

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MİKROKRİSTAL SELÜLÖZ/METİL STEARAT/GRAFEN NANOPELLET
KOMPOZİT FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİNİN HAZIRLANMASI,
KARAKTERİZASYONU VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esmâ ÇAKIR

HAZİRAN 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MİKROKRİSTAL SELÜLÖZ/METİL STEARAT/GRAFEN NANOPELLET
KOMPOZİT FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİNİN HAZIRLANMASI,
KARAKTERİZASYONU VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Esmâ ÇAKIR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
" METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ "
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15 / 05 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 04 / 06 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet SARI

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

Bu çalışmada farklı oranlarda MCS/MtS/GnT-1, MCS/MtS/GnT-2 ve MCS/MtS7GnT-3 yapıcı kararlı kompozit FDM'ler üretilmiştir. Kolay vakum emprenye yöntemi ile yapıcı kararlı mikro kristalin selülöz (MCS)/metil stearat (MtS)/grafen nano tabaka (GnT) kompozitleri yeni ısı depolama malzemesi olarak üretilmiştir. Bu kompozitlerde, destek malzemesi olarak MCS, faz değişim malzemesi (FDM) olarak MtS ve ısıl iletken olarak GnT kullanılmıştır. Ayrıca, GnT'nin kompozit yapıdaki MtS yükleme oranına etkisinin yanı sıra kimyasal yapı, gizli ısı, ısıl kararlılık, kristal yapı, morfolojik yapı, ısı depolama ve salma gibi diğer özelliklere etkisi de araştırılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca üzerimde fazlaca emeği bulunan, yol gösteren ve sonsuz bilgi ve deneyiminden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Ahmet SARI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam süresinde deneysel çalışmalarında bana yardımcı olan ve desteğini hiç esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Gökhan HEKİMOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Esma ÇAKIR

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Mikrokristal Selülöz/Metil Stearat/Grafen Nanopellet Kompozit Faz Değişim Malzemesinin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Isıl Enerji Depolama Özelliklerinin Belirlenmesi” başlıklı bu tez çalışmasını danışmanım Prof. Dr. Ahmet SARI’nın gözetimim altında tamamladığımı, verileri ve örnekleri kendim bir araya getirdiğimi, deneyleri ve analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı ve yaptırdığımı, başka çalışmalardan edindiğim bilgileri tezin ilgili kaynakça bölümünde gösterdiğimi, bu tez çalışması süresince bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak hareket ettiğimi ve bunun aksi durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/06/2024

Esma ÇAKIR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLOLAR DİZİNİ	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Enerji Depolama Yöntemleri	5
2.1.1 Gizli Isı Depolama	9
3. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (FDM)	10
3.1. Faz Değişim Malzemelerinin Sınıflandırılması.....	11
3.2. FDM Seçiminde Kullanılan Ölçütler.....	14
3.2.1. Termodinamik Ölçütler	14
3.2.2. Kinetik Ölçütler.....	14
3.2.3. Kimyasal Ölçütler	15
3.2.4. Ekonomik Ölçütler.....	15
3.3. Organik Faz Değiştiren Malzemeler (OFDM)	15
3.3.1. Parafinler	15
3.3.2. Parafin Olmayan OFDM'ler.....	18
3.3.3. Yağ Asitleri	19
3.3.4. Esterler.....	20
3.3.5. Polietilen Glikoller (PEG).....	21
4. Yapıca Kararlı Kompozit Faz Değişim Malzemeleri (YK-KFDM).....	23
4.1. YK-KFDM'lerin Sınıflandırılması.....	24
4.1.1. Seramik Esaslı YK-KFDM'ler.....	25
4.1.2. Karbon Esaslı YK-KFDM'ler	26
4.1.3. Metal Esaslı YK-KFDM'ler.....	28

4.1.4.	Polimer Esaslı YK-KFDM'ler	29
4.2.	Yapıca Kararlı Kompozit FDM'lerin Üretim Yöntemleri.....	30
5.	DENEYSEL	33
5.1.	Kullanılan Kimyasal Malzemeler	33
5.2.	Yapıca Kararlı MCS/MtS Kompozit FDM'lerin Hazırlanması	35
5.3.	Yapıca Kararlı MCS/MtS/GnT Kompozit FDM'lerin Hazırlanması	36
5.4.	Hazırlanan Yapıca Kararlı MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT Kompozitlerinin Karakterizasyonu	37
5.4.1.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	37
5.4.2.	X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi.....	38
5.4.3.	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi	38
5.4.4.	Termogravimetri (TG) Analizi.....	39
5.4.5.	Isıl İletkenlik Ölçümü	39
5.4.6.	FT-IR Analizi	40
6.	BULGULAR.....	40
6.1.	Sızdırmazlık Testi Sonuçları	40
6.2.	Yüzey Morfolojisi Analiz Bulguları.....	41
6.3.	XRD Sonuçları	42
6.4.	FT-IR Sonuçları	43
6.5.	DSC Sonuçları.....	44
6.6.	TGA Sonuçları	48
6.7.	Isıl İletkenlik Sonuçları	49
7.	TARTIŞMA VE SONUÇ	53
8.	ÖNERİLER	53
9.	KAYNAKLAR	54
	ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

MİKROKRİSTAL SELÜLÖZ/METİL STEARAT/GRAFEN NANOPELLET
KOMPOZİT FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİNİN HAZIRLANMASI,
KARAKTERİZASYONU VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ

Esmâ ÇAKIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet SARI
2024, 79 Sayfa

Bu tez çalışmasında kolay vakum emprenye yöntemi ile yapıca kararlı mikro kristalin selülöz (MCS)/metil stearat (MtS)/grafen nano tabaka (GnT) kompozitler yeni ısı depolama malzemesi olarak üretilmiştir. Bu kompozitlerde, destek malzemesi olarak MCS, faz değişim malzemesi (FDM) olarak MtS ve ısıl iletken olarak GnT kullanılmıştır. Ayrıca, GnT'nin kompozit yapıdaki MtS yükleme oranına etkisinin yanı sıra kimyasal yapı, gizli ısı, ısıl kararlılık, kristal yapı, morfolojik yapı ve ısı depolama ve salma gibi diğer özelliklere etkisi de araştırılmıştır. MCS-GnT hibrit yapısının destek malzemesi olarak kullanıldığı yapıca kararlı kompozitte ağırlıkça %65'lik yüksek bir MtS yükleme oranı elde edilmiştir. Bu kompozit 0.51 W/mK ısıl iletkenlik performansı ile en yüksek ısı depolama-salma performansı sundu. Geliştirilmiş olan ısıl iletkenlik; erime-donma sürelerindeki azalmalar ve kızılötesi termal görüntü yakalama analiziyle de doğrulanmıştır. DSC sonuçları bu kompozitin 147.97 J/g erime entalpisiyle 35.32°C'de eridiğini göstermiştir. Önerilen MCS/MtS/GnT kompoziti, 1000 erime-donma döngüsünden sonra mükemmel döngü kararlılığının yanı sıra yüksek ısıl kararlılık da sunmuştur. Tüm test sonuçları, hazırlanan MCS/MtS/GnT kompozitlerinin çeşitli düşük sıcaklıklı IED uygulamaları için önemli bir potansiyel sunduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz değişim malzemeleri, Isıl enerji depolama, Mikrokristal Selülöz, Metil stearat, Grafen nanotabaka, Gizli ısı depolama, Kompozit.

Master Thesis

SUMMARY

Master Thesis

Preparation, Characterization, and Determination of Thermal Energy Storage Properties of Microcrystalline Cellulose-Based/Methyl Stearate/Graphene Nanoplatelet Composite Phase Change Material

Esma ÇAKIR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgical and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet SARI
2024, 78 Pages

In this thesis study, microcrystalline cellulose (MCS)/methyl stearate (MtS)/graphene nanolayer (GnT) composites were produced as new phase change materials using the facile vacuum impregnation method. In these composites, MCS was utilized as the supporting material, MtS as the phase change material (PCM), and GnT as the thermal conductor. Additionally, the effect of GnT loading ratio in the composite structure on MtS, as well as its impact on other properties such as chemical structure, latent heat, thermal stability, crystal structure, morphological structure, and heat storage and release, were investigated. By employing MCS-GnT hybrid structure as the supporting material in the thermally stable composite, a high MtS loading ratio of 65% by weight was achieved. This composite exhibited the highest heat storage-release performance with a thermal conductivity performance of 0.51 W/mK. The enhanced thermal conductivity was confirmed by reductions in melting-freezing times and infrared thermal image capture analysis. DSC results indicated that this composite melted at 35.32 °C with a melting enthalpy of 147.97 J/g. The proposed MC/MtS/GnP composite offered excellent cycle stability after 1000 melting-freezing cycles, along with high thermal stability. All test results demonstrate significant potential of the prepared MCS/MtS/GnT composites for various low-temperature thermal energy storage (TES) applications.

Keywords: Phase change materials, Thermal energy storage, Microcrystalline cellulose, Methyl stearate, Graphene nanoplatelet, Latent thermal storage, Composite.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması	5
Şekil 2. FDM'nin faz değişiminin şematik gösterimi	6
Şekil 3. Faz değişimi sırasında duyulur ısı ve gizli ısı ile sıcaklığın kontrolü	7
Şekil 4. FDM'lerin Sınıflandırılması ve özellikleri	11
Şekil 5. YK-KFDM'lerin bileşenleri ve avantajları	23
Şekil 6. Farklı matrislerin özellikleri	24
Şekil 7. Farklı türdeki karbon malzemelerinin SEM görüntüleri: a) grafen, b) karbon nanotüp, c) karbon siyahı, d) karbon fiber, e) genişletilmiş grafit ve f) grafit	26
Şekil 8. (a) Nikel köpük ve (b) eritritol-nikel köpük YK-KFDM'nin resimleri ve SEM görüntüleri	29
Şekil 9. Farklı YK-KFDM'lerin üretim yöntemleri	30
Şekil 10. Farklı emprenye yöntemlerinin oranları	31
Şekil 11. Kullanılan MtS ve kimyasal formülü	33
Şekil 12. Kullanılan MCS ve kimyasal fomülü	34
Şekil 13. Kullanılan GnT ve kimyasal yapısı	34
Şekil 14. Yapıca Kararlı MCS/MtS Kompozit FDM'lerin Hazırlanmasının şematik görüntüsü	35
Şekil 15. Farklı GnT oranlarında hazırlanmış yapıca kararlı (a) MCS/MtS/GnT-1 (b) MCS/MtS/GnT-2 ve (c) MCS/MtS/GnT-3 kompozit FDM'ler	36
Şekil 16. LEO 440 Model SEM Cihazı	37
Şekil 17. XRD Cihazı	38
Şekil 18. DSC Cihazı (Hitachi-DSC 7020 Model)	38

Şekil 19. TG analiz cihazı (Perkin-Elmer TGA7 model)	39
Şekil 20. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı (Decagon KD2)	40
Şekil 21. JASCO 430 Model FT-IR Cihazı	40
Şekil 22. Yapıca kararlı farklı MCS/MtS/GnT kombinasyonlarının sızıntı testi sonuçları	40
Şekil 23. Saf MCS (a-b), yapıca kararlı MCS/MtS kompoziti (c-d), yapıca kararlı MCS/MtS/GnT-3 (e-f) kompozitlerinin SEM görüntüleri	42
Şekil 24. Numunelerin XRD desenleri.....	43
Şekil 25. Numunelerin FTIR spektrumları.....	44
Şekil 26. DSC eğrisi şematik gösterimi	45
Şekil 27. MCS/MtS, MCS/MtS/GnT-1, MCS/MtS/GnT-2 ve MCS/MtS/GnT-3'nin DSC eğrileri	46
Şekil 28. Numunelerin TGA Eğrileri	48
Şekil 29. Isıl iletkenlik ölçüm sonuçları.....	49
Şekil 30. Üretilen kompozitlerin elde edilen ısınma-soğuma eğrileri.....	51
Şekil 31. (a). MCC/MtS, (b). MCC/MtS/GnT-1, (c). MCS/MtS/GnT-2 ve (d). MCS/MtS/GnT-3 kompozitlerinin 2, 4, 6 ve 8 dakika ısıtılmasından sonra oluşan ısıl kızılötesi ışınların görüntüleri.....	52
Şekil 32. MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin ilk, 500 ve 1000 döngülerindeki DSC ve FTIR eğrileri	53

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Duyulur ısı depolayan katı ve sıvı malzemelerin temel özellikleri.	8
Tablo 2. IED Sistemlerinde kullanılacak FDM'lerde olması gereken özellikler	12
Tablo 3. FDM'lerin kıyaslanması.....	13
Tablo 4. FDM olarak kullanılan parafinler.	17
Tablo 5. Parafin ve parafin olmayan FDM'lerin özellikleri.....	18
Tablo 6. Organik FDM olarak yaygın kullanılan yağ asitlerinin bazı ısı özellikleri.....	19
Tablo 7. Bazı yağ asidi ötektiklerinin ısı özellikleri	20
Tablo 8. Yağ asidi esterlerinin ısı özellikleri.....	21
Tablo 9. Çeşitli moleküler ağırlıklara sahip PEG için sıcaklık ve füzyon ısıları.....	22
Tablo 10. YK-KFDM'lerin üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları	31
Tablo 11. Bu çalışmada kullanılan MCS'nin teknik özellikleri	33
Tablo 12. Bu çalışmada kullanılan MCS'nin teknik özellikleri	34
Tablo 13. Bu çalışmada kullanılan GnT'nin teknik özellikleri	35
Tablo 14. Hazırlanan yapıcı kararlı MCC/MtS ve MCC/MtS/GnP kompozitlerinin listesi ve kütle bileşim oranları	37
Tablo 15. TG analiz şartları	39
Tablo 16. Numunelerin DSC verileri	46
Tablo 17. MCS/MtS tabanlı kompozitlerin gizli ısı depolama özelliklerinin literatürle karşılaştırılması	47
Tablo 18. Hazırlanan MCS/MtS esaslı kompozitlerin ısı iletkenliklerinin literatür ile karşılaştırılması	50

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

DID: Duyulur Isı Depolama

DSC: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre

EG: Expanded Grafit

FDM: Faz Değişim Malzemesi

FT-IR: Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskop

GID: Gizli Isı Depolama

GIIED: Gizli Isı Isıl Enerji Depolama

GnT: Grafen Nano Tabaka

HDPE: Yüksek Yoğunluklu Polietilen

IED: Isıl Enerji Depolama

KNE: Karbon Nano Elyaf

KNF: Karbon Nano Fiber

KNT: Karbon Nano Tabaka

LDPE: Lineer Yoğunluklu Polietilen

LLDPE: Lineer Düşük Yoğunluklu Polietilen

MCS: Mikro Kristalin Selülöz

MtS: Metil Stearat

MWKNT: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp

OFDM: Organik Faz Değişim Malzemesi

PEG: Polietilen Glikol

RT100: Parafin

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

SWKNT: Tek Duvarlı Karbon Nanotüp

TGA: Termogravimetrik Analiz

YK-KFDM: Yapıca Kararlı Kompozit Faz Değişim Malzemesi

XRD: X-Işını Difraktometresi

Na₂SO₄: Sodyum Sülfat

μm : Mikrometre

nm : Nanometre

$\text{\AA}$: Angstrom



1. GİRİŞ

Enerji tasarrufunun önemi, son yıllarda artan nüfus ve gelişmekte olan teknolojiyle birlikte artmış ve insanlık için hayati bir konu haline gelmiştir. Bunun sonucu olarak dünyadaki bütün toplumlar enerji depolama ve tasarrufu üzerine yoğunlaşarak daha kaliteli bir yaşam tarzını hedeflemektedir. Günümüzde dünya ve toplum için gerekli olan enerjinin çoğu doğalgaz, petrol ve kömür gibi yenilenemez fosil yakıtlardan karşılanmaktadır [1]. Bundan dolayı fosil yakıtların dünyadaki rezervlerinin önümüzdeki 100 yıl içerisinde tükeneceği varsayılmaktadır [19]. Nüfusun artması ve enerji tüketiminin hızlanması sonucunda bu fosil yakıtlar hızlıca tükenmekte ve aşırı kullanımlarının sonucu olarak atmosfere saldıkları zehirli gazlarla çevreye zarar vererek küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bunun önüne geçilmesi adına toplumlar daha temiz ve ulaşılabilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Böylelikle mevcut enerji kaynaklarından daha etkili bir şekilde faydalanmak önemi giderek artmaktadır [2]. Ayrıca, enerji depolama; güneş enerjisi başta olmak üzere atık enerjinin ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması ile enerji arz-talep dengesini sağlamayı amaçlar [7].

Tüm bu durumların sonucunda mevcut enerjinin daha verimli kullanılması, azalmasını önlemek ve toplumların enerji gereksinimlerinin karşılanması için enerji depolanması adına birçok çalışma yürütülmektedir. Ayrıca, enerji depolama mevcut olan fosil yakıtların daha az tüketilmesini sağlayarak sera gazının da salınımını azaltarak küresel ısınmanın kötü etkilerini hafifletecektir [3].

Var olan enerjinin etkin bir şekilde kullanılabilmesi ve mümkün olan en verimli şekilde depolanabilmesi için birçok farklı depolama yöntemi kullanılmaktadır. Enerji ısı, enerji depolama, mekanik, kimyasal ve elektriksel olmak üzere 4 farklı şekilde depolanabilir. [4]. Yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının tükenmesi, artan dünya enerji talebiyle birleştiğinde, alternatif enerji kaynakları araştırması üzerinde odaklanmayı artırmıştır. Isıl enerji depolama sistemleri, bu küresel soruna kısmen çözüm bulmak için kullanılabilir. Gizli ısı depolama sistemleri, aynı zamanda Faz Değişim Malzemeleri (FDM'ler) olarak da bilinir, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve sıcaklık kontrolünün kolaylığı nedeniyle popülerlik kazanmaktadır [32].

Isıl enerji depolama yöntemleri; duyu ısı depolama (DID) ve gizli ısı depolama (GID) şeklinde iki ana gruba ayrılır [5]. Gizli ısı depolamanın ısı enerji depolama yöntemleri arasında en kullanışlı olan yöntemlerden birisi olmasının nedeni küçük sıcaklık aralığında ısı depolama ve salma özelliklerinin ve yüksek ısı depolama yoğunluğunun olmasıdır [6]. Faz değiştiren malzemeler (FDM) gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılır. FDM'nin erime sırasında depolanan enerji yine FDM'nin soğuması esnasında geri alınır. Bu malzemeler dar bir sıcaklık aralığında enerji depolama yoğunluğu yüksek olan malzemelerdir. FDM'ler kimyasal bileşimlerine göre ötektik, organik ve inorganik olmak üzere üçe ayrılır. Organik FDM'ler parafin mumları, yağ asitleri ve polietilen glikoller (PEG)'dir. İnorganik olan FDM'ler ise tuz hidratlar ve metalik bileşiklerden oluşurlar. Organik Faz Değişim Malzemeleri (OFDM)'ler parafin ve parafin olmayan olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu FDM'ler faz ayrımı olmadan sıvı faza ve tekrar faz ayrımı olmadan katı faza geçebilme özelliğine sahiptir. Bu durum ise OFDM'leri diğer biline diğer FDM'lerden daha fazla önem teşkil etmektedir. Diğer taraftan OFDM'lerin ısı iletkenliklerinin düşük olması, erime faz değişimi sırasında sızıntı göstermesi gibi olumsuzluklara sahip olması bu malzemelerin kullanımını sınırlandırır [8].

Kullanılan FDM'lerin düşük ısı iletkenliği kullanım alanlarını kısıtlamakla birlikte ısı yükleme ve salıverme sürelerini de önemli ölçüde uzatır. FDM'lerin ısı iletkenliklerini arttırma yöntemlerinden biri de FDM içerisine karbon esaslı bir malzeme ilavesidir. Grafen, grafen oksit, karbon nanotüp, karbon nanofiber ve geni letilmi  grafit erimiş haldeki FDM'ye eklenerek kompozit karışımlar hazırlanabilmekte ve böylece FDM'nin ısı iletkenliği önemli düzeyde iyile tirilebilmektedir [19].

FDM'lerin uygulama alanları binalar, lojistik ve soğuk zincir, insan vücudu, tıp, elektronik, endüstriyel olarak sınıflandırılabilir. Binalarda; alan ısıtma-soğutma, evsel sıcak su temini gibi uygulamalarda kullanılır. Lojistik ve soğuk zincir uygulamaları, sıcaklığa duyarlı malların taşınmasına yönelik uygulamaları ifade eder ve malların taşınması ve depolanması olarak ayrılabilir. Sağlık alanında organların taşınmasında ve korunmasında kullanılırlar [9].

Elverişli faz değişim sıcaklığı, gizli ısı depolama kapasitesinin yüksek olması, önemsiz hacim değişimi, aşırı soğuma derecesi, zehirsiz olma, iyi kimyasal ve ısı kararlılık, kısmen d  uk maliyet gibi birçok avantajlı özellik ester veya yağ asitleri FDM'lerini ısı enerji depolama uygulamalarının birçok türü için umut verici hale getirir. Ancak, bu FDM'lerin katı-sıvı faz değişimi boyunca gözlenen sızıntı sorunu ve d  uk ısı iletkenlikleri IED alanında FDM uygulamalarını gözle görülebilir şekilde sınırlandıran temel sorundur. Bu kapsamda FDM'lerin sızıntı sorunundan kaçınmak için mikro/nano boyuttaki kapsülleme, eriyik karıştırma ve vakum yoluyla emdirme yaygın bir şekilde kullanılan yöntemlerdir. FDM'lerin bir polimer kabuk yardımıyla mikro/nano kapsüllenmesi karmaşık adımlar gerektirir ve kısmen yüksek üretim maliyeti ayrıca yüksek basınçlı kalıplama durumunda kabuk hasarı riski ortaya çıkabilir. Polimerler kullanılarak yapılan eriyik karıştırma işlemleri FDM'nin hapsedilme oranının d  mesine neden olur. Bu bağlamda FDM'lerin gözenekli destek malzemesi içerisine vakum yoluyla emdirilmesi oldukça etkili bir yöntemdir. Bu metod; basit, tek adımlı ve kısmen d  uk maliyetli süreçten oluşur ve çoğunlukla yüksek oranda FDM yüklemesine izin verir. Bu bağlamda, birçok gözenekli mineral malzeme çeşitli FDM'lerin  ekilce veya yapıca kararlılığı için ta ııcıyı

matris olarak kullanıldı. Buna ek olarak, düşük ısı iletkenlik, düşük ısı iletim hızına neden olur ve böylece saf FDM'lerin ya da onların yapıca kararlı kompozit FDM'lerinin (YKK-FDM) ısı absorblama-salıverme periyotları boyunca kaçınılmaz olarak yüksek sıcaklık gradyanı gereklidir.

Bu problemleri gidermek veya en aza indirmek için birçok çaba sarf edilmiş ve özellikle genişletilmiş grafit, grafen oksit, karbon nano elyaf (KNE) ve grafen nanotabaka (GnT) gibi çeşitli karbon bazlı dolgu maddelerinin FDM'lere veya kompozit FDM'lere katılması etkili çözüm olarak sunulmuştur. Ayrıca, GnT yüksek ısı iletkenlik ve ısı dayanıklılık avantajı nedeniyle çeşitli FDM'ler için dolgu maddesi olarak tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, mikrokristal selüloz (MCS), metil stearat (MtS) ve GnT'den oluşan ısı performans özelliği iyileştirilmiş YK-KFDM'ler basit bir yöntemle sentezlendi. Uygun faz değişim sıcaklığı (yaklaşık 35°C) ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesi (yaklaşık 228 J/g), küçük hacim değişimi, göz ardı edilebilir olan aşırı soğuma derecesi, zehirli olmama, aşındırıcı olmama gibi özelliklerinden dolayı MS organik FDM olarak seçildi.

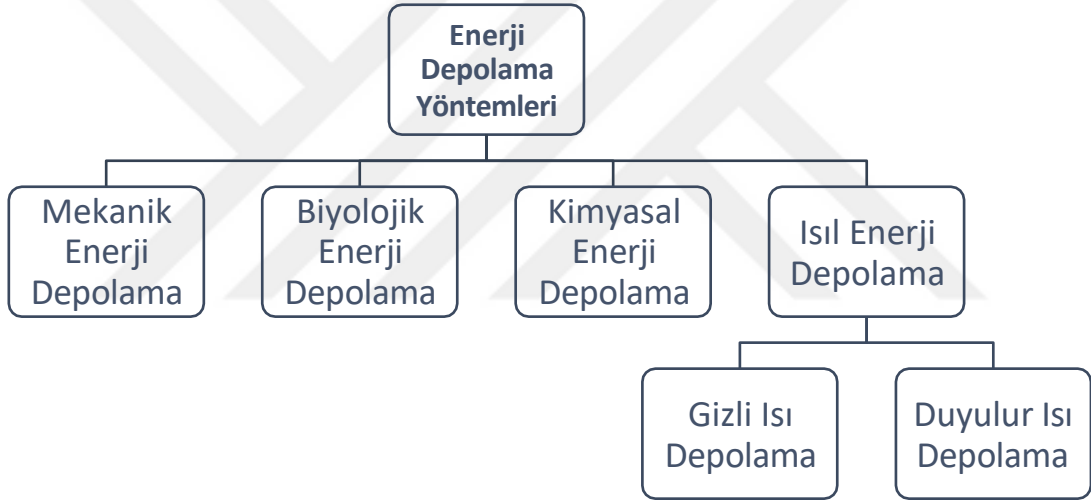
Ancak, bu FDM diğer tipik organik katı-sıvı FDM'ler gibi, katıdan sıvı duruma faz geçişi sırasında sızıntı sorunu yaşar. Ayrıca düşük ısı iletkenlik, IED uygulamalarındaki kullanımını sınırlar. Hazırlanacak karışımda yapı destek malzemesi olarak tercih edilen MCS ısıtma esnasındaki MS'deki sızıntı sorununu önleyebilse de düşük ısı iletkenlik kompozit FDM için hala bir sorundur. Düşük oranda GnT eklenmesi kompozit FDM'nin ısı iletkenliğini artırmakla kalmaz aynı zamanda MTS'nin yapıca kararlılığının artmasına da katkıda bulunur.

Ayrıca, MCS ve GnT'nin moleküler zincirlerinin işlevsel grupları arasında hidrojen bağının oluşması FDM kapsülleme yeteneğini artırır. GnT katılama işleminin FDM emdirme oranı, erime/donma sıcaklıkları, GID kapasiteleri, ısı iletkenlik, mikroyapı, ısı kararlılık ve önerilen MCS/MS bileşiğinin fizikokimyasal uyumluluğu üzerindeki etkileri, ilk kez bu çalışmada kapsamlı olarak incelenmiştir. Belirli sayıda tekrarlanan ısıtma-soğutma döngülerinden sonra kompozitlerin ısı enerji depolama ve salıverme performansları da karşılaştırılmalı olarak incelendi. Elde edilen bulgular, üretilen yapıca kararlı MCS/MS/GnT kompozitlerinin avantajlı özellikleri nedeniyle farklı tip IED talepleri için oldukça elverişli oldukları belirlendi.

2.GENEL BİLGİLER

2.1. Enerji Depolama Yöntemleri

Enerji talebindeki artışın bir sonucu olarak, enerji ihtiyacını karşılamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin en verimli biçimde depolanması çeşitli dönüşüm ve depolama yöntemleri geliştirilmiştir [5]. Enerji depolamada kullanılan farklı yöntemler aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1). Isıl enerji depolama (IED), mevcut ısı kaynaklarının enerji korunumu verimliliğini artırmak için en umut vadeden yöntemlerden biridir. Isıl enerji, gizli ısı depolama (GID), duyulur ısı depolama (DID) veya bazı kimyasalların kimyasal reaksiyonu kullanılarak depolanabilir [40].



Şekil 1. Farklı Enerji Depolama Yöntemleri

Isıl enerji depolamanın çeşitli gereksinimleri bulunmaktadır [12]. Bunlar;

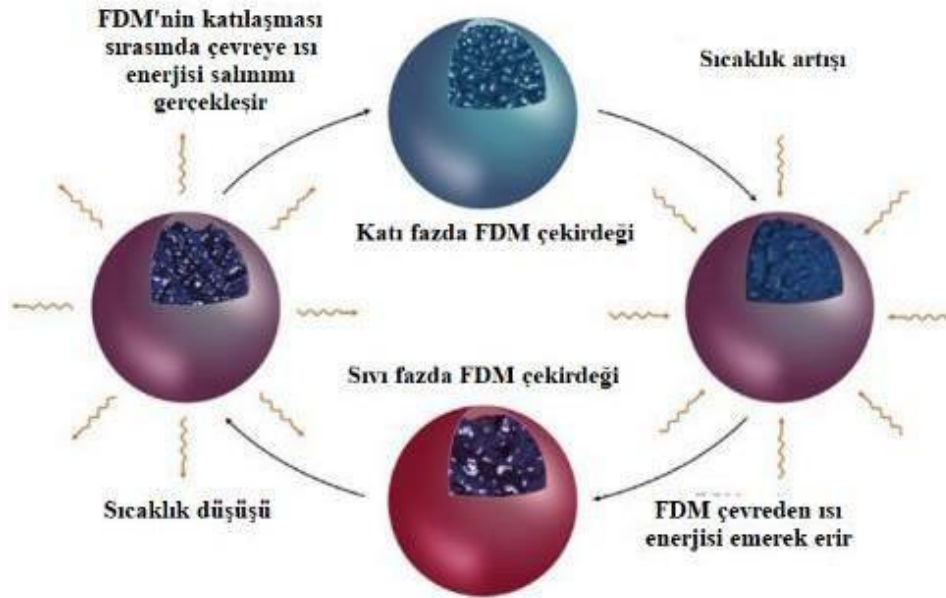
- Enerji kapasitesi: FDM olarak kullanılan malzemenin enerji yoğunluğunun yüksek olması
- Verim: Isı transfer sıvısı ve ısının depolanacağı ortam arasında iyi bir transfer
- Depolama malzemesinin kararlılığı
- Kullanım ömrü: Birden fazla depolama-salma döngüsünde tersinir olarak kullanılabilme
- Düşük ısı kaybı
- Kontrol kolaylığı olması

Enerji depolamanın avantajları;

- Elektrik enerjisi kullanımında tasarruf sağlar
- Gece saatlerinde gündüze oranla % 4-%5 daha az kayıp sağlar
- Ekonomik açıdan katkı sağlar
- Çevreci bir sistemdir
- Kullanıldığı binanın değerini artırır
- Gelişmekte olan bir sistem olduğu için rakiplerine kıyasla avantajlıdır
- Elektrik tüketimini en aza indirerek ısı kapasitesinin artırır
- Cihazlar ve teçhizat küçük olduğu için alandan tasarruf sağlar [14].

Enerji depolamanın dezavantajları;

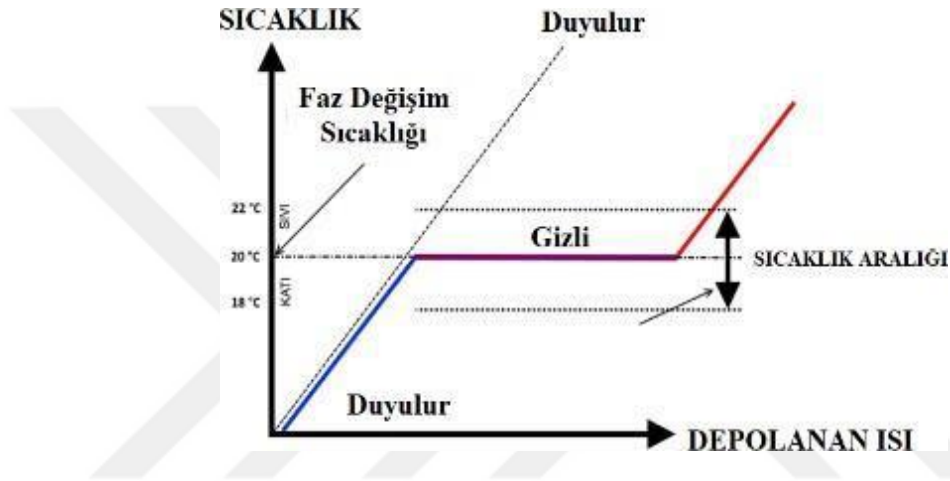
- Tasarımı karmaşıktır
- Klasik sistemler kadar yaygın kullanımı yoktur
- Bu yöntemi kusursuz bir şekilde ortaya koyacak personel sayısı azdır [14].



Şekil 2. FDM'nin faz değişiminin şematik gösterimi [19].

Enerji depolama yöntemleri arasında en verimli ve ekonomik olanı ısı enerji depolama (IED) yöntemidir [6].

Faz değişimi sırasında küçük sıcaklık değişimi ile ortamdan büyük miktarlarda enerji geri dönüşümlü olarak depolanabilmesi ve geri salıverilmesi mümkün olduğu için nispeten FDM kullanılan GID daha iyi bir seçenek olarak kabul edilir [11].



Şekil 3. Faz değişimi sırasında duyulur ısı ve gizli ısı ile sıcaklığın kontrolü

Gizli ısı depolama yönteminin en umut verici ve etkili yöntem olmasının nedeni; yoğunluğun ve enerjinin malzemenin faz değişim sıcaklığına karşılık gelen neredeyse sabit sıcaklıkta saklanabilmesidir.

Malzemenin faz değişimi sırasında ortaya çıkan ısının depolanması DID yöntemi olarak adlandırılır. Isı depolama; sıvı ile katının hibrit veya ayrı ayrı sıvı ve katı olacak şekilde yapılır. Bu sistemin avantajı, çok sayıda ısı depolama ve salıverme dönüşümünün gerçekleşebilmesi, dezavantajı ise gereksinim duyulan depo hacminin büyük olmasıdır [25].

GID yönteminde enerji, malzemede gerçekleşen faz dönüşümü sırasında moleküler düzeyde ısı birikimi sonucu depolanırken, DID yönteminde ısı enerji, bir iç enerji olarak depolanmaktadır. Duyulur ısı depolama malzemeleri, depolama uygulaması için gereken sıcaklık aralığında faz değişimine uğramaz [12]. Tablo 1’de duyulur ısı depolayan katı ve sıvı malzemelerin temel özellikleri verilmiştir.

Enerjinin depolandığı malzemenin kütlesi, ısı depolama kapasitesine ve ilk-son durumlar arasındaki sıcaklık derecesi DID yönteminde depolanan enerji miktarını belirler.

DID katı veya sıvı bir depolama olmak üzere iki farklı ortamda yapılabilir. Metal ve metal olmayan malzemeler katı depolama ortamı için uygundur.

Tablo 1. Duyulur ısı depolayan katı ve sıvı malzemelerin temel özellikleri [13].

Depolama ortamı	Sıcaklık Soğuk (°C) Sıcak (°C)		Ortalama yoğunluk (kg/m ³)	Ortalama ısı iletkenliği (W/mK)	Ortalama ısı kapasitesi (kJ/kgK)
Kum-kaya- mineral yağ	200	300	1700	1	1.3
Betonarme	200	400	2200	1.5	0.85
NaCl (katı)	200	500	2160	7	0.85
Dökme demir	200	400	7200	37	0.56
Silika ateş tuğlaları	200	700	1820	1.5	1
Magnezya ateş tuğlaları	200	1200	3000	1	1.15
Mineral yağ	200	300	1990	0.60	-
Sentetik yağ	250	350	770	0.12	2.6

2.1.1 Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama (GID) yöntemi son yılların en çok ilgi duyulan ısı enerji depolama yöntemidir. FDM kullanan gizli ısı depolama, yüksek enerji depolama yoğunluğu sağlaması ve depolamadan geri alma sürecine kadar küçük sıcaklık değişimi sağlaması nedeniyle en çekici depolama yöntemlerinden biridir [35]. Enerji depolama yoğunluğunun yüksek olduğu bu yöntemde enerji depolama faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) ile yapılmaktadır. Gizli ısı depolama (GID), bir depolama malzemesinin faz değişikliği sırasında ortaya çıkan ısıyı depolaması veya ortama salması mantığını esas alır [13].

Faz değişimi sırasında büyük hacim değişimi meydana gelir örneğin sıvı-sıvı, katı-gaz, katı-katı ve katı-sıvı faz geçişleri sırasında daha yüksek gizli ısı değeri ortaya çıkar bunun sonucunda da yüksek basınca dayanıklı kapların kullanılması gerekmektedir [6].

Faz dönüşümü katı-sıvı olan FDM'ler kullanılan gizli ısı depolama sistemlerinin, sıvı buhar ve katı-katı faz dönüşümlerine kıyasla çok daha verimli olduğu söylenebilir.

Gizli ısı depolama sistemleri (GID); duyulur ısı depolama sistemleri (DID) ile karşılaştırıldığında iki önemli avantaja sahiptir [6];

- Birim hacim ve birim kütle başına daha fazla enerji depolama kapasitesine sahiptirler
- Enerji depolama ve salıverme işlemleri sabit sıcaklıkta gerçekleşebilir.

Gizli ısı depolamanın duyulur ısı depolamaya kıyasla dezavantajları;

- Duyulur ısı depolama sistemlerine göre ısıнын depolanacağı malzemenin hacmi daha küçüktür.
- Enerji depolama sırasında FDM'nin sıcaklığı kısmen sabit kaldığından 'sabit sıcaklıkta enerjiyi depolama ve salıverme işlemleri için oldukça uygundur [3].

3. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (FDM)

Belli bir sıcaklık aralığında faz dönüşümü gösteren ve bu faz dönüşümü esnasında gizli ısı depolayabilen malzemelere faz değişim malzemeleri (FDM) denir.

Son zamanlarda, enerji tasarrufu ve sürdürülebilir altyapı için farklı alanlarda; ısıyı depolama, serbest bırakma ve ısı konforu artırma özelliklerinden dolayı FDM kullanımı hayati bir önem kazanmıştır. FDM'ler faz değişimi sırasında büyük miktarlarda gizli ısıyı tersinir olarak depolayan ve serbest bırakan fonksiyonel malzemelerdir.

FDM yüksek gizli ısılarının geçici ısı yükleri yönetmek için değerli bir özellik olması nedeniyle oldukça arzu edilen aday malzemeler olarak tanımlanmıştır [15]. Faz dönüşümü endotermik bir olay olduğundan ortam sıcaklığının artmasına bağlı olarak faz değişimine uğrayan FDM'ler ortamdaki ısı enerjisini depolarlar. Katı-katı FDM'ler genellikle düşük ısı enerji depolama yoğunluğuna ve yüksek faz değişim sıcaklığına sahiptir. Katı-sıvı FDM'lerin son yıllarda yaygın olarak kullanılmasının sebebi faz dönüşümü esnasında uygun faz değişim sıcaklığı ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesi göstermesidir [10].

FDM'ler inorganik, organik ve ötektik olmak üzere üç alt gruba ayrılır [16]. FDM'ler hem ısıtma hem de soğutma sistemlerinde kullanılabilir. Yapı malzemelerinde kullanılan FDM'ler organik FDM'ler olan; parafinler, yağ asitleri, ötektik karışımlar, yağ alkolleri ve inorganik FDM'lerdir [17]. Şekil 2'de gösterildiği gibi FDM'lerin çeşitliliği mevcuttur ve bunlar geniş erime/katılaşma noktalarına sahiptir. FDM'lerin yüksek gizli ısı depolama kapasitesi, küçük hacim değişikliği, toksik olmama, korozyon direnci ve düşük maliyet gibi avantajları bulunmaktadır [30]. FDM'lerin önemli dezavantajları; yapıcı kararsız olmaları, alt soğutma, düşük korozyon direncine ve düşük ısı iletkenliğe sahip olmalarıdır. Bu nedenle FDM'lerin büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda sınırlı kalmasına yol açmaktadır [38].

3.1. Faz Değişim Malzemelerinin Sınıflandırılması

Erime sıcaklığı aralığına göre FDM'ler üç alt kategoriye ayrılır, düşük sıcaklık FDM'leri, orta sıcaklık FDM'leri ve yüksek sıcaklık FDM'leri. Kimyasal kompozisyonlarına göre üç kategoriye ayrılırlar; organik FDM'ler, inorganik FDM'ler ve ötektik FDM'ler olarak ifade edilir. Ötektik FDM'ler organik ve inorganik FDM'lerin karışımıdır.

İnorganik FDM'lere su, tuzlar, tuz hidratlar ve metaller dahildir ki bu da yüksek ısı enerji depolama (IED) yoğunluğu ve nispeten yüksek ısıl iletkenlik gösterir. Ancak ciddi faz ayrılmaları ve aşırı soğuma olayı uygulama alanlarını daraltır.

Organik FDM'ler parafin mumlar, yağ asitleri ve polimerlerdir. Nispeten organik FDM'ler yüksek faz değişim entalpisi ve duyulur faz değişim sıcaklığı gösterir, faz ayrımları yoktur ve aşırı soğumaları düşüktür. Organik FDM'ler kolayca işlenebilirler, bol miktarlarda elde edilebilir ve nispeten ucuzdurlar. Bu yüzden organik FDM'ler pratik uygulamalarda çok yaygın kullanılırlar. Bununla birlikte, düşük ısıl iletkenlikleri (0.15-0.30 W/mK), ısının FDM'nin içine girmesini önleyen yetersiz ısı transferi ile sonuçlanacak ve böylece IED uygulamalarında etkinliklerini azaltacaktır. Ek olarak organik FDM'lerin sızıntı ve yanma gibi olumsuz yanları da vardır. Tablo 2'de IED Sistemlerinde kullanılacak FDM'lerde olması gereken özellikler verilmiştir. Bu malzemelerin kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılması Şekil 4'de verilmiştir. Malzemenin kullanılacağı sistem ve erime sıcaklıkları gibi parametreler kullanılacak FDM'yi belirler.



Şekil 4. FDM'lerin sınıflandırılması ve özellikleri [37].

FDM'ler faz dönüşüm özelliklerine göre de sınıflandırılmaktadır. Enerji depolama sisteminin özel koruyucu malzemelerden yapılmasının nedeni FDM'lerde büyük oranlardaki hacimsel değişimin sonucu olan madde kaybını azaltmaktır. Katı-katı FDM'lerin gizli ısısı düşük olduğundan kullanım açısından uygun değildir. Katı-sıvı FDM'lerin gizli ısısı yüksek olduğundan kullanılan sistem içerisinde hacim değişimleri kolaylıkla sağlanmaktadır.

Tablo 2. IED Sistemlerinde kullanılacak FDM'lerde olması gereken özellikler

Kinetik Özellikler	Aşırı soğuma göstermemeli Kristalleşme hızı yeterli
Kimyasal Özellikler	Kimyasal kararlılığın uzun olması Yapı malzemelerine uygunluk Toksik olmamalı Yanıcı olmamalı Kimyasal problem oluşturmamalı
Ekonomi	Böl bulunabilir olmalı Ucuz olmalı
Isıl Özellikler	Uygun faz dönüşüm sıcaklığı Yüksek erime gizli ısısı Yüksek ısı transfer hızı
Fiziksel Özellikler	Uygun faz dengesi Buhar basıncının düşük olması Hacim değişiminin düşük olması Yüksek yoğunluk

Yukarıdaki tabloda verilen özelliklerin hepsini bünyesinden barındıran tek bir FDM bulunmamaktadır. FDM'ler gizli ısı depolama sistemlerinde verimliliklerinin düşmesine neden olan bazı istenmeyen özelliklere sahiptirler. IED sisteminde düşük ısıl iletkenlik, yüksek yanıcılık, zayıf ısıl kararlılık, korozyon olma, aşırı soğuma, faz dönüşümü sırasında basınç/hacim değişiklikleri ve eriyen FDM'nin ısı enerji depolama sisteminden sızması gibi istenmeyen durumlar FDM'lerin ticari olarak uygulanabilirliğini engellemektedir.

Tablo 3'e göre daha fazla avantaja sahip olan organik FDM'lerin diğer FDM'lere kıyasla daha çok tercih edilir. Bununla birlikte FDM seçiminde dikkat edilmesi gereken birçok kriter mevcuttur

Tablo 3. FDM'lerin kıyaslanması [17].

FDM'ler	Avantajları	Dezavantajları
Organik FDM'ler	Isıl kararlılıkları iyi Aşırı soğuma olmadan donma Düşük buhar basıncı Düzenli eriyebilme Özgün çekirdekleşme özelliği Hacim değişiklikleri düşük Reaktif ve zehirli değil Çalışma alanı sıcaklığı geniş Geleneksel yapı malzemeleri ile uyumluluk	Sıvı FDM'nin sızıntı yapması Isıl iletkenliğin düşük olması Yanıcı olması
İnorganik FDM'ler	Gizli ısı depolama hacmi geniştir Yanıcı değildir Faz değişimi düzgündür	Aşırı soğumaya eğilimli olması Faz ayrışması Düzenli eriyememe Metallerle aşındırıcı olma
Ötektik FDM'ler	Keskin erime sıcaklıkları Özellikleri özel isteklere göre değiştirilebilir	Maliyetlidir

Bunlar; FDM'nin istenilen sıcaklık aralığında olması, birim hacim ya da kütle başına depoladığı faz değişim ısısının yüksek olması, yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması, düşük buhar basıncına sahip olması ve faz değişimi esnasında küçük hacim değişimi göstermesi ve düzenli erime-katılaşma davranışı göstermesidir [2]. Tablo 3'de belirtilen bu organik FDM'leri; parafinler, yağ asitleri, esterler ve alkoller oluşturmaktadır [24].

3.2. FDM Seçiminde Kullanılan Ölçütler

İnorganik veya organik bir malzemenin gizli ısı depolama özelliğinden faydalanabilmek için; erime sıcaklığı, zehirli olması, kimyasal stabilite, korozyon direnci ve yanma gibi özelliklerin dikkate alınması gerekir. 0-120 °C sıcaklık aralığında yüksek erime entalpisine sahip olan birçok inorganik ve organik malzeme ekonomik ve bol miktarda bulunuyor olması dikkat çeken bir diğer özelliktir.

Faz değişim malzemesinin gizli ısı depolama uygulamalarında kullanılabilmesi için ısı depolama/salıverme ve ısıl-fiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. FDM'lerde aranan özellikler aşağıda sıralanmıştır.

3.2.1. Termodinamik Ölçütler

- Uygun erime sıcaklığı.
- FDM kullanımını en aza indirerek yüksek miktarda enerji depolamak için birim kütle veya birim hacim başına yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olmalı.
- Duyulur ısı depolamanın yanında yüksek ısı depolama hacmine sahip olmalı.
- Faz ayrımı olmamalı.

3.2.2. Kinetik Ölçütler

- Katılaşma faz değişimi esnasında çok az aşırı soğuma veya hiç göstermemeli.

3.2.3. Kimyasal Ölçütler

- Kimyasal stabilite göstermeli.
- Erime ve katılaşma reaksiyonu tersinir olmalı.
- Birden fazla erime ve katılaşma reaksiyonundan sonra kimyasal bozunmaya uğramamalı.
- Depolandığı kaba korozyon etki göstermemeli.
- Patlayıcı, yanıcı ve zehirli olmamalı.

3.2.4. Ekonomik Ölçütler

- Çok miktarda ve kolay bulunabilmeli.
- Maliyeti düşük olmalı.

3.3. Organik Faz Değiştiren Malzemeler (OFDM)

Organik FDM'ler parafinler ve parafin olmayanlar (yağ asitleri, esterler, alkoller) olmak üzere ikiye ayrılır. Kimyasal kararlılık, aşırı soğuma göstermemeleri, korozyon olmamaları, yüksek gizli erime ısısının yanında düşük buhar basıncı göstermeleri, az veya hiç aşırı soğuma göstermemeleri organik FDM'lerin avantajı iken düşük ısı iletkenlik, faz dönüşümü sırasında büyük hacim değişikliği ve yanıcı olmaları ise dezavantajdır [36].

3.3.1. Parafinler

Gizli ısı depolama kapasiteleri yüksek, üstün faz değişim özellikleri olan, ısı ve kimyasal kararlılıklarıyla ilgi çeken parafin olan ve parafin olmayan olmak üzere iki çeşitten oluşan parafinler (Tablo 5)'de verilmiştir. Faz dönüşümü esnasında katı halden sıvı hale geçiş yapan bu malzemeler gösterdikleri büyük hacim değişimlerinden dolayı olası sızdırma sorununa sahiptirler ve ısı enerji depolama sistemlerinde doğrudan kullanılmaları risklidir. Bu risklerin ortadan kaldırılması için parafin olan veya olmayan malzemeler mikro/nano ya da makro boyutta kapsüllendirilerek ya da uygun gözenekli bir yapıda hapsedilmeleri sonucu kompozit FDM'ler üretilmektedir [34].

Saf parafinin ekonomik olmamasından dolayı onun yerine GID uygulamalarında tercih edilen parafin mumları düz zincirli n-alkanların bir karışımıdır. Doğal parafinler ve parafin mumları, pratik uygulama için saf alkanlara kıyasla değerli ürüne karşılık gelir. Parafinler büyük ölçekte üretilirler, nispeten ucuzdurlar ve yüksek füzyon ısısına sahiptirler [34].

Yukarıda belirtilen özelliklere sahip olan parafinler ısı enerji depolama da kullanılan faz değişim malzemelerinin gereksinimlerini karşılamaktadır [18]. Parafinlerin katı-sıvı FDM olarak yaygın bir şekilde kullanılmasının nedenleri; zehirli olmamaları, ekolojik olarak zararsız olmaları ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olmalarıdır.

Çeşitli FDM türleri arasında, genellikle 18-50 karbonlu bir zincirle karakterize edilen parafin mumu, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek faz değişim sıcaklığı aralığı, kimyasal kararlılık, ticari bulunabilirlik ve düşük maliyetli olması nedeniyle çok yaygın bir şekilde kullanılır [22].

Düşük ısı iletkenliğe sahip oldukları için geniş bir yüzey alanına ihtiyaç vardır parafin mumları orta derecede IED yoğunluğu gösterir ve bu da faz dönüşümü esnasında enerji depolama ve salıverme oranlarını azaltır.

Parafinlerin gizli ısı molar kütleyle dayalıdır ve çeşitli faz değişim sıcaklıkları, belirli bir GID uygulaması için uygun bir FDM seçme kolaylığı sağlar. Ekonomik olarak ucuzdurlar ve katı-sıvı geçişi boyunca tekrarlanan döngü, faz ayırımına neden olmaz [18].

Ham petrolün damıtılmasıyla üretilen ve farklı hidrokarbonların bir karışımı olan ticari sınıf parafin mumu olarak adlandırılır ve hidrokarbon zincirinin uzunluğu arttıkça füzyon ısı ve erime sıcaklığı da o kadar artmış olur [41].

Bu ilişki, fiziksel olarak farklı parafinleri karıştırarak yeni ve farklı özelliklere sahip FDM'lerin üretilmesinde kullanılabilir. Bununla birlikte, çoğu parafin FDM'leri, moleküllerinde farklı sayıda karbon atomuna sahip doymuş hidrokarbonların karışımlarıdır. Parafin mumları güvenlidir, reaktif değildir ve korozyona neden olmadıkları için metal kaplarla uyumludur. Parafinlerin en önemli sorunu ısı iletkenliklerinin gerekli ısı değişim oranını sağlamak için çok düşük olmasıdır [18].

Tablo 4'de yaygın olarak kullanılan parafinlerin entalpi değerleri ve erime sıcaklıkları verilmiştir. Tabloya göre parafinlerce içerilen karbon sayısı arttıkça gizli ısı değeri ve erime sıcaklığı da artış göstermektedir. Mumsu halde olan parafinler 15 üzeri karbon atomu içerirlerken, sıvı durumda olan parafinler 5 veya 15 karbon atomu içerirler.

Mumsu haldeki parafinlerin erime sıcaklıkları 23°C ve 67°C sıcaklık aralığında olup ekonomik, kolay erişilebilen, zehirli olmayan ve yüksek ısı enerji depolama kapasitesine sahip olmalarından dolayı tercih edilen OFDM'lerdir.

Tablo 4. FDM olarak kullanılan parafinler [18].

Parafin	Karbon Sayısı	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Yoğunluk (g/cm)
Tetradekan	14	5,8-6,0	228	-
Pentadekan	15	9,9-10,0	206	-
Hekzadekan	16	18,0-20,0	225	0,773
Heptadekan	17	22-22,6	160-215	0,778
Oktadekan	18	28.0-28,4	200-250	0,776
Nonadekan	19	32,0	220	0,785

Tablo 5. Parafin ve parafin olmayan FDM'lerin özellikleri [19].

Malzemeler	Avantajlar	Dezavantajlar
Parafin Malzemeler	Tehlikesiz çalışma Henüz kullanım sırasında sonuç öngörme Maliyeti uygun Aşındırıcı olmama Düşük buhar basıncı Kimyasal kararlılık Faz ayrımı yok Kolay elde edilebilir	Düşük ısı iletkenlik Plastik saklama kapları ile uyumsuz Orta derecede yanıcı Sabit erime sıcaklığı yoktur
Parafin Olmayan Malzemeler	Isıl kararlılık Kimyasal kararlılık Korozyon olmama Zehirli değildir Kolay elde edilebilir Aşırı soğuması yoktur Dar sıcaklık aralığında çalışma	Yanıcıdır Erime ısısı düşük Isıl iletkenliği düşük Yanma noktası düşük Zehirlidir

3.3.2. Parafin Olmayan OFDM'ler

Parafin olmayan OFDM'ler; yağ asidi esterleri, alkoller, yağ asitleri ve glikollerden oluşmakta olup GID için en geniş kullanım alanına sahip malzemelerdir. En önemli avantajları yanıcı olmamalarıdır. Isıl iletkenlikleri düşüktür fakat erime ısıları nispeten yüksektir.

3.3.3. Yağ Asitleri

Kimyasal formülleri olan ve parafinlerle benzer özelliklere sahip olan organik FDM'lerdir. Sıvı ya da katı halde bulunabilen yağ asitleri molekülleri bir ucunda metil grubu bir ucunda ise karboksil grubu bulunduran OFDM'lerdir. Oda sıcaklığında sıvı halde bulunan yağ asitleri hidrokarbon zincirindeki karbon sayısı düşük olanlardır ve karbon sayısının artmasıyla viskozitelerinde artış görülürken hidrokarbon zincirinde karbon sayısı yüksek olan yağ asitleri ise oda sıcaklığında katı haldedirler [16, 19].

Faz değişim malzemesi olarak kullanıldıklarında yüksek yüzey geriliminden yararlanılan sıvı haldeki yağ asitleri suda çözündüklerinden dolayı bir absorban maddeye tutunarak kullanılmaları mümkündür. Katı durumdaki yağ alkolleri ve yağ asitlerinin birçoğu suda çözünmedikleri için yapı malzemelerine ilave edilerek enerji depolama maksadıyla yaygın bir şekilde kullanılırlar. Stearik, laurik, miristik ve palmitik asitin kullanılmasıyla fazla sayıda FDM uygulamasının yapılması, bu malzemeler hakkında fazlaca bilgi edinilmesini sağlar. Yağ asitlerinin erime ve katılaşma sıcaklıkları yaklaşık 0°C-80°C arasında değişmektedir. Alkil zincirinde bulunan karbon atomu sayısının artmasına bağlı olarak yağ asitlerinin erime/katılaşma sıcaklık değerleri de artış göstermektedir [16, 19]. Tablo 6'da organik FDM olarak kullanılan bazı yağ asitlerinin ısı özellikleri verilmiştir.

Yüksek gizli ısı kapasitesi, enerjiyi hapsetme ve serbest bırakma sırasında sabit sıcaklık özelliği ve ucuz olmaları sebebiyle yağ asitleri sıklıkla tercih edilmektedir [16, 19].

Tablo 6. Yaygın olarak kullanılan yağ asitlerinin ısı özellikleri

Malzemeler	Erime Sıcaklığı (°C)	Gizli Isısı (kJ/kg)	Isıl İletkenlik (W/mK)
Laurik asit	44	178	0.147
Kaprik asit	32	153	0.153
Stearik asit	69	202	0.172
Palmitik asit	64	185	0.162

Yağ asitlerinden elde edilecek olan FDM karışımlarının yağ asitleri gibi diğer FDM'lere oranla daha üstün bazı fiziksel, kimyasal ve ısı özellikler göstermesi beklendiğinden dolayı yağ asiti ötektik karışımları çok fazla çalışılmakta ve literatürde önemli yer kapsamaktadır. Bazı yağ asidi ötektik karışımlarının ısı özellikleri Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7. Bazı yağ asidi ötektiklerinin ısı özellikleri

Yağ asidi karışımı	Ağırlıkça oran (%)	Erime sıcaklığı (°C)	Gizli ısı (J/g)
Miristik asit-Palmitik asit	51.0-49.0	39.8	174.0
Miristik asit-stearik asit	65.7-34.3	44.2	181.0
Palmitik asit-Stearik asit	64.9-35.1	50.4	179.0
Laurik asit-stearik asit	75.5-24.5	37.3	171.0
Laurik asit-palmitik asit	64.0-36.0	32.8	165.0
Laurik asit-miristik asit	62.6-37.4	32.6	156.0
Kaprik asit-stearik asit	86.6-13.4	26.8	160.0
Kaprik asit-palmitik asit	75.2-24.8	22.1	152.0
Kaprik asit-miristik asit	73.5-26.5	21.4	152.0
Kaprik asit-laurik asit	61.5-38.5	19.1	132.0

3.3.4. Esterler

OFDM'ler arasında oldukça yeni bir malzeme grubu olan yağ asidi esterlerinin literatüre bakıldığında kısıtlı ısı özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Esterler alkoller ile tepkimeye tabi tutularak yağ asitlerinin aşındırıcı özelliklerini hafifletmek amacıyla çeşitli yağ asidi ester grupları elde edilir.

Stearik asit ve palmitik asit gibi kısa zincirli yağ asidi esterleri ısı enerji depolama maksadıyla kullanılmaktadır. Benzer faz dönüşümlerine ve gizli ısı depolama özelliklerine sahip olan, yağ asitleriyle benzerlik gösteren, dar bir sıcaklık aralığında katı-sıvı faz dönüşümü sergileyen ve yaygın bir şekilde kullanılan yağ asidi esterleri ötektik karışımlardan oluşmaktadır (Tablo 8). Oda sıcaklığına yakın faz dönüşüm sıcaklığına, yüksek faz değişim entalpisine ve düşük aşırı soğuma derecesine sahip yağ asidi esterlerinin ötektik karışımları metil stearat-setil palmitat, metil stearat-metil palmitat, ve metil stearat-setil stearat olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Tablo 8. Yağ asidi esterlerinin ısı özellikleri

Yağ Asidi Esteri	Kimyasal Formül	Erime Sıcaklığı (°C)	Gizli Isısı (J/g)
Gliserol trimiristat	$C_{45}H_{86}O_6$	32.0	154.3
Eritritol tetrapalmitat	$C_{68}H_{130}O_4$	21.9	201.1
Galaktitol hegzapalmitat	$C_{102}H_{212}O_6$	47.8	251.1
Tetradecil tridekanoat	$C_{14}H_{29}COOC_{12}H_{25}$	40.0	207.9
Tetradecil heptadekanoat	$C_{14}H_{29}COOC_{16}H_{33}$	46.7	217.2
Tetradecil oktadekanoat (miristil stearat)	$C_{14}H_{29}COOC_{17}H_{35}$	49.6	221.8
Gliserol tristearat	$C_{57}H_{110}O_6$	63.5	149.4

3.3.5. Polietilen Glikoller (PEG)

OFDM'ler arasında, PEG'lerin en önemli avantajı zehir olmamalarıdır ve bu nedenle biyolojik süreçlerde kullanılmışlardır. Organik FDM'ler kararsız bir şekilde erirler ve yüksek

gizli ısıya sahiptirler [27]. Ancak, PEG'in düşük termal iletkenlik ve kolay akıcılık gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır [31].

PEG, hidroksil (-OH) ile sonlanan ve -CH₂-CH₂-O- tekrar eden birimine sahip önemli bir yarı kristaldir. Sulu boyalarda, tekstil liflerinde, kâğıt kaplamalarda, ambalaj malzemelerinin bir bileşeni olarak ve ilaçlarda bir çözücü madde olarak kullanılır. PEG'in kullanımı için ısı depolama nispeten yeni bir uygulama alanıdır. Polietilen glikol (PEG), gizli ısı depolamada katı-sıvı faz geçişinde organik FDM olarak kullanılır. Ancak, gizli ısı depolama için PEG'in katı-sıvı faz değişimi yerine katı-katı faz değişimi daha avantajlıdır [28].

Moleküler ağırlık, PEG'in ısı depolamada kullanılabilmesi için önemli bir konudur. Tablo 9 çeşitli moleküler ağırlıklara sahip PEG için sıcaklık ve füzyon değerleri verilmiştir. Füzyon ısısı 117-174 J/g aralığında olan PEG'in erime noktası moleküler ağırlığa göre değişim göstermekte olup 4 ile 70°C arasında değişebilir

PEG'in faz geçiş ısısındaki artış moleküler ağırlığındaki artış ile doğru orantılıdır. Moleküler ağırlık ayrıca %83.8 ila %96.4 arasında değişen kristallik derecesini de etkiler [18].

Tablo 9. Çeşitli moleküler ağırlıklara sahip PEG için sıcaklık ve füzyon ısıları [18].

Polimer	Erime Sıcaklığı (°C)	Füzyon ısısı (J/g)
PEG 400	4.2	117.6
PEG 600	12.5	129.1
PEG 1000	40.0	168.6
PEG 3400	63.4	166.8
PEG 10000	65.9	171.6
PEG 20000	67.7	160.2
PEG 35000	68.7	166.9
PEG 100000	67.0	175.8

4. Yapıca Kararlı Kompozit Faz Değişim Malzemeleri (YK-KFDM)

Yapıca kararlı kompozit FDM'ler (YK-KFDM'ler), temel olarak bir FDM, fiziksel ve kimyasal olarak kararlı bir destek malzemesinden ibarettirler (Şekil 4). Bu tür malzemeler, pratikte erimiş FDM'lerin kapiler kuvvet nedeniyle matrisin katı yapısında tutunabileceği için katı-katı FDM gibi davranır. Saf FDM'ye kıyasla YK-KFDM'nin avantajları şunlardır:

- Yapıca kararlı olması nedeniyle FDM'ler ve ısı transfer akışkanları arasında doğrudan teması sağlayarak ısı transfer verimliliğini artırılabilir.
- FDM'nin çevre ile olan ilişkisini kestiği için korozyon sorununu azaltabilir.
- Karbon ve metal matrisler, enerji depolaması ve salınımı verimine katkıda bulunacak bir ısı iletim yolu oluşturabilirler.
- FDM sınırlı bir şekilde matris yapısına gömülü ve homojen bir şekilde dağıldığı için faz ayrımı sorunu azalır.

FDM için tutma matrisinin yüzeyi potansiyel olarak bazı çekirdek oluşum alanları sağladığından bazı durumlarda aşırı soğuma sorunu engellenebilir [34].



Şekil 5. YK-KFDM'lerin bileşenleri ve avantajları [21].

4.1. YK-KFDM'lerin Sınıflandırılması

YK-KFDM'ler, matrislere göre dört gruba ayrılabilir; seramik, karbon, metal ve polimer matris tabanlı YK-KFDM'ler. Şekil 5 farklı türdeki YK-KFDM 'lerin özelliklerini göstermektedir. Seramik matris, mükemmel kimyasal ve ısı kararlılık sağlar ve tüm matrisler arasında en yüksek çalışma sıcaklığına sahiptir. Ayrıca, FDM'ler ıslanabilirlikleri nedeniyle iyi bir emme yeteneği gösterirler. Karbon ve metal matrisler ısı iletkenlik açısından üstün olup bu nedenle ısı iletkenliği artırmak için yaygın olarak kullanılırlar [34]. Metal matris ayrıca yüksek mekanik dayanıklılık sağlar, ancak yüksek maliyet ve tuz esaslı FDM'lerle potansiyel korozyon sorunu gibi sınırlamaları vardır. Karbon matrisi çeşitli allotropik yapıları içerir, bu da FDM'lerle alternatif olasılıklar ve kombinasyonlar ortaya çıkarır.

Bununla birlikte, bazı nano boyutlu karbon malzemeler oldukça maliyetlidir, bu nedenle büyük ölçekli uygulamalar için uygun değildir. Ayrıca, karbon matrisleri ile FDM'ler arasındaki ıslanma davranışının bilinmesi gereklidir, çünkü bu FDM sızıtısına yol açabilir. Polimer matrisi, tüm matrisler arasında en düşük ısı kararlılığına sahip olmasına rağmen; ucuz, dayanıklı ve kolay işlenebilir özelliklere sahiptir. Polimerlerin düşük iletkenlik ve yüksek yanıcılık gibi dezavantajları vardır. Bu nedenle, polimer matrislere ısı iletkenlik artırıcı ve yanmazlık maddeleri gibi katkı maddeleri ilave edilir.

	Polimer Matris	Karbon Matris	Metal Matris	Seramik Matris
	✓ Kimyasal Kararlılık ✓ Düşük Fiyat ✓ Dayanıklılık	✓ Yüksek Isıl İletkenlik ✓ İyi kimyasal Kararlılık ✓ Çeşitli boyut ve geometriler	✓ Yüksek Isıl İletkenlik ✓ Yüksek Porozite ✓ Yüksek Isıl Kararlılık ✓ İyi Mekanik Özellikler	✓ Yüksek Kimyasal Kararlılık ✓ İyi Isıl Kararlılık ✓ Düşük Fiyat ve Bol Kaynak ✓ Yüksek Absorplama
	x Düşük Isıl İletkenlik x Yanıcı Olma	x Nano boyuttaki karbon matrisler için yüksek fiyat	x Yüksek Fiyat x Korozyon Olma	x Yetersiz Isıl Kararlılık
	$T_{Max}: \sim 400^{\circ}C$	$T_{Max}: \sim 600^{\circ}C$	$T_{Max}: \sim 800^{\circ}C$	$T_{Max}: \sim 1000^{\circ}C$

Şekil 6. Farklı matrislerin özellikleri [21].

4.1.1. Seramik Esaslı YK-KFDM'ler

Yapısal malzemeler olan seramikler, iyi kimyasal uyumluluk, ısı kararlılık ve orta düzeyde emme yeteneği gibi avantajlara sahiptirler. Seramik malzemelerin kaynakları bol olduğundan, fiyatları genellikle rekabetçidir. Gözenekli ve gözeneksiz seramik malzemeler olarak ikiye ayrılırlar. Gözenekli seramik malzemeler, yüksek özel yüzey alanlarına sahip olduklarından istenen emme yeteneğini gösterirler [34]. Bu tür malzemeler arasında diatomit (özel yüzey alanı: $\sim 1717,11\text{--}4251\text{ m}^2/\text{g}$), vermikülit ($\sim 672\text{ m}^2/\text{g}$), sepiyolit ($\sim 900\text{ m}^2/\text{g}$), ve genişletilmiş perlit yer alır. Bu gözenekli seramik malzemelerin organik ve inorganik FDM'lerle emdirilmesine yönelik geniş çaplı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, matrisin gözenekli yapısının ve/veya parçacık aralıklarının kapiler kuvvetlerle erimiş FDM'yi sızdırmadan tutabilme özelliğini kanıtlamıştır (Şekil 6).

Oya ve ark., (2012); tarafından yapılan bir çalışmada, %83 ağırlıkça eritritolün sızıntı olmadan genişletilmiş perlit içinde tutulabileceği gösterilmiştir [39].

Qin ve ark., (2014); çalışma sıcaklığı $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar olan mükemmel bir yüksek sıcaklıkta diatomit/ Na_2SO_4 YK-KFDM formüle etmiştir [40-42]. Bu YK-KFDM, sızıntı olmadan %55 FDM içerir ve çalışma sıcaklık aralığı $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında olan 360 kJ/kg 'ye kadar yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptir. MgO , SiO_2 ve Kaolin gibi gözeneksiz seramik malzemeler de yapısal matris olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu gözeneksiz malzemeler FDM'yi çoğunlukla parçacık aralıklarındaki boşluklarda tutarlar.

Ge ve ark., (2014); $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3/\text{MgO}$ /grafit kompozit FDM'nin %50 tuz içeriğiyle kararlı bir YK-KFDM oluşturduğunu göstermiştir [43].

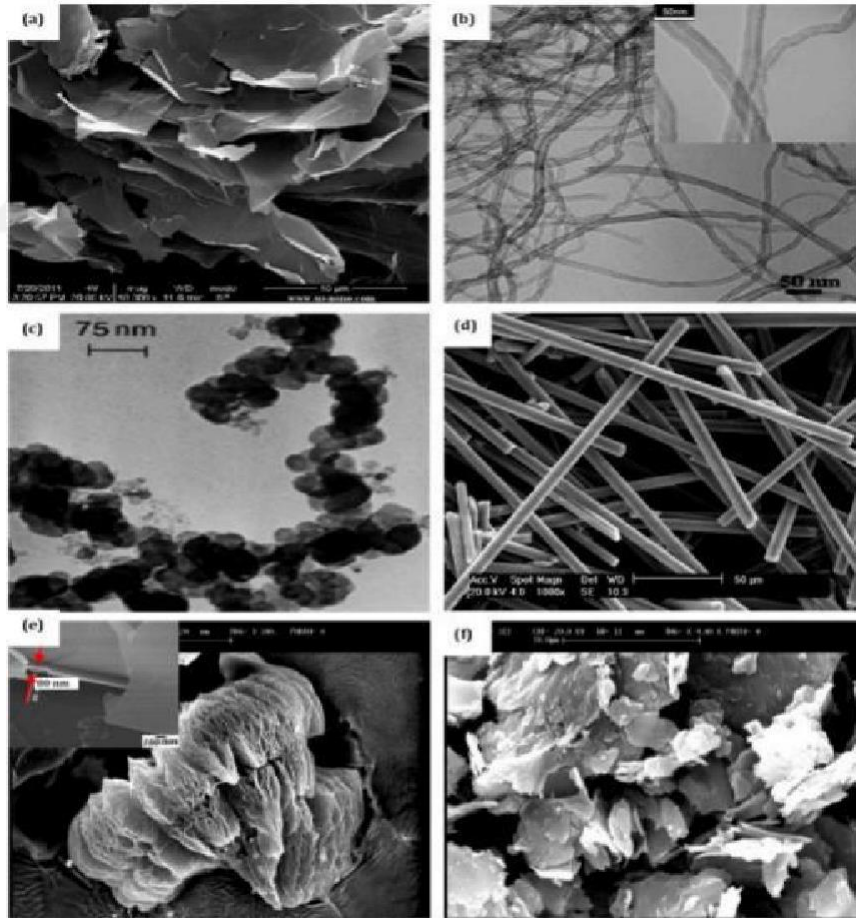
Lv ve ark., (2017); seramik malzemelerin nitratlar, karbonatlar, sülfatlar gibi yüksek sıcaklıkta tuz esaslı FDM'lerle (genellikle birçok metal yapı malzemesi için korozyona neden olan) büyük uyumluluk gösterdiğini tespit etmişlerdir [44].

Qian ve ark., (2016); diatomitin gözenek yapısını değiştirmek için kalsinasyon, asit işlemi, alkali çözeltiyle yıkama ve nano-silika dekorasyon yöntemlerini kullandılar. Sonuçlar, %5 NaOH ile alkali yıkamanın en etkili yöntem olduğunu gösterdi ve gözenek hacminin 0.0241 mL/g 'den 0.0718 mL/g 'ye kadar artış sağladığını göstermiştir [45].

Jiang ve ark., (2019); CaCO_3 eklenmesi sonucu diatomitin porozitesinin %67.53 oranında arttığını ve gözenek boyutunun $\sim 0.7 \mu\text{m}$ 'den $\sim 26.6 \mu\text{m}$ 'ye kadar genişlediğini rapor etmişlerdir [46].

4.1.2. Karbon Esaslı YK-KFDM'ler

Karbon esaslı malzemeler yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle, parafinler, yağ asitleri gibi ısı iletkenlikleri zayıf olan FDM'ler için mükemmel bir matris oluşturlar. Karbon esaslı malzemeler, karbon nanotüpler (KNT'ler), karbon nanofiberler (KNF'ler), grafit nanotabakalar (GNT'ler), grafit oksit ve genişletilmiş grafit gibi, organik FDM'lerin ısı iletkenliğini artırmak için kullanılırlar [33]. Karbon matrisleri iki kategoriye ayrılmaktadır; (a) mikro boyutlu karbon matrisleri; örneğin genişletilmiş grafit (EG), karbon siyahı, grafit pulları, karbon fiberler; (b) nano boyutlu karbon matrisleri; örneğin tek/çok duvarlı karbon nanotüpler, grafit, ve grafit nano tabakalar (GnT'ler) olarak sıralanır.



Şekil 7. Farklı türdeki karbon malzemelerinin SEM görüntüleri a) grafit, b) karbon nanotüp, c) karbon siyahı, d) karbon fiber, e) genişletilmiş grafit ve f) grafit [24].

Chavan ve ark., (2018) karbon nanotüplerinin FDM'lerin ısı transfer performansına etkileri üzerine yapılan son makaleleri ve patentleri gözden geçirmiştir [47]. Bu farklı şekiller geometrilerine bağlı olarak FDM'lerle alternatif olasılıklar ve kombinasyonlar ortaya çıkarabilir ve ısı transferine katkıda bulunurlar. Örneğin, solucan benzeri bir yapıya sahip EG etkili bir ısı transfer ağı oluşturabilir, çok duvarlı karbon nanotüp' n (MWCNT) t p yapısı bir ısı transfer kanalı oluşturmaya ve aşırı yüksek yönlendirilmiş ısı iletkenliğe katkıda bulunurken, küresel şekli ile yüksek bir yüzey alanı sunar [29].

Gilart ve ark., (2012); parafine %25 ağırlıkça EG katılmasıyla ısı iletkenliğinin %576 oranında arttırırken aynı miktarda MWCNT'lerle karşılaştırıldığında %41 oranında daha fazla arttırdığını rapor etmişlerdir [48].

Harish ve ark., (2017); tek duvarlı karbon nanotüplerin (SWCNT), MWCNT'lerin ve grafen nano tabakaların (GnT) laurik asit üzerindeki ısı iletkenlik artışını ayrı ayrı karşılaştırmışlardır. GnT'nin %1 hacimce kullanılması, diğer katkı maddeleri kullanımına kıyasla en yüksek ısı iletkenlik artışını (%223) sağladığını ve bunun göreceli olarak düşük arayüzey ısı direnci ve yüksek en-boy oranından kaynaklandığını belirlemişlerdir [49].

Benzer bir sonuç Cui ve ark., (2014); tarafından da elde edilmiştir. Katkı maddesi miktarının daha da artması nanopartiküllerin bir araya gelmesinden dolayı ısı iletkenliğin nano boyutlu karbon katkılarının miktarının artmasıyla düzenli olarak artmadığını göstermişlerdir [50].

Tao ve ark., (2015); dört karbon nano malzemenin (SWCNT, MWCNT, grafen tabakası ve C60) inorganik bir FDM'nin ısı iletkenliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir ve kullanılan KNT'lerin ve grafenin ısı iletkenliğinin katkı maddesi yüzdesinin %1.5 oranında arttırılmasıyla ısı iletkenliğin arttığını ancak daha yüksek oranlarda azalmaya başladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, ısı iletkenliğin artışının parçacık boyutuna bağlı olduğunu bulmuşlardır [51]. Xiang ve ark., (2011); 15  m boyutundaki grafen nano tabakalarının, 1  m boyutundakilerden daha yüksek bir ısı iletkenlik artışına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedenini, daha büyük karbon parçacıklarının arasında daha az parçacık teması ve buna bağlı arayüzey ısı transfer direncinin oluşması olarak yorumlamışlardır [52].

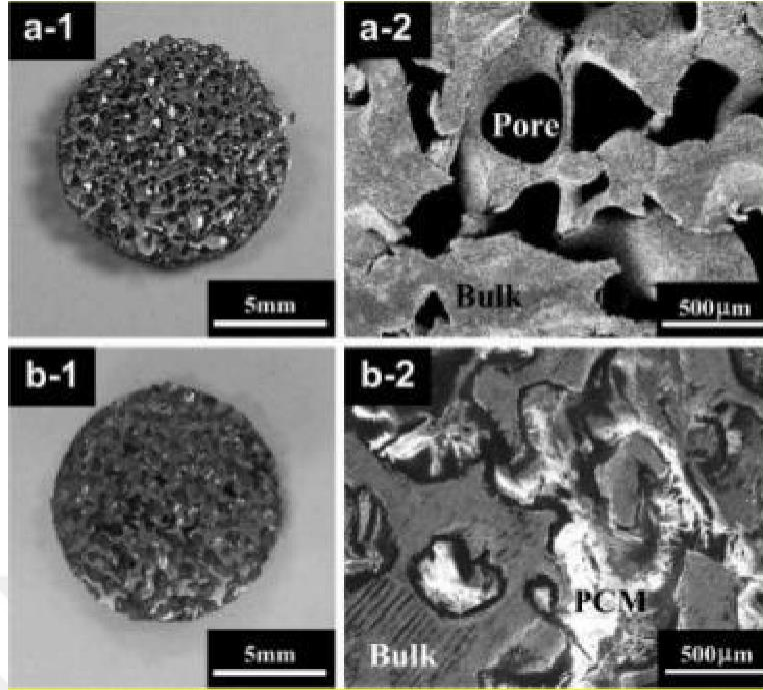
Küçük boyutlu karbon malzeme daha yüksek bir yüzey alanı sunmasına rağmen, küçük parçacık boyutu nedeniyle arayüzey iletkenlik direnci, bu tür bir malzemenin kullanımının avantajlarını azaltabilir. Farklı karbon allotropları arasında, EG yüksek gözenekli yapısı ve mükemmel ısı iletkenliği nedeniyle en çok tercih edilen karbon matrislerinden biridir [26]. Zhang ve ark., (2015); %80 RT100 (parafin) emdirilmiş EG'nin 6.8 W/mK kadar yüksek bir ısı iletkenlik gösterdiğini ve 200 ısı döngüden sonra sızıntı olmaksızın iyi bir yapısal kararlılığa sahip olduğunu tespit etmişlerdir [53].

Wu ve ark., (2015); EG'nin gözenekliliğinin ~2 nm~100 µm aralığındaki hiyerarşik gözenek boyutu dağılımına bağlı olarak %92.78'e kadar yükseldiğini bildirdi. EG'yi FDM olarak Na₂SO₄·10H₂O ile birleştirdi ve EG'nin hem ısı iletkenliği 3.643 W/mK'ye kadar yükselttiğini hem de Na₂SO₄·10H₂O 'nun faz ayrımı ve aşırı soğuma sorununu önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuşlardır [54].

4.1.3. Metal Esaslı YK-KFDM'ler

Metal köpüklerin ısıyı iletme için sürekli bir iskelet yapısına sahip olması, yüksek miktarda FDM içerebilmesi ve bunlara ek olarak büyük mekanik dayanıklılık ve ısı kararlılık sağlaması nedeniyle oldukça önemli bir matristir. Ancak, metal köpüklerin yüksek fiyatı ve bazı FDM'lerle potansiyel korozyon sorunu gibi nedenler bu matrislerin kullanımını sınırlandırır. Yaygın olarak kullanılan metal köpükler bakır köpük, nikel köpük, alüminyum köpük ve paslanmaz çelik köpüklerdir. Bunlar arasında bakır köpük en yüksek ısı iletkenliği 380 W/mK sağlar ve onu alüminyum köpük 240 W/mK takip eder. Porozite ve gözenek boyutu metal köpüklerin önemli parametreleridir. Metal matrislerin ayrıca tüp, düzlem, küresel ve çeşitli geometrileri de mevcuttur (Şekil 8).

Zhang ve ark., (2016); FDM'leri emdirme amacıyla kullanılan metal köpükleri incelemiş ve genellikle %85-%98 arasında bir porozite ve 0.1-5 mm arasında bir gözenek boyutuna sahip olduğunu bulmuşlardır. Metal köpüğün porozitesinin YK-KFDM'lerin genel ısı iletkenliğini etkilediğini, daha düşük bir porozitenin daha iyi bir ısı transferi sağladığını ancak emdirilen FDM oranını ve dolayısıyla gizli ısıyı etkilediğini belirlemişlerdir. Gözenek boyutunun ısı iletkenlik üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve henüz bir uzlaşmaya varılmamıştır [55].



Şekil 8. (a) Nikel köpük ve (b) eritritol-nikel köpük YK-KFDM'nin resimleri ve SEM görüntüleri

Oya ve ark., (2012); eritritol-nikel köpük YK-KFDM'yi incelemiş ve gözenek boyutunun artışının metal iskeletin daha iyi bağlantılı olmasına ve dolayısıyla daha yüksek bir ısı iletkenliğe katkıda bulunduğunu bulmuşlardır [56].

Bununla birlikte, Huang ve ark., (2017); gözenek boyutunun hem nikel hem de bakır köpük tabanlı YK-KFDM'ler için ısı iletkenlikte azalan gözenek boyutunun daha yüksek bir iyileştirme sağladığını göstermişlerdir. Bu nedenle, YK-KFDM'nin ısı iletkenliği üzerinde gözenek boyutunun etkisi daha fazla araştırma gerektirmektedir. Ancak, farklı gözenek boyutları farklı miktarda FDM hapsedilmesine neden olabilir. Eğer metal köpüğün gözenek boyutu yeterince küçük değilse oluşan kapiller kuvvet sıvı FDM sızıntısını önlemek için yeterli olmayabilir. Bu nedenle, büyük gözenek boyutuna sahip metal köpükler için ek bir hapsedme yöntemi gereklidir [57].

4.1.4. Polimer Esaslı YK-KFDM'ler

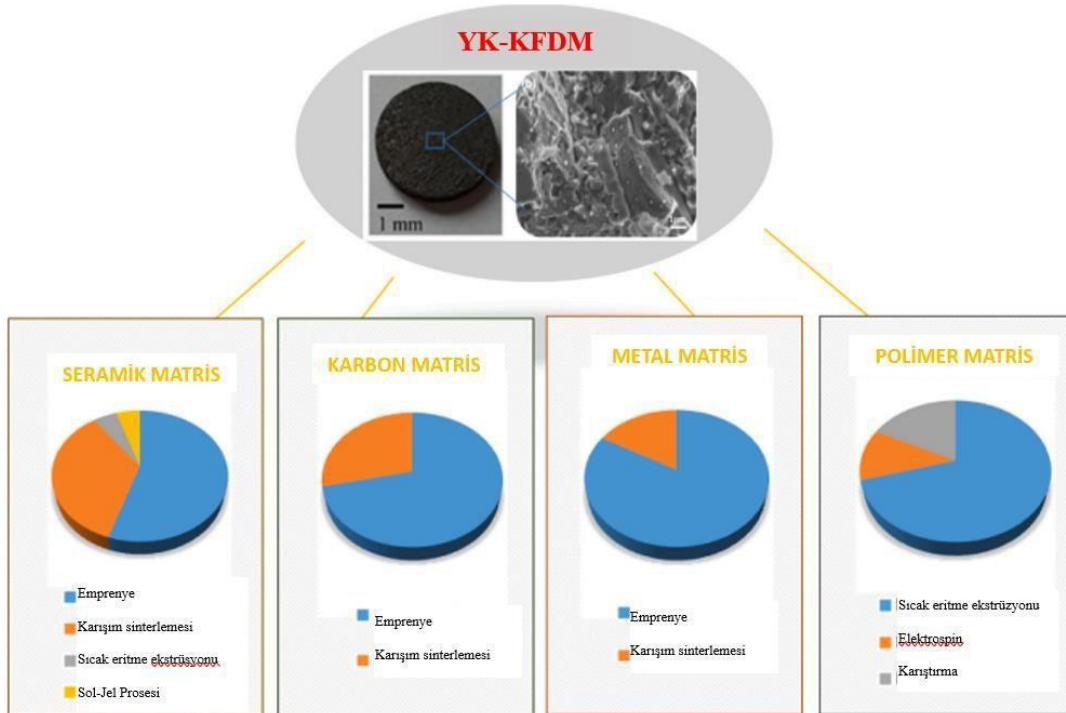
Yüksek yoğunluklu ve düşük yoğunluklu polietilen (HDPE ve LDPE) gibi polimerler; düşük maliyet, iyi kimyasal kararlılık ve dayanıklılık gibi avantajlara sahiptir. Bu tür polimer matrislerin çalışma sıcaklığıyla ilgili sınırlamalar olduğundan, genellikle fiziksel karıştırma ve/veya kimyasal çapraz bağlama yoluyla düşük veya orta sıcaklıkta çalışan FDM'lerle birlikte kullanılırlar [23].

Bazı polimerlerin yanıcı olması nedeniyle yanma direncini azaltmak için alev geciktiriciler (magnezyum hidroksit ve mikroenkapsüle kırmızı fosfor gibi) genellikle katkı maddeleri bu tip polimerlere ilave edilir. Kaygusuz ve ark., (2017) ve Sarı, A., (2004); eriyik halde %76 oranında parafin içeren parafin/HDPE/grafit YK-KFDM hazırlamışlardır [58-59]. Ayrıca bu çalışmalarda ısıl iletkenlik artırıcı olarak genişletilmiş grafit eklenerek, ısıl iletkenlik sırasıyla %33.3 ve %52.3 olarak artırılmıştır.

Chen ve ark., (2014); parafin ve HDPE, LDPE, LLDPE gibi polimerler arasındaki kısmi karışabilirliğin sınırlı olmasından dolayı parafinin kristallik derecesinde önemli bir azalma ve dolayısıyla gizli ısıda bir gerçekleşmiştir [60]. Parafinin HDPE'ye nispeten LDPE ile daha az karıştığı ve bu durumun HDPE tabanlı YK-KFDM'nin gizli ısısının en yüksek değeri gösterdiği sonucuna varmışlardır.

4.2. Yapıca Kararlı Kompozit FDM'lerin Üretim Yöntemleri

Kullanılan ana matris malzemenin türüne göre YK-KFDM'lerin üretim yöntemi değişiklik gösterebilmektedir. Şekil 10'da ana matris malzeme olarak seramik, karbon, metal köpük ve polimer gibi malzemelere FDM farklı yöntemlerle hapsedildiğini göstermektedir.



Şekil 9. Farklı YK-KFDM'lerin üretim yöntemleri [21].

Tablo 10’da ise FDM’lerin ana matrise farklı yöntemlerle hapsedilmesine dair avantaj ve dezavantaj özellikler sunulmaktadır. Şekil 11’de ise farklı FDM’lerin ana matrise farklı emdirme yöntemlerine ait avantaj ve dezavantaj özellikler görülmektedir.

Tablo 10. YK-KFDM'lerin üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Emprenye	Oda sıcaklığı/düşük sıcaklık işlemi; FDM’nin nispeten yüksek oranı.	Yüksek sıcaklık FDM için zorlayıcı; işlemde ekstra adımlar gerektirir.
Karışım sinterleme	Ekstra adım gerekmez; basit ve ölçeklenebilir; şekillerden arınmış.	Yüksek sıcaklık gerekli; uzun hazırlık süresi (sinterleme zaman)
Sıcak eritme ekstrüzyon	Geniş kapsamlı üretim; kontrol edilebilir; düşük işgücü maliyeti.	Tüm matrisler için uygun değildir; ekstrüzyon sırasında sızıntı; olası agrega oluşumu
Sol-jel prosesi	Kararlı yapı; düşük sızıntı.	Karmaşık; yüzey aktif maddelere ihtiyaç duyar
Elektrospin	Kararlı fibril yapı.	Karmaşık cihazlar; yüksek fiyat; düşük FDM oranı

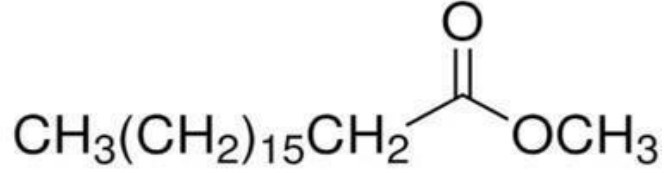


Şekil 10. Farklı emprenye yöntemlerinin oranları [21].

5. DENEYSEL

5.1. Kullanılan Kimyasal Malzemeler

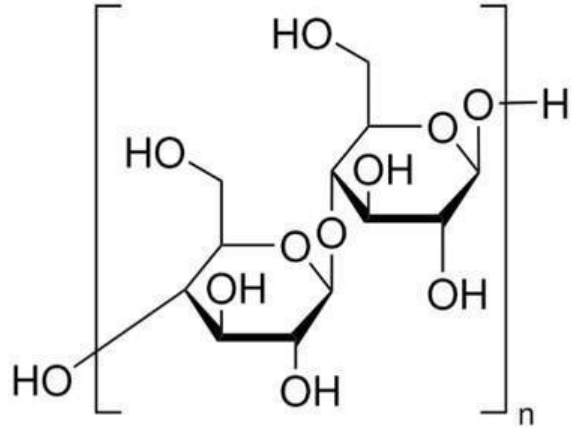
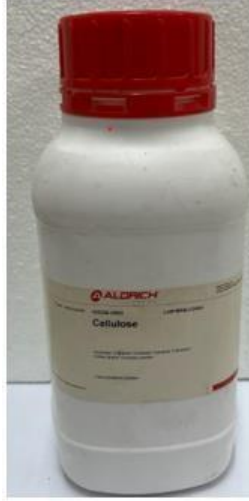
YK-KFDM olarak kullanılacak olan MCS/MtS/GnT kompozitlerinin hazırlanması sırasında uygulanan deneysel çalışmalarda FDM olarak metil sterat (MtS) (Şekil 11), destek malzemesi olarak mikro kristalin selülöz (MCS) (Şekil 12) ve grafen nanotabaka (GnT) (Şekil 13) kullanıldı. Deneyde kullanılan MtS ve MCS Aldrich, destek malzemesi olarak kullanılan GnT ise Nanografi Nano Technology şirketinden temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin teknik özellikleri sırasıyla Tablo 11, Tablo 12 ve Tablo 13’de verilmiştir.



Şekil 11. Kullanılan MtS ve kimyasal formülü

Tablo 11. Bu çalışmada kullanılan MCS’nin teknik özellikleri

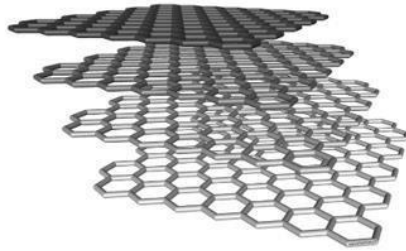
Malzeme	Kimyasal Formül	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Yoğunluk (g/cm ³)
Metil Stearat (MtS)	C ₁₈ H ₃₈ O ₂	~35 °C	~266	0.84



Şekil 12. Kullanılan MCS ve kimyasal fomülü

Tablo 12. Bu çalışmada kullanılan MCS'nin teknik özellikleri

Malzeme	Kimyasal Formül	Erime Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)
Mikro Kristal Selülöz (MCS)	C ₁₄ H ₂₆ O ₁₁	~78 °C	1.76



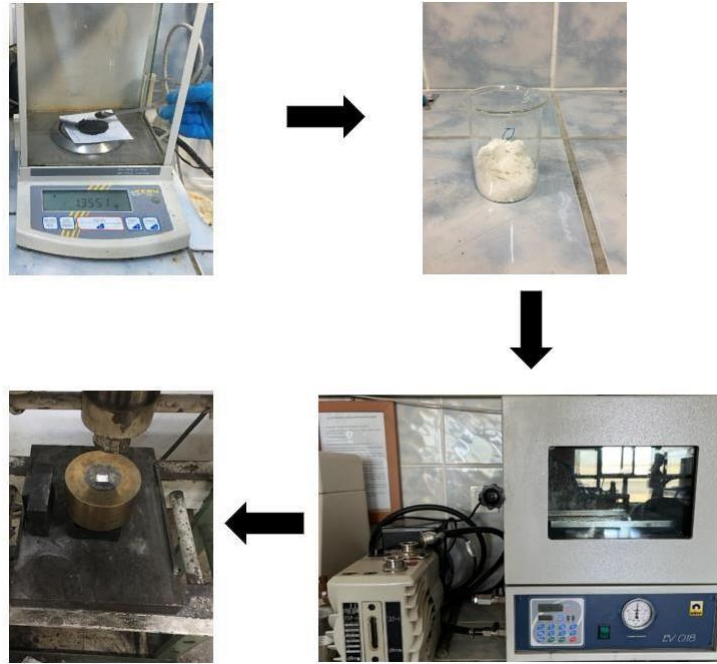
Şekil 13. Kullanılan GnT ve kimyasal yapısı

Tablo 13. Bu çalışmada kullanılan GnT'nin teknik özellikleri

Malzeme	Saflık	Toz Çapı	Spesifik Yüzey Alanı (m ² /g)	İletkenlik (s/m)
Grafen Nanotabaka	% 99.5	24 µm	150	1100-1600

5.2. Yapıca Kararlı MCS/MtS Kompozit FDM'lerin Hazırlanması

Yapıca kararlı kompozitlerin üretimi kolay vakum emprenye yöntemiyle gerçekleştirildi. Miktarı belirli MtS faz değişim sıcaklığını üzerinde eritilerek yine tartım miktarı belirli olan toz formadaki MCS'ye ilave edildi. Yapıca kararlı MCS/MtS kompozitin hazırlanması için MCS'ye ilave edilen MtS miktarı %25-%50 aralığında değiştirilerek bir seri kompozit hazırlandı. Her bir kompozit numune 70 °C'de bir vakum fırın içerisinde 3 saat boyunca ve -60 kPa vakum altında bekletildi. MtS'nin MCS içerisine iyice nüfuz edebilmesi için numuneler her 30 dakikada bir dışarıya alınıp karıştırıldı. Emprenye işlemi tamamlandıktan sonra yapıca kararlı kompozit FDM oranını belirlemek için her bir numune sızdırmazlık testine tabi tutuldu. Bu test öncesinde her bir kompozit sızdırmazlık testi için 2x2 cm ebatlarında kalıp kullanılarak hidrolik presle kare şekline getirildi. Kompozit FDM numunelerinin üretimin aşamaları Şekil 14'de gösterilmiştir.

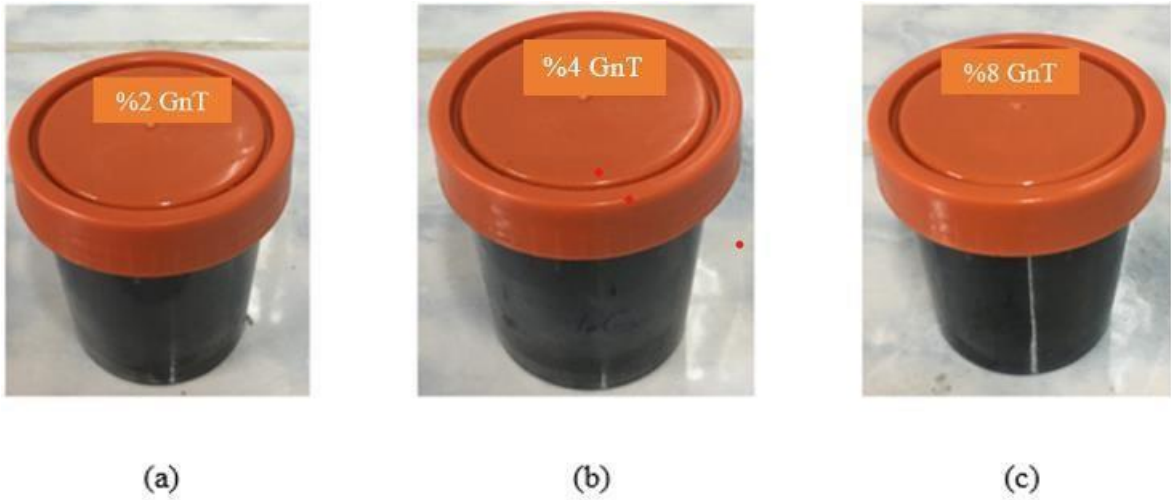


Şekil 14. Yapıca Kararlı MCS/MtS Kompozit FDM'lerin Hazırlanmasının şematik görüntüsü

Kalıplanmış her bir kompozit numune bir süzgeç kâğıdı üzerinde sıcaklık kontrollü ısıtıcı üzerinde 70°C’de 30 dakika süre ile ısıtıldı. Bu işlem sonrasında numunelerden erimiş halde MtS sızıntısının olup olmadığı gözlemlendi. Elde edilen bulgulara göre YK-KFDM oranı tespit edildi.

5.3. Yapıca Kararlı MCS/MtS/GnT Kompozit FDM’lerin Hazırlanması

Yapıca kararlı MCS / MtS içerisindeki MtS emprenye oranını ve kompozitin ısıl iletkenliğini arttırmak için bu kompozite GnT ilave edildi. GnT içerikli YK-KFDM kompozit üretiminde GnT ile ilgili aglomerasyon sorununu ortadan kaldırmak için farklı bir üretim yaklaşımı izlendi. Bu üretim adımlarında belirlenen miktarlarda GnT öncelikle bir beher içerisinde saf etanol ile 1 saat boyunca ultrasonik olarak karıştırıldı. Bu karışıma tartım miktarı belli MCS eklendi ve ultrasonik karıştırmaya 1 saat boyunca devam edildi. Bu işlemin ardından nihai kompozit içerisinde etanol buharlaştırma işleminden sonra %2, %4 ve %8 oranlarında GnT yer alacak şekilde hibrit MCS/GnT ön-kompozitleri hazırlandı. Son aşamada ise her bir ön kompozite %45-%70 arasında değişen oranlarda aynı vakum şartları altında MtS emprenye edildi. Farklı MtS kütle oranlarına (Tablo 11) sahip MCS/MtS/GnT kompozit numunelerin YK-KFDM oranını belirlemek için sızıntı testine tabi tutuldular. Üç farklı oranda GnT içeren YK-KFDM numunelerin fotoğraf görüntüsü Şekil 13’de gösterilmiştir. Ayrıca hazırlanan kompozitlerin bileşim oranı Tablo 11’de sunulmuştur.



Şekil 15. Farklı GnT oranlarında hazırlanmış yapıca kararlı (a) MCS/MtS/GnT-1 (b) MCS/MtS/GnT-2 ve (c) MCS/MtS/GnT-3 kompozit FDM’ler

Tablo 14. Hazırlanan yapıcı kararlı MCC/MtS ve MCC/MtS/GnP kompozitlerinin listesi ve kütle bileşim oranları

Numune	MCS (ağ.%)	MtS (ağ. %)	GnT (ağ.%)
MCS/MtS	55	45	0
MCS/MtS/GnT-1	48	50	2
MCS/MtS/GnT-2	39	57	4
MCS/MtS/GnT-3	27	65	8

5.4. Hazırlanan Yapıcı Kararlı MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT Kompozitlerinin Karakterizasyonu

5.4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Üretilen yapıcı kararlı MCS/MtS/GnT kompozitlerinin morfolojik yapıları SEM cihazı (ZEISS EVO LS 10 model) ile incelenmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. LEO 440 Model SEM Cihazı

5.4.2. X-Işını Kırınımı (XRD) Analizi

Hazırlanan MCS/MtS/GnT'lerin ve bileşenlerinin kristal yapıları X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile incelenmiştir. Şekil 17'de gösterilen PANalytical X'-Pert3 model toz kırınım ölçer cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 17. XRD Cihazı

5.4.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Analizi

Hazırlanan yapıca kararlı MCS/MtS/GnT kompozitlerinin gizli ısı depolama kapasiteleri Şekil 18'de gösterilen Hitachi-7020 model DSC cihazı ile belirlenmiştir. DSC ölçüm işlemi süresince dakikada 5 °C'lik bir ısıtma/soğutma hızlarında ve azot gazı içeren ortamda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 18. DSC Cihazı (Hitachi-DSC 7020 Model)

5.4.4. Termogravimetri (TG) Analizi

Hazırlanan yapıca kararlı MCS/MtS/GnT kompozitlerinin ısı kararlılığı TG analiz cihazı (Perkin-Elmer TGA7 model) TG ile belirlenmiştir (Şekil 19) analiz cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 19. TG analiz cihazı (Perkin-Elmer TGA7 model)

5.4.5. Isıl İletkenlik Ölçümü

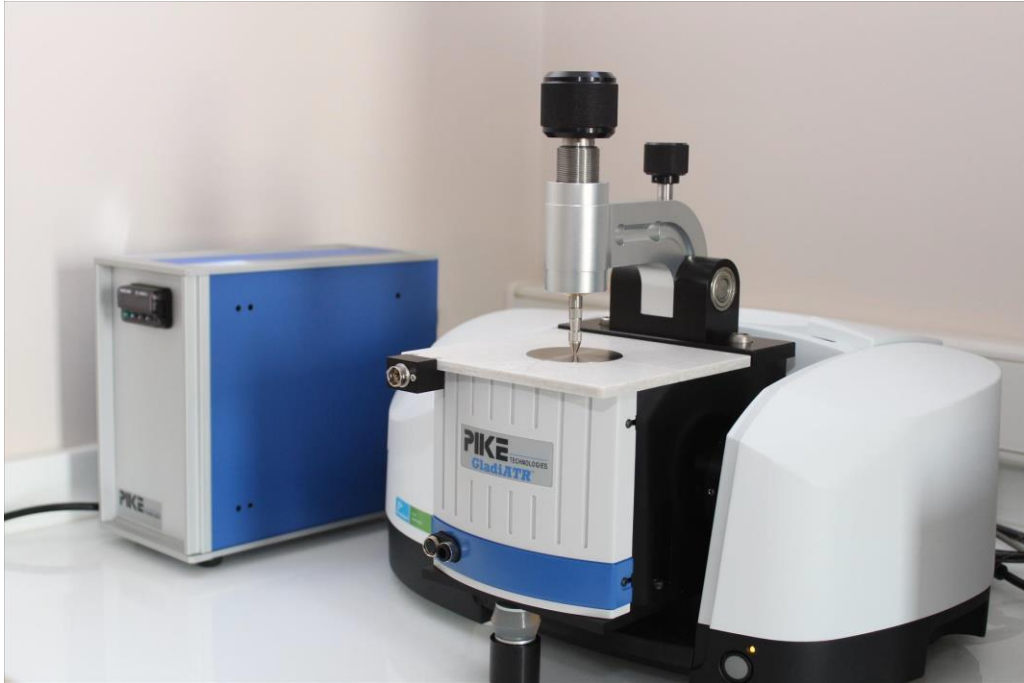
Hazırlanan yapıca kararlı MCS/MtS/GnT'lerin ısı iletkenlikleri iletkenlik ölçüm cihazı (Şekil 20; Decagon KD2 Pro model) ile ölçülmüştür. Hazırlanan numuneler plastik bir tüp içerisinde hava boşluğu kalmayacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 20. Isıl iletkenlik ölçüm cihazı (Decagon KD2)

5.4.6. FT-IR Analizi

Hazırlanan yapıca kararlı MCS/MtS/GnT'lerin kimyasal yapı analizi ve ısıl döngü sonrası kimyasal yapı kararlılığının ölçümü (FT-IR) cihazı (Şekil 21) ile yapılmıştır.

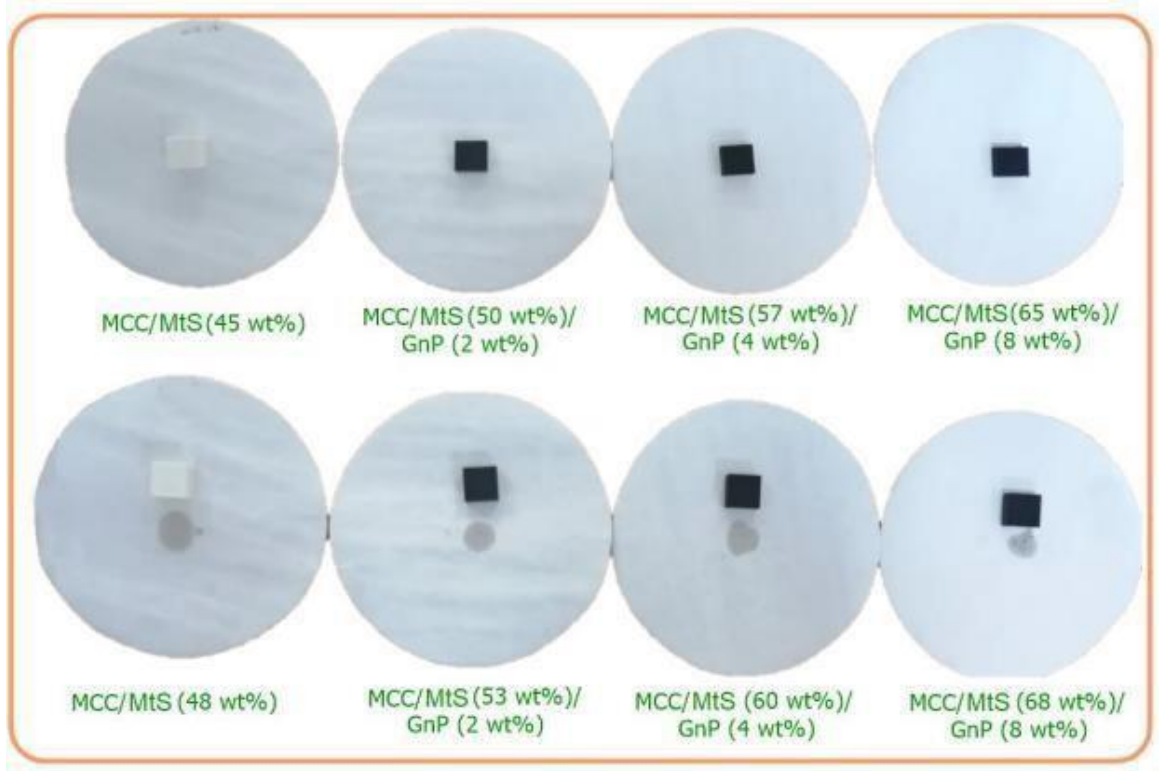


Şekil 21. JASCO 430 Model FT-IR Cihazı

6. BULGULAR

6.1. Sızdırmazlık Testi Sonuçları

MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT kombinasyonlarının sızma testine ilişkin sonuçlar Şekil 22’de verilmiştir. Test sonuçlarına göre, sızıntının tespit edilmediği en yüksek MtS içeriğine sahip kombinasyonlar YK-KFDM’ler olarak adlandırıldı. Bu bağlamda, elde edilen görüntülerden de anlaşılabacağı gibi, MCS/MtS numunelerindeki MtS içeriği ağırlıkça %45’ten yüksek olduğunda önemli miktarda sıvı MtS sızıntısı meydana geldiği gözlenmiştir. Diğer bir ifadeyle MCS/MtS kompoziti içerisindeki MtS oranının maksimum ağırlıkça %45 ile sınırlı olduğu belirlendi. Ayrıca Şekil 20’de sızdırmazlık test sonuçlarından görüldüğü gibi ağırlıkça %2 GnT katkısı sonucu MtS emprenye oranı %45’den %50’ye, %4 ve %8 GnT katkısı sonucu bu oran sırasıyla %57 ve %65 oranına yükseldiği belirlenmiştir. Bu oranların üzerinde akma davranışını gözlemlendiği sunulan fotoğraflardan da rahatlıkla görülebilmektedir.



Şekil 22. Yapıca kararlı farklı MCS/MtS/GnT kombinasyonlarının sızıntı testi sonuçları

Açıkçası, yapıca kararlı kompozitlerdeki MtS yükleme oranları, artan GnT miktarı nedeniyle önemli ölçüde artmıştır. Bunun sebebi, burada MtS'nin sadece mikro gözenekler içeren çapraz bağlı MCS örgü yapısı içerisinde değil, aynı zamanda nispeten yüksek spesifik yüzey alanına sahip GnT levhalarının yüzeylerinde de hapsedilmesidir. Ayrıca yapıya giren GnT; MCS ve MtS arasındaki yüzey gerilimi ve kılcal kuvvetler gibi fiziksel etkileşimlerin güçlendirilmesine katkıda bulunabilir.

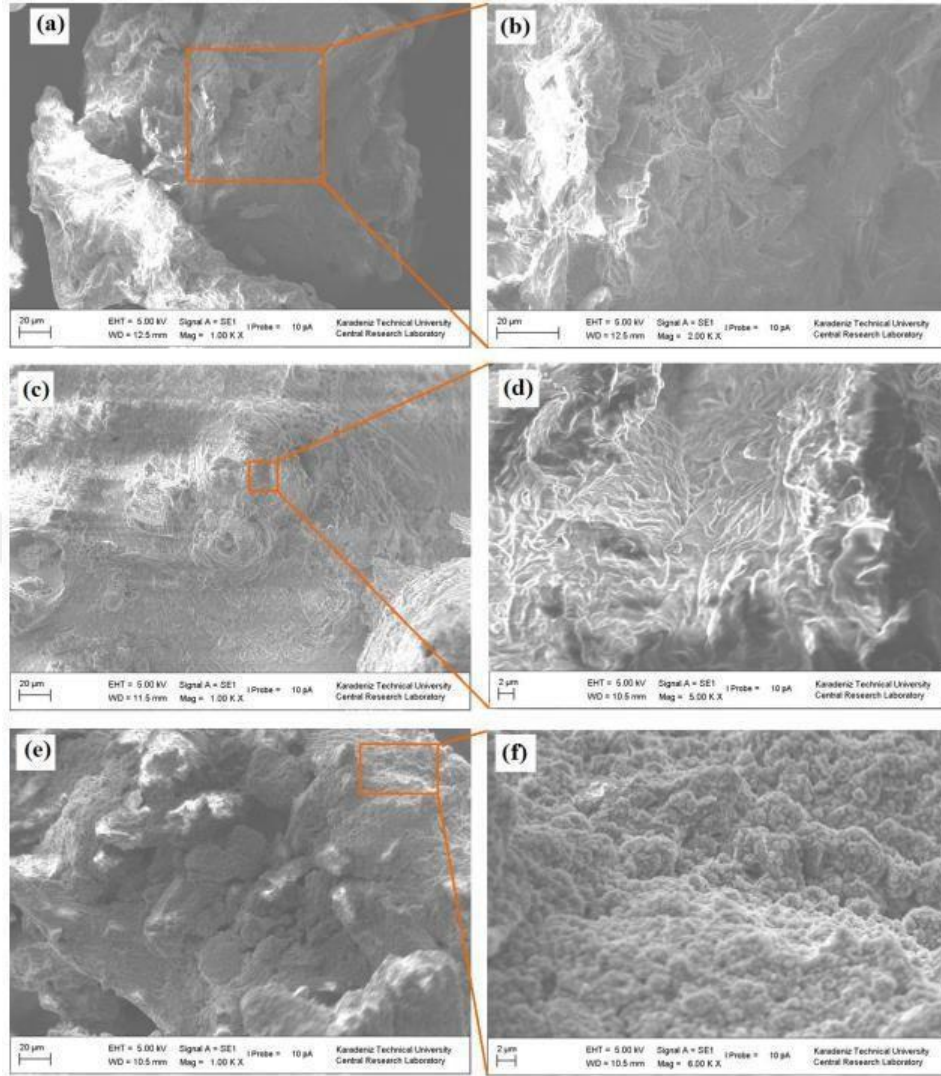
6.2. Yüzey Morfolojisi Analiz Bulguları

Saf MCS'nin ve yapıca kararlı MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT-3 kompozitlerinin SEM görüntüleri Şekil 23'de görülmektedir. MCS'nin mikro yapısı, çoğunlukla rastgele şekilli topaklanmalar oluşturan tabaka benzeri ve çubuk benzeri selülöz mikro-fibrillerinden oluşur. Bu tür yapılar, yüksek miktarlarda FDM hapsedilmesi için oldukça elverişli olan gözenekli pürüzlü bir yüzey sunar. Yapıca kararlı MCS/MtS kompozit SEM görüntülerinden MCS'nin gözenekli yapısının MtS tarafından kapsandığı ve yüzey nispeten daha yumuşak hale geldiği fark edilebilir. Bu, MtS'nin MCS'nin gözenekli yapısı tarafından emildiğini ve MCS'nin yüzeyine yüzey gerilimi ve kılcal kuvvetlerle verimli bir şekilde bağlandığını gösterir. Sonuç olarak, MCS'nin sunduğu gözenekli yapı ve iyi fiziksel uyumluluk, kompozit FDM'yi mekanik olarak kompakt bir yapı haline getirir ve FDM sızıntısını önler.

Bu bulgular MCS/MtS/GnT-3 kompoziti için de geçerlidir ancak kompozitteki GnT içeriğinden dolayı MCS/MtS kompozitine göre mikroyapıda farklılıklar tespit edilmiştir.

Bu mikroyapıda MtS, MCS/GnT hibrid yapısı tarafından sıkıca hapsedilmiştir. Bu nedenle, sızıntı testi sonuçlarında gözlemlendiği gibi, GnT'nin, MtS'nin akma davranışı göstermemesinde önemli bir işlevi olmuştur.

Bu etki MtS, MCS/MtS kompozitinin mikro yapısında açıkça fark edilebilir, ancak MCS/MtS/GnT kompozitinde tespit edilmesi zordur. Sonuç olarak, SEM analizi MtS'nin MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT kompozisyonlarında başarılı bir şekilde hapsedilmiş olduğunu açık bir şekilde göstermektedir.



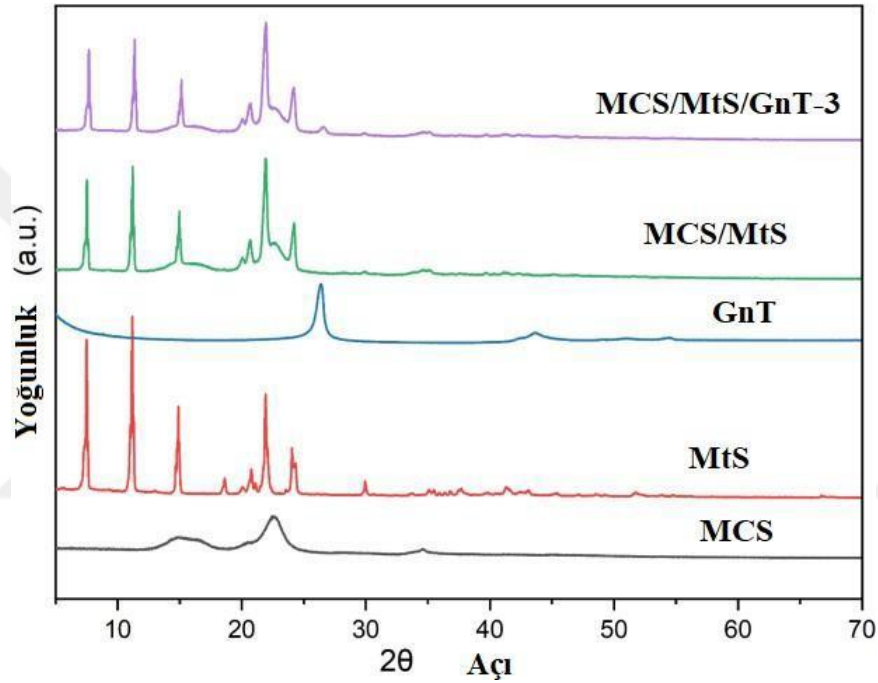
Şekil 23. Saf MCS (a-b), yapıca kararlı MCS/MtS kompoziti (c-d), yapıca kararlı MCS/MtS/GnT-3 (e-f) kompozitlerinin SEM görüntüleri

6.3. XRD Sonuçları

Saf numunelerin ve hazırlanmış MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT kompozitlerinin XRD desenleri Şekil 24’de verilmiştir. MtS, 7.50, 11.29, 14.81, 20.84, 22.06, 24.14° ve 29.88°’lik 2θ değerindeki karakteristik pikler düzenli kristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

MCS'nin XRD deseni, literatürdeki çalışmalara benzer şekilde 2θ değerinde 15.26, 22.57° ve 34.53°’de karakteristik pikler göstermiştir. GnT’nin 26.30° 2θ değerinde karakteristik pik verdiği gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan yapıca kararlı kompozit MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT FDM'lerin XRD desenlerinde, MCS, MtS ve GnT'ye özgü kristal piklerini gözlemlemek mümkündür. Ancak kompozit içerisindeki GnT miktarı düşük olduğu için bu bileşene ait pikin şiddeti saf haline göre daha düşük tespit edilmiştir. Ayrıca her iki kompozit FDM'nin XRD desenlerinde bileşenlerin sahip olduğu karakteristik piklerin haricinde yeni bir pike rastlanmamıştır. Bu sonuçlar, kompozitlerin oluşumu esnasında yeni bir maddenin ortaya çıkmadığı ve dolayısıyla kompozisyonun fiziksel etkileşimlerle meydana geldiğini göstermiştir.



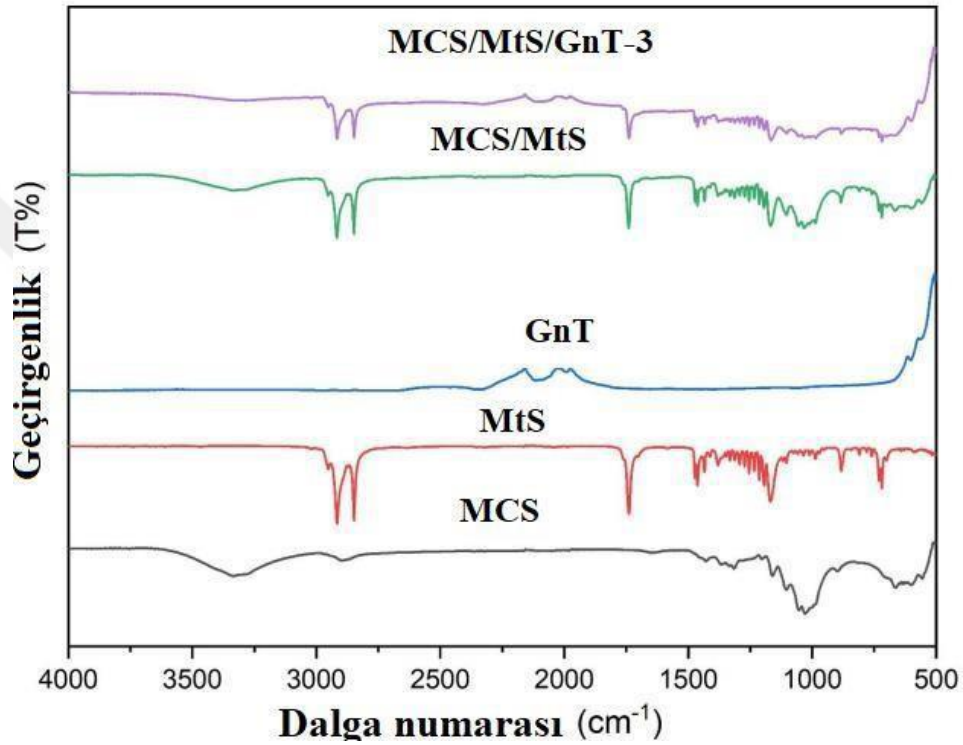
Şekil 24. Numunelerin XRD desenleri

6.4. FT-IR Sonuçları

MtS, MCS, GnT ve üretilen kompozit FDM'lerin FTIR spektrumları Şekil 25'de verilmiştir. MCS'nin FTIR spektrumlarında, 3315 cm^{-1} 'de gözlenen geniş bant O-H titreşim gerilmesine karşılık gelmektedir. Yaklaşık 2892 cm^{-1} 'deki küçük pik asimetric C-H gerilmesini temsil etmektedir. Selülözün C-O gerilmesinden kaynaklı pik 1037 cm^{-1} civarında gözlemlenmiştir. 1432 cm^{-1} 'deki pik, yapıdaki C-H bağının eğilme pikini göstermektedir. 1632 cm^{-1} 'deki pik, yapıdaki absorbe su moleküllerinin titreşimini gösterir. 1324 ve 889 cm^{-1} 'deki pikler, $-\text{CH}_2$ grubunun gerilme ve eğilme titreşimlerini temsil ederken, 1115 cm^{-1} 'deki pik, C-O-C gruplarının gerilme titreşimlerine atfedilir. MtS

spektrumunda ise 2916 cm^{-1} ve 2844 cm^{-1} 'deki pikler $-\text{CH}_2$ grubunun simetrik ve asimetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanır. 1736 cm^{-1} 'deki pik $\text{C}=\text{O}$ gerilme titreşiminden kaynaklanmıştır.

1462 ve 1247 cm^{-1} 'deki pikler $-\text{CH}_2$ ve $-\text{CH}_3$ gruplarının eğilme titreşimleriyle ilişkilendirilebilir. 1158 cm^{-1} 'deki pik $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 'nin gerilme titreşimlerine aitken, 883 cm^{-1} 'deki pik hidroksil (OH) fonksiyonel grubundan kaynaklanmaktadır.



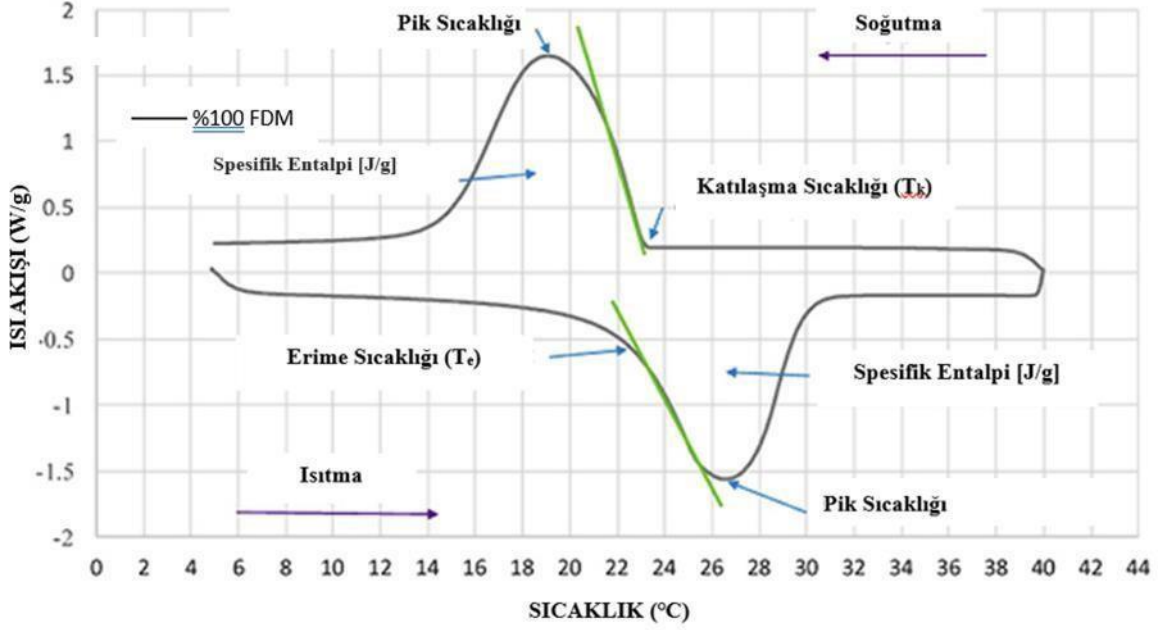
Şekil 25. Numunelerin FTIR spektrumları

Yapıca kararlı MCS / MtS ve MCS/ MtS / GnT kompozitlerinin FTIR spektrumlarında beklenen karakteristik piklerin dışında yeni bir pike rastlanılmamıştır. Ayrıca MCS, MtS ve GnT'ye özgü piklerin dalga boyu değerlerinde de kayda değer bir kaymanın olmadığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, kompozit bileşenler arasındaki etkileşimlerin tamamen fiziksel karakterde olduğunu açık bir şekilde ortaya koymuştur.

6.5. DSC Sonuçları

Şekil 27'de saf MtS ve MtS içerikli yapıca kararlı kompozitlerin DSC eğrileri görülmektedir. Bu DSC eğrileri incelendiğinde, termogramların gizli ısı depolama-salınım işlemlerini temsil eden endotermik ve ekzotermik piklerin varlığı belirgin bir şekilde

gözükmektedir. Şekil 26’da gösterildiği gibi piklerin maksimum eğimli noktasından çizilen teğetin temel çizgiyi (baseline) kestiği noktaya karşılık gelen sıcaklık değeri faz geçiş sıcaklığı olarak alınmıştır. Piklerin altında kalan alanın integrasyon yoluyla DSC cihazı içerisinde yüklü program vasıtasıyla hesaplanarak gizli ısı hesaplanarak gizli ısı depolama kapasitesi belirlenmiştir.



Şekil 26. DSC eğrisi şematik gösterimi

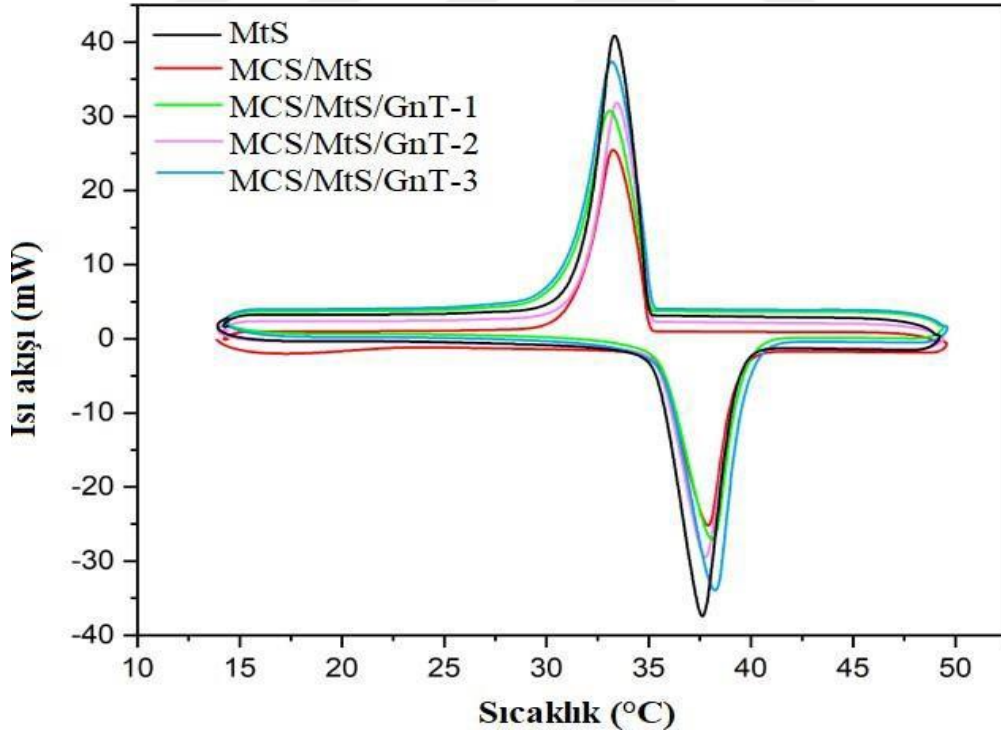
Şekil 27 de verilen kompozitlerin DSC eğrilerindeki pik şekilleri ve konumları saf MtS'dekilerle karşılaştırıldığında, erime-donma faz geçişlerini temsil eden piklerin alanlarının MtS kütle fraksiyonu azaldıkça azaldığı fark edilmiştir. Bu durum, MCS veya GnT'nin gizli ısı depolama (GID) kapasitesinin olmaması, dolayısıyla MtS oranı düştükçe kompozitlerin gizli ısı depolama kapasitesinin düşmesi ile ilgilidir. Test sonuçlarına göre saf MtS 35.14°C’de erimekte, 35.00 °C de ise donmaktadır. Erime sıcaklıkları MCS/MtS, MCS/MtS/GnT-1, MCS/MtS/GnT-2 ve MCS/MtS/GnT-3 için 35.35, 35.38, 35.31 ve 35.32°C olarak, donam sıcaklıkları ise sırasıyla 35.05, 35.06, 35.14 ve 35.13°C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, MCS veya GnT'nin MtS'nin faz geçiş sıcaklıkları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını ortaya koymuştur.

Saf MtS'nin erime-donma entalpileri 266.20-228.40 J/g olarak bulunmuştur. MCS/MtS, MCS/MtS/GnT-1, MCS/MtS/GnT-2 ve MCS/MtS/GnT-3 kompozitlerinin erime entalpileri sırasıyla; 102.18, 113.85, 129.75 ve 147.97 J/g iken, donma entalpileri bu

kompozitler için 101.11, 112.52, 128.21 ve 146.31 J/g olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden de görülebileceği gibi hazırlanan kompozit içerisindeki MtS miktarı arttıkça kompozitin gizli ısı depolama kapasitesi de artmıştır.

Tablo 16. Numunelerin DSC verileri

Numune	Erime Noktası (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Donma Noktası (°C)	Donma Entalpisi (J/g)
MtS	35.14	228.40	35.00	226.20
MCS/MtS	35.35	102.18	35.05	101.11
MCS/MtS/GnT-1	35.38	113.85	35.06	112.52
MCS/MtS/GnT-2	35.31	129.75	35.14	128.21
MCS/MtS/GnT-3	35.32	147.97	35.13	146.31



Şekil 27. MCS/MtS, MCS/MtS/GnT-1, MCS/MtS/GnT-2 ve MCS/MtS/GnT-3'nin DSC eğrileri

Ayrıca, önerilen selülöz bazlı yapıcı kararlı kompozitlerin gizli ısı depolama özelliklerinin literatürdeki benzer kompozitlerle karşılaştırılması Tablo 16'da verilmiştir.

Hazırlanmış olan YK-KFDM'lerin faz dönüşüm sıcaklıkları ve IED kapasiteleri dikkate alındığında bu kompozitlerin elektronik sistemler, gıda taşıyıcıları, güneş PV panelleri, yapı malzemeleri gibi ısı yönetim uygulamaları için literatürdeki emsallerine nispeten gayet elverişli oldukları söylenebilir.

Tablo 17. MCS/MtS tabanlı kompozitlerin gizli ısı depolama özelliklerinin literatürle karşılaştırılması

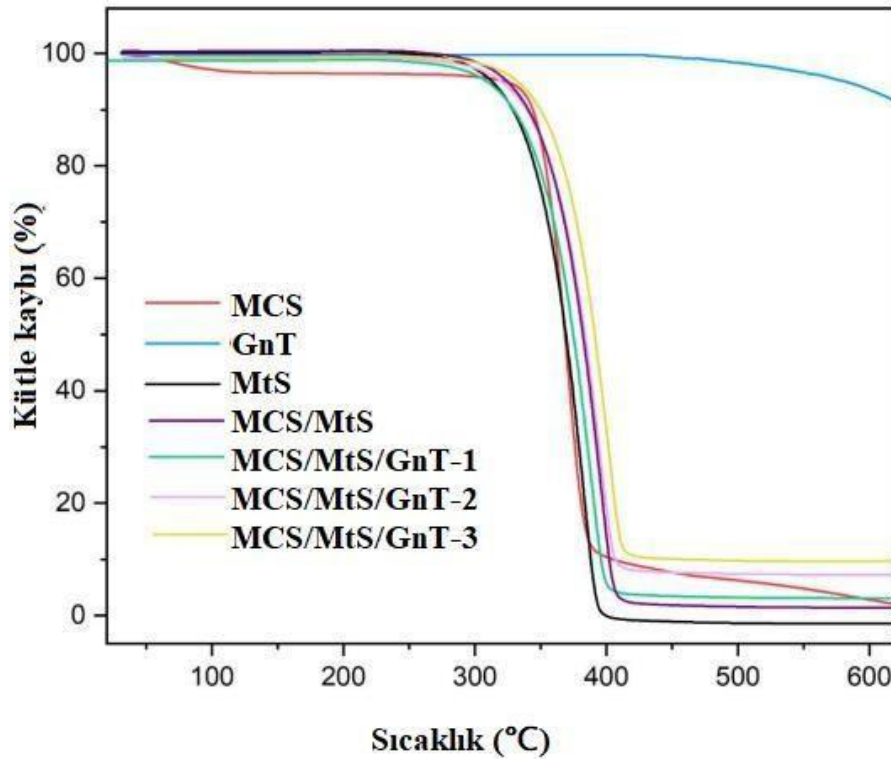
Yapıca kararlı FDM'ler	Erime noktası (°C)	Erime entalpisi (J/g)
Karboksi metil selülöz-1/stearik-laurik ötektiği	32.2	114.6
Hidroksilpropil metil selülöz/tetradekanol-miristik ötektiği	23.62	102.11
Hidroksilpropil metil selülöz/dodekanol-palmitik ötektiği	19.34	113.12
Sisal Fiber Selülöz/PEG/Grafen Oksit	65.79	121.94
Selülöz nanokristal/PEG	47.1	82.3
Selülöz nanokristal/PEG/GnT	59.6	145.5
MCS/MtS	32.35	102.18
MCS/MtS/GnT	35.31-35.38	113.85-147.97

6.6. TGA Sonuçları

Numunelerin ısıl bozunma davranışı TGA analizleri ile incelenmiştir ve elde edilen TGA termogramları Şekil 28’de gösterilmektedir. Şekil 25 de görüldüğü gibi, MtS'nin kütle kaybı yaklaşık 298 °C’de başlamakta olup yaklaşık 385 °C de tamamlanmaktadır. MCS, MtS’den farklı olarak iki aşamalı ısıl bozunma davranışı sergilemektedir. 100°C’den 335°C’ye kadar MCS’nin kütlesi neredeyse hiç değişmedi. Bu noktadan 381°C’ye MCS’nin depolimerizasyonu ve dehidrasyonu nedeniyle hızlı kütle kayıpları görülmektedir.

Bunun yanında, üretilen tüm kompozit FDM’lerin bozunma davranışları, saf MtS ve MCS’nin gösterdiği ısıl davranışlara uyumludur. Başlangıç bozunma sıcaklıkları biraz gecikmiş olsa da (21 °C kadar) MtS’ye benzer şekilde tek adımlı bozunma davranışı gözlenmiştir. MCS ve GnT içerikleri MtS’nin bozulmasına karşı ek ısıl direnç sağladığından bu beklenen bir sonuçtur.

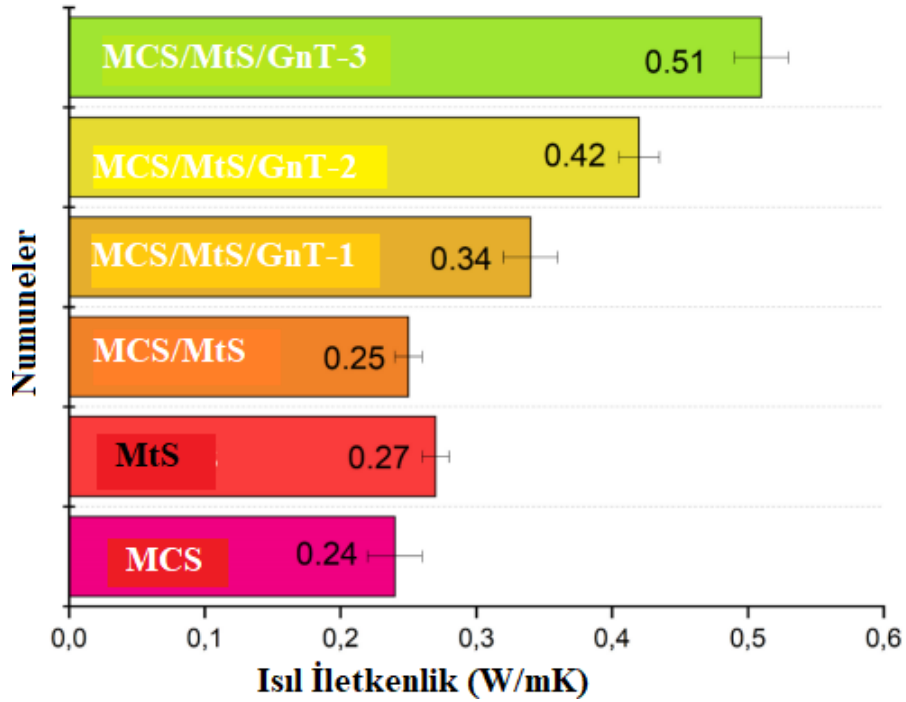
Sonuç olarak; MtS’nin enerji depolama sistemlerinde çalışma sıcaklığının yaklaşık 35 °C olduğu ve üretilen kompozitlerin neredeyse 300 °C ye kadar herhangi bir bozunma davranışı göstermemesi gerçeği göz önüne alınarak bu kompozit FDM’lerin mükemmel düzeyde ısıl kararlılık performansına sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 28. Numunelerin TGA Eğrileri

6.7. Isıl İletkenlik Sonuçları

Isıl iletkenlik, ısı depolama ve geri salma süreçlerinde FDM içeren ısı yönetim sistemlerinde verimli bir şekilde kullanılan önemli bir faktördür. Diğer bir ifadeyle, yüksek ısı iletkenliğe sahip FDM'ler ısıyı daha hızlı bir şekilde depolayabilir ve salıverebilir. Bu nedenle, üretilen kompozit FDM'lerin ısı iletkenliğini belirlemek önemlidir. Saf MCS, MtS ve GnT ilaveli/ilavesiz kompozitler için ölçülen ısı iletkenlik değerleri Şekil 29'da gösterilmiştir. Yapıca kararlı MCS/MtS/GnT-1, MCS/MtS/GnT-2 ve MCS/MtS/GnT-3 kompozitleri nispeten yüksek ısı iletkenlik (sırasıyla 0.34, 0.42 ve 0.51 W/mK) gösterirken, MtS, MCS ve MCS/MtS kompozitlerinin ısı iletkenlikleri ise sırasıyla 0.27 W/m·K, 0.24 W/m·K ve 0.25 W/m·K olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden görüldüğü gibi kompozit içerisindeki GnT miktarındaki artışa bağlı olarak ısı iletkenlik değeri de artmıştır. MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin ısı iletkenliği saf MtS ve MCS/MtS için ölçülen değere kıyasla sırasıyla %47.05 ve %50.98 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Isıl iletkenlikteki bu artış kompozit içerisinde homojen dağılmış GnT tabakaları ısı transferinin etkin bir şekilde arttığı anlamına gelmektedir.



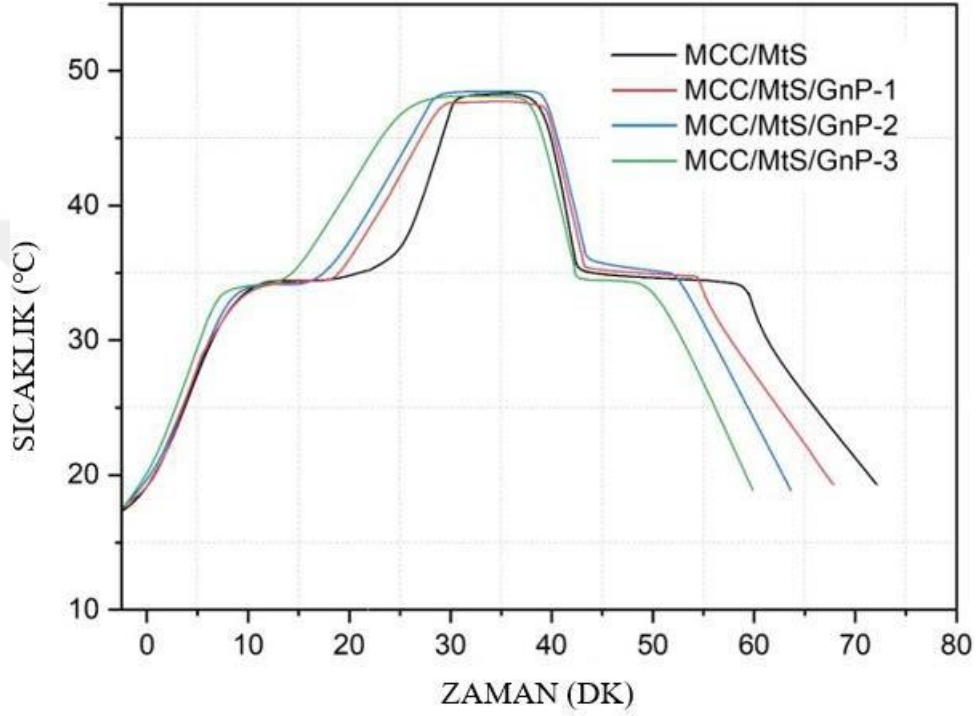
Şekil 29. Isıl iletkenlik ölçüm sonuçları

Önerilen yapıca kararlı selülöz kompozit FDM'ler için ölçülen ısı iletkenlik değeri literatürdeki benzer selülöz veya selülozdan üretilmiş FDM'ler için ölçülen değeri Tablo 18'de kıyaslanmıştır. Tabloda verilen değerlerden de görüldüğü gibi hazırlanan kompozitlerin (özellikle MCS/MtS/GnT) literatürdeki muadillerine göre rekabetçi bir ısı iletkenliğe sahip oldukları söylenebilir.

Tablo 18. Hazırlanan MCS/MtS kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin literatür ile karşılaştırılması

Kompozit FDM'ler	Isı İletkenlik (W/m·K)
Selülöz nanokristal/PEG	0.44
Hidroksipropil metil selülöz/dodekanol-palmitik asit ötektik	0.130
Hidroksipropil metil selülöz/dodekanol-palmitik asit ötektik/MWKNT	0.172
Sisal Fiber Selülöz/PEG	0.3091
Sisal Fiber Selülöz/PEG/Grafen Oksit	0.4632-0.5398
Mikrokristal Selülöz/PEG	0.31
Mikrokristal Selülöz/PEG/Grafen nanotabaka aerjel	1.03
MCS/MtS	0.25
MCS/MtS/GnT	0.34-0.51

Kompozitlerin ısı iletim kat sayısına bağlı olarak artan ısı transfer verimliliği (ısı depolama/salma performansları) erime ve donma sürelerini direkt olarak etkiler. Üretilen kompozitlerin elde edilen ısınma-soğuma eğrileri Şekil 30'da gösterilmiştir. Bu eğrilerde sıcaklığın hemen hemen sabit kaldığı aralıklar (erime-katılaşma faz geçişlerinin gerçekleştiği zaman aralıkları) rahatlıkla fark edilebilir.

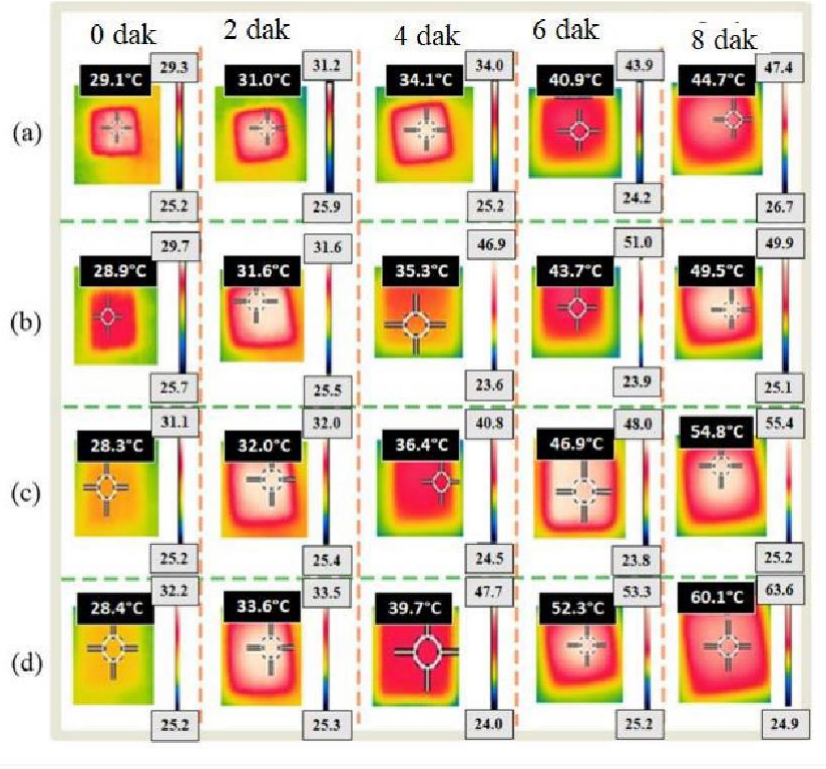


Şekil 30. Üretilen kompozitlerin elde edilen ısınma-soğuma eğrileri

GnT'nin farklı kütle fraksiyonlarında MCS/MtS kompozitine entegrasyonunun ısıl iletkenlik artışına olan olumlu etkisi, MCS/MtS kompozitlerinin ısıl depolama-serbest bırakma performans eğilimlerinden kolayca anlaşılabilir. MCS/MtS kompoziti içerisindeki GnT katkısı arttıkça ısı depolama-salıverme hızlarının arttığını gözlemek mümkündür. Örneğin, MCS/MtS kompozitinin erime süresi yaklaşık 22 dakika iken, sırasıyla %2, %4 ve %8 GnT içeriğine sahip kompozitlerin erime süreleri yaklaşık 18, 16 ve 13 dakikaya inmiştir. Bu sonuçlar, sırasıyla GnT ilavesiyle MCS/MtS kompozitinin ısı depolama performansında yaklaşık %18, %27 ve %41 oranlarında iyileşmenin meydana geldiğini göstermektedir. Öte yandan, MCS/MtS kompozitin donma süresi yaklaşık 24 dakika iken, %2, %4 ve %8 GnT katkısına sahip kompozitlerin donma süreleri sırasıyla 19, 17 ve 13 dakikaya düşmüştür. Bu azalmalar, MCS/MtS kompozitine kıyasla GnT ilaveli kompozitlerin ısı salıverme performansında yaklaşık sırasıyla %20, %29 ve %43 oranlarındaki artışa karşılık

gelmektedir. Tüm bu sonuçlar GnT ilaveli kompozitlerin ısı iletkenliğindeki artışa bağlı olarak ısınma ve soğuma performanslarının önemli düzeyde iyileştiğini göstermektedir.

Kompozitlerin GnT ilavesiyle iyileştirilmiş ısı iletim performansları, ısınma süreci sırasında kızılötesi görüntülerindeki sıcaklık değişiklikleri esas alınarak da değerlendirildi (Şekil 31).



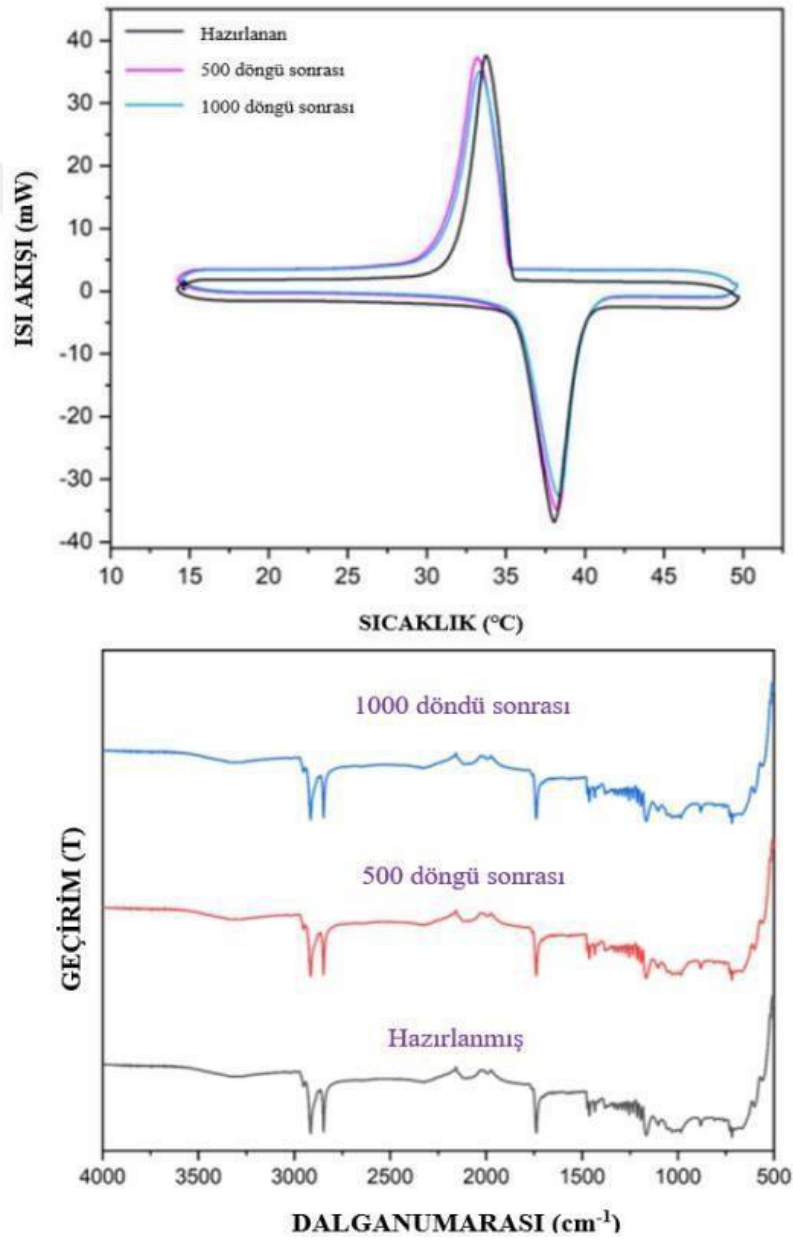
Şekil 31. (a). MCC/MtS, (b). MCC/MtS/GnT-1, (c). MCS/MtS/GnT-2 ve (d).

MCS/MtS/GnT-3 kompozitlerinin 2, 4, 6 ve 8 dakika ısıtılmasından sonra oluşan ısı kızılötesi ışınların görüntüleri

Diğer bir ifadeyle, kızılötesi ısı görüntü yakalama testi, GnT eklenmesiyle MCS/MtS'nin ısı yayma yeteneğinin arttığını daha net göstermek için uygulandı. Kızılötesi ısı görüntülerden fark edildiği üzere, ısınma sürecinde yüksek GnT içeriğine sahip MCS/MtS kompozitlerindeki sıcaklık artışları, saf MCS/MtS kompozitine kıyasla daha hızlıydı. Örneğin, 8 dakikalık ısınma sonrasında MCS/MtS, MCS/MtS/GnT-1, MCS/MtS/GnT-2 ve MCS/MtS/GnT-3 kompozitlerinin sıcaklıkları, başlangıç sıcaklıklarından sırasıyla 15.6 °C, 20.6°C, 26.5°C ve 31.7 °C artmıştır. En yüksek GnT içeriği ile hazırlanan MCS/MtS/GnT-3 kompozitin ısınma hızı, ısının en hızlı yayıldığını gösteriyor ve bu sonuç ısı iletkenlik ile örtüşmektedir.

6.8. Isıl Döngü Testi Sonuçları

Üretilen yakıca kararlı kompozitler arasında en iyi ısı kararlılık performansı sergileyen MCS/MtS/GnT-3 kompoziti uzun süreli kullanım gereksinimlerinin karşılayıp karşılayamadığını belirlemek için döngü testine tabi tutulmuştur. Şekil 32’de ilk 500. ve 1000. döngülerde MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin FTIR spektrumları ve DSC eğrileri verilmiştir.



Şekil 32. MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin ilk, 500 ve 1000 döngülerindeki DSC ve FTIR eğrileri

İlk döngüdeki MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin FTIR spektrumuyla karşılaştırıldığında; 500 ve 1000 ısı döngü sonrası yeni karakteristik pik görülmediği ve mevcut piklerin kaybolmadığı belirlenmiş olup bunun sonucunda MCS/MtS/GnT-3'ün 1000 ısıtma-soğutma döngüsünden sonra kimyasal yapısında herhangi bir bozunma olmadığı ve uzun süreli kullanımlar için gerekli kimyasal kararlılığa sahip olduğu anlaşılmıştır. MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin gizli ısı özelliklerinin tekrarlanabilirliği, ilk 500 ve 1000 ısı döngülerin DSC eğrilerinin karşılaştırılması sonucu ilgili DSC eğrilerinin üst üste bindiği ve bunun da MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin mükemmel tekrarlanabilir gizli ısı özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Ancak faz geçiş sıcaklıklarında ve entalpi değerlerinde kabul edilebilir küçük değişikliklerin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Erime-donma sıcaklıklarındaki ve buna karşılık gelen entalpi değerlerindeki değişiklikler sırasıyla +0.03/-0.02 ve -1.28/-1.17 J/g olarak gerçekleşmiştir. Bu tür makul değişiklikler, üretilen MCS/MtS/GnT-3 kompozitinin tekrarlanabilir gizli ısı özelliklerine ve üstün ısı döngü dayanıklılığına sahip kararlı bir malzeme olduğunu göstermiştir.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında mikrokristal selülöz (MCS) ihtiva eden ve grafen nano tabaka YK-KFDM'ler elde edilmiştir. Elde edilen kompozit YK-KFDM'ler içerisinde metil stearat (MtS) enerji depolayan faz değişim malzemesi olarak kullanılmıştır. Sağlanan bulguların değerlendirilmesiyle elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Taramalı elektron mikroskobu analizinden elde edilen bulgular MCS'nin gözenekli yapısı içerisinde MtS'nin yüzey gerilimi ve kapiler kuvvetlerle homojen bir şekilde hapsedildiğini ortaya koymuştur.
2. MCS/MtS ve MCS/MtS/GnT kompozit bileşenlerinin XRD analiz bulgularında karakteristik piklerin haricinde yeni bir pike rastlanmadığını açık bir şekilde görülmüştür. Bu durum bileşenler arasında herhangi bir kimyasal etkileşimin olmadığını ve yapıya ilave edilen GnT'lerin MCS ve MtS'nin kristal yapılarında herhangi bir değişime neden olmadıklarını göstermiştir.
3. FTR spektral analiz bulguları MCS, MtS ve GnT'ye özgü piklerin dalga boyu değerlerinde belirgin bir kaymanın olmadığını ve kompozitler arasındaki etkileşimin tamamen fiziksel karakterde olduğunu ortaya koymuştur.
4. DSC analiz sonuçları hazırlanan kompozitlerin gizli ısı depolama kapasiteleri içeriğindeki MtS artışına bağlı olarak orantılı bir şekilde arttığı bulgusuna ulaşılmıştır.
5. TGA analiz bulguları hazırlanan MtS/MCS kompozitlerindeki FDM'nin iyi seviyede ısı kararlılığına sahip olduğunu ve bozunma sıcaklığının, çalışma sıcaklığının ya da faz dönüşüm sıcaklığının (yaklaşık 35°C) oldukça üzerinde olduğu (yaklaşık 300°C) sonucuna ulaşılmıştır.
6. %2 GnT ihtiva eden kompozitin ısı iletkenliği saf MtS ve MtS/MCS kompozitinne göre yaklaşık sırasıyla %26 ve %36 oranında artış gösterirken bu oranın %8'e çıkarılmasıyla ısı iletkenlikteki artış oranı yaklaşık %89 ve %104'e yükselmiştir. Isıl iletkenlikteki bu artış kompozit içerisindeki ısı transferinin GnT ağları boyunca etkin bir şekilde yapı içerisine dağıldığını ispatlamıştır.

7. Hazırlanan YK-KFDM'lerin GnT ilavesiyle erime ve katılaşma sürelerinde görülen kayda değer ölçüdeki azalmaların artan ısı iletkenlikle birlikte zenginleşen ısı transferinden kaynaklandığı anlaşılmıştır.
8. MCS/MtS/GnT kompozitinin 1000 erime-donma döngüsünden sonra mükemmel IED kararlılığı gösterdiği anlaşılmıştır.
9. GnT katkılı hazırlanan kompozitler içerisinde diğerlerine kıyasla MCS/MtS/GnT-3 yüksek ısı iletkenlik ve uygun GID kapasitesi ve faz dönüşüm sıcaklığı, yüksek ısı ve kimyasal kararlılık özelliklerinden dolayı birçok IED uygulamaları için önemli bir potansiyele sahip olduğu sonucu gözlemlenmiştir.



8. ÖNERİLER

1. Yapılacak ileri bir çalışmada farklı tür selülöz yapılar ve farklı tür FDM'ler seçilerek üretilecek yapıca kararlı kompozitlerin IED özellikleri bu tez çalışmasındaki sonuçlarla kıyaslanabilir.
2. Yapılacak ileri bir çalışma da KNT, grafen oksit, karbon nano fiber metal nano oksitler vb. ısı iletkenlik arttırıcı katkı malzemeleri hazırlanan kompozitlere eklenebilir. Elde edilen bulgular karşılaştırılmalı olarak tartışılabilir.
3. Üretilen yapıca kararlı kompozit FDM'ler daha büyük geometrilerde (örneğin 10x10x2 cm ebatlarında) hazırlanarak dış ortam hava şartlarındaki IED performansı incelenebilir.

9. KAYNAKLAR

- Nazir, H., Batool, M., Osorio, F.J.B., Ruiz, M.I., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin., & Kannan, A.M., (2019), Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A Review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491-523.
- Sarı, A., Faz Değişimi Yoluyla Isıl Enerjinin Depolanması ve Bu Alanda Yapılan Çalışmalar, 2011.
- Karlı, A., Yağ Asidi/PEMA Kompozit Karışımlarının Hazırlanması ve Gizli Isı Enerji Depolama Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, GOÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2012.
- Biçer, A., 2017. Isıl Enerji Depolama Amaçlı Yapıca Kararlı Yeni Bir Faz Değişim Malzemesi Olarak Silikafume/Laurik Asit (LA) Kompoziti. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 21 (3): 967-73.
- Biçer, A., Polistiren Esaslı Yeni Katı-Katı Faz Değişim Maddelerinin Sentezi ve Isıl Enerji Depolama Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, GOÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2015.
- Kozak, M. & Kozak, Ş., (2012), Enerji Depolama Yöntemleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 17-29.
- Koşan, M. & Aktaş, M., (2018), Faz Değiştiren Malzemelerle Termal Enerji Depolayan Bir Isı Değiştiricisinin Sayısal Analizi, *Politeknik Dergisi*, 21,(2), 403-409.
- Mehling, H., Brütting, M., & Haussmann, T., (2022), PCM products and their fields of application—An overview of the state in 2020/2021, *Journal of Energy Storage*, 51, 104354.
- <http://www.yelizkonuklu.com/?p=69> Termal Enerji Depolama Yöntemleri. 11Şubat 2015.
- Talu, F., Mert, M.S., & Mert, H.H., (2023), Gizli Isıl Enerji Depolama Sistemleri: Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanıldığı Aktif ve Pasif Sistem Uygulamaları, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 531-547.

- Cai, Y., Song, X., Liu, M., Li, F., Xie, M., Cai, D., & Wei, Q. (2016)., Flexible cellulose acetate nano-felts absorbed with capric–myristic–stearic acid ternary eutectic mixture as form-stable phase-change materials for thermal energy storage/retrieval”. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, 661-673.
- Jiang, Z., Palacios, A., Zou, B., Zhao, Y., Deng, W., Zhang, X., & Ding, Y. (2022), A review on the fabrication methods for structurally stabilised composite phase change materials and their impacts on the properties of materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159, 112134.
- Chen, F., & Wolcott, M. (2014). Miscibility studies of paraffin/polyethylene blends as form-stable phase change materials. *European Polymer Journal*, 52, 44-52.
- Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G., (2017), Microstructure and Thermal Properties of Cetyl Alcohol/High Density Polyethylene Composite Phase Change Materials with Carbon Fiber As Shape-Stabilized Thermal Storage Materials, *Applied Energy*, 200, 19-27.
- Chen, X., Cheng, P., Tang, Z., Xu, X., Gao, H., & Wang, G. (2021), Carbon-Based Composite Phase Change Materials for Thermal Energy Storage, Transfer, and Conversion, *Advanced Science*, 8(9), 2001274.
- Fleischer, A.S., (2015), *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials: Fundamentals And Applications*, Springer, Villanova, PA, USA.
- Gilart, P., Martínez, Á., Barriuso, M., & Martínez, C., (2012), Development of PCM/carbon-based composite materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 205-211.
- Gök, Ö., & Alkan, C., (2020), Poly(ethylene glycol)s grafted celluloses as solid–solid phase change materials for different thermal energy storage application temperatures and through isophorone linkage, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 146.
- Gök, Ö., Alkan, C., & Konuklu, Y., (2019), Developing a poly(ethylene glycol)/cellulose phase change reactive composite for cooling application, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 345-349.

- Harish, S., Orejon, D., Takata, Y., & Kohno, M., (2016), Enhanced thermal conductivity of phase change nanocomposite in solid and liquid state with various carbon nano inclusions, *Applied Thermal Engineering*, 114.
- Huang, X., Lin, Y., Alva, G., & Fang, G., (2017), Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials using myristyl alcohol/metal foam for solar thermal storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 170, 68-76.
- Jia, S., Zhu, Y., Wang, Z., Chen, L., & fu, L., (2017), Improvement of shape stability and thermal properties of PCM using polyethylene glycol (PEG)/sisal fiber cellulose (SFC)/graphene oxide (GO), *Fibers and Polymers*, 18, 1171-1179.
- Jiang, F., Zhang, L., Jiang, Z., Li, C., Cang, D., Liu, X., Xuan, Y., & Ding, Y., (2018), Diatomite-based porous ceramics with high apparent porosity: Pore structure modification using calcium carbonate, *Ceramics International*, 45.
- 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 & Solar Cells*, 95 (2011) 1208–1212.
- Kanlı, Z., Mert. M. S., & Mert. H. H., (2021), Isıl Enerji Depolama Uygulamaları İçin Selülöz Nanofibril Temelli Parafin İçeren Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 22, 273-81.
- Kaygusuz. K. & Sarı, A., (2007), High Density Polyethylene/Paraffin Composites as Form- stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage, *Energy Sources Part A-recovery Utilization and Environmental Effects* 29, 261-70.
- Aydın, A.A., Faz Değişim Malzemeleri ve Isı Enerjisinin Depolanması, *Kısaltılmış Doktora Tezi*, İstanbul Sanayi Odası, İstanbul, 2010.
- Küçük, A., Isıl Enerji Depolama Amaçlı Stearik Asit'in PMMA ve PS Polimerleriyle Mikro/Nano Boyutlarında Kapsüllenmesi ve Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, GÖ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat, 2015.

- Li, C., Li, Q., Cong, L., Li, Y., Liu, X., Xuan, Y., & Ding, Y., (2019), Carbonate salt based composite phase change materials for medium and high temperature thermal energy storage: A microstructural study, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 196, 25-35.
- Li, Y., Yu, S., Chen, P., Rojas, R., Hajian, A., & Berglund, L., (2017), Cellulose nanofibers enable paraffin encapsulation and the formation of stable thermal regulation nanocomposites, *Nano Energy*, 34.
- Kenisarin, M. M., (2014), Thermophysical Properties of Some Organic Phase Change Materials For Latent Heat Storage. A Review, *Solar Energy*, 107, 553–575.
- Mert, M.S., Sert, M., & Mert, H.H., (2018), Isıl Enerji Depolama Sistemleri için Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine Bir İnceleme, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6,1, 161-174.
- Nomura, T., Okinaka, N., & Akiyama, T., (2009), Impregnation of Porous Material with Phase Change Material for Thermal Energy Storage, *Materials Chemistry and Physics*, 115, 846-850.
- Oya, T., Nomura, T., Okinaka, N., & Akiyama, T., (2012), Phase change composite based on porous nickel and erythritol, *Applied Thermal Engineering*, 40, 373-377.
- Özyurt, E. E., Faz Değiştiren Malzemelerin Dış Duvarlarda Kullanımında Güneş Işınımı Katkısının Bina Enerji Etkinliği Açısından Değerlendirilmesi: İzmir İli Örneği, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2019.
- Qian, T., Li, J., & Deng, Y., (2016), Pore structure modified diatomite-supported PEG composites for thermal energy storage, *Scientific Reports*, 6, 32392.
- Qin, Y., Yu, X., Leng, G., Zhang, L., & Ding, Y., (2014), Effect of diatomite content on diatomite matrix based composite phase change thermal storage material, *Materials Research Innovations*, 18, S2-453

- Qin, Y., Leng, G., Yu, X., Cao, H., Qiao, G., Dai, Y., Zhang, Y., & Ding, Y., (2015), Sodium sulfate–diatomite composite materials for high temperature thermal energy storage, *Powder Technology*, 282, 37-42.
- Qu, M., Guo. C., & Li. L., (2021), Preparation, characterization and thermal properties of dodecanol, palmitic acid and hydroxylpropyl methyl cellulose as novel form-stable phase change materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147.
- Qu. M., Guo, C., & Zhang. X., (2017), Preparation and investigation on tetradecanol and myristic acid/cellulose form-stable phase change material, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 130, 1-10.
- Saeed, R., Schlegel, J., Castano Giraldo, C., & Sawafta, R., (2018), Preparation and enhanced thermal performance of novel (solid to gel) form-stable eutectic PCM modified by nano-graphene platelets. *The Journal of Energy Storage*, 15, 91-102.
- Sari, A., (2004), Form-Stable Paraffin/High Density Polyethylene Composites as Solid–Liquid Phase Change Material for Thermal Energy Storage: Preparation and Thermal Properties, *Energy Conversion and Management* 45, 2033-42.
- Sundararajan, S., Samui, A., & Kulkarni, P., (2017), Shape-stabilized poly(ethylene glycol) (PEG)-cellulose acetate blend preparation with superior PEG loading via microwave-assisted blending, *Solar Energy*, 144, 32-39.
- Şentürk, S., Kahraman. D., Alkan. C., & Gökçe. İ., (2011), Biodegradable PEG/cellulose, PEG/agarose and PEG/chitosan blends as shape stabilized phase change materials for latent heat energy storage, *Carbohydrate Polymers*, 84, 141-44.
- Tang, B., Wu, C., Qiu, M., Zhang, X., & Zhang, S., (2014), PEG/SiO₂–Al₂O₃ hybrid form- stable phase change materials with enhanced thermal conductivity, *Materials Chemistry and Physics*, 144, 162-167.
- Tang, L., Zhao, X., Feng, C., Bai, L., Yang, J., Bao, R., Liu, Z., Yang, M., & Yang, W., (2019), Bacterial cellulose/MXene hybrid aerogels for photodriven shape-stabilized composite phase change materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 203, 110174.
- Tao, Y. B., Lin, C., & He, Y. L., (2015), Preparation and thermal properties characterization of carbonate salt/carbon nanomaterial composite phase change material, *Energy Conversion and Management*, 97.

- Wan, Liqiang, Chao Liu, Daxian Cao, Xiao Sun, ve Hongli Zhu. 2020. "High Phase Change Enthalpy Enabled by Nanocellulose Enhanced Shape Stable Boron Nitride Aerogel". ACS Applied Polymer Materials (May1s).
- Wu, Y., & Wang, T., (2015), Hydrated salts/expanded graphite composite with high thermal conductivity as a shape-stabilized phase change material for thermal energy storage. Energy Conversion and Management, 101.
- Xiang, J., & Drzal, L., (2011), Investigation of exfoliated graphite nanoplatelets (xGnP) in improving thermal conductivity of paraffin wax-based phase change material, Solar Energy Materials and Solar Cells, 95, 1811-1818.
- Yang, G., Wang, B., Cheng, H., Mao, Z., Xu, H., Zhong, Y., Feng, X., Yu, J., & Sui, X., (2020), Cellulosic scaffolds doped with boron nitride nanosheets for shape-stabilized phase change composites with enhanced thermal conductivity, International Journal of Biological Macromolecules, 148.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretimi Trabzon'un Of ilçesinde tamamladıktan sonra 2012 yılında Affan Kitapçıoğlu Anadolu Lisesi'ni kazandı. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne girmeye hak kazandı ve dört yıllık lisans eğitiminin ardından 2020 yılında aynı kurumda yüksek lisans eğitimine başladı. Mart 2024 tarihinden itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Kompozit Malzemeler Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Uluslararası dergide yayımlanmış makalesi bulunmakta olup 1 adet BAP projesinde araştırmacı olarak yer almaktadır.

ÇAKIR, İngilizce bilmektedir.

Yüksek Lisans Tezi Kapsamında Yayımlanan Makale

- Hekimoğlu, G., Çakır, E., Sarı, A., Gencel, O., Tyagi, V. V., & Sharma, R. K. (2023). Shape stabilized microcrystalline cellulose/methyl stearate/graphene nanoplatelet composite with enriched thermal conductivity and thermal energy storage/release performance. *Cellulose*, 30(16), 10199-10214.