkça erime sıcaklıkları ve gizli ısıları artar. Parafinler faz ayrımı göstermezler, aşırı soğuma davranışı göstermezler, çekirdekleştiriciye ihtiyaç duymazlar ve kimyasal olarak kararlıdırlar (Lane vd., 1975; Sarı vd., 2004). Parafin yağlar başlıca erime sıcaklıkları 23-67°C arasında olan hidrokarbon zincirlerinden oluşur. Parafinlerin en büyük dezavantajları; düşük ısıl iletkenlikleri, plastik kaplarla uyumsuz olma, orta derecede alevlenme özelliğidir (Abhat, 1983; Lane & Lane, 1983).

Tablo 3. Bazı parafinlerin erime sıcaklıkları ve erime gizli ısıları (Mehling & Cabeza, 2008)

FDM	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime entalpisi (J/g)
Tetradekan (C <sub>14</sub> H <sub>30</sub> )	6	230
Pentadekan (C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> )	10	212
Heksadekan (C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> )	18	210
Heptadekan (C <sub>17</sub> H <sub>36</sub> )	19	240
Oktadekan (C <sub>18</sub> H <sub>38</sub> )	28	200

GIED’de kullanılmak üzere çok sayıda parafin olmayan organik maddeler (esterler, yağ asitleri, alkoller ve glikoller) mevcuttur (Akeiber vd., 2016). Organik FDM’lerin yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olma avantajlarının yanında, kolay yanabilme, düşük ısı iletkenlik gösterme, zehirli olabilme ve yüksek sıcaklıklarda kararsızlık gibi dezavantajları mevcuttur.

Yağ asitleri ve yağ asidi türevleri; yağ asitleri CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>2n</sub>COOH kapalı formülüne sahip doymuş ve doymamış karboksilik asitlerdir. Doğal yağ asitleri genelde 4-28 karbon aralığında değişen çift sayıda karbon atomundan oluşan dallanmamış yapılardır. beş veya daha az karbon içeren alifatik kuyruklu yağ asitleri kısa zincirli, 6-12 karbon içeren alifatik kuyruklu olanlar orta, 13-20 arasında karbon içeren alifatik kuyruklu olanlar ise uzun zincirli yağ asitleri olarak adlandırılmaktadır (Zakim & Herman, 1969). Yağ asitlerinin ısı kapasiteleri, parafinlere göre daha yüksektir. Yağ asitleri aşırı soğuma davranışı göstermezler, tekrarlanabilir erime donma döngüleri sonucu kimyasal ve yapısal kararlılıklarını korumalarından dolayı FDM olarak seçilme önceliği sunarlar (Lane vd., 1975). Doymuş yağ asitlerine; kaprilik asit (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>COOH), kaprik asit (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>8</sub>COOH), laurik asit (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>10</sub>COOH), miristik asit (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>12</sub>COOH), palmitik asit (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>14</sub>COOH), stearik asit (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COOH), araşidonik asit (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>18</sub>COOH) örnek olarak verilebilir. Mevcut FDM formunda kullanılabilen yağ asitleri, bina enerji sistemlerinde, iklimlendirme sistemlerinde ve güneş enerjisiyle ısıtma sistemlerinde, sahip oldukları üstün özelliklerinden dolayı kullanıma uygundur.

Tablo 4. FDM olarak araştırılan bazı yağ asitleri (Mehling &amp; Cabeza, 2008)

FDM	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime entalpisi (J/g)
Kaprilik asit [CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>6</sub> COOH]	16	149
Kaprik asit [CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH]	32	153
Laurik asit [CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH]	43	178
Miristik asit [CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH]	85	186
Palmitik asit [CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH]	63	185

Yağ asidi bazlı FDM'ler için çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları Tablo 6'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Faz değiştiren bir materyal olarak yağ asidine genel bakış

Yağ asit bazlı FDM	Açıklama	Referanslar
Kaprik asit (KA) / Laurik asit (LA) ötektik karışımı	Düşük sıcaklıkta termal depolama için kullanılabilir.	(Costa vd., 2009)
Laurik asit (LA) / Palmitik asit (PA) ötektik karışımı	Laurik / Palmitik asit ikili sistemin 32,8°C'de 1000 ısıtma-soğutma döngüsünden sonra termal kararlılık gösterir, ısı enerji depolamada kullanılabilir.	(Z. Wang vd., 2017)
Miristik asit (MA) / Stearik asit (SA) ötektik karışımı	Düşük sıcaklıkta termal depolama için kullanılabilir.	(Sari & Kaygusuz, 2006)
Miristik / palmitik ve stearik asitlerin, gliserol ile esterleri	Erime sıcaklıkları 31°C (gizli ısıya karşılık gelen 149 kJ/kg) ile 63°C (gizli ısıya karşılık gelen 185 kJ/kg) arasında bulunmuştur. Bu ester bazlı faz değiştiren malzeme, 1000 termal döngüden sonra bile mükemmel termal kararlılık sunar.	(Sari & Kaygusuz, 2006)
Kaprik asit (KA) / Laurik asit (LA) / PMMA formda kararlı faz değişim malzemesi	Bina enerji tasarrufu uygulamalarında faz değişim sıcaklıkları ve gizli ısı değerleri sırasıyla 21,11°C ve 76,3 kJ/kg'dır.	(L. Wang & Meng, 2010)
Kaprik asit / miristik asit / PMMA formda kararlı faz değişim malzemesi	Bina enerji tasarrufu uygulamalarında faz değişim sıcaklıkları ve gizli ısı değerleri sırasıyla 25,16°C ve 69,32 kJ/kg'dır.	(L. Wang & Meng, 2010)
Kaprik asit / stearik asit / PMMA formda kararlı faz değişim malzemesi	Bina enerji tasarrufu uygulamasında faz değişim sıcaklıkları ve gizli ısı değerleri sırasıyla 26,38°C ve 59,29 kJ/kg'dır.	(L. Wang & Meng, 2010)
Laurik asit / miristik asit / PMMA YKK-FDM	Faz değişim sıcaklıkları ve gizli ısı değerleri sırasıyla 34,81°C ve 80,75 kJ/kg olup bina enerji tasarrufu uygulamasında kullanılır.	(L. Wang & Meng, 2010)

Stearik asit / kaprik asit / aktive edilmiş-atapulgit kararlı faz değişim malzemesi	Faz değişim sıcaklığı ve gizli ısı sırasıyla 21,8°C ve 72,6 kJ/kg'dir. Çok sayıda termal döngüye sonrasında ısı ve kimyasal kararlılık gösterirler. Bina enerji tasarrufu için gizli ısı enerji depolamasında kullanılabilir.	(Song vd., 2014)
Kaprik asit /palmitik asit /stearik asit üçlü ötektik karışım/nano-silikon dioksit kararlı faz değişim malzemesi	Faz değişim sıcaklığı 17,16°C–26°C aralığında, gizli ısı değeri ve ısı iletkenlik sırasıyla 99,43kJ/ kg ve 0,08239 W/mK olarak bulunmuştur.	(Song vd., 2014)
Laurik asit / aktif karbon bazlı faz değişim malzemesi	Kompozitlerdeki laurik asit içeriğinin artırılmasıyla gizli ısı enerji depolama kapasitesi ve ısı iletkenlik geliştirilir. Kompozitin faz değişim davranışı laurik asit ile aynıdır. Aktif karbon, kompozitlerin termal kararlılıklarının artmasını sağlar.	(Chen vd., 2012)
Laurik asit / miristik asitin ötektik karışımları	34,2°C erime sıcaklığı, 166,8 kJ/kg gizli füzyon ısısına sahiptir. 1460 termal döngü boyunca ısı ve yapıca kararlılık göstermektedir.	(Sarı, 2005)
Laurik asit / palmitik asidin ötektik karışımları	35,2°C erime sıcaklığı, 166,3 kJ/kg gizli füzyon ısısına sahiptir. 1460 termal döngü boyunca ısı ve yapıca kararlılık göstermektedir.	(Sarı, 2005)
Miristik asit / stearik asidin ötektik karışımları	44,1°C erime sıcaklığı, 182,4 kJ/kg gizli füzyon ısısına sahiptir. 1460 termal döngü boyunca ısı ve yapıca kararlılık göstermektedir.	(Sarı, 2005)
MA / HDPE / Nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Kompozitleri	Nanokompozit bazlı faz değişim malzemesinin ısı iletkenlikleri 12% nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> içeriğinde 95% artırılmıştır. Termal enerji depolamada uygulamalarında kullanılabilirler.	(Y. Tang, Su, vd., 2016)
MA / HDPE / nano-grafit kompozitler	Nanokompozit bazlı faz değişim malzemesinin ısı iletkenliklerini artırmıştır. Termal enerji depolamada uygulamalarında kullanılabilir.	(Y. Tang, Su, vd., 2016)
Palmitik asit / yüksek yoğunluklu Polietilen/grafen nanoplateletler	Nanokompozitlerin termal iletkenlik ve termal kararlılıkları, grafen nanoplateletler tarafından geliştirilir; grafen nanoplateletler, palmitik asit sızıntısını önemli ölçüde azaltır.	(Y. Tang, Jia, vd., 2016)

Polietilen Glikoller (PEG)'ler, (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O-) monomer biriminden oluşan genel formülü C<sub>2n</sub>H<sub>4n</sub>+2O<sub>n+1</sub> ile gösterilen polimerlerdir. Suda ve organik çözücülerde çözünürler. Molekül ağırlığı 20000'in altında olanlarda erime sıcaklığı molekül kütlesi ile orantılıdır. PEG'ler, yüksek özgül ısı, uygun erime sıcaklığı, erime sırasında düşük buhar

basıncı, erime donma döngüleri boyunca ısıl ve kimyasal kararlılığa sahip olmaları, biyolojik olarak parçalanabilir olmaları, alev almamaları, aşındırıcı ve korozyif olmamaları, uygun maliyette olmaları gibi aranan özelliklere sahip olmalarıyla; bina kaplamalarında, tekstil ürünlerinde, köpüklerde ve liflerde, çok sayıda farklı ısı depolama uygulamalarında FDM olarak araştırılmaktadır (Okogeri & Stathopoulos, 2021). Farklı moleküler kütleyle sahip PEG'ler karıştırılarak, istenilen erime sıcaklığına ve istenilen ısı enerji emilim kapasitesine ulaşmalarını sağlamak mümkündür. PEG'ler uzun zincirlere sahip olmaları ve kristallenme sorunu ile bağlantılı olarak aşırı soğuma davranışı gösterir (L. Feng vd., 2011).

Tablo 6. Polietilen glikolün molekül ağırlığına bağlı olarak erime sıcaklıkları (Mondal, 2008)

<b>FDM</b>	<b>Erime sıcaklığı (°C)</b>	<b>Erime entalpisi (J/g)</b>
PEG 400	8	100
PEG 600	17-22	127
PEG 1000	35-40	160
PEG 6000	57	176
PEG10000	59-62	179

Ötektik karışımlar; GIED'da çalışılmak üzere seçilecek sıcaklıkta saf FDM'lerini bulmak oldukça zordur. Bu nedenle, istenilen sıcaklıkta eriyebilecek bir FDM'nin oluşturulması gerekebilir. Bunun için molekül kütlesi küçük olan bir FDM ile molekül kütlesi yüksek olan bir FDM istenen mol ya da kütle oranında karıştırılarak ötektik karışım oluşturulur. Ötektik karışımın oranlarının hesabı için, bir seri farklı oranlarda karışımlar hazırlanır, hazırlanan her bir karışımın diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiz tekniğiyle erime ısıları ve erime sıcaklıkları belirlenir. Elde edilen veriler doğrultusunda sıcaklık bileşim oranı diyagramı oluşturulur, ötektik bileşim oranı ve ötektik erime noktası belirlenir (L. Feng vd., 2011; Okogeri & Stathopoulos, 2021).

Tablo 7. Bazı ötektik FDM örneklerinin gizli ısıları ve erime noktaları (Ferrer vd., 2015; Singh vd., 2021; Tatsidjodoung vd., 2013; Tyagi vd., 2022; Waqas & Din, 2013)

FDM	Erime sıcaklığı (°C)	Erime entalpisi (J/g)
Kaprik+Laurik asit	21	143
Kaprik+Miristik asit	21.4	152
Kaprik+Palmitik asit	22.1	153
Kaprik+Stearik asit	24.7	178.6
Laurik+Miristik asit	32.2	177
Laurik+Stearik asit	37	182.7
Laurik+Palmitik asit	35.2	166.3

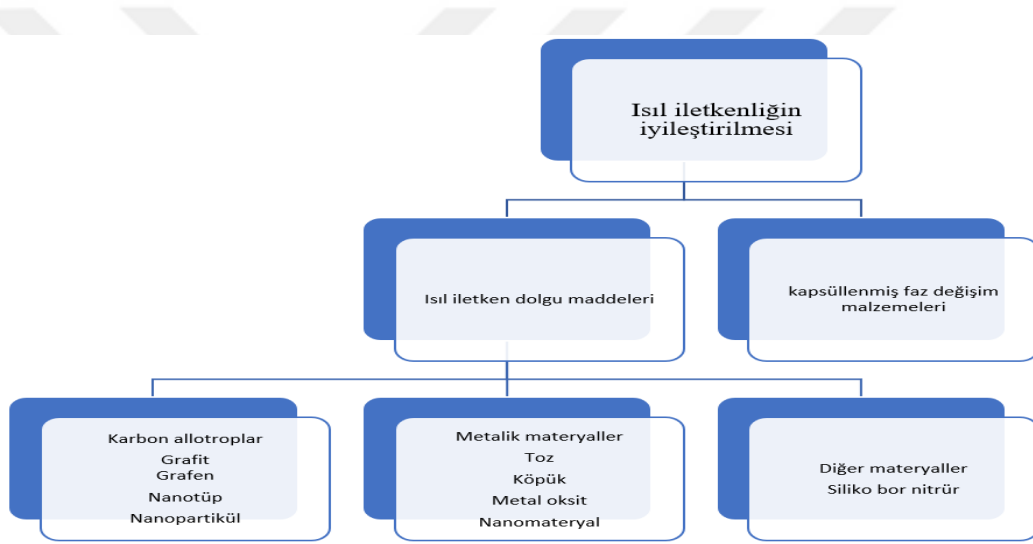
### 1.3.2. İnorganik Faz Değişim Maddeleri

İnorganik FDM'ler tuz hidratlar ve metalikler olarak sınıflandırılabilir. Tuz hidratlar  $M_x(H_2O)_y$  kapalı formülü ile gösterilen inorganik bileşiklerin hidratasyonlu tipik kristal yapıdaki bileşikleridir. Kısaca bunlar inorganik tuzlar ve suyun alaşımıdır. Tuz hidratlarda katı-sıvı geçişi; tuzun hidratasyon ve dehidratasyon olayı ile gerçekleşir. Birim hacim başına depoladıkları enerji miktarı fazladır. Erime gizli ısıları ve ısı iletkenlikleri yüksektir, erime esnasında küçük hacim değişimi gösterirler, uygun fiyatlıdır. Ancak aşırı soğuma davranışı göstermeleri, korozif olmaları ve faz ayrımı gösterme dezavantajlarından dolayı tercih edilmemektedirler. Tuz hidratlar erime noktasına geldiğinde susuz veya daha az su içeren düşük mol sayılı formuna ayrılır. Tuz hidratlar erime noktasında kristalin salıverdiği su miktarının, katı fazı tamamen çözmek için yeterli olmadığından dolayı düzensiz erime davranışı göstermektedirler. İnorganik FDM'lerin diğer sorunu ise aşırı soğuma davranışıdır. Bu sorun daha önceden de belirtildiği gibi uygun bir çekirdekleştirici ilavesiyle çözümlenebilir.

Metallerin ısı iletim katsayıları yüksektir ve faz ayrımı göstermezler. Metallerin ağırlıklarının fazla olmasından kaynaklı depolama gücü oluştururlar ve yüksek maliyetli olmalarından dolayı genellikle tercih edilmezler.

#### 1.4. Faz Değişim Malzemesi Olarak Yağ Asidi Kompozitleri

Yağ asit kompozitleri; ısı enerjisi depolamada gösterdikleri üstün özellikler, uygun maliyet avantajı ve kullanım alanlarına göre ayarlanabilir olmalarından dolayı tercih edilmektedir. Bu avantajların yanında ısı iletim katsayıları düşüktür. Bu sorun organik FDM sınıfında yer alan yağ asitlerinin ısı enerjisi depolamada şarj deşarj süresini artırır dolayısıyla da enerji verimini azaltarak, ısı enerjisi depolama sistemlerinde kullanılamamasına neden olur (Sarı vd., 2004). Çeşitli dolgu malzemeleri ilavesi ile belirtilen dezavantajlar giderilebilmektedir. FDM'lerin düşük ısı iletimlerini artırmak için yüksek ısı iletimliğe sahip olan FDM'leri hapsedecek dolgu maddeleri kullanılmaktadır.



Şekil 4. Termal iletkenliği artırma stratejisi

Tablo 8. Literatürde yer alan bazı FKK-FDM'lerin ısı iletkenlikleri

YKK-FDM	Isıl iletimi iyileştirici takviye	Kütlece ısı iletimi iyileştirici katkı oranı %	Isıl İletkenlik (W/mK)	Referanslar
Perlit/ Kaprik-miristik asit	GG	10	0.076	(Karaıpekli & Sarı, 2008)
Genişletilmiş perlit/ Kaprik-Laurik asit	GG	5	0.244	(Wen vd., 2017)
Müllit/Palmitik asit	Grafit	5	0.52	(Gu vd., 2019)
Diatomit/Heksadekan	Grafit	5	0.42	(Jeong vd., 2013)
Modifiye edilmiş uçucu kül/Laurik asit	KNT	1-3-5-7	0.81	(Z. Liu vd., 2018)
Vermikülit/ Laurik asit	GG	10	0.50	(Wen vd., 2016)
SiO <sub>2</sub> /PEG	KNF	3	0.45	(Z. Liu vd., 2018)

#### 1.4.1. Karbon Bazlı Faz Değişiren Malzemeler

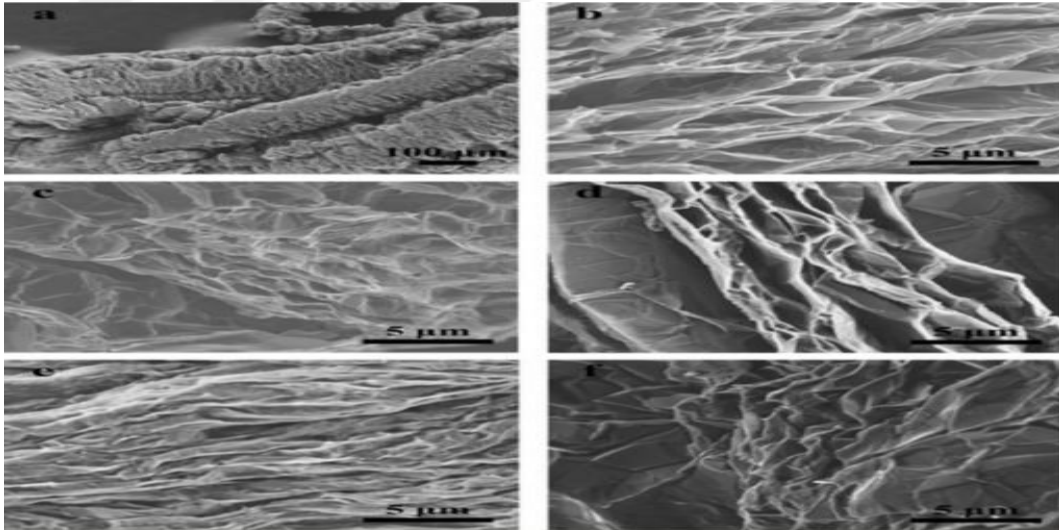
Isıl enerji depolamanın iki temel amacı vardır. Birincisi enerji tasarrufu sağlamak, ikincisi çevrenin korunmasıdır. Isıl enerji depolama alanlarında, FDM'ler önemli bir yere sahiptir. FDM'lerin ısı iletkenliklerinde kullanılmalarını kısıtlayan, düşük ısı iletkenliğine sahip olmaları, faz geçiş esnasında sızdırmadan kaynaklı madde kaybıyla birlikte gelen sorunları çözmek için karbon bazlı malzemelerden destek alınmaktadır. Karbon bazlı malzemeler ile düşük ısı iletkenliklerinin artırılması amaçlanmaktadır. Karbon tabanlı bu malzemeler; karbon nanotüpler, karbon lifleri, grafit ve grafendir.

#### 1.4.2. Grafit Bazlı Yağ Asidi Faz Değişim Malzemeleri

FDM'lerin düşük ısı iletkenliklerinin, genişletilmiş grafit kullanılarak artırılabilirliği bilinmektedir. Gözenekli yapıda olan genişletilmiş grafit, mükemmel ısı iletkenliği, uygun yoğunluğu, endüstriyel çeşitliliği ve organik FDM'leri ile uyumluluğu nedeniyle adsorban malzeme olarak tercih edilmektedir (X. Tang vd., 2015). Araştırmacılar, parafin'e kütlece

6% genişletilmiş grafit (GG) ilavesiyle elde edilen kompozitlerin ısı iletkenliğin, katkısız parafine kıyasla 0,32W/mK'den, 3,66W/mK'ye yükseldiğini belirtmişlerdir (Cui vd., 2011).

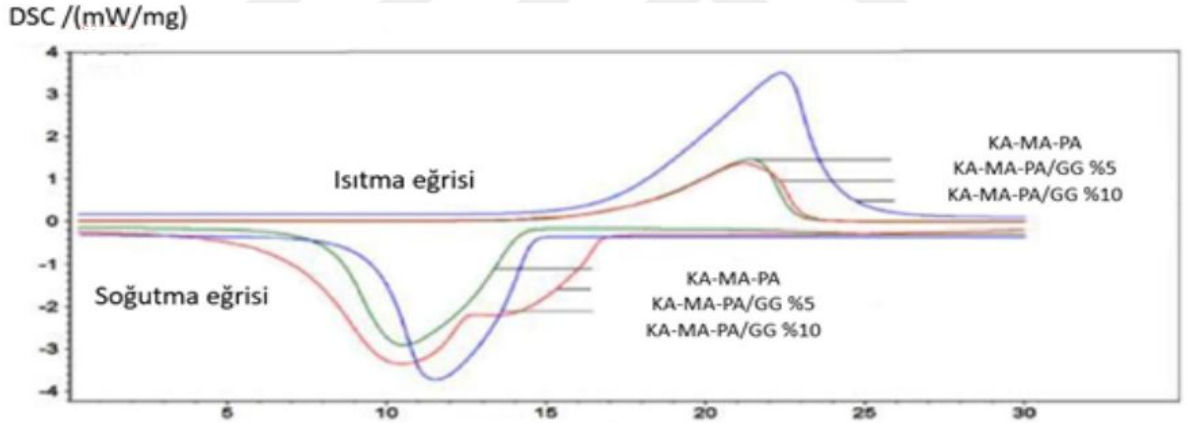
Araştırmalar sonucu stearik asidin (SA), laurik asidin (LA), miristik asidin (MA) ve palmitik asidin (PA) ısı iletkenliğinin, GG takviyesi ile iyileştirildiği görölmektedir (N. Zhang vd., 2013). Sahip olduğu mükemmel gözenek yapısıyla birlikte GG, kılcal kuvvet kullanarak FDM'lerin sızıntı sorununu belli bir miktar azaltılmasını destekleyebilir. Gözenek yapıları, faz değişim süreçleri boyunca yağ asidi ötektiğine bağlı olarak FDM'lerin önemli hacim değişimlerini sınırlayabilir (Dimaano & Watanabe, 2002; Zeng, Gan, vd., 2014). Kaprik asit, laurik asit ve oleik asit, ötektik karışımı için belirli bir yüzdede karıştırılır ve ötektik bir FDM elde edilir. Elde edilen ötektik FDM'yi yapıcı kararlı hale getirebilmek için GG içine emdirilir (X. Tang vd., 2015; Thalib vd., 2020). GG'nin, hazırlanan kompozitlerin ve FDM'lerin mikro yapıları Şekil 5' de SEM görüntüleri ile gösterilmiştir. Şekil 5a'da GG, solucan benzeri mikro bir yapı olarak görüntülenmektedir. GG mikro ölçekte görüntülerinde ise gözenek ağları net olarak şekil 5b' de görölmektedir. Bu gözeneklerin birbirine bağlantılı ağ yapısı da iyi bir emilim kapasitesine sahip olmasını sağlamaktadır.



Şekil 5. GG'nin, ötektik karışımın ve kompozitin SEM görüntüleri

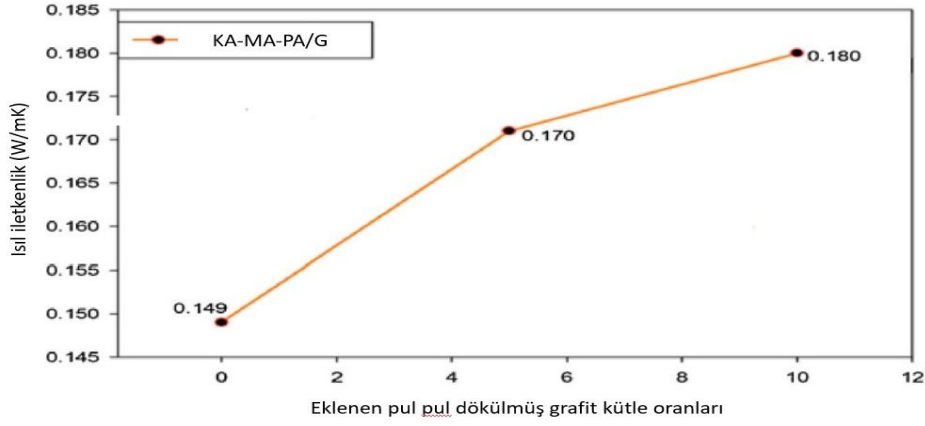
Kaprik asit-laurik asit-oleik asit ötektik karışımı, GG'in mikro gözenekleri tarafından emildiğinde (Şekil 5c-f), kenarların ve yüzeyin daha pürüzlü olduğu ve tabakaların kalınlaştığı görölmektedir. Gizli ısı enerji depolama sistemlerinde, FDM formundaki yağ asitleri GG yapılarına, vakum altında emdirme yöntemi kullanılarak emdirilmektedir.

Literatürde sıvı stearik asit çeşitli kütle oranlarında GG emdirilerek kompozitler elde edilmiştir. Elde edilen kompozit malzemelerdeki stearik asit, ısıl enerji depolamada kullanılmak üzere FDM olarak uygulanmıştır. Kompozitteki GG, destekleyici malzeme olarak kullanılmıştır. Kütlece 83% oranında stearik asit ve GG kullanılarak oluşturulan kompozitler 54.28°C'de katılaşıp 155.70 kJ/kg erime entalpisi değerine sahipken, 53.12°C sıcaklıkta erimiş 155.50 kJ/kg erime entalpisi değerine sahip olduğu görülmüştür (X. Tang vd., 2015). Literatür araştırmasında, laurik asit-miristik asit ile oluşturulan ikili ötektik karışımların, GG emdirilmesi ile (absorbe edilmesi) kompozit yapı elde edilmiştir. GG takviyeli laurik asit-miristik asit kompozitlerinin ısıl kararlılığı, laurik asit-miristik asit ötektik karışımı ile kıyaslandığında arttığı gözlenmiştir (He vd., 2016). Enerji depolamaya yönelik bir FDM'si olarak kaprik-miristik-palmitik asit ve pul pul dökülmüş grafit kompozitlerinin üçlü bir ötektik karışımı rapor edilmiştir. Şekil 6'de kaprik asit-miristik asit-palmitik asit ve kaprik asit-miristik asit-palmitik asit ve kütlece 5%-10% oranlarında pul pul dökülmüş grafit kompozit FDM'lerin, DSC eğrilerini gösterilmektedir.



Şekil 6. KA-MA-PA ve KA-MA-PA/5%-10% GG kompozitlerinin DSC eğrileri (Jebasingh, 2016)

Kaprik asit-miristik asit-palmitik asit-pul pul dökülmüş grafit kompozit yapısının erime ve donma sıcaklığının, kaprik asit-miristik asit-palmitik asitden oluşan ötektik karışıma göre nispeten daha düşük olduğu bulunmuştur. Bunun sebebi pul pul dökülmüş grafit'in mükemmel bir ısıl iletkenliğe sahip olmasından dolayı ısı iletim hızını artırarak faz değişim sıcaklığını düşürmesidir (Jebasingh, 2016). Kaprik asit-miristik asit-palmitik asit ve kaprik asit-miristik asit-palmitik asit-pul pul dökülmüş grafit kompozitlerinin ısıl iletkenlikleri Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 7. KA-MA-PA ve KA-MA-PA/5%-10% GG kompozitlerinin ısıl iletkenlikleri (Jebasingh, 2016)

Kaprik asit-miristik asit-palmitik asit kompozitlerinin ısıl iletkenliklerinin, pul pul dökülmüş grafitin eklenmesiyle önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Kaprik asit-miristik asit-palmitik asit ötektik karışımına, kütlece 5% oranında pul pul dökülmüş grafit ilavesiyle elde edilen kompozitlerinin ısıl iletkenliği 0,17 W/mK 'e çıkarırken, oranın kütlece 10% artırılmasıyla elde edilen kompozitin ısıl iletkenlik değerinin 0,18 W/mK'e yükseldiği gözlenmiştir (Jebasingh, 2016). Önceki çalışmalara ait sonuçlar Tablo 10' da verilmiştir.

Tablo 9. Grafit ve yağ asidi faz değişim malzemelerine genel bakış

Grafit ve yağ asidi bazlı değişim malzemesi	Notlar	Referanslar
Stearik Asit /Asetanilid Ötektik Karışımı / GG kompoziti	Yüksek ısıl iletkenlik, büyük ısı depolama kapasitesi ve olağanüstü ısıl kararlılığı sayesinde GIED sistemlerinde kullanılması umut vadetmektedir.	(Ma vd., 2018)
Stearik asit / grafit levha kompoziti	180°C'nin altında iyi termal kararlılığa sahip kompozitlerdir, mükemmel termal kararlılığa ve stearik asitten 10,08 kat daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir.	(C. Li vd., 2019)
GG / stearik asit kompoziti üzerinde içi boş gözenekli $Co_3O_4$	Stearik asitten daha üstün termal performans sergilerler, erimiş stearik asidin sızıntısını engeller.	(D. Li vd., 2018)
Stearil alkol / palmitik ve stearik asit / grafit	Isıl iletkenliğin altı kat arttığı gözlenmiştir. Tek erime ve kristalleşme pikleri gözlenmektedir.	(Mhike vd., 2018)
Palmitik asit / polivinil bütiral / GG	Palmitik asitten daha yüksek gizli ısıya sahiptir; palmitik asit / polivinil bütiral kompozitlerin termal iletkenliği, GG ile önemli ölçüde geliştirilebilir.	(Lin vd., 2018)
Palmitik asit / stearik asit / GG	Optimum soğurma oranı, geliştirilmiş termal iletkenlik, artırılmış termal enerji depolama ve salınım oranları, termal güvenilirlik gösterir.	(N. Zhang, Yuan, Du, vd., 2014)

Kaprik asit / palmitik asit / stearik asit /GG kompozit	Takviye GG ilavesiyle termal iletkenlik ve erime soğutma süresinde azalma gözlenmiştir. 500 ısıtma soğutma döngüsü testinden sonra mükemmel termal güvenilirlik göstermektedir.	(H. Zhang, Gao, vd., 2016)
Palmitik asit / polianilin / pul pul dökülmüş grafit nanoplateletler (GNP)	Isıl iletkenlikte iyileşme gözlenmiştir, düşük IED ile, güneş ısıl enerjisi uygulamalarında daha iyi performans gösterir.	(Zeng, Zheng, vd., 2014)
Miristik asit /grafit nanoplaka kompoziti	Kompozitin termal iletkenliğinde iyileşme gözlenmiştir. Termal döngü kararlılığı göstermiştir.	(İnce vd., 2015)
Yağ asidi ötektikleri /GG	Düşük erime noktasında bile termal iletkenlik artışı görülmektedir.	(X. Yang vd., 2014)
Miristik asit / palmitik asit / stearik asit / GG	Uygun faz değişim sıcaklığı, yüksek termal iletkenlik ve gizli ısıya sahiptir. Güneş enerjisiyle ısıtmada kullanılabilir. Isıtma soğutma döngüsü sonucunda termal güvenilirlik göstermektedir.	(Huang vd., 2017)
Yağ asidi ötektikleri / bentonit / GG kompozitleri	GG ilavesiyle termal özellikler iyileşmektedir. 50 ısıtma soğutma döngüsünden sonra mükemmel termal kararlılık, termal depolama ve salınım oranında iyileştirme görülmektedir.	(Huang vd., 2017)
Stearik asit / GG kompoziti	Düşük sıcaklıkta güneş enerjisinin depolaması için uygundur. Termal performansta artış, termal kararlılıkta artış görülmektedir.	(Cheng vd., 2017)
Laurik asit / miristik asit / stearik asit / GG	1000 termal döngüden sonra bile ısıl kararlılık göstermektedir. Binalarındaki ısının geri kazanımında kullanılabilir.	(C. Liu vd., 2014)
Kaprik asit / miristik asit / palmitik asit / GG	İyi termal güvenilirlik sağlar, gizli ısı depolama sistemi, termal iletkenlikte ve enerji depolama oranında artış görülmektedir.	(Yuan vd., 2014)

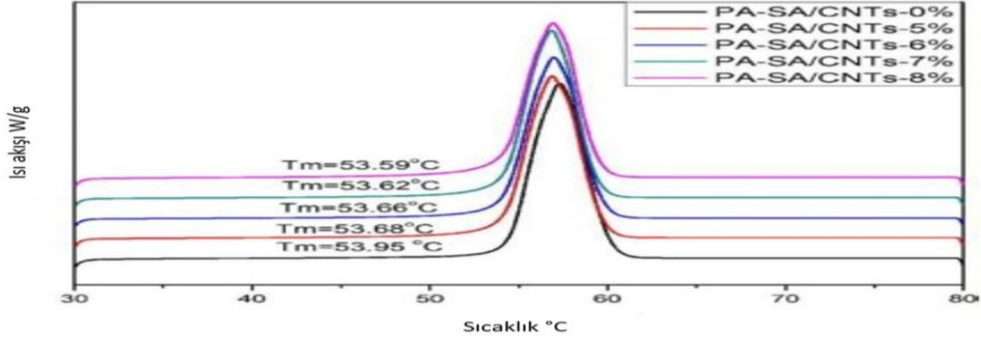
### 1.4.3. Karbon Fiber Bazlı Yağ Asidi Faz Değişim Malzemeleri

FDM'si olarak kullanılan yağ asitlerinin düşük ısıl iletkenlik dezavantajlarını iyileştirmek için yüksek ısıl iletkenliğe sahip karbon fiber takviyelerinin ilavesi alternatif yollardan biridir (Karaipekli vd., 2007). Literatür araştırmasında farklı kütle oranlarında (2%, 4%, 7% ve 10%) yüksek ısıl iletkenliğe sahip genişletilmiş grafit (GG) ve karbon nanofiber (KNF) takviyeli stearik asit (SA) kompozitleri incelenmiştir. GG ve KNF ilavesi ile ısıl iletkenliğin önemli ölçüde arttığı ve gizli ısı depolama kapasitesinin ihmal edilebilir bir ölçüde azaldığı rapor edilmiştir (Soares vd., 2015). Yapılan bir çalışmada stearik asidin ısıl iletkenliğindeki artışı gözlemleyebilmek için saf stearik asit, stearik asit-GG ve stearik asit-KNF kompozitlerinin erime süresi incelenmiştir. Saf stearik asidin ısıl iletkenliği 0,30 W/m.K olarak ölçülmüştür. Ağırlıkça 10% oranında GG ve KNF eklenmesiyle ısı iletim değerinde 266,6% gibi yüksek oranda bir artış görülmüştür. GG ve KNF takviyeleri ısıl

difüzyon destekçisi olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak stearik asidin gizli ısı depolama kapasitesinin ihmal edilebilir bir oranda azalmış olmasına rağmen ısı iletim değerinin mükemmel ölçüde iyileştirdiği görülmüştür (Karaipekli vd., 2007; Song vd., 2014). Literatür taramasında ısı difüzyonu artırıcı destek materyali olarak karbon nanotüpler de (KNT) yer almaktadır. Karbon nanotüp ilavesi ile FDM'lerin ısı iletkenliklerinin iyileştirdiği rapor edilmiştir (Barreneche vd., 2018; Cai vd., 2014).

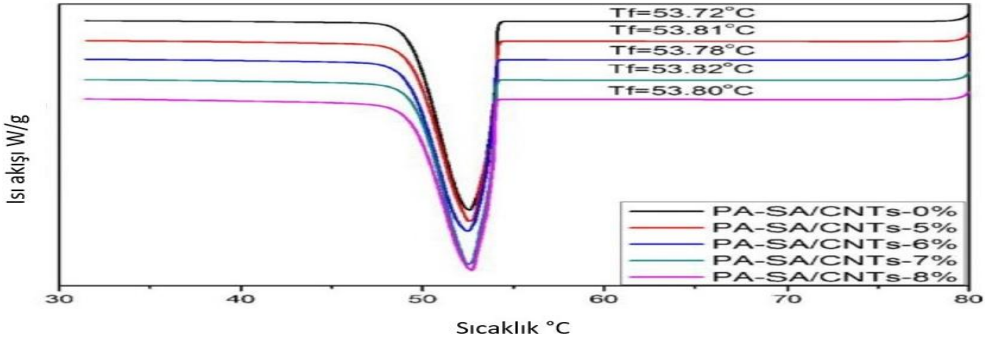
#### **1.4.4. Karbon Nanotüp Bazlı Yağ Asidi Faz Değişim Malzemeleri**

1991 yılında Iijima'nın KNT'yi bulmasından günümüze kadar, KNT sahip oldukları büyüleyici mekanik, ısı, elektriksel vb. özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır (Iijima & Ichihashi, 1993; Mishra vd., 2018). Literatür taraması sonucunda KNT'lerin denge moleküler dinamiği simülasyonlarının uygulanmasıyla KNT'lerin ısı iletkenliklerinin oda sıcaklığındaki ölçümlerinde ısı iletkenlik değerinin 6600 W/mK ulaştığını gözlemlenmiştir (Iijima & Ichihashi, 1993). Modifiye edilmiş KNT içerisine FDM olarak palmitik asit dahil edilmesiyle elde edilen kompozit FDM'lerin ısı iletkenliklerinde artış gözlenmiştir. Bu artış büyük ölçüde KNT'lerin modifikasyonuna bağlıdır (J. Wang vd., 2010). KNT'lerin, ısı iletkenliklerini artırmak için FDM'ler ile modifiye edildiği birçok çalışma mevcuttur. KNT'ler ile matrikslerin ara yüzey direnci, ara yüzey ısı akışı olarak kabul edilir (Anand K vd., 2007). Araştırmacılar, KNT kompozitlerin ısı iletim davranışı üzerindeki etkisini incelemek için klasik moleküler dinamik (MD) simülasyonunu kullanmışlardır (Shenogin vd., 2004). Nanotüp duvarları ve matris malzemeleri arasındaki zayıf bağlar ara yüzey direncini artırmakta iken kimyasal bağlanma ara yüzey direncini azalttığı sonucuna ulaşmışlardır (J. Wang vd., 2010). Literatürde araştırmasında palmitik asit (PA)-stearik asit (SA) ötektik karışımı ile destek materyali olarak KNT kullanılarak (PA-SA) / KNT kompozit FDM'ler üretilmiştir. KNT'nin farklı kütle yüzdeleri ile bir seri kompozit yapıda FDM hazırlanmıştır. Araştırmacılar bu kompozit yapıların ısı iletkenliklerini, ısı şarj deşarj sürelerini, ısı kararlılık ve ısı döngüleri incelenmek üzere analiz etmişlerdir. Şekil 8'de erime işlemi esnasında PA-SA ve (PA-SA) / KNT kompozit FDM'lerin, DSC eğrilerini gösterilmektedir.



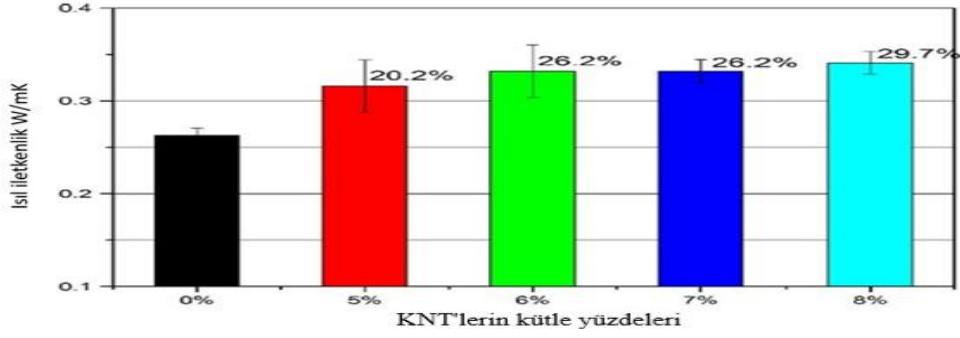
Şekil 8. Erime esnasında PA-SA ve (PA-SA) / KNT'lerin DSC eğrileri (N. Zhang, Yuan, Yuan, vd., 2014)

PA-SA ötektik karışımı olarak seçilen FDM'lerinin, ısıl iletkenliğinin iyileştirmesi amacıyla KNT'lerin kütlece 0%-5%-6%-7%-8% oranlarında eklenmesiyle elde edilen kompozit yapıların DSC eğrilerinden yararlanarak faz değişim sıcaklıklarına bakıldığında, KNT'lerin kütle yüzdelerinin artırılmasının, yüksek erime gizli ısısına sahip mükemmel ısıl özellikte (PA-SA) / KNT kompozit yapının elde edildiği görülmüştür. (N. Zhang, Yuan, Yuan, vd., 2014). Katılma işlemi ise PA-SA ve (PA-SA) / KNT kompozit FDM'lerin, DSC eğrileri Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Katılma esnasında PA-SA ve (PA-SA) / KNT'lerin, DSC eğrileri (N. Zhang, Yuan, Yuan, vd., 2014)

KNT eklenen (PA-SA) / KNT kompozit FDM'lerinin, katkısız PA-SA'nın aksine daha düşük erime sıcaklıklarında eridiği ve daha yüksek donma sıcaklıklarında katılaştığı görülmektedir (N. Zhang, Yuan, Yuan, vd., 2014). Şekil 10'da, (PA-SA) / KNT kompozitinin ısıl iletkenlikleri gösterilmektedir. Sonuç olarak ısıl iletken yapıya sahip olan KNT'lerin eklenmesi ile PA-SA FDM'lerin ısıl iletkenliklerinin arttığı gözlenmiştir (N. Zhang, Yuan, Yuan, vd., 2014).



Şekil 10. (PA-SA) / KNT kompozitinin ısıl iletkenlikleri (N. Zhang, Yuan, Yuan, vd., 2014)

Tablo 10. KNT / Yağ asidi FDM'lerin özellikleri ve uygulamaları

Karbon nanotüp ve Yağ asidi bazlı faz değişim malzemesi	Açıklama	Referanslar
KNT'ler, oksitlenmiş KNT ve aşılınmış karbon nanotüpler / palmitik asit faz değişim kompozitleri	Modifiye edilmiş karbon nanotüpler, palmitik asitin aksine gizli ısı ve termal iletkenlikte 34.1% oranında artış sergilemektedir. Ayrıca, modifiye karbon nanotüp kullanılan kompozit, 100 erime ve donma döngüsünden sonra ısıl kararlılık göstermektedir.	(Xiao vd., 2015)
Stearik asit / GG kompozitleri	Saf stearik asitle karşılaştırıldığında, faz değişimli kompozitlerin termal iletkenliğinin, ağırlıkça 9% GG kullanıldığında 6,2 kat daha fazla olduğu bulunmuştur.	(Cheng vd., 2017)
Stearik asit / KNT kompozitleri	Saf stearik ile karşılaştırıldığında, kompozit yapının ısıl iletkenliğinde artış görülmektedir.	(Cheng vd., 2017)
Laurik asit / KNT kompozitleri	Saf laurik asit ile KNT'li kompozitlerin ısıl iletkenlikleri kıyaslandığında, kompozit yapının ısıl iletkenliğinin 4 kat artığı gözlenmektedir.	(Y. Feng vd., 2018)
Stearik asit ve asitle işlenmiş KNT kompozitleri	Stearik asitin faz geçişi / asitle işlenmiş KNT'ler kompozit için gün ışığında çalıştırılmaktadır.	(B. Li vd., 2015)
Palmitik / stearik asit ikilisi ötektik karışım KNT kompozitleri	KNT takviyesi ile şarj deşarj süresi önemli ölçüde azalmıştır.	(N. Zhang, Yuan, Du, vd., 2014)
Yağ asitleri / KNT kompozitleri	Isı iletkenlik KNT takviyesi ile önemli ölçüde geliştirilmiştir.	(Meng vd., 2013)
Laurik asit / KNT kompozitleri	Isı ve kütle aktarımı KNT takviyesi ile iyileştirildi.	(Wu vd., 2019)
Çok duvarlı KNT / laurik asit kompozitleri	KNT takviyesi ile enerji depolama verimi artmaktadır.	(Ni vd., 2016)
Stearik asit ve çok duvarlı KNT	KNT takviyesi ile enerji depolama verimi artmaktadır.	(T. Li vd., 2013)

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Yapıca kararlı kompozitlerin üretiminde gizli ısı depolama malzemesi olarak; yağ alkolü (stearil alkol), parafin (oktadekan), ötektik karışım (17% stearik asit, 83% kaprik asit) olmak üzere 3 farklı FDM kullanılmıştır. Kullanılan tüm FDM'ler (SA, OD, (KA-SA)) Sigma-Aldrich şirketinden temin edilmiştir. Tez kapsamında kullanılan FDM'lerin, bazı fiziksel ve termal özellikleri Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 11. Kullanılan FDM'lerin bazı fiziksel özellikleri

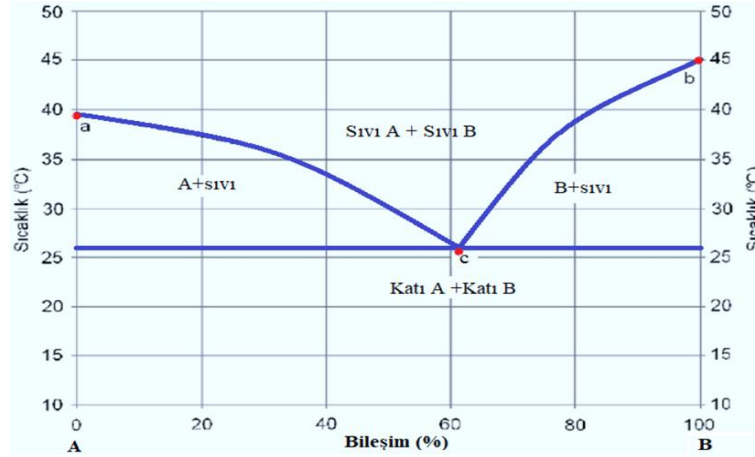
	<b>Stearil alkol</b>	<b>Oktadekan</b>	<b>Kaprik asit</b>	<b>Stearik asit</b>
<b>Ampirik formül</b>	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub> O	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>
<b>Molekül ağırlığı (g/mol)</b>	270.49	254.49	172.26	284.48
<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)(20°C'de)</b>	0.812	0.777	0.893	0.845
<b>Erime sıcaklığı (°C)</b>	59.4-59.8	28-30	29-32	68-70
<b>Safılık</b>	≥98	≥99	≥98	≥97

Yapıca kararlı kompozitlerin hazırlanmasında, gözenekli yapıları sayesinde FDM'leri tutarak, FDM'lerin akma davranışını engellemek üzere hindistan cevizi kabuğundan elde edilen aktif karbon ve atık araç lastiğinden elde edilen aktif karbon kullanılmıştır. HCK ve AAL Nanografi şirketinden temin edilmiştir. Yapıca kararlı kompozitlerin ısı iletkenliklerini iyileştirmek amacıyla takviye malzeme olarak kullanılan karbon nanotüp (KNF; safılık > 96%, dış çapı: 190-590 nm) ve genişletilmiş grafit (GG; safılık ≥96%, boyut: 79 mm), Nanografi şirketinden temin edilmiştir.

### 2.2. Kaprik-Stearik Ait Ötektik Karışımın (KA-SA) Hazırlanması

Tez kapsamında Stearil alkol, Oktadekan, Kaprik-Stearik asit ötektik bileşimi olmak üzere üç farklı FDM tercih edilmiştir. Bu FDM'lerden stearil alkol ve oktadekan saf "tek bileşenli" olarak kullanılmıştır. KA-SA iki farklı FDM'nin ötektik oranlarda karıştırılması

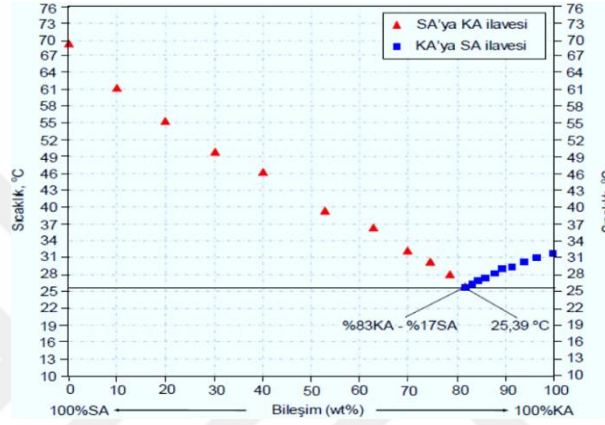
ile hazırlanmıştır. Tek bileşenli FDM'lerin faz geçiş sıcaklıkları sabittir. Termal konforun sağlanması için bazı FDM'lerin faz geçiş sıcaklıkları daha makul değerlere getirilmelidir. Tablo 12'deki verilere göre; Stearik asiti'in erime noktası 68-70°C'dir ve bu sıcaklık aralığı bina iklimlendirme uygulamaları için uygun bir değer değildir. İki ya da daha fazla FDM'nin belirlenen oranlarda karıştırılmasıyla istenilen faz geçiş sıcaklığına sahip yeni FDM'ler (ötektik karışımlar) üretilebilmektedir. Şekil 11'de, A ve B bileşenlerinden oluşan temsili bir ötektik bileşime ait faz diyagramı gösterilmiştir. Diyagramdaki "a" noktası saf A'nın, "b" noktası saf B'nin katılma noktalarını göstermektedir. Diyagramda görüldüğü gibi saf A bileşenine saf B bileşeni eklendiğinde ya da saf B bileşenine saf A bileşeni eklendiğinde sırasıyla karışımın katılma sıcaklığı "ac" eğrisi ve "bc" eğrisi boyunca azalmaktadır. A ve B bileşenleri ile doymuş olan "c" noktası ötektik noktayı temsil eder. Kendini oluşturan bileşenlerle doymuş halde olan ve en düşük katılma noktasına sahip olan çözeltili ötektik karışım, bu karışımın bileşenlerine ötektik bileşim ve bileşimin sabit kalarak karışımın tamamen katıldığı sabit sıcaklığa ise ötektik sıcaklık denir. "c" doğrusunun altında kalan alanda A ve B kristallerinin heterojen karışımı bulunmaktadır. Ötektik karışımın bileşen oranları DSC termogramında faz dönüşümlerinin tek bir pik vermesi ile temsil edilir.



Şekil 11. Ötektik bileşimin oluşturulmasında kullanılan sıcaklık-bileşim faz diyagramı (Karaipekli, 2010)

KA-SA ötektik bileşiminin hazırlanması literatür (Karaipekli, 2010)'den yararlanılarak yapılmıştır. Sözü geçen çalışmada KA-SA ötektik karışımın bileşen oranları için bir seri farklı kütle oranlarında KA-SA karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan

karişimlar erime sıcaklığının üzerinde sürekli kariştirilerek ısıtılmıştır. Hazırlanan karişimların DSC analizi ile erime katılma sıcaklıkları ve bununla birlikte kütle bileşim oranları bulunarak Şekil 12'deki diyagram oluşturulmuştur. Elde edilen diyagram sayesinde kütle bileşim oranları 83%KA-17%SA ve erime sıcaklığı 25.39°C olarak belirlenmiştir. Ötektik karişımın bileşenlerinin erime sıcaklıkları KA ve SA sırasıyla ~70°C ve ~32°C iken 83%KA-17%SA kütle oranlarındaki ötektik karişımın erime sıcaklığı 25.39°C çekilerek binalarda kullanılmak üzere termal konfor sıcaklığına erişilmiştir.



Şekil 12. KA-SA karişımının kütlece % bileşimine ait erime sıcaklığı (Karaipekli, 2010)

### 2.3. Yapıca Kararlı Kompozitlerin Hazırlanması

Prosedürün ilk basamağında; tez çalışması kapsamında 1. destek materyali olarak seçilen gözenekli yapıya sahip hindistan cevizi kabuğundan elde edilen aktif karbona (HCK) en yüksek emme oranına sahip kuma davranışı göstermeyen kompozit yapının belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle birinci FDM olarak seçilen stearyl alkol erime noktasının (57.9°C) üzerindeki bir sıcaklığa kadar eritilerek, tartım miktarı (100% HCK – X%FDM) hesaplamasından yararlanarak miktarı belirlenmiş ve toz halindeki HCK'a ilave edilerek bir seri farklı kütlece yüzde FDM oranlarına sahip yapılar hazırlanmıştır. Aynı işlem birinci destek materyali olan HCK'a, tez kapsamında seçilen ikinci FDM (oktadekan) erime noktası (28°C), üçüncü FDM olarak seçilen ötektik karişım erime noktası (25.39°C), üzerindeki bir sıcaklığa kadar eritilip toz halindeki HCK'a ayrı ayrı farklı kütlece yüzde oranlarında ilave edilerek seri yapılar hazırlanmıştır. Hazırlanan yapılar FDM% oranları; 45-65% olarak belirlenmiş ve hesaplanan bu oranlara göre tartımlar yapılarak yapılar hazırlanmıştır.

Prosedürün ikinci basamağında; destek materyallerinin emme oranlarının karşılaştırılması için seçilen 2. destek materyali olan; atık araç lastiğinden elde edilen toz halindeki aktif karbona (AAL) farklı kütle oranlarında stearil alkol, oktadekan ve öteklik karışım tartılarak ilave edilmiştir. Her bir FDM erime noktası üzerindeki bir sıcaklıkta eritilerek bir beher içerisinde toz halindeki hesaplanan AAL üzerine ilave edilmiştir. Belirli kütle oranlarında eritilmiş üç farklı FDM (stearil alkol, oktadekan, öteklik karışım) ve toz halindeki farklı destek materyallerin emmesini sağlamak için, FDM'lerin erime noktasından +20°C olacak şekilde, 60 kPa vakumlu etüvde bir saat bekletilmiştir.

Destek materyallerinin gözenekli yapılarına daha yüksek oranlarda FDM'lerin dahil edilmesi için direkt karıştırma yerine vakumda emdirme yöntemi tercih edilmiştir. Bir saat sonunda FDM'lerin destek materyallerine daha iyi nüfus etmesi için vakum boşaltılmış numuneler cam baget ile karıştırılarak tekrar bir saat daha vakumlandırma işlemi altında FDM'lerinin erime noktasının üstünde olacak şekilde destek materyalleri tarafından emilme oranının artırılması amaçlanmıştır. Vakumlu etüvden alınan örneklerde FDM'lerin destek materyallerinin gözenekli ağ yapılarının içerisinde de kristallenebilmesi için 5°C'ye kadar soğutularak bekletilmiştir. İşlem sonunda farklı FDM oranları içeren HCK/FDM ve AAL/FDM kombinasyonları elde edilmiştir.



Şekil 13. Kompozitlerin hazırlanma prosedürü

Bir gün bekletilen HCK/FDM ve AAL/FDM'ler den oluşan YKK-FDM'lerin bulunması için sızdırmazlık testine tabii tutulmuşlardır. Bunun için numuneler çapı 1 cm olacak şekilde 1'er gramlık numuneler kalıp kullanarak hidrolik presle yuvarlak pelet haline getirilmiştir. Pelet haline getirilmiş yapılar kontrollü ısıtıcı yüzey üzerine

yerleştirilen beyaz bir kağıt üzerine konularak, FDM'lerin erime sıcaklığının üstünde olacak şekilde yarım saat bekletilmiştir. İşlem sırasında kompozitlerden FDM'lerin akma davranışı gösterip göstermediği incelenmiştir. Akma davranışı göstermeyen en yüksek emme oranına sahip kompozit yapılar bulunana kadar işleme devam edilmiştir. En yüksek emme oranına sahip ve akma göstermeyen kombinasyonlar yapıca kararlı kompozit FDM'ler (YKK-FDM) olarak adlandırılmıştır.

Tablo 12. HCK/FDM ve AAL/FDM'den oluşan YKK-FDM'lerin listesi

<b>Destek Materyali</b>	<b>FDM</b>	<b>Nihai YKK-FDM</b>
HCK	Stearil alkol	HCK/SA
HCK	Oktadekan	HCK/OD
HCK	Ötektik karışım	HCK/KA-SA
AAL	Stearil alkol	AAL/SA
AAL	Oktadekan	AAL/OD
AAL	Ötektik karışım	AAL/KA-SA

#### **2.4. Isıl İletkenlikleri Artırılmış YKK-FDM'lerin Hazırlanması**

Bir önceki bölümde verilen bilgiler ile hazırlanan YKK-FDM'ler yüksek gizli ısı depolama özelliklerine sahip olsalar bile düşük ısı iletkenlikleri yüzünden enerji şarj / deşarj sürelerini uzatarak verimi oldukça düşürecektir. Literatür verilerinden yararlanarak bu tez kapsamında ısı iletkenlikleri iyileştirilmiş YKK-FDM'ler üretilmiştir. Prosedürün ikinci aşamasında FDM'lerinin ve destek materyallerinin düşük ısı iletkenliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, ısı iletimi oldukça iyi olan; genişletilmiş grafit (GG) ve karbon nanofiber (KNF)'nin, destek materyallerinin iki farklı kütlece yüzde oranlarında (5%-10%) eklenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Isı iletimi takviye maddelerinin oranlarının en yüksek kütle oranının 10% olmasının birinci sebebi; daha yüksek oranlarda ilavesiyle kompozitler içerisinde aglomerasyon sonunu oluşturmasıdır. İkinci sebebi ise söz konusu malzemelerin yüksek maliyetleri doğrudan kompozitlerinde maliyetleri artıracaktır.

Isı iletimini iyileştirici maddelerin destek materyaline ilave edilmeden önce, ısı iletim takviye ürünlerin kompozit içerisinde topaklaşmasını engelleyebilmek için GG'in üzerini örtecek kadar saf aseton ilave edilerek üç saat boyunca manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Üç saat sonunda asetonu buharlaştırarak uzaklaştırmak için iki gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Asetonun uzaklaştığından emin olduktan sonra, kütlece 5%, 10% oranlarında GG olacak şekilde, tez çalışması kapsamında seçilen aktif karbonlara

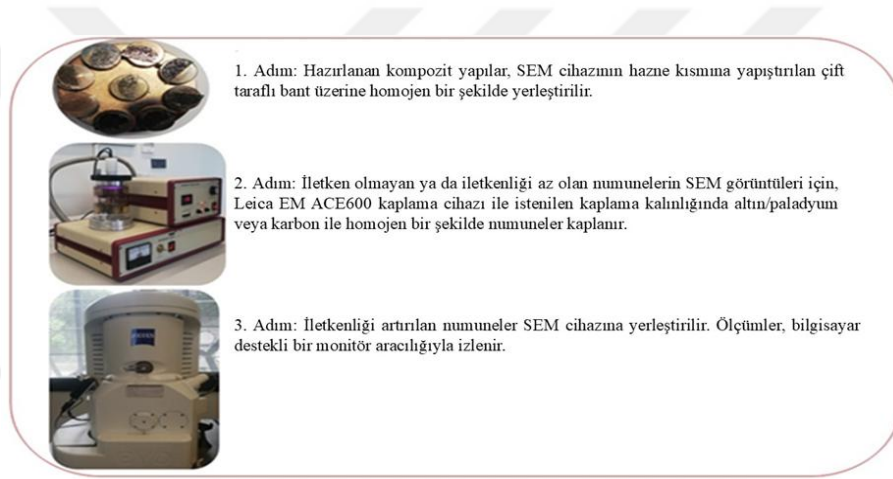
(HCK ve AAL) ayrı ayrı ilave edilerek, üç saat boyunca karıştırmaya devam edilmiştir. Aynı işlem basamakları KNF için de gerçekleştirilmiştir. Bunun için KNF beher içerisinde alınarak üzeri örtülecek kadar aseton ile kapatılarak manyetik karıştırıcı ile üç saat karıştırılmış. Üç saat sonunda aseton buharlaştırılarak uzaklaştırılmış ve kütlece 5%, 10% oranlarında KNF takviyesi olacak şekilde iki farklı destek materyaline ilave edilmiş ve böylece ısı iletimi kütlece 5%-10% GG ve kütlece 5%-10% KNF ile iyileştirilmiş iki farklı ön kompozit malzeme hazırlanmıştır. Prosedürün son aşamasında hazırlanan her bir ön kompozite 45%-65% oranları arasında değişen kütlece yüzde oranlarında üç farklı FDM'ler bir beher içerisinde ilave edilerek aynı vakum şartları altında aynı işlem sırası ile FDM'lerin ısı iletimi iki farklı kütlece yüzde oranlarında iyileştirilmiş iki farklı destek materyaline emdirilme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 13. Tez kapsamında hazırlanan tüm YKK-FDM'lerin listesi

Numune	Kütlece % GG	Kütlece % KNF	Kompozit yapı	FDM	YKK-FDM
HCK	-	-	HCK	SA	HCK/SA
HCK	5%	-	HCK/5%GG	SA	HCK/5%GG/SA
HCK	10%	-	HCK/10%GG	SA	HCK/10%GG/SA
HCK	-	5%	HCK/5%KNF	SA	HCK/5%KNF/SA
HCK	-	10%	HCK/10%KNF	SA	HCK/10%KNF/SA
HCK	-	-	HCK	OD	HCK/OD
HCK	5%	-	HCK/5%GG	OD	HCK/5%GG/OD
HCK	10%	-	HCK/10%GG	OD	HCK/10%GG/OD
HCK	-	5%	HCK/5%KNF	OD	HCK/5%KNF/OD
HCK	-	10%	HCK/10%KNF	OD	HCK/10%KNF/OD
HCK	-	-	HCK	(KA-SA)	HCK/(KA-SA)
HCK	5%	-	HCK/5%GG	(KA-SA)	HCK/5%GG/(KA-SA)
HCK	10%	-	HCK/10%GG	(KA-SA)	HCK/10%GG/(KA-SA)
HCK	-	5%	HCK/5%KNF	(KA-SA)	HCK/5%KNF/(KA-SA)
HCK	-	10%	HCK/10%KNF	(KA-SA)	HCK/10%KNF/(KA-SA)
AAL	-	-	AAL	SA	AAL/SA
AAL	5%	-	AAL/5%GG	SA	AAL/5%GG/SA
AAL	10%	-	AAL/10%GG	SA	AAL/10%GG/SA
AAL	-	5%	AAL/5%KNF	SA	AAL/5%KNF/SA
AAL	-	10%	AAL/10%KNF	SA	AAL/10%KNF/SA
AAL	-	-	AAL	OD	AAL/OD
AAL	5%	-	AAL/5%GG	OD	AAL/5%GG/OD
AAL	10%	-	AAL/10%GG	OD	AAL/10%GG/OD
AAL	-	5%	AAL/5%KNF	OD	AAL/5%KNF/OD
AAL	-	10%	AAL/10%KNF	OD	AAL/10%KNF/OD
AAL	-	-	AAL	(KA-SA)	AAL/(KA-SA)
AAL	5%	-	AAL/5%GG	(KA-SA)	AAL/5%GG/(KA-SA)
AAL	10%	-	AAL/10%GG	(KA-SA)	AAL/10%GG/(KA-SA)
AAL	-	5%	AAL/5%KNF	(KA-SA)	AAL/5%KNF/(KA-SA)
AAL	-	10%	AAL/10%KNF	(KA-SA)	AAL/10%KNF/(KA-SA)

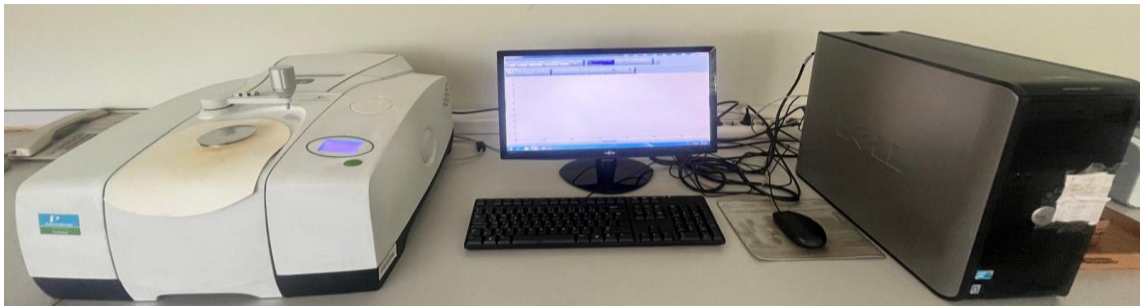
## 2.5. Üretilen YKK-FDM'lerin Karakterizasyonu

Üretilen YKK-FDM'lerin yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu cihazı (SEM, ZEISS EVO LS 10 model) ile incelenmiştir (Şekil 14). SEM cihazı ile analiz yöntemi ile hazırlanan yapıca kararlı kompozitlerinin yüzey morfolojisini tayin edilebilmek için hazırlık aşamaları Şekil 14'de gösterilmektedir. Analiz sonucunda ısı iletimi artırılmamış destek materyallerinin (HCK ve AAL) ve ısı iletimi kütlerce 10%GG ve 10%KNF ile artırılmış (HCK/10%GG, HCK/10%KNF, AAL/10%GG, AAL/10%KNF) kompozit yapılar içerisinde FDM'lerin (SA, OD, (KA-SA)) homojen olarak dağılıp dağılmadığını anlamak amacıyla bu analizler yapılmıştır.



Şekil 14. Numunelerin SEM cihazında ölçümleri için hazırlık aşamaları

Kompozit yapıların kimyasal yapısını ve bileşenler arasındaki etkileşimleri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi analizleri (FTIR, PerkinElmer Frontier Model ile belirlenmiştir. Spektrumlar  $4000\text{ cm}^{-1}$  ile  $500\text{ cm}^{-1}$  dalga boyu aralıklarında  $4\text{ cm}^{-1}$  çözünürlükte alınmıştır. FT-IR cihazı Şekil 15 'de gösterilmektedir.



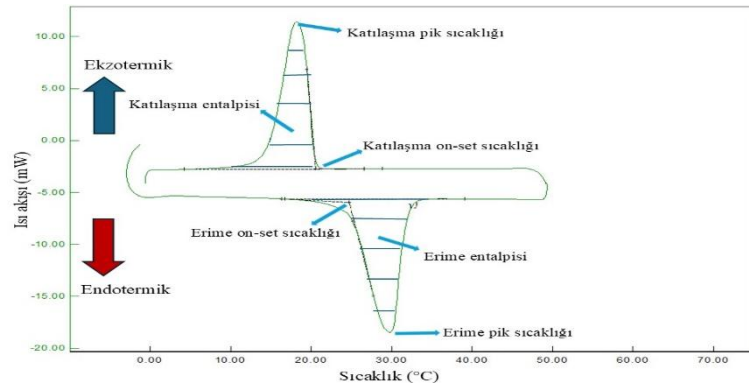
Şekil 15. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi

Hazırlanan yapıca kararlı kompozitlerinin gizli ısı depolama özellikleri Şekil 16’da gösterilen diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC, Hitachi 7020 model) cihazı ile belirlenmiştir. DSC analizi inert gaz (azot gazı ortamında) 5°C/dk ısıtma/soğutma hızında gerçekleştirilmiştir. 10’ar mg numunelere karşı referans olarak boş krezeler konularak ölçümler alınmıştır. Bu şekilde referans hücreye göre numunelerin ısı akışlarına karşı verdikleri tepkiler belirlenmiştir.



Şekil 16. DSC Cihazı (Hitachi-DSC 7020 Model)

Analiz sonucunda cihaza bağlı software ile ısı akışı-sıcaklık grafikleri oluşturulmuş ve numunelerin gizli ısı depolama özellikleri hakkında bilgiler edinilmiştir. Piklerin başlangıç değerleri (on-set) numunelerin faz değişim sıcaklıklarının başladığı sıcaklıkları göstermektedir. Pik sıcaklıkları da faz değişimlerinin tamamen gerçekleştiği (tamamlandığı) sıcaklıkları göstermektedir. Erime katılaşma piklerinin altında kalan alan faz değişimine karşılık gelen entalpi değişimini vermektedir. Şekil 17’de gizli ısı depolama verileri örnek bir DSC eğrisi ile temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 17. Tipik bir DSC termogramında karakteristik değerlerin belirlenmesi

Hazırlanan yapıca kararlı kompozitlerin ısıl kararlılığı Termogravimetrik analizleri (TGA Perkin-Elmer TGA 4000 model) ile belirlenmiştir. (Şekil 18) Analizler inert argon gazı varlığında 25-650°C sıcaklık aralığında 25°C/dk ısıtma hızında incelenmiştir. TGA analizi ile numunenin sıcaklığının artırılması ile kütesinde oluşabilecek azalma miktarı, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Bu şekilde yapıca kararlı kompozitin hangi sıcaklıkta bozunmaya başladığı ve hangi sıcaklığa kadar yüksek bozunma direnci gösterebildiği ölçülmüştür. Hazırlanan kompozitler YKK-FDM'lerin analizleri yapıldıktan sonra döngü kararlılıklarını analiz edebilmek için YKK-FDM'ler 0-60°C sıcaklık aralığında 1000 kez hızlandırılmış erime katılaşma ısıl döngü işlemi uygulandı. Bu işlem için termal döngü cihazı (3Prime, Techne) kullanıldı. Döngü sonrası YKK-FDM'lerin FT-IR ve DSC analizleri tekrarlandı. Bu şekilde YKK-FDM'lerin termal döngü öncesi ve 1000 kez eritme katılaşma döngüsü sonrası değerleri Şekil 18'de gösterilmektedir.



Şekil 18. Termal döngü cihazı (3Prime, Techne)



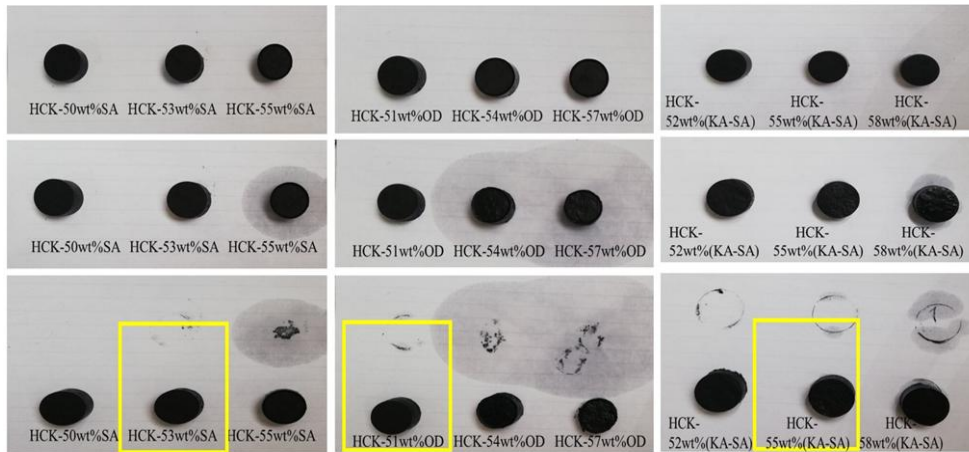
Şekil 19. TGA cihazı (Perkin-Elmer TGA 4000)

Isıl enerji depolamada en çok karşılaşılan sorunlardan biri; FDM'lerin ve destek materyallerinin düşük ısı iletkenlikleridir. Düşük ısı iletkenlik, enerjinin şarj ve deşarj süresini artırarak, prosesinin enerji verimini önemli ölçüde azaltacaktır. Bu nedenle tez kapsamında düşük ısı iletim dezavantajını çözüm için ısı iletkenliği yüksek maddelerin belirli oranlarda takviyesi ile çözüm bulunmaya çalışılmıştır. HCK ve AAL destek materyallerine kütlece 5%-10% oranlarında GG ve KNF takviyeleri ile hazırlanan yapılar, FDM'leri aynı metot ile emdirilerek hazırlanan kompozit yapıların peletleri çıkartılmıştır. Destek materyallerine ilave edilen ısı iletimi yüksek takviyeli ürünler, aynı koşullarda ısıtma işlemine tabii tutularak termal kamera ile belirli zaman aralıklarında erime sıcaklıklarına kadar termal görüntüleri çekilmiştir. Bu işlem için (FLIR E5 XT IR KAMERA) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

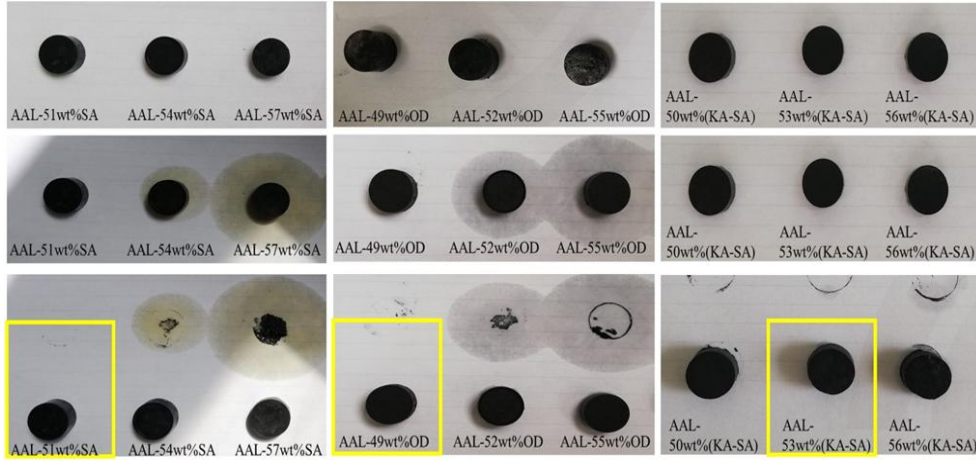
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Sızdırmazlık Test Sonuçları

Tablo 13’de listelenen kompozitlerin YKK-FDM olarak hazırlamak için sızdırmazlık davranışlarının incelendiği test sonuçları aşağıdaki fotoğraflarla gösterilmiştir. Fotoğraflarda hindistan cevizi kabuğundan ve atık araç lastiğinden elde edilen aktif karbonlara farklı oranlarda FDM’leri ilave edilerek en yüksek oranda emme yapan ve sızdırma davranışı göstermeyen yapılar ile karşılaştırma amacıyla sızdırma yapanların fotoğrafları çekilmiştir. Sızdırma yapmayan ve en yüksek emme oranına sahip ön kompozitler, yapıcı kararlı kompozit faz değişim malzemeleri (YKK-FDM) olarak adlandırılmıştır. Sızdırmazlık test sonuçlarına göre HCK destek materyaline, akma davranışı sergilemeden kütlece yüzde en yüksek oranda FDM’ler emdirilme oranları sırasıyla; 53% stearil alkol, 51% oktadekan ve 55% ötektik karışım olarak belirlenmiştir. Sızdırmazlık test sonuçlarına göre AAL destek materyaline, akma davranışı sergilemeden kütlece yüzde en yüksek oranda FDM’lerin emdirilme oranları sırasıyla; 51% stearil alkol, 49% oktadekan ve 53% ötektik karışım olarak belirlenmiştir. Sızdırmazlık testi, ısı iletimi iyileştirilmiş destek materyallerine emdirilen FDM ile birlikte elde edilen kompozit yapılara da aynı koşullarda uygulanmıştır. Isı iletimini artırıcı takviyeli kompozit yapıların, ısı iletiminin iyileştirilmemiş kompozitlere kıyasla sızdırma davranışlarında önemli bir değişiklik görülmemiştir. Sonuç olarak; GG ve KNF’nin akma davranışında önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 20. HCK ve 3 farklı FDM ile hazırlanan kompozitlerin sızdırmazlık test sonuçları



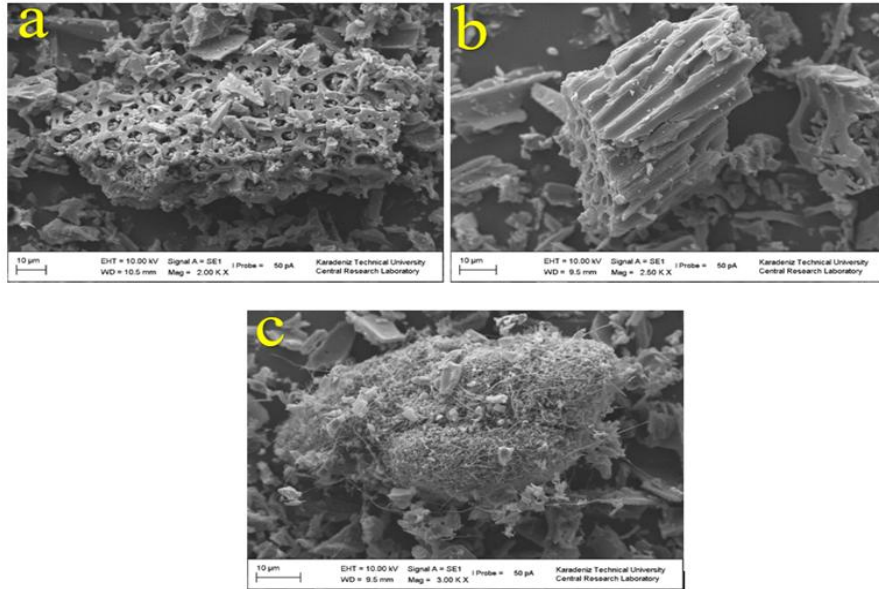
Şekil 21. AAL ve 3 farklı FDM ile hazırlanan kompozitlerin sızdırmazlık test sonuçları

Tablo 14. Üretilen kompozitlerin en yüksek FDM emme oranları

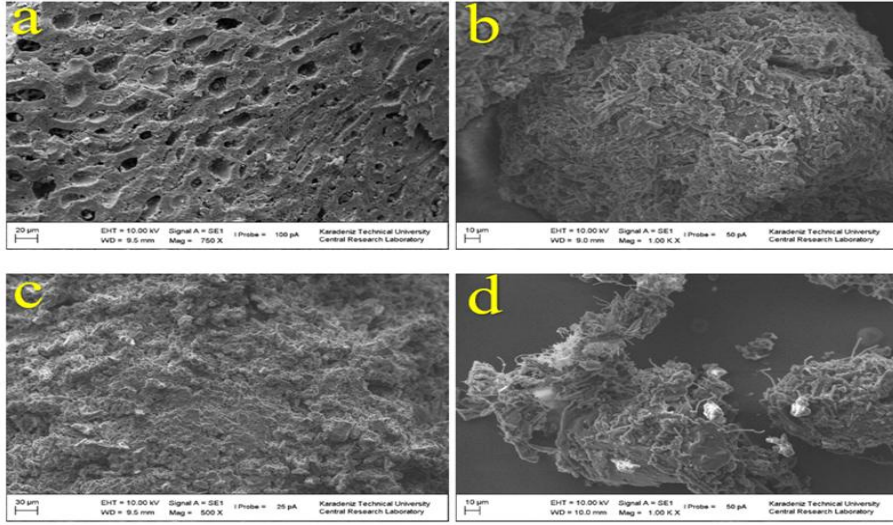
Destek materyali	Kütlece yüzde ısı iletimi artırıcı katkı maddesi	%kütle FDM
HCK	-	53% SA
HCK	5% GG	53% SA
HCK	10% GG	53% SA
HCK	5% KNF	53% SA
HCK	10% KNF	55% SA
HCK	-	51% OD
HCK	5% GG	51% OD
HCK	10% GG	51% OD
HCK	5% KNF	51% OD
HCK	10% KNF	53% OD
HCK	-	55% (KA-SA)
HCK	5% GG	55% (KA-SA)
HCK	10% GG	55% (KA-SA)
HCK	5% KNF	55% (KA-SA)
HCK	10% KNF	57% (KA-SA)
AAL	-	51% SA
AAL	5% GG	51% SA
AAL	10% GG	51% SA
AAL	5% KNF	51% SA
AAL	10% KNF	53% SA
AAL	-	49% OD
AAL	5% GG	49% OD
AAL	10% GG	49% OD
AAL	5% KNF	49% OD
AAL	10% KNF	51% OD
AAL	-	53% (KA-SA)
AAL	5% GG	53% (KA-SA)
AAL	10% GG	53% (KA-SA)
AAL	5% KNF	53% (KA-SA)
AAL	10% KNF	55% (KA-SA)

### 3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu ( SEM ) Analiz Sonuçları

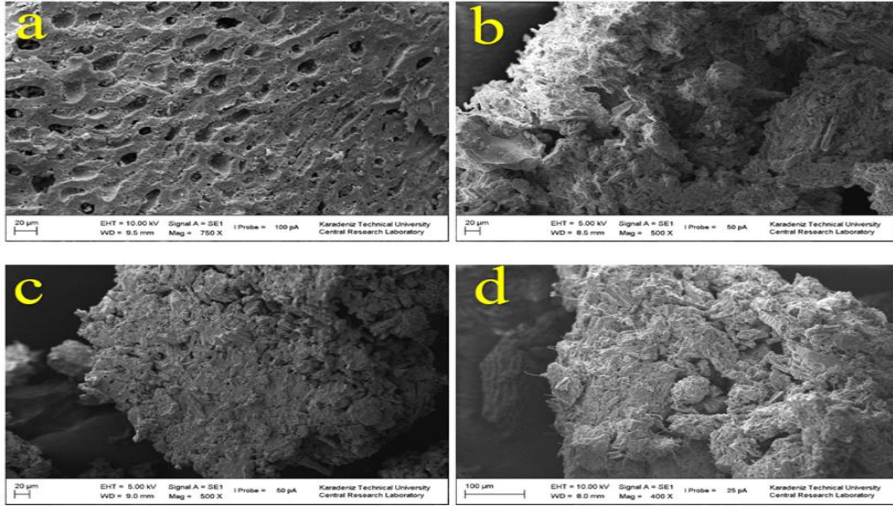
Aşağıdaki SEM görüntülerinde oldukça gözenekli yapıya sahip hindistan cevizi kabuğu ve hindistan cevizi kabuğuna göre daha az gözenekli bir yapıya sahip olan atık araç lastiğin yüzey morfolojisi görülmektedir. Ayrıca ısıl iletkenliği GG ve KNF ile iyileştirilmiş destek malzemelerine FDM emdirilerek elde edilen kompozit malzemelerin mikro yapılarında fotoğrafları aşağıda gösterilmiştir. SEM görüntülerinden de görüldüğü gibi destek materyalleri farklı boyutlarda gözenekli yapılara sahiptir ve bu gözenekli yapılar destek materyalinin yüzey alanını artırarak, FDM'lerinin emilmesi için daha fazla alan oluşturmaktadır. Diğer tarafta ısı iletimini artırması için kullanılan, GG'de şeritli yapılar, KNF'de ise birbirine dolanmış yumaklar görülmektedir. GG ve KNF ısıyı kesintisiz iletmek için yüksek ısıl iletkenlik ağ yapılarına sahiptir. Sahip oldukları morfoloji de yüksek miktarda FDM'si emilimine olanak sağlayacağı düşünülmektedir. Emdirme işlemi yapılmadan destek materyalinin ve farklı kütlece yüzde oranlarında FDM'si emdirilmiş kompozit yapıların SEM görüntülerini incelediğimizde, FDM'lerin kompozit yüzeyi boyunca yer yer homojen olarak dağılmış olduğunu yer yer ise aglomerasyonları görmekteyiz. Buna rağmen FDM'lerin kompozit yapı içerisinde daha çok homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir.



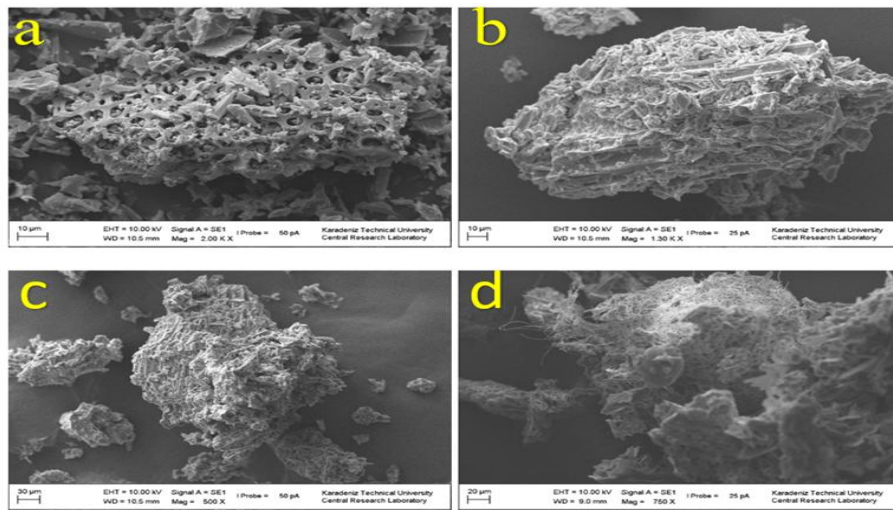
Şekil 22. SEM görüntüleri a) Saf HCK b) HCK/10%GG c) HCK/10%KNF



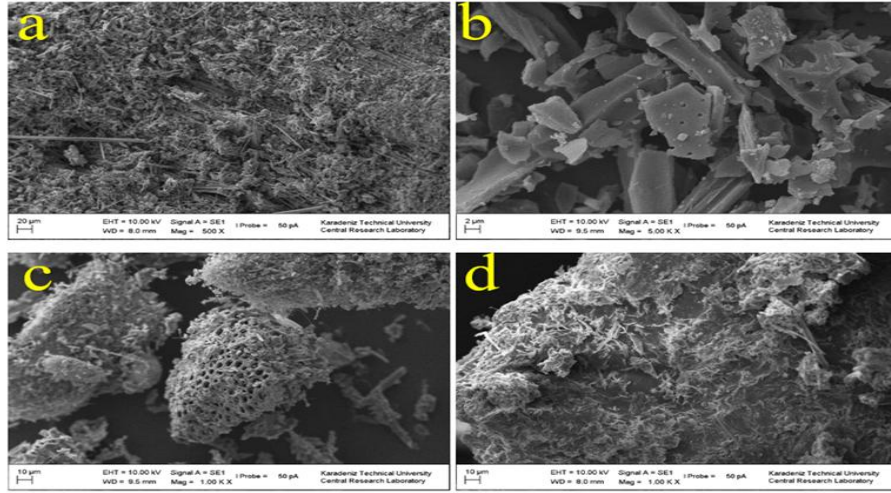
Şekil 23. a) Saf HCK b) HCK/SA c) HCK/10%GG/SA d) HCK/10%KNF/SA



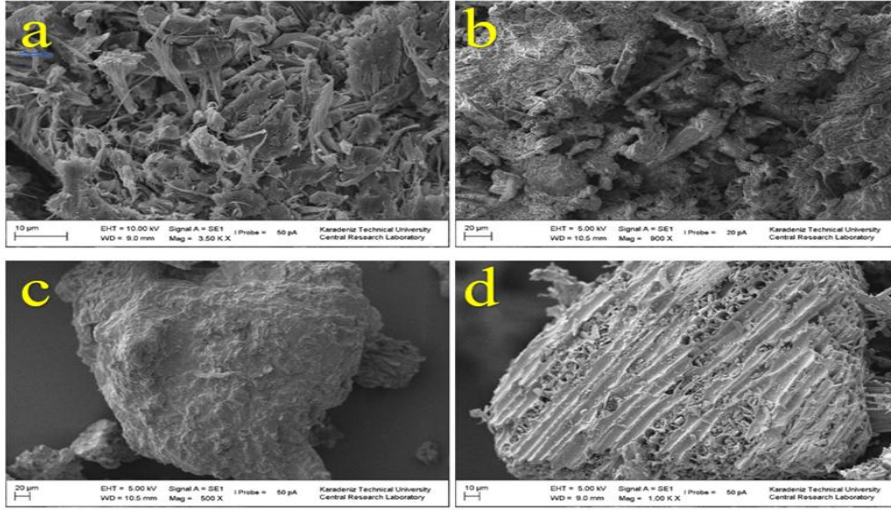
Şekil 24. a) Saf HCK b) HCK/OD c) HCK/10%GG/OD d) HCK/10%KNF/OD



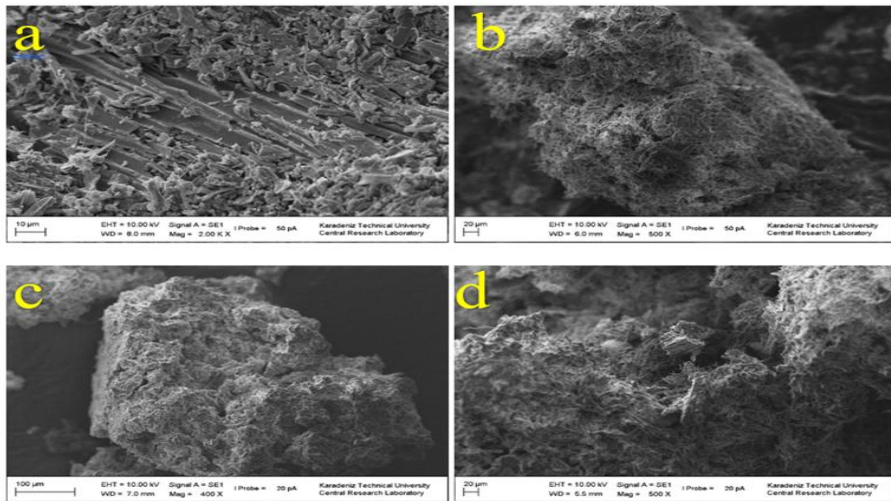
Şekil 25. a) Saf HCK b) HCK/(KA-SA) c) HCK/10%GG/(KA-SA) d) HCK/10%KNF/(KA-SA)



Şekil 26. a) Saf AAL b) AAL/SA c) AAL/10%GG/SA d) AAL/10%KNF/SA



Şekil 27. a) Saf AAL b) AAL/OD c) AAL/10%GG/OD d) AAL/10%KNF/OD

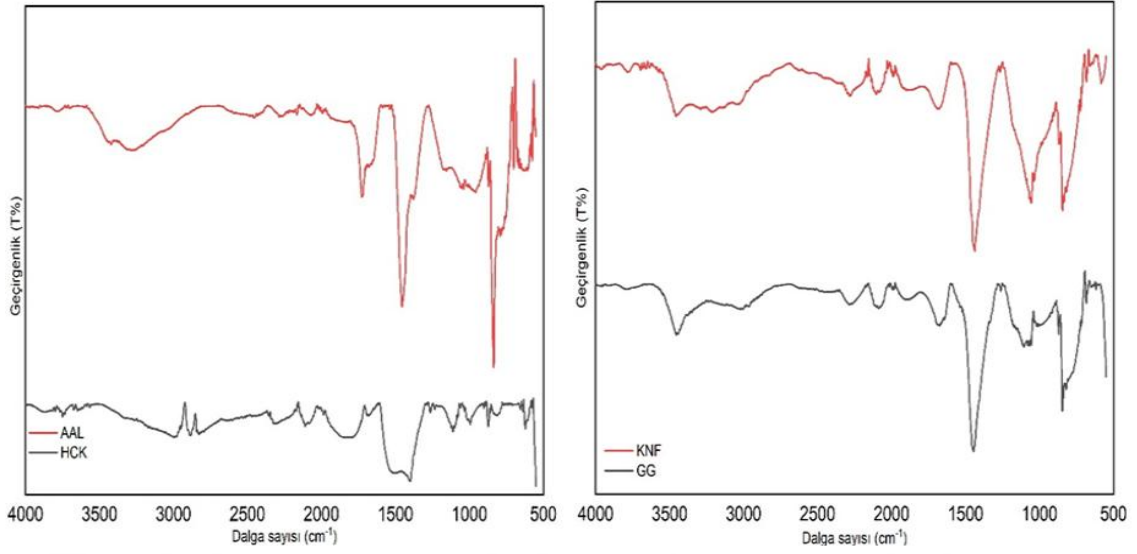


Şekil 28. a) Saf AAL b) AAL/(KA-SA) c) AAL/10%GG/(KA-SA) d) AAL/10%KNF/(KA-SA)

Yukarıdaki görüntülerde destek materyali olarak seçilen gözenekli yapıya sahip olan HCK ve AAL ile elde edilen yapıcı kararlı kompozitlerin yüzey morfolojilerini incelediğimizde, destek materyallerinin yüzey morfolojilerinin, FDM'lerinin emdirilme öncesi ve sonrası yüzey morfolojisinden farklı olduğu görülmektedir. Destek materyallerinin farklı boyutlardaki gözenekli yapılarının büyük bir kısmı çalışılan üç farklı FDM ile farklı oranlarda dolmuştur. İncelenen kompozitlere yüksek voltaj altında elektron ışını uygulanmış olmasına rağmen, kapiler/yüzey gerilim kuvvetlerinin tüm matriks içindeki yapısal direncinden kaynaklı ikinci bir faz olarak herhangi bir sıvı faz tespit edilmemiştir. Elde edilen sonuçlar bize yapıyı oluşturan bileşenler arasında iyi bir fiziksel uyumluluğun olduğunu göstermektedir. Bu uyumluluk, yapıya kararlılık kazandırarak hazırlanan kompozitlerin IED sistemlerinde, FDM'lerin sızıntı sorunu olmadan kullanılması için uygun olduğunu göstermektedir. Kompozitlere ısı iletkenlik artırıcı olarak iki farklı kütlece yüzde oranlarında (5%-10%) ilave edilen karbon bazlı malzemeler (GG, KNF), ısı iletkenliği iyileştirici ağ yapısına sahiplerdir. Bu takviyeler kesintisiz bir yol ile ıyı çok hızlı bir şekilde iletterek enerjinin şarj ve deşarj süresini önemli miktarda azalmasını sağlar ve enerji verimini artırır.

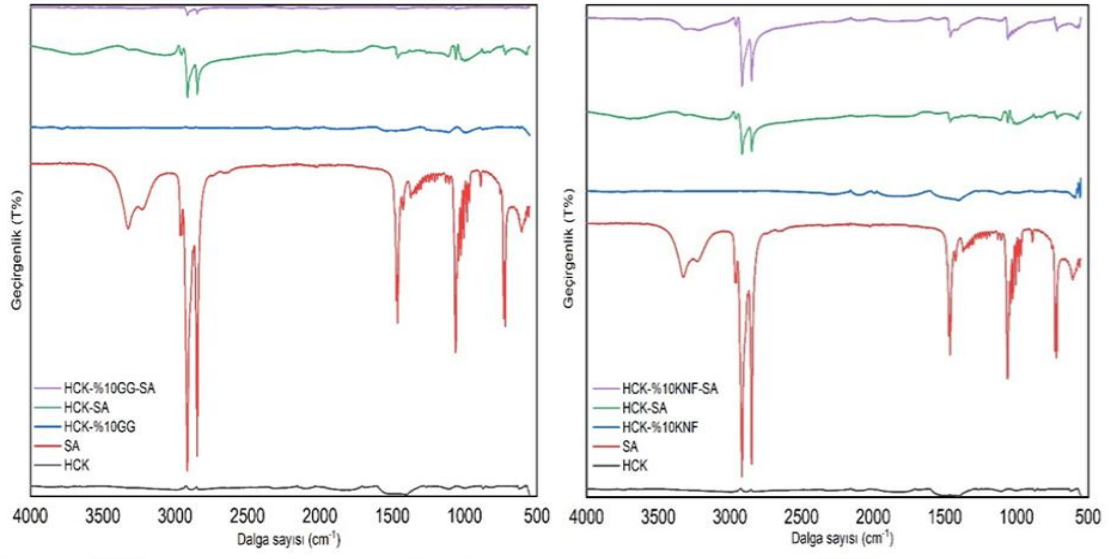
### **3.3. FT-IR Analiz Sonuçları**

Kompoziti oluşturan her bir bileşenin (SA, OD, KA-SA, GG, KNF, HCK, AAL) ve üretilen yapıcı kararlı kompozitlerin kimyasal yapı analizi kapsamında, kompoziti oluşturan bileşenlerinin arasındaki muhtemel etkileşimleri belirleyebilmek için FT-IR analizleri yapılmıştır. Bu bağlamda, gözenekli destek materyali olarak seçilen saf HCK ve AAL ile ısı iletkenlik artırıcı katkı malzemesi olarak seçilen saf GG ve KNF için elde edilen FT-IR spektrumları Şekil 29'da verilmiştir.

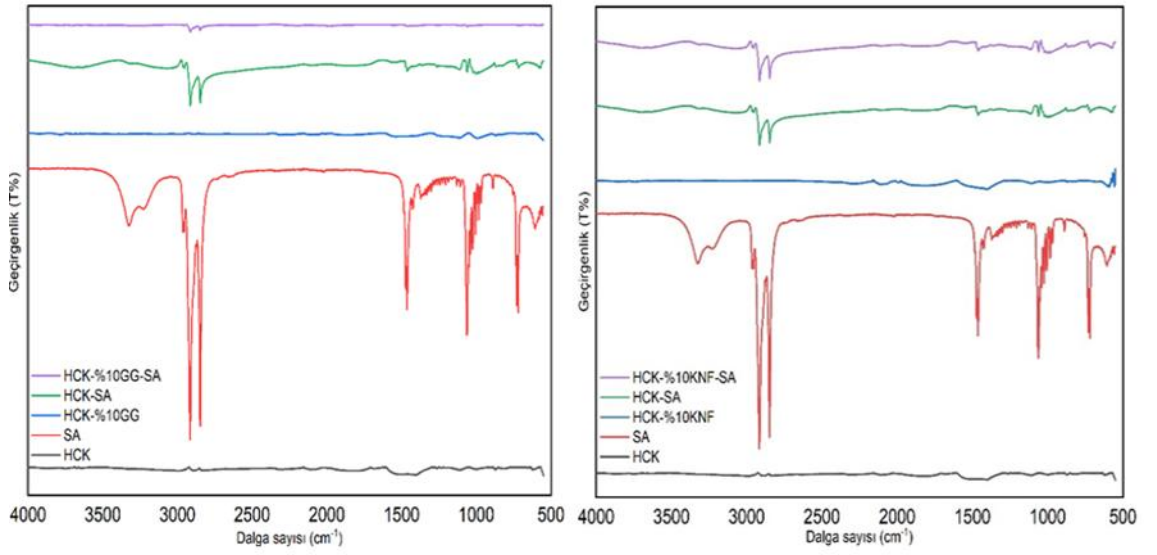


Şekil 29. Saf HCK, AAL, GG ve KNF için elde edilen FT-IR spektrumları

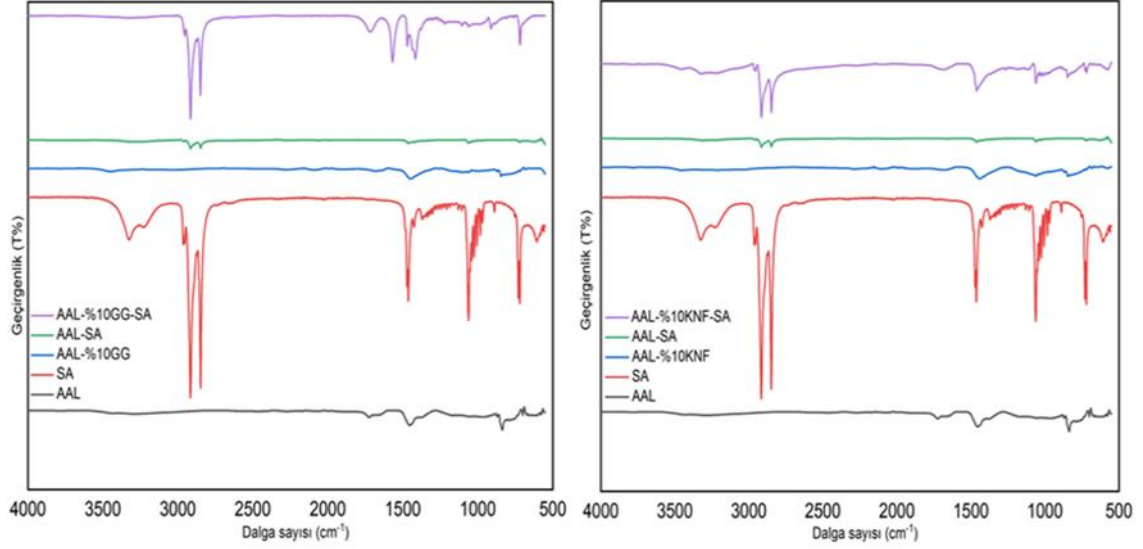
Saf HCK biyokütlesinin FT-IR spektrumunda; 3000-2700  $\text{cm}^{-1}$  C-H gerilme, 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$  O-H gerilme, 2200  $\text{cm}^{-1}$  C $\equiv$ N gerilme, 2110  $\text{cm}^{-1}$  C $\equiv$ C gerilme, 2000  $\text{cm}^{-1}$  C-H bükülme, 1500  $\text{cm}^{-1}$  N-O gerilme, 1100  $\text{cm}^{-1}$  C-N gerilme, 900  $\text{cm}^{-1}$  O-H bükülme titreşimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Saf AAL biyokütlesinin FT-IR spektrumunda; 3200-3000  $\text{cm}^{-1}$  deki geniş ve yayvan pikin -OH fonksiyonel grubuna, 3000-2700  $\text{cm}^{-1}$  C-H gerilme, 1400-1200  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki pikin C-O titreşiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. 1300-950  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki piklerin esterler, eterler veya fenollerdeki C-C'ye karşılık gelmektedir. 900-700  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki birçok karakteristik pikler aromatik yapı ile ilişkili olduğu kabul edilir. HCK ve AAL'de ortak görülen 1700  $\text{cm}^{-1}$ 'deki piklerin ise C=C, C=O ve C=N fonksiyonel gruplarından kaynaklanmakta olduğu düşünülmektedir. GG ve KNF'nin FT-IR spektrumlarında benzer karakteristik pikler görülmektedir. 3000-3200  $\text{cm}^{-1}$ 'deki pikin -OH fonksiyonel grubundan, 2800  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki piklerin C-H gerilme titreşimlerinden, 1500  $\text{cm}^{-1}$  civarındaki piklerin C=C ve C=N bağından kaynaklanan pikler tespit edildi.



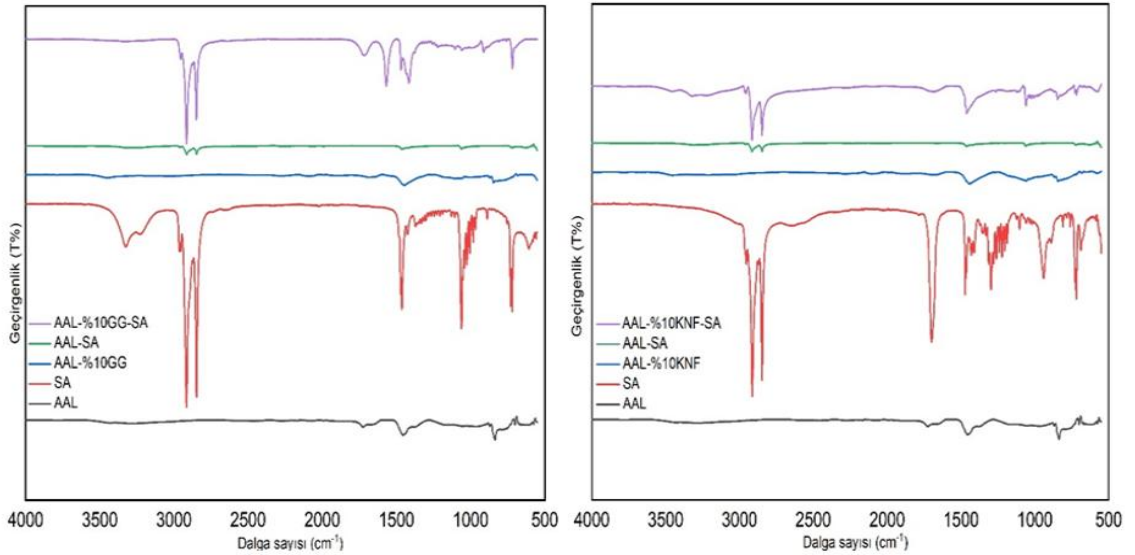
Şekil 30. Saf HCK, SA, GG ve KNF bileşenli kompozitlerin FT-IR spektrumları



Şekil 31. HCK / SA kompozitlerinin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları



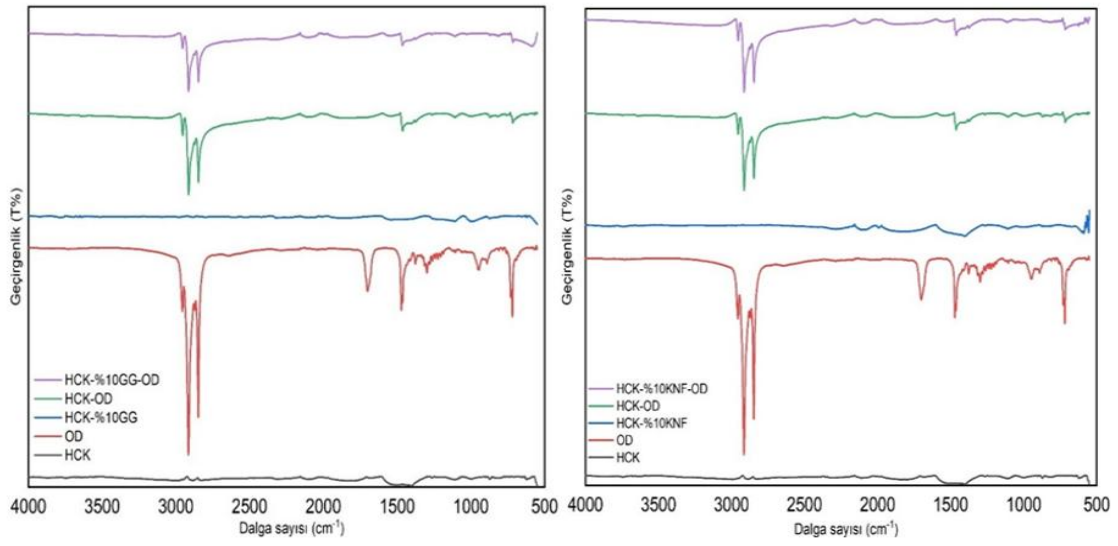
Şekil 32. Saf AAL, SA, GG ve KNF bileşenli kompozitlerin FT-IR spektrumları



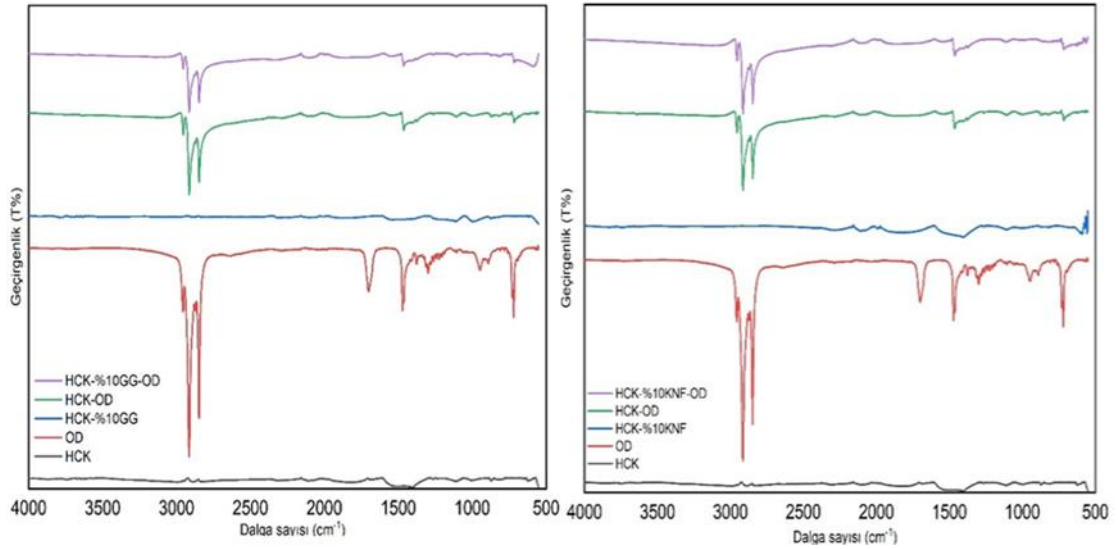
Şekil 33. AAL / SA kompozitlerinin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları

Destek materyali olarak HCK ve AAL'nin, kütlece 10% GG ve 10% KNF ile ısı iletimi artırıldıktan sonra FDM olarak emdirilen SA ile elde edilen yapıca kararlı kompozitlere 1000 termal döngü sonrasında kompozit yapılara tekrardan FT-IR spektrumu alınarak, numunelerin yapılarında herhangi bir değişim olup olmadığı incelenerek elde edilen kompozitin kullanım süresi tayin edilmeye çalışılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında piklerde çok hafif bir şiddet azalması olduğu görülmektedir. Sonuç olarak elde edilen kompozit yapı 1000 termal döngüye kadar kütle kaybı olmadan kullanılabilir. FDM olarak seçilen; stearil alkol (1-oktadekanol)  $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{16}\text{-CH}_2\text{-OH}$

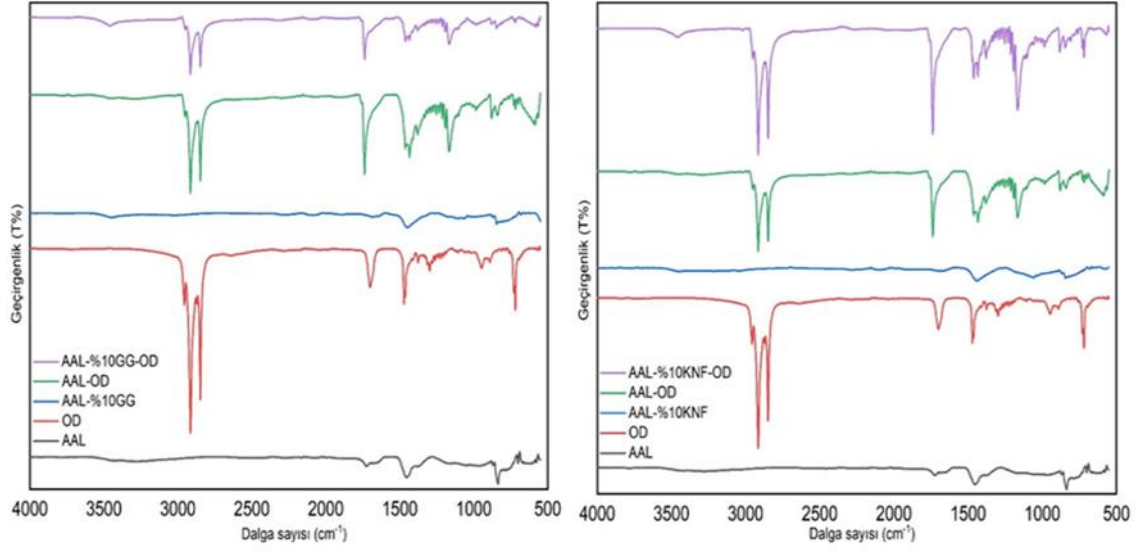
molekül yapısına sahip doymuş yağ alkolü ile hazırlanan yapıcı kararlı kompozit yapının FT-IR spektrumu Şekil 30, 31, 32, 33'de verilmiştir. Stearil alkol'ün spektrumunda; 3400-3250  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu, monomerik alkol pikine atfedilir. Genellikle 3970-2850  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki keskin ve orta şiddetli çoklu pik, molekülün yapısında bulunan alifatik düz zincirli doymuş C-C-H (alkan) bağından kaynaklandığı düşünülmektedir. 2924  $\text{cm}^{-1}$   $\text{CH}_2$  gerilme titreşimim pikini, 2836  $\text{cm}^{-1}$   $\text{CH}_3$  gerilme titreşimini pikini temsil ettiği düşünülmektedir. 1450-1350  $\text{cm}^{-1}$  C-H, 1463-886  $\text{cm}^{-1}$  OH fonksiyonel grubuna, 1291-1216  $\text{cm}^{-1}$  C-O, 1400-600  $\text{cm}^{-1}$  parmak izi bölgesinde C-C bağının piklerine atfedilir.



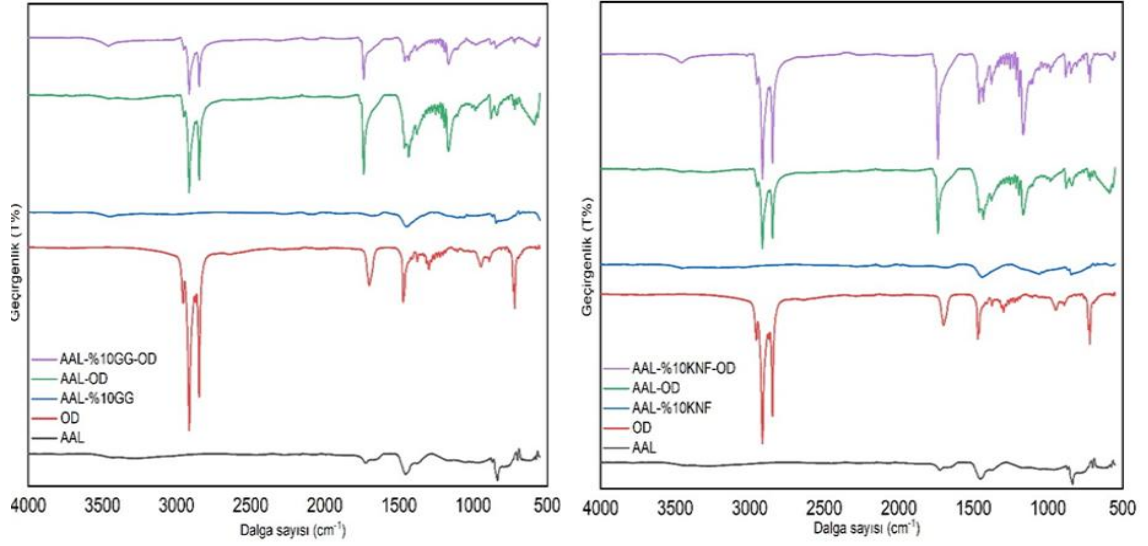
Şekil 34. Saf HCK, OD, GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları



Şekil 35. HCK / OD kompozitlerinin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları

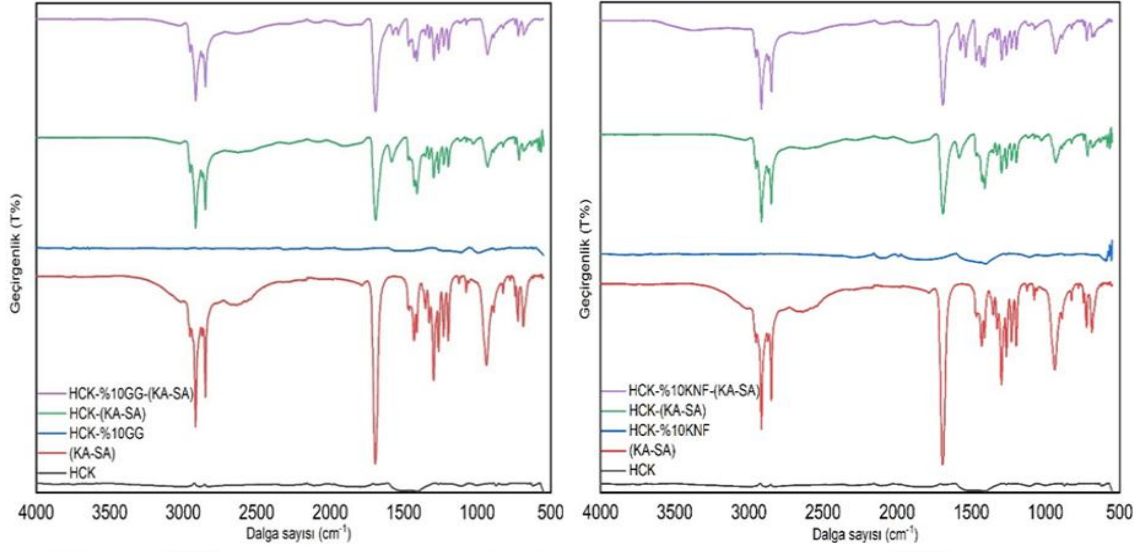


Şekil 36. Saf AAL, OD, GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları

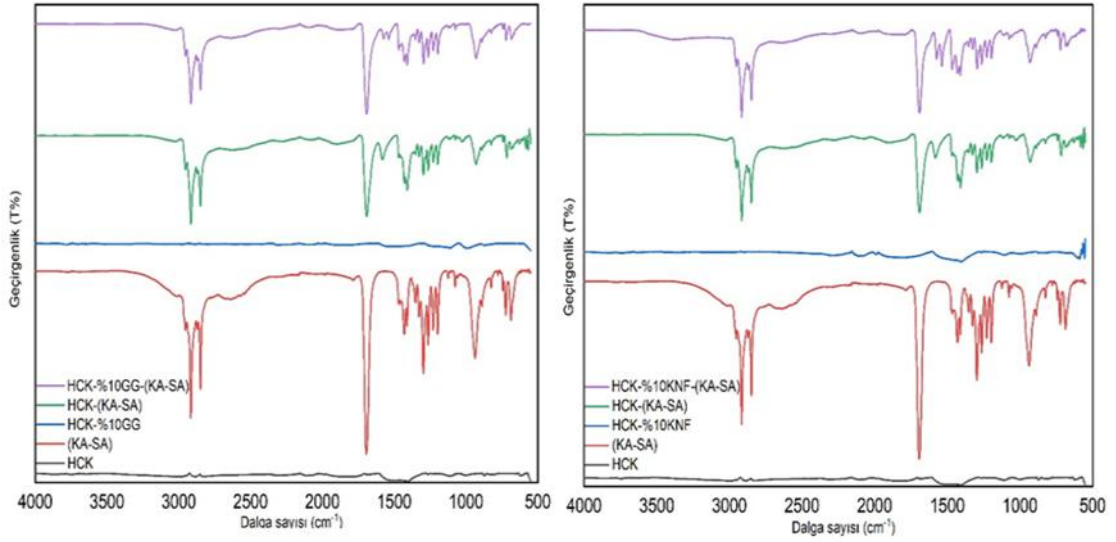


Şekil 37. AAL / OD kompozitlerin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları

FDM olarak seçilen; oktadekan  $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{CH}_3$  molekül yapısına sahip düz zincirli alkanadır. OD ile hazırlanan yapıca kararlı kompozit yapının FT-IR spektrumu Şekil 34, 35, 36, 37'de verilmiştir. FDM olarak seçilen; OD'nın FT-IR spektrumunda  $2955 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2915 \text{ cm}^{-1}$ ,  $2847 \text{ cm}^{-1}$  sırasıyla CH,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  gerilme piklerine,  $1500 \text{ cm}^{-1}$  C-C bağına,  $1467 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1369 \text{ cm}^{-1}$  sırasıyla CH ve  $\text{CH}_3$  bükülme titreşimine atfedilir.



Şekil 38. Saf HCK, (KA-SA), GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları

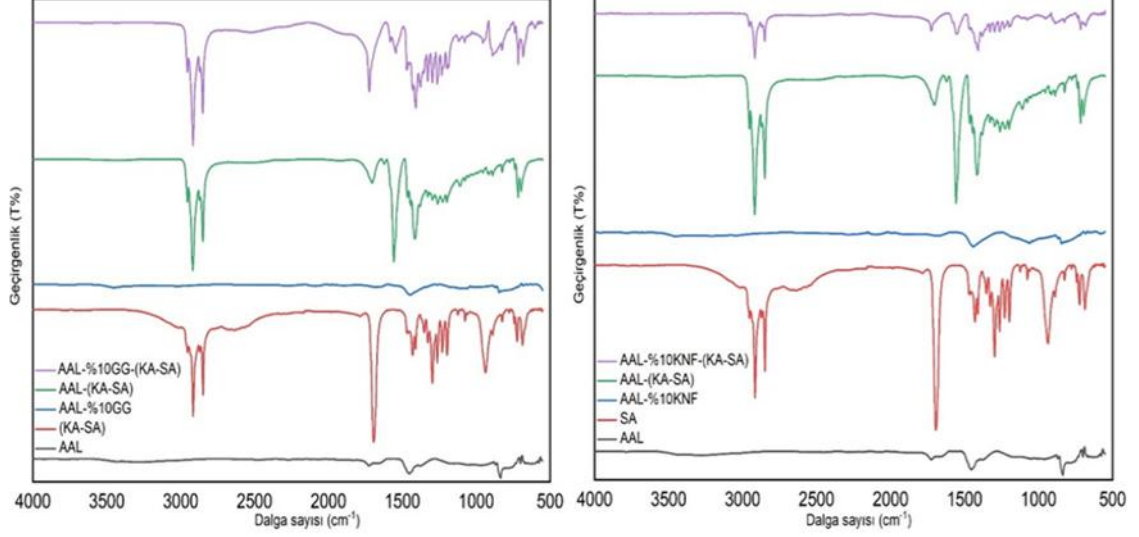


Şekil 39. HCK / (KA-SA) kompozitlerin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları

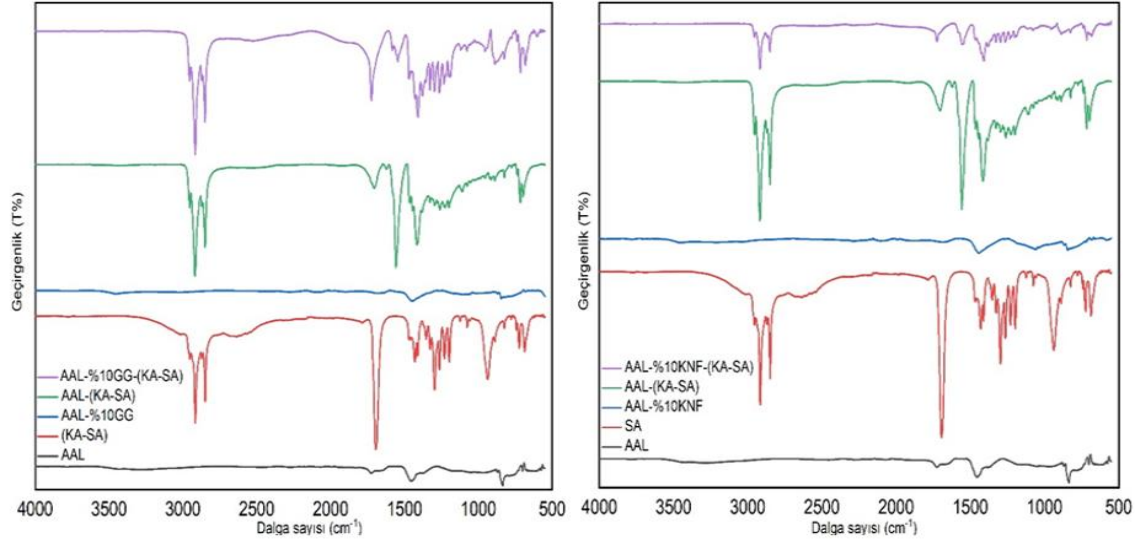
Ötektik karışım stearik asit ve kaprik asitten oluşmaktadır. İkisi de doymamış yağ asitidir. Yapılarında yer alan  $2800\text{ cm}^{-1}$  piki C-C bağı,  $1725\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$  pikleri karboksilik asit grubunu,  $1700\text{ cm}^{-1}$  piki C=O bağından kaynaklandığı,  $1430\text{ cm}^{-1}$  piki C-O bağı,  $950\text{ cm}^{-1}$ 'deki pikin O-H gerilme titreşimine ait olan pik görülmektedir.

Bununla birlikte HCK-%10GG-SA, HCK-%10KNF-SA kompozit yapıların FT-IR spektrumlarında, saf HCK, GG, KNF ve SA'e ait olan piklerin varlığını koruduğu ve yeni piklerin oluşmadığı görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda elde edilen kompozit

yapının bileşenleri arasında kimyasal bir etkileşimin olmamasından dolayı yeni kimyasal bağların oluşmadığını ve tüm etkileşimlerin fiziksel olduğunu anlamaktayız.



Şekil 40. Saf AAL, (KA-SA), GG ve KNF bileşenli kompozitlerinin FT-IR spektrumları



Şekil 41. AAL / (KA-SA) kompozitlerin termal döngü sonrası FT-IR spektrumları

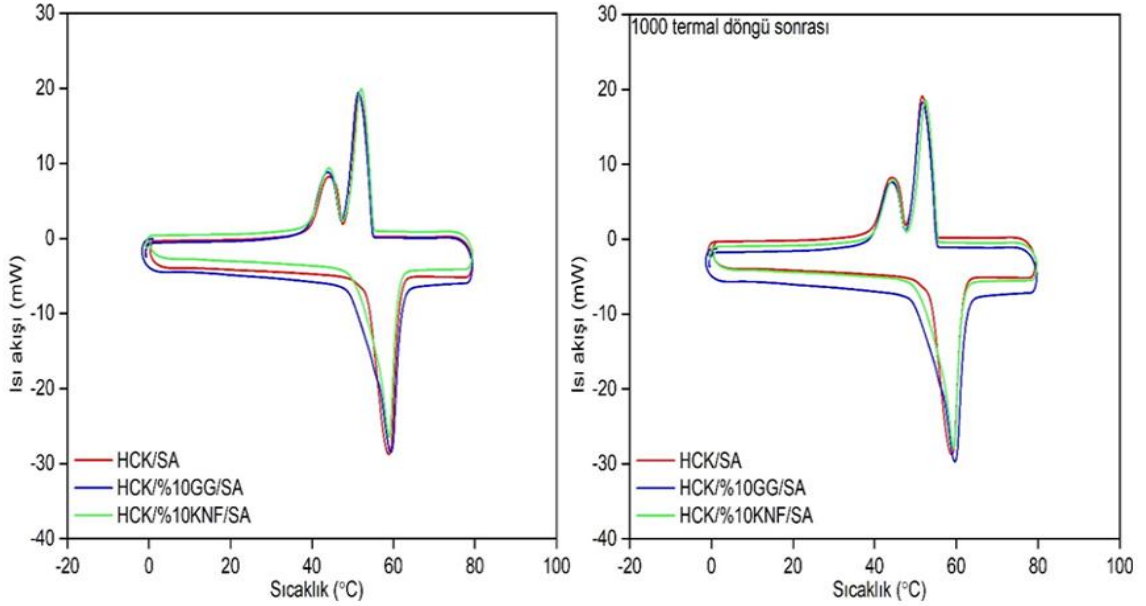
Elde edilen yapıca kararlı kompozit ürünlerin FT-IR analizleri ile kompoziti oluşturan bileşenlerin FT-IR piklerini kıyasladığımızda yeni piklerin oluşmaması ve var olan piklerin varlığını korumaması, bileşenler arasında kimyasal bir etkileşim olmadığı anlamına gelmektedir. Bazı karakteristik piklerde görülen küçük kaymalar, kompozitin bileşenleri arasında fiziksel etkileşimler olduğu anlaşılmaktadır.

### 3.4. DSC Analiz Sonuçları

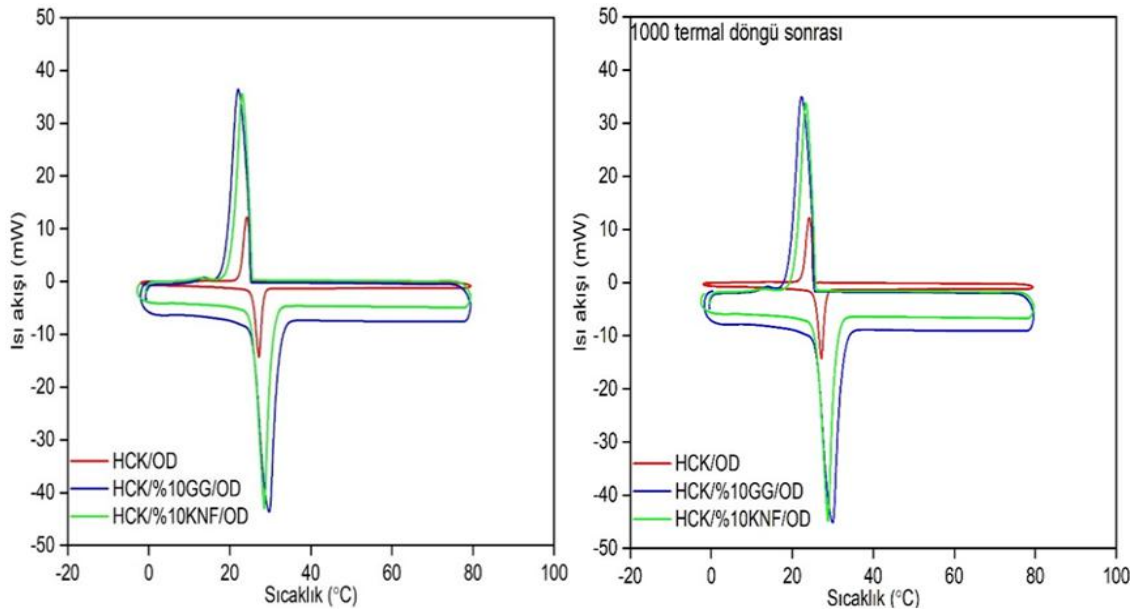
Isı depolama sistemlerinde kullanılacak olan FDM'lerin ve FDM'lerle birlikte elde edilen kompozit yapılar için en önemli özelliklerinden birisi; yüksek gizli ısı depolama kapasitelerine sahip olmaları iken ikinci önemli özellik ise kullanılacak alana uygun olarak tasarlanan faz değişim sıcaklığıdır. Bu özelliklerin sağlanma koşulunu açıklayabilmek amacıyla DSC analizleri gerçekleştirilmiş ve bu analizlerde, ısı iletimi artırılmamış kompozit yapılar ile ısı iletimi kütlece 10% oranlarında GG ve KNF ile artırılmış, en yüksek emme kapasitesine sahip akma davranışı göstermeyen kararlı kompozitlerin ısıtma ve soğutma periyotlarına ait DSC termogramları Şekil 42,43,44,45,46,47'de sunulmuştur. Endotermik ve ekzotermik eğrilere karşılık gelen pikler sırasıyla erime ve katılma faz değişimlerini temsil etmektedir. Termogramların değerlendirilmesi sonucu elde edilen ısı özellikler Tablo 15'de özetlenmiştir. Kompozitlerin ısı özellikleri, saf FDM'lerle karşılaştırıldığında, ihmal edilebilir kaymalar görülmektedir.

Bu durum kompozitin bileşenleri ile hidrojen bağı, yüzey gerilimi ve kılcal kuvvetler gibi zayıf fiziksel etkileşimlere, FDM'lerin hapsedilme oranına ve ısı iletim hızındaki artışa bağlanabilir. YKK-FDM'lerin gizli ısı depolama kapasiteleri, saf FDM'lerin gizli ısı depolama kapasitelerinden beklenildiği gibi daha düşüktür. Bunun sebebi gizli ısı depolama kapasitesine sahip malzemeler yalnızca FDM'ler iken destek materyalleri ve ısı iletimini artırıcı takviye ürünler bu özelliklere sahip değildir. Bu nedenle YKK-FDM'ler için FDM absorpsiyon oranlara kadar gizli ısı depolama kapasitesi elde edilmiştir. YKK-FDM'lerin termal döngü kararlılığına ait diğer bir belirteç ise, termal çevrimlerden sonra faz değişim sıcaklıklarında ve gizli ısı depolama kapasitelerinde olabilecek değişimleri tespit etmektir. FDM'lerin ve üretilen YKK-FDM'lerin çok sayıda termal döngü sonrasında bile fiziksel, kimyasal ve gizli ısı depolama özelliklerini ilk günkü gibi koruması beklenmektedir. Bu nedenle üretilen YKK-FDM 1000 defa hızlandırılmış termal döngü işlemine tabi tutulmuştur. 1000 kez erime-katılma işlemine maruz bırakılan YKK-FDM'lerin termal kararlılıkları DSC ile kimyasal kararlılıkları FT-IR analiz tekniği ile tekrar incelenmiş ve termal döngü işlemi uygulanmamış kompozitlerle elde edilen DSC ve FT-IR sonuçlarıyla karşılaştırılıp yapılarında herhangi bir değişiklik olup olmadığı incelenmiştir. Tüm kompozitlerin termal döngü öncesi ve sonrası (1000 erime-katılma) termal kararlılığını karşılaştırmalı olarak Şekil 42,43,44,45,46,47'de gösterilmektedir. DSC diyagramlarında da görüldüğü gibi kompozitlerin faz dönüşümlerini temsil eden

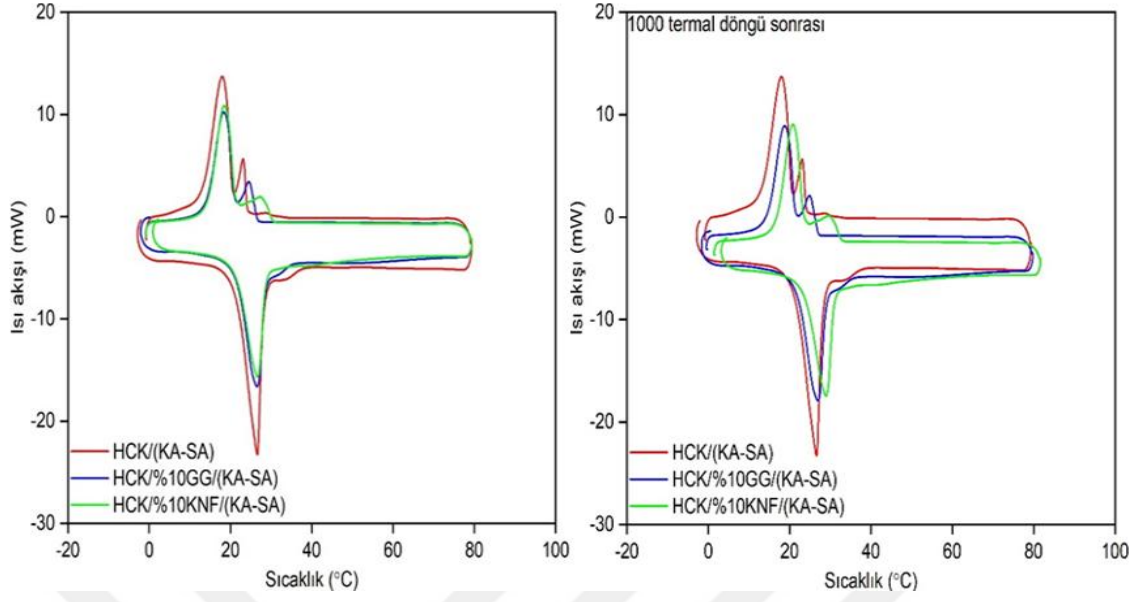
ekzotermik ve endotermik piklerin konumunda ve şeklinde önemli bir değişiklik gerçekleşmemiştir. Bu durum, YKK-FDM'lerin 1000 gibi yüksek termal döngü testi sonrasında elde edilen kompozitlerin ısıl özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Kısaca, kompozitlerin kabul edilebilir termal kararlılığa sahip olduklarını göstermektedir.



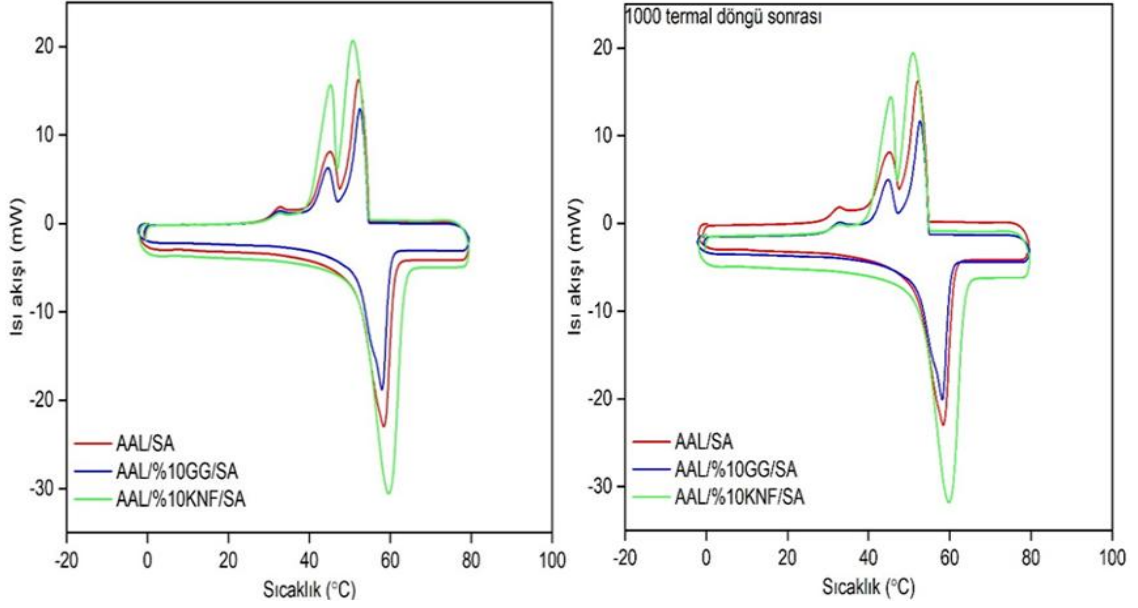
Şekil 42. HCK / SA kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları



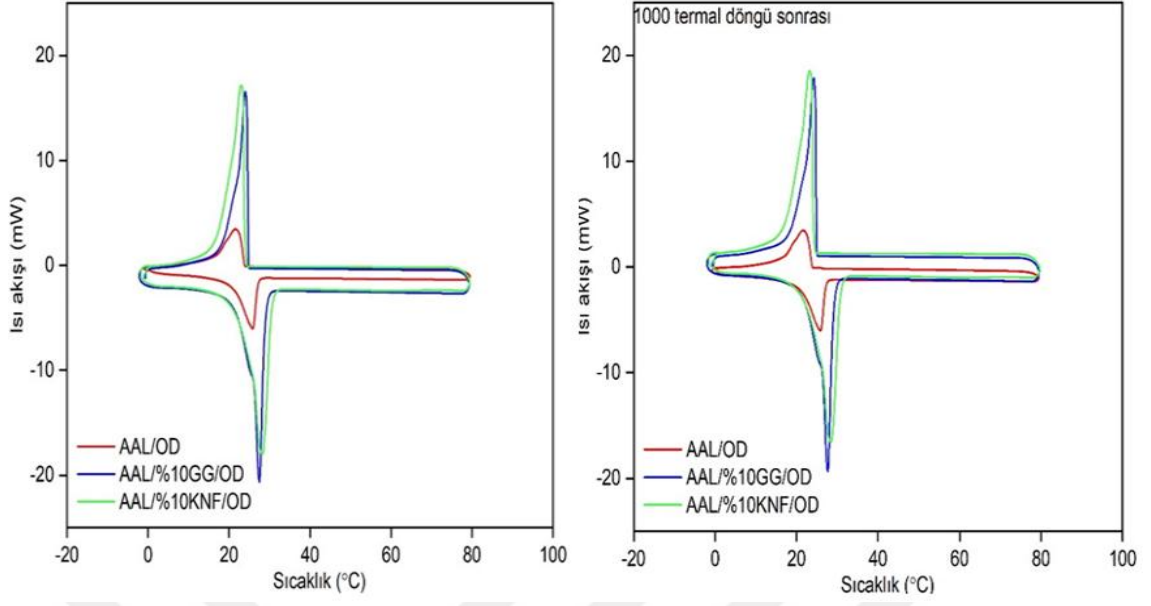
Şekil 43. HCK / OD kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları



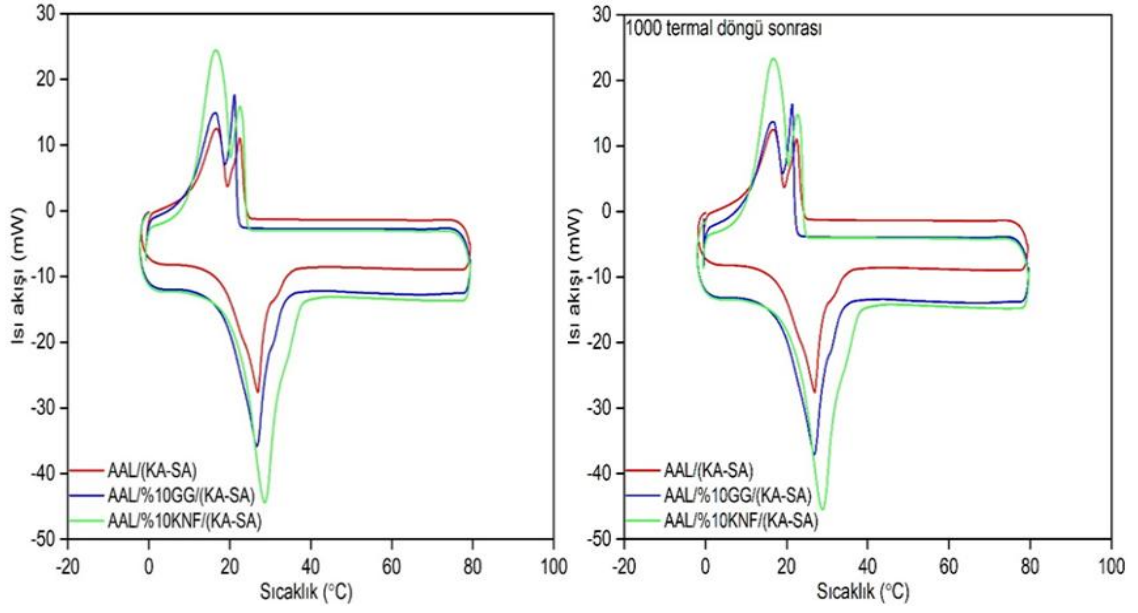
Şekil 44. HCK / (KA-SA) kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları



Şekil 45. AAL / SA kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları



Şekil 46. AAL / OD kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları



Şekil 47. AAL / (KA-SA) kompozitlerinin termal döngü öncesi / sonrası DSC spektrumları

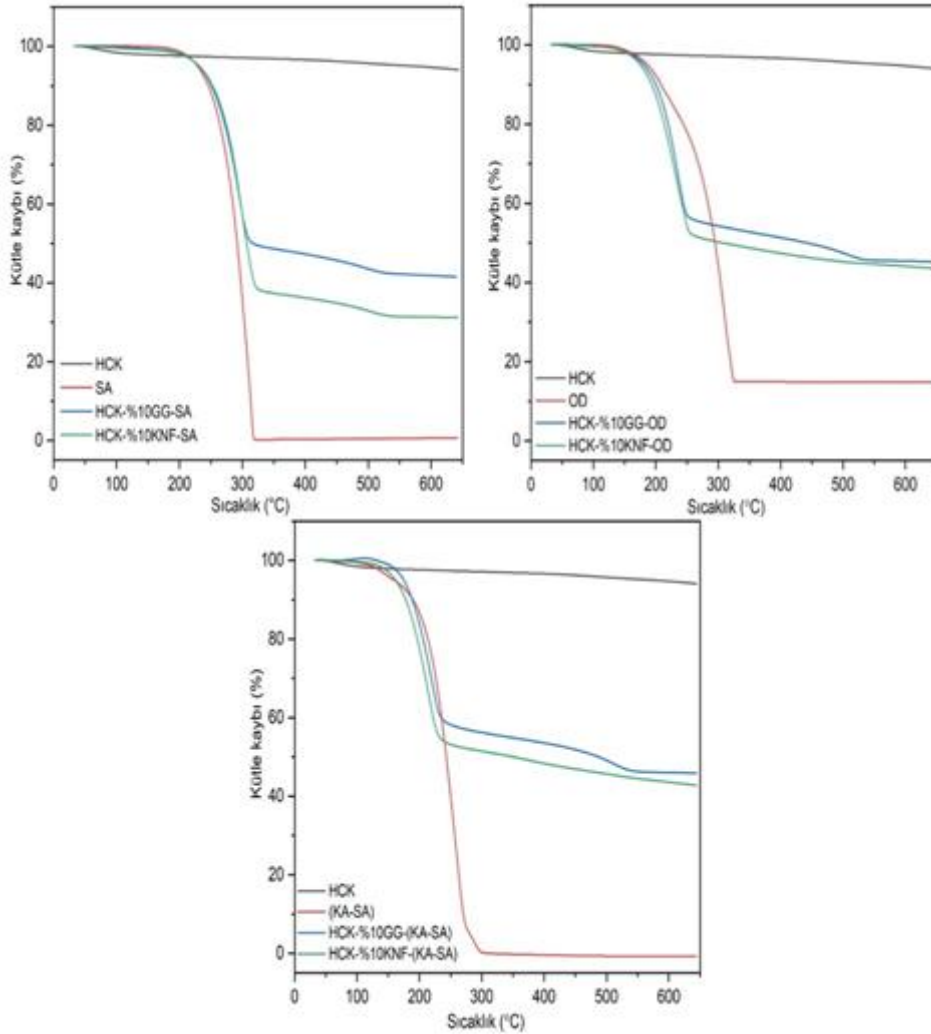
Tablo 15. Kompozit bileşenlerinin ve kompozitlerin DSC verileri

Kompozit	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Gizli Isısı (j/g)	Katılma Sıcaklığı (°C)	Katılma Gizli Isısı (j/g)
HCK/SA	57.8	107	52.6	105
HCK/%10GG/SA	59.6	106	51.6	95.8
HCK/%10KNF/SA	58.9	110	52.0	107
HCK/OD	27.2	102	24.2	78.6
HCK/%10GG/OD	28.2	102	23.1	93.8
HCK/%10KNF/OD	28.4	106	23.0	97.8
HCK/(KA-SA)	26.3	98.6	18.0	73.5
HCK/%10GG/(KA-SA)	26.4	98.8	18.6	73.3
HCK/%10KNF/(KA-SA)	26.8	101	18.6	82.9
AAL/SA	58.4	102	52.2	123
AAL/%10GG/SA	58.9	102	51.3	125
AAL/%10KNF/SA	59.4	110	50.9	155
AAL/OD	26.6	80.5	21.2	51.0
AAL/%10GG/OD	27.6	97.7	24.2	84.1
AAL/%10KNF/OD	27.6	101	23.5	95.3
AAL/(KA-SA)	26.9	74.4	22.6	58.0
AAL/%10GG/(KA-SA)	26.5	94.6	22.6	96.6
AAL/%10KNF/(KA-SA)	28.3	98.2	22.8	95.9

### 3.5. TGA Analizleri

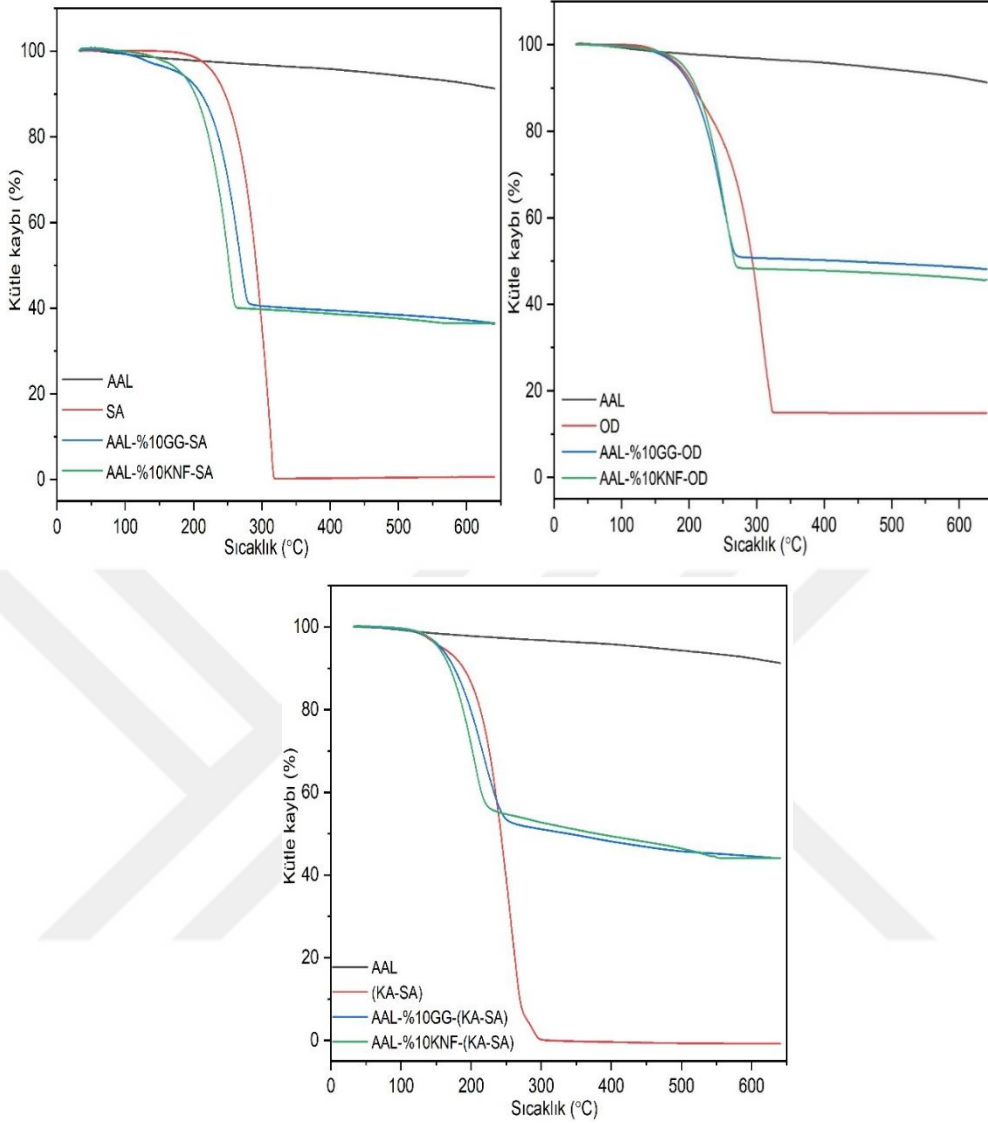
FDM'ler ile hazırlanan kompozit yapıların IED malzemesi olarak kullanılabilmesi için termal kararlılığa sahip olması istenmektedir. Kompozitler kullanılacağı alana göre tasarlandığı çalışma sıcaklığında kütlelerini korumalı ve yüksek termal direnç göstermelidir. Termal kararlılık bu çalışma kapsamında termogravimetri analiz (TGA) yöntemi ile belirlenmiştir. TGA analizinde numuneler belirli bir ısıtma hızında belirlenen bir sıcaklığa ısıtılarak kütle kayıpları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenir. Bu yöntem ile numunelerin bozunma sıcaklığından termal kararlılıkları anlaşılmaktadır. Kompoziti oluşturan bileşenlerin ve üretilen YKK-FDM'lerin termal kararlılığını ve bozunma sıcaklıklarını belirleyebilmek için TGA analizi yapılmış ve elde edilen TGA eğrileri Şekil 48'de verilmiştir. HCK'da termal olarak bozunabilir veya oksitlenebilir bileşenler mevcut olmadığından 600°C'ye kadar kütleli bir kayba uğramadığı yalnızca 180°C'ye kadar 5%-10% aralığında kütleli bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu ihmal edilebilir azalmanın; yapı içerisinde bağıl sudan veya diğer uçucu bileşenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Saf SA'in TGA eğrisinden yaklaşık 200°C'de başlayan ve 320°C'ye kadar süren bozunma

davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Saf SA'e benzer şekilde, HCK-10%GG-SA VE HCK-10%KNF-SA'ler için de kütle kaybı davranışı sergilediği görülmektedir. YKK-FDM'lerin bozunma sıcaklık aralığının saf SA'ya göre 20°C'ye kadar ötelenmiştir. Bu ötelenmenin destek materyallerinin ve ısı iletimini artırıcı malzemelerin termal bozunmaya karşı daha dirençli olmalarından kaynaklanmaktadır. Diğer bir değişle YKK-FDM'lerin kütle kayıplarının SA'den kaynaklandığı açıktır. OD, 150 °C ile 300 °C arasında tek adımlı bir bozunma davranışı göstermiştir. Yine bu sıcaklık aralıklarına çok yakın sıcaklıklarda HCK ve OD bazlı GG ve KNF takviyeli YKK-FDM'lerin yapısı içinde bozunma davranışı görülmektedir. KA-SA'nın kullanıldığı YKK-FDM'lerde de bozunmaya başladıkları sıcaklıklarda çok küçük kaymalar görülmektedir.



Şekil 48. HCK kompozitlerinin TGA spektrumları

Tez kapsamında destek materyallerini kıyaslamak amacıyla seçilen ikinci destek materyali olan AAL'in ve AAL ile farklı kütlece yüzde oranlarıyla hazırlanan ön kompozite, üç farklı FDM emdirilmiş ve akma davranışı göstermeyen YKK-FDM'lerin termal kararlılığını ve bozunma sıcaklıklarını belirleyebilmek için TGA analizi yapılmış. Elde edilen TGA eğrileri Şekil 49'da verilmiştir. Karbonlaştırılmış AAL'de termal olarak bozunabilir veya oksitlenebilir bileşenler mevcut değildir. 180°C'den başlayarak 600°C'ye kadar az miktarda kütleli bir kayıp olduğu görülmektedir. Kütleli bu kaybın, AAL içerisinde bulunan bağıl su, uçucu bileşenler ve AAL'nin karbonlaştırılması sırasında kullanılan kimyasallardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Saf SA'nın TGA eğrisinden yaklaşık 200°C'de başlayan 320°C'ye kadar süren bozunma davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Saf SA'ya benzer şekilde, AAL-10%GG-SA ve AAL-10%KNF-SA'ler içinde kütle kaybı davranışı sergilediği görülmüştür. AAL-10%GG-SA ve AAL-10%KNF-SA'ların için de kütle kayıplarının FDM (SA) ve lastik içerisindeki C harici malzemelerden kaynaklandığı görülmektedir. OD, 150 °C ile 300 °C arasında tek adımlı bir bozunma davranışı göstermiştir. Yine bu sıcaklık aralıklarına çok yakın sıcaklıklarda AAL ve OD bazlı GG ve KNF takviyeli YKK-FDM'lerin yapısı için de bozunma davranışı görülmektedir. KA-SA'in kullanıldığı YKK-FDM'lerde de bozunmaya başladıkları sıcaklıklarda çok küçük kaymalar görülmektedir.

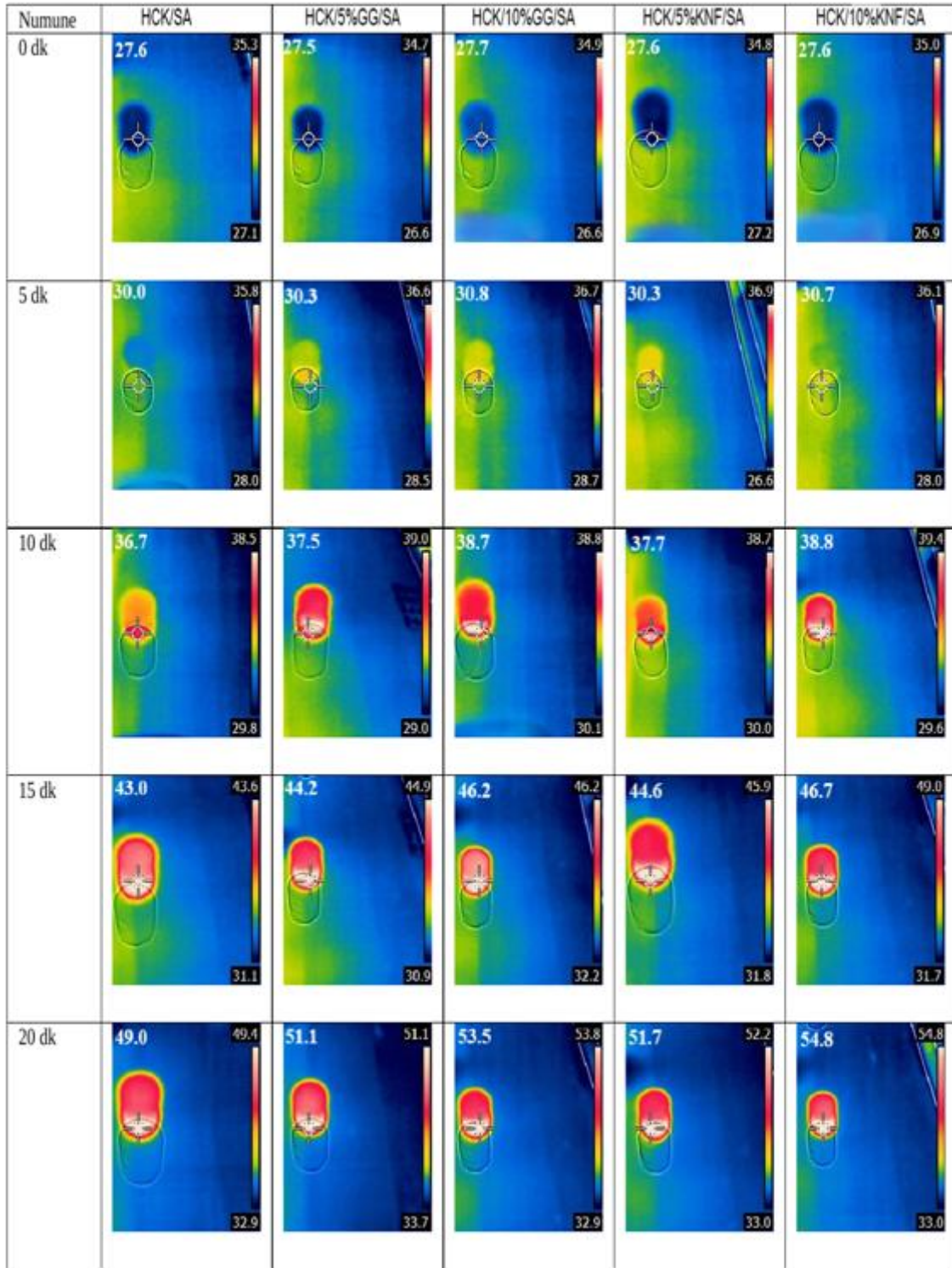


Şekil 49. AAL kompozitlerinin TGA spektrumları

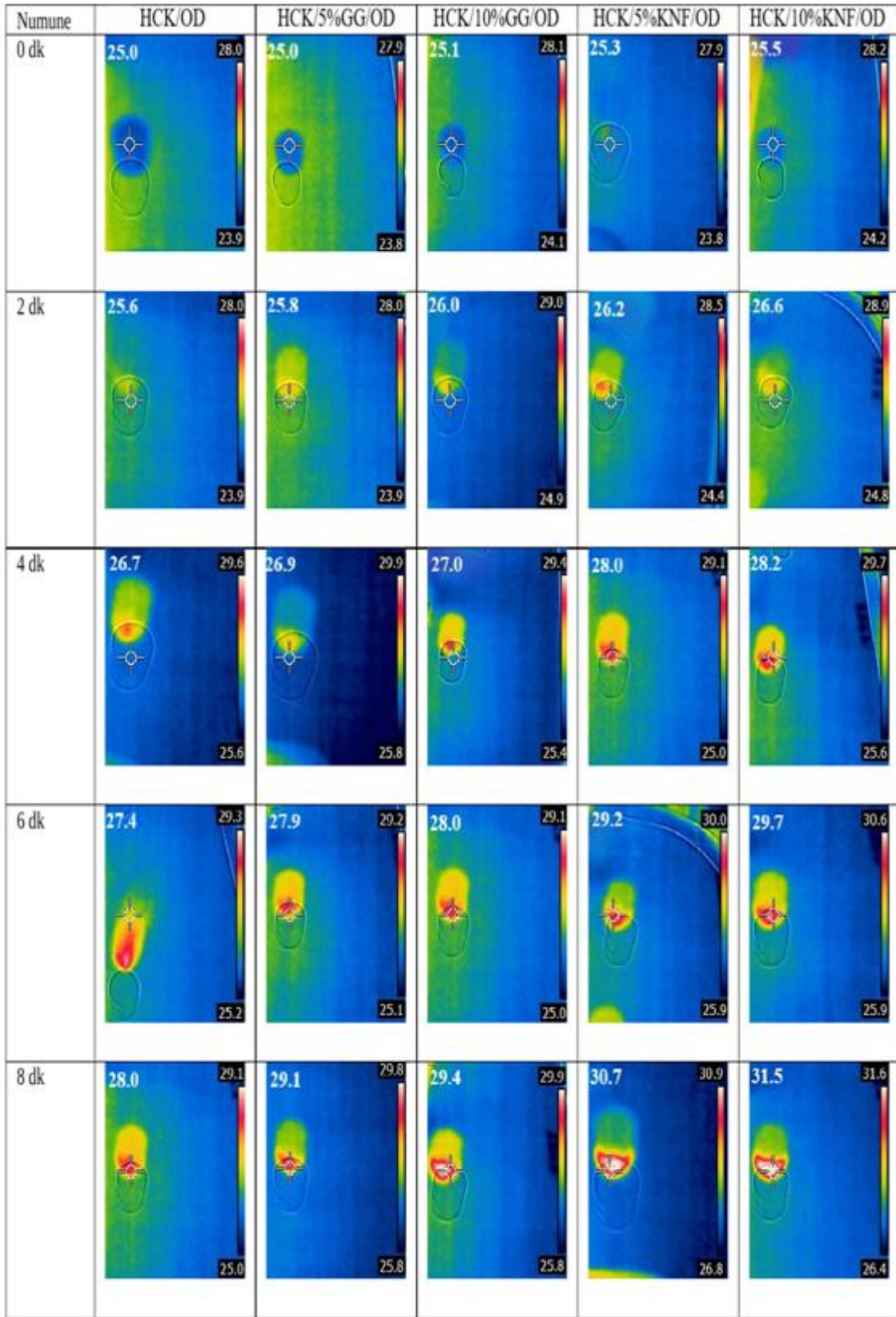
Sonuç olarak, HCK ve AAL'den üretilen tüm YKK-FDM'lerin en düşük termal kararlılığa sahip kompozitinin bile 150°C civarında olduğu görülmektedir. Kısaca kompozitler 150°C'ye kadar ısıtıldıklarında kütlelerinde herhangi bir kayıp olmayacak şekilde yüksek termal kararlılığa sahiplerdir. Bu şekilde YKK-FDM'ler tasarlandıkları sistemlere entegre edilerek kullanım imkanı sağlamaktadır. Ancak HCK'dan üretilen YKK-FDM'lerin termal kararlılıkları değerlendirildiğinde, AAL'den üretilen YKK-FDM'lere göre daha yüksek bir sıcaklıkta (+50°C) termal kararlılığa sahip oldukları görülmektedir. Bu sonuçlar da bizleri HCK'nın üretilen kompozitlerin daha iyi termal kararlılığa sahip olduğunu ve HCK'un tasarlanan sistemde daha uzun bir kullanım ömrü oluşturacağı aşıkardır.

### 3.6. Termal Kamera Sonuçları

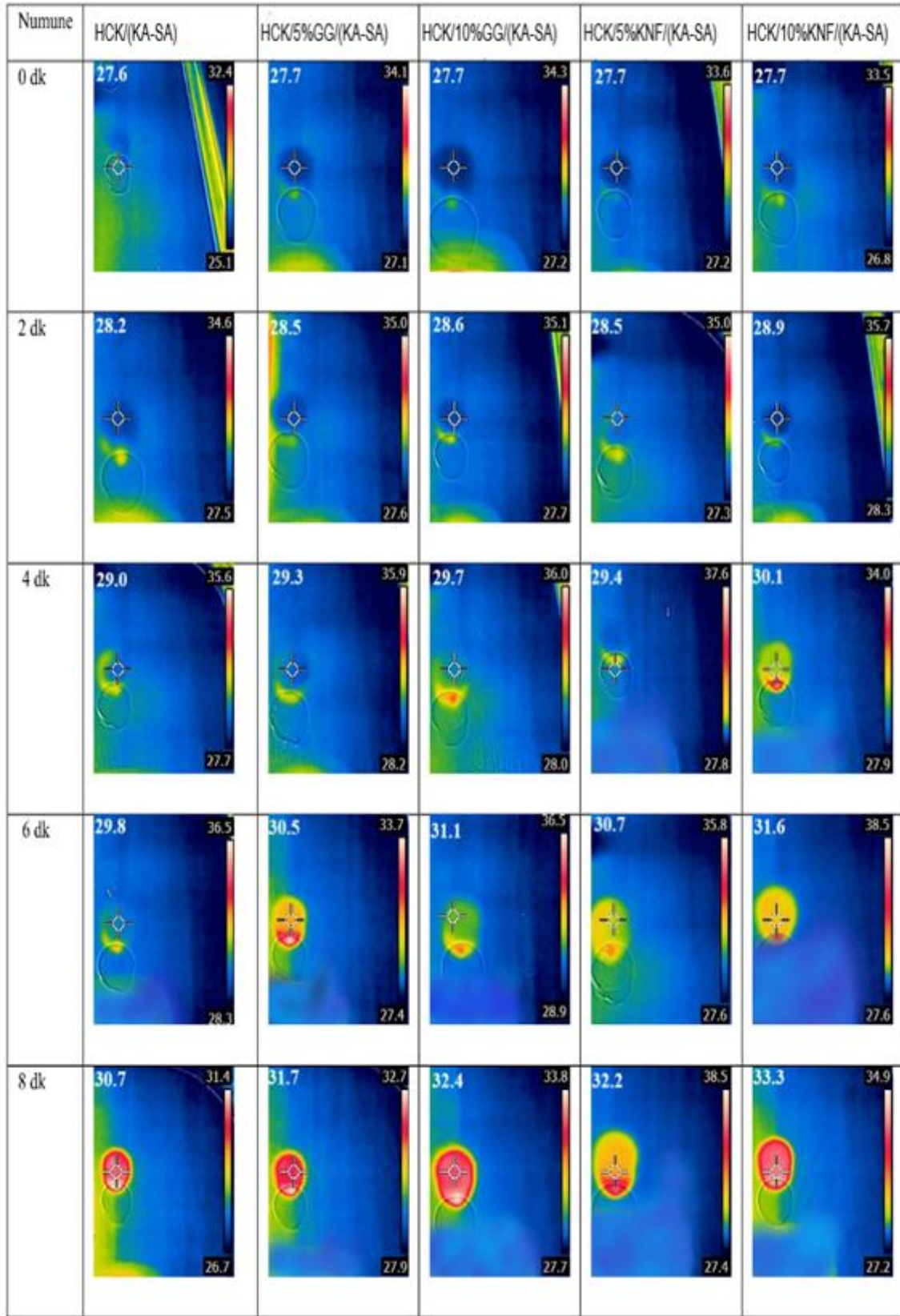
Elde edilen termal kamera görüntü sonuçlarına göre; ısı iletimi artırılmış kompozitlerin, ısı iletimi artırılmamış kompozitlere kıyasla, ilgili kompozitlerin ısıyı daha hızlı transfer ettiği gözlemlenmiştir. İki destek materyalinde de kütlece 10% takviyeli KNF'li kompozitlerin ısıyı en hızlı şekilde transfer ettiği görölmektedir. İki destek materyalinde de sırasıyla en iyi ısı iletimini sağlayan oranlar 10% KNF, 10% GG, 5% KNF, 5% GG takviyeli kompozit yapılar olarak sıralanabilir. Sonuç olarak tez kapsamında seçilen ısı iletimini artıcı takviye ürünlerle (GG, KNF) birlikte ısı iletim depolama sistemlerinde bir dezavantaj olan düşük ısı iletim sorununun iyileştirilebildiği görölmektedir.



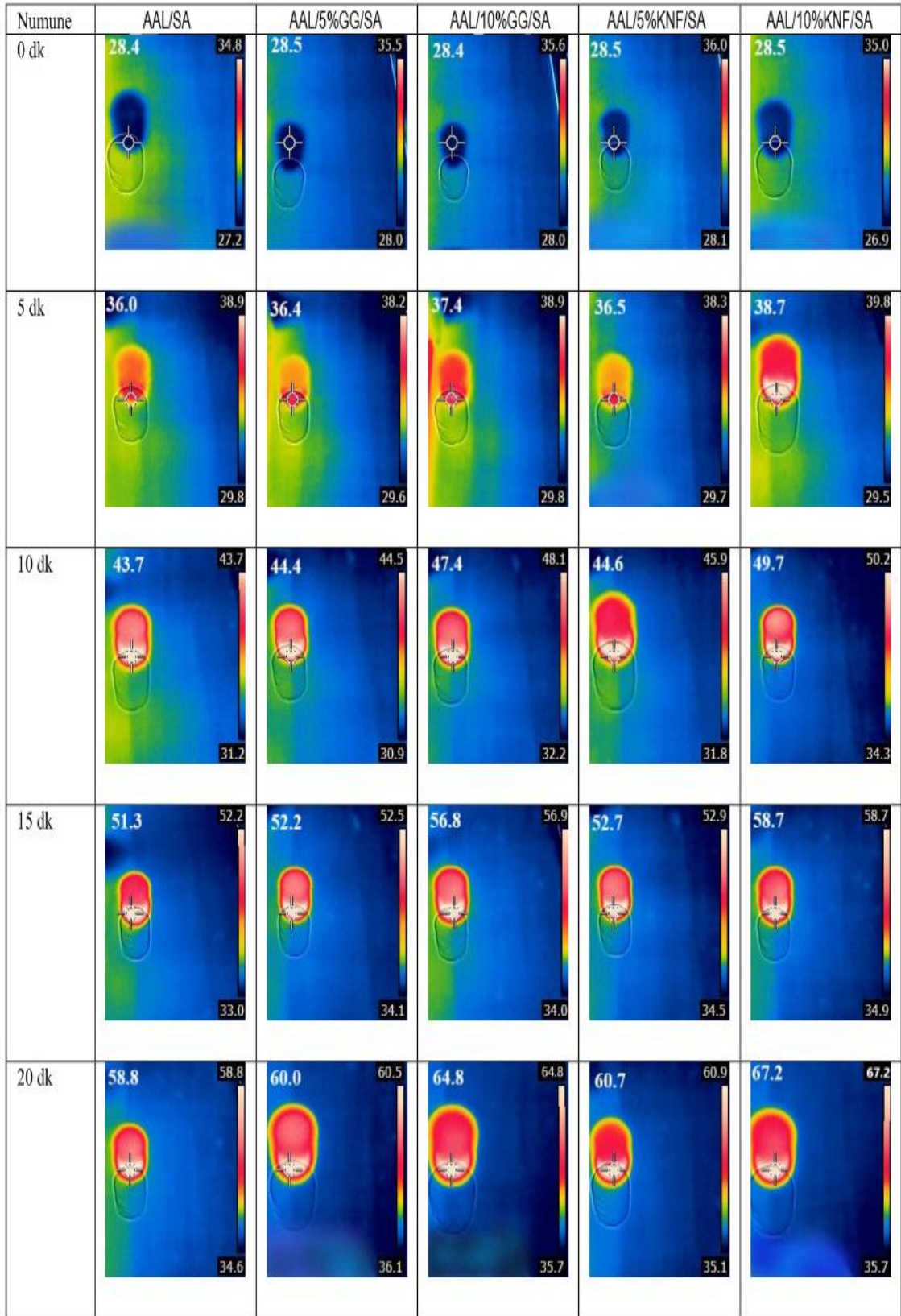
Şekil 50. Isı iletimi artırılmış HCK / SA kompozitlerin termal kamera görüntüleri



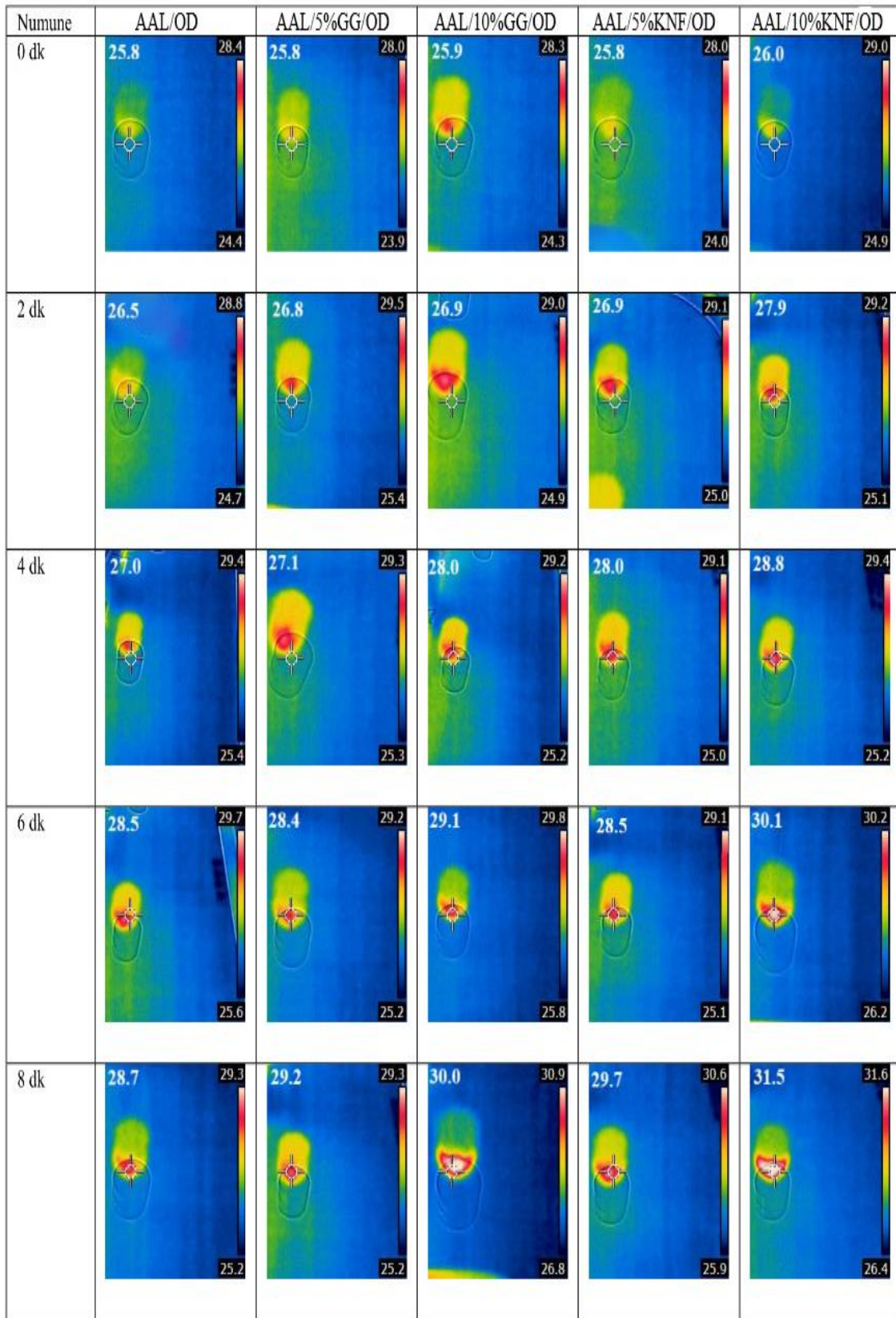
Şekil 51. Isı iletimi artırılmış HCK / OD kompozitlerin termal kamera görüntüleri



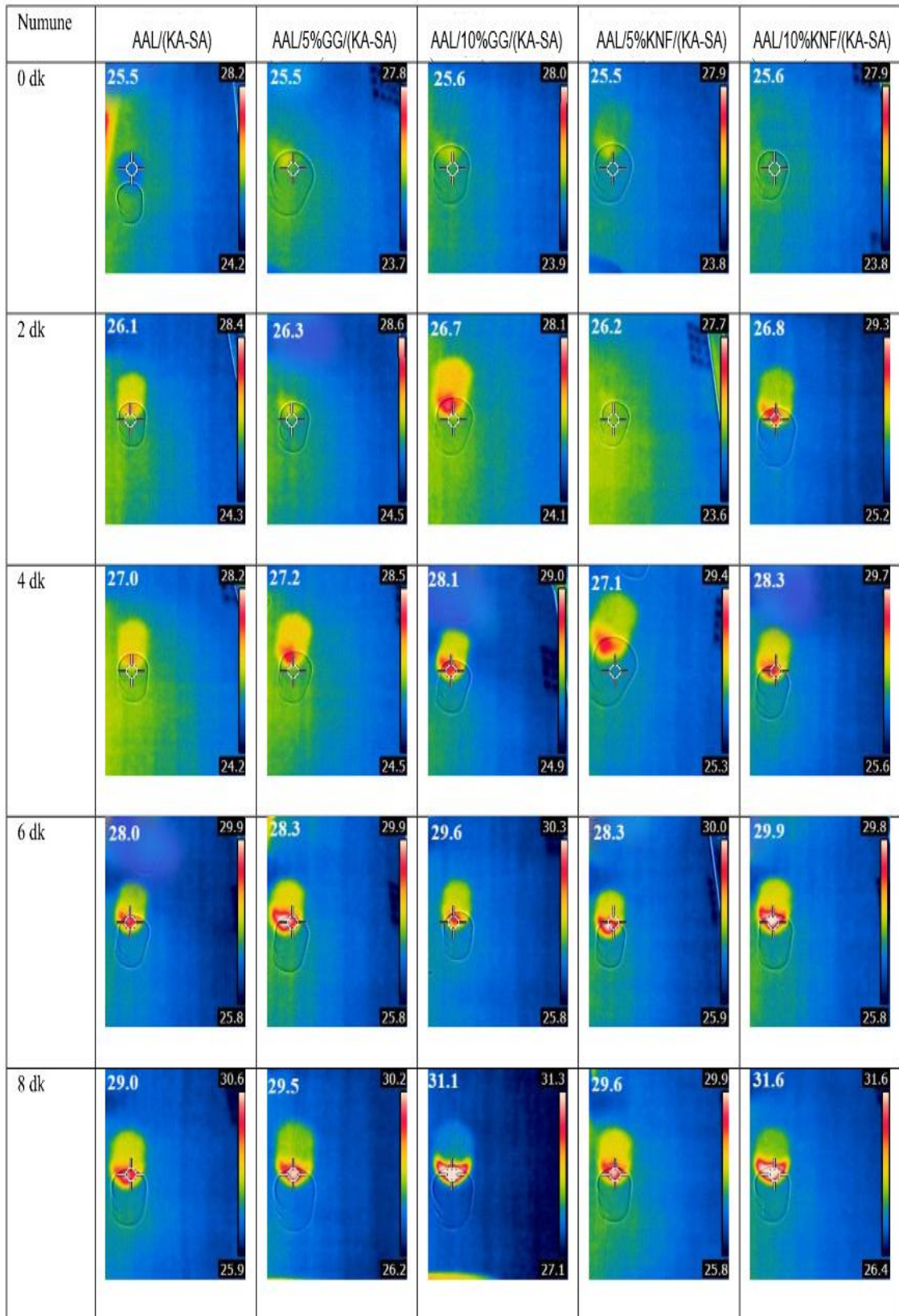
Şekil 52. Isı iletimi artırılmış HCK / (KA-SA) kompozitlerin termal kamera görüntüleri



Şekil 53. Isı iletimi artırılmış AAL / SA kompozitlerin termal kamera görüntüleri



Şekil 54. Isı iletimi artırılmış AAL / OD kompozitlerin termal kamera görüntüleri



Şekil 55. Isı iletimi artırılmış AAL / (KA-SA) kompozitlerin termal kamera görüntüleri

#### 4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında yenilenebilir ısı enerjisi depolama sistemlerinde kullanılmak üzere ısıtma-soğutma enerjisi talebini azaltacak yönde kullanılacak kompozitlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla FDM'lerin faz geçiş esnasında enerjiyi, gizli ısı olarak depolama özelliklerinden yararlanılmıştır. FDM'lerin emdirilmesi için, termal enerji depolama sistemlerinde kullanılmak üzere, çevre dostu bir biyokütle kaynağı olarak HCK'ın ve geri dönüşüm malzemesi olan AAL'nin çalışılması ana motivasyon kaynağı olmuştur. Gözenekli destek materyalleri ve FDM'lerden oluşan yapıca kararlı kompozit FDM'lerin düşük ısı şarj/deşarj performansının artırılması için oldukça yüksek nano ısı iletken katkı malzemelerinin ilavesiyle ısı şarj/deşarj performansının artırılması da önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu bilgiler ışığında yürütülen tez çalışması kapsamında, saf FDM'ler ile vakumda emdirme ile HCK/SA, HCK/GG/SA, HCK/KNF/SA, HCK/OD, HCK/GG/OD, HCK/KNF/OD, HCK/(KA-SA), HCK/GG/(KA-SA), HCK/KNF/(KA-SA), AAL/SA, AAL/GG/SA, AAL/KNF/SA, AAL/OD, AAL/GG/OD, AAL/KNF/OD, AAL/(KA-SA), AAL/GG/(KA-SA), AAL/KNF/(KA-SA) kompozitleri elde edilmiştir. İki farklı destek materyaline iki farklı ısı iletimi artırıcı ürünün farklı iki oranda takviyeli ve takviyesiz ön kompozitlere üç farklı FDM ile toplamda da otuz adet kompozit yapı üretilerek, kompozit yapıların termal davranışları kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Çalışmanın ilk kısmında vakumda emdirme ile YKK-FDM'ler hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozitler içerisinde Stearil alkol (SA), Oktadekan (OD) ve Stearil-Kaprik asit ötektik karışımı (KA-SA) gizli ısı enerjisi depolama malzemesi olarak kullanılırken, Hindistan cevizi kabuğundan elde edilmiş aktif karbon (HCK) ve atık araç lastiğinden elde edilen aktif karbon (AAL) ise gözenekli destek matrisi olarak kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin ısı iletkenliklerini iyileştirmek için her bir kompozit ultra yüksek ısı iletkenliğe sahip GG ve KNF ile iki farklı kütle oranlarında (5%,10%) takviye edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen ana sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Farklı kütlece yüzde bileşimlerde hazırlanan HCK/FDM ve AAL/FDM ön kompozitlerine uygulanan akma testleri sonucunda Stearil alkolün HCK'ya ve AAL'ye hapsedilme oranı sırasıyla 53%, 51% olarak bulunmuştur. Oktadekanın HCK ve AAL'ye hapsedilme oranı sırasıyla 51%, 49% ve son olarak, ötektik karışımın HCK ve AAL'de

hapsedilme oranı sırasıyla 55% ve 53% olarak bulunmuştur. Sonuçlar, söz konusu yüzde oranlardan fazla FDM içeren ön kompozitlerde FDM'lerin erime sıcaklıklarının üstündeki sıcaklık değerlerine çıkarılmasıyla kompozit yapılarda akma davranışı meydana geleceği anlamına gelmektedir. Testler sonucunda kasma davranışı göstermeyen söz konusu maksimum bileşim oranları ile hazırlanan ön kompozit yapıca kararlı kompozit FDM'ler (YKK-FDM) olarak adlandırılmaktadır.

2. İlk basamakta üretilen HCK/SA, HCK/OD, HCK/(KA-SA) ve AAL/SA, AAL/OD, AAL(KA-SA) kompozitlerinin ısı iletkenliklerini artırmak için GG ve KNF ile iki farklı kütle oranlarında (5%-10%) ilave edilmiştir. Bunun sonucunda ısı şarj deşarj performansı geliştirilmiş yirmi dört adet tane yeni tür YKK-FDM üretilmiştir.

3. Üretilen YKK-FDM'lerin morfolojik yapıları SEM, kimyasal yapıları ise FT-IR analizleri ile karakterize edilmiştir. Elde edilen SEM görüntülemelerinden FDM'lerin gözenekli destek maddeleri içerisinde başarılı bir şekilde hapsedildiğini göstermiştir. Eklenen karbon bazlı ısı iletkenlik artırıcı malzemelerin kompozitlerin içerisinde hemen hemen homojen bir şekilde dağıldığını ancak kompozit içerisinde bazı noktalarda az da olsa topaklaşmaların olduğu görülmektedir. Kompozitlerin bileşenleri arasındaki kimyasal ve fiziksel etkileşimleri belirleyebilmek amacıyla FT-IR analizleri gerçekleştirilmiş, bu analizler sonucunda kompozitlerin bileşenleri arasında herhangi bir kimyasal etkileşimin olmadığı, sadece fiziksel etkileşimlerin gerçekleştiği anlaşılmıştır.

4. Üretilen YKK-FDM'lerin ve bileşenlerinin termal kararlılıkları TGA analizleriyle incelenmiştir. YKK-FDM'lerin TGA eğrilerinde, kompozitlerin, kompozit bünyesinde yer alan FDM'lerin faz dönüşüm sıcaklıklarına oranla daha yüksek ısı dayanıklılığa sahip oldukları görülmüştür. TGA eğrilerinde, yola çıkarak belirlenen kütle kayıpları, belirlenen bozunma sıcaklıklarında kompozit bileşim oranları ile uyumluluk görülmüştür.

5. Hazırlanan YKK-FDM'lerin erime katılma sıcaklıkları ile gizli ısı depolama özellikleri DSC analiz tekniğiyle belirlenmiştir. Veriler doğrultusunda HCK/SA, HCK/OD, HCK/(KA-SA) esaslı kompozitlerin erime sıcaklıkları 57.8-58.9°C, 27.2-28.4°C, 26.3-26.8°C aralıklarında değişmiştir. Aynı kompozitlerin erime faz dönüşüm sıcaklığında gizli ısı depolama kapasiteleri sırayla 107-110 j/g, 102-106 j/g, 98.6-101 j/g aralıklarında değişmiştir. LAC/SA, LAC/OD, LAC/(KA-SA) esaslı kompozitlerin ise erime sıcaklıkları 58.4-59.4°C, 26.6-27.6°C, 26.9-28.3°C aralıklarında değişmiştir. Aynı kompozitlerin erime faz dönüşüm sırasında gizli ısı depolama kapasiteleri sırasıyla 102-110 j/g, 80.5-101 j/g, 74.4-98.2 j/g aralığında değişmiştir. Veriler doğrultusunda, hazırlanan tüm kompozit

yapılar bina içi termal konforu artırarak enerji tasarrufu için kullanılabilme potansiyeli taşımaktadır.

6. YKK-FDM'lerin uzun ömürlü kullanımı için ısıl döngü kararlılıklarını belirlemek amacıyla hızlandırılmış 1000 erime-katılma döngüsü uygulanmıştır. Test sonrası kimyasal ve termal kararlılıklar, tekrarlanan DSC ve FT-IR analizleri ile incelenerek döngü öncesi sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, kompozitlerin hem kimyasal yapılarında hem de gizli ısı depolama özelliklerinde önemli bir değişiklik görülmediği ortaya konulmuştur.

7. Hazırlanan HCK/SA, HCK/OD, HCK/(KA-SA), AAL/SA, AAL/OD, AAL/(KA-SA) kompozitlerinin farklı oranlarda (5% ve 10%) GG ve KNF ile takviye edilmesiyle ısıl iletkenlik değerlerindeki artışı analiz etmek için ısıl iletkenliği artırılmamış ve iki farklı ısı iletimini artırıcı ürünün iki farklı oranda takviyesi ile elde edilen kompozitlerin peletleri çıkarıldıktan sonra ısıtıcı yüzey üzerinde termal kamera ile görüntülemeleri yapılmıştır. Görüntülerden de anlaşılacağı gibi ısı iletimini artıran destek malzemelerinin eklenmesiyle ısıl iletimin kesinlikle olumlu bir artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak iki farklı destek materyali olarak seçilen HCK ve AAL'den daha çok gözenek yapısına sahip olan HCK iyi bir destek materyali görevi görmektedir. Çalışılan üç farklı FDM SA, OD, (KA-SA)'dan de SA ve (KA-SA)'nın iyi bir FDM olarak tercih edilebileceğini söyleyebiliriz. Son olarak da ısı iletim takviyelerinden GG ve KNF'nin ısı iletimini artırıcı etkisi olmasına ilave olarak kütlice 10% KNF takviyesinin hem HCK hem de AAL'nin, FDM'lerin emme oranına da katkı sağladığı görülmektedir. Bütün bu bulgular sonucunda, hazırlanan kompozit yapıların ısıl enerji depolama amacıyla kullanılabilceği düşünülmektedir.

## 5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, IED sistemlerinde kullanılmak üzere literatürde de yer alan HCK ve AAL destek materyallerinden yararlanarak, erime noktaları birbirinden farklı üç adet FDM ile enerjinin depolanması çalışılmıştır. Tez çalışması ile enerji depolama sistemlerindeki çalışmalar yapan araştırmacılara ve uygulayıcılara iletilmek istenen öneriler aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Destek materyali olarak seçilen malzemelerin oldukça gözenekli yapıya sahip olmaları emdirilecek FDM miktarını artıracak ve bu da daha yüksek oranlarda enerjinin depolanmasını sağlayacaktır. Bu nedenle, seçilen destek materyalinin oldukça gözenekli yapıya sahip olması ve FDM ile herhangi kimyasal bir etkileşime girmeden fiziksel çekim kuvvetleriyle FDM'leri içerisinde hapsedecek yapıda olması istenmektedir.

- Uygun FDM oranlarının bulunması için hazırlanan kompozitlerde, FDM'lerin destek materyallerine homojen bir şekilde emdirilmesi için küçük miktarlarda her iki bileşenin de vakum altında sürekli birbirine temas edecek şekilde karıştırılarak emdirilmesi önerilmektedir. Akma davranışı göstermeyen en yüksek emme oranına sahip kompozit yapı bulunduktan sonra daha büyük miktarlarda kompozit malzemeler üretilmelidir.

- Tez kapsamında literatürde IED sistemlerinde oldukça yaygın bir şekilde ısı iletimini iyileştirici takviye ürünler olarak kullanılan GG ve KNF oranları kompozit içerisinde topaklaşma yapmayacak şekilde kütlece yüzde 10'dan daha yüksek miktarlarda tavsiye edilebilir.

- Tezde bahsedilen ısı iletimini artırıcı farklı takviye ürünler ile hazırlanan kompozitlerin şarj/deşarj süreleri tez kapsamında çalışılan ürünlerle ile kıyaslanabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar energy*, 30(4), 313-332.
- Aftab, W., Mahmood, A., Guo, W., Yousaf, M., Tabassum, H., Huang, X., Liang, Z., Cao, A., & Zou, R. (2019). Polyurethane-based flexible and conductive phase change composites for energy conversion and storage. *Energy Storage Materials*, 20, 401-409.
- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Famileh, I. Z., Calautit, J. K., Hughes, B. R., & Zaki, S. A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470-1497.
- Al-Shannaq, R., Kurdi, J., Al-Muhtaseb, S., Dickinson, M., & Farid, M. (2015). Supercooling elimination of phase change materials (PCMs) microcapsules. *Energy*, 87, 654-662.
- Altohamy, A. A., Abd Rabbo, M. F., Sakr, R. Y., & Attia, A. A. (2015). Effect of water based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle PCM on cool storage performance. *Applied Thermal Engineering*, 84, 331-338.
- Anand K, A., Agarwal, U. S., & Joseph, R. (2007). Carbon nanotubes-reinforced PET nanocomposite by melt-compounding. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(5), 3090-3095. <https://doi.org/10.1002/app.25674>
- Arslan, Ö. (1993). *Enerjinin faz değişimiyle tuz hidratlarda depolanması* [Master's Thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Barreneche, C., Mondragon, R., Ventura-Espinosa, D., Mata, J., Cabeza, L. F., Fernández, A. I., & Julia, J. E. (2018). Influence of nanoparticle morphology and its dispersion ability regarding thermal properties of water used as phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 128, 121-126.
- Baylin, F. (1979). Low temperature thermal energy storage: A state-of-the-art survey. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 80, 15583.
- Buddhi, D., & Sawhney, R. L. (1994). Proc: Thermal energy storage and energy conversion. *School of Energy and Environmental Studies, Devi Ahilya University, Indore, India*.
- Cabeza, L. F., Mehling, H., Hiebler, S., & Ziegler, F. (2002). Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage. *Applied thermal engineering*, 22(10), 1141-1151.

- Cai, Y., Zong, X., Zhang, J., Du, J., Dong, Z., Wei, Q., Zhao, Y., Chen, Q., & Fong, H. (2014). The Improvement of Thermal Stability and Conductivity via Incorporation of Carbon Nanofibers into Electrospun Ultrafine Composite Fibers of Lauric Acid/Polyamide 6 Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *International Journal of Green Energy*, 11(8), 861-875. <https://doi.org/10.1080/15435075.2013.829068>
- Cao, L., Su, D., Tang, Y., Fang, G., & Tang, F. (2015). Properties evaluation and applications of thermal energystorage materials in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 500-522.
- Chen, Z., Shan, F., Cao, L., & Fang, G. (2012). Synthesis and thermal properties of shape-stabilized lauric acid/activated carbon composites as phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 102, 131-136.
- Cheng, X., Li, G., Yu, G., Li, Y., & Han, J. (2017). Effect of expanded graphite and carbon nanotubes on the thermal performance of stearic acid phase change materials. *Journal of Materials Science*, 52(20), 12370-12379. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1350-9>
- Costa, M. C., Sardo, M., Rolemberg, M. P., Coutinho, J. A., Meirelles, A. J., Ribeiro-Claro, P., & Krähenbühl, M. A. (2009). The solid–liquid phase diagrams of binary mixtures of consecutive, even saturated fatty acids. *Chemistry and Physics of Lipids*, 160(2), 85-97.
- Cui, Y., Liu, C., Hu, S., & Yu, X. (2011). The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(4), 1208-1212.
- da Cunha, S. R. L., & de Aguiar, J. L. B. (2020). Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. *Journal of Energy Storage*, 27, 101083.
- De Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414-419.
- Dimaano, M. N. R., & Watanabe, T. (2002). The capric–lauric acid and pentadecane combination as phase change material for cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 22(4), 365-377.
- Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., & Liu, H. (2018). A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied energy*, 220, 242-273.
- Feng, L., Zheng, J., Yang, H., Guo, Y., Li, W., & Li, X. (2011). Preparation and characterization of polyethylene glycol/active carbon composites as shape-stabilized phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 644-650.

- Feng, Y., Wei, R., Huang, Z., Zhang, X., & Wang, G. (2018). Thermal properties of lauric acid filled in carbon nanotubes as shape-stabilized phase change materials. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(11), 7772-7780.
- Ferrer, G., Solé, A., Barreneche, C., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2015). Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 665-685.
- Fu, X., Liu, Z., Xiao, Y., Wang, J., & Lei, J. (2015). Preparation and properties of lauric acid/diatomite composites as novel form-stable phase change materials for thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 104, 244-249.
- Fukai, J., Hamada, Y., Morozumi, Y., & Miyatake, O. (2002). Effect of carbon-fiber brushes on conductive heat transfer in phase change materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(24), 4781-4792.
- Gu, X., Liu, P., Bian, L., & He, H. (2019). Enhanced thermal conductivity of palmitic acid/mullite phase change composite with graphite powder for thermal energy storage. *Renewable Energy*, 138, 833-841.
- Hale, D., Hoover, M., & O'Neill, M. (1971). *Phase change materials handbook. Report no. NASA-CR-61363. Contract no.: NAS8-25183. NASA.*
- He, Y., Zhang, X., Zhang, Y., Song, Q., & Liao, X. (2016). Utilization of lauric acid-myristic acid/expanded graphite phase change materials to improve thermal properties of cement mortar. *Energy and Buildings*, 133, 547-558.
- Ho, C.-J., Wei, L. C., & Li, Z. W. (2010). An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3), 96-103.
- Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G. (2017). Preparation, characterization and thermal properties of fatty acid eutectics/bentonite/expanded graphite composites as novel form-stable thermal energy storage materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 166, 157-166.
- Iijima, S., & Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *nature*, 363(6430), 603-605.
- İnce, Ş., Seki, Y., Ezan, M. A., Turgut, A., & Ereğ, A. (2015). Thermal properties of myristic acid/graphite nanoplates composite phase change materials. *Renewable Energy*, 75, 243-248.
- Jebasingh, B. E. (2016). Exfoliation of graphite by solar irradiation and investigate their thermal property on capric-myristic-palmitic acid/exfoliated graphite composite as phase change material (PCM) for energy storage. *Journal of Energy Storage*, 5, 70-76.
- Jeong, S.-G., Jeon, J., Chung, O., Kim, S., & Kim, S. (2013). Evaluation of PCM/diatomite composites using exfoliated graphite nanoplatelets (xGnP) to improve thermal properties. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 114, 689-698.

- Jia, L., Chen, Y., & Mo, S. (2013). Solid–liquid phase transition of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 59, 29-34.
- Kang, Y., Jeong, S.-G., Wi, S., & Kim, S. (2015). Energy efficient Bio-based PCM with silica fume composites to apply in concrete for energy saving in buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 143, 430-434.
- Karaipekli, A., & Sarı, A. (2008). Capric–myristic acid/expanded perlite composite as form-stable phase change material for latent heat thermal energy storage. *Renewable Energy*, 33(12), 2599-2605.
- Karaipekli, A., Sarı, A., & Kaygusuz, K. (2007). Thermal conductivity improvement of stearic acid using expanded graphite and carbon fiber for energy storage applications. *Renewable Energy*, 32(13), 2201-2210.
- Lane, G. A., Glew, D. N., Clark, E. C., Rossow, H. E., Quigley, S. W., Drake, S. S., & Best, J. S. (1975). Heat of fusion systems for solar energy storage. *Proc. Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*, 43-55.
- Lane, G. A., & Lane, G. A. (1983). *Solar heat storage: Latent heat materials* (C. 1). CRC press Boca Raton, FL, USA: <https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.1201/9781351076746&type=googlepdf>
- Leungtongkum, T., Flick, D., Chaomuang, N., Denis, A., & Laguerre, O. (2023). Influence of use conditions on heat transfer in an insulated box equipped with a phase change material. *Journal of Food Engineering*, 357, 111644. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111644>
- Li, B., Nie, S., Hao, Y., Liu, T., Zhu, J., & Yan, S. (2015). Stearic-acid/carbon-nanotube composites with tailored shape-stabilized phase transitions and light–heat conversion for thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 98, 314-321.
- Li, C., Xie, B., Chen, D., Chen, J., Li, W., Chen, Z., Gibb, S. W., & Long, Y. (2019). Ultrathin graphite sheets stabilized stearic acid as a composite phase change material for thermal energy storage. *Energy*, 166, 246-255.
- Li, D., Cheng, X., Li, Y., Zou, H., Yu, G., Li, G., & Huang, Y. (2018). Effect of MOF derived hierarchical Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/expanded graphite on thermal performance of stearic acid phase change material. *Solar Energy*, 171, 142-149.
- Li, T., Lee, J.-H., Wang, R., & Kang, Y. T. (2013). Enhancement of heat transfer for thermal energy storage application using stearic acid nanocomposite with multi-walled carbon nanotubes. *Energy*, 55, 752-761.
- Lin, Y., Zhu, C., Alva, G., & Fang, G. (2018). Palmitic acid/polyvinyl butyral/expanded graphite composites as form-stable phase change materials for solar thermal energy storage. *Applied Energy*, 228, 1801-1809.

- Liu, C., Yuan, Y., Zhang, N., Cao, X., & Yang, X. (2014). A novel PCM of lauric–myristic–stearic acid/expanded graphite composite for thermal energy storage. *Materials Letters*, *120*, 43-46.
- Liu, Z., Wei, H., Tang, B., Xu, S., & Shufen, Z. (2018). Novel light–driven CF/PEG/SiO<sub>2</sub> composite phase change materials with high thermal conductivity. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *174*, 538-544.
- Luo, J., Zou, D., Wang, Y., Wang, S., & Huang, L. (2022). Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, *430*, 132741.
- Ma, G., Wang, Z., Xie, S., Sun, J., Jia, Y., Jing, Y., & Du, G. (2018). Preparation and Properties of Stearic Acid–Acetanilide Eutectic Mixture/Expanded Graphite Composite Phase-Change Material for Thermal Energy Storage. *Energy Technology*, *6*(1), 153-160. <https://doi.org/10.1002/ente.201700352>
- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>
- Mehrali, M., Latibari, S. T., Mehrali, M., Mahlia, T. M. I., Sadeghinezhad, E., & Metselaar, H. S. C. (2014). Preparation of nitrogen-doped graphene/palmitic acid shape stabilized composite phase change material with remarkable thermal properties for thermal energy storage. *Applied energy*, *135*, 339-349.
- Meng, X., Zhang, H., Sun, L., Xu, F., Jiao, Q., Zhao, Z., Zhang, J., Zhou, H., Sawada, Y., & Liu, Y. (2013). Preparation and thermal properties of fatty acids/CNTs composite as shape-stabilized phase change materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *111*(1), 377-384. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2349-8>
- Mhike, W., Focke, W. W., Mackenzie, J., Mills, E. J., & Badenhorst, H. (2018). Stearyl alcohol/palm triple pressed acid-graphite nanocomposites as phase change materials. *Thermochimica Acta*, *663*, 77-84.
- Mishra, R. K., Mishra, P., Verma, K., & Joseph, K. (2018). Manipulation of thermo-mechanical, morphological and electrical properties of PP/PET polymer blend using MWCNT as nano compatibilizer: A comprehensive study of hybrid nanocomposites. *Vacuum*, *157*, 433-441.
- Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied thermal engineering*, *28*(11-12), 1536-1550.
- Ni, Z., Zeng, Y. Y., Zhou, F. Y., Bai, J. J., & Zhou, J. H. (2016). Effect of carbon nanotubes on organic phase change materials. *J Shenzhen Univ Sci Eng*, *33*(03), 241-247.
- Okogeri, O., & Stathopoulos, V. N. (2021). What about greener phase change materials? A review on biobased phase change materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*, *10*, 100081.

- Özonur, Y., Mazman, M., & Paksoy, H. (2003). Termal enerji depolaması için parafinin mikrokapsüllemesi, Türkiye 9. *Enerji Kongresi*, 24-27.
- Parameshwaran, R., Harikrishnan, S., & Kalaiselvam, S. (2010). Energy efficient PCM-based variable air volume air conditioning system for modern buildings. *Energy and Buildings*, 42(8), 1353-1360.
- Patel, J., Andharia, J., Georgiev, A., Dzhonova, D., Maiti, S., Petrova, T., Stefanova, K., Trayanov, I., & Panyovska, S. (2022). Modeling and Simulation of Phase Change Material Based Thermal Energy Accumulators in Small-Scale Solar Thermal Dryers. İçinde C. Boyadjiev (Ed.), *Modeling and Simulation in Chemical Engineering* (ss. 155-191). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-87660-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87660-9_8)
- Peng, Y., Wang, F., Wang, Z., Alsayed, A. M., Zhang, Z., Yodh, A. G., & Han, Y. (2015). Two-step nucleation mechanism in solid–solid phase transitions. *Nature materials*, 14(1), 101-108.
- Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in materials science*, 65, 67-123.
- Py, X., Olives, R., & Mauran, S. (2001). Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material. *International Journal of heat and mass transfer*, 44(14), 2727-2737.
- Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18, 246-258.
- Sarı, A. (2005). Eutectic mixtures of some fatty acids for low temperature solar heating applications: Thermal properties and thermal reliability. *Applied thermal engineering*, 25(14-15), 2100-2107.
- Sarı, A., Sarı, H., & Önal, A. (2004). Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials. *Energy conversion and management*, 45(3), 365-376.
- Sarı, A., & Kaygusuz, K. (2006). Thermal energy storage characteristics of myristic and stearic acids eutectic mixture for low temperature heating applications. *Chinese journal of chemical engineering*, 14(2), 270-275.
- Sarıer, N., & Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: An overview. *Thermochimica acta*, 540, 7-60.
- Shabtay, Y. L., & Black, J. R. (2014). Compact hot water storage systems combining copper tube with high conductivity graphite and phase change materials. *Energy Procedia*, 48, 423-430.

- Sharif, M. A., Al-Abidi, A. A., Mat, S., Sopian, K., Ruslan, M. H., Sulaiman, M. Y., & Rosli, M. A. M. (2015). Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 557-568.
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., & Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy conversion and management*, 95, 193-228.
- Sharma, S. D. (1999). *Study of thermal energy storage in phase change materials for low temperature solar applications* [PhD Thesis]. Ph. D. Dissertation, Devi Ahilya University, Indore, India.
- Shenogin, S., Bodapati, A., Xue, L., Ozisik, R., & Keblinski, P. (2004). Effect of chemical functionalization on thermal transport of carbon nanotube composites. *Applied Physics Letters*, 85(12), 2229-2231.
- Singh, P., Sharma, R. K., Ansu, A. K., Goyal, R., Sarı, A., & Tyagi, V. V. (2021). A comprehensive review on development of eutectic organic phase change materials and their composites for low and medium range thermal energy storage applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 223, 110955.
- Soares, N., Gaspar, A. R., Santos, P., & Costa, J. J. (2015). Experimental study of the heat transfer through a vertical stack of rectangular cavities filled with phase change materials. *Applied energy*, 142, 192-205.
- Song, S., Dong, L., Chen, S., Xie, H., & Xiong, C. (2014). Stearic–capric acid eutectic/activated-attapulgiate composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Energy conversion and management*, 81, 306-311.
- Sun, X., Lin, Y., Zhu, Z., & Li, J. (2022). Optimized design of a distributed photovoltaic system in a building with phase change materials. *Applied Energy*, 306, 118010.
- Şahan, N., Fois, M., & Paksoy, H. (2015). Improving thermal conductivity phase change materials—A study of paraffin nanomagnetite composites. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 61-67.
- Tang, X., Zhu, B., Xu, M., Zhang, W., Yang, Z., Zhang, Y., Yin, G., He, D., Wei, H., & Zhai, X. (2015). Shape-stabilized phase change materials based on fatty acid eutectics/expanded graphite composites for thermal storage. *Energy and Buildings*, 109, 353-360.
- Tang, Y., Jia, Y., Alva, G., Huang, X., & Fang, G. (2016). Synthesis, characterization and properties of palmitic acid/high density polyethylene/graphene nanoplatelets composites as form-stable phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 155, 421-429.
- Tang, Y., Su, D., Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G. (2016). Synthesis and thermal properties of the MA/HDPE composites with nano-additives as form-stable PCM with improved thermal conductivity. *Applied energy*, 180, 116-129.

- Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, *18*, 327-349.
- Thalib, M. M., Manokar, A. M., Essa, F. A., Vasimalai, N., Sathyamurthy, R., & Garcia Marquez, F. P. (2020). Comparative study of tubular solar stills with phase change material and nano-enhanced phase change material. *Energies*, *13*(15), 3989.
- Tyagi, V. V., Chopra, K., Sharma, R. K., Pandey, A. K., Tyagi, S. K., Ahmad, M. S., Sari, A., & Kothari, R. (2022). A comprehensive review on phase change materials for heat storage applications: Development, characterization, thermal and chemical stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *234*, 111392.
- Venkateswarlu, K., & Ramakrishna, K. (2022). Recent advances in phase change materials for thermal energy storage—a review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, *44*(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03308-7>
- Wang, J., Xie, H., Xin, Z., & Li, Y. (2010). Increasing the thermal conductivity of palmitic acid by the addition of carbon nanotubes. *Carbon*, *48*(14), 3979-3986.
- Wang, L., & Meng, D. (2010). Fatty acid eutectic/polymethyl methacrylate composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Applied Energy*, *87*(8), 2660-2665.
- Wang, X., Lu, E., Lin, W., Liu, T., Shi, Z., Tang, R., & Wang, C. (2000). Heat storage performance of the binary systems neopentyl glycol/pentaerythritol and neopentyl glycol/trihydroxy methyl-aminomethane as solid–solid phase change materials. *Energy conversion and management*, *41*(2), 129-134.
- Wang, Z., Sun, J., Xie, S., Ma, G., & Jia, Y. (2017). Thermal Properties and Reliability of a Lauric Acid/Nonanoic Acid Binary Mixture as a Phase-Change Material for Thermal Energy Storage. *Energy Technology*, *5*(12), 2309-2316. <https://doi.org/10.1002/ente.201700349>
- Waqas, A., & Din, Z. U. (2013). Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *18*, 607-625.
- Weinstein, R. D., Kopec, T. C., Fleischer, A. S., D'Addio, E., & Bessel, C. A. (2008). *The experimental exploration of embedding phase change materials with graphite nanofibers for the thermal management of electronics*. <https://asmedigitalcollection.asme.org/heattransfer/article-abstract/130/4/042405/439540>
- Wen, R., Huang, Z., Huang, Y., Zhang, X., Min, X., Fang, M., Liu, Y., & Wu, X. (2016). Synthesis and characterization of lauric acid/expanded vermiculite as form-stabilized thermal energy storage materials. *Energy and Buildings*, *116*, 677-683.
- Wen, R., Zhang, X., Huang, Y., Yin, Z., Huang, Z., Fang, M., Liu, Y., & Wu, X. (2017). Preparation and properties of fatty acid eutectics/expanded perlite and expanded vermiculite shape-stabilized materials for thermal energy storage in buildings. *Energy and Buildings*, *139*, 197-204.

- Weng, J., Yang, X., Zhang, G., Ouyang, D., Chen, M., & Wang, J. (2019). Optimization of the detailed factors in a phase-change-material module for battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *138*, 126-134.
- Wu, S., Ma, X., Peng, D., & Bi, Y. (2019). The phase change property of lauric acid confined in carbon nanotubes as nano-encapsulated phase change materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *136*(6), 2353-2361. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7906-3>
- Xiao, D., Qu, Y., Hu, S., Han, H., Li, Y., Zhai, J., Jiang, Y., & Yang, H. (2015). Study on the phase change thermal storage performance of palmitic acid/carbon nanotubes composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *77*, 50-55.
- Yang, J., Qi, G.-Q., Bao, R.-Y., Yi, K., Li, M., Peng, L., Cai, Z., Yang, M.-B., Wei, D., & Yang, W. (2018). Hybridizing graphene aerogel into three-dimensional graphene foam for high-performance composite phase change materials. *Energy Storage Materials*, *13*, 88-95.
- Yang, X., Yuan, Y., Zhang, N., Cao, X., & Liu, C. (2014). Preparation and properties of myristic–palmitic–stearic acid/expanded graphite composites as phase change materials for energy storage. *Solar Energy*, *99*, 259-266.
- Yavari, F., Fard, H. R., Pashayi, K., Rafiee, M. A., Zamiri, A., Yu, Z., Ozisik, R., Borca-Tasciuc, T., & Koratkar, N. (2011). Enhanced Thermal Conductivity in a Nanostructured Phase Change Composite due to Low Concentration Graphene Additives. *The Journal of Physical Chemistry C*, *115*(17), 8753-8758. <https://doi.org/10.1021/jp200838s>
- Yuan, Y., Yuan, Y., Zhang, N., Du, Y., & Cao, X. (2014). Preparation and thermal characterization of capric–myristic–palmitic acid/expanded graphite composite as phase change material for energy storage. *Materials Letters*, *125*, 154-157.
- Zabalegui, A., Lokapur, D., & Lee, H. (2014). Nanofluid PCMs for thermal energy storage: Latent heat reduction mechanisms and a numerical study of effective thermal storage performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *78*, 1145-1154.
- Zakim, D., & Herman, R. H. (1969). Regulation of fatty acid synthesis. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *22*(2), 200-213.
- Zeng, J.-L., Gan, J., Zhu, F.-R., Yu, S.-B., Xiao, Z.-L., Yan, W.-P., Zhu, L., Liu, Z.-Q., Sun, L.-X., & Cao, Z. (2014). Tetradecanol/expanded graphite composite form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar energy materials and solar cells*, *127*, 122-128.
- Zeng, J.-L., Zheng, S.-H., Yu, S.-B., Zhu, F.-R., Gan, J., Zhu, L., Xiao, Z.-L., Zhu, X.-Y., Zhu, Z., & Sun, L.-X. (2014). Preparation and thermal properties of palmitic acid/polyaniline/exfoliated graphite nanoplatelets form-stable phase change materials. *Applied energy*, *115*, 603-609.

- Zeng, J.-L., Zhu, F.-R., Yu, S.-B., Zhu, L., Cao, Z., Sun, L.-X., Deng, G.-R., Yan, W.-P., & Zhang, L. (2012). Effects of copper nanowires on the properties of an organic phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *105*, 174-178.
- Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G., Degreve, J., & Lv, Y. (2016). Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*, *53*, 1-40.
- Zhang, H., Gao, X., Chen, C., Xu, T., Fang, Y., & Zhang, Z. (2016). A capric–palmitic–stearic acid ternary eutectic mixture/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *87*, 138-145.
- Zhang, N., Yuan, Y., Du, Y., Cao, X., & Yuan, Y. (2014). Preparation and properties of palmitic-stearic acid eutectic mixture/expanded graphite composite as phase change material for energy storage. *Energy*, *78*, 950-956.
- Zhang, N., Yuan, Y., Wang, X., Cao, X., Yang, X., & Hu, S. (2013). Preparation and characterization of lauric–myristic–palmitic acid ternary eutectic mixtures/expanded graphite composite phase change material for thermal energy storage. *Chemical Engineering Journal*, *231*, 214-219.
- Zhang, N., Yuan, Y., Yuan, Y., Cao, X., & Yang, X. (2014). Effect of carbon nanotubes on the thermal behavior of palmitic–stearic acid eutectic mixtures as phase change materials for energy storage. *Solar energy*, *110*, 64-70.
- Zhang, P., Xiao, X., & Ma, Z. W. (2016). A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. *Applied Energy*, *165*, 472-510.
- Zhou, M., Bi, H., Lin, T., Lü, X., Wan, D., Huang, F., & Lin, J. (2014). Heat transport enhancement of thermal energy storage material using graphene/ceramic composites. *Carbon*, *75*, 314-321.

## ÖZ GEÇMİŞ

Seçil SARI, 2009-2013 yılları arasında Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya bölümünde birinci lisans eğitimini tamamladı. 2013-2017 yılları arasında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği bölümünde derece ile ikinci lisans eğitimini tamamladı. 2018-2020 yılları arasında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve idari Bilimler Fakültesi İşletme bölümünde tezsiz yüksek lisans programını tamamladı. 2018-2021 yılları arasında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya bölümünde tezli yüksek lisans programını tamamladı. 2021-2022 yılları arasında NATURENX Bitkisel Pigment şirketinde Yüksek Kimya Mühendisi olarak çalıştı. 2022 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü'nde Fizikokimya anabilim dalında araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümünde üçüncü yüksek lisans eğitimine başlamıştır.