



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MODİFİYE EDİLMİŞ MANYETİK NANOPARTİKÜLLER
İÇEREN POLİHIPE KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE
ISIL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜRKAN CAN

DANIŞMAN: DOÇ. DR. HATİCE HANDE MERT

**YALOVA
HAZİRAN 2022**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MODİFİYE EDİLMİŞ MANYETİK NANOPARTİKÜLLER İÇEREN POLİHIPE
KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA
UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜRKAN CAN
185107001

DANIŞMAN: DOÇ. DR. HATİCE HANDE MERT

YALOVA
HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Gürkan CAN



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. Hatice Hande MERT'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için sevgili annem Feride CAN ve Sıla CAN'a ayrıca iş hayatında bana kattıkları değerler ve bilgiler için başta İsmail BÜLBÜL ve Mustafa MECİT olmak üzere tüm PUROTTO KİMYA ailesine teşekkür ederim.

Bu tez çalışması desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2020/YL/0011) teşekkür ederim.

Mayıs – 2022

Gürkan CAN





İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	xi
SİMGELER	xi
KISALTMALAR	xi
TABLolar LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER	5
2.1. Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması	7
2.1.1. Organik faz değiştiren maddeler.....	7
2.1.2. İnorganik faz değiştiren maddeler	8
2.1.3. Ötektik faz değiştiren maddeler.....	8
3. ŞEKİLCE KARARLI FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER	11
3.1. Şekilce Kararlı Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması	11
3.1.1. Mikro kapsülleme	12
3.1.1.1. Organik kabuk.....	13
3.1.1.2. İnorganik kabuk	13
3.1.1.3. Organik – inorganik hibrit kabuk.....	13
3.1.2. Polimer matris.....	14
3.1.2.1. Poliakrilatlar	14
3.1.2.2. Poliolefinler.....	14
3.1.2.3. Stirenik blok kopolimerleri	14
3.1.2.4. Polisakkaritler	15
3.1.2.5. Poliüretanlar	15
3.1.3. Nanomalzemeler	15
3.1.3.1. Bir boyutlu (1D) yapılar	15
3.1.3.2. İki boyutlu (2D) yapılar	16
3.1.3.3. Üç boyutlu (3D) yapılar	16

3.1.4. Gözenekli malzemeler	17
3.1.4.1. Gözenekli karbon	17
3.1.4.2. Grafit temelli yapılar	17
3.1.4.3. Poliüretan köpükler	18
3.1.4.4. Silika temelli yapılar	18
3.1.4.5. Kil mineralleri	18
3.1.5. Katı-katı FDMler	19
3.1.5.1. Polialkoller	19
3.1.5.2. Polimerler	20
4. ŞEKİLCE KARARLI FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERİN UYGULAMA ALANLARI	21
4.1. Tekstil Alanındaki Uygulamalar	22
4.2. İnşaat Alanındaki Uygulamalar	23
4.3. Sağlık ve Gıda Alanındaki Uygulamalar	23
5. EMÜLSİYON ŞABLONLU GÖZENEKLI POLİMERLER	25
5.1. PoliHIPE Yapısı ve Özellikleri	25
5.2. PoliHIPE Uygulama Alanları	26
5.3. Enerji Depolama	26
6. MATERYAL VE METOD	29
6. 1. Kullanılan Kimyasal Malzemeler	29
6.2. Deneysel Yöntem	29
6.2.1. Demir Oksit (Fe_3O_4) nanopartiküllerin hazırlanması	29
6.2.2. Demir Oksit partiküllerin CTAB ajanı ile modifikasyonu	29
6.2.3. Modifiye edilmiş demir oksit nanopartiküller katkılı poliHIPE kompozitlerin hazırlanması	30
6.2.4. Şekilce kararlı n-heptadekan içerikli kompozit FDMlerin üretimi	31
6.3. Malzemelerin Karakterizasyonu	31
6.3.1. Fe_3O_4 ve Modifiye Fe_3O_4 nanopartiküllerin karakterizasyonu	31
6.3.2. Modifiye Fe_3O_4 nanopartiküller katkılı poliHIPE köpüklerin karakterizasyonu	32
6.3.3. Şekilce kararlı n-heptadekan/poliHIPE kompozitinin karakterizasyonu	32
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
7.1. Fe_3O_4 ve Modifiye Fe_3O_4 Nanopartiküllerin Analiz Sonuçları	33
7.2. Modifiye Fe_3O_4 Nanopartikül Katkılı PoliHIPE Köpüklerin Analiz Sonuçları	36



7.3. Şekilce Kararlı N-heptadekan/PoliHIPE Kompozitinin Analiz Sonuçları.....	40
7.4. Termal Davranışın İncelenmesi.....	43
8. SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	49
TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER.....	57



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

ΔH	: Erime veya kristallenme gizli ısı (J/g)
δ_{BET}	: BET spesifik yüzey alanı (m^2/g)
T_d	: Bozunma sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_{max}	: Pik maksimum sıcaklık değeri ($^{\circ}C$)
V_{max}	: Pik maksimum sıcaklık değerinde bozunma hızı ($\%.dk^{-1}$)

KISALTMALAR

FDM	: Faz Değiştiren Maddeler
GG	: Genişletilmiş grafit
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
MFDM	: Mikrokapsülenmiş Faz Değiştiren Maddeler
NPG	: Neopentilglikol
PE	: Pentaeritriol
PEG	: Polietilen glikol
PMMA	: Polimetil metakrilat
PU	: Poliüretan
SEBS	: Stiren-B-(Etilen-ko-Butilen)-B-Stiren Triblok Kopolimeri
ŞKFDM	: Şekilce Kararlı Faz Değiştiren Maddeler
TAM	: tris (hidroksimetil) aminometan



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Şekilce kararlı FDMlerin bazı ticari örnekleri [43]	21
Tablo 4.1. (Devam) Şekilce kararlı FDMlerin bazı ticari örnekleri [43]	22
Tablo 7.1. Elde edilen poliHIPE destek malzemelerinin spesifik yüzey alanı değerleri.....	37
Tablo 7.2. PoliHIPE destek malzemelerinin TGA sonuçları.	39
Tablo 7.3. HP ve PHP-MAG4-HP'nin DSC sonuçları.....	42
Tablo 7.4. Literatürde bulunan diğer n-heptadekan bazlı kompozit FDM'ler ile üretilen kompozit FDMnin karşılaştırılması	42
Tablo 7.5. Numunelerin hesaplanan ısı depolama hızları	45





ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Faz değıştiren maddelerin (FDMlerin) genel sınıflandırılması [32].....	5
Şekil 2.2. Farklı FDM çeşitleri [33].....	6
Şekil 3.1. Organik FDMlerin şekilce kararlılığının sağlanmasında kullanılan destek malzemelerinin sınıflandırılması [43].....	12
Şekil 5.1. (a) Açık hücreli bir poliHIPE'nin ve (b) kapalı hücreli bir poliHIPE'nin SEM görüntüsü [72].....	26
Şekil 7.1. Sentezlenen Fe ₃ O ₄ parçacıklarının SEM (a) ve TEM (b) görüntüleri	33
Şekil 7.2. Sentezlenen Fe ₃ O ₄ nanoparçacıklarının EDX spektrumu.....	34
Şekil 7.3. Sentezlenen Fe ₃ O ₄ nanoparçacıklarının manyetizasyon eğrisi	35
Şekil 7.4. (a) Fe ₃ O ₄ nanopartiküllerin, (b) modifiye partiküllerin (CTAB-MAG) FTIR spektrumları	36
Şekil 7.5. CTAB-MAG katkılı poliHIPE destek malzemelerinin SEM görüntüleri: (a) PHP-MAG1, (b) PHP-MAG2, (c) PHP-MAG3, (d)PHP-MAG4	37
Şekil 7.6. PoliHIPE destek malzemelerinin (a) TGA ve (b) DTG termogramları.....	39
Şekil 7.7. (a) HP, (b) PHP-MAG4, (c) PHP-MAG4-HP'nin FTIR spektrumları.....	40
Şekil 7.8. Isıtma ve soğutma periyodunda HP ve PHP-MAG4-HP'nin DSC termogramları	41
Şekil 7.9. PHP-MAG4-HP'nin POM görüntüsü.....	42
Şekil 7.10. Sızıntı testi öncesi ve sonrası HP ve PHP-MAG4-HP'nin görüntüleri	43
Şekil 7.11. Üretilen malzemelerin termal performansının belirlendiği deneysel test sistemi	44
Şekil 7.12. PHP-MAG1, PHP-MAG2, PHP-MAG3 ve PHP-MAG4'ün ısıtma eğrileri	46
Şekil 7.13. PHP-MAG4, PHP-MAG4-HP ve saf n-HP sıcaklıklarının soğutma işlemleri sırasındaki zamanla değışimi	46



MODİFİYE EDİLMİŞ MANYETİK NANOPARTİKÜLLER İÇEREN POLİHIPE KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE ISIL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARI

ÖZET

Faz Değiştiren Maddeler (FDMler), ısı enerji depolama amaçlı kullanılabilen, sabit sıcaklıkta faz geçişiyle ortamdaki ısıyı alarak ya da ortama vererek ısı konforun sürekliliğini sağlayan maddelerdir. Bu malzemelerin faz geçişi esnasında katıdan sıvıya ya da sıvıdan katıya dönüşümleri söz konusu olduğundan akma, sızma, bulaşma sorunları ve büyük hacim değişimleri nedeniyle enerji dönüşüm proseslerinde doğrudan kullanılmaları uygun değildir. FDMler her ne kadar yüksek enerji depolama kapasitesine sahip olsalar da uygulamada karşılaşılan sızdırma problemi ve düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle performansları önemli oranda kısıtlanmaktadır. Bu nedenle son yıllarda kullanılan yaklaşım bu malzemeleri uygun destek malzemesine hapsedmek suretiyle şekilce (yapıca) kararlı FDMler oluşturmaktır. Bu sayede bu malzemelerin ısı iletkenlik, kimyasal kararlılık, alev direnci gibi birçok özelliğini de iyileştirmek mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, FDM olarak n-heptadekanın impregnasyonu için destek malzeme olarak demir oksit (Fe_3O_4) nanoparçacıkları içeren polimerize edilmiş yüksek iç fazlı emülsiyon (poliHIPE) köpüklerin tasarımı, hazırlanması ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Fe_3O_4 nanoparçacıkları, mekanik destekli birlikte çöktürme yöntemiyle sentezlenmiş ve emülsiyon sistemi ile uyumlaştırmak için modifiye edilmiştir. Demir oksit katkılı destek malzemeleri, emülsiyon kalıplama stratejisi ile hazırlanmış ve üretilen polimerik köpükler, şekilce kararlı n-heptadekan bazlı kompozit FDMlerin hazırlanması için kullanılmıştır. Üretilen kompozit FDMnin toplam gizli ısı değeri, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi ile 99,6 J/g olarak belirlenirken, n-heptadekanın impregnasyon oranı %67 olarak bulunmuştur. Ayrıca kompozit FDMnin performansı, sızıntı ve ısı davranış testleri ile araştırılmıştır. Analiz sonucuna göre, şekilce kararlı n-heptadekan bazlı kompozit FDMnin düşük sıcaklıktaki gizli ısı depolama uygulamaları için umut verici enerji malzemesi olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren maddeler (FDMler), PoliHIPE kompozit, Isı enerji depolama, Manyetik nanopartiküller.



PREPARATION OF POLYHIPE COMPOSITES CONTAINING MODIFIED MAGNETIC NANOPARTICLES AND THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATIONS

ABSTRACT

Phase Change Materials (PCMs) are materials that can be used for thermal energy storage and provide the continuity of thermal comfort by taking the heat from the environment with a constant temperature or giving it to the environment. Since these materials transform from solid to liquid or from liquid to solid during the phase transition, they are not suitable for direct use in energy conversion processes due to leakage, contamination problems and large volume changes. Although PCMs have high energy storage capacity, their performance is significantly restricted due to leakage problems and low thermal conductivity encountered in practice. For this reason, the approach used in recent years is to form shape stabilized PCMs by trapping these materials in the appropriate support material. In this way, it is possible to improve many properties of these materials such as thermal conductivity, chemical stability, flame resistance etc.

This thesis study based on design, preparation and characterization of polymerized high internal phase emulsion (polyHIPE) foams as support materials containing iron oxide (Fe_3O_4) nanoparticles for impregnation of n-heptadecane as phase change material (PCM). The Fe_3O_4 nanoparticles were synthesized mechanically assisted co-precipitation method and modified for harmonization with the emulsion system. Fe_3O_4 nanoparticles doped support materials were prepared via emulsion-templated strategy, and the produced polymeric foams used for preparation of shape-stabilized n-heptadecane based composite PCMs. The total latent heat of produced composite PCM was determined as 99.6 J/g by differential scanning calorimetry (DSC) analysis, while the impregnation ratio of n-heptadecane was found to be 67%. The performance of composite PCM was also investigated via leakage and thermal behaviour tests. Based on the analysis result, it was determined that shape-stabilized n-heptadecane based composite PCMs are promising energy materials for low temperature latent heat storage applications.

Keywords: Phase change materials (PCMs), PolyHIPE composite, Thermal energy storage, Magnetic nanoparticles.



1. GİRİŞ

Faz değiştiren maddeler (FDMler) aracılığıyla ısıl enerji depolama, enerji sistemlerinin verimli bir şekilde ısıl yönetimi için öne çıkan yöntemlerden biridir. FDMler, neredeyse sabit bir sıcaklıkta faz değişimi yoluyla enerjiyi gizli ısı olarak depolayabilen fonksiyonel malzemelerdir [1-3]. Bu akıllı malzemeler, gıda ürünlerinin taşınması ve korunması, elektronik cihazların soğutulması, binalarda ısıl konforun sağlanması, sera iklimlendirme sistemleri, termal düzenlemeli tekstil ürünlerinin geliştirilmesi gibi ısı yönetimi gerektiren birçok alanda ve uygulamada tercih edilmektedir [4-6]. Lineer alkanların karışımından oluşan parafinler, yüksek enerji depolama kapasitesi, düşük kimyasal reaktivite, düşük aşırı soğuma derecesi, düşük maliyetli olması, toksik olmaması ve aşındırıcı olmaması gibi üstün özellikleri sayesinde enerji depolama sistemlerinde kullanım için uygun olan organik FDM sınıfına ait kimyasallardır [7, 8]. Bununla birlikte, parafinin erime sıcaklığının üzerinde katıdan sıvıya faz geçişi sırasında görülebilen olası sızıntı problemi, bir kabuk malzemesinde FDMnin kısıtlanarak şekilce stabilizasyonunun sağlanmasını gerektirir. Genişletilmiş grafit [9], alümina [10], çeşitli kil mineralleri; sepiyolit [11], vermikülit [12], halloysit [13] gibi gözenekli malzemeler, kapiler kuvvet ve yüzey gerilimi kuvvetleri yoluyla gözenekli bir ağda FDMyi sınırlamak amacıyla kullanılabilir.

PoliHIPE'ler, yüksek iç fazlı emülsiyonların polimerizasyonu yoluyla elde edilen hiyerarşik gözenekli polimerlerdir [14, 15]. Bu malzemelerin uygun gözenek yapıları ve morfolojileri, filtrasyon/adsorpsiyon/ayırma prosesleri, doku mühendisliği, organik reaksiyonlar ve kataliz ve enerji depolama gibi birçok uygulamada destek materyali olarak kullanım için uygun olmalarını sağlar [15]. Bu malzemeler emülsiyon kalıplama (şablonlama) adı verilen bir yaklaşımla yüksek iç fazlı emülsiyonların (HIPE'ler) polimerizasyonu ile hazırlanır ve bu emülsiyonların stabilizasyonu çeşitli yöntemlerle sağlanabilir. HIPE'lerin stabilizasyonu farklı yollarla başarılabilir: yüzey aktif madde ile stabilize edilmiş yüksek iç fazlı emülsiyonlar (yüzey aktif madde ile stabilize edilmiş HIPE'ler), partiküllerle stabilize edilmiş Pickering yüksek iç fazlı emülsiyonlar (partikül stabilize Pickering HIPE'ler) veya surfaktan içeren-partikül stabilize Pickering HIPE'ler [16]. Bu stabilizasyonu sağlamak için yüksek miktarda yüzey aktif madde ve ayrıca çeşitli işlevselleştirilmiş

katı parçacıklar kullanılabilir. Katı parçacıklar sadece stabilizasyona katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda fonksiyonel merkezler olarak hareket edebilir ve polimer zincirleri arasında çapraz bağların oluşumunda yer alabilir veya fonksiyonel özellikleri aracılığıyla poliHIPE'lere yeni özellikler kazandırabilirler [16, 17]. Örneğin, parçacıkların işlevselliğine ve tipine bağlı olarak, poliHIPE'lerin termal, elektriksel veya mekanik özellikleri de geliştirilebilir. Son zamanlarda, Pickering HIPE'lerden PoliHIPE'nin hazırlanmasına yönelik çalışmalar, nanoparçacıkların yüzeylerini modifiye ederek hidrofilik-hidrofobik özellikleri değiştirmeye ve böylece yağ-su arayüzünde tutulmalarını sağlamaya odaklanmıştır.

Son yıllarda, FDM'nin şekil stabilizasyonunun sağlanması için iskelet olarak kullanılmak üzere gözenekli polimer yapılar sentezlenmiştir [18-23]. Puupponen ve ark. mevsimsel termal enerji depolama amacıyla poliHIPE köpüklerle polyol-polistiren kompozitler hazırlanmışlardır [18]. Biyo-bazlı bir FDM olarak bütül stearat, emülsiyon şablonlama yöntemiyle sentezlenen pullulan monolitleri ile kapsüllenmiştir [19]. Mert H.H., bina uygulamalarında termal enerji depolama için yüzeyi modifiye edilmiş montmorillonit içeren n-hekzadekan bazlı poliHIPE kompozitleri hazırlamıştır [20]. Oktadekan içeren esnek kapalı hücreli poliHIPE'ler, Zhang ve diğerleri tarafından gizli ısı depolama için üretilmiştir [21]. Bir başka çalışmada, termal enerji depolama uygulamalarında kullanım için, karbon nanofiber içeren poliHIPE monolitleri destek materyali olarak sentezlenmiş ve FDM olarak hekzadekanol vakumda emdirme işlemi ile emprenye edilmiştir [22]. Türkoğlu ve ark., selüloz nanokristaller içeren poliHIPE iskeletleri sentezlemiş ve tek adımlı impregnasyon yöntemiyle şekilce kararlı n-hekzadekan bazlı kompozit FDMler hazırlamıştır [23].

N-heptadekan, termal enerji depolama ile ilgili bugüne kadar birçok araştırma çalışmasında tercih edilmiş, parafin tipi organik bazlı bir FDMdir. N-heptadekan, Sarı ve diğerleri tarafından pasif güneş enerjisi depolama sistemlerinde potansiyel kullanım için polistiren kabuk ile mikro/nano boyutunda kapsüllenmiştir [24].

Irani ve diğerleri tarafından patates nişastası kabuk materyali olarak kullanılarak n-heptadekan mikroenkapsülasyonu da gerçekleştirilmiş ve hazırlanan mikrokapsüllerin termal enerji depolama uygulamaları için farklı matrislerde kullanılabileceği bildirilmiştir [25]. Başka bir çalışmada, grafenin nişasta kabuğu

ile işbirliği ile n-heptadekan mikrokapsülleri hazırlanmış ve grafen miktarının mikrokapsüllerin özelliklerine etkisi incelenmiştir [26]. Li ve diğerleri tarafından heksandiol diakrilat polimeri, mikro akışkan teknikle kontrol edilebilir boyutta n-heptadekan mikroenkapsülasyonu için kabuk materyali olarak kullanılmıştır [27]. Sarabandi ve ark. fiziksel ve kimyasal aktivasyon yolu ile çam kozalaklarından gözenekli aktif karbon üretmiş ve bunu binaların termal yönetimi için n-heptadekan bazlı nanokompozitlerin hazırlanmasında kullanmıştır [28]. Hekimoğlu ve diğerleri tarafından karbonize limon kabuğu da gözenekli bir destek malzemesi olarak hazırlanmış ve n-heptadekan esaslı kompozitler vakumda emdirme tekniği ile üretilmiştir [29].

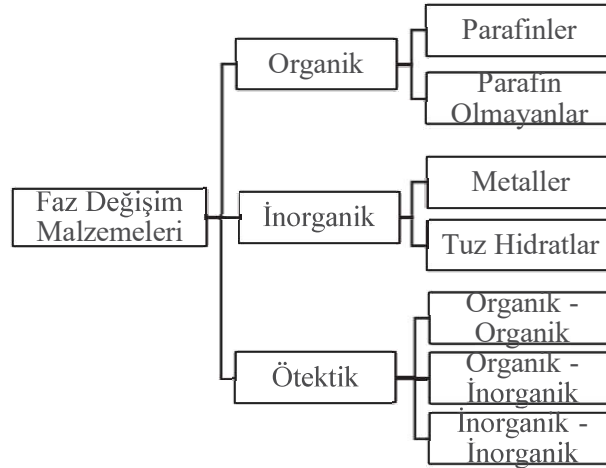
Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bu tez çalışmasında düşük sıcaklıkta gizli ısı depolama uygulamaları için gelişmiş termal özelliğe sahip sızdırmaz, şekilce kararlı kompozit FDMler elde etmek amacıyla, ilk kez n-heptadekan, yüzey modifiye Fe_3O_4 nanopartikülleri destekli poliHIPE köpüğe emprenye edilmiştir. Polimerizasyon ortamına farklı yüzdelerde dahil edilen emülsiyon sistemi ile uyumlaştırılmış Fe_3O_4 nanoparçacıklarının gözenek morfolojisine, ısıl kararlılığa ve gözenekli destek malzemelerinin yüzey alanlarına katkısının belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen şekilce-kararlı kompozit FDMnin sızdırmazlık özelliği test edilmiş, n-heptadekanın gözenekli polimerik destek malzemesine katılma oranı hesaplanmış ve üretilen kompozit FDMnin enerji depolama kapasitesi belirlenmiştir. Ayrıca laboratuvar ölçekli performans testleri ile enerji malzemesinin ısıl davranışı araştırılmıştır.

2. FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER

Faz değiştiren maddeler (FDMler), belli bir sıcaklıkta faz geçişi gösteren ve bu faz değişikliği esnasında enerjiyi gizli ısı olarak depolayabilen malzemelerdir. Faz değişimi esnasında maddenin ortamdan aldığı veya ortama saldığı bir enerji söz konusudur. Bu enerji ise *ısıl enerji* olarak adlandırılmaktadır. FDMlerin faz değişimi ortam sıcaklığının değişmesine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Faz değişim süresince sıcaklık, sabit kalarak iç enerji artışı ile ısı enerjisi madde tarafından gizli ısı olarak depolanmaktadır [30].

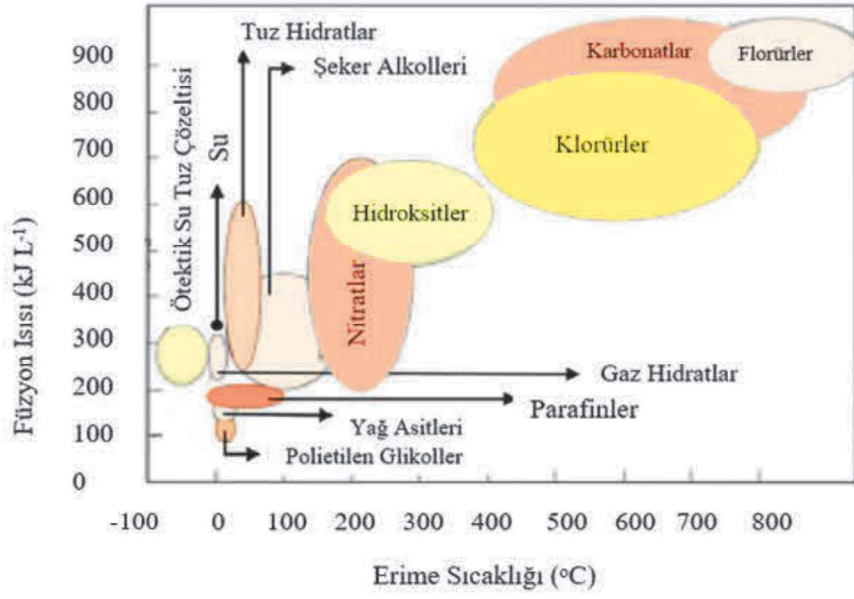
Katıdan gaza ve sıvıdan gaza faz geçişlerinde daha yüksek gizli ısı değeri görülmektedir. Sıvıdan sıvıya faz geçişlerinde ise depolanabilecek enerji miktarı daha azdır. Katıdan katıya faz geçişlerinde kristal yapı değişikliğinden ötürü, hacim değişimi en az seviyededir. Ancak depolanabilecek gizli ısı enerjisi miktarı ise daha azdır [31].

1983'te Abhat tarafından ısıl enerji depolamada kullanılan FDMler, kimyasal bileşimlerine göre organik, inorganik ve ötektik olmak üzere sınıflandırılmış ve Şekil 2.1'de gösterilmiştir [32].



Şekil 2.1. Faz değiştiren maddelerin (FDMlerin) genel sınıflandırılması [32]

FDMler tektik su-tuz çözeltisi, su, tuz hidratlar, polietilen glikoller, yağ asitleri, nitratlar, hidroksitler, klorürler, karbonatlar ve florürler olarak da sınıflandırılabilir. Bu tip FDM'lerin tipik erime sıcaklığı ve füzyon ısısı Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Farklı FDM çeşitleri [33]

Isıl enerji depolamada kullanılmak üzere yeni maddelerin araştırmasına yönelik yürütülen çalışmaların yanı sıra mevcut FDMler kullanılarak malzemelerin kullanım alanlarının genişletilmesi içinde birçok çalışma bulunmaktadır. FDMlerin binaların ısı yönetimi, elektronik cihazların soğutulması, ısı regülasyona sahip akıllı tekstil malzemelerinin üretilmesi, gıdaların belli sıcaklıkta bozunmadan taşınması, medikal alanda ısıya hassas dokuların/organların korunmasının sağlanması gibi pek çok alanda kullanım potansiyeli mevcuttur.

FDMlerin kullanım alanını belirleyen en önemli iki özelliği yüksek gizli ısı entalpisine ve uygun faz değişim sıcaklığına sahip olmasıdır. Bu iki özellik bir malzemenin temel termo-fiziksel özelliklerinin sınırlarını belirler [34]. Ancak bu temel özelliklerin yanında enerji depolama sistemlerinde kullanılacak FDMlerin termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik açıdan birtakım özelliklere sahip olması gerekir. Bu özellikler aşağıda sıralanmıştır:

Termodinamik açıdan sahip olması gereken özellikler

- Faz değiştirme sıcaklığının istenilen uygulama alanının gerektirdiği sıcaklık aralığında olması,
- Birim kütledeki faz değişim gizli ısısının yüksek olması,
- Yüksek ısı iletkenliğe sahip olması,

- Faz geçiş döngüsünün düzenli olması,
- Buhar basıncının düşük ve faz geçişi sırasındaki hacim değişiminin küçük olması gerekmektedir.

Kinetik açıdan sahip olması gereken zellikler

- Aşırı soğumanın engellenmesi için çekirdekleşme hızının büyük olması,
- Kristal büyüme hızının yüksek olması gerekmektedir.

Kimyasal açıdan sahip olması gereken zellikler

- Kimyasal olarak kararlı olması ve çok sayıda ısıl döngüye dayanıklı olması,
- Korozi olmaması,
- Zehirli, yanıcı ve patlayıcı özellikte olmaması gerekmektedir.

Ekonomik açıdan sahip olması gereken zellikler

- Temini kolay ve uygun fiyatlı olması gerekmektedir.

2.1. Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması

FDMLer faz değişim sıcaklığı ve faz değişimi sırasında gözlenen gizli ısı depolama özellikleri temelinde organik, inorganik ve ötektik faz değiştiren maddeler olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

2.1.1. Organik faz değiştiren maddeler

Organik FDMLer, parafin ve parafin olmayan olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Parafinler düz zincir yapısındadırlar. Karbon zincirinin uzunluğundaki artışa bağlı olarak erime sıcaklıkları ve gizli ısı değerleri artmaktadır. Parafinlerin içerdikleri karbon sayılarına göre erime sıcaklıkları değişmekte olup, karbon atom sayıları 13 ila 28 arasında olduğunda erime sıcaklıkları -5 ile 60°C arasında değişiklik göstermektedir [34].

Parafin olmayan gruptaki FDMLere bakıldığında parafinlere yakın özellikler göstermemekte, her bir FDM kendine özgü özellikler sergilemektedir. Ucuz olmaları, bol bulunmaları ve daha kararlı olmaları parafinler için başlıca tercih sebebidir. Ayrıca organik FDMLerin pek çok avantajı vardır:

- FDMler geniş sıcaklık aralığında (20– 70 °C) kullanılabilir olup katı-sıvı faz geçişi göstermektedirler.
- Erime esnasında düşük yoğunluğa sahip olmaları sebebiyle küçük hacim değişikliği gösterir ve faz ayrımına uğramazlar.
- FDMler kimyasal olarak kararlıdır.
- Erime gizli ısıları yüksektir (120 J/g - 210 J/g).
- Zehirli ve tahriş edici olmamalarından ötürü geri dönüştürülebilirler.
- Bu malzemelerin en büyük avantajlarından biri ise maliyetlerinin düşük olmasıdır.

Organik FDMlerin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar 0,2 W/mK civarında düşük ısı iletkenliğine sahip olmaları, yüksek yüzey alanı gerektirmeleri, kolay alevlenebilmeleri ve her zaman plastik kaplarla uyum göstermemeleri ve sabit bir erime sıcaklığına sahip olmamaları şeklinde sıralanabilir [35].

2.1.2. İnorganik faz değiştiren maddeler

İnorganik FDMler tuzlar, tuz hidratlar, metaller ve alaşımlar olmak üzere 4 sınıfta gruplandırılabilir. Organik esaslı FDMlere kıyasla inorganik FDMler birim hacimde iki kat daha fazla enerji depolama kapasitesine sahiptirler [36, 37]. İyi termal iletkenlik, yüksek erime ısı, kolay bulunabilmeleri, ucuz olmaları ve yanıcı olmamaları inorganik FDMlerin avantajlarıdır. İnorganik FDMlerin dezavantajları ise; birçok metale karşı korozif olmaları, tuz ve tuz hidratların aşırı soğuma davranışı sergilemeleri, hacim değişiminin yüksek olması ve faz ayrılması görülmesi şeklinde sıralanabilir.

2.1.3. Ötektik faz değiştiren maddeler

Ötektik karışım, her birinin düzenli bir şekilde eridiği ve katılaştığı iki veya daha fazla bileşenin birleşimi şeklinde olabilir. Ötektik FDMler eş anlı olarak erime ve kristallenme özelliği göstermekte ve faz ayrımına uğramamaktadırlar [38]. Ayrıca hacimsel ısı depolama yoğunluklarının yüksek olması, tek bir erime sıcaklığına

sahip olmaları, ötektik FDMlerin avantajları olarak sayılabilir. En büyük dezavantajı ise termofiziksel özellikleri hakkında sınırlı veri olmasıdır [39].



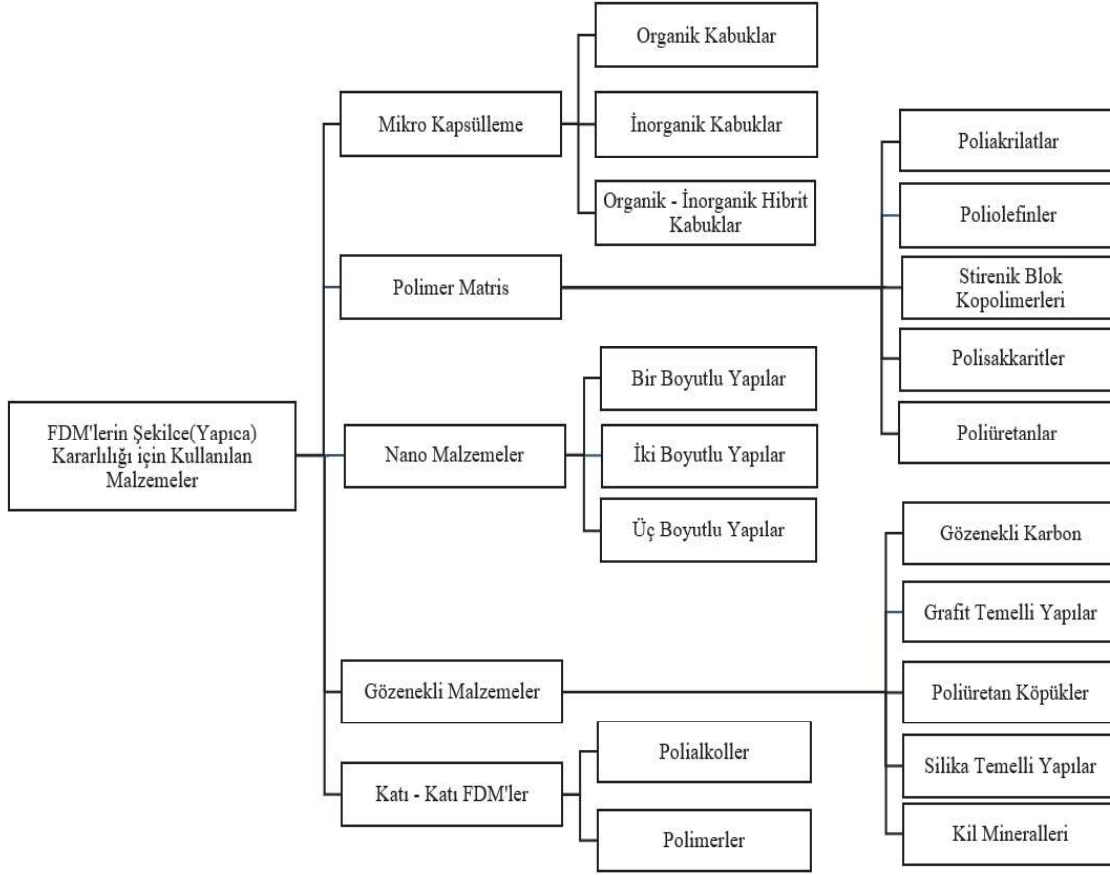


3. ŞEKİLCE KARARLI FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER

FDMlerin faz değişim esnasında sızıntı yapması ve hacim değişikliği, düşük ısı iletkenliği gibi durumlar göz önüne alındığında bu olumsuz koşullar, kapsamlı araştırmaları ve çalışmaları beraberinde getirmiştir. Yapılan birçok araştırma ve çalışmaların sonucunda FDMlerin mikrokapsülasyon işlemiyle ya da metal köpük gibi bir destekleyici malzeme içine emdirilmesiyle hazırlanan *Şekilce Kararlı Faz Değiştiren Maddeler* ortaya çıkmıştır [40]. Şekilce kararlı FDMler, FDMnin erime sıcaklığının üstünde bile sıvı sızıntısı olmadan kompozit materyali katı ve sabit tutabilen, destekleyici malzemeler kullanılması prensibine dayanmaktadır [41]. Bu malzemeler yüksek termal iletkenlikleri ve termal stabilitelelerinden dolayı birçok uygulama alanına sahiptir. Bu uygulama alanlarından bazıları soğuk termal enerji deposu, güneş emme-soğutma sistemleri, güneş enerjisi termik santralleridir. Şekilce kararlı FDMler, faz değişim özelliği olan madde (FDM) ve bir destek malzemesinden oluşur. Erime veya katılaşıma işlemleri sırasında faz değişim özelliği olan madde gizli ısıyı depolar veya serbest bırakır, destek malzemesi ise erimiş fazın sızmasını önleyerek tüm sistemin katı halde kalmasını sağlar [42]. FDMlerin şekilce kararlılığı için birçok farklı destek malzemesi kullanılabilir.

3.1. Şekilce Kararlı Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması

Şekilce kararlı FDMleri hazırlamak amacıyla kullanılan mikro kapsülleme yöntemi hakkında birçok araştırma yapılmıştır. Fakat düşük ısı transfer hızı ve mikrokapsülasyon işlemi için gerekli hazırlığın getirdiği yüksek maliyet ve ek işlemler gibi nedenlerden dolayı bu destek malzemeleri, sınırlı uygulama alanına sahiptir. Gözenekli malzemeler ise yüzey alanlarının elverişli olması, yüksek gözenek hacmi, yüksek depolama kapasiteleri ile oldukça ilgi görerek adsorpsiyon gibi uygulamalarda da hâlihazırda yaygın olarak kullanılmaktadır. Faz değiştiren maddelerin şekilce kararlılığı için kullanılan diğer destek malzemeleri de oldukça ilgi görmektedir. Bu malzemeler, Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Organik FDMlerin şekilce kararlılığının sağlanmasında kullanılan destek malzemelerinin sınıflandırılması [43]

3.1.1. Mikro kapsülleme

Mikrokapsülasyon tekniği, günümüzde bina ve tekstilde termal düzenleme amacıyla kullanılacak mikrokapsülenmiş faz değiştiren maddelerin (MFDMLerin) ticarileştirilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Mikrokapsülasyon sıvı veya katı parçacıkların ince bir film içine hapsedilmesidir. Mikrokapsülasyonun en önemli amacı, MFDMLnin katı veya sıvı fazını belirli bir hacimde tutmak ve çevredeki ortamla etkileşmesini önlemektir [43].

Kimyasal, fiziksel ve fiziko-kimyasal yöntemler olmak üzere mikrokapsülasyon üç farklı yolla gerçekleştirilebilir. Emülsiyon, süspansiyon, çöktürme veya dispersiyon

polimerizasyonu ve in-situ polimerizasyonu gibi yerinde prosesler, mikro kapsülleme için kullanılan en önemli kimyasal tekniklerdir. Fiziksel yöntemler ise püskürterek kurutma, santrifüj, püskürtmeli soğutma (spray cooling), püskürtmeli kurutma (spray drying), akışkan yatak (fluidized bed) prosesleri gibi teknikleri içerir. Son olarak fiziko-kimyasal yöntemler, sol-jel teknolojisinin yanı sıra basit ve karmaşık bir koaservasyon içermektedir. FDMlerin mikro boyutta kapsüllemesinde kabuk malzeme seçimi, FDM performansının kabuk malzemelerinin kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olması sebebiyle çok önemlidir. Organik, inorganik ve organik-inorganik hibrit olmak üzere kimyasal yapıya bağlı olarak üç ana tür kabuk malzemesi vardır [43].

3.1.1.1. Organik kabuk

Temel olarak MFDMlerin organik esaslı kabuk malzemeleri melamin, formaldehit reçinesi, üre formaldehit reçinesi, poli (üre-üretan), poliüre ve akrilik reçinedir. Yapısal esneklik ve tekrarlanan faz değişim işlemi esnasında hacim değişikliğine karşı mükemmel bir dayanıklılığa sahip mikrokapsüller sunmalarına karşılık, organik kabuk malzemelerinin kimyasal-termal kararlılıkları çok düşüktür [43].

3.1.1.2. İnorganik kabuk

İnorganik kabuk malzemeleri silika, titanya, kalsiyum karbonat ve çinko oksit gibi, sert kabuk oluşturan malzemelerdir. İnorganik kabuklu MFDMler organik kabuklu MFDMlere kıyasla mükemmel termal stabiliteye, nispeten yüksek termal iletkenliğe, daha iyi mekanik dayanıklılığa, kimyasal olarak inertliğe sahiptir ve zehirli değildirler. İnorganik MFDMlerin bu özellikleri otomotiv uygulamaları ve binaların termal yönetimleri için çok uygundur [43].

3.1.1.3. Organik – inorganik hibrit kabuk

Organik kabuklu MFDMlere göre inorganik kabuklu MFDMlerin uygulamada daha düşük dayanıklılık göstermelerinin sebebi, inorganik malzemelerin organik malzemelerden oldukça kırılma eğilimli olmalarıdır. Ayrıca tekrarlanan faz geçisi esnasında meydana gelen hacim değişikliğinden kaynaklanan gerilimi sürdüremezler. Organik kabuklara inorganik katkı maddeleri (gümüş nanopartiküller, demir nanopartiküller, silikon nitrit vb.) ekleyerek üstün termal iletkenlik, kimyasal stabilite ve mekanik sağlamlık elde etmenin olağanüstü avantajları bazı çalışmalarda görülmüştür [43].

3.1.2. Polimer matris

Mikro kapsülleme tekniğinin, yüksek işlem maliyeti ve uygulamaya göre doğru malzemelerin seçilmesi ve tasarlanması açısından zor olması, araştırmacıları FDMleri polimer matrisinde birleştirerek uygun maliyetli ve basit tekniklere sahip olan şekilce kararlı FDMleri elde etmeye teşvik etmiştir. Destekleyici malzemeler olarak kullanılan başta poliakrilatlar, poliolefinler, stirenik blok kopolimerleri, polisakkaritler ve poliüretanlar olmak üzere çok çeşitli polimerler vardır.

3.1.2.1.Poliakrilatlar

Sarı ve diğ. çalışmalarında FDMlerin şekil stabilizasyonu için destekleyici materyaller olarak akrilik polimerlerin kullanılabileceğini rapor etmişlerdir [44]. Bu çalışmalarında araştırmacılar, metakrilik asit-metil metakrilat kopolimer ile miristik asit, palmitik asit ve stearik asit karışımlarını hazırlamışlardır. Hazırladıkları kompozitlerdeki bütün yağ asitlerinin maksimum kütle içeriği % 70 olarak bulunmuş ve 50 -70 °C sıcaklık aralığında sızıntı göstermemiştir. Bir başka çalışmalarında ise, PMMA'ı (polimetilmetakrilatı) destek malzemesi olarak kullanmışlar ve PEG/PMMA karışımlarından oluşan yeni şekilce kararlı FDMler hazırlamışlardır [45].

3.1.2.2. Poliolefinler

Yüksek ve düşük yoğunluklu polietilenler uygun fiziksel özelliklere ve kimyasal afiniteye sahip olduklarından dolayı organik FDMler için destekleyici malzeme olarak kullanılmaktadır. Kaygusuz ve diğ. bir çalışmalarında parafini kapsüllemek için destek malzemesi olarak HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) matrisi kullanmışlar ve böylece parafin/HDPE şeklinde şekilce kararlı FDM kompozitleri hazırlamışlardır [46].

3.1.2.3. Stirenik blok kopolimerleri

Stiren-b- (etilen-ko-butilen) -b-stiren triblok kopolimeri (SEBS), lastik bloğunda çift bağ bulunmamasına bağlı olarak üstün termal ve ışık stabilitesi göstermektedir. SEBS içindeki etilen-bütillen orta bloğunun çözünürlük parametresi parafine benzemektedir [47]. Parafin bazlı şekilce kararlı FDMleri hazırlamak için uzun vadeli stabilite ve uyumluluk açısından SEBS uygun bir destekleyici malzemedir [48].

3.1.2.4. Polisakkaritler

Şekilce kararlı FDMlerin hazırlanmasında polisakkaritler ve bunların türevleri; selüloz, selüloz asetat, kitosan, agaroz ve şekerler destekleyici malzeme olarak kullanılmıştır. Doğal olarak oluşan bu polimerler, termal düzenleyici kumaşlar, mobilyalar ve inşaat malzemeleri için oldukça elverişli ve ideal destekleyici malzemelerdir. Şentürk ve diğerleri tarafından şekilce kararlı FDM olarak PEG/selüloz, PEG/agaroz ve PEG/kitosan karışımları hazırlanmıştır [49].

3.1.2.5. Poliüretanlar

Diğer polimer matrisler ile poliüretan matrisler karşılaştırıldığında poliüretan matris, katı-katı faz geçişine maruz kalabildiği için bir gizli ısı depolama malzemesidir. Poliüretanlar, sızıntı problemini ortadan kaldırmasının yanı sıra yüksek termal enerji depolama yoğunluğu özelliklerinden dolayı FDM kompozitlerin hazırlanmasına olanak sağlamaktadır [43].

3.1.3. Nanomalzemeler

Nanobilim ve nanoteknoloji şekilce kararlı FDM'lerinin geliştirilmesinde önemli bir yere sahiptir. Nanoyapılı malzemeler, FDMlerin şekilce kararlılığını gerçekleştirmek için boyuna (1D), arayüzey (2D) ve gözenekli (3D) olacak şekilde incelenmiştir [43].

3.1.3.1. Bir boyutlu (1D) yapılar

Genellikle organik FDMler bir boyutlu olacak şekilde malzeme içerisine hapsedilmektedir. Bu hapsedilme uzunlamasına olacak şekilde de gerçekleştirilebilmektedir. Nanofiberler tek eksenli ve eş-ksenli elektrospınleme yöntemleri ile organik FDMlerin şekilce kararlılığı için üretilmektedir. Bu yöntemler sonucunda yüksek FDM kapsülleme verimliliğine sahip nanofiberler kolaylıkla elde edilmektedir.

SiO₂, poliüretan, selüloz asetat ve polietilen tereftalat gibi malzemeler bu amaçla kullanılan destek malzemeleridir. Organik FDMlerin elektrospınlenmesinde bu destek malzemeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler sayesinde doğrudan kullanım, uygun maliyet sağlanarak ek kapsüllemeye ihtiyaç duyulmadan şekilce kararlı nanofiber FDMler elde edilmektedir. Nanofiber FDMler çoğunlukla tekstil sektöründe termal düzenleyici lifler olarak karşımıza çıkmaktadır [50, 51].

3.1.3.2. İki boyutlu (2D) yapılar

Bu tür yapılarda nanomalzemelerin arasında arayüzey etkileşimi sayesinde organik FDMler bulunmaktadır. İki boyutlu yapılar için en önemli örnek grafendir. Teorik termal iletkenliğinin yüksek olması, geniş yüzey alanı ve yüksek işlevsellik gibi özellikleri sebebiyle FDMnin hapsedilmesinde grafen yaygın olarak tercih edilmektedir. Grafen ve FDMlerin oluşturacakları kompozit yapı karıştırılma, vakumla emdirilme veya aşılama yöntemleri ile elde edilmektedir. Bu yöntemler sayesinde kompozit istenilen derecede şekilce kararlı yapıya sahip olmaktadır [52].

FDMnin faz değişim davranışını kontrol etmek için grafenin yüzey özellikleri ve ara katman mesafesi değiştirilebilmektedir. Grafenin yüksek termal ve elektrik iletkenliği FDMler için enerji dönüşümünü artırmaktadır. Bu, grafen kullanılan FDM kompozitleri için en önemli avantajlardan birisidir [53].

Grafen destekli FDM kompozitlerinin kullanım alanları güneş termal enerji depolama, elektronik cihazlar ve Li-iyon pillerdeki termal uygulamalardan oluşmaktadır [54].

3.1.3.3. Üç boyutlu (3D) yapılar

Üç boyutlu yapılarda FDMler, nanogözenekli yapıya kendiliğinden bağlanmaktadır. Nanogözenekli yapıya FDMler vakumda emdirme yolu ile sızdırılıp monte edilmektedir. Üç boyutlu yapıların gözenek çapları 1 - 1000 nm arasında değişiklik göstermektedir. Bu tür yapıların en bilinenleri karbon nanotüp ve grafen oksittir. Bu malzemeler kendiliğinden birleşme ve dondurarak kurutma yöntemleri kullanılarak üç boyutlu yapılar oluşturulmaktadır. Erimiş FDM vakumda emdirme yöntemi ile şekilce kararlı FDMler üretilmektedir.

Üç boyutlu gözenekli yapılar, maksimum FDM miktarı elde etmeyi ve faz geçişi sırasında sızıntıyı önlemeyi sağlamaktadır. FDMlerin ısı transferini ve ısı iletkenliğini artırmak için gözeneklerin oluşturdukları ağlar birbirine bağlanmaktadır. FDMlerin yüksek enerji depolama yoğunluğu üç boyutlu yapılarda artmaktadır.

İdeal termal amortisörler ve ısı emiciler olarak elektronik cihazların termal yönetim sisteminde yüksek enerji depolama yoğunluğu olan FDMler kullanılmaktadır [55, 56].

3.1.4. Gözenekli malzemeler

Mükemmel destekleyici malzemeler olarak bilinen biyokütle, çeşitli mineraller, killeri, lifler ve polimerler işlev görebilen gözenekli yapıya uyarlanabilmektedir. Gözenekli malzemeler üstün emilim özelliğine sahiptir. Üstün emilim özelliği düşük yoğunluk, geniş yüzey alanı ve geniş gözenek boyutu dağılımından kaynaklanmaktadır. Gözenekli malzemeler beş alt başlıkta incelenmektedir. Bunlar; gözenekli karbon, grafit temelli yapılar, poliüretan köpükler, silika temelli yapılar ve kil mineralleridir.

Hidrojen bağları, Van der Waals kuvveti gibi kimyasal bağlar ve yüzey gerilimi sayesinde FDMler gözeneklerde tutunmaktadır. FDMlerin sızmasını önlemek için bu kuvvetler önem kazanmıştır. FDMlerin şekilce kararlılığını sağlamak için en çok kullanılan gözenekli malzeme grafitir. Yüksek gözenekli ve düşük yoğunluklu özellikleri nedeniyle grafit gözenekli malzemelerin en iyisi olarak bilinmektedir [57, 58].

3.1.4.1. Gözenekli karbon

Gözenekli karbonlu malzemeler toksik olmayan, yüksek emici ve ekonomik olmakla beraber biyokütle ve atıklardan kolaylıkla elde edilmektedir. Bu sebeple ideal destekleyici malzemeler olarak kabul edilmektedirler. Mezo-gözenekli yapıya sahip karbonlar büyük emme kabiliyetine sahiptir. Mezo-gözenekli yapının bu özelliği mükemmel kılcallık ve FDMlerle güçlü etkileşim sayesinde gerçekleşmektedir. Bu sayede gözenekli karbon ile FDMler yüksek sınırlanma etkisi kazanmaktadır. Makro gözenekli karbonların emme kabiliyetleri mezo gözenekli yapıya göre daha düşüktür. Gözenekli karbon destekli FDM kompozitlerinin en önemli özellikleri, yüksek termal emme göstermeleri ve mükemmel şekil kararlılığıdır. Bu özellikleri sayesinde şekilce kararlı FDMlerin yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlanmaktadır. Gözenekli karbon malzemeleri, güneşden-termal enerji depolama uygulamalarında kullanılan yeni malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır [59].

3.1.4.2. Grafit temelli yapılar

Siyah bir karbon biçimi olan grafit, katmanlı ve düzlemsel bir yapıya sahiptir. Grafit kendiliğinden hafif hidrofilik yapıdadır ve düzlemleri arasındaki mesafe küçüktür. Bu nedenle FDMnin grafik katmanları arasına eklenmesi zorlaşmaktadır. Kimyasal

ve ısıtma işlemi genişletilmiş grafit (GG) sentezi sayesinde bu problem çözülmektedir. Genişletilmiş grafit üretmek için mikrodalga ısıtım gücü, kolay ve daha az enerji tüketen bir yöntemdir. FDM kompozitlerinde termal iletkenliği ve alev geciktiriciliği gibi özellikleri artırmak için genişletilmiş grafit, katkı maddesi işlevi görmektedir. Genişletilmiş grafit destekli FDM kompozitleri yüksek FDM yüklenmeleri sayesinde şekil kararlılığı da kazanmaktadır. Organik FDMlerdeki yüksek afinite, GG destekli FDM kompozitlerin güneş enerjisi kaynaklı uygulamalarda, yapı malzemelerinde ve diğer termal enerji depolama uygulamalarında kullanılmasını sağlamaktadır [60, 61].

3.1.4.3. Poliüretan köpükler

Mükemmel yalıtım ve yüksek enerji emiciliğine sahip hafif malzemeler olan poliüretan köpükler, yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Şekilce kararlı FDM kompozitlerini geliştirmek için poliüretan köpüğe mikro ve/veya nanokapsüllenmiş FDM ilave edilmektedir. Liang ve diğerleri tarafından yürütülen bir çalışmada silika kabuğu ile nanokapsüllenmiş n-oktadekan içeren sert PU köpükler hazırlanmıştır [62].

Bir diğer çalışmada ise Qu ve ark. polimetil metakrilat kabuğu ile mikrokapsüllenmiş n-oktadekan içeren poliüretan köpük hazırlamışlardır [63]. Aydın ve diğ. ise, kapsüllenmemiş yağ asidi ester bazlı FDMnin sert poliüretan köpük içine dahil edilmesine dair çalışmalar yürütmüşlerdir [64].

3.1.4.4. Silika temelli yapılar

SiO_2 'nin gözenekli bir formu olan silika jel mekanik özellikleri, geniş yüzey alanı, ısıtma ve kimyasal kararlılık gibi özellikleri barındırmaktadır. FDMlerin şekilce kararlılığının sağlanmasında bu özellikleri sebebiyle silika temelli yapılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Wang ve ark. şekilce kararlı polietilen glikol- SiO_2 kompozitlerini sol-jel yöntemi ile üretmişlerdir [65].

Tang ve ark. ultrasonik destekli sol-jel yöntemi ile şekilce kararlı PEG/ SiO_2 kompozit FDM üretimi için hızlı, yardımcı çözücü ve yüzey aktif madde içermeyen bir yöntem önermişlerdir [66].

3.1.4.5. Kil mineralleri

Kil mineralleri doğal gözenekli yapısı sayesinde organik FDMleri absorbe edilebilmektedir. Kil bazlı şekilce kararlı FDMlerin üretiminde en yaygın olarak

kullanılan malzemeler; diyatomit, kaolin, vermikülit, perlit, opal, bentonit ve kaolinit gibi malzemelerdir. Bu malzemeler, yapı malzemeleri ile uyumludur ve enerji tasarrufu sağlayarak binaların ısıtılması ile ilgili uygulamalarda kullanılmaktadır. Kil bazlı şekilce kararlı FDMlerde en yaygın olarak kullanılan kil materyali diyatomittir. Diyatomit, yüksek gözenekli yapısı, düşük yoğunluğu ve yüksek ısı direnci sayesinde FDMnin maksimum oranda adsorpsiyonunu sağlayan destekleyici bir malzeme olarak tanımlanmaktadır [67].

3.1.5. Katı-katı FDMler

Katı-katı faz değıştiren maddelerin faz değışimleri sırasında küçük hacim değışimleri göstermeleri katı-sıvı FDMlere göre sahip olduğu önemli bir avantajdır. Bu sebeple destekleyici malzemeye ihtiyaç duyulmaz. İki tip katı-katı FDM vardır:

- Polimer katı-katı FDMler
- Polialkoller (organik bileşikler)

Kristalize olabilen doğrusal bir zincirin polimerik omurgaya aşılması ile polimer katı-katı FDM hazırlanmaktadır.

- PEG/sorbitol
- PEG/glukoz
- Poliüretan

katı-katı FDM'nin başarılı şekilde sentezlenen örnekleridir.

Polialkol organik bileşiklerin (plastik kristaller) kullanımı kolaydır, fakat endüstriyel ölçekli uygulamalar için daha fazla maliyetlidir. Sızıntının kesinlikle istenmediği gıda ve farmasötikler için soğuk depo ambalaj uygulamalarında katı-katı FDMler özellikle tercih edilmektedir [68].

3.1.5.1. Polialkoller

NPG (neopentilglukol), TAM (tris (hidroksimetil) aminometan) ve PE (pentaeritritol) gibi polialkoller düşük sıcaklıklarda heterojendir. Ayrıca sıcaklık katı-katı faz geçiş sıcaklığına yükseldiğinde, molekülleri yüksek simetri ve hidrojen bağı enerjisini emme kabiliyetine sahip homojen faktörlü kübik kristaller haline gelirler [31].

3.1.5.2. Polimerler

Polimerik katı-katı FDM'lerin, mükemmel termal performansları ve sızdırmazlık özellikleri nedeniyle şekil stabilize FDMlerin geliştirilmesinde önemli bir rolü vardır. Polimerik katı-katı FDMlerde, polimerin sert segmenti iskelet görevi görür ve polimer yapısına rijitlik sağlarken, polimerin diğer kısımları çalışan kısım olarak işlev görür ve kimyasal bağlanma ile sert segmentin çerçevesine yapıştırılmış yumuşak segmentler olarak bilinir. Polimerik katı-katı FDMdeki faz geçiş mekanizması, amorf ve kristal haller arasındaki çalışma maddelerinin tersinir geçişidir. Faz geçiş işlemi sırasında, tüm maddeler katı halde kalırken, çalışma maddeleri gizli ısıyı serbest bırakır veya depolar [69, 70].



4. ŞEKİLCE KARARLI FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERİN UYGULAMA ALANLARI

Şekilce kararlı faz değıştiren maddelerin, iyi termal iletkenlik, yüksek depolama yoğunluğu ve minimum aşırı soğuma gibi üstün özellikleri, termal yönetim sistemindeki performanslarını ve potansiyellerini artırabilir. FDMler, elektronik cihazların soğutulmasında, termoreğülasyonlu akıllı tekstil ürünlerinin geliştirilmesinde, gıdaların ve ısıya hassas ürünlerin taşınmasında, binalarda ısı konforun sürdürülmesinde, ısıtma-soğutma sistemlerinde, seralarda, medikal alanda olmak üzere çok geniş bir skalada kullanım alanına sahiptir.

Tablo 4.1’de bazı şekilce kararlı FDMlerin ticari örnekleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Şekilce kararlı FDMlerin bazı ticari örnekleri [43]

Üretici Firma	Ürünler	Uygulamalar
PCM Products Ltd.	Doğal elyaf / Organik FDM kompozit	Binalar için duvar kaplaması
Pure PCM	Mikrokapsüllenmiş FDM	Tekstil kumaşları
Phase Change Energy Solution	BioPCM™	Binalar için kaplama ve paneller
Robert McKeown Co., Inc.	THERMFLOW™	Elektronik cihazlar için termal arayüz pedleri
Croda International	CrodaTherm™	Binalar, tekstil ve otomotiv
Rgees LLC	savENRG™	Pasif termal kontrol paketlenme

Tablo 4.1. (Devam) Şekilce kararlı FDMlerin bazı ticari örnekleri [43]

Rubitherm GmbH	Mikrokapsüllenmiş FDM	Isı depolama panoları, terapötik kullanım için ısı torbaları
Microtek Laboratories, Inc.	Mikrokapsüllenmiş FDM	Tekstil, yapı, elektronik ve ambalaj
Shanghai Tempered Entropy New Energy Co.	Mikrokapsüllenmiş FDM	Isı terapi paketi, tekstil, inşaat ve elektronik soğutma
Andores New Energy Co., Ltd.	Mikrokapsüllenmiş FDM	Soğutma yelekleri

4.1. Tekstil Alanındaki Uygulamalar

1980'li yılların başlarında NASA tarafından yürütülen araştırmalar sonucunda faz değiştiren madde mikrokapsüllerinin tekstillere uygulanması ortaya çıkmıştır. Günümüzde, şekilce kararlı FDMlerin tekstil ürünlerine uygulanması ile ilgili araştırma yapıldığında, faz değişim maddelerinin doğrudan veya önce kapsüllenip sonrasında tekstil yapılarına uygulandığı görülmektedir. Şekilce kararlı FDMlerin yapıcı kararlılığı, dayanıklılığı ve toksisitesi, tekstil uygulamalarında dikkate alınması gereken önemli hususlardır.

Şekilce kararlı FDMlerin tekstil uygulamaları şöyle sıralanabilir;

- Dış giyim (akıllı ceket, yelek, şapka, eldiven ve yağmurluklar)
- Aktif dış giyim (mont, astar, bot, çorap, kayak ve snowboard eldivenleri)
- Koruyucu giysiler (itfaiyeci uniformaları, kurşun geçirmez yelekler)
- Ev tekstili (perde, yer kaplaması, sandalye-koltuk döşemeleri, yatak, yastık ve battaniyeler) [71].

4.2. İnşaat Alanındaki Uygulamalar

Isıl depolama sistemleri güneş enerjili ısıtma sistemlerinde olduğu gibi birçok enerji sisteminde, konutlarda ve ticari binalarda soğutma atıklarının ısıtılmasında ve atık ısı uygulaması gibi sistemlerde önemli bir rol oynamaktadır. Zamanla enerji talebi ve enerji arzı arasındaki farkları dengeleyebilmektedirler.

İnşaat sektöründe bina yapı malzemelerine eklenmek suretiyle kullanılabilen FDMler ısıtma-soğutma yükünün azaltılmasında önemli kazanımlar sağlamaktadır. FDMlerin binaların ısııl yönetiminde kullanılması, dış cephe kaplama materyallerine eklenmek suretiyle veya soğutma amaçlı uygulamalarda klima kanallarında, asma tavanlarda ve döşemelerde uygulanarak gerçekleştirilmektedir.

4.3. Sağlık ve Gıda Alanındaki Uygulamalar

Şekilce kararlı FDMler medikal alanda ve gıda sektöründe özellikle ısıya hassas malzemelerin taşınmasında kullanılmaktadır. Taşıma süresince ısıya duyarlı malzemenin belli sıcaklıkta korunabilmesi için FDMler ile sağlanabilmektedir.

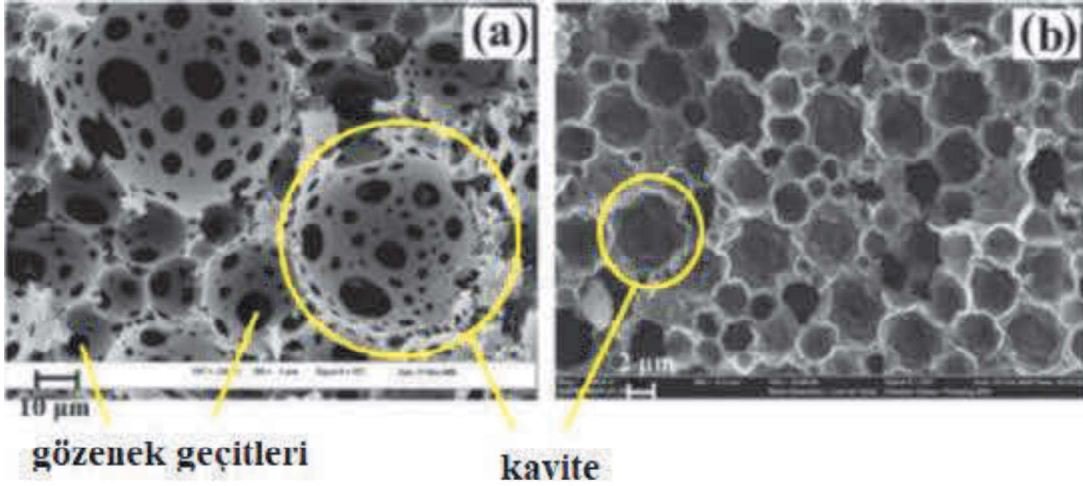


5. EMÜLSİYON ŞABLONLU GÖZENEKLİ POLİMERLER

Emülsiyon şablonlama, iyi tanımlanmış gözenekliliğe sahip hiyerarşik makro gözenekli polimerlerin hazırlanması için kullanılan çok yönlü bir yaklaşımdır. Yaklaşımın temeli, gözenekli yapıların oluşturulması için şablon olarak konsantre emülsiyonların kullanılmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşımla, hiyerarşik polimer köpükler yüksek iç fazlı emülsiyonlar (HIPE'ler) kullanılarak üretilir. HIPE'ler, 0,74'ten büyük iç faz hacim fraksiyonuna (ϕ) sahip emülsiyonlar olarak tanımlanır. Yüksek iç fazlı emülsiyonların, monomer fazının polimerizasyonu ile poliHIPE'ler olarak bilinen polimerler elde edilir. PoliHIPE'ler, düşük yoğunluklu makro gözenekli polimerlerdir. PoliHIPE'lerin gözenek yapısı, öncü HIPE şablonları değiştirilerek kolaylıkla değiştirilebilir. Bu özellikleri ile poliHIPE'ler, yüksek geçirgenlik ve şekil stabilizasyonunun gerekli olduğu adsorpsiyon, kromatografi, kataliz, doku mühendisliği ve gazların, sıvıların ve enerjinin depolanması gibi uygulamalarda kullanılabilir [72].

5.1. PoliHIPE Yapısı ve Özellikleri

PoliHIPE'ler, açık hücreli yapı gerektiren birçok uygulamada benzersiz gözenek morfolojileri sayesinde tercih edilmektedir. PoliHIPE'ler, küçük deliklerle birbirine bağlanan büyük hücrelerden (kavite) oluşan hiyerarşik açık gözenekli yapılardır (Şekil 5.1.a). Ancak üretim koşullarına bağlı olarak kapalı hücre morfolojisinin (Şekil 5.1.b) oluşumu da mümkündür. Kapalı hücre morfolojisi gösteren poliHIPE'lerin açık gözenekli olanlardan temel farkı, yapıda birbirine bağlı gözeneklerin (gözenek geçitlerinin) olmamasıdır. Bir poliHIPE'de oluşan kavite, öncü HIPE'lerdeki damlacıklara karşılık gelir. Bir HIPE genellikle 5 ila 100 μm arasında değişen çaplara sahip damlacıklardan oluştuğu için, poliHIPE'lerin kavite de aynı boyut aralığında değişmektedir. PoliHIPE'ler genellikle 0.1 g/cm^3 civarında yoğunluklar sergilerler [72].



Şekil 5.1. (a) Açık hücreli bir poliHIPE'nin ve (b) kapalı hücreli bir poliHIPE'nin SEM görüntüsü [72]

5.2. PoliHIPE Uygulama Alanları

PoliHIPE'ler malzeme bilimi alanında birçok uygulama alanı bulmaktadır. Bu polimerik malzemeler düşük yoğunlukları, açık hücreli yapıları ve yüksek absorplama kapasiteleri ile ayırma ve filtrasyon işlemleri, adsorpsiyon işlemi, doku mühendisliği, kataliz, enzim immobilizasyonu, enerji depolama vb. gibi birçok mühendislik uygulamasında kullanılabilir. Bunların içinde ayırmaya ait uygulamalar başta olmak üzere, doku mühendisliğinin de poliHIPElerin kullanımının önemli bir yeri vardır. Son on yılda, yeni enerji kaynaklarına artan ilgi nedeniyle poliHIPE'lerin enerji depolama amaçlı kullanımı önemli bir uygulama haline gelmiştir.

5.3. Enerji Depolama

Son yıllarda yapılan çalışmalarda faz değiştiren maddelerin şekilce kararlılığının sağlanmasına yönelik enerji depolama uygulamalarında destek malzemesi olarak poliHIPE'ler kullanılmaktadır.

Kontrol edilebilir gözenekli yapı ve artırılabilir yüzey alanına sahip olması, iyileştirilebilir mekanik özellikler, enerji depolama malzemeleriyle uyumlu kimyasallardan sentez imkanı emülsiyon şablonlu polimerleri (poliHIPE'leri), şekilce kararlı FDMlerin hazırlanması için çekici matris haline getirmiştir.

Puupponen ve diğ. (2016), polistiren bazlı poliHIPE köpükleri, FDM olarak seçtikleri eritritol ve ksilitolün mikroenkapsülasyonunu sağlamak için kullanmışlardır. Bu amaçla, deneysel parametreler kontrol edilerek köpük yapısı optimize edildikten sonra polioller emülsiyon sisteminin sulu fazında çözülerek polioller-polistiren kompozitleri hazırlanmıştır. Eritritol ve ksilitolün köpüğe katılma fraksiyonlarının ağırlıkça %62 ve %67 olduğu, ayrıca elde edilen kompozit FDMlerin yığın FDMlere kıyasla daha kontrollü ve hızlı ısı salma özellikleri gösterdiği bulunmuştur [18].

Başka bir çalışmada, emülsiyon şablonlama yaklaşımıyla bütül stearatın pullulan köpüğü ile kapsüllenmesi yoluyla biyobazlı FDMler hazırlanmıştır [19]. Sentezlenen malzemenin gizli erime ısısının 33 J/g olduğu bulunmuş ve faz değişim sıcaklıklarında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu bulgularla emülsiyon şablonlama stratejisinin, araştırmacılar tarafından FDMlerin kapsüllenmesi için uygulanabilir bir yöntem olduğu rapor edilmiştir.

Enerji depolama malzemelerinin poliHIPE'ler kullanılarak şekil stabilizasyonunun sağlanması, iyi tasarlanmış gözenekli poliHIPE monolit elde edildikten sonra tek adımlı emprenye yöntemiyle FDM'nin gözenekli poliHIPE destek matrisine dahil edilmesi yoluyla da sağlanabilir [72]. Bu bağlamda Mert (2020), n-hekzadekanın şekil stabilizasyonu için yüzeyi modifiye edilmiş montmorillonit kil içeren poliHIPE temelli kompozit FDMler hazırlamıştır [20]. İstenen morfolojiye ve en yüksek sıkıştırma modülüne sahip olan poliHIPE kompoziti, tek adımlı emprenye yöntemiyle şekilce kararlı FDM üretmek için destek materyali olarak seçmiştir. Elde edilen şekilce kararlı FDMnin yüksek gizli ısı depolama kapasitesine (143.41 J/g) sahip olduğu, termal kararlılık ve sızdırmaz özellik gösterdiği ve bina uygulamalarında sistemlerin termal yönetimi için dikkate değer bir potansiyele sahip olduğu bildirilmiştir.

Kapalı hücreli, esnek, FDM kapsüllenmiş poliHIPE monolitleri, Zhang ve arkadaşları tarafından FDM olarak n-oktadekan kullanılarak arayüzey tiyol-Michael ilavesiyle sentezlenmiştir [21]. Elde edilen esnek monolitlerin yüksek ısı depolama kapasitesi (213 J/g'ye kadar) yanında, aynı zamanda 100 ısıtma-soğutma döngüsü sonrası ısı kapasitesini koruyarak yeniden kullanılabilirlik ve kimyasal kararlılık özellikleri gösterdiği bildirilmiştir.



6. MATERYAL VE METOD

6. 1. Kullanılan Kimyasal Malzemeler

Demir (II) klorür tetrahidrat $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Carlo Erba), demir (III) klorür heksahidrat $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (%97, Isolab Chemicals), hidroklorik asit HCl (%36,5-38,0 Sigma Aldrich), amonyak çözeltisi (%28-30 Merck), setil trimetilamonyum bromür (%98, Sigma), stiren (Merck), divinil benzen (%80 Aldrich Chemistry), $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (%98 Sigma-Aldrich), Span80 (Aldrich Chemistry), potasyum persülfat, KPS (%98 Merck) n-heptadekan (Merck) alındığı gibi kullanıldı. Bütün deneylerde ultra saf su kullanıldı.

6.2. Deneysel Yöntem

6.2.1. Demir Oksit (Fe_3O_4) nanopartiküllerin hazırlanması

Fe_3O_4 nanoparçacıklarının sentezi, literatürden uyarlanan mekanik destekli birlikte çöktürme yöntemine göre gerçekleştirilmiştir [73]. 0,02 mol $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ katı kristalleri 2M HCl çözeltisinde dağıtıldı. Aynı bir yerde 0,04 mol $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ultra saf suda karıştırıldı. Elde edilen bu iki çözelti bir mekanik karıştırıcı yardımıyla karıştırıldı ve ardından oda sıcaklığındaki ultrasonik banyoda homojenize edildi. Elde edilen bu çözeltiliye 0,7 M NH_3 çözeltisi inert atmosferde eklendi ve mekaniksel karıştırma sürdürüldü. Fe_3O_4 partiküllerinin oluşmasıyla siyah renkli çökelti elde edildi. Fazların ayrımı gerçekleştikten sonra üstteki faz dekante edilerek ayrıldı. Fe_3O_4 partikülleri içeren alttaki faza, ultra saf su eklendi ve karışım oda sıcaklığında karıştırıldı. Daha sonra karışım santrifüj tüplerine aktararak santrifüj edildi. Karışımın pH'ı nötr olana dek saf suyla yıkama ve santrifüj işlemine ardışık olarak devam edildi. Elde edilen partiküller önceden ısıtılmış vakum etüvünde kurutuldu. Elde edilen partiküller "MAG" olarak adlandırıldı.

6.2.2. Demir Oksit partiküllerin CTAB ajanı ile modifikasyonu

Elde edilen demir oksit partikülleri, yüksek iç fazlı emülsiyon sistemi ile uyum için setiltrimetil amonyum bromür (CTAB) ile modifiye edildi. Bu amaçla demir oksit nanoparçacıkları ultra saf su içinde dağıtıldı ve 55 °C'de mekaniksel olarak karıştırıldı. Aynı bir yerde belirli miktarda CTAB ajanı ultra saf su içinde çözüldürüldü ve 55 °C'lik sabit sıcaklıkta karıştırıldı. Karışım daha sonra ultrasonik

banyoda homojenize edildi. CTAB çözeltisi, nanopartikül çözeltisi üzerine döküldü ve bir miktar ultra saf su ilave edildi. Mekanik karıştırma, 55 °C'lik sabit bir sıcaklıkta sürdürüldü. Süre sonunda karışım santrifüj tüplerine aktarılarak santrifüj edildi. Nihai partiküller, ultra saf su ile yıkandı ve vakum etüvünde kurutuldu. Elde edilen modifiye parçacıklar “CTAB-MAG” olarak adlandırıldı.

6.2.3. Modifiye edilmiş demir oksit nanopartiküller katkıli poliHIPE kompozitlerin hazırlanması

FDM için destek malzemeleri olarak poliHIPE kompozitleri, CTAB-MAG nanoparçacıkların varlığında sentezlendi. Bu amaçla hacimce %80 su fazı ve hacimce %20 monomer fazından oluşan yüksek iç fazlı emülsiyonlar (HIPE'ler) hazırlanmıştır. Monomer fazı stiren, divinilbenzen (DVB) ve Span 80®'den oluşurken, su fazı ultra saf su, CaCl₂.6H₂O ve KPS'den oluşmaktadır. Monomer fazını oluşturmak için, stiren, DVB, Span80® ve monomer fazının ağırlıkça farklı %'lerindeki CTAB-MAG partikülleri sabit hızla mekaniksel olarak karıştırılmıştır. Daha sonra elde edilen karışım ultrasonik homojenizatör vasıtasıyla (-1 sn on 1 sn off modunda) homojenize edilmiştir. KPS ve CaCl₂.6H₂O'un ultra saf suda çözünmesiyle su fazı hazırlanmıştır. Mekaniksel olarak karıştırılan monomer fazına, su fazı bir peristaltik pompa vasıtasıyla eklenmiş ve ekleme bittikten sonra, karıştırma işlemi bir süre daha devam etmiştir. Elde edilen homojen viskoz emülsiyonlar polietilen tüplere aktarılmış ve önceden ısıtılmış vakum etüvünde polimerize edilmiştir.

Süre sonunda elde edilen poliHIPE kompozitler saflaştırma amacıyla sokslet ekstraktöründe ekstrakte edilmiş ve vakum etüvünde kurutulmuştur. CTAB-MAG partikülleri içermeyen poliHIPE malzemesi de yukarıda anlatılan prosedüre göre sentezlenmiştir. Elde edilen poliHIPE kompozitler içerdikleri modifiye demir oksit miktarlarına göre Tablo 6.1'de verildiği gibi adlandırılmıştır. Emülsiyon viskozitesindeki artış nedeniyle sisteme eklenen Fe₃O₄ nanopartikül yüzdesi %0,75 ile sınırlandırılmıştır.

Table 6.1. Üretilen poliHIPE destek malzemeleri ve CTAB-MAG katkı oranları

Malzeme Adı	CTAB-MAG katkı oranı (% ağır.)
PHP-MAG1	0
PHP-MAG2	0,25
PHP-MAG3	0,50
PHP-MAG4	0,75

6.2.4. Şekilce kararlı n-heptadekan içerikli kompozit FDMlerin üretimi

Sentezlenen gözenekli malzemelerden karakteristik poliHIPE özellikleri açısından öne çıkan kompozit malzeme şekilce kararlı kompozit FDM üretimi için destek materyali olarak kullanılmıştır. Bu amaçla poliHIPE malzeme küçük boyutlara indirgenmiştir. Belirli miktarda, n-heptadekan taşıyıcı çözücüde çözülmüş ve 35 °C sabit sıcaklıkta karıştırılmıştır. Belirli miktarda poliHIPE destek materyali üzerine n-heptadekan çözeltisi dökülmüş ve karışım ultrasonik banyoda belirli süre tutulmuştur. Ardından karışım bir su banyosuna oturtulmuş ve sabit sıcaklıkta mekaniksel olarak karıştırılmıştır. Süre sonunda malzeme önceden ısıtılmış vakum etüvünde kurutulmuştur.

6.3. Malzemelerin Karakterizasyonu

6.3.1. Fe₃O₄ ve Modifiye Fe₃O₄ nanopartiküllerin karakterizasyonu

Sentezlenen Fe₃O₄ nanoparçacıklarının morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Zeiss EVO® LS 10) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM, JEOL-Jem 2100) ile araştırılmıştır. Fe₃O₄ nanoparçacıklarının elementel bileşimi Energy Dispersive X-ray (SEM-EDS, Zeiss EVO® LS 10) analizi ile ortaya çıkarılmıştır. Sentezlenen Fe₃O₄ nanoparçacıklarının manyetik özellikleri, oda sıcaklığında ±1Tesla (10 000 Oe) manyetik alan altında Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM, Cryogenic Limited PPMS) ile belirlenmiştir. Nanopartiküllerin modifikasyonu ise, oda sıcaklığında 650-4000 cm⁻¹ dalga boyunda Fourier Dönüşüm Kızılötesi (FT-IR, Perkin Elmer, Spectrum One) analizi ile de doğrulanmıştır.

6.3.2. Modifiye Fe₃O₄ nanopartiküller katkılı poliHIPE köpüklerin karakterizasyonu

Modifiye Fe₃O₄ katkılı poliHIPE köpüklerinin morfolojik karakterizasyonu SEM analizi (FEI Ouanta FEG 250 model mikroskop) ile gerçekleştirilmiştir. PoliHIPE köpüklerin termal özellikleri Termogravimetrik (TG) Analiz (Seiko TG/DTA 6300 termal analiz sistemi cihazı, Seiko Instruments, Tokyo, Japonya) ile araştırılmış ve TG analizleri 0-800°C sıcaklık aralığında, 10°C.dak⁻¹ ısıtma hızında ve inert azot atmosferi altında gerçekleştirilmiştir. PoliHIPE köpüklerinin spesifik yüzey alanları, Micromeritics Gemini VII 2390t Tam Otomatik BET Aleti (Micromeritics Instrument Corporation, ABD) ile Brunauer–Emmet–Teller (BET) adsorpsiyon modeline dayalı olarak belirlenmiştir.

6.3.3. Şekilce kararlı n-heptadekan/poliHIPE kompozitinin karakterizasyonu

Elde edilen şekilce kararlı n-heptadekan/poliHIPE kompozitinin morfolojisi bir Leica DM2700P, polarize optik mikroskop (POM) ile incelenmiştir. Kompozitin ve saf n-heptadekanın erime sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı, erime ve kristalleşme entalpileri gibi termal özellikleri, inert azot atmosferi altında Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) (Seiko, DSC 7020) ile 5°C.dak⁻¹ ısıtma hızında belirlenmiştir. Destek poliHIPE köpüğüne n-heptadekanın (ağırlıkça %) katılma oranı Denklem 1 ile hesaplanmıştır:

$$\text{Katılma oranı (ağırlıkça \%)} = \left[\frac{\Delta H_{m(\text{şekilce kararlı n-heptadekan/poliHIPE kompozit})}}{\Delta H_{m(\text{n-heptadekan})}} \right] \times \%100 \quad (1)$$

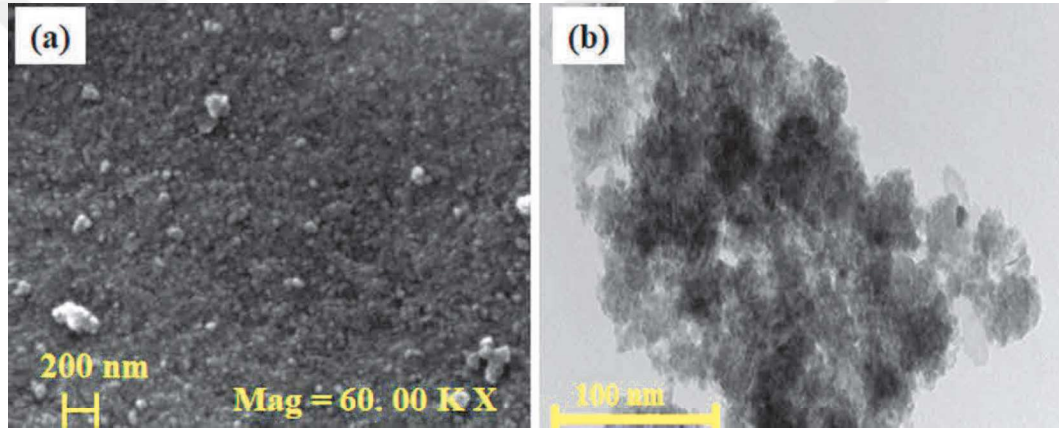
Burada ΔH_m gizli erime ısısına (J.g⁻¹) karşılık gelmektedir.

PoliHIPE köpüklerine n-heptadekanın katılması, 650-4000 cm⁻¹ dalga boyu aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen Fourier Dönüşüm Kızılötesi (FT-IR, Perkin Elmer, Spectrum 100) analizi ile doğrulanmıştır. Şekilce kararlı n-heptadekan bazlı kompozit FDMnin sızıntı testi, 45±5°C'lik sabit sıcaklıktaki bir vakum fırınında gerçekleştirilmiştir. Kompozit FDMnin ısıl davranışı, bir veri kaydedici, termokupl, sirkülasyon banyosu ve bilgisayardan oluşan bir sistemde ısı depolama hızı ölçümü ile araştırılmıştır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

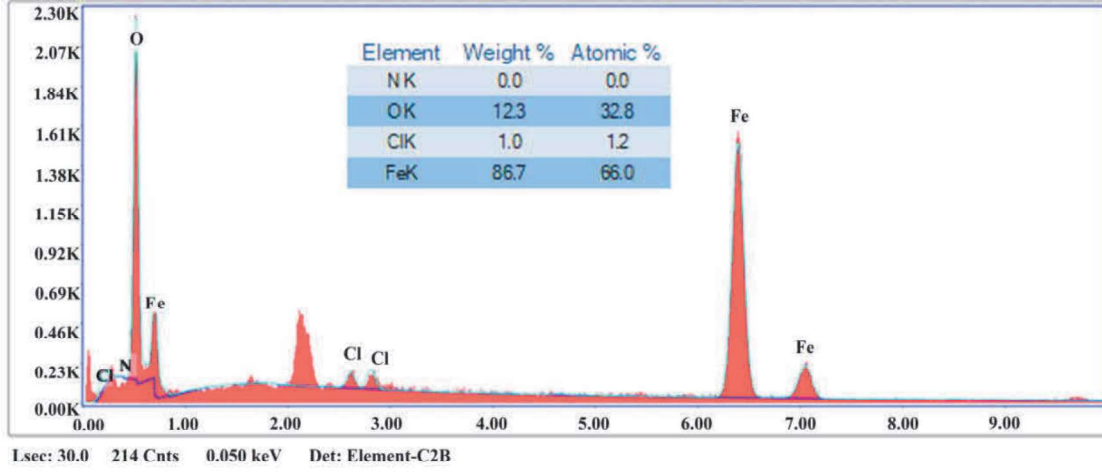
7.1. Fe₃O₄ ve Modifiye Fe₃O₄ Nanopartiküllerin Analiz Sonuçları

Sentezlenen Fe₃O₄ partiküllerinin morfolojisi SEM ve TEM analizleri ile araştırılmış ve ilgili görüntüler sırasıyla Şekil 7.1a ve 7.1b'de verilmiştir. Şekil 7.1a'dan görülebileceği gibi, sentezlenen Fe₃O₄ partikülleri, 200 nm'nin çok altında boyuta ve neredeyse küresel bir şekle sahiptir. Bu sonuç, Şekil 7.1b'de sunulan TEM görüntüsü ile uyumludur. Öte yandan bazı bölgelerde fark edilen aglomerasyonun nanopartiküller arasındaki hidrofobik etkileşimlerden kaynaklandığı söylenebilir.



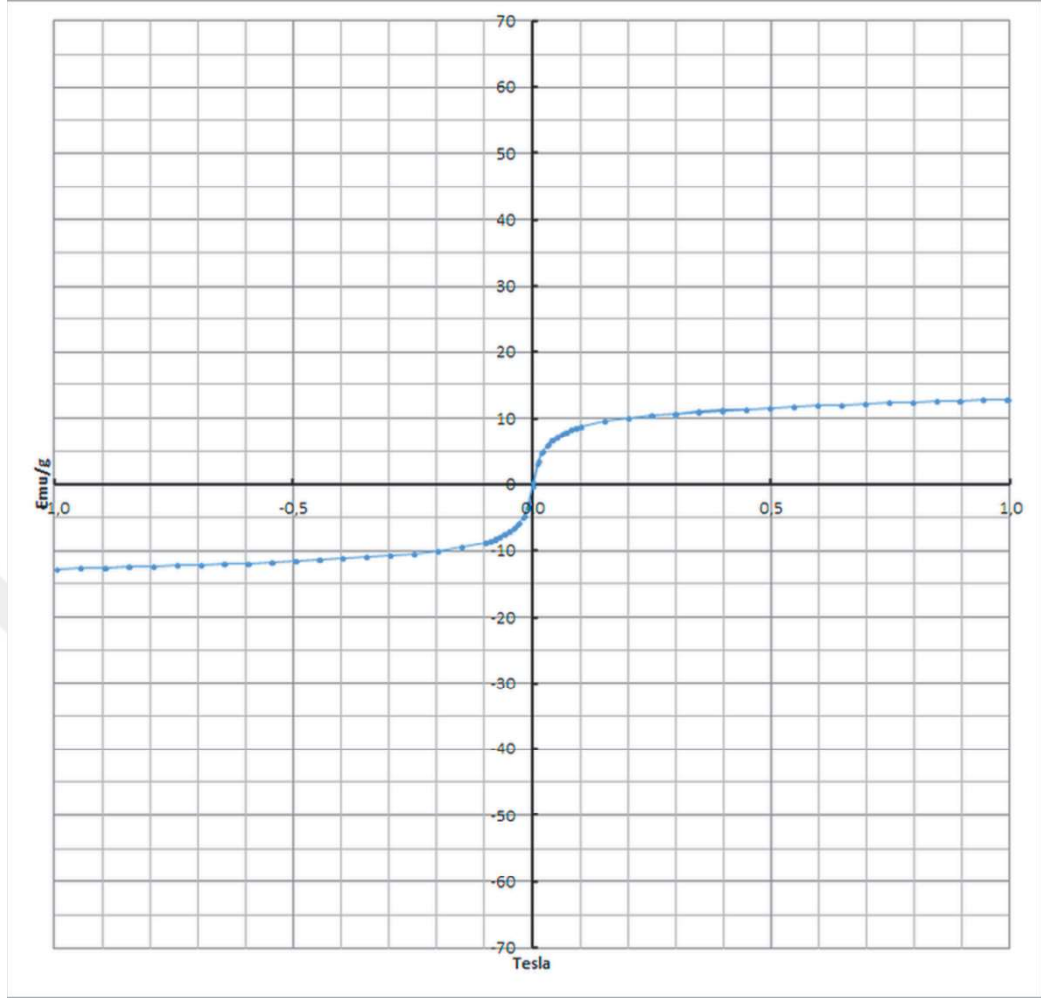
Şekil 7.1. Sentezlenen Fe₃O₄ parçacıklarının SEM (a) ve TEM (b) görüntüleri

Sentezlenen Fe₃O₄ partiküllerinin EDX spektrumu ve Fe₃O₄ nanoparçacıklarının bileşimi Şekil 7.2'te sunulmuştur. Spektrumdan da görülebileceği gibi, Fe ve O elementlerine ait pikler, Fe₃O₄ nanoparçacıklarını doğrulamaktadır. Öte yandan, daha az oranda Cl elementine karşılık gelen pikin varlığı, demir (II) klorür tetrahidrat ve demir (III) klorür hekzahidrat öncülerine bağlanabilir.



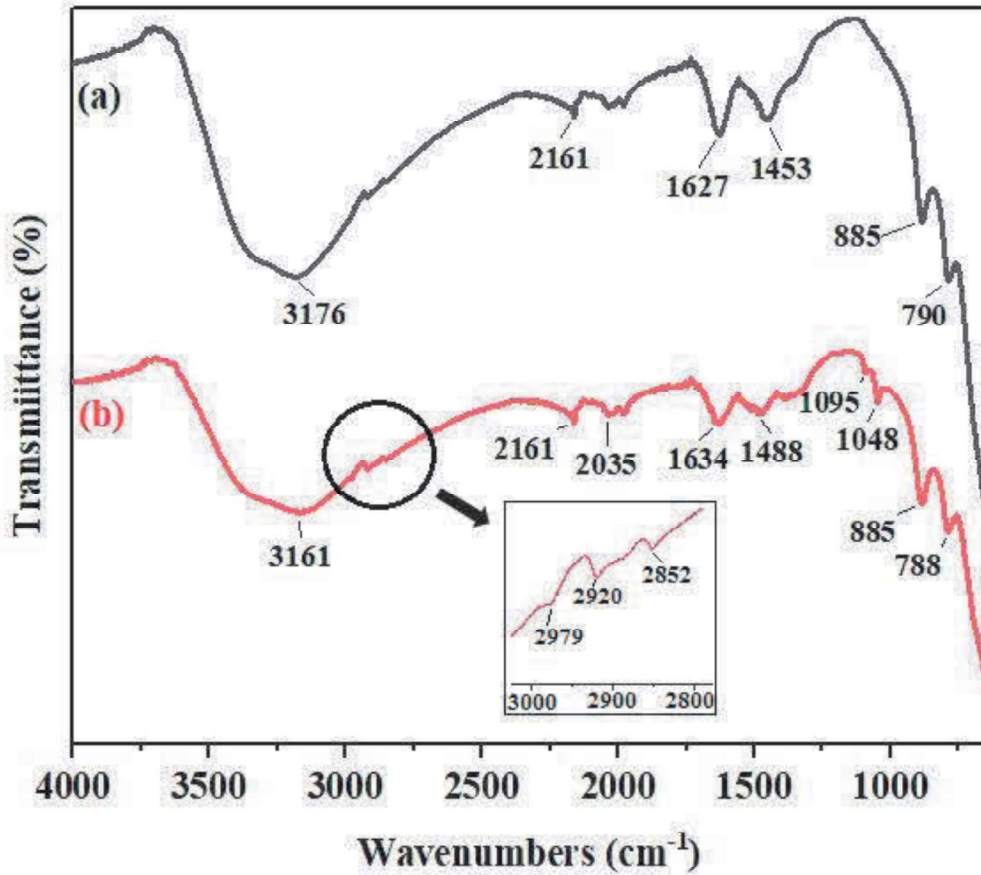
Şekil 7.2. Sentezlenen Fe_3O_4 nanoparçacıklarının EDX spektrumu

Sentezlenen Fe_3O_4 nanoparçacıklarının manyetik özellikleri de oda sıcaklığında ± 1 Tesla (10 000 Oe) manyetik alan altında Titreşimli Örnek Manyetometresi (VSM) ile araştırılmıştır. Nanoparçacıkların manyetizasyon-manyetik alan ($M(\text{Emu/g})-H(\text{Tesla})$) eğrisi Şekil 7.3'te verilmiştir. Nanoparçacıkların doyma manyetizasyon (M_s) değeri 13 emu/g olarak bulunmuştur. Bulunan M_s değeri, yığın magnetitin M_s değerinden (92 emu/g) [74] çok daha küçük parçacıkların elde edilmesi dolayısıyla önemli ölçüde daha düşüktür.



Şekil 7.3. Sentezlenen Fe₃O₄ nanoparçacıklarının manyetizasyon eğrisi

Fe₃O₄ nanopartiküllerin ve modifiye partiküllerin (CTAB-MAG) kimyasal karakterizasyonu FT-IR analizi ile gerçekleştirilmiştir. Fe₃O₄ ve modifiye partiküllerin FT-IR spektrumları karşılaştırmalı olarak Şekil 7.4'te sunulmuştur. Şekil 7.4a'dan görülebileceği gibi, 3100-3200 cm⁻¹'de gözlenen geniş pik, Fe₃O₄ nanoparçacıklarının yüzeyindeki OH gruplarının eğilme ve gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. CTAB-MAG partiküllerinin FT-IR spektrumunda (Şekil 7.4b) 3000-2800 cm⁻¹'de gözlenen pikler, CTAB'deki -CH₂ gruplarının C-H bağları gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, 1400-1500 cm⁻¹'de gözlenen pikler, CTAB'nin C-H eğilme titreşiminden ortaya çıkmıştır [23]. 3161 cm⁻¹'deki geniş bant, Fe₃O₄ nanoparçacıklarının yüzeyindeki OH⁻ grupları ile CTAB'deki NH₄⁺ grubu arasındaki elektrostatik etkileşime atfedilir [75]. Bu sonuçlara göre Fe₃O₄ nanoparçacıklarının yüzey modifikasyonunun başarılı olduğu sonucuna varılabilir.

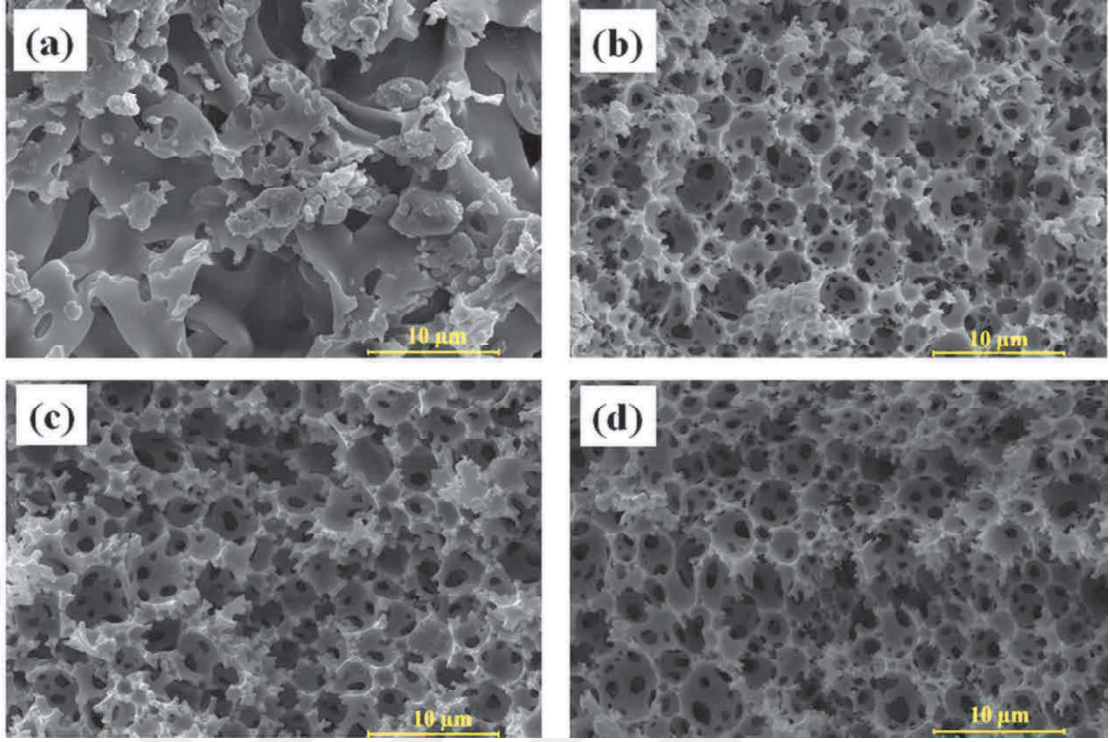


Şekil 7.4. (a) Fe_3O_4 nanopartiküllerin, (b) modifiye partiküllerin (CTAB-MAG) FTIR spektrumları

7.2. Modifiye Fe_3O_4 Nanopartikül Katkılı PoliHIPE Köpüklerin Analiz

Sonuçları

Referans poliHIPE ve CTAB-MAG nanopartikülleri katkıli poliHIPE köpüklerinin (Tablo 6.1'de bileşimleri sunulan) morfolojik karakterizasyonu SEM analizi ile gerçekleştirilmiştir ve poliHIPE köpüklerin SEM görüntüleri Şekil 7.5'de verilmiştir. Şekil 7.5'deki SEM görüntülerinden fark edildiği üzere, sentezlenen tüm poliHIPEler, geleneksel bir poliHIPE yapısında gözlenen gözenek iç bağlantılarının eşlik ettiği kavitelere sahiptir. Ayrıca, emülsiyon sistemi ile uyumlu hale getirilmiş CTAB-MAG nanoparçacıklarının artmasıyla poliHIPE destek malzemelerinin açık gözenekli morfolojisinin iyileştiği SEM görüntülerinden gözlemlenmiştir. Bu sonuç, CTAB ile modifiye edilmiş nanopartiküllerin yüksek iç fazlı emülsiyon stabilizasyonuna olumlu katkısına bağlanabilir.



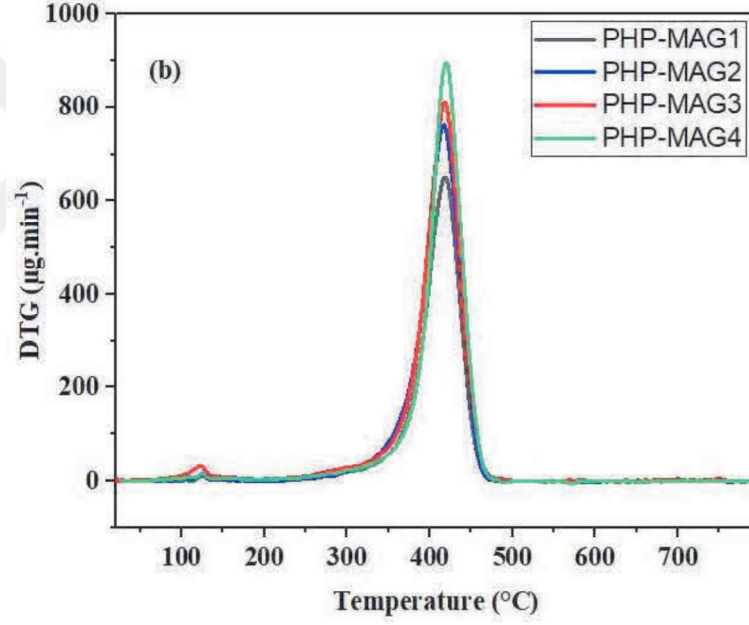
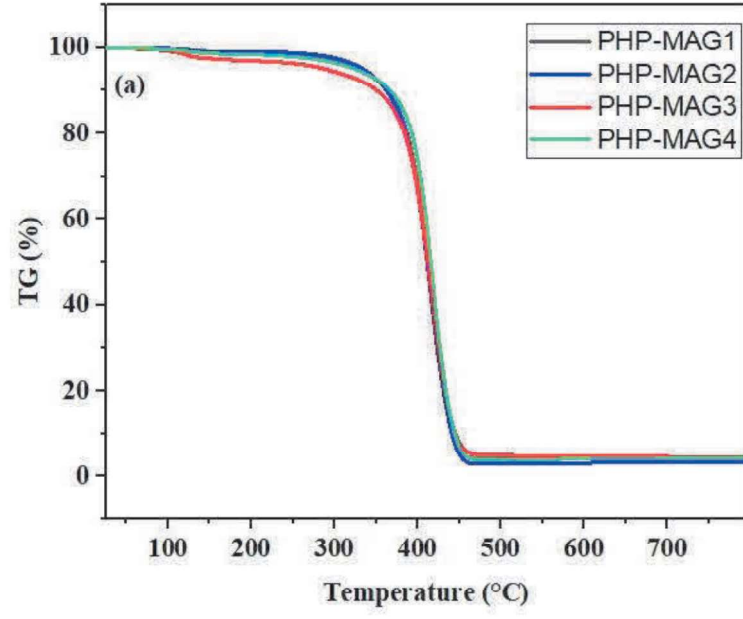
Şekil 7.5. CTAB-MAG katkılı poliHIPE destek malzemelerinin SEM görüntüleri: (a) PHP-MAG1, (b) PHP-MAG2, (c) PHP-MAG3, (d) PHP-MAG4

PoliHIPE destek malzemelerinin spesifik yüzey alanları belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 7.1'de sunulmuştur. Tablo 7.1'den görüldüğü üzere, CTAB-MAG katkılı poliHIPE destek malzemelerinin yüzey alanı, katkısız poliHIPE malzemesinin (PHPMAG1) yüzey alanından daha fazladır. En yüksek katkı oranına sahip PHP-MAG4 destek malzemesinin (ağırlıkça %0,75) aynı zamanda en yüksek yüzey alanına ($7,0593 \text{ m}^2/\text{g}$) sahip olduğu bulunmuştur. Arttırılmış bir yüzey alanına sahip destek malzemesi, yüksek miktarda FDM'yi gözenekli kompozit matris içine dahil etmek ve şekilce kararlı kompozit FDM'ler elde etmek için arzu edilen bir özelliktir.

Tablo 7.1. Elde edilen poliHIPE destek malzemelerinin spesifik yüzey alanı değerleri

PoliHIPE Destek Materyali	δ_{BET} (m^2/g)
PHP-MAG1	1,8911
PHP-MAG2	6,4437
PHP-MAG3	6,0960
PHP-MAG4	7,0593

Polimer matrisine CTAB-MAG nanoparçacık katkısının termal özellikler üzerindeki etkisi TG analizi ile araştırıldı. PHP-MAG serisinin termal gravimetri (TGA) ve diferansiyel termal gravimetri (DTG) termogramları Şekil 7.6'da, karşılık gelen sonuçlar ise Tablo 7.2'de verilmiştir. Tablo 7.2'de numunelerin ilk bozunma sıcaklığı, yani T_{d10} , sonuçtaki ağırlık kaybının %10 olduğu sıcaklık, T_{d50} ise ağırlık kaybının %50 olduğu sıcaklığı temsil eden orta nokta bozunma sıcaklığıdır. Tablo 7.2'den de görülebileceği gibi, ağırlıkça % 0.75 CTAB-MAG nanoparçacık yüklemeli PHP-MAG4 örneğinin T_{d10} ve T_{d50} değerleri, herhangi bir CTAB-MAG nanoparçacığı içermeyen PHP-MAG1'e kıyasla artmıştır. Bu sonuç, CTAB-MAG nanoparçacık katkısı ile geliştirilmiş polimer matris morfolojisine bağlı olarak artan termal stabiliteye bağlanabilir. Ayrıca maksimum kütle kaybına karşılık gelen pik maksimum sıcaklık değerinin ($T_{maks.}$) PHP-MAG4 için referans destek malzemesine göre biraz arttığı gözlemlenmiştir.



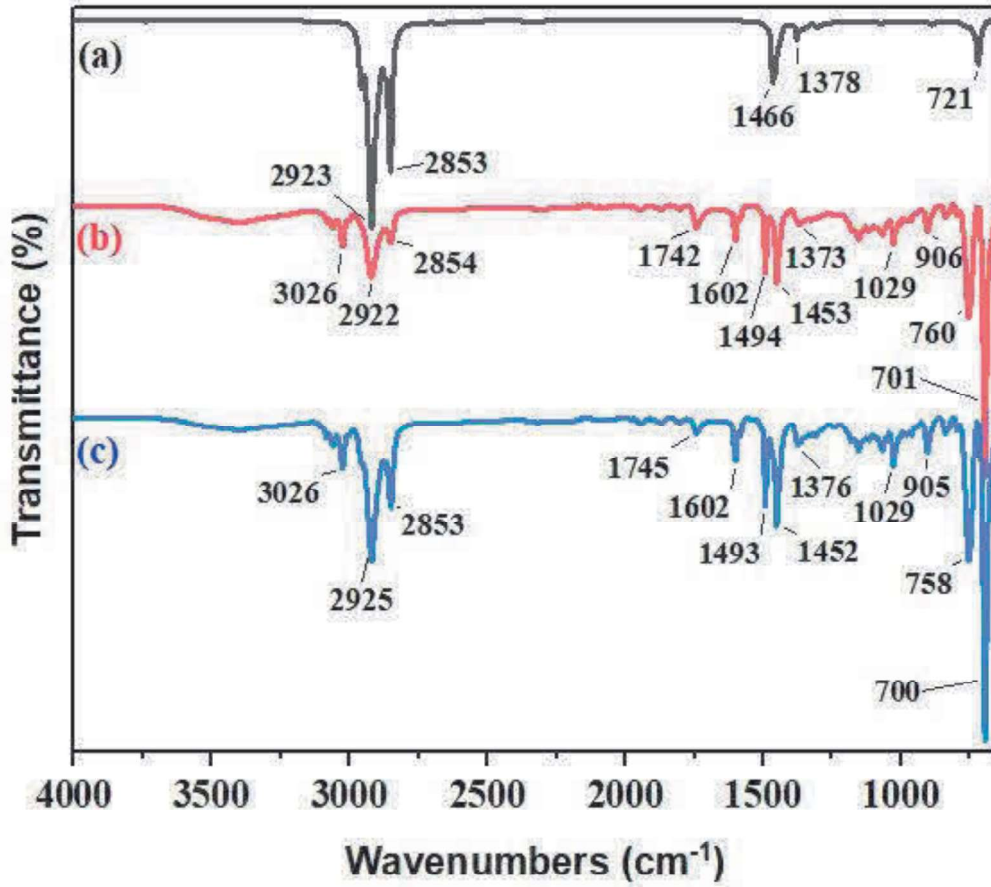
Şekil 7.6. PoliHIPE destek malzemelerinin (a) TGA ve (b) DTG termogramları.

Tablo 7.2. PoliHIPE destek malzemelerinin TGA sonuçları.

PoliHIPE destek malzemesi	T_{d10} (°C)	T_{d50} (°C)	$T_{maks} @ V_{maks}$ (°C @ %. dak^{-1})
PHP-MAG1	363,8	412,7	418,6 @ 17,56
PHP-MAG2	362,7	411,4	416,9 @ 17,12
PHP-MAG3	350,5	412,4	417,9 @ 16,74
PHP-MAG4	367,4	415,8	419,4 @ 19,12

7.3. Şekilce Kararlı N-heptadekan/PoliHIPE Kompozitinin Analiz Sonuçları

Üretilen poliHIPE kompozitlerinden PHP-MAG4, yüksek yüzey alanı, yüksek termal kararlılığı ve iyileştirilmiş morfolojisi nedeniyle FDM destek malzemesi olarak seçilmiş ve tek aşamalı emprenye tekniği ile şekilce kararlı n-heptadekan/poliHIPE kompozitinin hazırlanmasında kullanılmıştır. Üretilen kompozit FDM, “*PHP-MAG4-HP*” olarak adlandırılmıştır. Polimer destek malzemesine n-heptadekanın katılması FT-IR analizi ile doğrulanmış ve n-heptadekan (HP), PHP-MAG4 ve PHP-MAG4-HP spektrumları Şekil 7.7'de verilmiştir. HP, 2956, 2923 ve 2853 cm^{-1} 'de C-H gruplarının gerilme titreşimlerine atfedilebilecek karakteristik bantlar göstermiştir [23].

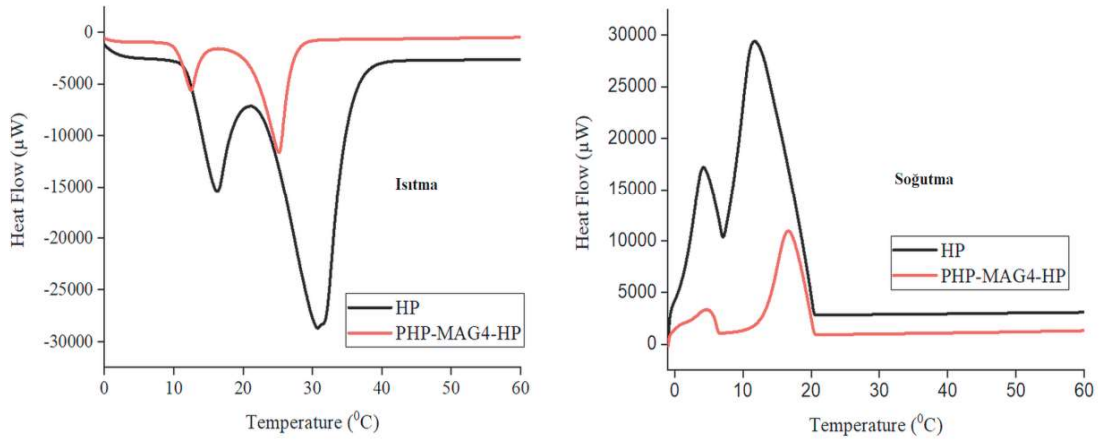


Şekil 7.7. (a) HP, (b) PHP-MAG4, (c) PHP-MAG4-HP'nin FTIR spektrumları

1466 ve 721 cm^{-1} 'de gözlenen pikler sırasıyla C-H'nin deformasyon ve sallanma titreşim bantlarına aittir [76]. PHP-MAG4 spektrumunda (Şekil 7.7b), 760 ve 701 cm^{-1} 'de bulunan bantlar, aromatik C-H bükülmesine atfedilirken, 1602, 1494 ve 1453 cm^{-1} 'de gözlenen pikler polistiren matrisi için karakteristik bantlar olup aromatik

C=C bükülmesine karşılık gelir. Şekil 7.7c'de, PHP-MAG4-HP'nin spektrumu ise, HP ve polimer matrisi arasındaki kimyasal reaksiyona atfedilebilecek yeni bir pik olmaksızın, HP ve PHP-MAG4 spektrumlarında bulunan tüm karakteristik bantları göstermiştir. Sonuçlar, HP'nin PHP-MAG4 kompozit matrisine dahil edilmesinin başarılı olduğunu göstermektedir.

HP ve PHP-MAG4-HP'nin faz değişim özellikleri DSC analizi ile araştırılmıştır. Isıtma ve soğutma işlemleri sırasında elde edilen HP ve PHP-MAG4-HP'nin DSC termogramları Şekil 7.8'de verilmiş olup, bunlara karşılık gelen veriler Tablo 7.3'te sunulmuştur. Tablo 7.3'ten de görülebileceği gibi, HP'nin erime ve kristallenme pik sıcaklıkları sırasıyla 30,78 °C ve 11,72 °C olarak ölçülmüştür. Öte yandan, şekilce kararlı kompozit FDM'nin (PHP-MAG4-HP) erime ve kristallenme pik sıcaklıkları bir kompozit matrisinde HP'nin sınırlanması nedeniyle değişmiş ve sırasıyla 25,17 °C ve 16,68 °C olarak bulunmuştur. HP'nin ısıtma ve soğutma periyotları için toplam gizli ısıları sırasıyla 147,9 J/g ve -211 J/g olarak bulunmuştur. PHP-MAG4-HP için ise toplam gizli ısıları ısıtma ve soğutma periyotları için sırasıyla 99,6 J/g ve -100,6 J/g olarak ölçülmüştür. Ayrıca, destek malzemesinde bulunan FDM'nin ağırlık oranını belirten poliHIPE köpüğüne HP'nin katılma oranı Denklem 1 kullanılarak hesaplanmış ve %67 olarak bulunmuştur. Tablo 7.4'ten görülebileceği gibi, PHP-MAG4-HP olarak adlandırılan şekilce stabilize edilmiş kompozit FDM, literatürde mevcut olan diğer n-heptadekan bazlı kompozit FDM'lere kıyasla nispeten yüksek termal enerji depolama kapasitesine sahiptir [77-81].



Şekil 7.8. Isıtma ve soğutma periyodunda HP ve PHP-MAG4-HP'nin DSC termogramları

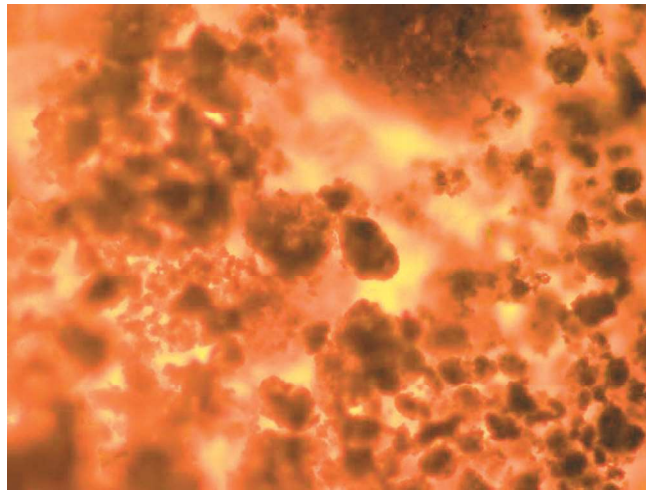
Tablo 7.3. HP ve PHP-MAG4-HP'nin DSC sonuçları

Malzeme	Isıtma Periyodu				Soğutma Periyodu			Katılma oranı (% ağır.)
	Katı-katı geçişi pik sıc. (°C)	Katı-sıvı erime pik sıc. (°C)	Erime gizli ısı ΔH (J.g ⁻¹)	Toplam gizli ısı ΔH (J/g)	Sıvı-katı kristallenme pik sıc. (°C)	Katı-katı geçişi pik sıc. (°C)	Toplam gizli ısı ΔH (J/g)	
HP	16,25	30,78	119,0	147,90	11,72	4,37	-211	100
PHP-MAG4-HP	12,48	25,17	79,90	99,60	16,68	4,65	-100,6	67

Tablo 7.4. Literatürde bulunan diğer n-heptadekan bazlı kompozit FDM'ler ile üretilen kompozit FDMnin karşılaştırılması

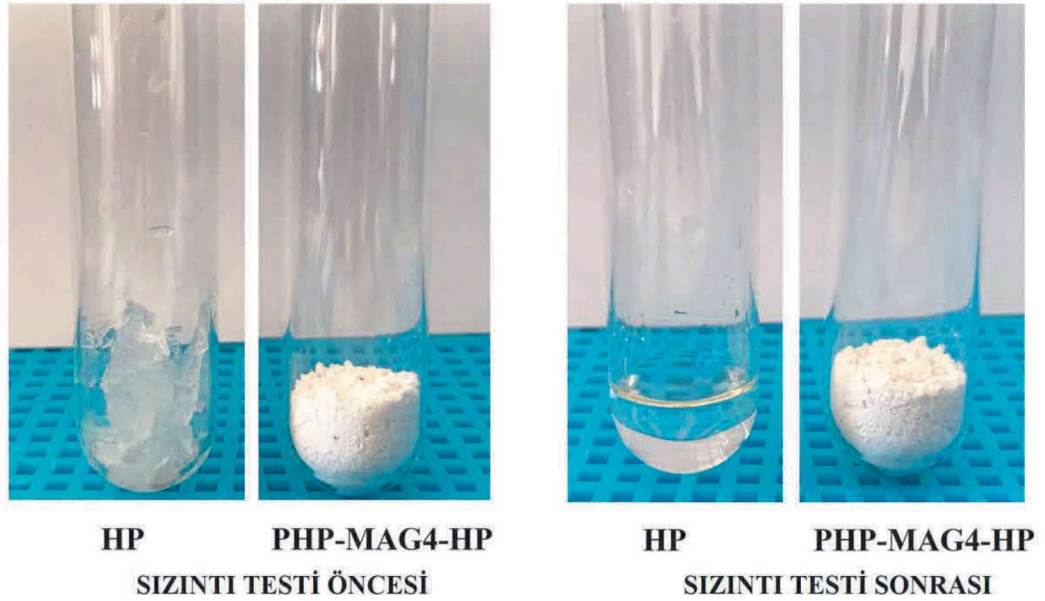
n-heptadekan bazlı kompozit FDM	Erime gizli ısı ΔH (J.g ⁻¹)	Toplam gizli ısı ΔH (J/g)	Referans
n-Heptadekan/Bentonit kil	38,42	-	[77]
n-Heptadekan/Pomza	72,38	-	[78]
n-Heptadekan/Kaolin kil	34,63	-	[79]
n-Heptadekan/CaCO ₃ kabuk	59,82	-	[80]
n-Heptadekan/PMMA kabuk	81,50	-	[81]
PHP-MAG4-HP	79,90	99,60	Bu çalışma

N-heptadekanın polimer matrisine penetrasyonu, POM analizi ile de belirlenmiş ve PHP-MAG4-HP'nin POM görüntüsü Şekil 7.9'da verilmiştir. HP'nin varlığından dolayı opak ve gölgeli alanların gözlemlenmesi, FDMnin gözeneklere dahil edildiğini doğrulamıştır.



Şekil 7.9. PHP-MAG4-HP'nin POM görüntüsü

Sızdırmazlık, kullanıldıkları ekipmanda ciddi kontaminasyon hasarına neden olma potansiyeli nedeniyle kompozit FDMler için çok önemlidir. Şekilce stabilize edilmiş n-Heptadekan/poliHIPE köpüğünün sızıntı testi, HP'nin erime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa önceden ısıtılmış bir vakum fırınında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla HP ve kompozit FDM cam tüplere yerleştirilerek vakumlu fırında sabit sıcaklıkta ($45^{\circ}\text{C}\pm 5$) bir saat süreyle tutulmuştur. Sızıntı testi öncesi ve sonrası HP ve PHP-MAG4-HP'nin elde edilen görüntüleri Şekil 7.10'da verilmiştir. Şekil 7.10'da görüldüğü gibi, HP, sızıntı testi öncesi oda sıcaklığında katı ve yapışkan bir yapıya sahipken, ısıya maruz kaldıktan sonra eriyip sıvı faz haline dönüşmüştür. Buna karşın, PHP-MAG4-HP, tüpün iç duvarında sızıntı olduğunu gösteren herhangi bir yağlı iz bırakmadan kararlılığını korumuştur. Bu sonuç, polimer destek matrisinin gözeneklerinde FDMnin tutulmasını sağlayan kılcal, yüzey gerilimi, Van der Waals kuvveti gibi kuvvetlere atfedilebilir [43].

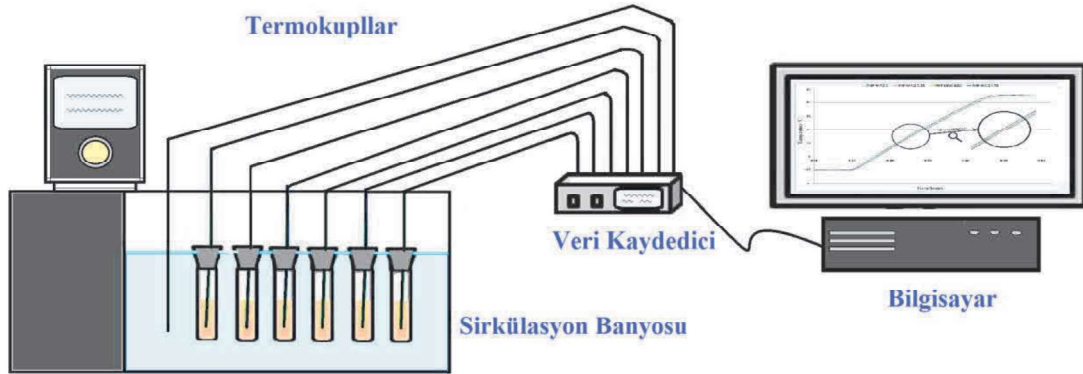


Şekil 7.10. Sızıntı testi öncesi ve sonrası HP ve PHP-MAG4-HP'nin görüntüleri

7.4. Termal Davranışın İncelenmesi

Üretilen malzemelerin termal davranışları veri kaydedici, termokupllar, sirkülasyon banyosu ve bilgisayardan oluşan deneysel bir test sistemi kullanılarak incelenmiştir (Şekil 7.11). Termal davranış testleri, iki ayrı test ile gerçekleştirilmiştir. Burada, üretilen destek malzemelerine (poliHIPE'lere) Fe_3O_4 nanoparçacıklarının katkısının

etkisini ve elde edilen kompozit FDMnin termal davranışını gözlemlemek amaçlanmıştır.



Şekil 7.11. Üretilen malzemelerin termal performansının belirlendiği deneysel test sistemi

İlk testte modifiye Fe_3O_4 nanoparçacıkları içeren ve katkısız poliHIPE köpükler eşdeğer miktarlarda tüplere konuldu. Daha sonra tüplerin içine K tipi termokupllar yerleştirildi ve termokupllar veri kaydediciye bağlandı. Banyo, etanol ile dolduruldu ve etanol, dahili bir sirkülasyon pompası ile homojen sıcaklık dağılımını korumak için sürekli olarak sirküle edildi. Daha sonra tüpler sirkülasyon banyosuna daldırıldı. Elde edilen malzemelerin ısı iletim özellikleri $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında gözlemlenmiştir. Tüm tüpler $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de termal dengeye ulaştığında test başlatılmış ve banyo $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmıştır. Isıtma işlemi sırasında; numunelerin sıcaklık değişimleri veri kaydedici kullanılarak toplanmış ve veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Şekil 7.12, PHP-MAG1, PHP-MAG2, PHP-MAG3 ve PHP-MAG4'ün ısıtma eğrilerini göstermektedir. Sonuçlar, destek malzemelerinin (poliHIPE'ler) termal iletkenliklerinin, Fe_3O_4 nanoparçacıkları katkı miktarı ile uyumlu olarak $\text{PHP-MAG4} > \text{PHP-MAG3} > \text{PHP-MAG2} > \text{PHP-MAG1}$ sırasını izlediğini göstermektedir. Ayrıca, Fe_3O_4 nanoparçacıkları içermediği için PHP-MAG1'in ısınma hızının en düşük olduğu da açıkça görülmektedir.

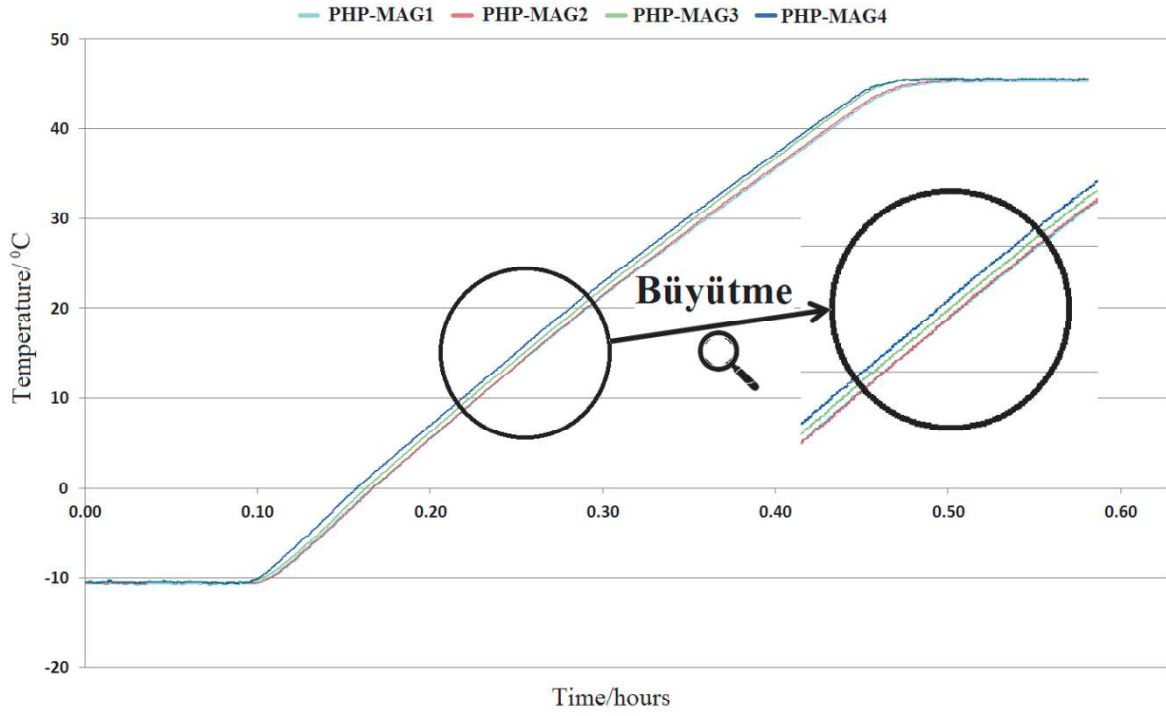
Elde edilen malzemelerin ısıtma işlemi sırasındaki ısı depolama hızları Tablo 7.5'te verilmiş olup, burada belirli bir sıcaklık aralığı belirli bir zaman aralığına bölünerek ısı depolama hızları hesaplanmıştır. Buna göre PHP-MAG4'ün ısı depolama hızının en yüksek ($0,0198\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) ve PHP-MAG1'in ($0,0191\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) en düşük olduğu görülmüştür. Fe_3O_4 nanoparçacıkların eklenmesiyle emülsiyon viskozitesindeki

artışın getirdiği çalışma zorluğu nedeniyle, az miktarda Fe_3O_4 nanoparçacıklarının eklenmesiyle bile, sentezlenen destek malzemelerinin ısıl iletkenliği, artırılmıştır. Böylece, destek malzemesine (PHP-MAG4) yalnızca ağırlıkça %0,75 Fe_3O_4 nanoparçacıklarının eklenmesi; ısıtma işlemi için ısı depolama hızını 0,0191 °C/s'den 0,0198 °C/s'ye yükseltmiş ve artış yüzdesi % 3,67 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, az miktarda Fe_3O_4 nanopartikül ilavesinin bile destek malzemesinin termal iletkenliğini artırabileceği bulunmuştur.

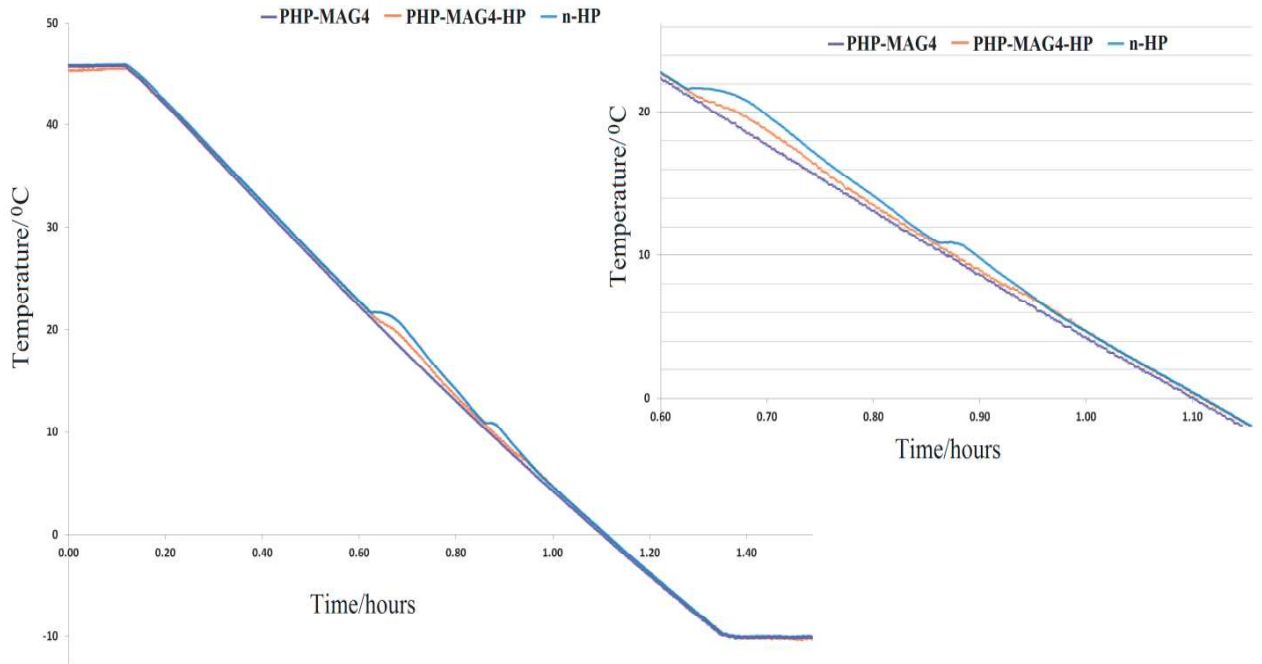
Tablo 7.5. Numunelerin hesaplanan ısı depolama hızları

Proses	Özellik	PHP-MAG1	PHP-MAG2	PHP-MAG3	PHP-MAG4
Isıtma	Isı depolama hızı (°C/s)	0,0191	0,0192	0,0194	0,0198

İkinci testte, saf FDM olarak n-heptadekan ve PHP-MAG4, PHP-MAG4-HP gibi malzemelerin termal davranışları yukarıda belirtilen şekilde elde edilmiştir. Farklı olarak bu sefer malzemelerin soğutma işlemi 45 °C ile -10 °C arasında incelenmiştir. Test numunelerini içeren tüpler sirkülasyon banyosuna daldırılmıştır. ~45 °C'de ısıl denge sağlandığında soğutma işlemi başlatılmış ve veriler elde edilmiştir. Şekil 7.13, saf FDM olarak n-heptadekan ve PHP-MAG4, PHP-MAG4-HP malzemelerinin soğuma eğrilerini göstermektedir. Buna göre PHP-MAG4-HP ve n-heptadekanın faz değişim süreçlerinin DSC analizi sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenmiştir (Tablo 7.3.). Ayrıca PHP-MAG4, sadece destek matrisi olduğu ve herhangi bir FDM içermediği için faz değişikliği göstermemiş, Şekil 7.13'te gösterildiği gibi sadece soğuma işlemi gerçekleşmiştir.



Şekil 7.12. PHP-MAG1, PHP-MAG2, PHP-MAG3 ve PHP-MAG4'ün ısıtma eğrileri



Şekil 7.13. PHP-MAG4, PHP-MAG4-HP ve saf n-HP sıcaklıklarının soğutma işlemleri sırasındaki zamanla değişimi

8. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında modifiye Fe_3O_4 nanoparçacıklar katkılı şekilce stabilize edilmiş n-heptadekan/poliHIPE kompozit FDM, ısıl enerji depolama uygulamaları için hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Fe_3O_4 nanoparçacıkları mekaniksel olarak eş anlı çöktürme yöntemiyle üretilmiş ve SEM ve TEM analiz sonuçları bu nanopartiküllerin başarılı bir şekilde sentezlendiğini doğrulamıştır.
- Modifiye Fe_3O_4 nanoparçacıklarının FT-IR ile gerçekleştirilen karakterizasyonu, Fe_3O_4 nanoparçacıklarının yüzey modifikasyonunun başarılı olduğunu göstermiştir.
- Modifiye Fe_3O_4 nanoparçacıklarının farklı oranlarda katkılandırılmasıyla hazırlanan poliHIPE köpüklerin özellikleri SEM, BET yüzey alanı analizi ve TGA ile araştırılmıştır.
- SEM sonuçlarına göre, poliHIPE destek malzemelerinin morfolojisi, modifiye Fe_3O_4 nanoparçacıklarının artırılmasıyla iyileştirilmiştir. Ayrıca, PHP-MAG4, Fe_3O_4 nanoparçacıklarının destek matrisine eklenmesiyle gelişmiş termal iletkenlik özellikler göstermiştir. Öte yandan, en yüksek yüzey alanı değeri ($7,0593 \text{ m}^2/\text{g}$), termal kararlılığın yanı sıra en yüksek nanoparçacık miktarını içeren PHP-MAG4 kompoziti için bulunmuştur. Bu nedenle, şekilce stabilize edilmiş n-heptadekan/poliHIPE kompozitinin hazırlanması için PHP-MAG4 destek materyali olarak seçilmiştir.
- HP'nin gözeneklere dahil edilmesi, FT-IR, POM ve DSC analizleriyle doğrulanmıştır.
- Elde edilen kompozit FDM yani PHP-MAG4-HP, yüksek gizli ısı entalpisini ($99,6 \text{ J/g}$) ve sızdırmazlık özelliği göstermiştir.
- Sonuç olarak üretilen şekilce kararlı kompozit FDM'nin düşük sıcaklıktaki termal enerji depolama uygulamaları için kullanım imkanına sahip olduğu tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] M. S. Mert, H. H. Mert, M. Sert, “Microencapsulated oleic–capric acid/hexadecane mixture as phase change material for thermal energy storage,” *J Therm Anal Calorim*, 136, pp. 1551–1561, 2009.
- [2] C.Cárdenas-Ramírez, F. Jaramillo, M. Gómez, “Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials,” *Journal of Energy Storage*, 30, pp. 101495, 2020.
- [3] M. Teggari, S. S. M. Ajarostaghi, Ç. Yıldız, M. Arıcı, K. A.R. Ismail, H. Niyas, F. A.M. Lino, M. S. Mert, M. Khalid, “Performance enhancement of latent heat storage systems by using extended surfaces and porous materials: A state-of-the-art review,” *Journal of Energy Storage*, 44, pp. 103340, 2021.
- [4] X. Yang, Y. Liu, Z. Lv, Q. Hua, L. Liu, B. Wang, J. Tang, “Synthesis of high latent heat lauric acid/silica microcapsules by interfacial polymerization method for thermal energy storage,” *Journal of Energy Storage*, 33, pp. 102059, 2021.
- [5] A. Khezri, M. Sahebi, M. Mohammadi, “Fabrication and Thermal properties of graphene nanoplatelet-enhanced phase change materials based on paraffin encapsulated by melamine–formaldehyde,” *J Therm Anal Calorim*. DOI:10.1007/s10973-021-11085-7.
- [6] M. Teggari, M. Arıcı, M. S. Mert, S. S. M. Ajarostaghi, H. Niyas, E. Tunçbilek, K. A. R. Ismail, Z. Younsi, A. T. Benhouia, E. H. Mezaache, “A comprehensive review of micro/nano enhanced phase change materials,” *J Therm Anal Calorim*, 147, pp. 3989–4016, 2022.
- [7] D. Fan, Y. Meng, D. Shen, Y. Cao, K. Chen, L. Qian, J. Liu, Q. Zhao, “Form-stable phase-change materials supported by 1-octadecylamine-modified montmorillonite for latent heat storage,” *Int J Energy Res.*, 45, pp. 8871– 8881, 2021.
- [8] W.Wu, W. Wu, S. Wang, “Form-stable and thermally induced flexible composite phase change material for thermal energy storage and thermal management applications,” *Applied Energy*, 236, pp. 10-21, 2019.
- [9] Z. Zhang, N. Zhang, J. Peng, X. Fang, X. Gao, Y. Fang, “Preparation and thermal energy storage properties of paraffin/expanded graphite composite phase change material,” *Appl. Energy*, 91, pp. 426-431, 2012.
- [10] H. H. Mert, M. S. Mert, “Design of n-octadecane-based form-stable composite phase change materials embedded in porous nano alumina for thermal energy storage applications,” *J Therm Anal Calorim*, 147, pp. 4925–4934, 2022.
- [11] Y. Luo, S. Xiong, J. Huang, F. Zhang, C. Li, Y. Min, R. Peng, Y. Liu, “Preparation, characterization and performance of paraffin/sepiolite composites

- as novel shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 231, pp. 111300, 2021.
- [12] W. Guan, J. Li, T. Qian, X. Wang, Y. Deng, “Preparation of paraffin/expanded vermiculite with enhanced thermal conductivity by implanting network carbon in vermiculite layers,” *Chem. Eng. J.*, 277, pp. 56-63, 2015.
- [13] J. Zhang, X. Zhang, Y. Wan, D. Mei, B. Zhang, “Preparation and thermal energy properties of paraffin/halloysite nanotube composite as form-stable phase change material,” *Sol. Energy* 86, pp. 1142-1148, 2012.
- [14] S. Sajad, M. R. Moghbeli, “Preparation of highly open-porous functionalized PolyHIPE monoliths via emulsion templating for catalyst surface immobilization and thiophene chemical oxidation,” *Colloid Polym Sci*, 299, pp. 1419–1437, 2021.
- [15] E.H. Mert, H. H. Mert, “Preparation of polyHIPE nanocomposites: Revealing the influence of experimental parameters with the help of experimental design approach,” *Polymer Composites*, 42 pp. 724–738, 2021.
- [16] M. S. Silverstein, PolyHIPEs: “Recent advances in emulsion-templated porous polymers,” *Prog. Polym. Sci.*, 39, pp. 199–234, 2014.
- [17] Z. Zheng, X. Zheng, H. Wang, Q. Du, “Macroporous graphene oxide–polymer composite prepared through pickering high internal phase emulsions,” *Appl. Mater. Interfaces*, 5, pp. 7974–7982, 2013.
- [18] S. Puupponen, V. Mikkola, T. Ala-Nissila, A. Seppälä, “Novel microstructured polyol-polystyrene composites for seasonal heat storage,” *Appl. Energy.*, 172 pp. 96-106, 2016.
- [19] J.A. Moreno Balderrama, M. A. Dourges, A. Magueresse, L. Maheo, H. Deleuze. “Emulsion-templated pullulan monoliths as phase change materials encapsulating matrices,” *Mater. Today Commun.*, 17, pp. 466-473, 2018.
- [20] H. H. Mert, “PolyHIPE composite based-form stable phase change material for thermal energy storage,” *Int. J. Energy Res.*, 44, 8, pp. 6583-6594, 2020.
- [21] T. Zhang, Z. Xu, H. Chi, Y. Zhao, “Closed-cell, phase change material-encapsulated monoliths from a reactive surfactant-stabilized high internal phase emulsion for thermal energy storage,” *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2,7, pp. 2578-2585, 2020.
- [22] D. Kahraman Döğüşcü, G. Hekimoğlu, A. Sarı, “High internal phase emulsion templated-polystyrene/carbon nano fiber/hexadecanol composites phase change materials for thermal management applications,” *Journal of Energy Storage*, 39, pp. 102674, 2021.
- [23] Z. Türkoğlu, H. H. Mert, E. H. Mert, H. Ocak, M. S. Mert, “Cellulose nanocrystals supported—PolyHIPE foams for low-temperature latent heat storage applications,” *J. Appl. Polym. Sci.*, 139, 11, pp. e51785, 2022.

- [24] A. Sarı, C. Alkan, D. Kahraman Döğüşcü, A. Biçer, “Micro/nano-encapsulated n-heptadecane with polystyrene shell for latent heat thermal energy storage,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 126, pp. 42-50, 2014.
- [25] F. Irani, Z. Ranjbar, S. Moradian, A. Jannesari, “Microencapsulation of n-heptadecane phase change material with starch shell,” *Progress in Organic Coatings*, 113, pp. 31-38, 2017.
- [26] F. Irani, Z. Ranjbar, A. Jannesari, S. Moradian, “Fabrication and characterization of microencapsulated n-heptadecane with graphene/starch composite shell for thermal energy storage,” *Progress in Organic Coatings*, 131, pp. 203-210, 2019.
- [27] J. Li, L. Jia, Y. Chen, L. Li, S. Mo, J. Wang, C. Wang, “Microfluidic fabrication and thermal properties of microencapsulated n-heptadecane with hexanediol diacrylate shell for thermal energy storage,” *Applied Thermal Engineering*, 162, pp. 114278, 2019.
- [28] D. Sarabandi, G. Roudini, F. Barahuie, “Activated carbon derived from pine cone as a framework for the preparation of n-heptadecane nanocomposite for thermal energy storage,” *Journal of Energy Storage*, 24, pp. 100795, 2019.
- [29] G. Hekimoğlu, A. Sarı, S. Arunachalam, H. Arslanoğlu, O. Gencel, “Porous biochar/heptadecane composite phase change material with leak-proof, high thermal energy storage capacity and enhanced thermal conductivity,” *Powder Technology*, 394, pp. 1017-1025, 2021.
- [30] A. S. Fleischer, *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [31] X. Wang, E. Lu, W. Lin, C. Wang, “Micromechanism of heat storage in a binary system of two kinds of polyalcohols as a solid–solid phase change material,” *Energy Conversion and Management*, 41(2), pp. 135-144, 2000.
- [32] M. S. Mert, M. Sert, H. H. Mert, “Isıl Enerji Depolama Sistemleri için Organik Faz Değiştiren Maddelerin Mevcut Durumu Üzerine Bir İnceleme,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6 (1), pp. 161-174, 2018.
- [33] M. H. Abokersh, M. Osman, O. El-Baz, M. El-Morsi, O. Sharaf, “Review of the phase change material (PCM) usage for solar domestic water heating systems (SDWHS),” *Int. J. Energy Res.*, 42, pp. 329–357, 2018.
- [34] H. Mehling, L.F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. NewYork: Springer, 2008.
- [35] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, “Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review,” *Energy and Buildings*, 42, pp. 1361–1368, 2010.

- [36] P. Verma, Varun, S. K. Singal, “Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), pp. 999-1031, 2008.
- [37] S. A. Mohamed, F. A. Al-Sulaiman, N. I. Ibrahim, M. H. Zahir, A. Al-Ahmed, R. Saidur, B.S. Yılbaş, A. Sahin, “A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, pp. 1072-1089, 2017.
- [38] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 318-345, 2009.
- [39] S. A. Memon, “Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,” 31, pp. 870-906, 2014.
- [40] M. M. Kenisarin, K.M. Kenisarina, “Form-stable phase change materials for thermal energy storage,” *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, pp. 1999–2040, 2012.
- [41] D. Wu, W. Wen, S. Chen, H. Zhang, “Preparation and properties of a novel form-stable phase change material based on a gelator,” *J. Mater. Chem. A*, 3, pp. 2589-2600, 2015.
- [42] C. Wang, L. Feng, W. Li, J. Zheng, “Shape-stabilized phase change materials based on polyethylene glycol/porous carbon composite:the influence of the pore structure of the carbon materials,” *Sol Energy Mater Sol Cells*,”105, pp. 21-26, 2012.
- [43] M. M. Umair, Y. Zhang, K. Iqbal, S. Zhang, B. Tang, “Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage—A review,” *Applied Energy*, 235, 846-873, 2019.
- [44] A. Sarı, C. Alkan, U. Kolemen, O. Uzun, “Eudragit S (methyl methacrylate methacrylic acid copolymer)/fatty acid blends as form-stable phase change material for latent heat thermal energy storage,” *J Appl Polym Sci*,101, pp. 1402–1406, 2006.
- [45] A. Sarı, C. Alkan, A. Karaipekli, O. Uzun, “Poly(ethylene glycol)/poly(methyl methacrylate) blends as novel form-stable phase-change materials for thermal energy storage,” *J Appl Polym Sci*,116, pp. 929–933, 2010.
- [46] K. Kaygusuz, A. Sarı, “High density polyethylene/paraffin composites as formstable phase change material for thermal energy storage,” *Energy Sources, Part A*, 29, pp. 261–270, 2007.
- [47] S. Song, J. Feng, P. Wu, “A new strategy to prepare polymer-based shape memory elastomers,” *Macromol Rapid Commun*, 32, pp. 1569–1575, 2011.

- [48] S. Peng, A. Fuchs, R. A. Wirtz, “Polymeric phase change composites for thermal energy storage,” *J Appl Polym Sci*, 93, pp.1240–1251, 2004.
- [49] S. B. Şentürk, D. Kahraman, C. Alkan, İ. Gökçe, “Biodegradable PEG/cellulose, PEG/ agarose and PEG/chitosan blends as shape stabilized phase change materials for latent heat energy storage,” *Carbohydr Polym*, 84, pp. 141–144, 2011.
- [50] Y. Wu, C. Chen, Y. Jia, J. Wu, Y. Huang, L. Wang, “Review on electrospun ultrafine phase change fibers (PCFs) for thermal energy storage,” *Appl Energy*, 210, pp. 167–81, 2018.
- [51] C. Chen, Y. Zhao, W. Liu, “Electrospun polyethylene glycol/cellulose acetate Phase change fibers with core–sheath structure for thermal energy storage,” *Renew Energy*, 60, pp. 222–225, 2013.
- [52] S. Tahan Latibari, S. M. Sadrameli, “Carbon based material included-shaped Stabilized phase change materials for sunlight-driven energy conversion and storage: an extensive review,” *Sol Energy*,170, pp.1130–1161, 2018.
- [53] T. C. Chang, S. Lee, Y.K. Fuh, Y.C. Peng, Z.Y. Lin, “PCM based heat sinks of paraffin/ nanoplatelet graphite composite for thermal management of IGBT,” *Appl Therm Eng*, 112, pp. 1129–36, 2017.
- [54] D. Zou, X. Ma, X. Liu, P. Zheng, Y. Hu, “Thermal performance enhancement of Composite phase change materials (PCM) using graphene and carbon nanotubes as additives for the potential application in lithium-ion power battery,” *Int J Heat Mass Transf*,120, pp. 33–41, 2018.
- [55] C. Kinkelin, S. Lips, U. Soupremanien, V. Remondière, J. Dijon, H. Le Poche, et al “Theoretical and experimental study of a thermal damper based on a CNT/PCM composite structure for transient electronic cooling,” *Energy Convers Manag*, 142, pp. 257–271, 2017.
- [56] S. Yu, S.G. Jeong, O. Chung, S. Kim, “Bio-based PCM/carbon nanomaterials Composites with enhanced thermal conductivity,” *Sol Energy Mater Sol Cells*,120, pp. 549–54, 2014.
- [57] P. Lv, C. Liu, Z. Rao, “ Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: preparation, characterization and applications,” *Renew Sustain Energy*, 68, pp. 707–726, 2017.
- [58] S. Liu, L. Han, S. Xie, Y. Jia, J. Sun, Y. Jing, et al., “A novel medium-temperature Form stable phase change material based on dicarboxylic acid eutectic mixture/expanded graphite composites,” *Sol Energy*,143, pp. 22–30, 2017.
- [59] Y. Wei, J. Li, F. Sun, J. Wu, L. Zhao, “Leakage-proof phase change composites Supported by biomass carbon aerogels from succulents,” *Green Chem*, 20, pp. 1858-1865, 2018.

- [60] D. Zhang, M. Chen, Q. Liu, J. Wan, J. Hu, "Preparation and thermal properties of molecular-bridged expanded graphite/polyethylene glycol composite phase change materials for building energy conservation," *Materials*, 11, pp. 818, 2018.
- [61] Y. Lin, C. Zhu, G. Alva, G. Fang, "Palmitic acid/polyvinyl butyral/expanded graphite composites as form-stable phase change materials for solar thermal energy storage," *Appl Energy*, 228, pp.1801–1809, 2018.
- [62] S. Liang, Y. Zhu, H. Wang, T. Wu, C. Tian, J. Wang, et al. "Preparation and characterization of thermoregulated rigid polyurethane foams containing nanoencapsulated phase change materials," *Ind Eng Chem Res*, 55, pp. 2721-2730, 2016.
- [63] L. Qu, A. Li, J. Gu, C. Zhang, "Thermal energy storage capability of polyurethane foams incorporated with microencapsulated phase change material," *ChemistrySelect*, 3, pp. 3180–3186, 2018.
- [64] A.A. Aydın, H. Okutan, "Polyurethane rigid foam composites incorporated with Fatty acid ester-based phase change material," *Energy Convers Manag*, 68, pp. 74–81, 2013.
- [65] W. Wang, X. Yang, Y. Fang, J. Ding, "Preparation and performance of form-stable polyethylene glycol/silicon dioxide composites as solid–liquid phase change materials," *Appl Energy*, 86, pp.170–174, 2009.
- [66] B. Tang, J. Cui, Y. Wang, C. Jia, S. Zhang, "Facile synthesis and performances of PEG/SiO₂ composite form-stable phase change materials," *Sol Energy*, 97, pp. 484–92, 2013.
- [67] H. Akeiber, P. Nejat, M.Z.A. Majid, M.A. Wahid, F. Jomehzadeh, I. Zeynali Famileh, et al. "A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes," *Renew Sustain Energy Rev*, 60, pp.1470–97, 2016.
- [68] N. Zhang, Y. Song, Y. Du, Y. Yuan, G. Xiao, Y. Gui,, "A novel solid-solid phase changematerial: pentaglycerine/expanded graphite composite PCMs," *Adv Eng Mater*, 20, pp. 1800237, 2018.
- [69] J.S. Lim, A.J. Fowler, A. Bejan, "Spaces filled with fluid and fibers coated with a phase change material," *J Heat Transf*, 115, pp.1044–1050, 1993.
- [70] Y. Jiang, E. Ding, G. Li, "Study on transition characteristics of PEG/CDA solid–solid phase change materials," *Polymer*, 43, pp. 117–122, 2002.
- [71] A. Kuru, S. Alay Aksoy, "Faz Değiştiren Maddeler ve Tekstil Uygulamaları," *Tekstil ve Mühendis Dergisi*, 19(86), pp. 41-48, 2012.
- [72] H.H. Mert, E.H. Mert, *Emulsion Templated Hierarchical Macroporous Polymers*. In: Uthaman A., Thomas S., Li T., Maria H. (eds), *Advanced Functional Porous Materials. Engineering Materials. Springer, Cham.*, 2022.

- [73] A. Özkonstanyan, H. H. Mert, M. S. Mert, B. Bilgin Eran, H. Ocak, "Synthesis and characterization of new bent-core liquid crystal with a ferroelectric-like switching/modified magnetite nanocomposite", *Journal of Molecular Structure*, 1222, pp. 128851, 2020.
- [74] M. Mahdavi, M. B. Ahmad, M. J. Haron, F. Namvar, B. Nadi, M.Z. Ab Rahman, J. Amin, "Synthesis, surface modification and characterisation of biocompatible magnetic iron oxide nanoparticles for biomedical applications," *Molecules*, 18, pp. 7533-7548, 2013.
- [75] S. A. Elfeky, S. E. Mahmoud, A. F. Youssef, "Applications of CTAB modified magnetic nanoparticles for removal of chromium (VI) from contaminated water," *Journal of Advanced Research*, 8, pp. 435-443, 2017.
- [76] B. Zhang, Z. Zhang, S. Kapar, P. Ataeian, J. S. Bernardes, R. Berry, W. Zhao, G. Zhou, K. C. Tam, "Microencapsulation of phase change materials with polystyrene/cellulose nanocrystal hybrid shell via Pickering emulsion polymerization," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 7, pp. 17756–17767, 2019.
- [77] A. Sarı, "Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials," *Energy Conversion and Management*, 117, pp. 132-141, 2016.
- [78] A. Karaipekli, A. Sarı, "Development and thermal performance of pumice/organic PCM/gypsum composite plasters for thermal energy storage in buildings," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 149, pp. 19-28, 2016.
- [79] A. Sarı, "Fabrication and thermal characterization of kaolin-based composite phase change materials for latent heat storage in buildings," *Energy and Buildings*, 96, pp. Pp. 193-200, 2015.
- [80] S. Emir, H. Paksoy, "New multilayered microencapsulated phase change material with CaCO₃ and Ag shells," *Energy Storage*, 3, pp. e214, 2021.
- [81] A. Sarı, C. Alkan, A. Karaipekli, "Preparation, characterization and thermal properties of PMMA/n-heptadecane microcapsules as novel solid–liquid microPCM for thermal energy storage," *Applied Energy*, 87, pp. 1529-1534, 2010.



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2012 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Kimya ve Süreç Mühendisliği Bölümünden 2018 yılında mezun oldu. Laboratuvar ve üretim stajlarını Etimaden Emet Eti Bor Maden İşletmeleri (Temmuz 2016), Tayf Kimya Matbaa Mürekkepleri (2017) bünyesinde yaptı. 2019 yılında Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı programında tezli yüksek lisans öğrenimine başladı. 2019 Haziran tarihinden itibaren poliüretan sistemler üzerine iş yapan Purotto Kimya A.Ş firmasında çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

[1] G. Can, H. H. Mert, "Modifiye edilmiş magnetit nanopartikülleri içeren poliHIPE kompozit temelli faz değıştiren maddelerin geliştirilmesi", 6. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, Sözlü Özet Bildiri, İstanbul, Türkiye, 17-18 Aralık 2020.