



T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS

FONKSİYONELLEŞTİRİLEN YÜKSEK İÇ FAZLI EMÜLSİYON
POLİMER/ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KOMPOZİTLERİNİN
TERMAL ENERJİ DEPOLAMA PERFORMANSLARININ
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülşah ÖNER

Danışman: Doç. Dr. Derya KAHRAMAN DÖĞÜŞCÜ

TOKAT – 2025



Bu tez çalışması;

**Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 2210C
Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs programı ile desteklenmiştir.**

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Derya KAHRAMAN DÖĞÜŞCÜ danışmanlığında hazırlamış olduğum “Fonksiyonelleştirilen Yüksek İç Fazlı Emülsiyon Polimer/ Faz Değiştiren Malzeme Kompozitlerinin Termal Enerji Depolama Performanslarının Araştırılması” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

10/12/2025

Gülşah ÖNER

JÜRİ KABUL VE ONAY

Gülşah ÖNER tarafından hazırlanan “**Fonksiyonelleştirilen Yüksek İç Fazlı Emülsiyon Polimer/ Faz Değiştiren Malzeme Kompozitlerinin Termal Enerji Depolama Performanslarının Araştırılması**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 10.12.2025 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen Jüri tarafından Oy Birliği ile Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı Soyadı)

İmzası

Üye (Danışman):Doç. Dr. Derya KAHRAMAN DÖĞÜŞCÜ

Üye (Başkan) :Prof. Dr. Ahmet SARI

Üye :Prof. Dr. Esra KOÇ

ONAY

...../...../.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca öğrencisi olmaktan büyük onur duyduğum, bana her konuda yol gösteren gerek akademik hayatımda gerekse sosyal hayatımda yardımını hiçbir şekilde esirgemeyen, bu süreç boyunca yaşadığım bütün zorluklarda sorunları sorun olmaktan çıkaran, önüme çıkan engelleri bana en büyük desteği vererek aşmamı sağlayan, danışmanım Doc. Dr. Derya KAHRAMAN DÖĞÜŞCÜ'ye teşekkür ederim.

Çalışmalarımnda, beton kompozitlerin hazırlanması termal ve mekanik olarak test edilmesi konusunda destek sağlayan Prof. Dr. Ahmet SARI'ya (Karadeniz Teknik Üniversitesi), Prof. Dr. Osman GENÇEL'e (Bartın Üniversitesi) ve Prof. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ'a (Bartın Üniversitesi) teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca burs desteği aldığım TÜBİTAK 2210-C Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı'na teşekkür ederim.

Projedeki çalışma arkadaşlarım, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizikokimya Araştırma Laboratuvarı'ndaki çalışma arkadaşlarım Hazal YILMAZKAYA'ya, Özlem YILMAZ'a, Ramazan ONAY'a ve İbrahim Kubilay NEYİŞ'e teşekkür ederim.

Desteği ve sevgisi ile her zaman yanımda olan canım aileme, akademik hayatındaki başarı ile bana örnek ve destek olan eşim İbrahim Enes ÖNER'e ve biricik oğlum Ömer Melikşah ÖNER'e çok teşekkür ederim.

Gülşah ÖNER

ÖZET

FONKSİYONELLEŞTİRİLEN YÜKSEK İÇ FAZLI EMÜLSİYON POLİMER/ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KOMPOZİTLERİNİN TERMAL ENERJİ DEPOLAMA PERFORMANSLARININ ARAŞTIRILMASI

Öner, Gülşah

Yüksek Lisans, Kimya Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Derya KAHRAMAN DÖĞÜŞCÜ

Aralık 2025, xiii + 81 sayfa

Faz değişim malzemeleri (FDM'ler), fosil yakıtlara olan bağımlılığı ve artan küresel enerji talebini azaltmak için yaygın olarak araştırılmaktadır. FDM'lerinin yapı malzemelerine entegre edilmesi ile üretilen akıllı bina uygulamaları sıcaklık dalgalanmalarının önüne geçerek enerji tasarrufu sağlarlar. Bu çalışma, özellikle inşaatta artan enerji tüketimine yanıt olarak, enerji verimliliğini artırmak amacıyla yapı malzemesine entegre edilmiş FDM'lerin rolünü araştırmaktadır. Ultra gözenekli yüksek iç faz emülsiyon polimerleri (PoliHIPE) yüksek oranda FDM hapsedme kapasitesine sahiptirler. Ayrıca FDM içeren PoliHIPE iskeletler bina yapı elemanlarına termal konfor sağlaması amacıyla daha önce hiç entegre edilmemiştir. PoliHIPE iskelet, çapraz bağlayıcı madde olarak etilen glikol dimetakrilat kullanılarak glisidil metakrilat ve 2-etil heksil metakrilatın kopolimerizasyonu yoluyla oluşturulmuştur. Glisidil metakrilat bazlı PoliHIPE iskelet trietanolamin varlığında -OH fonksiyonel grupları yapısında bulunduran FDM afinitesi artırılmış yapılara dönüştürülmüştür. FDM olarak belirlenen metil palmitat, sızıntı davranışı olmaksızın kütlece %60 oranında PoliHIPE matrisi içine hapsedilmiştir. Kompozit FDM'lerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu FT-IR, XRD, SEM ve BET analizleri ile belirlenmiştir. DSC analizi yaklaşık 28 °C'de 136.43 J/g kadar ısı enerji depolayan, TG analizi yaklaşık 180 °C'ye kadar termal olarak kararlı kompozit yapıların başarı ile sentezlendiğini doğrulamıştır. Üretilen kompozit yapılar ardışık 1000 ısıtma/soğutma periyodu sonrasında yapısal ve termal olarak kararlıdır. Hafif betona entegre edilen PoliHIPE/FDM kompozit yapılar, betonun yoğunluk, mekanik mukavemet ve ısı iletkenlik değerlerinde bir miktar azalmaya sebep olsalar da bina yapı malzemesi olarak kullanılmaya elverişlidir. Termoregülasyon testleri, PoliHIPE/FDM kompozit yapıların binalarda sıcaklık dalgalanmalarını dengeleme yeteneğini ortaya çıkarmıştır (ortalama -12.35 °C gündüz soğutma, 1.21 °C gece ısıtma). Bu sonuçlar, üretilen yeni PoliHIPE/MP@Hafif beton yapıların binaların ısı düzenlemesi ve enerji tasarrufu için yapı malzemesi olarak etkili bir şekilde değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Isıl Enerji Depolama, Faz Değişim Malzemeleri, PoliHIPE, Hafif Beton, Binalarda Enerji Verimliliği

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THERMAL ENERGY STORAGE PERFORMANCE OF FUNCTIONALIZED HIGH INTERNAL PHASE EMULSION POLYMER/ PHASE CHANGE MATERIAL COMPOSITES

Öner, Gülşah

Master's Thesis, Department of Chemistry

Advisor: Doc. Dr. Derya KAHRAMAN DÖĞÜŞCÜ

December 2025, xiii + 81 pages

Phase change materials (PCMs) are being widely researched to reduce dependence on fossil fuels and address the increasing global energy demand. Smart building applications produced by integrating PCMs into building materials provide energy savings by preventing temperature fluctuations. This study investigates the role of PCMs integrated into building materials to increase energy efficiency, particularly in response to the increasing energy consumption in construction. Ultraporous high internal phase emulsion polymers (PolyHIPE) possess high PCM entrapment capacity. Furthermore, PolyHIPE scaffolds containing PCM have never been integrated into building structural elements to provide thermal comfort. The PolyHIPE scaffold was formed by the copolymerization of glycidyl methacrylate and 2-ethylhexyl methacrylate using ethylene glycol dimethacrylate as a crosslinking agent. The glycidyl methacrylate-based PolyHIPE scaffold was transformed into PCM-affinity structures containing -OH functional groups in the presence of triethanolamine. Methyl palmitate, determined as PCM, was entrapped in the polyHIPE matrix at 60% by mass without leaching. The structural and morphological characterization of the composite PCMs was determined by FT-IR, XRD, SEM, and BET analyses. DSC analysis confirmed the successful synthesis of composite structures that stored thermal energy up to 136.43 J/g at approximately 28 °C, and TG analysis confirmed the thermal stability of the structures up to approximately 180 °C. The produced composite structures were structurally and thermally stable after 1000 consecutive heating/cooling cycles. Although the polyHIPE/FDM composite structures integrated into lightweight concrete caused some decreases in the density, mechanical strength, and thermal conductivity of the concrete, they are suitable for use as building structural materials. Thermoregulation tests revealed the ability of polyHIPE/FDM composite structures to compensate for temperature fluctuations in buildings (average daytime cooling: -12.35 °C, nighttime heating: 1.21 °C). These results show that the newly produced PolyHIPE/MP@Lightweight concrete structures can be effectively evaluated as building materials for thermal regulation and energy saving of buildings.

Keywords: Thermal Energy Storage, Phase Change Materials, Polyhipe, Lightweight Concrete, Energy Efficiency in Buildings

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISATLMALAR VE SİMGELER	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ	4
2.1. Isıl Enerji Depolama Yöntemleri	4
2.1.1. Duyulur ısı depolama	5
2.1.2. Gizli ısı depolama	8
2.2. Faz Değişim Malzemeleri	10
2.2.1. FDM'lerin sınıflandırılması	11
2.2.2. FDM'lerde aranan özellikler	14
2.2.3. FDM'lerin TED sistemlerine entegre edilmesi	15
2.3. PoliHIPE	18
2.3.1. PoliHIPE'lerin TED sistemlerinde kullanılması	20
2.4. Bina Termal Yönetiminde FDM'lerinin Kullanılması.....	21
2.5. Hafif Beton.....	24
2.5.1. Hafif betonun geliştirilmesinde FDM'lerin kullanılması.....	25
3. MATERYAL METOT.....	28
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler.....	28
3.1.1. Glisidil metakrilat.....	28
3.1.2. 2-Etil heksil metakrilat.....	29
3.1.3. Etilen glikol dimetakrilat.....	30

3.1.4. Poli(etilen glikol)-blok-poli(propilen glikol)-blok-poli(etilen glikol)	30
3.1.5. Metil palmitat	31
3.1.6. Potasyum peroksidisülfat	32
3.1.7. Trietanolamin	32
3.1.8. GMA-EHMA-EGDMA PoliHIPE iskeletin sentezlenmesi ...	33
3.1.9. GMA bazlı PoliHIPE iskelet yapısının fonksiyonelleştirilmesi	35
3.1.10. GMA bazlı PoliHIPE/MP kompozitlerinin üretimi	36
3.2. GMA Bazlı PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Karakterizasyonu	38
3.3. Şekilce Kararlı GMA Bazlı PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Üretimi.....	39
3.4. Şekilce Kararlı GMA Bazlı PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Fiziksel Özellikleri, Basınç Dayanımı ve Termal iletkenliklerinin Belirlenmesi.....	40
3.5. Şekilce Kararlı GMA Bazlı PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Termoregülasyon Ölçümü	41
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	43
4.1. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Yapısal Karakterizasyonu.....	43
4.2. MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin XRD Analizi	46
4.3. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Morfolojik Karakterizasyonu	47
4.4. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Termal Karakterizasyonu	50
4.5. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Termal Kararlılığının İncelenmesi	52
4.6. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Isıl iletkenliğinin İncelenmesi	54
4.7. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Termal Güvenirliliğinin İncelenmesi	55

4.8. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Yığın Yoğunluğu	58
4.9. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Basınç Dayanımı.....	58
4.10. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Termal iletkenlikleri..	59
4.11. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Termoregülasyon Ölçümleri	60
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	65
6. KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	80



ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. TED sistemlerinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması	5
Çizelge 2. 2. Duyulur ısı depolama malzemelerinin istenilen özellikleri	7
Çizelge 2. 3. Duyulur depolama malzemelerinin ısı kapasiteleri	8
Çizelge 2. 4. Gizli ısı depolama malzemelerinin istenilen özellikleri	9
Çizelge 2. 5. FDM'lerin stabilizasyonu için PoliHIPE iskeleler kullanılan TED çalışmaları	20
Çizelge 3. 1. GMA'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri	29
Çizelge 3. 2. EHMA'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri	29
Çizelge 3. 3. Etilen glikol dimetakrilat fiziksel ve kimyasal özellikleri	30
Çizelge 3. 4. Synperonic PEL 121 fiziksel ve kimyasal özellikleri	31
Çizelge 3. 5. MP'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	31
Çizelge 3. 6. Potasyum Peroksit fiziksel ve kimyasal özellikleri	32
Çizelge 3. 7. Trietanolamin fiziksel ve kimyasal özellikleri	33
Çizelge 3. 8. GMA-EHMA-EGDMA kopolimeri için uygun bileşimi belirlemek amacıyla sentezlenen polimerlerin bileşimleri	34
Çizelge 3. 9. PoliHIPE/MP@Hafif Beton kompozitlerinin kütlece birleşme oranları ...	40
Çizelge 4. 1. Çıkış malzemeleri, FDM, PoliHIPE ve MP ve MP yüklü PoliHIPE kompozitinin FT-IR verileri	45
Çizelge 4. 2. PoliHIPE, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP'nin (60 ağırlık%) BET analizi	50
Çizelge 4. 3. MP ile geliştirilmiş kompozit FDM'lerin TED performansları	52
Çizelge 4. 4. MP, sentezlenmiş PoliHIPE, PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (%60 ağırlık) kompozitlerinin ısı iletkenlik verileri	54
Çizelge 4. 5. PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (%60 ağırlık) kompozit FDM'lerin 1000 termal döngüden önce ve sonra termal özellikleri ..	56
Çizelge 4. 6. Beton numunelerinin yığın yoğunluk değerleri	58
Çizelge 4. 7. Beton numunelerinin basınç dayanım değerleri	59
Çizelge 4. 8. Beton numunelerinin ısı iletkenlik değerleri	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1. TED sistemlerinin sınıflandırılması.....	4
Şekil 2. 2. Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması.....	12
Şekil 2. 3. Erime sıcaklıklarına dayalı sınıflandırma sistemi	14
Şekil 2. 4. Gözenekli bir monolit hazırlamak için su-yağ emülsiyonu şablonunun şematik gösterimi.....	18
Şekil 3. 1. Belirlenen optimum orana ait kopolimerik yapının SEM görüntüleri (a-2000 kat büyütme, b-10000 kat büyütme).....	35
Şekil 3. 2. GMA bazlı PoliHIPE yapının fonksiyonelleştirilmesi	36
Şekil 3. 3. Kompozit FDM'lerde akma davranışlarının incelenmesi	38
Şekil 3. 4. Termoregülasyon testleri için oluşturulan deneysel kurulum ve termokupl konumları.....	42
Şekil 4. 1. GMA, EHMA, EGDMA, PEL121 ve PoliHIPE'in FT-IR spektrumları	44
Şekil 4. 2. PoliHIPE, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE, MP ve MP yüklü PoliHIPE kompozitinin FT-IR spektrumları.....	45
Şekil 4. 3. MP ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP kompozitinin XRD eğrileri	47
Şekil 4. 4. PoliHIPE (a,b), MP yüklü PoliHIPE (c,d) ve MP yüklü -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE'in kompozitinin SEM görüntüsü.....	49
Şekil 4. 5. MP, PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP'nin DSC eğrisi (%60 ağırlık)	51
Şekil 4. 6. MP, -OH fonksiyonlu PoliHIPE ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP'nin (60 ağırlık%) TGA eğrisi.....	53
Şekil 4. 7. PoliHIPE/MP (50 wt%) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP'nin (60 wt%) 1000. döngüden sonra FT-IR eğrilerinin değişimi.....	56
Şekil 4. 8. 1000 termal döngüden sonra PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP'nin (%60 ağırlık) DSC termogramı	57
Şekil 4. 9. Deney sırasında yatay yüzeylerdeki küresel, doğrudan ve dağınık güneş radyasyonu güneş ışıınımı	61

Şekil 4. 10. Referans (LC-OHP0) ve test numunelerinin (LC-OHP100) alt (a), üst (b), yüzeye yakın (c) ve oda merkezi (d) sıcaklıkları.....	62
Şekil 4. 11. Kontrol (LC-OHP0) ve test örneği (LC-OHP100) arasındaki alt (a), üst (b), yüzeye yakın (c) ve oda merkezi (d) sıcaklık farkları	64



KISATLMALAR VE SİMGELER

Kısaltmalar	Açıklamalar
FDM	Faz değişim malzemesi
TED	Termal enerji depolama
HIPE	Yüksek iç faz emülsiyon
PoliHIPE	Yüksek iç faz emülsiyon polimeri
PEG	Polietilen glikol
GMA	Glisidil metakrilat
EHMA	2-etil heksil metakrilat
EGDMA	Etilen glikol dimetakrilat
PEL121	Poli(etilen glikol)-blok-poli(propilen glikol)-blok-poli(etilen glikol)
MP	Metil palmitat
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
BET	Brunauer-Emmett-Teller
MBET	Çok Noktalı BET
DFT	Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetri
TGA	Termogravimetrik analiz cihazı
XRD	X-Işını Difraktometresi
EG	Genişletilmiş grafit
3D	Üç boyutlu
ATRP	Atom transfer radikal polimerizasyonu

PoliHIPE/MP	GMA-EHMA-EGDMA polimerik iskelete MP emeperye edilmesi ile oluşan kompozit
PoliHIPE/MP (50 wt%)	GMA-EHMA-EGDMA polimerik iskelete kütlece %50 oranında MP emeperye edilmesi ile oluşan kompozit
-OH Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP	-OH Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE iskelete MP emeperye edilmesi ile oluşan kompozit
OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%)	-OH Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE iskelete kütlece %60 oranında MP emeperye edilmesi ile oluşan kompozit
LC-OHP0	Çimento ve perlit den hazırlanan hafif beton
LC-OHP50	Çimento, perlit ve PoliHIPE/FDM kompoziti hafif beton
LC-OHP50	Çimento ve PoliHIPE/FDM kompoziti hafif beton
ThC(1,2,3,4,5,6,7,8,9)	Beton numune üzerine farklı konumlarda yerleştirilmiş termometreler

Simgeler

Açıklamalar

C_k	Katı zgl ısısı
C_s	Sıvı zgl ısısı
ρ	Maddenin yoğunluğunu
ΔH_E	Gizli erime ısısı
T_e	Erime sıcaklığını
T_0	İlk sıcaklığı
T_s	Son sıcaklıklarını
C_p	Depo edilen maddenin ısı kapasitesi
ΔT	Sıcaklık değişimi
m	Maddenin miktarı
v	Maddenin hacmi

1. GİRİŞ

Enerji, modern yaşamın temel yapı taşlarından biri olup, günlük aktivitelerden endüstriyel üretime kadar her alanda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, enerji üretimi ve tüketimi arasındaki denge, birçok çevresel ve ekonomik sorunla doğrudan ilişkilidir. Artan enerji ihtiyacı, büyüyen endüstri, gün geçtikçe çoğalan nüfus, tükenme eğilimine girmiş fosil yakıtlar, artan çevre kirliliği ve CO₂ salınımı gibi tüm nedenler üst üste toplandığında mevcut enerji kaynaklarının daha etkili kullanılması ve gerektiğinde depo edilmesi günümüzün en çok araştırılan konularının başında gelmektedir. Faz değiştiren malzemeler (FDM) aracılığıyla termal enerji depolama (TED), ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmak ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılan en etkili ısıl enerji depolama yöntemlerinden biridir.

TED; duyulur ısı, gizli ısı ve kimyasal reaksiyon enerjisi depolama şeklinde sınıflandırılabilir. Gizli ısı depolama yöntemi; sabit sıcaklıkta neredeyse hacim değişimi olmaksızın yüksek enerji depo edebilme kabiliyetinden dolayı diğer yöntemlerden daha fazla tercih edilmektedir (Lyu ve ark., 2019; Ramakrishnan ve ark., 2015). Gizli ısı depolama sistemlerinde malzemelerin faz geçişi sırasında aldığı ya da verdiği ısı depolanır. Gizli ısı depolayan malzemeler FDM'leri olarak isimlendirilirler. FDM'ler katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz olmak üzere dört gruba ayrılabilir da pratik uygulamalarda sadece katı-katı ya da katı-sıvı faz geçişi ile ısı enerjisi depo edilmektedir. Katı-katı faz geçişi depolama kabına ihtiyaç duymaksızın bir ısıl enerji depolama malzemesine dönüşebilme avantajına sahiptir. Ancak ısı enerji depolama kapasitesinin oldukça düşük olması sebebiyle uygulamalarda katı-sıvı faz geçişi yoluyla gizli ısı depolama uygulamalarına yönelmiştir.

Katı-sıvı FDM'lerin ısıl enerji depolama sistemlerine entegre edilmesi için ya polimerik nano/mikro kabuklar içerisinde kapsüllenmesi ya da şekilce kararlı FDM kompozitleri şeklinde üretilmesi gerekmektedir. FDM'lerin yapıca ve şekilce kararlı kompozitleri olarak üretildiği ısıl enerji depolama araştırmalarına da literatürde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Özellikle yüksek gözenekli ve yüzey alanı büyük yapılar içerisinde FDM'lerin emperye edilmesi ile faz dönüşümü sırasında FDM'nin sızıntı problemini

ortadan kaldıran yapıca kararlı kompozit FDM ile ilgili araştırmalar oldukça yaygın olarak çalışılmaktadır.

Literatürde, yüksek iç faz emülsiyon polimerizasyonu ile üretilen yüksek iç faz emülsiyon polimerlerinin (PoliHIPE), FDM taşıyıcısı olarak kullanılması son on yılda oldukça ilgi görmektedir. Bu polimerler %70'ten fazla gözenek hacmine sahip, yüksek yüzey alanlı, hafif ve esnek yapısı sebebiyle tercih edilmektedir. PoliHIPE'ler, iskeletteki küçük gözeneklerle sınırlandırılmış ve bunları birbirine bağlayan konkav geniş boşluk bulunduran polimerik yapılardır. Yapıdaki büyük konkav boşluklar, PoliHIPE'lerin FDM'leri emdirme kapasitesini artırırken, küçük gözenekler emdirilmiş FDM'lerin dışarıya akışını engelleyerek sızıntısız FDM kompozit malzeme oluşturmaya destek olur.

FDM'lerinin binalarda enerji tasarrufu için kullanımı oldukça ilgi çekici araştırmaların başında gelmektedir. Binalarda harcanan enerji tüketiminin çoğunluğu ısıtma soğutma işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu sebeple binanın iç hava sıcaklığını muhafaza etmesi istenmektedir. Bina sahip olduğu ısıнын büyük kısmını yüzeylerden ve havalandırmadan iç ve dış sıcaklık farkına bağlı olarak kaybeder. Termal konforlu bina tasarımında en önemli beklenti ısıtma/soğutma periyodlarındaki enerji arzını azaltacak malzemelerin geliştirilmesidir. FDM'lerin yapı malzemelerine eklenmesi, ortam iç sıcaklığının dengelenmesine yardımcı olacağı gibi, pik saatlerde ısıtma soğutma enerji talebinin de azalmasına katkı sağlayacaktır. FDM'ler, binalarda enerji tasarrufu sağlamak için; imento, beton, çeşitli gözenekli dolgu malzemeleri gibi yapı malzemelerine entegre edilebilir. Bu sayede, enerji depo edebilen yeni kompozit yapı malzemeleri üretilmiş olunur.

Bu çalışmada, bina iklimlendirme sistemlerinde kullanılacak glisidil metakrilat-2etil heksil metakrilat monomerleri ve etilen glikol dimetakrilat çapraz bağlayıcısı varlığında üretilen PoliHIPE/FDM kompozit ve PoliHIPE/FDM@Hafif beton ürünlerin morfolojik, fiziksel, mekanik ve ısıl özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca yüksek enerji depolama kapasitesine sahip PoliHIPE/FDM@Hafif beton numunelerin dış ortam hava şartlarında güneş enerjisi ısıl düzenleme performans testi de gerçekleştirilmiştir. Isıl performans bulguları referans ve hafif beton (PoliHIPE@Hafif beton) için eş zamanlı elde

edilen sonuçlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, bina içi konfor sıcaklığına pasif yolla katkıda bulunabilecek yenilikçi ve enerji verimliliği yüksek yapı malzemeleri literatüre kazandırılmıştır.

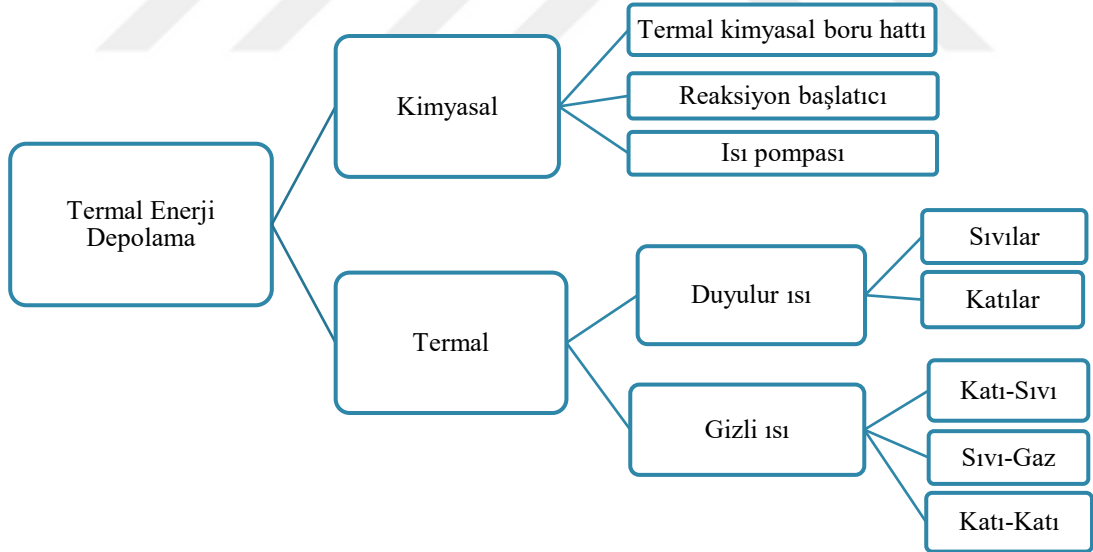


2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

2.1. Isıl Enerji Depolama Yöntemleri

Enerji, insan gereksinimlerini karşılamak için gerekli kaynakların işlenmesinde her zaman kritik öneme sahip olmuştur. Toplumun mal ve hizmetlere olan artan talebi, küresel toplam enerji tüketimini artırır.

Isıl enerji depolama, enerjinin bir ortamda fiziksel veya kimyasal olarak depolanması ile gerçekleştirilir. Enerji depolama ortamdaki ısıyı bir süre muhafaza eder ve ihtiyaç duyulduğunda sistemden geri salınır. TED çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Şekil 1’de ısııl enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması gösterilmiştir (Sarbu & Dorca, 2019). Bu sınıflandırmanın dışında TED; kullanılan teknolojiye, depolama malzemesinin çeşidine, uygulama yöntemine ve kullanılacağı sisteme göre de sınıflandırılabilir.



Şekil 2. 1. TED sistemlerinin sınıflandırılması

Bir enerji depolama sisteminde, kimyasal bir değişme olmaksızın sadece faz değişimi ile enerji depo ediliyorsa sabit basınç altında depolanan toplam enerji aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Q_T = \int_{T_0}^{T_e} C_k dT + \Delta H_E + \int_{T_e}^{T_s} C_s dT \quad (2.1)$$

Eşitlikte C_k ve C_s (kJ/kg °C) sırası ile katı ve sıvı sabit basıncındaki özgül ısılarını; ΔH_E (kJ/kg) gizli erime ısısını, T_e (°C) erime sıcaklığını, T_0 ve T_s sırasıyla FDM'nin ilk ve son sıcaklıklarını gösterir. Bu formüle göre enerji; maddelerin artan ısı kapasitesi ve sabit sıcaklıktaki gizli erime ısısı ile depolanmaktadır. Maddenin ısı kapasitesinden faydalanılarak depoladığı enerjiye duyulur ısı depolama, sabit bir sıcaklıkta faz geçişi sırasında depolanan enerjiye gizli ısı depolama denir.

TED kimyasal olarak da depo edilebilir. Bu yöntemde ısı, kimyasal reaksiyonlar sırasında oluşan bağ enerjisi olarak depolanır ve tersinir kimyasal tepkimeler ile serbest bırakılır. Bu sebeple, bu yöntem uzun süreli mevsimsel depolamalar için uygundur. Termokimyasal yöntem, duyulur ve gizli ısı depolama yöntemlerine göre daha karmaşıktır. Bu yöntemin TED sistemlerinde kullanımı için karmaşık ve teknik mühendislik problemlerin çözümü gereklidir. Bu nedenle diğer yöntemlere göre daha maliyetlidir (Sunku Prasad ve ark., 2019). Çizelge 2.1'de duyulur ısı, gizli ısı ve termokimyasal enerji depolama yöntemleri kapasite, güç, verimlilik, depolama süresi ve maliyet dahil olmak karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir (De Gracia & Cabeza, 2015).

Çizelge 2. 1. TED sistemlerinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması

TED Sistemi	Kapasite (kWh/t)	Güç (MW)	Verim (%)	Depolama Periyodu	Maliyet (€/kWh)
Duyulur ısı depolama (sıcak su)	10-50	0.001-10.0	50-90	Gün/ay	0.1-10
Gizli ısı depolama	50-150	0.001-1.0	75-90	Saat/ay	10-50
Termokimyasal enerji depolama	120-250	0.01-1.0	75-100	Saat/gün	8-100

2.1.1. Duyulur ısı depolama

Duyulur ısı depolama, ısıyı depolamanın en basit ve en gelişmiş yoludur. Duyulur ısı depolama sistemleri, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin

kullanılabilmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Özellikle güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi gibi dalgalanmalı enerji kaynaklarının kullanıldığı yenilenebilir enerji sistemlerinde hibrit teknoloji olarak kullanılır.

Duyulur ısı depolama, sıcaklık değişimi sırasında oluşan ısıнын depo edilmesidir. Bu yöntemle ısı enerjisi, madde üzerinde sıcaklık değişikliği olarak depolanır ve faz değişimi olmaksızın katı, sıvı ya da gaz fazlarında gerçekleşir. Bu enerji daha sonra belirli bir sıcaklık seviyesine gelindiğinde serbest bırakılabilir. Depo edilebilecek ısı miktarı; depo edilen maddenin ısı kapasitesine C_p , sıcaklık değişimine ΔT ve depolanan maddenin miktarına (m) bağlıdır (Dincer & Dost, 1996).

$$Q = \int_{T_i}^{T_s} m C_p dt = m C_p (T_s - T_i) = v \rho C_p \Delta T \quad (2.2)$$

Eşitlikte v (m^3) maddenin hacmini, ρ (kg/m^3) maddenin yoğunluğunu ve C_p (kJ/kgK) sabit basınçtaki özgül ısıyı ifade etmektedir.

Duyulur ısı depolama sistemlerinde birçok malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler genellikle yüksek ısıl kapasitesine sahip, yani çok ısı depolayabilen materyaller olarak seçilir. Duyulur ısı depolama malzemelerinin ısı depolama kapasitesinin yüksek olmasının yanında kullanılacak malzemelerin termofiziksel, kimyasal, mekanik, çevresel ve ekonomik özelliklerinin de uygun olması gerekmektedir. Duyulur ısı TED sisteminde kullanılacak malzemelerde beklenen özellikler Çizelge 2.2’de özetlenmiştir (De Gracia & Cabeza, 2015).

Çizelge 2. 2. Duyulur ısı depolama malzemelerinin istenilen özellikleri

Termo-fiziksel Özellikler	Kimyasal Özellikler	Mekanik Özellikler	Çevresel Özellikler	Ekonomik Özellikler
Çalışma sıcaklığı sınırları içerisinde yüksek ısı iletkenliği	Uzun vadeli kimyasal ayrışma olmaksızın kimyasal kararlılık	İyi mekanik stabilite	Düşük üretim enerji gereksinimi	Ucuz
Yüksek enerji yoğunluğu (birim kütle veya hacim başına)	Büyük giriş/çıkış ile önemli sıcaklık farkları olmadan mükemmel şarj ve deşarj kabiliyeti	Düşük termal genleşme katsayısı	Düşük CO ₂ ayak izi	Yüksek kullanılabilirlik
Yüksek ısı kapasitesi	Toksik ve patlayıcı değildir.	Yüksek kırılma tokluğu		Uygun şekillerde şekillendirildiğinde düşük imalat maliyetine sahiptir.
Uzun vadede, birkaç bin çalışma çevriminden sonra bile, yüksek termal güvenilirlik ve kararlılık	Düşük korozyon potansiyeli veya ısı transfer ortamına karşı düşük reaktivite	Yüksek basınç dayanımı		
Düşük termal genleşme katsayısı	Yapı malzemesine uyumludur.			

Duyulur ısı depolama sistemlerinde çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Çizelge 2.3'te duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan çeşitli malzemelerin ısı depolama kapasiteleri gösterilmiştir (Khatod ve ark., 2022).

Çizelge 2. 3. Duyulur depolama malzemelerinin ısı kapasiteleri

Malzeme	Sıcaklık aralığı (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı kapasitesi kJ/(kg K)	Hacimsel termal kapasite kJ/(m ³ K)
Tuğla	0-1000	1400-1900	0.84	1176-1596
Termal yağ	0-400	850-900	1.6-2.1	1360-1620
Odun	20	700	2.390	1673
Cam	20	2710	0.837	2268
Kum	20	1555	0.8	1244
Bütan	≤115	805	2.4	1932
Alüminyum	20	2710	0.896	2428
Etanol	≤76	785	2.5	1962
Kaya çakıl taşları	20	510	0.88	1410
Çelik	20	7850	0.48	3800
Demir	20	7900	0.452	3571
Beton	20	2000	0.880	1760
Çakıllı toprak	20	2050	1.840	3772
Propan	≤96	800	2.5	2000
Motor yağı	≤160	885	1.88	1669
Oktan	≤125	705	2.4	1692

2.1.2. Gizli ısı depolama

Gizli ısı depolama, bir depolama malzemesinin katıdan sıvıya, sıvıdan gaza veya tam tersine faz değişimine uğradığında ısı emilimine veya salımına dayanır. Gizli ısı depolama yöntemi; sabit sıcaklıkta neredeyse hacim değişimi olmaksızın yüksek enerji depo edebilme kabiliyetinden dolayı diğer yöntemlerden daha fazla tercih edilmektedir.

$$Q = \int_{T_0}^{T_e} m C_p dt + m \Delta H_E + \int_{T_e}^{T_s} m C_p dt = m [\Delta H_E + C_k (T_e - T_i) + C_s (T_s - T_e)] \quad (2.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte bulunan C_k ve C_s sırası ile katı ve sıvının sabit basınçta olan özgül ısıları (kJ/kgK); T_0 ; başlangıç sıcaklığı, T_e ; erime sıcaklığı T_s ; son sıcaklık (K) ve ΔH_E ; gizli erime ısıdır (kJ/kg). Bu eşitlikteki birinci ve üçüncü terim FDM'nin duyulur ısısını,

ikinci terim ise, erime gizli ısısını ifade eder. Çizelge 2.4'te gizli ısı depolama malzemelerinde beklenen özellikler verilmiştir (Sarbu & Dorca, 2019).

Çizelge 2. 4. Gizli ısı depolama malzemelerinin istenilen özellikleri

Termal Özellikler	Fiziksel Özellikler	Kinetik Özellikler	Kimyasal Özellikler	Ekonomik Özellikler
İstenilen çalışma aralığında erime sıcaklığı	Çalışma sıcaklıklarında küçük buhar basıncı	Donma sırasında çok az veya hiç aşırı soğutma olmaz	Kimyasal kararlılık	Bol bulunur
Birim hacim başına yüksek gizli füzyon ısısı	Faz değişiminde küçük hacim değişimi	Aşırı soğumayı önlemek için yüksek çekirdeklenme oranı	Tam geri dönüşümlü donma/erime döngüsü	Büyük ölçekli kullanılabilirlikler
Yüksek özgül ısı	Yüksek yoğunluk	Yeterli kristalleşme oranı	Kap malzemeleriyle uyumluluk	Etkin maliyet
Her iki fazın da yüksek termal iletkenliği			Toksik, yanıcı ve patlayıcı madde içermez	

Gizli ısı depolamanın, duyulur ısı depolamaya göre avantajları şunlardır:

- Gizli ısı depolama, faz değişimi sırasında daha fazla ısı depolayarak daha küçük hacimlerde yüksek enerji depolanmasını sağlar. Duyulur ısı depolamada ise, daha büyük hacimler gerekebilir.
- Gizli ısı depolama, daha az yer kaplayarak daha fazla ısı depolar, bu da sistemleri daha az kompakt hale getirir. Duyulur ısı depolama genellikle büyük hacimli malzemelere ihtiyaç duyar.
- Gizli ısı depolama, faz değişimi sırasında sabit bir sıcaklıkta ısı depolar, bu da uygulamalarda daha kontrollü ve kararlı bir ısı transferi sağlar. Duyulur ısı

depolama, sıcaklık değişimi ile ısının depolandığı ortamda sürekli sıcaklık artışı yaşar.

- Gizli ısı depolama sırasında ısı kaybı genellikle daha azdır çünkü ısı faz değişimi sırasında depolanır ve salınır. Duyulur ısı depolama ise daha geniş sıcaklık aralıklarında işlem gördüğü için enerji kayıpları daha fazla olabilir.
- Gizli ısı depolama, faz değişimi sırasında büyük miktarda ısıyı depolayabilen malzemeler kullanır. Duyulur ısı depolama, aynı sıcaklık farkında daha az enerji depolayabilir.
- Gizli ısı depolama, daha az hacimle daha fazla enerji verimliliği sağlar, çünkü faz değişim malzemeleri belirli sıcaklık aralıklarında daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.
- Gizli ısı depolama, ısının uzun süre depolanmasına olanak tanır ve daha hızlı bir şekilde serbest bırakılabilir. Duyulur ısı depolama genellikle daha uzun süreli ve daha yavaş enerji salınımı yapar.
- Gizli ısı depolama, geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilen faz değişim malzemeleriyle daha esnek kullanım alanları sunar, bu da farklı uygulamalar için uygun olmasını sağlar.

Bu avantajlar, gizli ısı depolamayı, duyulur ısı depolamaya göre daha verimli hale getirir, özellikle enerji depolama sistemlerinde ve yenilenebilir enerji uygulamalarında tercih edilmesini sağlar.

2.2. Faz Değişim Malzemeleri

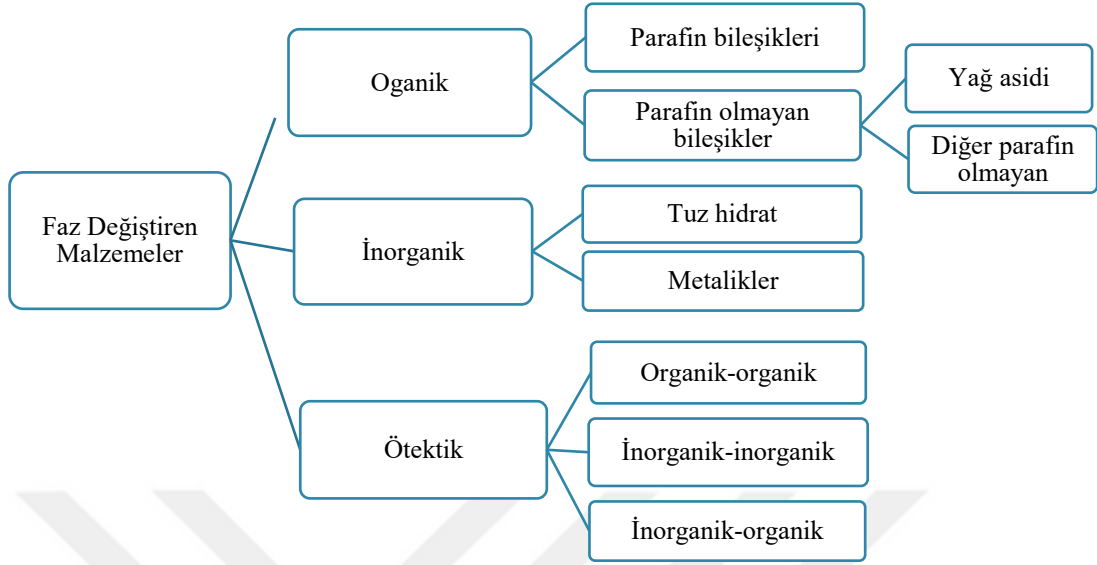
Gizli ısı depolayan malzemeler FDM olarak isimlendirilirler. FDM'lerin iyi bilinen faz geçiş özellikleri, muazzam miktarda ısı enerji depolamaya olanak tanır. Termal enerji, faz geçişi sırasında gizli ısı olarak depolanır. Faz geçişi izotermal bir süreçtir ve küçük bir sıcaklık aralığında gerçekteşmesi, sabit bir sıcaklıkta veya kısıtlı bir sıcaklık aralığında ısı enerjisinin emilmesini sağlar.

Güvenilir fiziksel ve kimyasal özellikleri ve hem şarj hem de deşarj süreçlerinde sürdürülebilir termal özellikleri nedeniyle, TED sistemlerinde FDM'lerin kullanılması

sürdürülebilir bir enerji arzını sağlamak için pratik ve verimli çözümler sunar (Wang ve ark., 2025). FDM'lerin gizli ısı enerji depolama sistemlerinde kullanımı, minimum sıcaklık dalgalanmalarıyla önemli miktarda termal enerjinin depolanabilmesi sebebiyle özellikle 2012-2022 yılları arasında literatürde artan sayıda araştırmanın konusu olmuştur. 2012 yılında FDM'lerini konu alan makale sayısı 4214 ilen 2022 itibarıyla bu sayı 10432'ye yükselmiştir (Reddy ve ark., 2024). FDM'ler üzerine yayınlanan makalelerin büyük çoğunluğu deneysel araştırma raporları veya araştırma makalelerinden oluşmakta olup, bunları konferans bildirileri ve derleme makaleleri takip etmektedir. Enerjiye duyulan ihtiyaç gün geçtikçe artmaya devam edeceği için bu konuda yapılan araştırmalar da her zaman güncel kalmaya devam edecektir.

2.2.1. FDM'lerin sınıflandırılması

FDM'leri katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz olmak üzere dört gruba ayrılrsa da pratik uygulamalarda sadece katı-katı ya da katı-sıvı faz geçişi ile ısı enerjisi depo edilmektedir. Katı-gaz ve sıvı-gaz faz geçişlerinde çok büyük hacim değişimi olması sebebiyle TED uygulamalarında bu iki faz geçişine ait ısı enerji depolama sistemleri kullanılmamaktadır. Katı-katı faz geçişi depolama kabına ihtiyaç duymaksızın bir ısı enerji depolama malzemesine dönüşebilme avantajına sahiptir. Ancak ısı enerji depolama kapasitesinin oldukça düşük olması uygulamalarda katı-sıvı faz geçişi yoluyla gizli ısı depolama uygulamalarına yönelmiştir. FDM'leri faz dönüşüm döngüsünün dışında kullanılan malzeme çeşidine göre de sınıflandırılır. Şekil 2.2'de FDM'leri kullanılan malzemenin türüne göre sınıflandırılmıştır (Sarbu & Dorca, 2019).



Şekil 2. 2. Faz değişim malzemelerinin sınıflandırılması

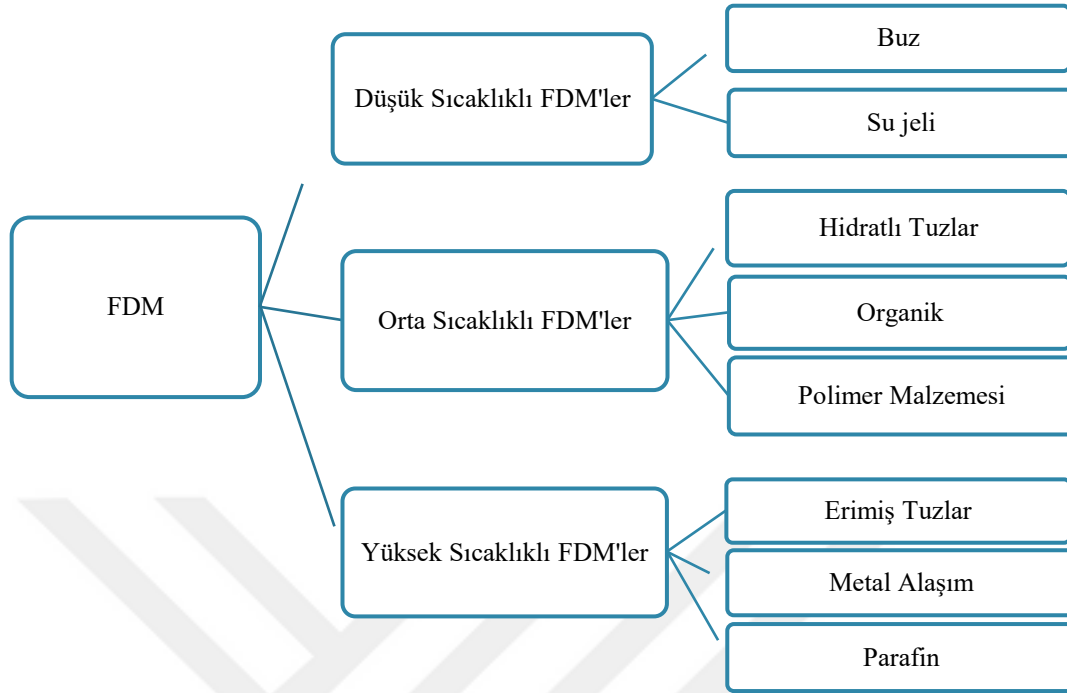
Organik FDM'ler, faz ayrımı olmadan birçok kez eriyip tekrar katılaşabilir ve az/hiç aşırı soğuma davranışı göstermeksizin kristalleşirler. Organik FDM'ler, parafin ve parafin olmayanlar olarak ikiye ayrılır. Parafinler genel de alkanlar olarak isimlendirilir ve genel formülü C_nH_{2n+2} olarak gösterilen doymuş hidrokarbonlardır. Parafinlerin, sert formu (mumsu) ve yumuşak formu (vazelin) olmak üzere iki formu bulunur. Mumsu formda $n > 20$ olan uzun zincirli hidrokarbonlardır. Vazelin formu ise, daha kısa moleküllerden oluşur. Parafin de zincir uzunluğu arttıkça, füzyon ısısı ve erime noktasında bir artış olur (Magendran ve ark., 2019). Organik FDM'ler çok sayıda TED uygulamasında yaygın olarak kullanılmıştır (Ajithkumar & GaneshKumar, 2025; Rathore & Shukla, 2021; Sathishkumar ve ark., 2025). Bu malzemelerin aşındırıcı olmaması, yeniden kullanılabilir olması, termal olarak kararlı olması, düşük maliyetli oluşu, sınırlı ya da hiç aşırı soğuma davranışı göstermemesi, yüksek gizli ısı depolama kabiliyeti göstermesi sebebiyle inorganik FDM'lere nispeten daha etkilidir (Sahan & Paksoy, 2014).

İnorganik FDM'ler; tuz hidratlar, metaller ve alaşımlardan oluşmaktadır. İnorganik FDM'ler, organik FDM'lere kıyasla yüksek gizli ısı, nispeten yüksek termal iletkenlik, toksik olmama, yanıcılık ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir. Bu sebeple, inşaat (Cao ve ark., 2024; Guo, 2024; Li ve ark., 2024; Tyagi ve ark., 2016), yoğunlaştırılmış güneş kolektörleri (Nartowska ve ark., 2023; Okulu ve ark., 2025; Wang ve ark., 2026),

Li-ion pillerin termal yönetimi (Dai ve ark., 2025; Galazutdinova ve ark., 2021; Ling ve ark., 2021; Ping ve ark., 2023) gibi birçok TED uygulamasında FDM olarak kullanılmıştır. Ancak bununla birlikte, inorganik FDM'lerin doğasına bağlı olarak, aşırı soğuma davranışı, TED uygulamalarında sızıntı göstermesi, termal kararsızlık, faz ayrımı göstermesi, korozif olması gibi üstesinden gelinmesi gereken TED uygulamalarında kullanımını kısıtlayan dezavantajlara sahiptir.

Ötektik FDM'ler, iki ya da daha fazla FDM'nin ötektik noktada tek erime ve katılaşma sıcaklığı gösteren karışımlarıdır (Sun ve ark., 2023). Karışımı oluşturan FDM'lerden düşük ya da yüksek sıcaklıkta uyumlu bir şekilde eriyen ve katılaşan karışımlar olarak sınıflandırılırlar. Ötektik karışımlar organik-organik, inorganik-inorganik bileşenlerin karıştırılması ile elde edilebileceği gibi organik-inorganik FDM'lerin uygun bileşimde karıştırılması ile de elde edilebilirler. Bu malzemelerin en büyük avantajı, istenilen özellikleri gösterecek şekilde hazırlanabilir olmalarıdır. Organik ve inorganik birçok FDM olmasına rağmen istenilen sıcaklık aralığında erime ve katılaşma davranışı gösteren malzeme seçme konusunda ötektik malzemeler ciddi bir avantaj sağlamaktadır. Ötektik malzemeler temel olarak uygulama için gerekli olan istenen sıcaklık aralığında bulunabilirlikleri (hazırlanabilmeleri) ve ötektik bileşenler arasında reaktif olmama özellikleri ile tanınırlar. Bu sebeple birçok TED uygulamasında ötektik FDM tercih edilmiştir (Anand ve ark., 2025; Singh ve ark., 2021) .

FDM'ler kullanılan malzeme çeşidine göre sınıflandırıldığı gibi FDM'nin çalışma sıcaklığına göre de kategorize edilebilir. Sıcaklık aralığı, bir FDM'nin herhangi bir uygulamada uygunluğu için temel kriterlerden biridir. FDM kullanan çok sayıda TED uygulaması vardır ve bunların hepsi optimum termal performansları için uygun belirli bir aralığa sahiptir (Sharma ve ark., 2015). Şekil 2.3'te, erime sıcaklıklarına dayalı bir sınıflandırma sistemini göstermektedir (Sarbu & Dorca, 2019). Bu sistem, istenen uygulamaya göre hangi FDM'nin kullanılacağına karar vermeye yardımcı olabilir (Ge ve ark., 2013).



Şekil 2. 3. Erime sıcaklıklarına dayalı sınıflandırma sistemi

2.2.2. FDM'lerde aranan özellikler

TED sistemlerinde kullanılacak FDM'lerinin fiziksel, kimyasal, ısı, kinetik, ekonomik ve çevresel özellikleri gibi bazı kriterleri karşılaması beklenmektedir. FDM'lerin TED sistemi bileşeni olarak kullanılması için gereken özellikler aşağıda sıralanmıştır (Mehling & Cabeza, 2007).

Fiziksel özellikler;

- Hal değişim sıcaklığı ve ısı depolama atımının sabit sıcaklık aralığında olması sağlanmalı.
- Yüksek hal değişim entalpisi ile yüksek duyulur ısı depolama yoğunluğuna ulaşılmalı.
- Yüksek ısı iletkenlik ile geniş ısı dalgalanmada, depolanmış gerekli ısıyı verebilmesi veya alabilmesi.
- Hal değişimi ile depolama malzemelerinin defalarca kullanılabilmesi.
- Düşük aşırı soğuma ile ergime ve katılaşmanın aynı sıcaklıkta olmasını sağlaması.

Teknik özellikler;

- Düşük hacim değişimi ile malzemeyi içeren ortamın mekanik dayanım gereksinimini azaltılabilmesi.
- Kimyasal ve fiziksel kararlılık ile malzemenin uzun ömürlülüğünün sağlanabilmesi.
- Diğer malzemelerle uyumluluk ile sızıntı durumunda malzemeyi içeren ortamın uzun ömürlülüğünün sağlanabilmesi.

Ekonomik özellikler;

- Düşük fiyat ile ısı depolamasında diğer seçeneklerle yarışabilmesi.
- Çevre ve güvenlik nedenleri yüzünden toksik olmaması.
- Malzemenin yeniden kullanılabilir olması (Mehling & Cabeza, 2007).

2.2.3. FDM'lerin TED sistemlerine entegre edilmesi

TED sistemlerinde en yaygın olarak katı-sıvı faz geçişi yolu ile ısı enerjisi depolayabilen malzemeler kullanılmaktadır. Faz geçişinin maddenin katı formundan sıvı formuna geçmesi sebebiyle katı-sıvı FDM'lerin ısı enerjisi depolama sistemlerine entegre edilmesi için ya polimerik nano/mikro kabuklar içerisinde kapsüllenmesi ya da şekilce kararlı FDM kompozitleri şeklinde üretilmesi gerekmektedir. Mikroenkapsülasyon, FDM parçacıklarının ya da sıvı FDM damlacıklarının boyutu 1000 μm 'nin altında olan homojen bir matrisin içine hapsedildiği veya gömüldüğü işlem olarak tanımlanır (Huang ve ark., 2019a). Mikroenkapsülleme tekniği kullanıcıya, hazırlama metodlarının kolay olması, ekonomik oluşu, kısa sürede hazır olabilmesi ve hafif olması gibi avantajlar sağlar. Bununla birlikte, sınırlı ısı iletkenlik, düşük mukavemet, kapsüllerin düşük yıkama dayanıklılığı ve sınırlı yüzey bağlama yetenekleri, mikroenkapsülenmiş FDM'lerin kullanımını sınırlandırmaktadır (Ghasemi ve ark., 2022; Huang ve ark., 2019a). FDM'lerin yapıcı ve şekilce kararlı kompozitleri olarak üretildiği ısı enerjisi depolama araştırmalarına da literatürde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Özellikle yüksek gözenekli ve yüzey alanı büyük yapılar içerisinde FDM'lerin emperye edilmesi ile faz dönüşümü sırasında FDM'nin sızıntı problemini ortadan kaldıran yapıcı kararlı kompozit FDM ile ilgili araştırmalar oldukça yaygın olarak çalışılmaktadır. Bu amaçla metalik köpükler

(Yang ve ark., 2017; Zhu ve ark., 2016), gözenekli karbonlar (Pan ve ark., 2021) ve gözenekli killeri (Salimi ve ark., 2023) ve polimerik yapılar (Bidiyasar ve ark., 2024; El Majd ve ark., 2024; Rahmalina ve ark., 2022) en çok kullanılan malzemeler arasındadır.

Metalik köpükler içerisinde FDM'lerin emperye edilmesi, FDM'ye bir iskelet sağlarken FDM'lerde en çok karşılaşılan problemlerden biri olan düşük ısı iletkenlik probleminin de üstesinden gelmeye yardımcı olmaktadır (Huang ve ark., 2019b). Bu amaçla sürekli bir iskelet yapısına, yüksek mukavemete/yoğunluk oranına, yüksek açık gözenekliliğe (%85-98), büyük gözenek boyutuna (0.1-5 mm) ve nispeten yüksek ısı iletkenliğe sahip nikel (Xiao ve ark., 2014; Xu ve ark., 2017), bakır (Yang ve ark., 2017; Zhang ve ark., 2017) ve alüminyum (Fleming ve ark., 2015; Zhu ve ark., 2016) gibi metal köpükler FDM'ler için destek malzemeler olarak kullanılmıştır. Ancak, bu uygulamalarda metal köpük içine hapsedilen FDM'lerin ısı iletkenlik kapasitelerinde %14-30 oranında azalma görülmüştür (Xiao ve ark., 2013). Yüksek yüzey alanlarına sahip gözenekli karbonlar (genişletilmiş grafit, karbon nanotüp, grafen aerogel) yüzey gerilimi, kılcal kuvvet, Van der Waals kuvveti, hidrojen bağı veya yüzey modifikasyonu olasılığı vb., gibi çeşitli etkileşimlerle farklı tipte FDM'leri yüklemek için kullanılabilir. ısı iletkenlikleri oldukça yüksek olan tek (6600 Wm⁻¹K⁻¹) (Che ve ark., 2000) ve çok duvarlı karbon (3000 Wm⁻¹K⁻¹) (Kim ve ark., 2001) nanotüplerin ısı iletkenlik depolama sistemlerinde kullanımı da popüler araştırma konularından biridir (Li ve ark., 2015; Li ve ark., 2017a; Wang ve ark., 2013). Altıgen petek kafes yapılı bir sp²-bağlı tek katmanlı 2D karbon levha olan grafen ve grafen aerogeller; yüksek teorik özgül yüzey alanı (2630m²g⁻¹) (Stoller ve ark., 2008), üstün ısı iletkenlik (3000–5000Wm⁻¹K⁻¹) (Balandin ve ark., 2008) gibi birçok istisnai özellik nedeniyle kompozit FDM'lerinin ısı iletkenliği arttırmak için kullanılmaktadır (Wu ve ark., 2016). FDM'lerinde ısı iletkenliği arttırmak için özellikle nanoakışkan malzemelerin ısı iletkenliğini arttırmak için Al₂O₃ (Teng, 2013), CuO (Hemmat Esfe ve ark., 2015), Co₃O₄ (Mariano ve ark., 2015), Fe₃O₄ (Yu ve ark., 2010) ve TiO₂ (Mostafizur ve ark., 2014) gibi birçok metal oksit kullanıldığı çalışmalarla karşılaşmak mümkündür (Liu ve ark., 2016). Ayrıca ısı iletkenlik artırma ajanı olarak karbon nanofiberlerin kullanıldığı FDM ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Yu ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada FDM olarak seçilen disodyum hidrojen fosfat dodekahidrat tuz hidratının ısı iletkenliğinin artırılması için karbon nanofiber ve

genişletilmiş grafit (EG) birlikte ısı iletkenlik ajanı olarak kullanılmıştır. Çalışmada artırılmış termal iletkenlik EG'nin düşük termal iletkenlik bölgelerine karbon nanofiber doldurulması ile sağlanmış, ısı iletkenlik değeri tuz hidrata oranla 3.69 kat artmıştır (Yu ve ark., 2019).

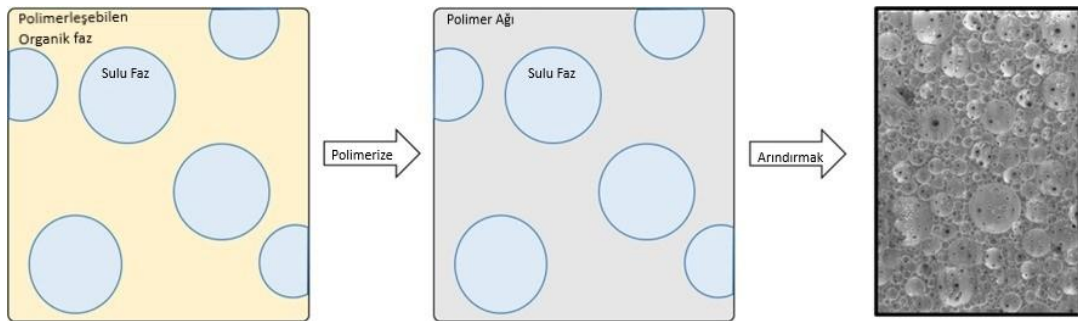
Gözenekli karbonların yanı sıra gözenekli killeri de yapıca-kararlı kompozit FDM'lerin geliştirilmesi için son yıllarda kullanılmaktadırlar. Mineral esaslı malzemeler yüksek spesifik yüzey alanına sahip gözenekli yapıları, yüksek ısıl stabiliteleri, kimyasal uyumluluğu, ısıl güvenilirlikleri ve makul fiyatları nedeniyle ısıl enerji depolama uygulamalarında FDM'ler için destek materyaller olarak yaygın kullanılmaktadırlar. Çeşitli organik FDM'leri; bentonit (Li ve ark., 2013), genişletilmiş perlit (Zhang ve ark., 2016), kaolin (Song ve ark., 2014), diatomit (Li ve ark., 2014), sepiyolit (Konuklu & Ersoy, 2016), montmorillonit (Yi ve ark., 2019), atapulgit (Shi & Li, 2020), vermikülit (Wi ve ark., 2020), uçucu kül (Liu ve ark., 2019) gibi birçok gözenekli kil mineraline direk emdirme veya vakum emdirme yöntemi ile kapsüllenmiştir (Lv ve ark., 2017). Ayrıca mezoporlu silika; metal köpükler, gözenekli karbon ve mineral killerden daha küçük ve ayarlanabilir gözenek boyutu, yüksek yüzey alanı gibi özelliklerinden dolayı çok sayıda uygulamada kullanılmıştır. Boyuta bağılı erime davranışı, nano ölçekli malzemelerin ilgi çekici özelliklerinden biridir. Çünkü FDM'lerdeki erime sıcaklığı, kristalizasyon ve ısı entalpisi gözenek boyutu ile değişmektedir. Bu sebeple gözenek boyutu ayarlanabilir malzemeler ısıl enerji depolama malzemeleri arasında popülerdir (Luo ve ark., 2015; Motahar ve ark., 2014; Wang ve ark., 2013).

Son yıllarda FDM'lerin kullanımını sınırlayan düşük ısı iletkenlik çözümü için geliştirilen materyallerden biri de üç boyutlu (3D) birbirine bağılı köpüklü yapıların kullanılmasıdır. Birbirine bağılı iskelet, ısı iletken bir çerçeve sağlar ve birbirine bağılı gözenekli ağılar, sızıntıyı önlemek için FDM'yi kapsül içine alır. 3D birbirine bağılı gözenekli karbon bazlı köpükler genellikle metalik köpükler üzerinde kimyasal buhar birikimi veya yüksek sıcaklıklarda piroliz ile hazırlanabilmektedir (Ji ve ark., 2014; Li ve ark., 2017b). Metal köpüklerin hassas hazırlama yolu ve yüksek sıcaklık pirolizi bu prosedürün kaçınılmaz engelleridir (Maleki, ve ark., 2019a). Öte yandan, hiyerarşik gözenekliliğe sahip, nihai kompozitlerde gizli ısınin düşmesinin önüne geçmek için daha

fazla FDM yüklenmesine olanak sağlayan kolay, basit ve düşük maliyetli polimerik yapılar, “yüksek iç faz emülsiyon (HIPE) polimerizasyonu” yöntemi ile sentezlenebilir. Bununla birlikte, polimerik yapılar nispeten düşük ısı iletkenliğe sahip bir destek malzemesi olsalar bile çeşitli ısıl iletkenlik ajanları ile de bu sorunun önüne geçilebilir (Maleki ve ark., 2019a).

2.3. PoliHIPE

Yüksek iç faz emülsiyonlar (HIPE), genellikle hacmin %74'ünü (%74-96) oluşturan majör, “iç” fazın sürekli, minör, “dış” faz içinde dağıldığı oldukça viskoz, genellikle yüzey aktif maddelerle stabilize edilen macun benzeri emülsiyonlardır (Yang ve ark., 2015). Bu kritik değerin üzerinde, emülsiyon damlacıkları birbirleriyle yakın temas halindedir ve çok ince bir filmle ayrılırlar. Polimerizasyon ve dağılmış fazın uzaklaştırılması üzerine, damlacıklar arasındaki ince zarlar delinir ve düşük yoğunluklu açık hücreli makro gözenekli polimer matrisleri oluşur. Şekil 2.4'te PoliHIPE hazırlamak için oluşturulan su-yag emülsiyonların şematik gösterimi verilmiştir (McKenzie & Ayres, 2023).



Şekil 2. 4. Gözenekli bir monolit hazırlamak için su-yag emülsiyonu şablonunun şematik gösterimi

Basitçe ifade etmek gerekirse, bir PoliHIPE malzemesi, genellikle %70'ten fazla gözenek hacmine sahip, polimer bazlı bir malzemedir ve bu da benzersiz özelliklere sahip hafif bir yapı ile sonuçlanır. PoliHIPE'ler çok çeşitli monomerlerden sentezlenebilirler. Tipik olarak, PoliHIPE'ler, yüzey aktif madde ile stabilize edilmiş su içinde yağ fazında çözünen monomerlerin HIPE'lerinde geleneksel serbest radikal polimerizasyon yöntemi

kullanılarak sentezlenirler. Bununla birlikte, diğer polimerizasyon yöntemleri de örneğin; adım-büyüme, atom transfer radikal polimerizasyonu (ATRP), halka açılma metatez polimerizasyonu, diğer HIPE stabilizasyon teknikleri (emulsifiyer yerine partikül bazlı stabilizasyon) ve diğer HIPE türleri (yağ fazında suda çözünen monomerler) de literatürde karşımıza çıkmaktadır. Emülsiyonların stabilizasyonu ve gözeneklerin birbirine bağlanması, Span 80, Tween 80, Triton X-100, Synperonic PEL 121 gibi yüzey aktif maddeler veya çeşitli fonksiyonelleştirilmiş partiküller kullanılarak gerçekleştirilebilir (Khare ve ark., 2013; Menner ve ark., 2007; Zhang ve ark., 2009).

PoliHIPE yapıları, benzersiz özellikleri sayesinde çeşitli alanlarda ve farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Geniş yüzey alanı ve gözenekliliğiyle öne çıkan PoliHIPE malzemeleri, kimyasal reaksiyonlarda katalizör desteği (Yavuz ve ark., 2019) veya filtrasyon ortamı (Vásquez ve ark., 2021) olarak işlev görebilir. Gözenekli yapı, katalitik proseslerde veya filtreleme sistemlerinde partiküllerin yakalanmasında yüksek verim ve etkili etkileşimi kolaylaştırır (Bhumgara, 1995). Gözenekli yapıları nedeniyle PoliHIPE iskeleleri, kontrollü ilaç verme sistemlerinde kullanım için de mükemmel adaylardır (Corti ve ark., 2019; Moglia ve ark., 2014). Ayrıca, PoliHIPE iskeleleri, hücre büyümesi ve doku yenilenmesi için yapısal destek sağlama amacıyla doku mühendisliği alanında da kullanılmaktadır (Aldemir Dikici ve ark., 2021; Wang ve ark., 2016). PoliHIPE malzemelerinin yüksek yüzey alanı ve gözenekliliği, önemli miktarda sıvı emilimini kolaylaştırarak, petrol sızıntısı temizliği gibi çevresel iyileştirmelerde yağların veya diğer sıvıların emilimi için etkili olmalarını sağlar (Mahadik ve ark., 2018; Zhang ve Guo, 2017). Gözenekli yapı, malzemenin belirli kimyasal veya çevresel uyaranlara tepki olarak özelliklerini değiştirdiği sensör cihazlarında da kullanılabilir (Feng ve ark., 2024; Yang ve ark., 2019). Beton, PoliHIPE bazlı bileşiklerle hafif, yalıtkan ve dayanıklı hale getirilebilir. Hava dolu gözenekli yapıları ısıyı hapsederek PoliHIPE malzemelerini etkili termal yalıtkanlar haline getirir (Yin ve ark., 2024, Yin ve ark., 2023). PoliHIPE yapılarının gözenekliliği, pil ve süper kapasitör enerji depolama yüzey alanını artırır. Yüksek yüzey alanı ve verimli elektron aktarımı gerektiren enerji depolama cihazları bu özellikten yararlanır (Deshmukh ve ark., 2018; Maleki ve ark., 2021). PoliHIPE iskeletlerin ısı enerjisi depolama uygulamalarında kullanımı ise oldukça yeni bir araştırma alanıdır. Bu çalışmalarda, PoliHIPE yapılar FDM'lerin hapsedilmesi için iskelet yapılar

olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kahraman Döğüşcü ve ark., 2024).

2.3.1. PoliHIPE'lerin TED sistemlerinde kullanılması

Son yıllarda PoliHIPE köpükler, şekil stabilizasyonu, yüksek yükleme hızı, mükemmel yapısal stabilite ve iç içe geçmiş gözenek morfolojisi gibi üstün özellikleri nedeniyle FDM'lerin yapıcı kararlı hale getirilmesinde dikkat çekmeye başlamıştır. PoliHIPE'ler, iskelet üzerindeki küçük pencerelerle sınırlandırılmış büyük boşluklu yapıları ile dikkat çekmektedir. Yapı üzerindeki büyük boşluklar PoliHIPE'lere FDM'leri emprenye etme konusunda daha fazla yetenek verirken, küçük pencereler emprenye edilmiş FDM'lerin akmasını engellemektedir. Bu yapıların FDM taşıyıcısı olarak mükemmel bir aday olarak görülmesinin ana nedeni budur. Gözenekli PoliHIPE'nin bu avantajlarına rağmen, literatürde FDM iskeleti olarak kullanıldığı yayınlanmış az sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürde PoliHIPE iskeletlerin FDM taşıyıcısı olarak kullanıldığı çalışmalar Çizelge 2.5'te özetlemiştir.

Çizelge 2. 5. FDM'lerin stabilizasyonu için PoliHIPE iskeleler kullanılan TED çalışmaları

PoliHIPE yapı	FDM	Enerji depolama kapasitesi (J/g)	Literatür
Polistiren@karbon nanotüp	Parafin	115-119.3	(Maleki ve ark., 2019)
Poliakrilonitril-divinilbenzen	Parafin	108.4 ve 120.2	(Maleki ve ark., 2019)
Poliakrilonitril-divinilbenzen	PEG6000	146.3 ve 163.0	(Maleki ve ark., 2019)
Polistiren@montmorillonit nanokil	N-hekzadekan	143.41	(Mert, 2020)
Polistiren@selüloz nanokristal	N-hekzadekan	117	(Türkoğlu ve ark., 2021)
Polistiren-divinil benzen@karbon nanotüp	Parafin	119.3	(Ahmadi ve ark., 2021)
Selüloz nanofiber	N-oktadekan	131.3–250.7	(Lu ve ark., 2021)
Polistiren@karbon nanofiber	Hekzadekanol	207.1- 207.5	(Döğüşcü ve ark., 2021)
Polistiren-divinil benzen	Hekzadekanol	163.7-210.4	(Zhao ve ark., 2021)
Polimetil metakrilat-divinil benzen@pumice zeolite	Laurik asit	55.60	(Mert ve ark., 2022b)

Çizelge 2.5. (Devam) FDM’lerin stabilizasyonu için PoliHIPE iskeleler kullanılan TED çalışmaları

PoliHIPE yapı	FDM	Enerji depolama kapasitesi (J/g)	Literatür
PolistirenStyrene-divinil benzen@Çinkoborat	Hekzadekan	123	(Mert ve ark., 2022)
β-Mirsen-Etilen glikol dimetakrilat@montmorillonit nanokil	N-tetradekan	72.58 ve 82.14	(Mert ve ark., 2022)
Doymamış polyester reçinesi-Divinil benzen@Aktif karbon	Hindistan cevizi yağı	42.92	(Mert ve ark., 2022a)
Polistiren@CuO	Oktadakanol	190.4-194.0	(Kahraman Döğüşcü ve ark., 2022)
Selüloz nanokristal	N-oktadekan	228.5–253.2	(Zhao ve ark., 2022)
Poliglisidil metakrilat	Dodekanol	130.32-158.62	(Li ve ark., 2022)
Polistiren@altıgen bor nitrür	N-eicosane	72.20-79.0	(Mert ve ark., 2023)
Poliürethan	N-oktadekan	231.6	(Xu ve ark., 2023)
Poli(2-Etilheksil akrilat)	Kalsiyum klorür heksahidrat	112–154	(Rosen ve ark., 2023)
Poli(stiren-ko- 2-etil heksil metakrilat)@grafen	PEG1000	120.8-121.9	(Kahraman Döğüşcü ve ark., 2024b)
Poliglisidil metakrilat@montmorillonit nanokil	Oleik asit	35.02- 36.64	(Mert ve ark., 2024)
Poliakrilonitril@Ni	Ticari parafın	90.6-111.2	(Ebrahimi ve ark., 2024)

2.4. Bina Termal Yönetiminde FDM’lerinin Kullanılması

FDM’lerin ısıyı faz geçiş sıcaklığına karşılık gelen neredeyse sabit bir sıcaklıkta ısı enerjisi depolayabilmesi, birim hacim başına duyulur ısı malzemelerinden daha fazla enerji depolayabilmesi, geniş sıcaklık aralığı kullanılabilirliği ve düşük maliyet gibi diğer önemli avantajlarından dolayı binaların ısıl düzenlemesine katkı sağlaması için ve/veya enerji verimli bina kabuğu geliştirmek için tuğla (Vicente & Silva, 2014), duvar kaplaması (Yu ve ark., 2020), alçıpan (Srinivasaraonaik ve ark., 2020), beton veya beton

levhaların (Rathore & Shukla, 2020) içinde gömülerek kullanıldığı çalışmalar da literatürde bulunmaktadır.

Yapı malzemelerinin alkali doğasından dolayı FDM'lerin yapı malzemelerine dahil edilmesi zordur. Bu nedenle FDM'lerin yapı malzemelerine uygun bir şekilde nasıl dahil edileceğini bilmek gerekir. FDM'leri yapı malzemelerine dahil etmek için genellikle doğrudan birleştirme, daldırma, kapsülleme ve yapıca kararlı hale getirme yöntemleri kullanılır (Sharshir ve ark., 2023). Doğrudan birleştirme işleminde FDM yapı malzemesinin hazırlanması sırasında doğrudan malzeme ile karıştırılarak hazırlanır (Feldman ve ark., 1991). Daldırma işleminde; yapı malzemesi FDM'ler erime sıcaklığının üzerinde doğrudan eriyiğin içine daldırılır. FDM yapı malzemesinin gözeneklerine nüfus eder. Hem doğrudan birleştirme hem de daldırma yöntemi, faz değiştiren malzemeyi sızdırma sorununa sahiptir ve aynı zamanda bu yöntemler yapı malzemesinin mekanik özelliklerini ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz yönde etkiler (Memon, 2014). Kapsülleme yöntemi ise bu iki yöntemle göre daha avantajlıdır. Sıvı haldeki FDM'lere konteyner sağlaması, katı-sıvı faz dönüşümü sırasında FDM sızıntısını önlenmesi bakımından ve birim hacme göre yüzey alanını arttırması ve dolayısıyla ısı transferini arttırması sebebiyle kullanışlı bir yöntemdir. Kapsülleme işlemi makro boyuttan nano boyuta kadar farklı boyutlarda gerçekleştirilebilir. Ancak kapsül boyutu büyüdükçe tasarımı ve maliyeti azalırken ısı iletkenliğin yetersiz olması, inşaat sırasında kapsüllerin korunması gerekliliği, köşe ve kenarların katılaşması sebebiyle ısı transferinin azalması gibi sorunlar karşımıza çıkmaktadır (Regin ve ark., 2008). Mikro ve nano kapsülleme yöntemi artan yüzey alanı sayesinde ısı transferini iyileştirmesi, yapı malzemelerine entegre edilmesinin kolaylığı ve polimerik esnek kabuklara sahip olmaları sebebiyle son yıllarda daha çok tercih edilmektedir (Gencel ve ark., 2022a; Naikwadi ve ark., 2021; Zhao ve ark., 2023). Ancak kapsüllerin korozyona dayanıklı, esnek aynı zamanda güçlü olması gerekmektedir (Shamshiri ve ark., 2022; Zhou ve ark., 2012). Aksi durumda özellikle yapı malzemelerinin hazırlanması sırasında yapılan kuvvetli karıştırma işlemleri sırasında kabuğun kırılması neticesinde FDM'nin dışarı sızması sıklıkla karşılaşılan problemdir. Yapıca kararlı FDM oluşturma işlemi için ya yüksek yoğunluklu polietilen, stiren ve bütadien gibi polimerik yapılarda ya da genişletilmiş grafit, silika dumanı, vermikülit, kaolin gibi yüksek gözenekli yapılarda FDM'nin hapsedilmesi

amaçlanır. Bu yöntem; malzemenin ekstra bir paketlemeye ihtiyacı olmaması, faz değişimi periyodunda şeklini koruması ve sızıntı davranışı göstermemesi, birçok ısıtma soğutma periyodundan sonra stabil kalması, yapı malzemelerine doğrudan karıştırılabilmesi ve gözenekli yapılar sayesinde yüksek oranda FDM hapsedebilmesi gibi özellikleri sebebiyle oldukça cazip bir metottur. Literatürde bu konuda yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur.

Gencel ve ark., (2021b), yaptıkları çalışmada laurik-miristik ötektik karışımını mikronize genişletilmiş vermikülit içinde emperye ederek çimento bazlı harç üretmişlerdir. Çalışmada üretilen yapıca kararlı FDM katkılı çimento esaslı harçların iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını en aza indirerek ısı konfor sağladığı rapor edilmiştir (Gencel ve ark., 2021b). Gencel ve ark., (2021), yaptıkları bir başka çalışmada ise FDM olarak kullandıkları kaprik-stearik asit ötektik karışımını taban külü içinde %30 oranında hapsederek çimento esaslı harç üretmişlerdir. 52 J/g erime entalpisine sahip kompozit yapının karbon emisyonunu ve yıllık enerji ihtiyacının azaltılması için enerji tasarruflu paneller, betonlar, harçlar, tuğlalar vb. oluşturulmasında yüksek potansiyele sahip olduğu sonucunu deklare etmişlerdir. Bir başka çalışmada kaprik-miristik asit ötektik karışımı atapulgit içinde stabilize edilmiş ve 3 farklı oranda köpük betona dahil edilmiştir. Köpük betona katkılanan FDM 21°C’de 10.98 J/g’lık ısı enerji katkısı sağlamıştır. Atapulgit/FDM içeren köpük betonların güneş ısı düzenleme performansları laboratuvar ve gerçek ortam koşullarında karşılaştırmalı olarak test edilmişlerdir. Sonuçlar, kabul edilebilir mekanik özelliklere sahip köpük betonların binalarda iç sıcaklık kontrolü ve enerji tasarrufu için kullanılabileceğini göstermiştir (Gencel ve ark., 2022). Yaras ve ark., yaptıkları çalışmada atapulgit içinde bir yağ alkolü olan dodekanolü hapsedmişlerdir. Kil/yağ alkolü karışımı alçı içine katkılanarak bina kabuğunda ısıtma soğutma yükünü azaltabilecek yeni bir malzeme üretilip gerçek hava koşulları altında enerji performansı test edilmiştir. Sonuçlar alçı/yapıca kararlı kompozit FDM içeren malzemenin sadece alçı ile hazırlanan test odası ile karşılaştırıldığında 6-12 saat aralığında 1.2-2.66 °C daha sıcak tutabildiğini göstermiştir (Yaras ve ark., 2022). Bir başka çalışmada; fırın cürufu/kaprik asit yapıca kararlı FDM üretilmiş ve %15, %30 ve %45 çimentoya eklenerek yeni tip çimento esaslı enerji depolama malzemesi üretilmiştir. Teorik hesaplamalar, 3×4×0.2 m boyutlarında bir duvarda üretilen FDM katkılı yapıca

kararlı çimento kullanılmasıyla 13.5 kWh enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir. Ayrıca üretilen ısı enerji depolama ünitesinin 1 kWh kömür, doğalgaz ve elektrik tüketimi başına karbon emisyonunu da sırasıyla 36.67, 35.73 ve 5.87 kg-CO₂ azaltacağını bildirmişlerdir (Gencel ve ark., 2022).

2.5. Hafif Beton

İnşaat sektöründe kullanılan en temel yapı malzemelerinin başında beton gelmektedir. İnşaat teknolojisinin gelişmesine bağlı olarak, betondan beklenen ihtiyaçlarda değişmiştir. Buda birçok farklı türde betonun ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bunlardan biri de hafif betonlardır. Hafif betonlar, beton teknolojisinin modern bir başarısı değildir. Antik çağlardan beri bilinmektedirler ve temelde günümüz betonunun öncüleridirler. 19. ve 20. yüzyıllarda endüstriyel olarak üretilen hafif agregaların geliştirilmesi ve üretimi, malzeme teknolojisi için tarihi bir dönüm noktası olmuştur (Agrawal ve ark., 2021; Banawair ve ark., 2019; Mo ve ark., 2017). Yük taşıyan bileşenlerin hacmini azaltmak, hammadde tüketimini düşürmek ve geleneksel betona göre daha iyi termal ve mekanik özellikler elde etmek için hafif betonlar geliştirilmeye başlanmıştır.

Hafif betonlar normal betonlar ile kıyaslandığında; birim hacimdeki toplam malzemenin kütesinin azalması ile daha hafiftirler dolayısıyla kalıplarda daha az basınç oluştururlar ve kalıplanması daha kolaydır, ağırlıklarının azalması sebebiyle temele ve diğer yapı elemanlarına düşen yükün azalmasına sebep olur dolayısıyla bu malzemelerin daha küçük boyutta yapılması ile daha az maliyete neden olur, depremde yıkım riski daha azdır, bu malzemelerin ısı ve ses yalıtımları daha iyidir, ısı iletkenlikleri düşüktür. Ancak bu beton türünün normal betona göre bazı dezavantajları da vardır. Boşluklu yapısından dolayı mukavemetleri ve elastisite modülü düşüktür. Aşınmaya karşı daha dayanıksızdır, rutubete karşı yalıtım yapılması gerekmektedir (Agrawal ve ark., 2021).

Hafif beton üretimi için kullanılan farklı yöntemler vardır. Bunlar; beton içindeki ince agregaların tamamen uzaklaştırıldığı ince agregasız beton üretimi, fiziksel yollar ve kimyasal katkıları ile beton içinde hava boşluklarının oluşturulmasıyla üretilen köpük ve

gaz betonlar, normal agregaya yerine gözenekli ve hafif agregaların betona eklenmesi ile üretilen hafif agregalı betonlar şeklinde açıklanabilir. Hafif beton üretiminde en çok kullanılan yöntem normal agregaya yerine hafif agregaların kullanılması ile hafif beton üretimidir. Hafif agregalı betonlar, genellikle 300 ile 1850 kg/m³ değerleri arasında birim ağırlıklara sahip betonlardır (Behera ve ark., 2025). Hafif betonların özellikleri kütle oranına, su/çimento gözenekli yapı seçimine, üretim sürecine, kullanılan bağlayıcıya, katkı maddesi veya yüzey aktif madde içeriğine, kullanılan agreganın çeşidine bağlı olarak değişmektedir. Hafif agregalı beton üretiminde çeşitli agregalar kullanılmaktadır. Bunlar; volkanik tüf, pomza ve diatomit gibi doğal hafif agregalar, genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vermikulit gibi doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar, uçucu kül, fırın cürufu gibi endüstriyel atıklardan üretilen hafif agregalar, kızdırılmış uçucu kül ve genleştirilmiş yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların işlenmesiyle oluşan hafif agregalardır.

2.5.1. Hafif betonun geliştirilmesinde FDM'lerin kullanılması

Sürdürülebilir inşaat malzemelerine olan artan talep, bina termal performansını artırmak için FDM'ler etkili bir çözüm olarak öne çıkarmıştır. Ancak hafif betonda FDM kullanımına ilişkin araştırmalar sınırlı kalmakta ve özellikle zorlu çevre koşullarında potansiyelinin büyük bir kısmı keşfedilmemiş halde kalmaktadır.

Mostofinejad ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ilk kez genleştirilmiş kil agregasına FDM olarak polietilen glikol (PEG) 600 ve PEG 1000'i dahil ederek üstün termal ve mekanik özelliklere sahip yenilikçi bir hafif beton ürettiler. FDM eklenen hafif betonun, yalıtım özelliklerinde %70'e varan toplam bir iyileştirme sağladı (Mostofinejad ve ark., 2025a). Aynı grubun bir başka çalışmasında, FDM olarak seçilen PEG üç farklı yöntemle hafif betona entegre edilmiştir. Birincisinde mikrokapsüllenmiş FDM hafif betona katılmıştır. İkinci yöntemde FDM, hafif genleşmiş kil agregalarına vakum emdirme yöntemi ile dahil edilip oluşturulan yeni agregaya betona katılmıştır. Üçüncü yöntemde mikrosilika, ikinci yöntemde oluşturulan agregaya ile belli oranlarda yer değiştirilerek hafif beton oluşturulmuştur. Sonuçlar, ikinci yöntemde oluşturulan hafif betonun en dengeli performans sunduğunu, basınç dayanımının %82.5'ini koruduğunu, ısı iletkenliği %55

oranında azalttığını ve su emilimini %4.7'lik bir artışla sınırladığını ortaya koymaktadır. Mikro silikaya dispersiyon en yüksek ısı yalıtımını sağlamıştır, ancak önemli bir dayanım kaybı (%62.5) oluşturmuştur. Mikro kapsülleme, dayanım ve yalıtım arasında orta düzeyde bir uzlaşma sağlamıştır (Mostofinejad ve ark., 2025c).

Alashker ve grubu yaptıkları çalışmada, hafif genişletilmiş şeyl agregaları içeren hafif betonun, FDM olarak seçilen PEG600 ve PEG1000 ihtivası ile termal düzenlenmeyi ve enerji verimliliğini arttırmayı amaçlamışlardır. FDM eklenmesi beklendiği üzere betonda mekanik dayanımı azaltmış ancak yüzey sıcaklığının artışını kontrol numunesine kıyasla 20 °C'ye kadar geciktirmiştir (Alashker ve ark., 2025).

Başka bir çalışmada, dodesilamin ve oktilamin kullanılarak ötektik katı-katı FDM üretilmiş, üretilen FDM aerojel ile birlikte beton harcına eklenmiştir. Çalışmada, hazırlanan hafif betonun termal ve mekanik analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, FDM içeren hafif betonun, çimento karolara göre daha uzun zaman sıcaklık gecikmelerine sahip olduğunu ortaya koymuştur (Krishnan ve ark., 2025).

2025 yılında yapılan bir çalışmada, mikrokapsüllenmiş polietilen glikol (PEG)1000 içeren hafif betonlar oluşturulmuştur. Sonuçlar, agregaların hafif genişletilmiş kil agregası ile değiştirilmesinin basınç dayanımını %25'e kadar azalttığını göstermiştir. Ancak, FDM olarak PEG 1000'in eklenmesi bu azalmayı hafifletmiş ve dayanım kaybını %16 ile sınırlamıştır. Standart hafif genişletilmiş kil agregası karışımlarında ısı iletkenlik %66 oranında azalmış ve FDM eklenerek daha da düşürülmüş, bu da üstün ısı yalıtım özellikli hafif betonlar üretilmesi ile sonuçlanmıştır (Mostofinejad ve ark., 2025b).

Jia ve grubu yaptıkları çalışmada, bina enerji tüketimini azaltan hafif beton üretmek istemişlerdir. Bu amaçla FDM iki farklı yöntemle betona dahil edilmiştir. Birincisinde geri dönüştürülmüş agregalara FDM emdirilmiş, ikincisinde doğrudan ekleme yöntemini kullanmışlardır. Sonuçlar, artan FDM içeriğiyle beton yoğunluğunda ve mekanik özelliklerde bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, serbest FDM katılımıyla %18.5'e kadar ulaşan ve sıfır karbonatlaşma derinliğine ulaşan klorür iyon

penetrasyon direncinde dikkate değer iyileştirmeler gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, FDM-beton kompozitlerinin enerji verimliliği ve yapısal bütünlüğünü uyumlu hale getirme, fosil yakıt bazlı klima sistemlerine sürdürülebilir bir alternatif sunma ve yapıların dayanıklılığı açısından büyük bir potansiyele sahip olma potansiyelini göstermiştir (Jia ve ark., 2024).

Salimi ve ark. yaptıkları çalışmada, FDM olarak seçtikleri bütül stearatı, önce grafen nanoplakçıklar ile muamele ederek nanoakışkan bir malzeme elde etmişlerdir. Sonrasında bu malzeme genişletilmiş kile vakum altında emdirilerek bir agrega elde edilmiştir. Son olarak elde edilen agrega betona eklenerek bir FDM içeren hafif beton oluşturulmuştur. FDM-grafen nanoplak ve kil içeren hafif betonun termal analizinde, FDM-kil içeren hafif betonla karşılaştırıldığında 4 °C'ye kadar, sadece kil içeren beton ile karşılaştırıldığında 5.1 °C'ye kadar yumuşatıldığını göstermiştir (Salimi ve ark., 2025).

Literatürde PoliHIPE yapıların ısı enerji depolama uygulamalarına yönelik çalışmalarla son yıllarda karşılaşılsa da bu yapıların yapı malzemelerine dahil edildiği hiçbir çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu yapılar gözenekli, hiyerarşik bağlantılı ve ısı iletkenlik sorununa katkı sağlayabilen, FDM emme kapasitesi yüksek yapılardır. Bu tez kapsamında sentezi gerçekleştirilen yapılar, polimer zincirinin modifiye edilmesi ile FDM ile polimer arasındaki etkileşim artırılarak daha kuvvetli ve daha çok FDM emme kapasiteli PoliHIPE yapılara evrilmiştir. Yine literatürde PoliHIPE yapıların FDM emme kapasitesini arttırmak için PoliHIPE yapıların fonksiyonlu biçime dönüştürüldüğü çalışmalarla da karşılaşılmamıştır. PoliHIPE/FDM kompozitlerinin hafif beton sistemine dahil edilip hem laboratuvar şartlarında hem de hazırlanacak prototip üretimle gerçek hava koşullarında ısı performanslarının test edilmesi de ilk defa bu çalışma ile gerçekleştirilmiştir.

3. MATERYAL METOT

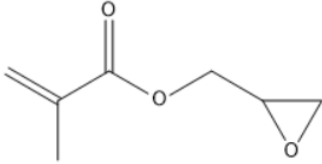
3.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Monomerler; glisidil metakrilat (GMA) ve 2-etil heksil metakrilat (EHMA), çapraz bağlayıcı etilen glikol dimetakrilat (EGDMA) sırasıyla Sigma-Aldrich, Aldrich, Merck, şirketlerinden tedarik edildi. PoliHIPE yapının fonksiyonolize edilmesi için kullanılan trietanolamin ve piridin Zag ve Merck şirketlerinden sağlandı. Potasyum peroksidisülfat ($K_2S_2O_8$) ve kalsiyum klorür ($CaCl_2$), başlatıcı olarak kullanılmak üzere Merck şirketinden tedarik edildi. Su-yağ emülsiyon ortamının oluşturulmasında kullanılan emülgatör poli(etilen glikol)-blok-poli(propilen glikol)-blok-poli(etilen glikol) (Synperonic PEL 121) Sigma Aldrich şirketinden satın alındı. Saflaştırma basamaklarında kullanılan teknik etanol TEKKIM firmasından satın alındı. FDM olarak kullanılan metil palmitat (MP) Alfa Easer firmasından tedarik edildi. PoliHIPE sentezi sırasında kullanılan tüm kimyasallar herhangi bir saflaştırma yapılmaksızın doğrudan kullanıldı. Bartın'daki Sanko Çimento fabrikasından tedarik edilen çimento (CEM I 42.5R), TS EN 197-1 standardının gerekliliklerini karşılamaktadır. Çimentonun özgül ağırlığı 3.11, özgül yüzey alanı $3650 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve hacim genleşmesi 1 mm'dir. Çalışmada hafif beton elde edilmesinde agrega olarak perlit kullanılmıştır.

3.1.1. Glisidil metakrilat

GMA, polimer kimyasında kullanılan bir kimyasal bileşik olup metakrilik asit esterini ve akrilat grubun epoksi grubunu içerir. Bu da onu yüksek reaktif bir kimyasal yapar. GMA'nın benzersiz reaktivitesi, polimerizasyon reaksiyonlarına girmesine ve kopolimerlerin ve reçinelerin oluşmasına olanak tanır. Farklı malzemeler arasındaki yapışmayı artırma yeteneği nedeniyle, yapıştırıcılar ve kaplamalarda vazgeçilmez olan önemli bir özelliktir. Ayrıca çapraz bağlanma özeliği yüksektir. GMA'nın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

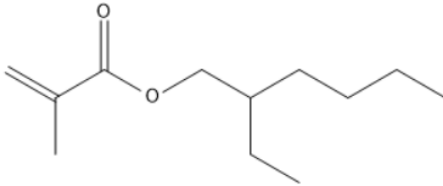
Çizelge 3. 1. GMA'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri

GMA	
Kimyasal Formülü	$C_7H_{10}O_3$
Molekül Kütlesi	142.1546 g/mol
Yoğunluk	1.07 g/cm ³
Kaynama noktası	189 °C
Erime noktası	-41.5 °C

3.1.2. 2-Etil heksil metakrilat

EHMA, (met)akrilik asit ve tuzları, amidleri ve esterleri ile ve (met)akrilatlar, akrilonitril, maleik asit esterleri, vinil asetat, vinil klorür, viniliden klorür, stiren, bütadien, doymamış polyesterler ve kurutma yağları vb. ile hazırlanabilir. EHMA, çok çeşitli organik ve inorganik bileşiklerle kolayca katılma reaksiyonlarına girebildiği için kimyasal sentezler için de oldukça kullanışlı bir hammaddedir. Çizelge 3.2'de EHMA'nın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.

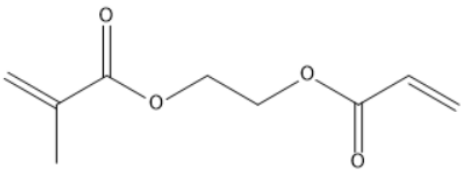
Çizelge 3. 2. EHMA'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri

EHMA	
Kimyasal Formülü	$C_{12}H_{22}O_2$
Molekül Kütlesi	198.3 g/mol
Yoğunluk	0.884 g/cm ³
Kaynama noktası	228 °C
Erime noktası	<-50 °C

3.1.3. Etilen glikol dimetakrilat

EGDMA, polimer formülasyonlarında çapraz bağlayıcı ajan olarak yaygın olarak kullanılan, düşük viskoziteli, iki fonksiyonlu bir metakrilat monomeridir. EGDMA, mekanik özellikleri ve kimyasal dayanıklılığı artırma kabiliyeti nedeniyle UV ile kurlenen sistemlerde, diş kompozitlerinde ve yüksek performanslı yapıştırıcıların üretiminde yaygın olarak kullanılır. Çizelge 3.3'te EGDMA'nın bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.

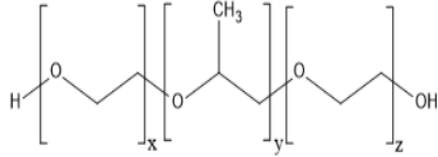
Çizelge 3. 3. Etilen glikol dimetakrilat fiziksel ve kimyasal özellikleri

EGDMA	
	
Kimyasal Formülü	C ₁₀ H ₁₄ O ₄
Molekül Kütlesi	198.218 g/mol
Yoğunluk	1.051 g/mL
Kaynama noktası	98 ila 100 °C
Erime noktası	-40 °C

3.1.4. Poli(etilen glikol)-blok-poli(propilen glikol)-blok-poli(etilen glikol)

Synperonic PEL 121, su/yağ emülsiyonlarında stabilize edici emülgatör olarak kullanılan bir blok kopolimerdir. Sert ve yumuşak yüzey temizleyiciler, kaplamalarda ve su arıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Çizelge 3.4'te Synperonic PEL 121'in bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.

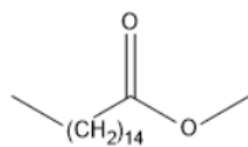
Çizelge 3. 4. Synperonic PEL 121 fiziksel ve kimyasal özellikleri

Synperonic PEL 121	
Molekül Kütlesi	$\overline{M}_n \approx 4400 \text{ g/mol}$
Yoğunluk	25 °C'de 1.006 g/mL
Viskozite	1.200 cP
HLB	1.0-7.0

3.1.5. Metil palmitat

MP, palmiye yağı ve cevizde doğal olarak bulunan bir palmitik asit metil esteridir. Metil palmitat, doymamış yağ asitlerinin oto oksidasyonunu yavaşlatarak yağ ve yağ ürünlerinin stabilizasyonu için gıda ve kozmetik endüstrisinde katkı maddesi olarak kullanılabilir. MP'ın çalışmada FDM olarak seçilmesinin sebebi 29.27 °C'de erime sıcaklığına ve 231.53 J/g erime entalpisine sahip olmasıdır. Çizelge 3.5'de MP'nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.

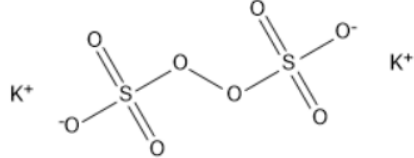
Çizelge 3. 5. MP'ın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Metil Palmitat	
Kimyasal Formülü	$C_{17}H_{34}O_2$
Molekül Kütlesi	270.45 g/mol
Yoğunluk	0.852 g/mL
Kaynama noktası	185 °C
Erime noktası	29-35 °C

3.1.6. Potasyum peroksidisülfat

$K_2S_2O_8$, organik sentezde genellikle oksitleyici bir madde ve polimerizasyon başlatıcısı olarak kullanılır. Potasyum peroksit olarak da bilinen bu tuz, soğuk suda az çözünürken, ılık suda daha iyi çözünen beyaz bir katıdır. Potasyum persülfat, yüksek akım yoğunluğunda sülfürik asitte soğuk potasyum bisülfat çözeltisinin elektrolizi ile hazırlanabilir. Çizelge 3.6'da $K_2S_2O_8$ 'nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.

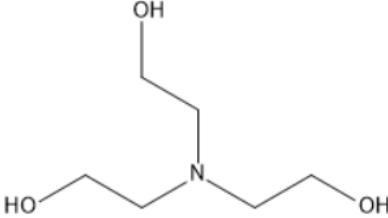
Çizelge 3. 6. Potasyum Peroksit fiziksel ve kimyasal özellikleri

Potasyum Peroksidisülfat	
	
Kimyasal Formülü	$K_2O_8S_2$
Molekül Kütlesi	270.32 g/mol
Yoğunluk	2.48 g/cm ³
Kaynama noktası	1689 °C
Erime noktası	1677 °C

3.1.7. Trietanolamin

Trietanolamin üretimi etilen oksit'in aşırı amonyak ile reaksiyona girmesi ile endüstriyel ölçekte üretilmektedir. Çalışmada, GMA bazlı PoliHIPE yapının epoksi halkasının açılarak -OH fonksiyonel PoliHIPE yapı elde edilmesi için kullanılmıştır. Çizelge 3.7'de trietanolamin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. 7. Trietanolamin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Tri- Etanolamin	
	
Kimyasal Formülü	$C_6H_{15}NO_3$
Molekül Kütlesi	149.19 g/mol
Yoğunluk	1.1245 g/cm ³
Kaynama noktası	360 °C
Erime noktası	21 °C

3.1.8. GMA-EHMA-EGDMA PoliHIPE iskeletin sentezlenmesi

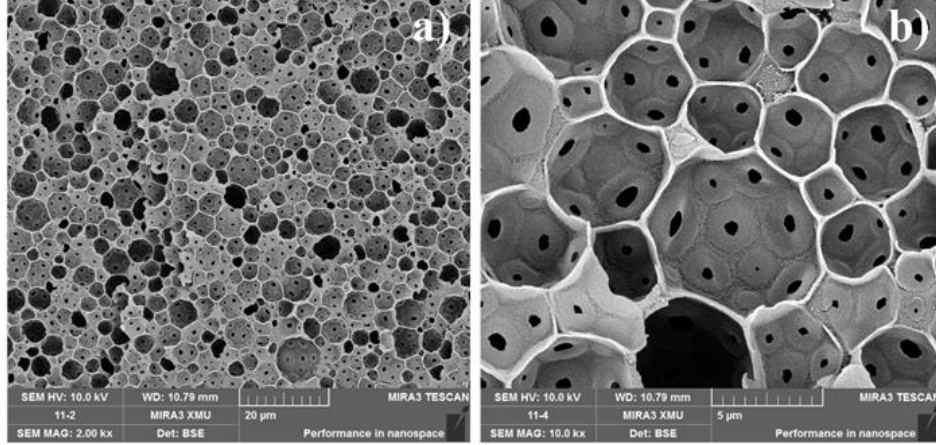
PoliHIPE yapının ana iskeleti olarak GMA ve EHMA monomerleri seçilmiştir. EGDMA komonomeri çapraz bağlayıcı olarak kullanılmıştır. GMA monomeri, reaktif epoksi gruplarının fonksiyonelleştirme ve çeşitli modifikasyonlar için uygun olması nedeniyle tercih edilirken (Paljevac ve ark., 2025), EHMA monomeri ise polimerin mekanik mukavemetini artırması nedeniyle tercih edilmiştir (McKenzie & Ayres, 2023).

GMA-EHMA ve EGDMA'dan oluşan kopolimerik iskeletin hazırlanması için monomer, komonomer, çapraz bağlayıcı, su fazı, organik faz ve emülgatörün en uygun oranı grubumuzun son çalışmasında belirlenmiştir (Kahraman Döğüşcü, 2025). Bu amaçla bir dizi polimer sentezlenmiştir. Çizelge 3.8'de GMA-EHMA-EGDMA kopolimeri için uygun bileşimi belirlemek amacıyla hazırlanan emülsiyonların bileşimi verilmiştir.

Çizelge 3. 8. GMA-EHMA-EGDMA kopolimeri için uygun bileşimi belirlemek amacıyla sentezlenen polimerlerin bileşimleri

Deney	Monomer yüzdesi			HIPE yüzdesi		Emülgatör
	GMA	EHMA	EGDMA	Su faz	Organik faz	PEL 121
1	50	40	10	90	10	20
2	50	40	10	90	10	30
3	50	40	10	85	15	20
4	50	40	10	85	15	30
5	50	30	20	90	10	20
6	50	30	20	90	10	30
7	50	30	20	85	15	20
8	50	30	20	85	15	30
9	40	40	20	90	10	20
10	40	40	20	90	10	30
11	40	40	20	85	15	20
12	40	40	20	85	15	30

Bu oranlara göre hazırlanan emülsiyonlardan sentezlenen 12 polimerin morfolojik analizi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. 11. deneyden elde edilen kopolimerik yapının SEM görüntüleri, diğer örneklerle kıyasla daha gözenekli bir mimari göstermesinin yanı sıra hiyerarşik yapıda herhangi bir kopma görülmeyen daha düzgün bir gözenek dağılımı sergiledi. Bu sebeple, 11. bileşim optimum kopolimer oranı olarak belirlendi. Bu oranlara göre üretilen polimerik yapı, araştırmanın geri kalanında kullanıldı. Şekil 3.1’de 11. bileşime ait polimerik iskeletin farklı büyütme oranlarında SEM görüntüleri verilmiştir.



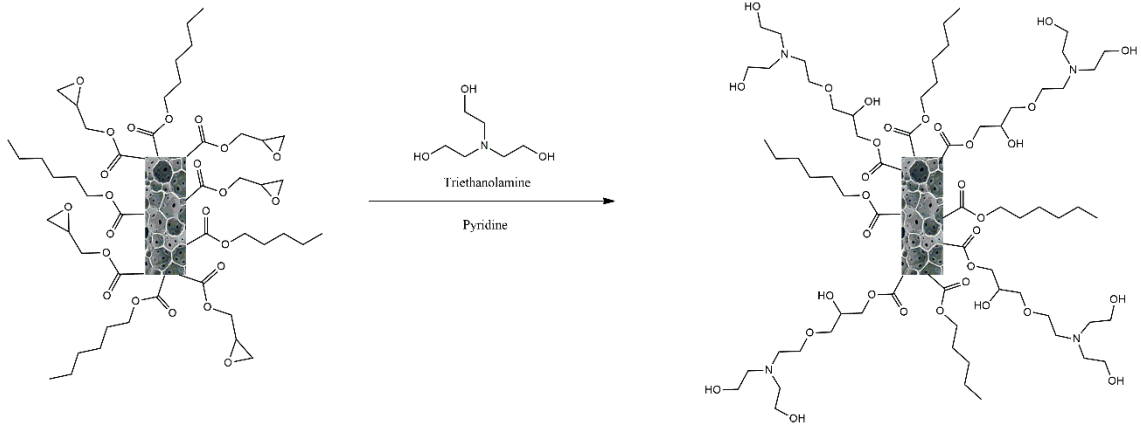
Şekil 3. 1. Belirlenen optimum orana ait kopolimerik yapının SEM görüntüleri (a-2000 kat büyütme, b-10000 kat büyütme)

Belirlenen oranlara göre, karalı emülsiyonun kütlece %15 organik faz ve %85 sulu fazdan oluşacağı sonucuna varıldı. Emülsiyondaki monomer bileşimi kütlece %40 GMA, %40 EHMA ve %20 EGDMA'dan oluşturuldu. Toplam monomer kütlece %20'si emülgatör, monomerlerin toplam mol sayısının %1'i kadar başlatıcı ilave edildi. Belirtilen oranlarda formüle edilen organik faz, ortam sıcaklığında mekanik karıştırıcı reaktörde 500 rpm'de otuz dakika karıştırıldı. Kalıcı emülsiyonu tamamlamak için, $K_2S_2O_8$ ve $CaCl_2$ içeren 85 ml deiyonize su, karışıma saniyede 1-2 damla eklendi. Tüm eklemeler tamamlandıktan sonra, mekanik karıştırmaya 30 dakika daha devam edildi. Kararlı bir emülsiyon oluştuktan sonra karışım, 80 °C'de bir etüvde 24 saat polimerize edildi. PoliHIPE iskelet içerisindeki emülgatörün uzaklaştırılması için, sentezlenen gözenekli polimerler etanol ile Soxhlet aparatı kullanılarak 48 saat yıkandı. Son olarak sentezlenen PoliHIPE iskeletler, 24 saat boyunca 40 °C'de bir etüvde kurutuldu.

3.1.9. GMA bazlı PoliHIPE iskelet yapısının fonksiyonelleştirilmesi

Çalışmada, iskelet olarak GMA ve EHMA monomerlerinin EGDMA çapraz bağlayıcısı kullanılarak polimerize edildiği PoliHIPE yapı sentezlenmiştir. Literatürde GMA bazlı PoliHIPE yapılar FDM iskeleti olarak kullanılsa da (Kahraman Döğüşçü, 2025), bu yapının fonksiyonolize edilerek PoliHIPE iskeleti olarak seçildiği bir çalışma bulunmamaktadır.

Sentezlenen GMA bazlı monolitın fonksiyonelleştirilmesi için, ilk olarak 3 g trietanolamin ve 4.78 g piridin bir balonda reaksiyona sokuldu. Daha sonra THF içerisine sırasıyla, kırılarak yüzey alanı arttırılan PoliHIPE ve hazırlanan trietanolamin ve piridin karışımı ilave edilerek oda sıcaklığında geri soğutucu altında 50 °C etkileştirildi (Paljevac & Krajnc, 2020). Şekil 3.2’de GMA bazlı PoliHIPE yapının fonksiyonelleştirilmesi için gerçekleştirilen reaksiyon şeması verilmiştir. Reaksiyon sonunda GMA’nın epoksi halkalarının bir kısmı açılarak -OH gruplarını yapısında bulunduran bir polimerik yapıya evrilmiştir. -OH grupları, polimerik iskelete emperye edilecek FDM ile hidrojen bağı, Dipol-Dipol ve Van ders Waals etkileşimleri gibi daha kuvvetli etkileşimler yaparak daha fazla FDM hapsedmesi için oluşturulmuştur.

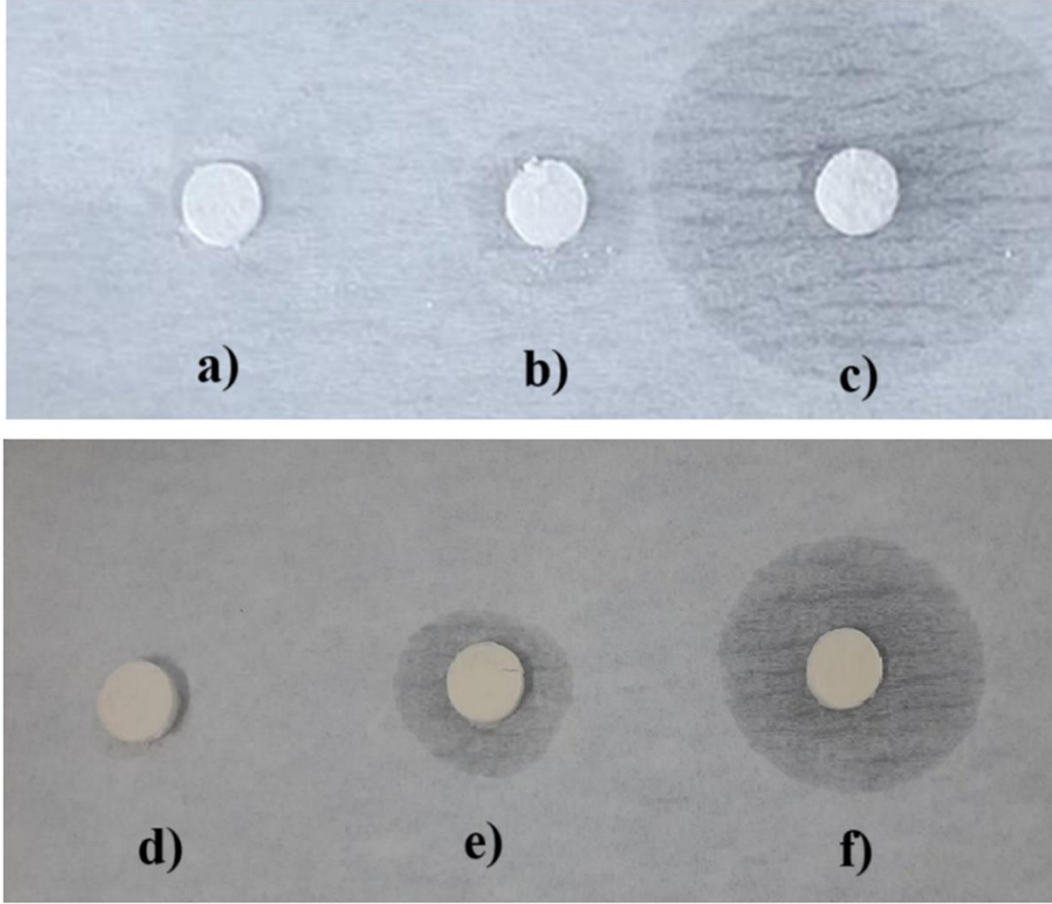


Şekil 3. 2. GMA bazlı PoliHIPE yapının fonksiyonelleştirilmesi

3.1.10. GMA bazlı PoliHIPE/MP kompozitlerinin üretimi

Yüksek enerji depolama kapasitesi nedeniyle FDM olarak seçilen MP, daha önce hiç glisidilmetakrilat-2-etilheksil metakrilat PoliHIPE yapısına dahil edilmemiştir. MP, kararlı faz geçiş özelliğine, yaklaşık 230 J/g’lık önemli TED kapasitesine ve 29.27 °C’lık bina termal konfor uygulamaları için uygun bir erime sıcaklığına sahip olması nedeniyle seçilmiştir. MP, yüksek enerji depolama kapasitesine ve uygun faz geçiş sıcaklığına sahip olmasına rağmen, katı-sıvı faz geçişi yoluyla enerji depolaması nedeniyle ortaya çıkan sızıntı sorununu önlemek için polimerik bir çerçeve içinde hapsedilmiştir.

FDM’lerde sızıntı davranışı, TED sistemlerinin güvenilirliğini ve etkinliğini kısıtlar, TED sisteminin performansını önemli ölçüde azaltır. Bu sebeple TED sistemlerinde FDM’lerin kullanımını kısıtlayan bu davranış titizlikle incelenmelidir. MP, GMA bazlı PoliHIPE iskelete vakum emdirme işlemi ile emperye edildi. GMA bazlı PoliHIPE iskeletin hapsedebileceği maksimum FDM miktarı sızıntı testi ile belirlendi. Hem fonksiyonolize edilmemiş hem de fonksiyonolize edilen PoliHIPE iskeletlerin hapsedebileceği maksimum MP oranı ayrı ayrı belirlendi. MP’ın erime noktasının üzerinde farklı oranlarda PoliHIPE/MP karışımları hazırlanarak 50 °C sıcaklıkta ve 60 kPa basınçta vakum etüvüne yerleştirildi. Vakum işleminin ardından, hazırlanan kompozit yapılar akma testine tabi tutuldu. Akma testi, kalıplanan kompozit FDM’lerin fitre kâğıdı ile 50 °C’de etüvde 1 saat bekletilmesi ile gerçekleştirildi. Şekil 3.3 sırasıyla fonsiyonelleştirilmemiş GMA-EHMA-EGDMA PoliHIPE yapısının ve -OH fonksiyonolize edilmiş GMA-EHMA-EGDMA PoliHIPE yapılarının akma testi fotoğraflarını göstermektedir. Fotoğraflardan da görüldüğü üzere, fonsiyonelleştirilmemiş PoliHIPE yapı en fazla kütlece %50 FDM hapsedebiliyorken, -OH fonksiyonolize edilmiş GMA-EHMA-EGDMA PoliHIPE yapı kütlece %60 MP hapsedebilmiştir. Bu oranların üzerinde akma davranışı izlenmiştir. -OH fonksiyonolize edilmiş kompozit yapının FDM’leri tutma konusundaki gelişmiş yeteneği, FDM ile gözenekli yapı arasında oluşan hidrojen bağı, Dipol-Dipol ve Van der Waals etkileşimleri ile açıklanmaktadır.



Şekil 3. 3. Kompozit FDM'lerde akma davranışlarının incelenmesi

Fonksiyonelize edilmemiş PoliHIPE/MP [a) %50 ağırlık, b) %55 ağırlık ve c) %60 ağırlık] ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP [d) %60 ağırlık, e) %65 ağırlık ve f) %70 ağırlık]

3.2. GMA Bazlı PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Karakterizasyonu

Çıkış maddeleri ve kompozit FDM'lerinin yapısal karakterizasyonu Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi (ATR-FT-IR, Jasco, 4700) kullanılarak $4000-400\text{ cm}^{-1}$ tarama aralığında analiz edildi. Yapısal karakterizasyon için kullanılan diğer yöntem X-Işını Difraktometresi (XRD) analizleridir. FDM olarak belirlenen MP ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP malzemenin XRD analizleri RIGAKU marka SmartLab model XRD cihazı ile $10-60^\circ$ aralığında 2θ 'da gerçekleştirilmiştir.

Üretilen PoliHIPE'nin, kompozit FDM'nin ve hafif beton/kompozit FDM'nin yüzey morfolojileri FEI/Quanta 450FEG SEM cihazı ile altın kaplama yapılarak analiz edildi. PoliHIPE, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP'den (60 ağırlık%) numunelerinin yüzey alanı ve gözenek hacmi Quantachrome/IQ-Chemi cihazı kullanılarak belirlendi. Bu analiz için numuneler ilk olarak 24 saat boyunca 80 °C'lik bir sıcaklıkta gaz gidericiye ve vakuma tabi tutuldu. Numunelerin N₂ adsorpsiyon ve desorpsiyon oranlarını belirlemek için Brunauer-Emmett-Teller (BET) teorisi; Çok Noktalı BET (MBET) ve Yoğunluk Fonksiyonel Teorisi (DFT) yöntemleri kullanılarak elde edilen izotermeler kullanıldı.

Sentezlenen malzemelerin termal enerji depolama kapasiteleri ve erime/donma sıcaklıkları diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC, Perkin Elmer) cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Analizler, N₂ atmosferinde 5 °C/dakika ısıtma/soğutulma hızında gerçekleştirilmiştir. Üretilen polimerik iskelet ve kompozit FDM'nin termal bozunma davranışları, Seteram termogravimetrik analiz cihazı (TGA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Ölçümler, Ar atmosferinde 10 °C/dakika ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir. Saf bileşenlerin ve üretilen kompozit FDM'lerin ısı iletkenlikleri, Decagon (KD2 modeli) marka ısı iletkenlik cihazı kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemelerin termal güvenilirliklerinin belirlenmesi için termal döngü cihazı (3Prime, Techne) ile 10 ila 50 °C sıcaklık aralığında ardışık 1000 ısıtma/soğutma döngüsünün ardından DSC ve FT-IR analizleri tekrar edilmiştir.

3.3. Şekilce Kararlı GMA Bazlı PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Üretimi

Hafif beton numuneleri üretmek için; çimento, perlit ve PoliHIPE/FDM kompozitleri mekanik bir karıştırıcıda 2 dakika karıştırıldı ve ardından su eklendi ve mekanik karıştırıcı ile 3 dakika boyunca karıştırılmaya devam edildi. Test ve analiz için, hazırlanan hafif beton karışımları çeşitli boyutlardaki kalıplara yerleştirildi ve 24 saat kurumaya bırakıldı. Çalışmada, 3 farklı hafif beton numunesi hazırlandı. Bunlardan ilki PoliHIPE/FDM katkısı olmaksızın çimento, perlit ve su ile hazırlandı. İkinci beton; çimento, perlit ve PoliHIPE/FDM kompoziti ile hazırlandı. Üçüncü numune ise, perlit katkısı olmadan,

çimento ve PoliHIPE/FDM kompoziti ile hazırlandı. Çizelge 3.9’da hazırlanan betonların kütle oranları verilmiştir.

Çizelge 3. 9. PoliHIPE/MP@Hafif Beton kompozitlerinin kütlece birleşme oranları

Numune Kodları	Çimento (g)	Perlit (g)	PoliHIPE/FDM (g)	Su (g)
LC-OHP0	900	180	0	634
LC-OHP50	900	90	90	528
LC-OHP100	900	0	180	485

3.4. Şekilce Kararlı GMA Bazlı PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Fiziksel Özellikleri, Basınç Dayanımı ve Termal iletkenliklerinin Belirlenmesi

3 farklı oranda hazırlanan hafif betonların birim hacimce ağırlığı ASTM C 642 standardı esas alınarak 50×50×50 mm prizma numunelerde Arşimet deneyi ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hazırlanan beton numunelerinin kuru ağırlıkları hassas terazide tartılarak tespit edilmiştir. Taşan suyun hacmi ile belirlenen hafif beton hacimleri ile birlikte hafif betonların yoğunlukları aşağıdaki eşitlik ile belirlenmiştir:

$$Beton\ yoğunluğu = \frac{beton\ kütlesi}{hacim} \quad (3.1)$$

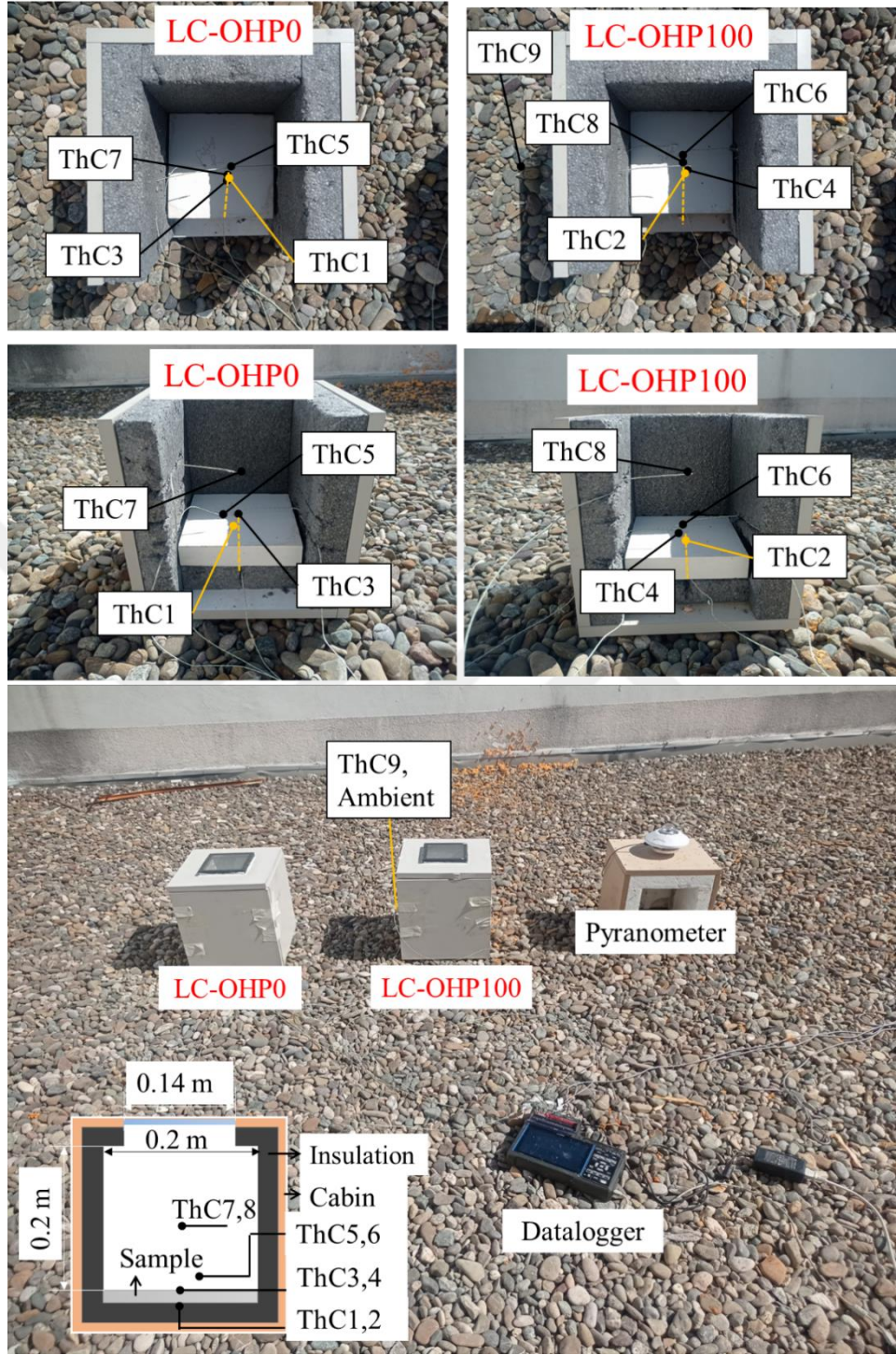
Farklı oranlarda hazırlanan hafif betonların basınç dayanımları 50×50×50 mm prizma numuneleri kullanılarak tespit edilmiştir. ASTM C 349 standardı referansı kullanılarak basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı değerleri aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmıştır:

$$Beton\ numunelerde\ basınç\ dayanımı = \frac{kırılma\ yükü}{deney\ yükü} \quad (3.2)$$

3 farklı oranda hazırlanan hafif betonların ısı iletkenliği 50×50×50 mm ebadında numuneler kullanılarak Tci Thermal Conductivity Analyzer cihazı ile belirlenmiştir. Değiştirilmiş geçici düzlem kaynağı (Modified Transient Plane Source) yöntemine göre ölçüm alınan cihazda ısı iletkenlik katsayısı ASTM D 7984 standardı esas alınarak ölçülmüştür.

3.5. Şekilce Kararlı GMA Bazlı PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Termoregülasyon Ölçümü

Hafif beton numunelerinin hem FDM'li hem de FDM'siz termoregülasyon özellikleri gerçek bir çevresel ortamda incelenmiştir. Deney, güneşli ve bulutlu bir günün olduğu 13.09.2025-14.09.2025 tarihinde, Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Ofis binasının çatısında gerçekleştirilmiştir. Deney için iki özdeş test kabini kullanılmıştır. Bu test kabinlerinin deney düzeneği Şekil 3.4'te gösterilmiştir. 20 cm×20 cm×2 cm boyutlarındaki numuneler test amaçlı olarak test kabinlerinin tabanına yerleştirilmiş ve her kabin içinde dört ayrı bölgede sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler, harcın alt ve üst yüzeylerini, harçtan 0.01 m uzaklıktaki bir mesafeyi ve test odasının hacminin merkezini kapsamıştır. Küresel güneş radyasyonunu ölçmek için Eco MS-410 piranometresi kullanılmıştır. Doğrudan ve dağınık güneş radyasyonları havanın açıklık indeksine göre hesaplanmıştır. Ölçümler 24 saat boyunca sürekli olarak gerçekleştirilmiştir.



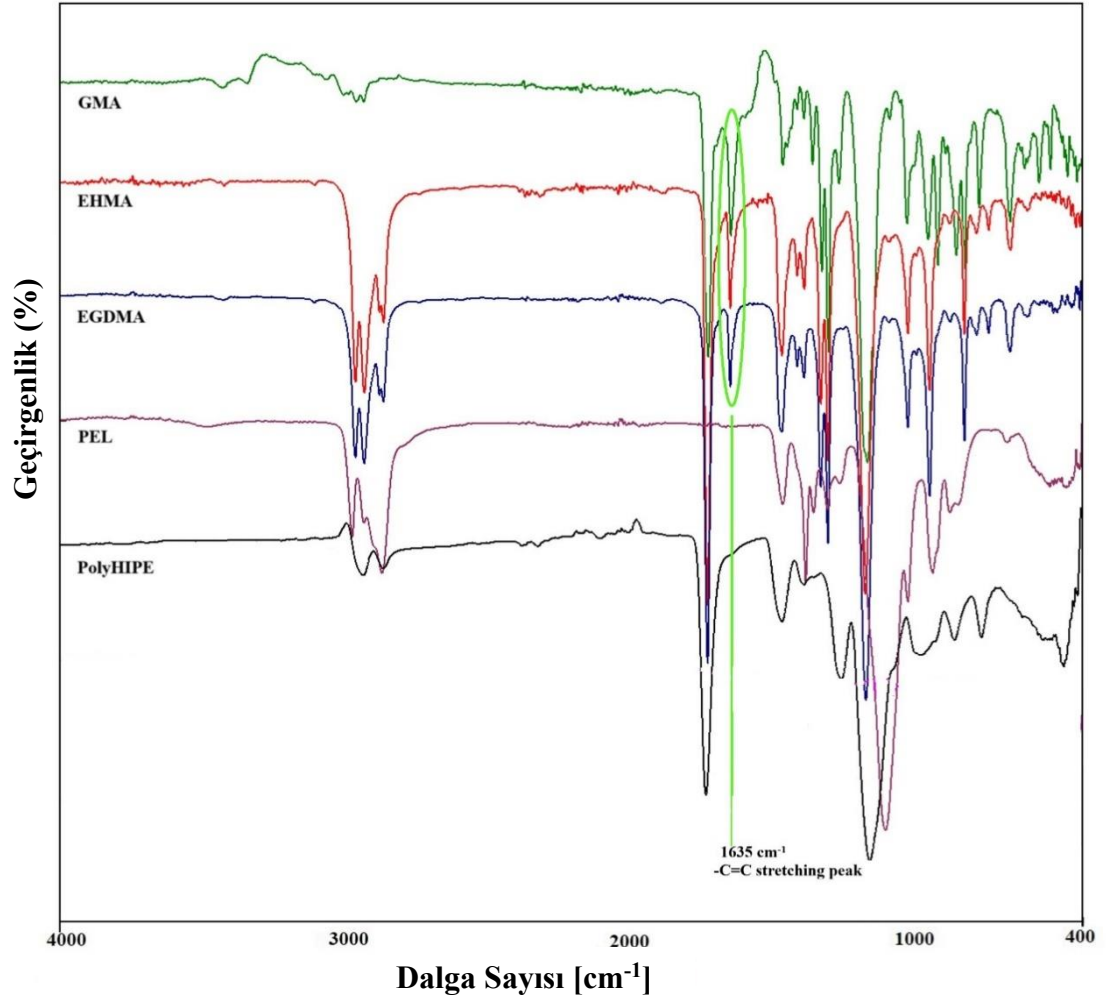
Şekil 3. 4. Termoregülasyon testleri için oluşturulan deneysel kurulum ve termokupl konumları

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

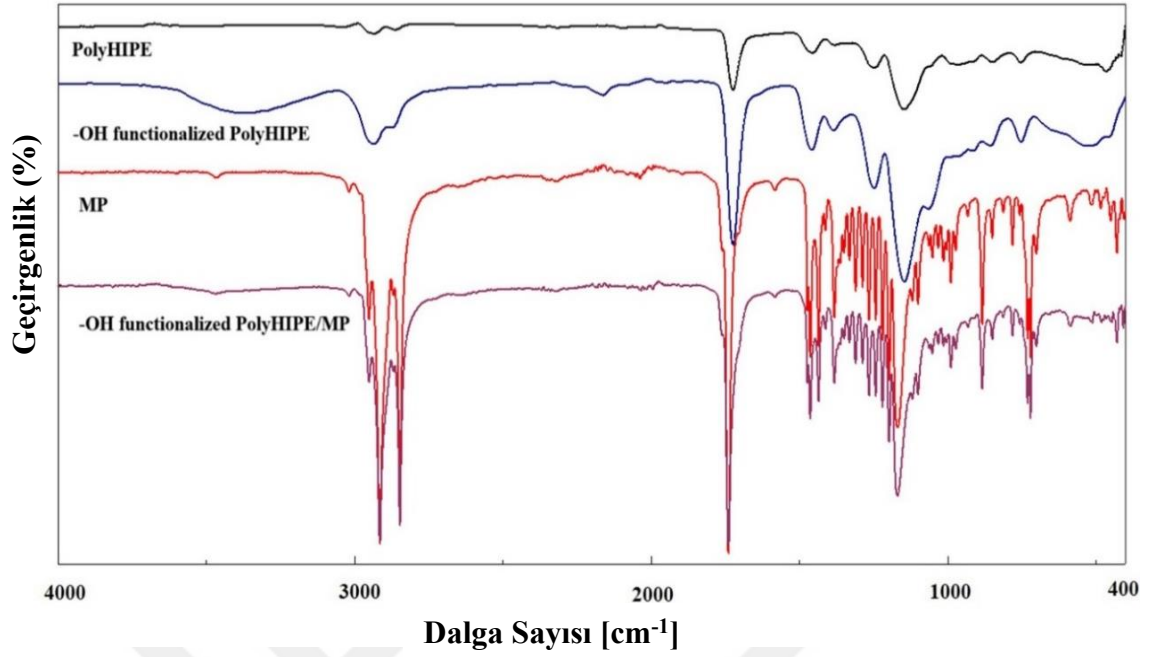
4.1. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Yapısal Karakterizasyonu

Sentezlenen kompozit yapıların yapısal karakterizasyonu FT-IR spektroskopisi analizi ile yapılmıştır. Şekil 4.1’de komonomerler; GMA ve EHMA, çapraz bağlayıcı; EGDMA, yüzey aktif madde PEL121 ve sentezlenen PoliHIPE yapının FT-IR spektrumu verilmiştir. Çizelge 4.1’de ise çıkış maddeleri, PoliHIPE iskeletler ve kompozit FDM’lere ait tüm karakteristik pikler tablo halinde özetlenmiştir.

Şekil 4.1’den de görüleceği üzere, monomer ve çapraz bağlayıcıdaki $-C=C$ çift bağyla ilişkili yaklaşık 1635 cm^{-1} ’deki pik, sentezlenen PoliHIPE yapılarda görülmemiştir. Bu durum, monomerdeki çift bağların açılması ile gerçekleşen sentezin monomer kalıntısı kalmadan başarı ile tamamlandığını göstermektedir. Şekil 4.2’de ise, PoliHIPE, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE, MP ve MP yüklü PoliHIPE kompozitinin FT-IR spektrumlarını göstermektedir. PoliHIPE’nin FT-IR spektrumu, 2938 ve 2867 cm^{-1} ’de alifatik gruplarda $-CH$ gerilme tepeleri, 1725 cm^{-1} ’de $-C=O$ gerilme tepesi (ester karbonil), 1247 cm^{-1} ’de $-C-O-C$ gerilme tepesi (epoksi halkası) ve 1148 cm^{-1} ’de $-C-O-C$ gerilme tepesi (ester grubu) sergilemiştir. Polimerizasyon sonrası yine 1635 cm^{-1} ’de $-C=C$ bağ pikinin bulunmaması, polimer sentezinin monomer kalıntılarından arınmış şekilde sentezlendiğini göstermektedir. Trietanolamin varlığında PoliHIPE yapının fonksiyonelleştirilmesinin ardından, glisidil metakrilat monomerindeki epoksi halkasının açılması sayesinde, -OH grupları içeren fonksiyonel bir PoliHIPE sentezi gerçekleştirilmiştir. $3100-3650\text{ cm}^{-1}$ ’de FT-IR spektrumlarında tespit edilen -OH bandı, bunu gösteren bir diğer kanıttır. PoliHIPE’de tespit edilen $-CH$, $-C=O$ ve $-C-O-C$ ’nin gerilme pikleri, fonksiyonel PoliHIPE yapısında da mevcuttur. Metil palmitatta, $-CH$ gerilme pikleri 2949 , 2914 ve 2845 cm^{-1} ’de, $-C=O$ gerilme piki 1740 cm^{-1} ’de ve $-C-O-C$ gerilme piki ise MP yüklü PoliHIPE kompozit yapısı içerisinde 1165 cm^{-1} ’de gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 1. GMA, EHMA, EGDMA, PEL121 ve PoliHIPE'in FT-IR spektrumları



Şekil 4. 2. PoliHIPE, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE, MP ve MP yüklü PoliHIPE kompozitinin FT-IR spektrumları

Çizelge 4. 1. Çıkış malzemeleri, FDM, PoliHIPE ve MP ve MP yüklü PoliHIPE kompozitinin FT-IR verileri

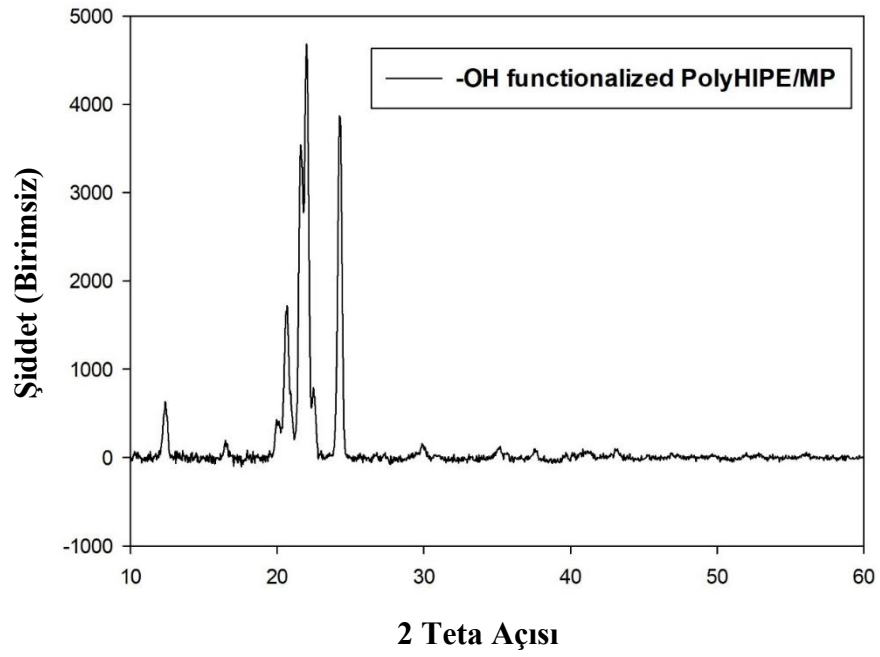
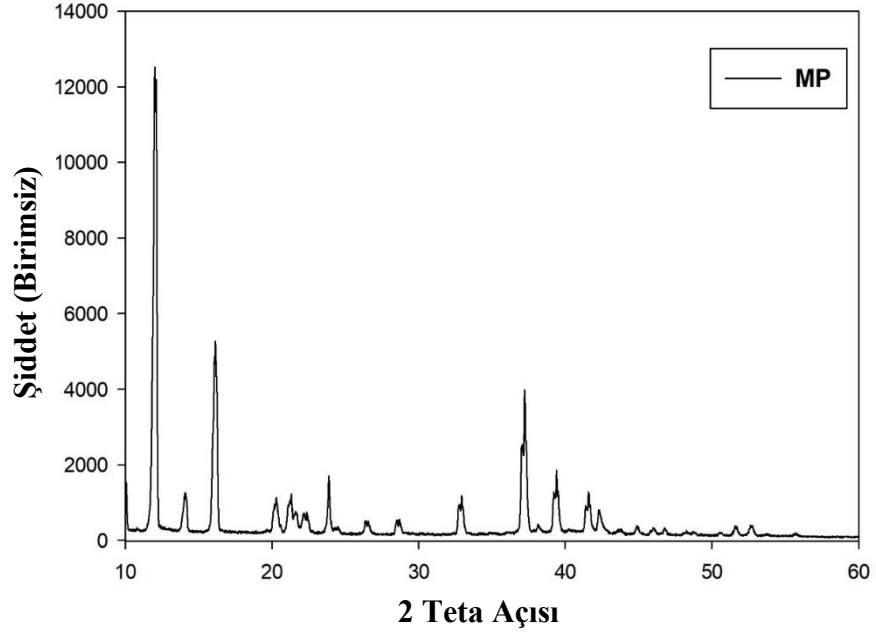
Materyal	Fonksiyonel Gruplar	Karakteristik Absorpsiyon Pikleri (cm ⁻¹)
GMA	-CH alifatik grupların gerilme piki	2999, 2958 ve 2932
	-C=O gerilme piki (ester karbonil)	1717
	-C=C gerilme piki	1635
	-C-O-C gerilme piki (epoksi halka)	1256
	-C-O-C gerilme piki (ester grup)	1165
	Epoksi gruplarının karakteristik titreşimi	907
	(Nanjundan ve ark., 2005)	
EHMA	-CH alifatik grupların gerilme piki	2958, 2926 ve 2861
	-C=O gerilme piki (ester karbonil)	1717
	-C=C gerilme piki	1638
	-C-O-C gerilme piki (ester grup)	1162
EGDMA	-CH alifatik grupların gerilme piki	2959, 2929 ve 2861
	-C=O gerilme piki (ester karbonil)	1717
	-C=C gerilme piki	1638
	-C-O-C gerilme piki (ester grup)	1159

Çizelge 4.1. (Devam) Çıkış malzemeleri, FDM, PoliHIPE ve MP ve MP yüklü PoliHIPE kompozitinin FT-IR verileri

Materyal	Fonksiyonel Gruplar	Karakteristik Absorpsiyon Pik Noktası (cm ⁻¹)
PEL121	-OH gerilme bandı	3483
	-CH alifatik grupların gerilme piki	2969, 2929 ve 2867
	-C-O-C gerilme piki (ester grup)	1092
PoliHIPE	-CH alifatik grupların gerilme piki	2938 ve 2867
	-C=O gerilme piki (ester karbonil)	1725
	-C-O-C gerilme piki (epoksi halka)	1247
	-C-O-C gerilme piki (ester grup)	1148
	Epoksi grupların karakteristik titreşimi	910
MP	-CH alifatik grupların gerilme piki	2950, 2911 ve 2847
	-C=O gerilme piki (ester karbonil)	1738
	-C-O-C gerilme piki (ester grup)	1168
-OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE	-CH alifatik grupların gerilim piki	2958, 2929 ve 2873
	-C=O gerilim piki (ester karbonil)	1723
	-C-O-C gerilim piki (epoksi halka)	1245
	Epoksi grupların karakteristik titreşimi	910

4.2. MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin XRD Analizi

Şekil 4.3'te MP ile birlikte -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP kompozitin XRD eğrileri verilmiştir. MP'nin karakteristik pikleri 11.99°, 16.11° ve 37.20° izlenmiştir. MP'nin -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE yapıya entegre edilmesi ile üretilen kompozit FDM'nin karakteristik pikleri 12.26°, 20.60°, 21.70°, 22.96° ve 24.07° izlenmiştir. -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP yapıya ait pikler, MP'nin pikleri ile kısmen örtüşmektedir.



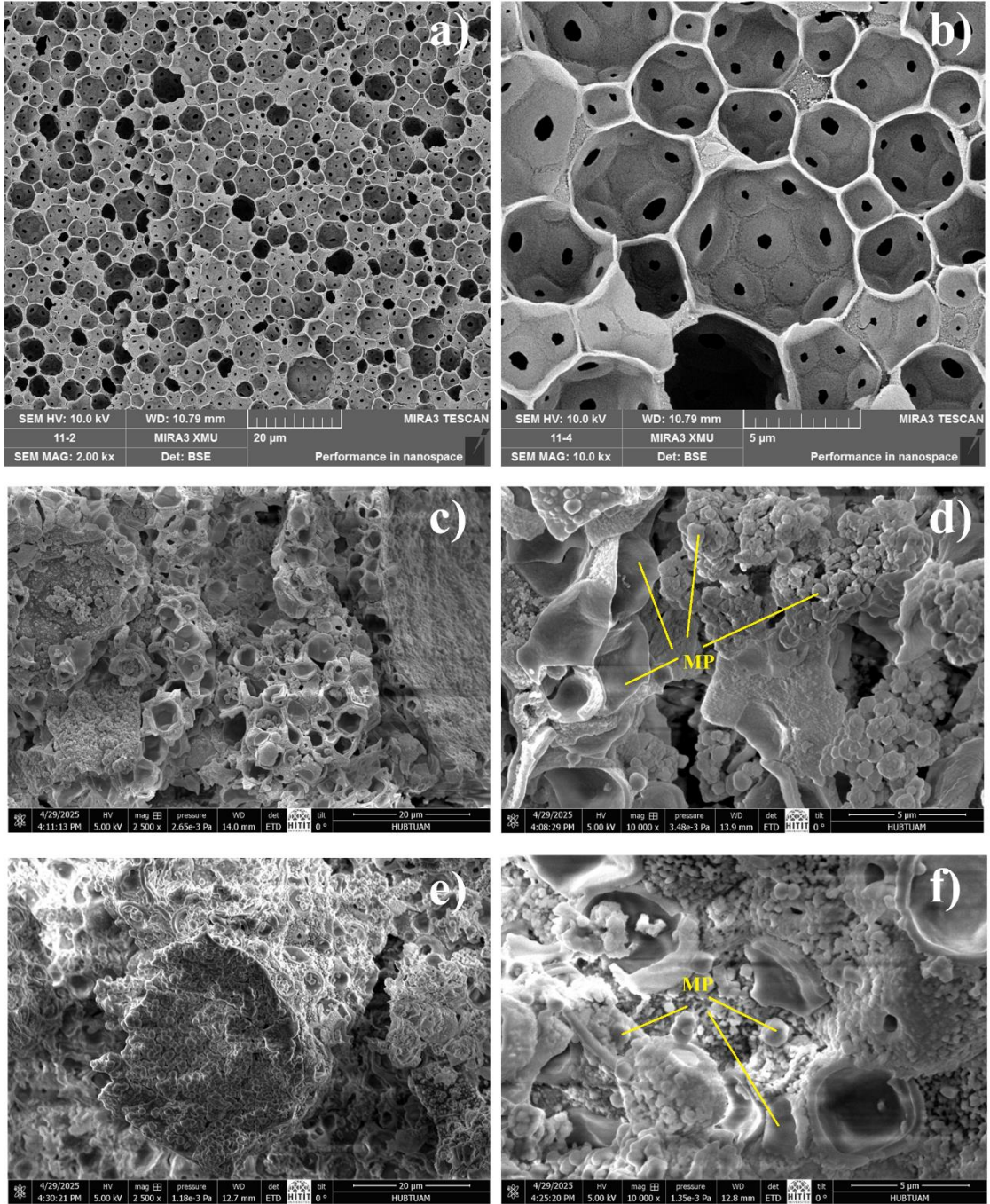
Şekil 4. 3. MP ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP kompozitinin XRD eğrileri

4.3. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Morfolojik Karakterizasyonu

Sentezlenen kompozit yapıların morfolojik karakterizasyonu SEM ve BET analizi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te, FDM emperye etmek üzere sentezlenen PoliHIPE

iskelet, PoliHIPE/MP ve -OH-fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP kompozitlerinin SEM görüntüleri farklı büyütme oranları ile verilmiştir. Şekil 4.4(a ve b)'te SEM görüntüsünden de görüleceği üzere sentezlenen GMA bazlı PoliHIPE iskelet, PoliHIPE yapıya özgü gözenekli, birbirine bağlantılı yüksek yüzey alanlı bir görüntü sergilemektedir. Yapıda birbirinde bağlantılı küçük gözenekler, daha büyük iç bükey boşluklar ile bir araya gelmiştir. Şekil 4.4(c ve d)'te PoliHIPE iskelete MP emperye edildikten sonra farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri sunulmuştur. Kütlece %50 MP emdirilen PoliHIPE iskeletin gözeneklerinin bir kısmı MP ile dolarken, bir kısmı hala boşluklu yapı sergilemeye devam etmiştir. PoliHIPE yapıdaki daha küçük birbirine bağlı mikro gözenekler; FDM'nin sızmasını önleyen yapısal stabilite sağlarken, PoliHIPE iskeletteki geniş içbükey boşluklar; FDM'lerin emdirilmesine olanak tanımıştır. PoliHIPE iskeletlerin mükemmel FDM taşıyıcı olarak kullanılabilmesinin temel sebebi bu morfolojiden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.4(d-e)'de, -OH-fonksiyonelleştirilmiş MP yüklü PoliHIPE kompozitinin 2500 ve 10000 kat büyütme oranlarındaki SEM görüntülerini gösterilmektedir. PoliHIPE iskelet, Şekil 4.4(c ve d) gözlenen mimariye benzer şekilde ancak daha fazla MP hapsedebilmiştir. Bu durumun GMA'daki epoksi halkasının açılarak -OH gruplarına evrilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapıdaki -OH gruplarının artması; PoliHIPE iskelet ile MP arasındaki hidrojen bağı, Dipol-Dipol ve Van der Waals gibi etkileşimleri arttırmıştır. Bu sebeple fonksiyonel hale getirilen iskelet daha fazla FDM emperye edebilmiştir.

SEM analizi BET analizi ile de desteklenmiştir. Kopolimerik köpük yapıların yüzey alanları BET teorisi MBET ve DFT metotlarına göre analiz edildi. PoliHIPE, -OH fonksiyonolize edilmiş PoliHIPE, ve -OH fonksiyonolize edilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%) yapıların BET bulguları Çizelge 4.2'de sunulmaktadır. PoliHIPE yapının glisidil metakrilat halkasının trietanolamin varlığında açılarak ve -OH fonksiyonel hale getirilmesinin sonucunda her iki metotta hesaplanan yüzey alanında ve gözenek hacminde bir miktar artma izlenmiştir. Bu durum akma testinde PoliHIPE yapının maksimum kütlece %50 FDM hapsedebilirken, -OH fonksiyonolize edilmiş PoliHIPE yapının kütlece %60 FDM emmesi ile de doğrulanmıştır. -OH fonksiyonolize edilmiş PoliHIPE yapıya MP emperye edilmesinin sonrasında ise, gözeneklerin bir kısmının MP ile dolmasından dolayı yüzey alanı ve gözenek hacmi beklendiği şekilde azalmıştır.



Şekil 4. 4. PoliHIPE (a,b), MP yüklü PoliHIPE (c,d) ve MP yüklü -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE'in kompozitinin SEM görüntüsü

Çizelge 4. 2. PoliHIPE, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP'nin (60 ağırlık%) BET analizi

Örnekler	MBET yöntemi	DFT yöntemi	
	Yüzey alanı (m ² /g)	Gözenek hacmi (cc/g)	Yüzey alanı (m ² /g)
PoliHIPE	10.375	0.053	6.960
-OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE	11.163	0.046	7.964
-OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%)	6.152	0.015	4.431

4.4. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Termal Karakterizasyonu

Sentezlenen kompozit yapıların enerji depolama özellikleri DSC analizi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te MP, PoliHIPE/MP (50 wt%) ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%)'ın DSC grafikleri, Çizelge 4.3'te ise bu analizden elde edilen datalar sunulmaktadır. Erime ve katılma noktaları, onset sıcaklığı olarak hesaplanmıştır. Çalışmada enerji depolayan birim olarak bina iklimlendirme sistemlerinde kullanılacak 29.27 °C'lik erime sıcaklığı ve 26.01 °C'lik katılma sıcaklığı gösteren MP seçilmiştir. Bu seçimde diğer bir kriter de MP'ın yüksek enerji depolama kapasitesidir. MP, 231.53 J/g erime entalpisi, 216.46 J/g katılma entalpisi sergilemektedir.

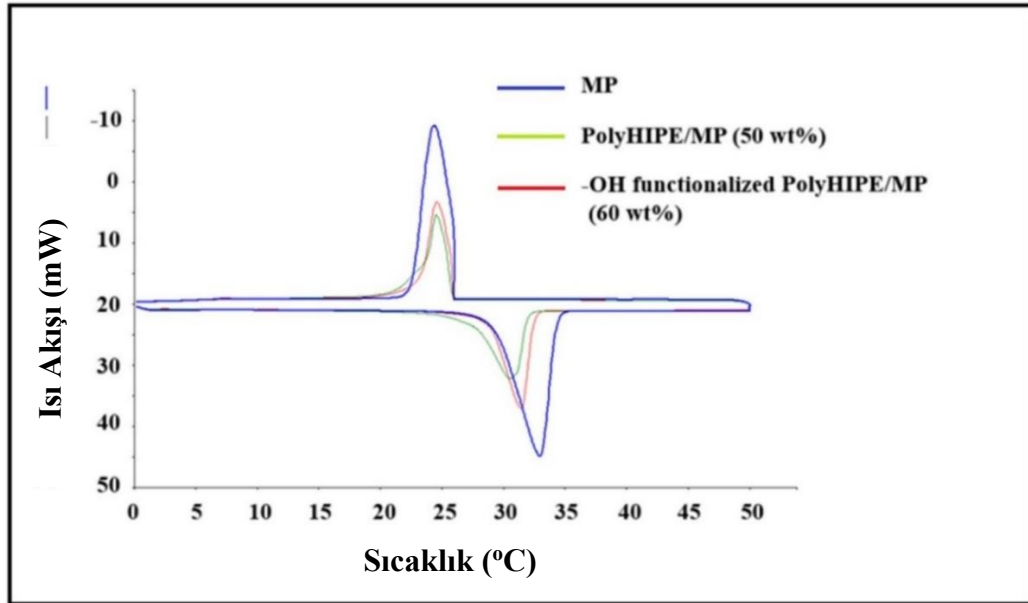
Fonksiyonlaştırılmamış PoliHIPE yapının, akma testinin ardından kütlece %50'ye kadar MP'yi etkili bir şekilde hapsedtiği bulunmuştur. Akma testine göre hazırlanan FDM kompozitin DSC analizine göre; erime ve katılma sıcaklıkları sırasıyla 28.39 °C ve 25.84 °C olarak belirlenirken, erime ve katılma entalpileri sırasıyla 111.64 J/g ve 100.58 J/g olarak okunmuştur. MP emperye edilen -OH-fonksiyonlu PoliHIPE iskeletin ise, akma testinde kütlece %60 MP hapsedebildiği belirlenmişti. Bu orana göre hazırlanan kompozit FDM'in erime ve katılma sıcaklıkları sırasıyla 28.73 °C ve 25.88 °C olarak belirlenirken, erime ve katılma entalpileri sırasıyla 136.43 J/g ve 125.81 J/g olarak ölçülmüştür. Ayrıca akma testine göre belirlenen MP emperye oranı ile DSC analizinde

elde edilen değerler aşağıdaki verilen eşitliğe göre karşılaştırılarak gerçek emperye oranı da belirlenmiştir.

$$\text{Emperye edilen FDM (\%)} = \left[\frac{\Delta H_{\text{kompozit FDM}}}{\Delta H_{\text{MP}}} \right] \times 100 \quad (4.1)$$

eşitlikte, $\Delta H_{\text{kompozit FDM}}$ ve ΔH_{MP} sırasıyla kompozit FDM ve kullanılan FDM'nin erime entalpisini göstermektedir. Emperye edilen FDM eşitliğine göre belirlenen kapsülleme oranı, PoliHIPE/MP kompozitleri için %48.22 ve -OH-fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP kompozitleri için %58.93 olarak bulundu. Teknik ve deneysel değerler arasındaki yakınlık, FDM'nin her iki kompozit yapıda da düzgün ve homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Dahası, PoliHIPE yapısının fonksiyonelleştirilmesi, gözenekli yapı içerisinde hapsedilmiş olan FDM miktarında bir artışa yol açmıştır. Sızıntı testinin ardından DSC sonuçları da FDM'nin PoliHIPE iskelet içerisinde belirlenen yüzdelere göre hapsedilebildiğini doğrulamıştır.

Sonuç olarak, PoliHIPE iskelet yapı MP'ın katı-sıvı faz dönüşümü sırasında sızıntı davranışı olmaksızın hapsolmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca, bu çalışmada geliştirilen kompozit FDM'ler, bina iklimlendirme uygulamaları için yüksek enerji depolama kapasitesi ve uygun çalışma sıcaklıkları sergilemiştir.



Şekil 4. 5. MP, PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP'nin DSC eğrisi (%60 ağırlık)

Çizelge 4. 3. MP ile geliştirilmiş kompozit FDM’lerin TED performansları

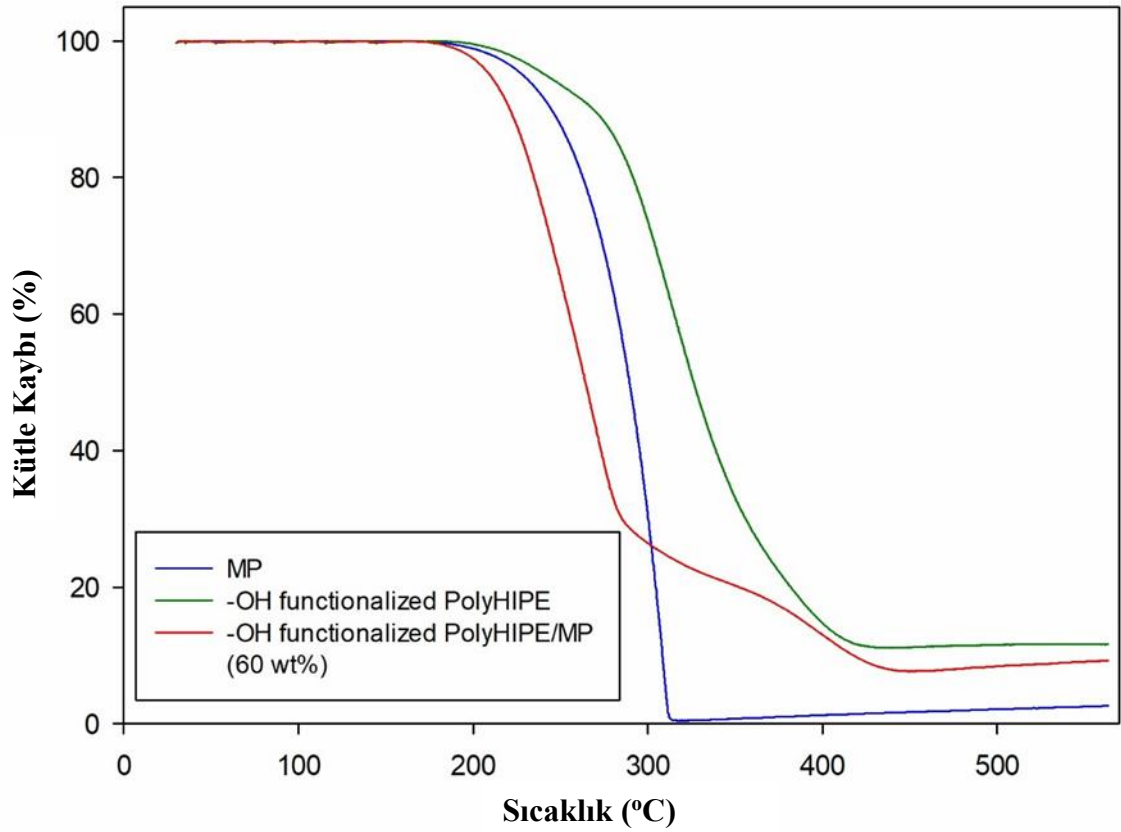
Örnek	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Katılaşma Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Entalpisi (J/g)	Emperye edilen FDM (%)
MP	29.27	231.53	26.01	216.46	-
PoliHIPE/MP (50 wt%)	28.39	111.64	25.84	100.58	48.22
-OH Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%)	28.73	136.43	25.88	125.81	58.93

4.5. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Termal Kararlılığının İncelenmesi

TGA, FDM’lerin termal kararlılık özelliklerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. Termal dayanıklılık özelliği, TED uygulamalarında kullanılan bir kompozit FDM için kritik bir parametredir, çünkü belirtilen çalışma sıcaklığı aralığında kompozit FDM bütünlüğünü korumalıdır.

MP, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (ağırlıkça %60) kompozitlerinin TGA eğrileri Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Elde edilen termogramlara göre, FDM ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE iskeletinin termal bozunma davranışı tek bir basamakta gerçekleşmiştir. MP’ın bozunma davranışı 189.27 °C’de başlamış ve 314.94 °C’de sona ermiş ve bu aşamada FDM neredeyse tamamen bozunmuştur. -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE iskeletinin termal bozunma sıcaklığı, FDM’ninkini aşarak 198.07 °C’de başlamıştır. Bu aşamada, kütlenin %88.86’sı bozunmaya uğramıştır. MP ve -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE yapı benzer bozunma davranışı sergilerken, PoliHIPE iskelet FDM’ye kıyasla daha yüksek sıcaklığa termal dayanıklılık göstermiştir. Kütlece %60 oranında MP emdirilerek hazırlanan -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE FDM kompoziti, iki basamaklı bir bozunma davranışı sergilemiştir. İlk bozunma basamağı 182.20 °C’de başlayıp 280.66 °C’de sona ermiş ve

bu aralıkta malzemenin kütleye yaklaşık %67.76'sı ayrılmıştır. Ayrılan bu kütlenin kompozit yapı içine emperye edilen FDM olduğu düşünülmektedir. İkinci bozunma davranışı 280.66 °C'de başlayıp 443.17 °C'de sona ermiştir. İkinci basamakta, kalan PoliHIPE yapısının bozunmaya uğradığı düşünülmektedir. İkinci basamakta malzemenin kütleye %24.71'i bozunmuş ve analiz edilen sıcaklıkta malzemenin bir kısmı bozunmadan kalmıştır. Elde edilen verilere göre, PoliHIPE iskeletine MP eklenmesinin iskeletin termal kararlılığının olumsuz bir etki göstermediği sonucuna ulaşılmıştır. Üretilen kompozit FDM'ler TED sistemleri için yüksek sıcaklıklara kadar termal dayanım göstermiştir.



Şekil 4. 6. MP, -OH fonksiyonlu PoliHIPE ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP'nin (60 ağırlık%) TGA eğrisi

4.6. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Isıl iletkenliğinin İncelenmesi

FDM kompozitlerin TED sistemlerinde kullanılabilirliğinin belirlenmesi için gerekli parametrelerden biri de uygun ısı iletkenlik değerine sahip olmasıdır. Sentezlenen kompozit FDM'lerin ısı iletkenlikleri, FDM ve FDM olmaksızın oluşturulan PoliHIPE yapıların ısı iletkenlikleri ile karşılaştırılarak Çizelge 4.4'te verilmiştir. Çalışmada üretilen PoliHIPE çerçeveler FDM taşıyıcıları olarak mükemmel performans gösterirken, bu yapıların ısı iletkenlikleri son derece düşüktür. GMA bazlı PoliHIPE iskeletin ısı iletkenlik değeri 0.03 W/mK olarak belirlenmiştir. FDM olarak kullanılan MP'nin ısı iletkenliği 0.12 W/mK olup, bu değer PoliHIPE yapısının ısı iletkenliğinden nispeten daha yüksektir. Fonksiyonelleştirilmemiş PoliHIPE yapıya kütlece %50 oranında MP emperye edilmesinden sonra ısı iletkenlik değeri, PoliHIPE yapıya oranla daha yüksek, MP'a oranla daha düşük olarak 0.05 W/mK olarak bulunmuştur. PoliHIPE yapının fonksiyonolize edilmesinden sonra kütlece %60 oranında MP içeren FDM kompozit yapının ısı iletkenliği 0.08 W/mK'e yükselmiştir. -OH Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%)'in ısı iletkenliği PoliHIPE yapıya kıyasla %166.67 oranında artarken, MP'a göre %33.34 azalmıştır. Nispeten düşük iletkenliğe sahip kompozit FDM'lerin ısı iletkenlikleri gelecekteki çalışmalarda farklı ısı iletkenlik ajanlarının polimerizasyon ortamına eklenmesi ile önlenabilir.

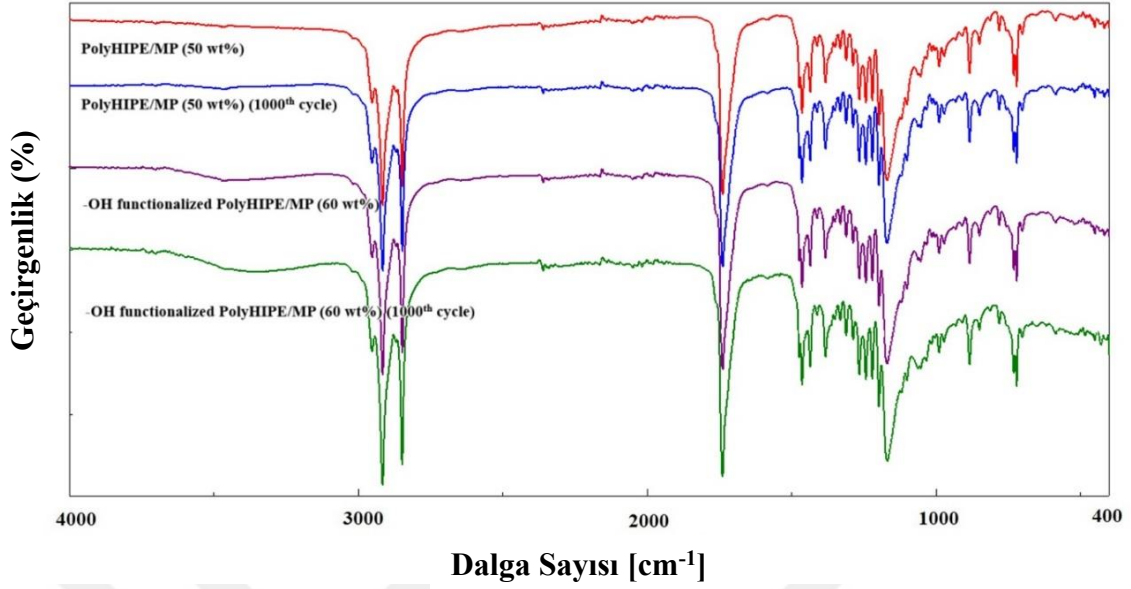
Çizelge 4. 4. MP, sentezlenmiş PoliHIPE, PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (%60 ağırlık) kompozitlerinin ısı iletkenlik verileri

Örnekler	Isıl iletkenlik (W/mK)
PoliHIPE	0.03
MP	0.12
PoliHIPE/MP (50 wt%)	0.05
-OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (60 wt%)	0.08

4.7. PoliHIPE/MP ve -OH-Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP Kompozitlerinin Termal Güvenirliliğinin İncelenmesi

Sentezlenen kompozit malzemelerin termal ve yapısal kararlılığı, 1000 ardışık ısıtma ve soğutma döngüsünden sonra, yani 0. ve 1000. döngülerde ve FT-IR spektrumları ve DSC termogramlarının karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Kompozit FDM'lerin yapısal kararlılığı, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi, PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (%60 ağırlık) kompozitlerinin başlangıçta ve 1000 ısı döngüsünden sonra FT-IR spektrumlarının karşılaştırılmasıyla değerlendirildi. Isıl döngü öncesi ve sonrası elde edilen spektrumların dalga sayılarında veya karakteristik pik görüntülerinde herhangi bir değişiklik izlenmedi veya yeni bir pik oluşumu görülmedi. FT-IR analizi üretilen Kompozit FDM'lerin 1000 ısıl döngü sonrasında yapısal olarak kararlı olduğunu kanıtlamıştır.

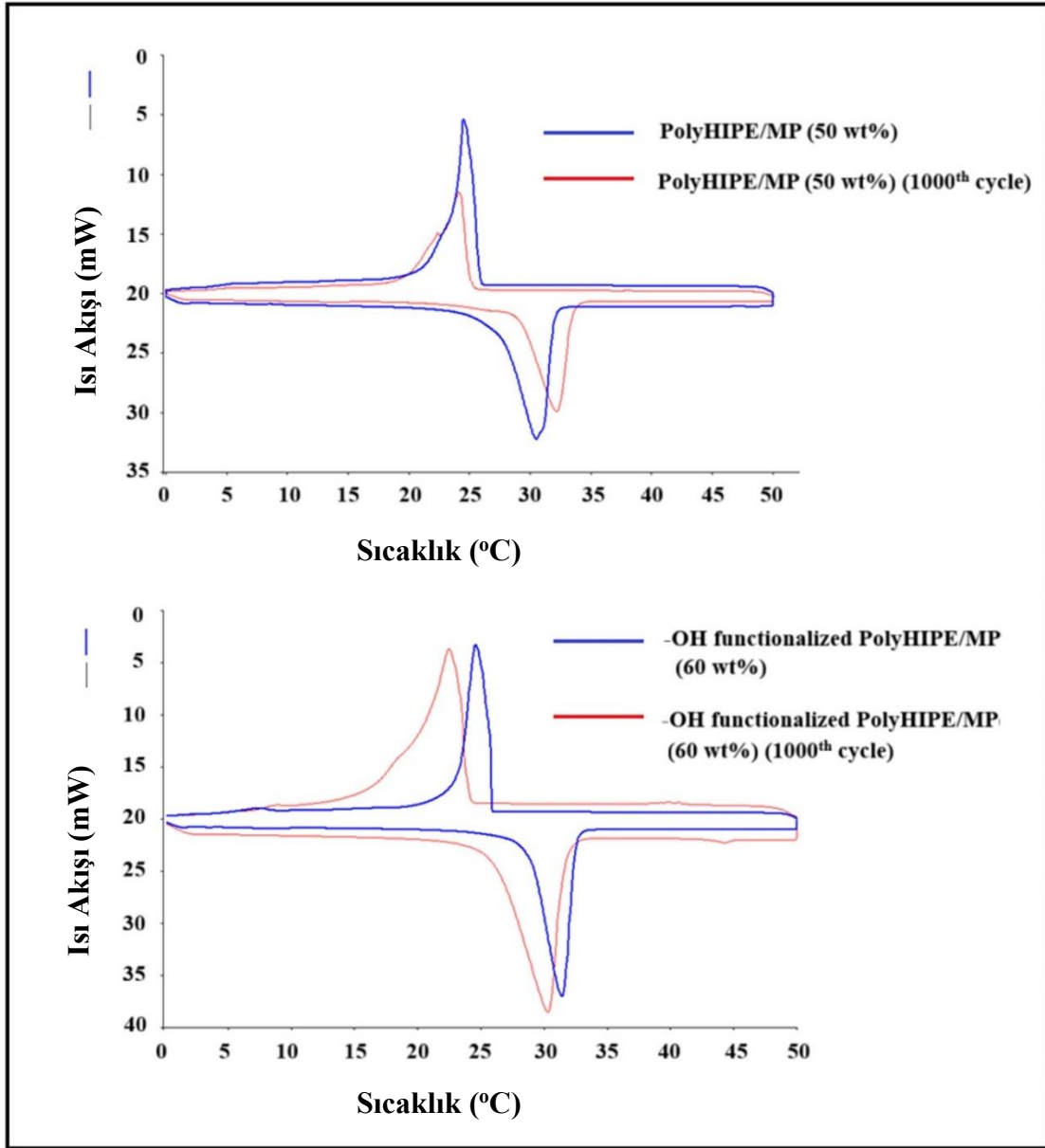
Şekil 4.8'de ise, PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (%60 ağırlık) kompozit FDM'lerin 0. ve 1000. ısı döngülerinde alınan DSC termogramlarını, Çizelge 4.5'te ise DSC analizinden elde edilen datalar verilmiştir. 1000 termal döngüden sonra PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (%60 ağırlık) FDM kompozitlerinin erime katılaşma sıcaklıklarında önemli bir değişiklik kaydedilmezken, erime katılaşma entalpilerinde sırasıyla 111.64 J/g'dan 97.41 J/g'a; 136.43 J/g'dan 120.72 J/g'a bir düşüş görülmüştür. Gözlemlenen azalma, gözenekler içinde kalmayan veya ısıtma ve katılaşma fazı boyunca yüzeye adsorbe olmayan FDM'lerin buharlaşmasına bağlanabilir. 1000 termal çevrimden sonra gözlemlenen entalpideki azalmaya rağmen malzemelerin sahip olduğu erime katılaşma entalpi değerleri, bu malzemelerin TED sistemleri için halen bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 7. PoliHIPE/MP (50 wt%) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP'nin (60 wt%) 1000. döngüden sonra FT-IR eğrilerinin değişimi.

Çizelge 4. 5. PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (%60 ağırlık) kompozit FDM'lerin 1000 termal döngüden önce ve sonra termal özellikleri

Örnek	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Katılaşma Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Entalpisi (J/g)	Emperye edilen FDM (%)
PoliHIPE/MP (50 wt%)	28.39	111.64	25.84	100.58	48.22
PoliHIPE/MP (50 wt%) (1000 th döngü)	28.87	97.41	25.00	85.01	42.07
-OH Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%)	28.73	136.43	25.88	125.81	58.93
-OH Fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE/MP (60 wt%) (1000 th döngü)	26.95	120.72	24.97	117.99	52.14



Şekil 4. 8. 1000 termal döngüden sonra PoliHIPE/MP (%50 ağırlık) ve -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP'nin (%60 ağırlık) DSC termogramı

4.8. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Yığın Yoğunluğu

Hazırlanan üç farklı bileşimdeki beton numunelerin yığın yoğunluğu Arşimet deneyi ile belirlenmiştir sonuçlar Çizelge 4.6’da özetlenmiştir. PoliHIPE/FDM olmaksızın hazırlanan çimento ve perlit içeren LC-OHP0 kodlu numune en yüksek 1.426 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir. Çimento, perlit ve FDM içeren PoliHIPE’den hazırlanan LC-OHP50 kodlu numunenin yoğunluğu 1.345 g/cm^3 iken perlit olmaksızın hazırlanan çimento ve FDM emperye edilmiş PoliHIPE ile hazırlanan LC-OHP100 kodlu numunenin yoğunluğu 1.297 g/cm^3 olarak bulunmuştur. Beton numunelerinde PoliHIPE/FDM kompoziti eklendikçe yığın yoğunlukta sistematik bir azalma izlenmiştir. Beton harcına, perlitin hiç eklenmediği üçüncü numunede en düşük beton yoğunluğu görülmüştür. Yığın yoğunluğundaki bu azalma, MP’in faz geçişleri sırasında beton yapısında boşluklar oluşturması ile harcın genel kütlesinde ve yoğunluğunda bir azalmaya neden olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4. 6. Beton numunelerinin yığın yoğunluk değerleri

Numune Kodları	Yığın Beton Yoğunluğu (g/cm^3)
LC-OHP0	1.426
LC-OHP50	1.345
LC-OHP100	1.297

4.9. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Basınç Dayanımı

Üç farklı bileşimde hazırlanan beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanım testi sonuçları Çizelge 4.7’de verilmektedir. PoliHIPE/FDM olmaksızın hazırlanan çimento ve perlit içeren LC-OHP0 kodlu numune en yüksek 29.2 MPa, çimento, perlit ve PoliHIPE/FDM içeren LC-OHP50 kodlu beton 26.3 MPa, perlit olmaksızın hazırlanan çimento ve FDM emperye edilmiş PoliHIPE ile hazırlanan LC-OHP100 kodlu beton 20.8 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Perlit agrega kütlesinin %50 PoliHIPE/FDM ile yer değiştirilmesi ile basınç dayanımı %9.93 oranında azalmıştır. Perlit agregasının tamamı yerine PoliHIPE/FDM kompoziti konulması ile bu azalma %28.76’a ulaşmıştır. PoliHIPE/FDM, perlit agregadan daha gözenekli bir yapıya sahip olduğundan basınç

altında önemli dayanım kayıpları izlenmiştir. Perlit, hafif betonun iskeletini oluşturduğundan perlitin varlığı mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple perlit yerine gözenekliliği yüksek PoliHIPE yapı harca eklendiğinde basınç dayanımı önemli ölçüde azalmaktadır. PoliHIPE yapı hafif beton içindeki gözenekliliği arttırdığından mekanik özellikler olumsuz etkilenmiştir. Literatürde de beton içesine farklı FDM kompozitleri eklendiğinde mekanik özelliklerde bir miktar kötüleşme izlenmiştir (Cunha ve ark., 2020; Gencel ve ark., 2021b; Gencel ve ark., 2022; Hekimoğlu ve ark., 2021).

Çizelge 4. 7. Beton numunelerinin basınç dayanım değerleri

Numune Kodları	Basınç Dayanımı
	(MPa)
LC-OHP0	29.2
LC-OHP50	26.3
LC-OHP100	20.8

4.10. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Termal iletkenlikleri

Çizelge 4.8’de hazırlanan beton örneklerinin ısı iletkenlik katsayıları gösterilmektedir. Beton örneklerin ısı iletkenlik değerleri 0.6684 ile 0.5896 W/mK arasında değişmektedir. Yüksek gözenekli -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (60 wt%) ısı iletkenlik beton harcına katılmadan önce de belirlenmiş 0.08 W/mK olarak bulunmuştu. PoliHIPE/FDM kompoziti eklenmeksizin hazırlanan çimento ve perlit içeren beton örneğinin ısı iletkenlik değeri 0.6684 W/mK olarak bulunmuştur. Perlit agrega kütlelerinin %50 PoliHIPE/FDM ile yer değiştirilmesi ile ısı iletkenlik değeri %6.97 azalmıştır. Perlit agregasının tamamı yerine PoliHIPE/FDM kompoziti konulması ile bu azalma %11.78’e ulaşmıştır. Beton numunelerdeki ısı iletkenliğinin azalmasının sebebi yine yapı içinde bulunan hava gözenekleridir. Yapı içerisindeki gözeneklilik arttıkça ısı iletkenlikte düşme devam etmiştir. PoliHIPE/FDM kompozitin beton harcına eklenmesi ile elde edilen beton numunesinin ısı iletkenlik değeri, çimento-perlit beton harcı ile mukayese edildiğinde düşük olsa da -OH fonksiyonlu PoliHIPE/MP (60 wt%) numunesinin ısı iletkenlik değerine kıyasla oldukça yüksektir. Beton harcına FDM kompozitleri eklenmesi ile elde

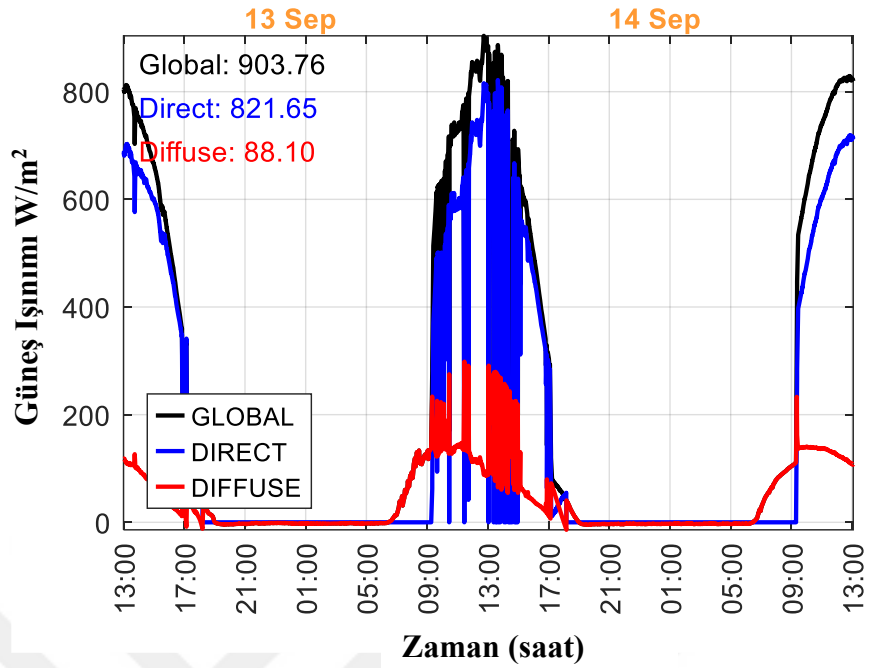
edilen yapı malzemelerinde de ısı iletkenliği azaldığı literatürde de karşımıza çıkmaktadır (Demirboğa, 2007; Ferraro ve Nanni, 2012; Praveenkumar ve ark., 2022).

Çizelge 4. 8. Beton numunelerinin ısı iletkenlik değeri

Numune Kodları	Isı İletkenlik (W/mK)
LC-OHP0	0.6684
LC-OHP50	0.6218
LC-OHP100	0.5896

4.11. PoliHIPE/MP@Hafif Beton Kompozitlerinin Termoregölasyon Ölçümleri

Şekil 4.9’da, 13.09.2025-14.09.2025 tarihlerinde saat 13:00 de güneşli ve bulutlu bir günde Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Faköltesi Ofis binasının çatısında 24 saat süre gerçekleştirilen yatay yüzeylerdeki küresel, doğrudan ve dağınık güneş radyasyonu gösterilmiştir. Çoğunlukla bulutlu günde gerçekleştirilen analizde güneş radyasyonunda saat 09:00 ve 17:00 arasında dalgalanmalar izlenmiştir. Maksimum küresel güneş radyasyonu 903.76 W/m² ile saat 13:00’de gözlenmiştir. Doğrudan ve dağınık radyasyonlar sırası ile maksimum 821.65, 88.10 W/m² olarak saat 13:30 sonrasında görölmüştür.



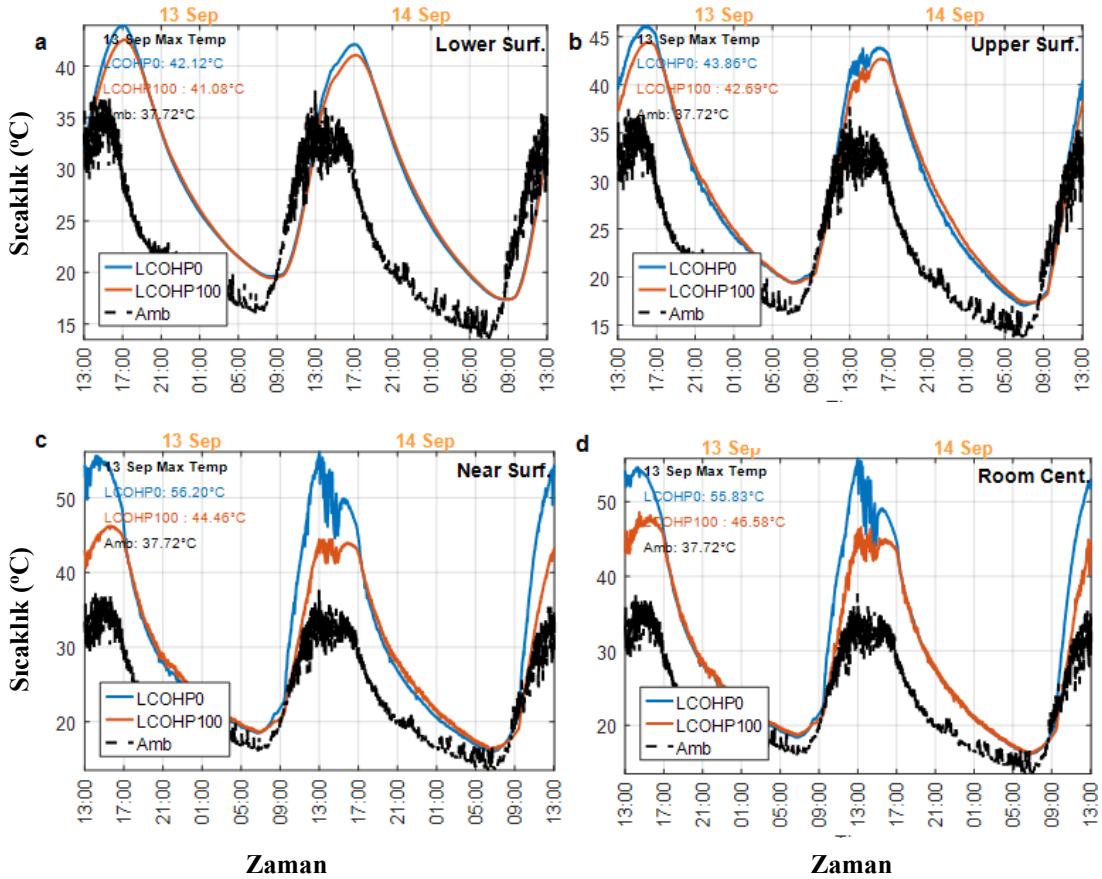
Şekil 4. 9. Deney sırasında yatay yüzeylerdeki küresel, doğrudan ve dağınık güneş radyasyonu güneş ışıınımı

Şekil 4.10'da, referans numunesinin (LC-OHP0) ve FDM içeren test numunesinin (LC-OHP100) alt yüzey (a), üst yüzey (b), yüzeye yakın bölge (c) ve oda merkezi (d) sıcaklıklarının zamana bağlı değişimini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, FDM eklenen yapı elemanının ısı davranışı üzerinde belirgin bir termal stabilite oluşturduğunu göstermektedir.

Gün içerisindeki güneş yüksekliğinin arttığı ısınma aşamalarında tüm ölçüm noktalarında LC-OHP100 numunesinin sıcaklıkları, LC-OHP0 numunesine kıyasla daha düşük maksimum değerlere ulaşmıştır. Bu fark özellikle yüzeye yakın bölgede ve oda merkezinde daha belirgin olup, sıcaklık artışının iç hacme iletimini önemli ölçüde geciktirmiştir. Örneğin, 13 Eylül tarihinde LC-OHP0 numunesinin yüzeye yakın bölgedeki tepe sıcaklığı 56.20°C iken, FDM içeren LC-OHP100 numunesinde bu değer 44.46°C'ye düşmektedir. Benzer şekilde oda merkezi sıcaklığı LC-OHP0'da 55.83°C'ye ulaşırken, LC-OHP100 numunesi 46.58°C seviyesinde kalmıştır. Bu durum FDM'nin yüksek enerji depolama kapasitesi sayesinde gündüz saatlerinde gelen ısıнын bir kısmını absorbe ederek iç ortam sıcaklık artışını sınırladığını göstermektedir.

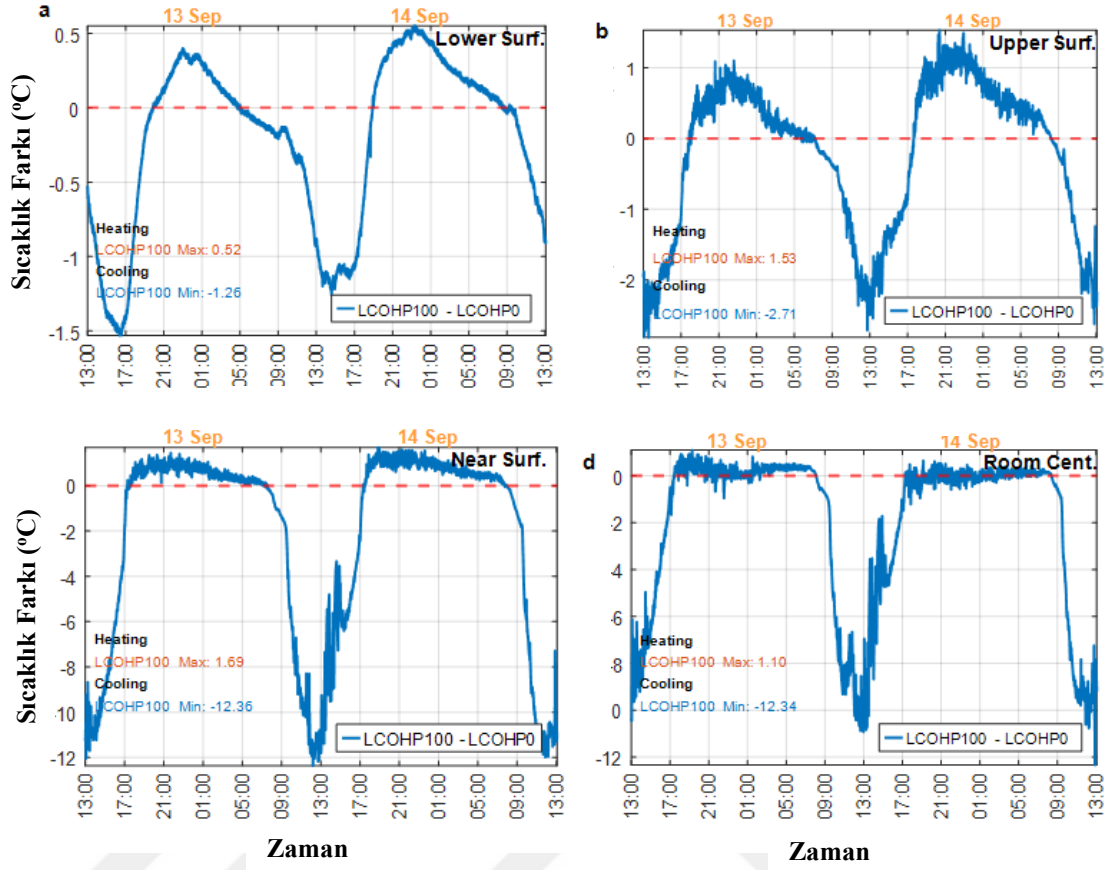
Gece saatlerinde ise FDM'in depoladığı ısıyı serbest bırakmaya başlamasıyla LC-OHP100 sıcaklıklarının LC-OHP0'a göre görece daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu özellik, hızlı ısı kayıplarını engelleyerek yapı elemanının soğuma hızını azaltmakta ve iç ortam sıcaklığında daha dengeli bir davranış sağlamaktadır.

Genel olarak Şekil 4.10'da FDM katkısının hem gündüz aşırı ısınmayı azaltarak tepe sıcaklıklarını düşürdüğünü, hem de gece soğumasını geciktirerek ısı konfor süresini uzattığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, LC-OHP100 numunesinin pasif ısı yönetim açısından referans numuneye göre daha üstün bir performans sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4. 10. Referans (LC-OHP0) ve test numunelerinin (LC-OHP100) alt (a), üst (b), yüzeye yakın (c) ve oda merkezi (d) sıcaklıkları

Şekil 4.11’de, FDM içeren LC-OHP100 numunesi ile referans LC-OHP0 numunesi arasındaki sıcaklık farkını dört farklı ölçüm noktası için göstermektedir. Gündüz saatlerinde tüm ölçüm noktalarında sıcaklık farkının negatif değerlere düşmesi, LC-OHP100 numunesinin ısı yük altında daha düşük sıcaklıklara ulaştığını ve FDM’nin erime süreci boyunca gelen ısıyı absorbe ederek sıcaklık artışını geciktirdiğini göstermektedir. Bu etki özellikle yüzeye yakın bölgede çok belirgin olup sıcaklık farkı -12.36°C seviyesine kadar düşmüştür. Benzer şekilde oda merkezinde de LC-OHP100 referansa kıyasla -12.34°C daha düşük sıcaklıklara ulaşmış ve bu durum FDM’in iç hacme iletilen ısıyı bastırmada son derece etkili olduğunu ortaya koymuştur. Gece saatlerinde ise eğrilerin pozitif değerlere yükselmesi FDM’nin depoladığı ısıyı kademeli olarak geri saldıgını göstermektedir. LC-OHP100 numunesi referansa göre daha sıcak iç ortam sıcaklığı sağlamıştır. Alt ve üst yüzeylerde bu fark sırasıyla 0.52°C ve 1.53°C olurken, yüzeye yakın bölgede 1.69°C ve oda merkezinde 1.10°C olarak kaydedilmiştir. Bu durum, FDM’nin dış ortam soğukken sıcaklık düşüşünü yavaşlatarak iç ortamın daha uzun süre görece sıcak kalmasına katkı sağlamıştır. Genel olarak sıcaklık farkı eğrileri, FDM katkısının çift yönlü etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Gündüz aşırı ısınmayı önemli ölçüde azaltırken, gece de ısı kayıplarını sınırlayarak ısı konfor süresini uzatmıştır. Özellikle yüzeye yakın bölge ve oda merkezindeki büyük farklar, FDM’in iç mekâna iletilen ısıyı daha stabil hale getirdiğini göstermektedir.



Şekil 4. 11. Kontrol (LC-OHP0) ve test örneği (LC-OHP100) arasındaki alt (a), üst (b), yüzeye yakın (c) ve oda merkezi (d) sıcaklık farkları

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında FDM emme kapasitesi yapısındaki fonksiyonel gruplar ile arttırılmış PoliHIPE yapıların sentezlenmesi, bu malzemelerin ısı enerji depolama malzemesi olarak üretilmesi ve üretilen PoliHIPE/FDM kompozit yapıların hafif beton harcına ilave edilmesi ile ısı enerji depo edebilen akıllı beton numunelerin üretilmesi ve karakterize edilmesi çalışmalarını içermektedir.

Çalışmaya ilk olarak, PoliHIPE yapıların sentezlenmesi, yapısal ve morfolojik karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesi ile başlanmıştır. GMA bazlı, EHMA komonomeri ve EGDMA çapraz bağlayıcısı varlığında yüksek iç fazlı emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile üretilen yüksek gözenekli PoliHIPE yapının yapısal karakterizasyonu FT-IR ve XRD spektrofotometresi ile incelenmiştir. Üretilen yapının FDM afinitesinin arttırılması için trietanolamin varlığında -OH grupları yapısında bulunduran PoliHIPE iskelet üretilmiştir. Yapıdaki -OH gruplarının varlığı FT-IR spektrofotometre analizi ile kanıtlanmıştır. Fonksiyonolize edilmemiş PoliHIPE iskelet yapı kütlece %50 MP emperye edebilirken, yapının -OH fonksiyonel hale getirilmesi ile FDM emperye oranı sızıntı davranışı olmaksızın %10 arttırılmıştır.

Sentezlenen PoliHIPE iskelet hem FDM emdirilmeden hem de FDM emdirildikten sonra morfolojik olarak SEM ve BET analizleri ile incelenmiştir. GMA bazlı PoliHIPE iskeletin SEM analizi, gözenekli, birbirine bağlantılı yüksek yüzey alanlı bir yapı üretildiğini doğrulamıştır. Yapıdaki daha büyük iç bükey boşluklar, iskeletin FDM taşıyabilmesine olanak sağlarken; birbirinde bağlantılı küçük gözenekler ise yapının FDM'yi sızıntı davranışı olmaksızın hapsedebilmesini sağlamamıştır. SEM görüntüleri BET analizi sonuçları ile de desteklenmiştir. PoliHIPE yapının glisidil metakrilat halkasının trietanolamin varlığında açılarak ve -OH fonksiyonel hale getirilmesinin sonucunda yüzey alanında ve gözenek hacminde bir miktar artma izlenmiştir. Yüzey alanı ve gözenek hacminin artması ile PoliHIPE iskelet daha fazla FDM hapsedebilmiştir. Akma testi sonuçları da -OH fonksiyonel hale getirilen yapının daha fazla FDM hapsedebildiğini göstermektedir. Gözeneklerin FDM ile doldurulmasının ardından kompozit yapıların gözenek hacmi ve yüzey alanı da beklendiği şekilde düşmüştür.

Üretilen ısı 11 enerji depolayan malzemelerin termal karakterizasyonu DSC ve TGA analizleri ile irdelenmiştir. Sızıntı davranışı olmaksızın kompozit FDM'ler 28 °C civarında 11.64 J/g ile 136.43 J/g enerji depo edebilmişlerdir. -OH fonksiyonolize edilmiş yapının daha fazla FDM hapsedebilmesi sebebiyle daha iyi enerji depolayabildiği görülmüştür. Ayrıca DSC analizi ile birlikte gerçek FDM emperye oranları da hesaplanmıştır. Gerçek emperye oranları ile akma testi ile belirlenen emperye oranları arasında çok az fark izlenmiştir. TGA sonuçları, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE iskeletin tek basamaklı bir bozunma davranışı sergilediğini, -OH fonksiyonelleştirilmiş PoliHIPE FDM kompozitinin ise iki basamaklı bozunma davranışı sergilediğini göstermiştir. Hem PoliHIPE iskelet hem de PoliHIPE/FDM kompozit yapı yaklaşık 180 °C'ye kadar yüksek termal dayanım göstermiştir.

FDM malzemelerinin TED sistemlerinde kullanımı için önemli bir parametre olan ısı iletkenlik değerleri de çalışma kapsamında irdelenmiştir. PoliHIPE malzemelerin ultra gözenekleri yapılarındaki hava boşlukları sebebiyle en önemli handikaplarından biri olan ısı iletkenlik problemi bu boşlukların FDM ile doldurulması ile önemli derecede iyileştirilmiştir. İleri çalışma planlarında ısı iletkenliğin daha da artırılması için PoliHIPE yapıların farklı ısı iletkenlik ajanları katkılı olduğu kompozit yapılarının oluşturulması planlanabilir. Üretilen kompozit FDM'ler 1000 termal döngü sonrasında yapısal ve ısı olarak tekrar irdelenerek termal stabilitesi de araştırılmıştır. Ardışık 1000 termal döngü sonrasında kompozit FDM'lerin yapısında ve enerji depolama özelliklerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.

Çalışmanın son kısmında ise, hazırlanan kütlece %60 MP içeren fonksiyonel hale getirilmiş PoliHIPE kompozit malzeme beton harcına ilave edilmiştir. Çalışmada beton olarak perlit agregası içeren hafif beton numunesi hazırlanmıştır. 3 farklı bileşimde hafif beton hazırlanmıştır. Bunlarda ilki PoliHIPE/FDM kompoziti olmaksızın çimento ve perlit ile, ikincisi çimento ile birlikte perlitin kütlesinin %50'sinin PoliHIPE/FDM kompoziti ile değiştirilmesi ile, üçüncüsü ise perlit yerine PoliHIPE/FDM kompoziti kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numuneleri yoğunluk, basınç dayanımı ve ısı iletkenlikleri irdelenerek test edilmiştir. Beton harcında, perlit agregasının azalması ya da perlitin hiç eklenmemesi durumunda hazırlanan örneklerin yoğunluk, basınç

dayanımı ve ısı iletkenliğinde sistematik olarak bir azalma izlenmiştir. Bu durum yapının PoliHIPE ilavesi ile daha gözenekli hale gelmesinden kaynaklanmaktadır.

PoliHIPE/FDM kompozitlerin beton harcına eklenmesi sonrasında termoregülasyon testleri gerçekleştirilerek kompozit FDM'lerin bina yapım elamanlarına sağladığı termal konfor analiz edilmiştir. Termoregülasyon testleri, çimento harcına PoliHIPE/FDM kompozitlerin ilave edilerek hazırlanan beton numunelerin referans numuneye kıyasla, gündüz saatlerinde ısınmayı ortalama 12.35 °C azalttığını göstermiştir. Bu durum FDM'in yüksek enerji depolama kapasitesi sayesinde gündüz saatlerinde gelen ısıнын bir kısmını absorbe ederek iç ortam sıcaklık artışını sınırladığını göstermektedir. Gece gerçekleştirilen termoregülasyon testlerinde ise, çimento harcına PoliHIPE/FDM kompozitlerin ilave edilerek hazırlanan beton numunelerin referans numuneye kıyasla, soğumayı ortalama 1.21 °C azalttığını göstermiştir. Gece saatlerindeki bu azalma, FDM'in depoladığı ısıyı kademeli olarak geri saldığını göstermektedir. Bu durum, FDM'in dış ortam soğukken sıcaklık düşüşünü yavaşlatarak iç ortamın daha uzun süre görece sıcak kalmasına katkı sağlamıştır. Gündüz ve gece gerçekleştirilen termoregülasyon testleri beton numunelerine eklenen kompozit FDM katkısının çift yönlü etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Gündüz aşırı ısınmayı önemli ölçüde azaltırken, gece de ısı kayıplarını sınırlayarak ısı konfor süresini uzatmıştır. Özellikle yüzeye yakın bölge ve oda merkezindeki büyük farklar, FDM'in iç mekâna iletilen ısıyı daha stabil hale getirdiğini kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada fonksiyonel hale getirilerek FDM emperye etme kapasitesi artırılmış PoliHIPE iskelete üretilmiştir. Dahası MP ilk kez bu çalışma ile PoliHIPE iskelet içerisine hapsedilerek kompozit FDM oluşturulmuştur. Ayrıca, PoliHIPE/FDM kompozitleri ilk defa bu çalışma ile bir yapı malzemesine eklenmiştir. Bu sayede bina iklimlendirme sistemlerinde kullanılabilecek akıllı inşaat malzemesi üretilmiştir. Çalışma bu yönü ile oldukça özgündür.

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar düşünüldüğünde ileriki araştırmalarda aşağıdaki önerilerin gerçekleştirilmesi düşünülebilir:

- Çalışmada üretilen PoliHIPE iskelet içerisinde farklı erime-katılma sıcaklığına ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip farklı FDM'ler hapsedilebilir. Böylece farklı sıcaklık uygulamaları için yeni bir şekilde kararlı FDM kompoziti üretilmiş olunur.
- Çalışmada üretilen PoliHIPE iskelet FDM afinitesinin artırılması için farklı fonksiyonel gruplar ile modifiye edilebilir. Bu sayede, daha fazla FDM emperye edilmiş PoliHIPE/FDM kompozitleri üretilebilir.
- Üretilen PoliHIPE/FDM kompozit yapının alçı, çimento, köpük beton gibi farklı yapı elamanlarındaki termal performansı incelenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N. L., & Siddique, S. (2021). A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction. *Construction Materials*, 1(1), 39–62.
- Ahmadi, R., Monadinia, F., & Maleki, M. (2021). Passive/active photovoltaic-thermal (PVT) system implementing infiltrated phase change material (PCM) in PS-CNT foam. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 222, 110942.
- Ajithkumar, A., & GaneshKumar, P. (2025). A systematic framework for the optimum selection of organic PCM in sustainable solar drying process: A multi-criteria decision-making methodology. *Journal of Energy Storage*, 116, 116080.
- Alashker, Y., Al-Naghi, A. A. A., Ahmed, B., Salmi, A., Ahmad, Z., Ghazouani, N., & Kubica, J. (2025). Phase change material-infused lightweight expanded shale aggregates for high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 499, 144080.
- Aldemir Dikici, B., Malayeri, A., Sherborne, C., Dikici, S., Paterson, T., Dew, L., ... Claeysens, F. (2021). Thiolene- and polycaprolactone methacrylate-based polymerized high internal phase emulsion (PolyHIPE) scaffolds for tissue engineering. *Biomacromolecules*, 23(3), 720–730.
- Anand, A., Mansor, M., Sharma, K., Shukla, A., Sharma, A., Siddiqui, M. I. H., ... Twala, B. (2025). A comprehensive review on eutectic phase change materials: Development, thermophysical properties, thermal stability, reliability, and applications. *Alexandria Engineering Journal*, 112, 254–280.
- ASTM International. (2018). *ASTM C349-18: Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure)*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM C642-21: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM D7984-21: Standard test method for measurement of thermal effusivity of fabrics using a modified transient plane source (MTPS) instrument*. ASTM International.
- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 8(3), 902–907.
- Banawair, A. S., Qaid, G. M., Adil, Z. M., & Nasir, N. A. M. (2019). The strength of lightweight aggregate in concrete – A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1), 012017.
- Behera, D., Liu, K. Y., Rachman, F., & Worku, A. M. (2025). Innovations and applications in lightweight concrete: Review of current practices and future directions. *Buildings*, 15(12), 2113.
- Bhumgara, Z. (1995). PolyHIPE foam materials as filtration media. *Filtration & Separation*, 32(3), 245–251.
- Bidiyasar, R., Kumar, R., & Jakhar, N. (2024). A critical review of polymer support-based shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage applications. *Energy Storage*, 6(4), e639.
- Cao, F., Li, Z., Zhang, Y., Wang, X., Zhu, L., Zhang, S., & Tang, B. (2024). Silica-based aerogels encapsulate organic/inorganic composite phase change materials for building thermal management. *Journal of Energy Storage*, 97, 112858.

- Che, J., Çagin, T., & Goddard, W. A. (2000). Thermal conductivity of carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 11(2), 65–69.
- Corti, M., Calleri, E., Perteghella, S., Ferrara, A., Tamma, R., Milanese, C., ... Tripodo, G. (2019). Polyacrylate/polyacrylate-PEG biomaterials obtained by high internal phase emulsions (HIPEs) with tailorable drug release and effective mechanical and biological properties. *Materials Science and Engineering: C*, 105, 110060.
- Cunha, S., Silva, M., & Aguiar, J. (2020). Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 230, 117011.
- Dai, X., Ping, P., Kong, D., Luo, X., Wang, G., Ren, J., & Gao, W. (2025). Experimental investigation on flexible inorganic phase change material for thermal management performance improvement of lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 272, 126358.
- De Gracia, A., & Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414–419.
- Demirboğa, R. (2007). Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2467–2471.
- Deshmukh, A. B., Nalawade, A. C., Karbhal, I., Qureshi, M. S., & Shelke, M. V. (2018). Electrochemical capacitive energy storage in PolyHIPE derived nitrogen enriched hierarchical porous carbon nanosheets. *Carbon*, 128, 287–295.
- Dincer, I., & Dost, S. (1996). A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications. *International Journal of Energy Research*, 20, 547–557.
- Döğüşcü, D. K., Hekimoğlu, G., & Sarı, A. (2021). High internal phase emulsion templated-polystyrene/carbon nano fiber/hexadecanol composites phase change materials for thermal management applications. *Journal of Energy Storage*, 39, 102674.
- Ebrahimi, M., Maleki, M., Ahmadi, R., Karimian, H., & Shokrieh, A. (2024). In-situ synthesis of nanoporous nickel/carbon composite foam to encapsulate the phase change materials for energy management. *Journal of Energy Storage*, 102, 113915.
- El Majd, A., Sair, S., Ousaleh, H. A., Bouhaj, Y., Belouaggadia, N., Younsi, Z., & El Bouari, A. (2024). Advancing tent thermoregulation: Integrating shape-stabilized PCM into fabric design. *Journal of Energy Storage*, 95, 112681.
- Feldman, D., Banu, D., Hawes, D., & Ghanbari, E. (1991). Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Solar Energy Materials*, 22(2–3), 231–242.
- Feng, W., Jiang, Y., Tang, J., Chen, Y., Zhang, T., Yu, D., & Wang, W. (2024). Durable and highly signal-stable pressure sensors prepared by sequential thiol-acrylate click reactions. *Chemical Engineering Journal*, 493, 152749.
- Ferraro, R. M., & Nanni, A. (2012). Effect of off-white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete. *Construction and Building Materials*, 31, 220–225.
- Fleming, E., Wen, S., Shi, L., & Da Silva, A. K. (2015). Experimental and theoretical analysis of an aluminum foam enhanced phase change thermal storage unit. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 273–281.
- Galazutdinova, Y., Ushak, S., Farid, M., Al-Hallaj, S., & Grágeda, M. (2021). Development of the inorganic composite phase change materials for passive

- thermal management of Li-ion batteries: Application. *Journal of Power Sources*, 491, 229624.
- Ge, H., Li, H., Mei, S., & Liu, J. (2013). Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 331–346.
- Gencel, O., Hekimoglu, G., Sari, A., Ustaoglu, A., Subasi, S., Marasli, M., ... Memon, S. A. (2022a). Glass fiber reinforced gypsum composites with microencapsulated PCM as novel building thermal energy storage material. *Construction and Building Materials*, 340, 127788.
- Gencel, O., Hekimoğlu, G., Sari, A., Sutcu, M., Er, Y., & Ustaoglu, A. (2021a). A novel energy-effective and carbon-emission reducing mortar with bottom ash and phase change material: Physico-mechanical and thermal energy storage characteristics. *Journal of Energy Storage*, 44, 103325.
- Gencel, O., Sari, A., Kaplan, G., Ustaoglu, A., Hekimoğlu, G., Bayraktar, O. Y., & Ozbakkaloglu, T. (2022b). Properties of eco-friendly foam concrete containing PCM impregnated rice husk ash for thermal management of buildings. *Journal of Building Engineering*, 58, 104961.
- Gencel, O., Sari, A., Ustaoglu, A., Hekimoglu, G., Erdogan, E., Yaras, A., ... Cay, V. V. (2021b). Eco-friendly building materials containing micronized expanded vermiculite and phase change material for solar-based thermo-regulation applications. *Construction and Building Materials*, 308, 125062.
- Gencel, O., Ustaoglu, A., Benli, A., Hekimoğlu, G., Sari, A., Erdogan, E., ... Yavuz Bayraktar, O. (2022). Investigation of physico-mechanical, thermal properties and solar thermoregulation performance of shape-stable attapulgite-based composite phase change material in foam concrete. *Solar Energy*, 236, 51–62.
- Ghasemi, K., Tasnim, S., & Mahmud, S. (2022). PCM, nano/microencapsulation and slurries: A review of fundamentals, categories, fabrication, numerical models and applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102084.
- Guo, X. (2024). Study on inorganic PCMs modification utilized in building environment for energy conservation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 4925–4938.
- Hekimoğlu, G., Nas, M., Ouikhalfan, M., Sari, A., Kurbetci, Ş., Tyagi, V. V., ... Saleh, T. A. (2021). Thermal management performance and mechanical properties of a novel cementitious composite containing fly ash/lauric acid–myristic acid as form-stable phase change material. *Construction and Building Materials*, 274, 122105.
- Hemmat Esfe, M., Saedodin, S., Akbari, M., Karimipour, A., Afrand, M., Wongwises, S., ... Dahari, M. (2015). Experimental investigation and development of new correlations for thermal conductivity of CuO/EG–water nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 65, 47–51.
- Huang, X., Chen, X., Li, A., Atinafu, D., Gao, H., Dong, W., & Wang, G. (2019a). Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications. *Chemical Engineering Journal*, 356, 641–661.
- Huang, X., Chen, X., Li, A., Atinafu, D., Gao, H., Dong, W., & Wang, G. (2019b, January 15). Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications. *Chemical Engineering Journal*. Elsevier B.V.
- Ji, H., Sellan, D. P., Pettes, M. T., Kong, X., Ji, J., Shi, L., & Ruoff, R. S. (2014). Enhanced thermal conductivity of phase change materials with ultrathin-graphite

- foams for thermal energy storage. *Energy and Environmental Science*, 7(3), 1185–1192.
- Jia, Z., Cunha, S., & Aguiar, J. (2024). Study on phase change materials integration in concrete: Form-stable PCM and direct addition. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 1293–1302.
- Kahraman Döğüşcü, D., Hekimoğlu, G., & Sarı, A. (2022). CuO nanoparticle@polystyrene hierarchical porous foam for the effective encapsulation of octadecanol as a phase changing thermal energy storage material. *Energy and Fuels*, 36(6), 3293–3303.
- Kahraman Döğüşcü, D. (2025). Encapsulation of N-eicosane in ZnO-modified glycidyl methacrylate-based high internal phase emulsion polymers for enhanced thermal conductivity and energy storage efficiency. *Thermal Science and Engineering Progress*, 68, 104202.
- Kahraman Döğüşcü, D., Sarı, A., & Hekimoğlu, G. (2024a). Effects of graphene doping on shape stabilization, thermal energy storage and thermal conductivity properties of PolyHIPE/PEG composites. *Journal of Energy Storage*, 76, 109804.
- Kahraman Döğüşcü, D., Sarı, A., & Hekimoğlu, G. (2024b). Effects of graphene doping on shape stabilization, thermal energy storage and thermal conductivity properties of PolyHIPE/PEG composites. *Journal of Energy Storage*, 76, 109804.
- Khare, S., Dell'Amico, M., Knight, C., & McGarry, S. (2013). Selection of materials for high temperature sensible energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 115, 114–122.
- Khatod, K. J., Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (2022). An evaluation for the optimal sensible heat storage material for maximizing solar still productivity: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104622.
- Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., & McEuen, P. L. (2001). Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Physical Review Letters*, 87(21), 215502.
- Konuklu, Y., & Ersoy, O. (2016). Preparation and characterization of sepiolite-based phase change material nanocomposites for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 107, 575–582.
- Krishnan, B. P., Suresh, S., Seeni Thangaraj Pandian, R., & Praveenkumar, S. (2025). Integration of novel eutectic solid–solid PCM and aerogel into cement mortar tiles for thermal energy storage: Preparation and experimental evaluation. *Journal of Energy Storage*, 132, 117856.
- Li, B., Nie, S., Hao, Y., Liu, T., Zhu, J., & Yan, S. (2015). Stearic-acid/carbon-nanotube composites with tailored shape-stabilized phase transitions and light-heat conversion for thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 98, 314–321.
- Li, B., Chen, Q., Dong, G., & Yin, D. (2022). Close-cellular shape-stable phase change material monolith prepared by high internal phase Pickering emulsion polymerization. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 163.
- Li, C., Fu, L., Ouyang, J., & Yang, H. (2013). Enhanced performance and interfacial investigation of mineral-based composite phase change materials for thermal energy storage. *Scientific Reports*, 3(1), 1–8.
- Li, J., Yuan, Y., Chen, H., Jia, L., Zhang, N., He, S., ... Li, J. (2024). Highly stable and nonflammable hydrated salt nanocapsules with inorganic–organic composite shell for sustainable building technology. *Journal of Energy Storage*, 79, 110173.

- Li, M., Guo, Q., & Nutt, S. (2017). Carbon nanotube/paraffin/montmorillonite composite phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy*, 146, 1–7.
- Li, X., Sanjayan, J. G., & Wilson, J. L. (2014). Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites. *Energy and Buildings*, 76, 284–294.
- Li, Y., Li, J., Feng, W., Wang, X., & Nian, H. (2017). Design and preparation of the phase change materials paraffin/porous Al_2O_3 @graphite foams with enhanced heat storage capacity and thermal conductivity. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(9), 7594–7603.
- Ling, Z., Li, S., Cai, C., Lin, S., Fang, X., & Zhang, Z. (2021). Battery thermal management based on multiscale encapsulated inorganic phase change material of high stability. *Applied Thermal Engineering*, 193, 117002.
- Liu, L., Lu, G., Qiu, G., Yue, C., Guo, M., Ji, R., & Zhang, M. (2019). Characterization of novel shape-stabilized phase change material mortar: Portland cement containing $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ and fly ash for energy-efficient building. *International Journal of Energy Research*, 43(11), 5812–5823.
- Liu, L., Su, D., Tang, Y., & Fang, G. (2016, September 1). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd.
- Lu, J., Zhang, T., Xu, Z., & Zhao, Y. (2021). Octadecane–cellulose nanofiber flexible composites for latent heat storage. *Chemical Engineering Journal*, 425, 131432.
- Luo, R., Wang, S., Wang, T., Zhu, C., Nomura, T., & Akiyama, T. (2015). Fabrication of paraffin@ SiO_2 shape-stabilized composite phase change material via chemical precipitation method for building energy conservation. *Energy and Buildings*, 108, 373–380.
- Lv, P., Liu, C., & Rao, Z. (2017, February 1). Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: Preparation, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd.
- Lyu, W., Li, X., Wang, B., & Shi, W. (2019). Energy saving potential of fresh air pre-handling system using shallow geothermal energy. *Energy and Buildings*, 185, 39–48.
- Magendran, S. S., Khan, F. S. A., Mubarak, N. M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., ... Karri, R. R. (2019). Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 20, 100399.
- Mahadik, D. B., Lee, K. Y., Ghorpade, R. V., & Park, H. H. (2018). Superhydrophobic and compressible silica–polyHIPE covalently bonded porous networks via emulsion templating for oil spill cleanup and recovery. *Scientific Reports*, 8(1), 1–9.
- Maleki, M., Ahmadi, P. T., Mohamdi, H., Karimian, H., Ahmadi, R., & Emrooz, H. B. M. (2019a). Photo-thermal conversion structure by infiltration of paraffin in three-dimensionally interconnected porous polystyrene–carbon nanotubes (PS–CNT) polyHIPE foam. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, 266–274.
- Maleki, M., Karimian, H., Chun, J., Shokouhimehr, M., & Beitollahi, A. (2021). Non-graphitizable resin coating on polyacrylonitrile-based polyHIPE to prepare high surface area graphitic carbon foam and the investigation of its electrochemical performance as an anode of lithium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 873, 159771.

- Maleki, M., Karimian, H., Shokouhimehr, M., Ahmadi, R., Valanezhad, A., & Beitollahi, A. (2019). Development of graphitic domains in carbon foams for high efficient electro/photo-to-thermal energy conversion phase change composites. *Chemical Engineering Journal*, 362, 469–481.
- Mariano, A., Pastoriza-Gallego, M. J., Lugo, L., Mussari, L., & Piñeiro, M. M. (2015). Co₃O₄ ethylene glycol-based nanofluids: Thermal conductivity, viscosity and high pressure density. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 54–60.
- McKenzie, T. J., & Ayres, N. (2023). Synthesis and applications of elastomeric polymerized high internal phase emulsions (PolyHIPEs). *ACS Omega*, 8(23), 20178–20195.
- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2007). Phase change materials and their basic properties. In *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption* (pp. 257–277).
- Memon, S. A. (2014). Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 870–906.
- Menner, A., Ikem, V., Salgueiro, M., Shaffer, M. S. P., & Bismarck, A. (2007). High internal phase emulsion templates solely stabilised by functionalised titania nanoparticles. *Chemical Communications*, (41), 4274–4276.
- Mert, H. H. (2020). PolyHIPE composite based-form stable phase change material for thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6583–6594.
- Mert, H. H., Eslek, A., Mert, E. H., & Mert, M. S. (2022a). Preparation and characterization of shape-stable bio-based composite phase change materials for thermal energy storage: Coconut oil / activated carbon from cherry stones doped composites. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(2), 5381–5397.
- Mert, H. H., Eslek, A., Mert, M. S., & Mert, E. H. (2022b). Preparation of Pickering-polyHIPEs from surface modified pumice stabilized high internal phase emulsions as supporting materials for lauric acid impregnation. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(14), 51892.
- Mert, H. H., Kekevi, B., Mert, E. H., & Mert, M. S. (2022). Development of composite phase change materials based on n-tetradecane and β -myrcene based foams for cold thermal energy storage applications. *Thermochimica Acta*, 707, 179116.
- Mert, H. H., Okay, H., & Mert, M. S. (2022). Form-stable n-hexadecane/zinc borate composite phase change material for thermal energy storage applications in buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101836.
- Mert, H. H., Simsek, E. B., Balta, Z., & Mert, M. S. (2023). Hexagonal boron nitride-loaded macroporous foams as frameworks for development of n-eicosane-based composite phase-change materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(13), 5943–5956.
- Mert, M. S., Mert, E. H., Pulko, I., Krajnc, P., & Mert, H. H. (2024). Form-stable oleic acid based polyHIPE/nanoclay framework supported composite phase change materials for low-temperature latent heat storage. *Thermal Science and Engineering Progress*, 50, 102569.
- Mo, K. H., Ling, T. C., Alengaram, U. J., Yap, S. P., & Yuen, C. W. (2017). Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 139, 403–418.
- Moglia, R., Whitely, M., Brooks, M., Robinson, J., Pishko, M., & Cosgriff-Hernandez, E. (2014). Solvent-free fabrication of polyHIPE microspheres for controlled

- release of growth factors. *Macromolecular Rapid Communications*, 35(14), 1301–1305.
- Mostafizur, R. M., Bhuiyan, M. H. U., Saidur, R., & Abdul Aziz, A. R. (2014). Thermal conductivity variation for methanol based nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 76, 350–356.
- Mostofinejad, D., Abdoli, M., Saljoughian, A., Karimi, A., & Eftekhari, M. (2025a). Innovative energy-efficient lightweight concrete with improved thermal and mechanical properties using PCM-impregnated LECA aggregates. *Construction and Building Materials*, 482, 141588.
- Mostofinejad, D., Abdoli, M., Saljoughian, A., Karimi, A., & Eftekhari, M. (2025b). Microencapsulated phase-change materials for sustainable thermal and mechanical optimization of lightweight concrete. *Journal of Building Engineering*, 111, 113379.
- Mostofinejad, D., Abdoli, M., Saljoughian, A., Karimi, A., & Eftekhari, M. (2025c). Sustainable PCM-integrated lightweight concrete with improved mechanical and thermal performance: A comparative study of impregnation and microencapsulation. *Construction and Building Materials*, 498, 143957.
- Motahar, S., Nikkam, N., Alemrajabi, A. A., Khodabandeh, R., Toprak, M. S., & Muhammed, M. (2014). A novel phase change material containing mesoporous silica nanoparticles for thermal storage: A study on thermal conductivity and viscosity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 56, 114–120.
- Naikwadi, A. T., Samui, A. B., & Mahanwar, P. (2021). Experimental investigation of nano/microencapsulated phase change material emulsion based building wall paint for solar thermal energy storage. *Journal of Polymer Research*, 28(11).
- Nanjundan, S., Unnithan, C. S., Selvamalar, C. S. J., & Penlidis, A. (2005). Homopolymer of 4-benzoylphenyl methacrylate and its copolymers with glycidyl methacrylate: Synthesis, characterization, monomer reactivity ratios and application as adhesives. *Reactive and Functional Polymers*, 62(1), 11–24.
- Nartowska, E., Styś-Maniara, M., & Kozłowski, T. (2023). The potential environmental and social influence of the inorganic salt hydrates used as a phase change material for thermal energy storage in solar installations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1331.
- Okulu, D., Selimefendigil, F., Öztop, H. F., & Baysal, E. (2025). A review study for the application of heat pipe and nano-enhanced PCM cooling methods on solar concentrated photovoltaic panels: State-of-the-art designs, outcomes and future trends. *Thermal Science and Engineering Progress*, 66, 104052.
- Paljevack, M., & Krajnc, P. (2020). Hierarchically porous poly(glycidyl methacrylate) through hard sphere and high internal phase emulsion templating. *Polymer*, 209, 123064.
- Paljevack, M., Pečar, D., & Krajnc, P. (2025). Efficient β -galactosidase immobilized on glycidyl methacrylate polyHIPE. *Polymer*, 325, 128264.
- Pan, X., Zhang, N., Yuan, Y., Shao, X., Zhong, W., & Yang, L. (2021). Balsa-based porous carbon composite phase change material with photo-thermal conversion performance for thermal energy storage. *Solar Energy*, 230, 269–277.
- Ping, P., Dai, X., Kong, D., Zhang, Y., Zhao, H., Gao, X., & Gao, W. (2023). Experimental study on nano-encapsulated inorganic phase change material for

- lithium-ion battery thermal management and thermal runaway suppression. *Chemical Engineering Journal*, 463, 142401.
- Praveenkumar, T. R., Vijayalakshmi, M. M., & Manigandan, S. (2022). Thermal conductivity of concrete reinforced using TiO₂ nanoparticles and rice husk ash. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1127–1133.
- Rahmalina, D., Rahman, R. A., & Ismail. (2022). Improving the phase transition characteristic and latent heat storage efficiency by forming polymer-based shape-stabilized PCM for active latent storage system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 31, 101840.
- Ramakrishnan, S., Sanjayan, J., Wang, X., Alam, M., & Wilson, J. (2015). A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites. *Applied Energy*, 157, 85–94.
- Rathore, P. K. S., & Shukla, S. K. (2020). An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings. *Renewable Energy*, 149, 1300–1313.
- Rathore, P. K. S., & Shukla, S. K. (2021). Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review. *Energy and Buildings*, 236, 110799.
- Reddy, V. J., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2024). Advancements in phase change materials for energy-efficient building construction: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 81, 110494.
- Regin, A. F., Solanki, S. C., & Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438–2458.
- Rosen, N., Toledo, H., & Silverstein, M. S. (2023). Encapsulating an inorganic phase change material within emulsion-templated polymers: Thermal energy storage and release. *Polymer*, 276, 125947.
- Sahan, N., & Paksoy, H. O. (2014). Thermal enhancement of paraffin as a phase change material with nanomagnetite. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 126, 56–61.
- Salimi, M., de Nardo, L., & Carvelli, V. (2023). Phase change materials embedded in expanded clay aggregates to develop energy storage concrete: A review. *Science and Technology for the Built Environment*, 29(10), 1050–1071.
- Salimi, M., De Nardo, L., & Carvelli, V. (2025). Lightweight aggregates with shape-stabilized graphene and phase change material for energy storage concrete. *Energy and Buildings*, 345, 116099.
- Sarbu, I., & Dorca, A. (2019). Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. *International Journal of Energy Research*, 43(1), 29–64.
- Sathishkumar, A., Sundaram, P., Prabakaran, R., Cheralathan, M., Kim, J. H., & Kim, S. C. (2025). Thermal performance evaluation of encapsulation materials for organic PCM-based cool thermal energy storage systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 74, 106945.
- Shamshiri, M., Jafari, R., & Momen, G. (2022). An intelligent icephobic coating based on encapsulated phase change materials (PCM). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 655, 130157.
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., & Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid-liquid phase change materials and their

- applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193–228.
- Sharshir, S. W., Joseph, A., Elsharkawy, M., Hamada, M. A., Kandeal, A. W., Elkadeem, M. R., ... Arıcı, M. (2023). Thermal energy storage using phase change materials in building applications: A review of the recent development. *Energy and Buildings*, 285, 112908.
- Shi, J., & Li, M. (2020). Surface modification effects in phase change material-infiltrated attapulgite. *Materials Chemistry and Physics*, 254, 123521.
- Singh, P., Sharma, R. K., Ansu, A. K., Goyal, R., Sari, A., & Tyagi, V. V. (2021). A comprehensive review on development of eutectic organic phase change materials and their composites for low and medium range thermal energy storage applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 223, 110955.
- Song, S., Dong, L., Zhang, Y., Chen, S., Li, Q., Guo, Y., ... Xiong, C. (2014). Lauric acid/intercalated kaolinite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Energy*, 76, 385–389.
- Srinivasaraonik, B., Singh, L. P., Sinha, S., Tyagi, I., & Rawat, A. (2020). Studies on the mechanical properties and thermal behavior of microencapsulated eutectic mixture in gypsum composite board for thermal regulation in the buildings. *Journal of Building Engineering*, 31, 101400.
- Stoller, M. D., Park, S., Yanwu, Z., An, J., & Ruoff, R. S. (2008). Graphene-Based ultracapacitors. *Nano Letters*, 8(10), 3498–3502.
- Sun, M., Liu, T., Sha, H., Li, M., Liu, T., Wang, X., ... Jiang, D. (2023). A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications. *Journal of Energy Storage*, 68, 107713.
- Sunku Prasad, J., Muthukumar, P., Desai, F., Basu, D. N., & Rahman, M. M. (2019). A critical review of high-temperature reversible thermochemical energy storage systems. *Applied Energy*, 254, 113733.
- Teng, T. P. (2013). Thermal conductivity and phase-change properties of aqueous alumina nanofluid. *Energy Conversion and Management*, 67, 369–375.
- Türkoğlu, Z., Mert, H. H., Mert, E. H., Ocak, H., & Mert, M. S. (2021). Cellulose nanocrystals supported—PolyHIPE foams for low-temperature latent heat storage applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 51785.
- Tyagi, V. V., Pandey, A. K., Buddhi, D., & Kothari, R. (2016). Thermal performance assessment of encapsulated PCM based thermal management system to reduce peak energy demand in buildings. *Energy and Buildings*, 117, 44–52.
- Vásquez, L., Davis, A., Gatto, F., Ngoc An, M., Drago, F., Pompa, P. P., ... Fragouli, D. (2021). Multifunctional PDMS polyHIPE filters for oil-water separation and antibacterial activity. *Separation and Purification Technology*, 255, 117748.
- Vicente, R., & Silva, T. (2014). Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach. *Applied Thermal Engineering*, 67(1–2), 24–34.
- Wang, A. J., Paterson, T., Owen, R., Sherborne, C., Dugan, J., Li, J. M., & Claeysens, F. (2016). Photocurable high internal phase emulsions (HIPEs) containing hydroxyapatite for additive manufacture of tissue engineering scaffolds with multi-scale porosity. *Materials Science and Engineering: C*, 67, 51–58.
- Wang, H., Liu, J., Wang, Y., Zhao, Y., & Zhang, G. (2025). A review of the performance and application of molten salt-based phase change materials in sustainable thermal energy storage at medium and high temperatures. *Applied Energy*, 389, 125766.

- Wang, J., Qiao, Y., Tian, B., Li, H., Sun, G., Li, J., & Wang, J. (2026). Hydrogel-based hydrated salt composite PCMs for TES in agricultural solar energy utilization facility—solar greenhouse. *Renewable Energy*, 256, 124604.
- Wang, W., Wang, C., Li, W., Fan, X., Wu, Z., Zheng, J., & Li, X. (2013). Novel phase change behavior of n-eicosane in nanoporous silica: Emulsion template preparation and structure characterization using small angle X-ray scattering. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(34), 14390–14395.
- Wang, Y., Tang, B., & Zhang, S. (2013). Single-walled carbon nanotube/phase change material composites: Sunlight-driven, reversible, form-stable phase transitions for solar thermal energy storage. *Advanced Functional Materials*, 23(35), 4354–4360.
- Wi, S., Yang, S., Park, J. H., Chang, S. J., & Kim, S. (2020). Climatic cycling assessment of red clay/perlite and vermiculite composite PCM for improving thermal inertia in buildings. *Building and Environment*, 167, 106464.
- Wu, X., Varshney, V., Lee, J., Zhang, T., Wohlwend, J. L., Roy, A. K., & Luo, T. (2016). Hydrogenation of penta-graphene leads to unexpected large improvement in thermal conductivity. *Nano Letters*, 16(6), 3925–3935.
- Xiao, X., Zhang, P., & Li, M. (2013). Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material. *Applied Energy*, 112, 1357–1366.
- Xiao, X., Zhang, P., & Li, M. (2014). Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. *International Journal of Thermal Sciences*, 81(1), 94–105.
- Xu, J., Chen, S., Wang, J., Du, J., Dong, X., Zhang, T., ... Ding, Y. (2023). Octadecane-encapsulated, polyurethane PolyHIPE composites with flexibility and stretchability for personal heat management. *ACS Applied Polymer Materials*, 5(10), 7927–7935.
- Xu, Y., Ren, Q., Zheng, Z. J., & He, Y. L. (2017). Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media. *Applied Energy*, 193, 84–95.
- Yang, L., Liu, Y., Filipe, C. D. M., Ljubic, D., Luo, Y., Zhu, H., ... Zhu, S. (2019). Development of a highly sensitive, broad-range hierarchically structured reduced graphene oxide/PolyHIPE foam for pressure sensing. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(4), 4318–4327.
- Yang, X., Feng, S., Zhang, Q., Chai, Y., Jin, L., & Lu, T. J. (2017a). The role of porous metal foam on the unidirectional solidification of saturating fluid for cold storage. *Applied Energy*, 194, 508–521.
- Yang, X., Tan, L., Xia, L., Wood, C. D., Tan, B., Yang, X., ... Wood, C. D. (2015). Hierarchical porous polystyrene monoliths from PolyHIPE. *Macromolecular Rapid Communications*, 36(17), 1553–1558.
- Yaras, A., Ustaoglu, A., Gencel, O., Sari, A., Hekimoğlu, G., Sutcu, M., ... Bayraktar, O. Y. (2022). Characteristics, energy saving and carbon emission reduction potential of gypsum wallboard containing phase change material. *Journal of Energy Storage*, 55, 105685.
- Yavuz, E., Cherkasov, N., & Degirmenci, V. (2019). Acid and base catalysed reactions in one pot with site-isolated polyHIPE. *Royal Society of Chemistry Advances*. Retrieved from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2019/ra/c9ra01053j>

- Yi, H., Zhan, W., Zhao, Y., Qu, S., Wang, W., Chen, P., & Song, S. (2019). A novel core-shell structural montmorillonite nanosheets/stearic acid composite PCM for great promotion of thermal energy storage properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 192, 57–64.
- Yin, X., Wang, Y., Xu, Z., Zhang, T., & Zhao, Y. (2024). Flame-retardant, cellulose-based, thermal insulating polyHIPEs and their application for early fire warning. *Cellulose*, 31(6), 3783–3796.
- Yin, X., Zhang, T., Zhao, T., Wang, K., Xu, Z., & Zhao, Y. (2023). Cellulose-based, flexible polyurethane polyHIPEs with quasi-closed-cell structures and high stability for thermal insulation. *Carbohydrate Polymers*, 302, 120385.
- Yu, H., Li, C., Zhang, K., Tang, Y., Song, Y., & Wang, M. (2020). Preparation and thermophysical performance of diatomite-based composite PCM wallboard for thermal energy storage in buildings. *Journal of Building Engineering*, 32, 101753.
- Yu, K., Jin, B., Liu, Y., & Li, L. (2019). Enhanced thermal conductivity of form-stable phase change materials using carbon nanofiber-expanded graphite hybrid structure. *Materials Research Express*, 6(12), 125503.
- Yu, W., Xie, H., Chen, L., & Li, Y. (2010). Enhancement of thermal conductivity of kerosene-based Fe₃O₄ nanofluids prepared via phase-transfer method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 355(1–3), 109–113.
- Zhang, P., Meng, Z. N., Zhu, H., Wang, Y. L., & Peng, S. P. (2017). Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam. *Applied Energy*, 185, 1971–1983.
- Zhang, S., Chen, J., & Perchyonok, V. T. (2009). Stability of high internal phase emulsions with sole cationic surfactant and its tailoring morphology of porous polymers based on the emulsions. *Polymer*, 50(7), 1723–1731.
- Zhang, T., & Guo, Q. (2017). Continuous preparation of polyHIPE monoliths from ionomer-stabilized high internal phase emulsions (HIPEs) for efficient recovery of spilled oils. *Chemical Engineering Journal*, 307, 812–819.
- Zhang, X., Wen, R., Tang, C., Wu, B., Huang, Z., Min, X., ... Wu, X. (2016). Thermal conductivity enhancement of polyethylene glycol/expanded perlite with carbon layer for heat storage application. *Energy and Buildings*, 130, 113–121.
- Zhao, J., Zhang, W., Gao, C., & Yin, D. (2021). Shape stabilization of phase change material by polymerized high internal phase emulsion for thermal energy storage. *International Journal of Energy Research*, 45(4), 5263–5271.
- Zhao, K., Wang, J., Xie, H., & Guo, Z. (2023). Microencapsulated phase change n-Octadecane with high heat storage for application in building energy conservation. *Applied Energy*, 329, 120284.
- Zhao, T., Zhang, T., Xu, Z., & Zhao, Y. (2022). Emulsion-based, flexible and recyclable aerogel composites for latent heat storage. *Journal of Colloid and Interface Science*, 627, 72–80.
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593–605.
- Zhu, F., Zhang, C., & Gong, X. (2016a). Numerical analysis and comparison of the thermal performance enhancement methods for metal foam/phase change material composite. *Applied Thermal Engineering*, 109, 373–383.

ÖZGEÇMİŞ

