



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

**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**KİLLERİN GİZLİ ISI DEPOLAMADA KULLANILMASI VE ŞEKİLCE KARARLI
KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YASEMİN ERBEN

DANIŞMAN: DOÇ. DR. HATİCE HANDE MERT

**YALOVA
HAZİRAN 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

KİLLERİN GİZLİ ISI DEPOLAMADA KULLANILMASI VE ŞEKİLCE KARARLI
KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YASEMİN ERBEN
228110002

DANIŞMAN: DOÇ. DR. HATİCE HANDE MERT

YALOVA
HAZİRAN 2025

ETİK BEYAN

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

Yasemin ERBEN



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Doç. Dr. HATİCE HANDE MERT'e ve yardımlarından ötürü Enerji Sistemleri Mühendisliği Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. MEHMET SELÇUK MERT'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için annem LEYLA ERBEN, babam KEMALETTİN ERBEN, 301 ailem ve ENES COŞGUN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması desteklenmesine olanak sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine (Proje No: 2023/YL/0012) teşekkür ederim.

Haziran-2025

YASEMİN ERBEN



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN.....	i
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (FDM'LER) VE SINIFLANDIRILMASI.....	3
2.1. Faz Değişiren Malzemelerin (FDM'lerin) Sınıflandırılması	4
2.1.1. Organik FDM'ler	7
2.2. Faz Değişim Malzemesi Olarak Kullanılan Yağ Asitleri.....	14
2.3. FDM'lerin Kullanım Alanları.....	15
2.4. Şekilce Kararlı Faz Değişiren Malzemeler	19
2.5. Killer ve Killerin Destek Materyali Olarak Kullanımı.....	22
3. MATERYAL VE METOT	25
3.1. Kimyasallar	25
3.2. Deneysel Metod	25
3.2.1 Laurik Asit/Refraktif Kil (LA/RC) kompozitlerinin hazırlanması.....	25
3.3. Kompozit FDM'lerin Karakterizasyonu.....	26
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	27
4.1 Refraktif Kilin ve Kompozit FDM'lerin Karakterizasyon Sonuçları	27
4.1.1 Refraktif kilin kimyasal bileşiminin belirlenmesi.....	27
4.1.2 Kompozit FDM'lerin sızdırma testi sonuçları	27
4.1.3 Morfolojik analiz sonuçları	28
4.1.4 Kimyasal analiz sonuçları	29
4.1.5 Isıl enerji depolama özelliklerine ait sonuçlar	30
4.1.6 Termogravimetrik analiz ve BET spesifik yüzey alanı sonuçları	32
4.1.7 Termal güvenilirlik testi sonuçları.....	33
4.2 Genişletilmiş Grafit (EP) Yüklü Kompozit FDM'nin Karakterizasyon Sonuçları.....	34
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	41
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	53
TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER.....	53



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
ΔT	: Sıcaklık farkı
T_m	: Erime sıcaklığı
ΔH_m	: Erime entalpisi
H_f	: Erime entalpisi
kJ	: Kilo joule
K	: Kelvin
W	: Watt
C_p	: Isı kapasitesi
q	: Yoğunluk

KISALTMALAR

FDM	: Faz Değiştiren Malzemeler
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektroskopisi
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
TG	: Termogravimetre



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Gizli ısı depolaması olarak kullanılan bazı parafinler, parafin mumları ve karışımlarının termo-fiziksel özellikleri. (Sharma ve diğ., 2015)	8
Tablo 2.2. Gizli ısı depolama amacıyla kullanılan bazı yağ asitlerinin termo-fiziksel özellikleri(Rozanna ve diğ., 2005).	11
Tablo 4.1. RC'nin XRF ile belirlenen kimyasal bileşimi.....	27
Tablo 4.2. Üretilen kompozit FDM'lerin kompozisyonları	28
Tablo 4.3. LA ve LA/RC kompozit FDM'lerin DSC analizinden elde edilen faz geçiş özellikleri.....	31
Tablo 4.4. RC ve kompozit FDM'nin BET sonuçları	33
Tablo 4.5. Isıl döngü testi öncesi ve sonrası faz geçiş özellikleri	34
Tablo 4.6. Üretilen kompozitlerin ısı enerji depolama özelliklerinin literatürle karşılaştırılması.....	38

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması (Abhat ve diğ., 2004)	5
Şekil 2.2. (a) Silindirik FDM cihazı; (b) Düşük enerjili bina (Arkar ve Medved, 2007).....	16
Şekil 2.3. Terapotik Tedavisi ve Yeni Doğan Soğutucu (Matthew ve diğ., 2015)	16
Şekil 2.4. Isı Koruma Giysilerinin Temel Mekanizması (Bühler ve diğ., 2013).	17
Şekil 2.5. Gizli ısı depolama özelliğine sahip enerji tasarrufu soğutucu kurutucu (Mehling ve diğ., 2021)	18
Şekil 2.6. Yalıtımlı soğutmalı kamyonlara monte edilmiş FDM dolgulu metal plakalar, FDM şarj olurken bekleme modundaki kamyonlar, Dondurucu/soğutucu ekipman (Rodrigues ve diğ., 2021)	19
Şekil 2.7. Organik FDM'lerin şekil stabilizasyonunda kullanılan destekleyici malzemelerin sınıflandırılması (Teggar ve diğ., 2021).....	20
Şekil 2.8. Kil Minerallerinin Tabaka Yapısı (Kök ve diğ., 2023).....	22
Şekil 3.1. LA/RC kompozit FDM'lerin üretim süreci	26
Şekil 4.1. Sızdırma testi sonuçları (a) LA ve (b) LA/RC kompozit FDM'ler.....	28
Şekil 4.2. Refraktif kil ve kompozit FDM'lerin SEM görüntüleri (a) RC, (b) LA/RC- 2575, (c) LA/RC-3070, (d) LA/RC-3565, (e) LA/RC-4060.	29
Şekil 4.3. FTIR spektrumları (a) RC ve LA, (b) LA/RC kompozit FDM'leri	30
Şekil 4.4. LA ve kompozit FDM'lerin DSC grafikleri.....	31
Şekil 4.5. LA, RC ve LA içerikli kompozit FDM'nin karşılaştırmalı TG analiz sonucu	32
Şekil 4.6. LA/RC kompozitinin termal döngü testi öncesi ve sonrası karşılaştırmalı DSC grafikleri	34
Şekil 4.7. EP ve EP yüklü kompozit FDM'nin FT-IR spektrumları	35
Şekil 4.8. SEM görüntüleri LA (a), EP (b), LA/RC-4060 (c) ve LA/RC-4060-5%EP (d)	36
Şekil 4.9. EP ile modifikasyon öncesi ve sonrası elde edilen TG termogramları	37
Şekil 4.10. EP ile modifiye edilmiş kompozit FDM'nin DSC termogramı	37
Şekil 4.11. Örneklerin termal davranışının T-kayıt testi ile incelenmesi	40



KİLLERİN GİZLİ ISI DEPOLAMADA KULLANILMASI VE ŞEKİLCE KARARLI KOMPOZİT FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN ÜRETİMİ

ÖZET

Tüm dünyada giderek artan enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için enerjinin etkin ve verimli kullanılması ya da uygun süreçlerle depolanması önemlidir. Faz değiştiren maddeler (FDM'ler), ısı enerjinin gizli ısı olarak depolanabilmesine olanak sağlayan, sıvıdan katıya ya da katıdan sıvıya faz değişimi esnasında büyük miktarda ısının depolanmasına veya salınmasına izin veren yeni nesil enerji depolama malzemeleridir. Son yıllarda, bu malzemelerin birtakım dezavantajlarını uygun yöntemlerle ortadan kaldırmak ve şekilce kararlılığını sağlamak için çeşitli yaklaşımlar uygulanmaktadır. Öte yandan bu malzemeler kaçak sorunları ve faz geçişi sırasındaki büyük hacim değişiklikleri nedeniyle enerji dönüşüm süreçlerinde doğrudan kullanıma uygun değildirler. Ayrıca FDM'lerin ısı iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle ısı enerji depolama sistemlerindeki performansları önemli ölçüde sınırlıdır.

Bu çalışmada, birçok endüstride kullanılan killerin, organik bazlı kompozit faz değiştiren malzemelerin tasarımında destek malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Organik bazlı FDM/kil kompozitleri farklı kompozisyonlarda başarıyla üretildi. Kompozit FDM'lerin termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) ile belirlendi. Ayrıca elde edilen kompozitlerin morfolojik özellikleri ve kimyasal yapıları sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) kullanılarak incelenmiştir.

Destek malzemesi olarak kullanılan refraktif kilin kimyasal kompozisyonu belirlenmiş ve çeşitli kompozisyonlarda laurik asit içerikli kompozit FDM'ler hazırlanmıştır. En yüksek FDM içeriğine sahip olan sızdırmaz özellikteki kompozit malzeme ısı özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla genişletilmiş grafit ile modifiye edilmiştir. Isıl iletim özelliği iyileştirilmiş ve sızdırmaz özellikteki kompozitin 63,6 J/g erime entalpisine ve -61,7 J/g kristallenme entalpisine sahip olduğu bulunmuştur. Elde edilen şekilce kararlı kompozitin sahip olduğu uygun ısı enerji depolama kapasitesi ve faz geçiş sıcaklıkları ile güneş enerjisi depolama ve binaların termoregülasyonu gibi enerji depolama uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl enerji depolama, Faz değiştiren malzeme, Isı transferi



USE OF CLAYS IN THE LATENT HEAT STORAGE AND PRODUCTION OF SHAPE-STABILIZED COMPOSITE PHASE CHANGE MATERIALS

ABSTRACT

In order to meet the ever-increasing energy demand all over the world, it is important to use energy effectively and efficiently or to store it with appropriate processes. Phase change materials (PCMs) are new generation energy storage materials that allow thermal energy to be stored as latent heat and allow large amounts of heat to be stored or released during the phase change from liquid to solid or from solid to liquid. In recent years, various approaches have been applied to eliminate some of the disadvantages of these materials with appropriate methods and to ensure their stability in form. On the other hand, these materials are not suitable for direct use in energy conversion processes due to leakage problems and large volume changes during phase transition. In addition, the performance of PCMs in thermal energy storage systems is significantly limited due to their low thermal conductivity.

In this study, the usability of clays used in many industries as support materials in the design of organic-based composite phase change materials was investigated. Organic-based PCM/clay composites were successfully produced in different compositions. Thermal properties of composite PCMs were determined by Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA). In addition, morphological properties and chemical structures of the obtained composites were investigated using Scanning Electron Microscope (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), respectively.

The chemical composition of the refractive clay used as support material was determined and lauric acid composite PCMs were prepared in various compositions. The leakproof composite material with the highest PCM content was modified with expanded graphite in order to improve its thermal properties. The thermal conductivity was improved and the leakproof composite was found to have a melting enthalpy of 63.6 J/g and a crystallization enthalpy of -61.7 J/g. It was concluded that the obtained shape-stablized composite can be used in energy storage applications such as solar energy storage and thermoregulation of buildings with its suitable thermal energy storage capacity and phase transition temperatures.

Keywords: Thermal energy storage, Phase change material, Heat transfer



1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde artan nüfus ve sanayileşme ile birlikte enerji ihtiyacı da gün geçtikçe artmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında enerji depolama teknolojileri önemli bir yer tutmaktadır. Isı depolama amacıyla, belirli sıcaklıklarda faz değişimlerine uğrayan ve gizli ısı değerleri yüksek olan materyallerden yararlanılmaktadır. Son yıllarda Faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) enerji ihtiyacının karşılanmasında ve mevcut enerjinin korunmasında kullanılan önemli malzemelerdir. FDM'ler en kısa tanımıyla, termal enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayarak enerji sağlayan maddelerdir. Yapı malzemeleri ile uyumlu olarak binalarda, soğuk hava depolarında, güneş enerjisi sistemlerinde, elektronik donanımların ısı kontrolünde, tekstil ve otomotiv endüstrisi gibi pek çok alanda kullanım potansiyeline sahiptir (Lee ve diğ., 2018).

FDM'ler yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olmakla birlikte atık ısının depolanmasında, enerji tedarikinin devamlı olabilmesinin sağlanmasında, yenilenebilir enerji sistemlerinde üretimin tüketimden fazla olduğu durumlarda kullanılarak enerji kayıplarını önlemektedir. Örneğin gece dış ortam sıcaklığının düşmesiyle donan FDM ısı salarak binanın ısınmasına katkı sağlar. Böylece güneş enerjisinden yararlanılarak bina içerisindeki ısının homojen olarak dağılmasına olanak sağlamaktadır (Mert ve Mert, 2020).

FDM'ler tekstil endüstrisi, kaplama ve soğutma gibi birçok uygulamada ticari olarak kullanılmaktadır. Genel olarak ısı kontrolü için depolama alanında kullanımı yaygındır. İlginç bir madde olan FDM'ler, son zamanlarda yeniden keşfedilerek geniş bir yelpazeye sahip yaşam bilimi uygulamalarında da kullanılmaya başlamıştır. Bunlar; biyolojik, insan vücuduyla ilgili uygulamalar, biyomedikal, ilaç, gıda ve tarımsal uygulamalardır. Yaşam bilimi uygulamalarına yönelik FDM'lerin, biyogüvenlik veya mühendislik açısından zorlukları bulunmaktadır (Malayoğlu ve Akar, 2021).

FDM'ler, faz geçişleri esnasında termal enerjiyi tersinir ısının gizli ısı olarak depolar ve serbest bırakabilir. 1970'li yıllardan bu yana FDM'leri geleneksel sistemlere dahil etmek için çeşitli adımlar atılmıştır. Örneğin, yapı malzemeleri içine FDM'lerin dahil edilmesiyle bina içlerinin ısıtılması veya soğutulması yoluyla ısı konforunun artırılması amacıyla duvar kaplamaları yapılmıştır (Cabeza ve diğ., 2011).

FDM'lerin kullanımı için kapsülleme ve impregnasyon yöntemleri sıklıkla tercih edilmektedir. Kapsülleme örneği makrokapsüllemeden mikrokapsüllemeye kadar değişiklik gösterir (Erlbeck ve diğ., 2016). Mikron boyutunda FDM'nin kullanılması yüzey alanını önemli ölçüde arttırdığı için ısı düzenleyici olarak tercih edilir. Alternatif olarak ise gözenekli desteklere impregnasyon işlemi yapılabilir. FDM'lerin impregnasyonda kil gibi doğal malzemeler tercih edildiği gibi zeolitlerde kullanılmaktadır (Milián ve diğ., 2017).

Kil minerali, FDM'lerin kapsüllemesinde üstün özellikleri ile tercih edilen doğal malzemelerdir. Kil mikropartikülleri gözenekli bir yapıya, iyi emilebilirlik ve belirgin spesifik yüzey alanına sahiptir (Li ve Shi, 2019). Kil bir birçok inşaat malzemesinin geleneksel bir bileşenidir ve dolayısıyla FDM/kil kompozitleri inşaat yapı malzemelerin bileşimlerine kolaylıkla dahil edilebilir (Rezende ve diğ., 2018).

Bu çalışmada, birçok endüstride destekleyici malzeme olarak kullanılan ticari olarak temin edilebilen killerin, organik esaslı kompozit faz değişim malzemelerinin tasarımı için kullanılabilirliği araştırılmıştır. Organik esaslı FDM/kil kompozitleri farklı kompozisyonlarda başarıyla üretilmiştir. Kompozit FDM'lerin termal özellikleri Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) ile belirlendi. Ayrıca, elde edilen kompozitlerin morfolojik özellikleri ve kimyasal yapıları sırasıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) ile incelenmiştir.

2. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (FDM'LER) VE SINIFLANDIRILMASI

Faz değıştiren malzemeler (FDM), belirli bir sıcaklık aralığında sıcaklıkları kontrol etmek için faz değışiminin gizli ısısını kullanmaktadır. Sıcaklık, belirli bir noktanın üzerine çıktığında kimyasal bağlar bu malzemeyi parçalamaya başlar ve malzeme endotermik bir ortamda ısıyı emmeye başlamaktadır. Malzemenin katıdan sıvıya geçiş sürecinde sıcaklık düştükçe, malzeme içerisinde bulunan enerjiyi vererek katı duruma döner. Eğer faz değışim sıcaklığı, beklenen konfor odası sıcaklığına yakınsa, daha istikrarlı bir iç mekan ısısı elde etmiş olur. Bu, iklim değışikliğine karşı etkili bir çözüme yol açar ve yüksek soğutma ve ısıtma yüklerini karşılamaya yardımcı olur. Bu sebeple, faz değıştiren malzemeler ısıyı arttırmasını sağlayabilir. Özellikle düşük termal kütleyle sahip binalarda depolama kapasitesi oldukça sınırlı olmaktadır. Faz değıştiren malzemelerin gereksinimleri şu şekilde özetlemiştir. Birim hacim ve birim ağırlık başına yüksek füzyon ısısı ve yüksek özgül ısıdır. Bu özellik, azami ölçüde küçük bir FDM hacmiyle daha fazla gizli ısı depolamayı hedeflemektedir. Faz değışim sıcaklığı, uygulanabilir şekilde seçilmelidir. Nitekim FDM'lerde faz değışim sıcaklığı, iklim ve lokasyon ile uyumlu olmalıdır. Bunun yanı sıra, FDM'nin kullanıldığı bina veya sistemin türüne de dikkat edilmelidir. Düşük buhar basıncı, çalışma sıcaklığı koşullarında temel bir gerekliliktir. Kapsülleyici malzeme üzerindeki basınç nedeniyle buhar basıncı, ekstra maliyetleri ve olası kopma tehlikesini önlemek için minimum seviyede korunmalıdır (Baetens ve diğ., 2010).

Kimyasal stabilite ve düşük korozyon oranı, FDM bakımından belirleyici unsurlardır. Kimyasal olarak kararlı malzemeler, FDM'lerin sabit sıcaklık ve etki koşullarında uzun süreli çalışma performansını desteklemektedir. Bu malzemeler, FDM'nin kendisiyle temas halindeki diğ er malzemelerle reaksiyona girme durumunu azaltarak operasyonel dayanıklılığı arttırmaktadır. FDM'ler, tehlikeli veya zehirli olmamalıdır; inşaat sektöründe, yangın ve sürekli kullanımda kapsülleme yırtıldığında zararlı emisyon oluşumu engellenmelidir. Bunun yanında, üretimi çevreye tehlikeli emisyonlar salmayan malzemelerle yapılmalıdır. Bu nedenle güvenliği de büyük önem taşımaktadır. FDM'lerin güvenliği ile ilgili katı inşaat yönetmeliklere uyumlu bir şekilde uygulanmalıdır. Kimyasal stabilite açısından, FDM'lerin binlerce faz değışimi sırasında bozulmadan yeniden kristalleşmesi önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, FDM'lerin uzun ömürlü olmasını sağlar. Diğ er yandan, düşük derecede aşırı soğutma ve yüksek kristal büyümesi istenen özellikler arasındadır (Schröder ve Gawron, 2010).

Faz değişim sıcaklığının kesinlik ve öngörülebilirlik arz etmelidir. Bu, malzeme seçiminde doğruluk ve tasarımın optimum seviyede olması gerekmektedir. Katılaşma sırasında küçük hacim değişimi sağlanmalıdır. Büyük hacim değişiklikleri, kapsülleme malzemesinin FDM'nin genleşmesine izin vermesine olanak tanır. Yüksek ısı iletkenliği, ısının malzeme içerisinde daha hızlı ve etkin bir şekilde yayılmasını sağlayarak, malzemenin termal enerjiyi daha yüksek sıcaklık seviyelerinde absorbe etmesine ve dağıtmasına olanak tanımaktadır (Zábransky ve diğ., 2001).

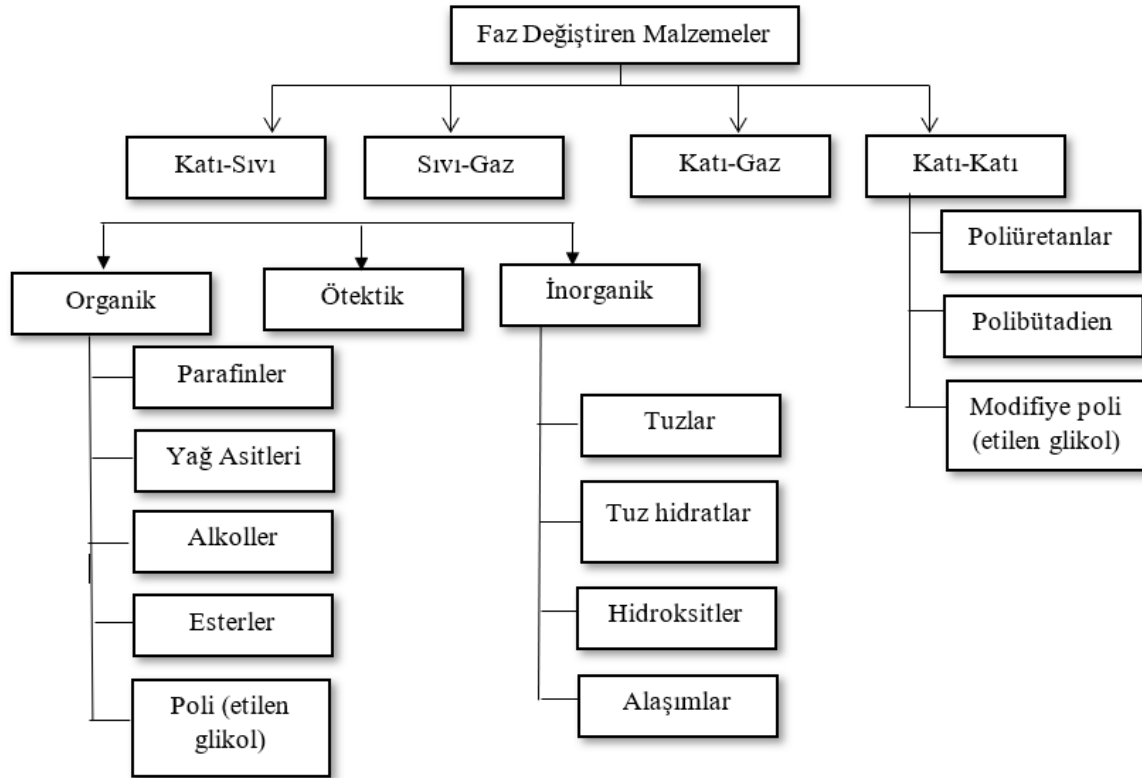
2.1. Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM'lerin) Sınıflandırılması

FDM'ler, genellikle organik, inorganik ve ötektik olarak sınıflandırılmaktadır. Erime/donma sıcaklığı ve füzyon gizli ısısına baz alınarak, birçok sayıda organik ve inorganik malzeme FDM olarak kabul edilmektedir. Bunun yanı sıra, erime/donma sıcaklıkları ęalıřma aralığında bulunsa bile, birçok FDM, uygun bir termal enerjiyi depolama cihazı için gereken kriterleri karşılayamaz. Bu sebeple, mevcut malzemeler kullanılmalı ve termofiziksel özellikleri, sistem üzerinde tasarıma uygun değişiklikler yaparak iyileştirilmelidir. Örneğin, FDM'nin ısı iletkenliği, FDM içine metal nanoparęacıklarının dağıtılmasıyla veya sistem tasarımına metal kanatęıkların eklenmesiyle yükseltilebilir (Nepomuceno ve Silva, 2014).

Organik FDM'ler, parafin mumu gibi, düz n-alkan zincirlerine ($-CH_3-(CH_2)-CH_3-$) veya düz zincirli hidrokarbonlardan oluşan yağ asitlerini iğerir. Bu malzemeler kısmi olarak pahalı ve yanıcı özellik gösterirler. Organik malzemeler, faz ayrımı yapmaksızın uyumlu erime kapasitesine sahiptirler (Khudhair ve Farid, 2004). Parafin, güvenilir, öngörülebilir, ucuz, korozyona karşı dayanıklı, kimyasal olarak inert ve 500°C altındaki sıcaklıklarda stabil özelliklerde olmalıdır. Fakat son derece düşük ısı iletkenliğe (0.1–0.3 W/m·K) sahip olup, plastik konteynerlarda kapsüllemek için yeterli değildirler.

İnorganik malzemeler büyük ölçüde hidratlı tuzlar ve metalik bununla birlikte, güneş enerjisi gibi birçok uygulamada kullanılır (Lane ve diğ., 1983). FDM olarak bu malzemeler, ęeřitli döngü aşamasından sonra bile füzyon ısısını (350 MJ/m³) koruma kabiliyetine sahip olup, kısmen yüksek ısı iletkenliği (yaklaşık 0.5 W/m·°C) kapsarlar. Ancak uyumsuz bir şekilde erime göstermektedir (Wen ve diğ., 2022).

Abhat tarafından verilen kapsamlı bir sınıflandırma (Abhat, 2004) Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması (Abhat ve diğ., 2004).

FDM'lerin termofiziksel özellikleri, üreticiden üreticiye farklılık göstermekte olup, mevcut herhangi bir FDM, etkili bir termal enerji depolama cihazı tasarımında basit bir şekilde uygulanması mümkün değildir (Hasnain, 1998). Termal depolama sistemi olarak kullanılacak FDM'nin o sistem için uygun termal, fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikteki koşulları sağlamalıdır (Farid ve diğ., 1983).

Başlıca aranan özellikler şunlardır (Zalba ve diğ., 2003):

Termal özellikler:

- Uygun faz değişim sıcaklığı.
- Yüksek özgül ısı.
- Yüksek gizli ısı.
- Hem sıvı hem de katı fazlarda yüksek ısı iletkenlik.

Isıtma veya soğutma sisteminin çalışma sıcaklığı, seçilecek FDM'nin faz değişim sıcaklığı ile uyumlu olması gerekir ve yüksek özgül ısı, duyarlı ısı depolamasını sağlar. Yüksek gizli ısı, küçük olan bir FDM hacminde yüksek miktarda enerjiyi depolamak için seçilmektedir.. Bu sebepten dolayı termal enerji depolamanın fiziksel boyutlarını minimizeen aza indirgemiş olur. Isıl iletkenliğinin yüksek olmasının yanı sıra, FDM'nin erimesi ve donması için gereken sıcaklık farkını minimize etmek için gerekli olmaktadır (Waqas ve diğ. 2018).

Fiziksel özellikler:

- Yüksek yoğunluk.
- Donma sırasında hiç veya çok az aşırı soğuma görülmesi.
- Düşük buhar basıncı.
- Küçük hacim değişikliği.

Yüksek yoğunluklu malzemeler, orta ölçekli depolama konteynerlerine gerekli görür ve minimum seviyede aşırı soğutma gereksinimi bulunmaktadır. Bu durum, FDM'nin donma veya erime hali için gereken sıcaklık aralığını engellemiş olur ve faz değişim sıcaklığının tek bir değerle belirlenmesini sağlamaktadır. Bu sebeple yüksek nükleasyon oranı elde edilir (Teggar ve diğ., 2021).

Kimyasal özellikler:

- Uzun süreli kimyasal kararlılık.
- Kapsül malzemesiyle uyumlu olmalıdır.
- Zehirli, yanıcı ve patlayıcı olmamalıdır.

FDM'nin sürekli donma ve erime döngüleri, kimyasal bileşimini etkilemektedir. Bu nedenle malzemenin uzun bir süre zarfında kimyasal kararlılığının devam ettirmesi son derece istenilen bir durumdur.

Ekonomik özellikler:

- Bolca bulunmalıdır.
- Ucuz olmalıdır.

FDM'lerin ucuz ve kolay erişilebilir olmaları, istenilen bir özellik olmaktadır.

2.1.1. Organik FDM'ler

Organik FDM'ler, uygun erime hali sağlamanın yanı sıra, parafinler ve parafin olmayanlar olarak iki kısma ayrılmaktadır. Bu malzemeler, faz ayrımı olmadan düzenli erime sürecini sağlar. Fakat birçok sayıda erime/donma döngüsünde bulunan FDM'ler gizli ısı kaybına uğrayabilir ve aşırı soğuma göstermezler. Parafin mumları, polietilen glikol, yağ asitleri ve türevleri gibi bir çok ısınma ve sonrasındaki soğuma esnasında katı-sıvı faz geçişi yaşayan organik FDM'ler mevcut durumdadır. Bunun yanı sıra polialkol ve polietilen ise, katı-katı faz geçişi sağlayan bir diğer organik FDM gruplarıdır. Bu tür faz geçişi haali, belirli bir sıcaklıkta, büyük miktarlarda gizli ısı emerek ve gizli ısı salarak gerçekleşmektedir (Farid ve diğ., 1983).

Organik FDM'lerin birçok avantajının bulunmasının yanı sıra, en önemli dezavantajları; düşük ısı iletkenliği sebebiyle şarj/deşarj oranlarının kısıtlanması, soğuma döngülerindeki aşırı soğuma etkisi ve kapsüllerde bulunan FDM sızıntısı görülebilir olmasıdır (Choi ve diğ., 2010).

Parafinler

Parafin, düz zincirli n-alkanların karışımından oluşan ve kimyasal formülü $C_n H_{2n+2}$ ile gösterilmektedir. Alkan zincirinin uzunluğu kapsamında, parafinler çift zincirli (n-parafin) veya tek zincirli (izo-parafin) olabilirler (Abhat, 1983). Parafinin moleküler zinciri, kristalleşme/erime durumunda büyük miktarda gizli ısı içermektedir. Parafin bileşiklerinin erime sıcaklığı, moleküllerdeki alkan zincirlerinin sayısının artması nedeniyle yükselebilir ve bu durum Tablo 2.1'de görülmektedir. Erime sıcaklığında gerçekleşen bu artış, n-alkan zincirleri arasındaki yükseltilmiş ve indüklenmiş dipol çekimi nedeniyle oluşmaktadır (Sarier ve Önder, 2012). Örnek verecek olursak, C_{14} 'ün erime noktası 4,5 °C, C_{18} 'in erime noktası ise 28 °C'dir. Geçmişte yapılan çalışmalara göre (Parks ve diğ., 2001), parafin mumlarının çok sayıda faz değişim döngüsü hizada büyük miktarda ısıyı emme, depolama ve serbest bırakma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bu özellikle ısı kapasitesi yüksek FDM'lerin binalarda enerji depolama için ideal malzemeler olduğunu göstermektedir (Sánchez ve diğ., 2010).

Tablo 2.1. Gizli ısı depolaması olarak kullanılan bazı parafinler, parafin mumları ve karışımlarının termo-fiziksel özellikleri (Sharma ve diğ., 2015).

Bileşik	T _m °C	H _f (kJ/kg)	C _p (kJ/kg. K)	k (W/m.K)	q (kg/m ³)
Dekan	-2665	202	-	-	726 (sıvı)
Undekan	-25,6	177	-	-	737 (sıvı)
Dodekan	-9,6	216	-	-	745 (sıvı)
Tridekan	-5,4	196	2,21 (sıvı)	-	753 (sıvı)
Parafin C ₁₄	4,5	165	-	-	-
Tetradekan	5,5	227	2,07 (katı)	0,15	825 (katı)
Parafin C ₁₅ -C ₁₆	8	153	2,2 (katı)	-	-
Parafin C ₁₆ -C ₁₈	20-22	152	-	-	-
Parafin C ₁₃ -C ₁₄	22-24	189	2,1	0,21	790 (sıvı)
					900 (katı)
Parafin C ₁₈	28	244	2,16	0,15	814
Nonadekan	32	222	-	-	785
Eikosan	36,6	247	-	-	788
Heneikosan	40,2	213	-	-	791
Parafin C ₂₀ -C ₃₃	48-50	189	2,1	0,21	769 (sıvı)
Parafin C ₂₂ -C ₄₅					912 (katı)
1-Tetradekanol	58-60	189	2,1	0,21	795

					(sıvı)
Parafin C ₂₃ -C ₄₅	62-64	189	2,1	0,21	0,915
Parafin Mumu	64	173,6	-	0,167 (sıvı)	790
					(sıvı)
Parafin C ₂₁ -C ₅₀	66-68	189	-	0,21	
Biphenyl	71	119,2	-	-	
Propionamid	79	168,2	-	-	
Naftalin					976
	80	147,7	2,8	0,132 (sıvı)	(sıvı)
Tetradekan+Oktadekan	-4.02,2.1	227,52	-	-	-
%91.67 Tetradekan+%8,33					-
Hexadekan	1,70	156,20	-	-	
Tetradekan+Dokasan	1,5-5,6	234,33	-	-	-
Parafin Karışımı (n=14-16)	5-6	152	-	-	783
					(katı)
Parafin Karışımı (n=15 16)	8	147-153	-	-	75,6
Parafin Karışımı (n=16-18)	20-22	152	-	-	-
Oktadekan+Heneikosan	25,8-26	193.93	-	-	-
Oktadekan+Dokasan	25,5-27	203,80	-	-	-

Parafinler, 2,14–2,4 kJ/kg.K arasında değişkenlik gösteren özgül ısı kapasitesi ve 200–220 kJ/kg arasında gizli ısı değerine sahip olan, birden çok faz geçiş döngüsüne maruz bırakılmalarına rağmen faz ayrışması göstermezler. Ek olarak, parafinler kimyasal olarak inert, aşındırıcı olmayan, renksiz, dayanıklı, maliyet etkin, bolca temin edilebilir, çevre dostu ve toksik olmayan özellikleri ile FDM olarak birçok avantaj sunmaktadır (Hasnain ve Lane, 1983).

Ancak yapılan çalışmalar dışında, parafinin oksijene maruz bırakıldığında yavaş oksitlenme eğiliminde olduğunu göstermektedir ve bu durumla beraber sızdırmaz konteynerler gerektirmektedir. Parafinler, genellikle tüm metal kaplarla uyumludur, fakat bazı plastik kaplar yumuşama özelliği gösterebilir (Zábransk, 2001).

Parafinler sıvı hali durumunda düşük termal iletkenliğe sahiptir ve bu sebepten kaynaklı donma döngüsünde yüksek gizli ısıya ihtiyaç duymaktadır. Parafinin gösterdiği bu özelliği, bazı malzemelerde metal dolgular ve diğer teknikler kullanılarak iyileştirilebilir hale getirilebilir (Ren ve diğ., 2022).

Yağ Asitleri

Parafin olmayan FDM'ler çoğunlukla asit formunda bulunmakta ve $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ formülü ile ifade edilmektedir (Demirbas, 2006). Yağ asitleri sonuç itibariyle bitkisel ve hayvansal kaynaklardan türetilir ve bu yağ asitlerini kirletici olmayan bir tedarik kaynağından temin edilmektedir (Feldman ve diğ., 1995). Yağ asitlerinin bir çok çeşidi bulunur; kaprilik, kaprik, laurik, miristik, palmitik ve stearik asittir (Abhat, 1983). Her bağımsız malzeme, parafinlere oranla çok farklı özellikler gösterebilir. Bunun sebebi ise parafinler benzer özelliklere barındırırken, yağ asitleri ise her birinin kendine özgü özellikleri bulunmaktadır (Sharma ve diğ., 2009). Parafinlerle kıyaslandığında, bu malzemeler maksimum düzeyde mükemmel faz değişim (katı-sıvı) özellikleri gösterirler. Fakat dezavantajlarından biri olan parafinlerden yaklaşık üç kat daha pahalı olma özelliği tercih açısından olumsuz bir sonuç göstermektedir (Hasnain, 1998). Yapılan çalışmalardan bahsedecek olursak, esterler, yağ asitleri, alkoller ve glikoller gibi birçok materyalin gizli ısı depolaması için uygun olduğunu göstermiştir (Abhat ve diğ., 1994).

Bu malzemeler fazla yanıcı olmakla beraber yüksek sıcaklıklara, alevlere ve oksitleyici ajanlara karşı korunması gerekmektedir. Düşük erime noktasına sahip olan yağ asitleri ve palmitoleik asitler ise, diğer yağ asitlerine oranla en yaygın kullanılan olarak tercih edilmiştir. Yağ asitlerinin erime sıcaklıkları -5°C ile 70°C arasında değişkenlik gösterir ve gizli ısıları 45-210 kJ/kg arasında kalmaktadır. Geçmişte incelenmiş olan bazı yağ asitleri, Tablo 2.2'de sunulmuştur (Sari ve diğ., 2004).

Tablo 2.2. Gizli ısı depolama amacıyla kullanılan bazı yağ asitlerinin termo-fiziksel özellikleri (Rozanna ve diğ., 2005).

Madde Adı	T_m (°C)	H_f (kJ/kg)	C_p (kJ/kg. K)	k (W/m.K)	q (kg/m³)
Enantik Asit	-7,4	107	-	-	-
Bütirik Asit	-5,6	126	-	-	-
Kaproik Asit	-3	131	-	-	-
Propil Palmitat	10	186	-	-	-
Pelargonik	12,3	127	-	-	-
Isopropil stearat	14-18	140-142	-	-	-
Kaprilik	16	148,5	-	0,149 (I)	862 (I)
	16,5	149	0,148 (I)	1033 (s)	981 (s)
Bütil stearat	19	140	-	-	-
	123- 200	-	-	-	-
Dimetil sabakat	21	120-135	-	-	-
Undesilenik	24.6	141	-	-	-
Vinil stearat	27-29	122	-	-	-
Undesilik	28,4	139	-	-	-
Kaprik	31,5	153	-	0,149 (I)	886 (I)
	32	152,7	0,153 (I)	878 (I)	-
	-	-	-	878 (I)	-
Tridesilik	41.8	157	-	-	-
Metil-12 hidroksi- stearat	42-43	120-156	-	-	-
Laurik Asit	42-44	178	1.6	0,147 (I)	870 (I)
	44	177,4	862 (I)	1007 (s)	-
Elaidik	47	218	-	-	851 (I)
miristik	54	187	1,6 (s)	990 (s)	844 (I)
	58	186,6	2,7 (I)	990 (s)	-
	49-51	204,5	-	-	-
Pentadekanoik	52-53	178	-	-	-
Marganik	60	172,2	-	-	-

Palmilik	63	187	-	0,165 (I)	874 (I)
	61	203,4	-	0,159 (I)	847 (I)
	64	185,4	-	0,162 (I)	850 (I)
Stearik	70	203	2,35 (I)	0,172 (I)	941 (I)
	69	202,5	848 (I)	-	-
	60-61	186,5	-	-	-
	69,4	199	-	-	-
Nonadesilik	67	192	-	-	-
Arakhidik	74	227	-	-	-
Heneikosilik	73-74	193	-	-	-
Fenil asetik	16,7	102	-	-	-
Asetamit	81	241	-	-	-

Yağ asitleri, düşük ve orta enerji depolama uygulamalarında potansiyel FDM olarak öne çıkmaktadır. Bu asitlerin özellikleri belirtilmek istenilir ise, yüksek termal stabilite, toksik olmayan, biyobozunabilirlik ve uygun erime sıcaklık aralıklarıdır. Yağ asitlerinin, örnek verecek olursak; kaprik, laurik, palmitik ve stearik asitlerin, termal özellikleri üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu maddelerin alan ısıtma sistemi gibi uygulamalarda kullanılabilceğini göstermiştir ve bu asitler, binlerce termal döngüye mukavemeti yüksek ve düşük sıcaklıklarda kararlılık göstermektedir (Feldman ve diğ., 1989, Sari ve diğ., 2001).

Şeker Alkolü

Şeker alkolleri (polialkoller), orta sıcaklık aralığında (90–200 °C) FDM’lerde yüksek olan materyallerdir. Ksilitol, eritritol ve manitol gibi şeker alkollerinin, bir diğer organik FDM'lere kıyasla daha yüksek gizli ısı değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir.

Esterler

Esterler, karboksilik asitlerin hidroksil (–OH) gruplarının alkil grupları (–OR) ile yer değiştirmesi sonucunda oluşan bileşiklerdir. Yağ asidi esterleri, dar sıcaklık aralıklarında gerçekleşmiş olab faz değişimi ile öne çıkar ve düşük aşırı soğuma eğilimleri sayesinde ise ötektik karışımlar oluşturabilirler.

Bu özelliklerinden kaynaklı yapı malzemeleri, kozmetik, polimer ve akıllı tekstil gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Louati ve diğ., 2016).

Polietilen Glikol

Polietilen glikol (PEG), polioksietilen (POE) veya polietilen oksit (PEO) yaygın olarak bilinen, uç kısımlarında hidroksil grupları bulunan ve eter bağları içeren bir polimerdir.

Bu yapısı özelliği sayesinde hem suda hem de birçok organik çözücüde çözünebilen PEG, farklı molekül ağırlıklarında (örneğin 400, 600, 1000, 3400, 10.000, 20.000, 35.000, 100.000 ve 1.000.000) ticari olarak temin edilebilmekle beraber uzun süreli kimyasal ve termal dayanımları ve maliyet açısından avantajlarıyla oldukça dikkat çekmektedir. Moleküler ağırlık arttıkça, PEG'in erime noktası ve gizli ısı kapasitesi de artmaktadır (Chen ve diğ., 2011).

Bio Bazlı FDM'ler

Bio-bazlı FDM'ler, organik FDM'lerin yeni bir kategorisi olmakla beraber soya yağı, hindistan cevizi yağı, palmye yağı ve sığır yağı gibi yaygın olarak kullanılmayan ham maddelerden elde edilmektedir. Organik FDM'lerle kıyaslandığında, bu materyaller daha yüksek gizli ısıya, daha iyi kimyasal stabiliteye sahip olmaktadır. Ayrıca az yanıcıdır ve oksidasyona uğramadan birçok erime/donma çevrimi hızında stabil kalabilirler. Bunun yanı sıra, erime noktalarının 22,77°C ile 77,83°C arasında değiştirilebilmesi, onları çeşitli uygulamalarda kullanılabilir zemin oluşturur ve mükemmel mikrokapsülleme yeteneği sunar (Zhang, 2020). Fakat, diğer organik FDM'ler gibi, bio-bazlı FDM'ler düşük ısı iletkenlik ve sızdırma problemi gibi zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır (Liu, 2019). Bio-bazlı FDM'lerin, alçı levha, beton ve diğer gözenekli materyallere göre entegre edilmesi gerekmektedir (Gao, 2017).

Bu çalışmada kompozit FDM üretiminde kullanılan malzeme organik FDM sınıfında yer alan bir yağ asidi olan laurik asittir. Bir sonraki bölümde yağ asitleri ile ilgili detaylı inceleme verilmiştir.

2.2. Faz Değişim Malzemesi Olarak Kullanılan Yağ Asitleri

Yağ asitleri, enerji kullanımını optimize etmek ve binaların ısı yönetimini en iyi haline getirmek amacıyla FDM'ler yaygın olarak kullanılmaktadır. FDM'ler, faz değişimi esnasında büyük miktarda enerji depolayarak ısıyı yönetebilmektedir. Organik yağ asitleri, düşük kimyasal reaktiviteye, yüksek termal stabiliteye ve biyolojik olarak çözünebilir haline ek olarak, çevre dostu olmaları sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Fakat, yağ asitleri geniş bir erime sıcaklık aralığına sahiptir ve sahip oldukları bu özellik yağ asitlerini inşaat sektöründe enerji verimliliği sağlamak için ideal hale getirmektedir (Liu, 2019).

Yağ asitlerinin termal depolama kapasitesinin yanında, erime ve donma işlemleri esnasında ve sabit bir sıcaklıkta ısı depolama yeteneği olan özelliği sayesinde, FDM olarak ideal özellik taşımaktadır. Yoğun olarak, laurik asit, yağ asitleri arasında olan FDM detaylı bir şekilde araştırılmakta ve kullanılmaktadır. Laurik asit ($C_{12}H_{24}O_2$), yaklaşık olarak 43-45°C erime sıcaklığı ve 170-200 J/g civarı gizli ısı kapasitesine sahiptir. Isının depolanması ve serbest bırakılması konusunda oldukça verimli bir FDM olarak oluşturmaktadır. Bu özellikler doğrultusunda, laurik asidi, düşük sıcaklıklarda faz değişimi gerektiren binalar ve diğer yapılar için kusursuz bir seçenek oluşturmuştur. Laurik asidin, diğer yağ asitlerine oranla daha yüksek termal stabiliteye ve düşük kimyasal reaktiviteye sahip olmasıdır. Hem iç mekan ısıtma ve soğutma sistemlerinde bunun yanında sürdürülebilir enerji sistemlerinde önemli bir malzeme haline getirmektedir. Laurik asidin erime sırasında sıvı hale geçmesi, sızıntı ve kayıp sorunlarına yol açar ve bu da uygulamalarda büyük bir zorluk oluşturmaktadır (Wang ve Ramírez, 2014).

Laurik asidin sıvı fazda gerçekleşen sızma problemini önlemek amacıyla, son yıllarda gözenekli taşıyıcı malzemeler tercih edilerek birçok alanda çalışmalar yapılmıştır. Bu taşıyıcılar, FDM'nin sıvılaşma sonucunda sızmasını engelleyerek, malzemenin şekil ve termal stabilitesini artırmayı sağlamaktadır. Örnek verecek olursak, genişletilmiş grafit (EG) ve genişletilmiş perlit (EP) gibi gözenekli olan mineraller, laurik asidi sınırlı olarak sızıntıyı önlemekte ve termal iletkenliğide artırmaktadır. Yapılan bir araştırma sonucunda, kaprik asit, palmitik asit ve stearik asit karışımından genişletilmiş grafit ile birleştirilerek 140,22 J/g'lık gizli ısı kapasitesine sahip bir kompozit FDM oluşturulmuştur. Bu tür oluşan kompozit malzemeler, yağ asitlerinin özelliklerini iyileştirerek, uygulama alanlarında sıvı sızıntısı riskini en aza indirmek ve termal stabiliteyi artırmaktadır (Liu ve diğ., 2015).

Laurik asit gibi olan yağ asitlerinin kullanımında, yalnızca binalarda enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli faydalar sağlamaktadır. Yağ asitlerinin organik kökeni, biyolojik olarak çözünebilen ve çevre dostu malzemeler olarak öne çıkarırken bunun yanında enerjinin depolanması ve serbest bırakılması süreçlerinde gösterdikleri ve sahip oldukları yüksek performans, onları çeşitli ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılabilir kılmıştır. Bu sebepten dolayı, laurik asit ve diğer yağ asitleri, termal enerji depolama sistemlerinin etkinliğini artırarak binalarda enerji tasarrufu sağlar bunun yanı sıra, karbon salınımının azaltılmasına da yardımcı olmaları ihtimal dahilindedir (Wang ve Ramírez, 2014).

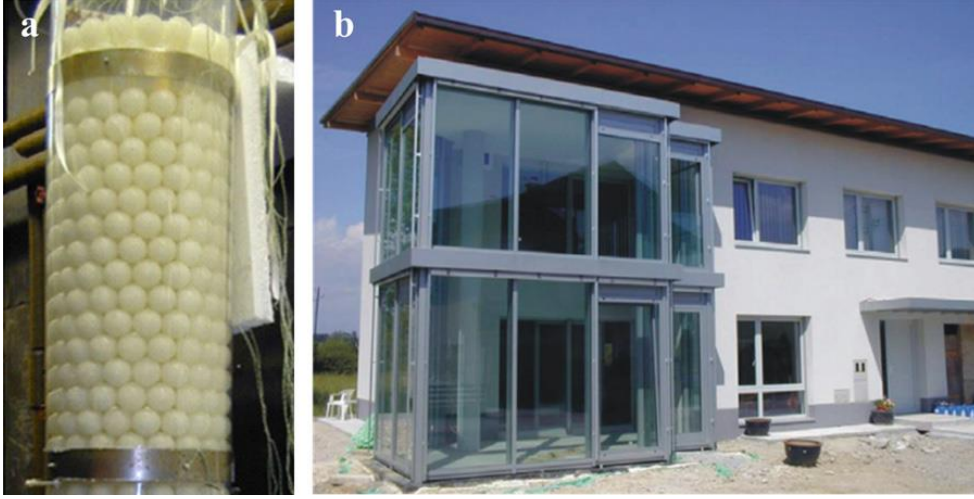
2.3. FDM'lerin Kullanım Alanları

FDM'ler, belirtilmiş olan sıcaklık aralığında faz değişim oluşturarak ısıyı depolama ve serbest bırakma özelliğine sahip malzemeler olmuştur. FDM'ler, özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde, inşaat sektöründe, tıbbi taşımacılıkta, tekstil sektörü ve elektronik cihazlarda çeşitli uygulama alanlarına sahiptirler. Bu malzemeler, yüksek enerji depolama kapasitesine sahiptir ve enerji tasarrufu sağlamak amacıyla sıcaklık dengelemesi yaparak sıcaklık dalgalanmalarını azaltmak için son derece etkilidir (Kuznik ve diğ., 2015).

FDM'lerin farklı kullanım alanları aşağıda detaylandırılarak, literatürdeki örneklerle birlikte verilmiştir.

İnşaat ve Binalarda FDM Kullanımı

İnşaat sektöründe kullanılan, FDM'ler binalarda iç mekan sıcaklıklarını dengeleyen önemli bir araçtır. FDM'lerin duvarlar, tavanlar ve zeminlere entegre halinde çalışması, enerji tasarrufu sağlamanın yanında iç mekanlarda sıcaklık dalgalanmalarını da önemli ölçüde azaltır. Bu, bina sakinlerinin daha konforlu bir ortamda yaşam alanı sağlar ve bunun yanında enerji tüketimini düşürür. Binalarda, FDM'ler duvarlara, tavanlara ve zeminlere yerleştirilerek sıcaklık dalgalanmalarını azaltır ve iç mekan konforunu iyileştirirken enerji tüketimini de aynı oranda azaltır. Şekil 2.2'de silindirik olarak tasarlanmış bir FDM kabini ve FDM'nin kullanıldığı bir bina uygulaması görülmektedir (Farid ve diğ., 2004).



Şekil 2.2. (a) Silindirik FDM cihazı; (b) Düşük enerjili bina (Arkar ve Medved, 2007).

Tıbbi Uygulamalarda FDM Kullanımı

FDM'ler, tıbbi taşımacılık ve ilaç depolama alanında da yaygın olarak kullanımı bulunmaktadır. Özellikle sıcaklık kontrolü gerektiren durumlarda ilaçların taşınmasında FDM'ler, sabit bir sıcaklık aralığının korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu durum, ilaçların etkinliğini artırarak güvenliğini sağlamak için son derece kritik bir faktör olmuştur (Kenisarin ve diğ., 2014).

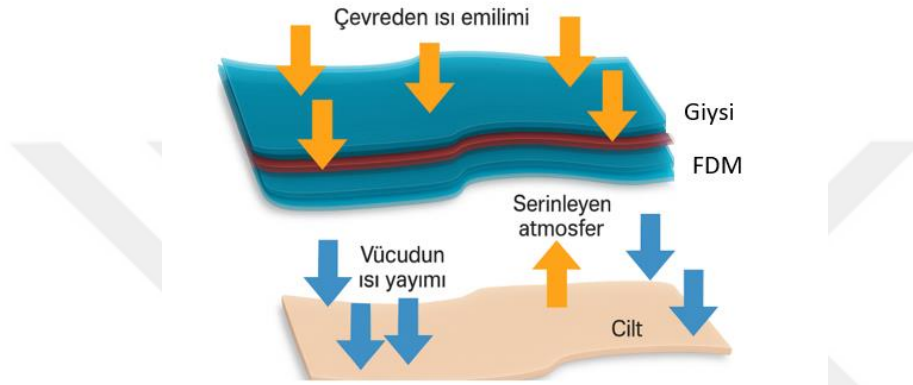
FDM'leri, ısıya hassas ilaç ürünlerinin güvenli taşınması için gerekmekte olan sıcaklık stabilitesini sağlamakta etkilidir (Kumar ve diğ., 2023). Şekil 2.3'de FDM'lerin tıbbi uygulamalarına yönelik örnekler görülmektedir.



Şekil 2.3. Terapotik Tedavisi ve Yeni Doğan Soğutucu (Mehling ve diğ., 2008).

Tekstil Sektöründe FDM Kullanımı

Tekstil sektöründe kullanılan FDM'ler, vücut sıcaklığını belirli seviyede düzenleyerek aşırı ısınmayı engeller ve soğuk hava koşullarında vücut ısınısını korumaktadır. Bu malzemeler, farklı hava koşullarında çalışan kişiler için önemli ölçüde faydalıdır ve ısıyı depolayarak vücut sıcaklığını sabit tutmaktadır. FDM'lerin giysilere entegrasyonu, vücut sıcaklığını hem sıcak hem de soğuk çevre koşullarına göre düzenleyerek ısı konforu sağlar. Şekil 2.4'de giysilerde kullanılan FDM'nin çalışma mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Isı Koruma Giysilerinin Temel Mekanizması (Mehling ve diğ., 2008).

Elektronik ve Akıllı Cihazlarda FDM Kullanımı

Elektronik cihazlarda FDM'ler, aşırı ısınmayı önlemek amacıyla kullanılır ve bu malzemeler, cihazların işlemcilerinin sıcaklıklarını dengeleyerek cihazın ömrünü uzatır daha verimli çalışmasını sağlar (Ianniciello ve diğ., 2018). Elektronikte, FDM'ler, ısıyı emerek aşırı ısınmayı önler ve bu sayede cihazların performansının ömrünü artırır (Li ve diğ., 2019). Şekil 2.5'de FDM'nin soğutmalı bir kurutucuda kullanımı gösterilmiştir.

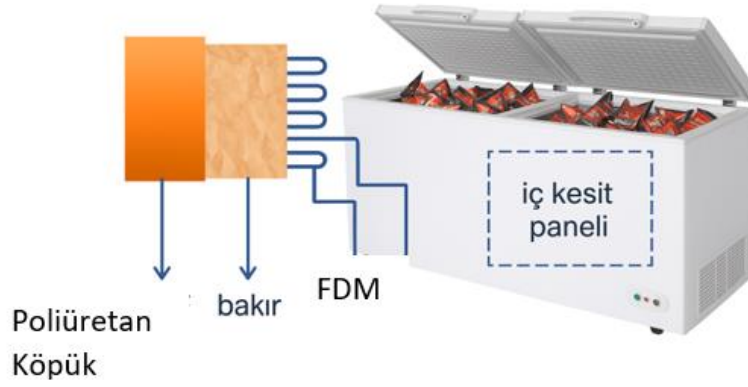


Şekil 2.5. Gizli ısı depolama özelliğine sahip enerji tasarrufu soğutucu kurutucu (Mehling ve diğ., 2008).

Gıda Endüstrisi ve Taşımacılık Sektöründe FDM Kullanımı

Gıda taşımacılığında, FDM'ler sıcaklık kontrolünü sağlamak için kullanılmaktadır. Bu malzemeler, taze gıda ve dondurulmuş ürünlerin taşınmasında önemli bir rol oynar. FDM içeren taşımacılık konteynırları, gıda ürünlerinin taze kalmasını sağlar ve bozunabilir gıda ürünlerinin taşınmasında yaygın olarak kullanılır sıcaklık stabilitesini sağlayarak raf ömrünü uzatır (Cabeza ve diğ., 2002). Şekil 2.6'da FDM'nin gıda ve endüstrisi ve taşımacılıkta kullanımına yönelik örnekler görülmektedir.



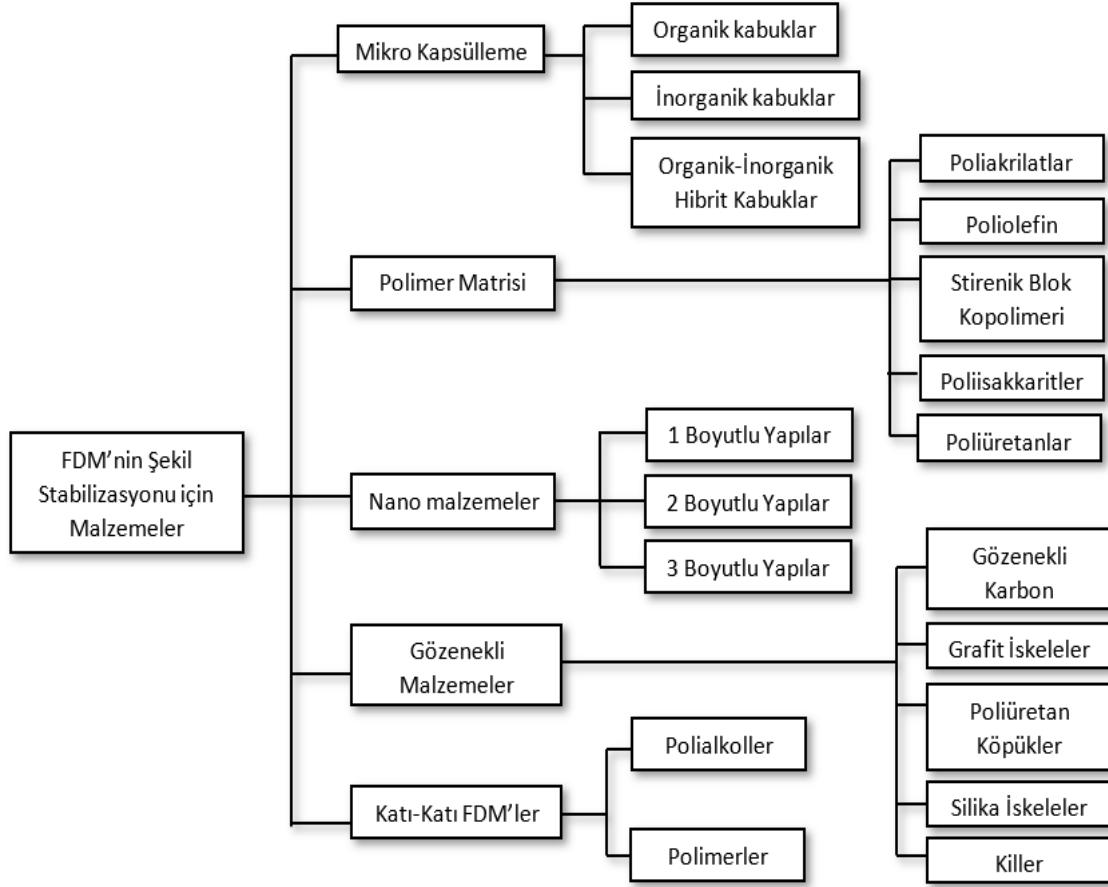


Şekil 2.6. Yalıtımlı soğutmalı kamyonlara monte edilmiş FDM dolgulu metal plakalar, FDM şarj olurken bekleme modundaki kamyonlar, Dondurucu/soğutucu ekipman (Rodrigues ve diğ., 2021)

2.4. Şekilce Kararlı Faz Değiştiren Malzemeler

FDM'ler, termal ve kimyasal özellikleri ile ekonomik avantajları açısından güneş enerji sistemleri, binaların ısıtma/soğutma sistemleri ve tekstil gibi birçok alanda yaygın kullanım alanları oluşturur. Fakat bu malzemeler, uygulama alanlarına bağlı olarak bazı sınırlara sahiptir.

Yapı malzemelerine entegre edilen FDM'lerde, faz değişimi esnasında şekil stabilitesi kaybı ve hacimsel genleşme gibi sorunlar göz önüne çıkmıştır. Bu nedenle, FDM'lerin performansını artırarak kapsülleme ya da gözenekli matrisler içinde sabitlenmelerini önermektedir. Şekil 2.7'de FDM'lerin şekilce kararlılığının sağlanmasında kullanılan yapılar görülmektedir. Kapsülleme işlemi (mikro ve makro) dış ortamdan korunmayı ve ısı transfer yüzeyini artırmayı sağlamış olsa bile, yüksek maliyet ve düşük ısı iletim verimliliği gibi dezavantajlara sahip olmuştur. Diğer bir olasılık olarak, gözenekli yapıların kullanımı FDM'lerin şekil kararlılığını koruması daha uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Iqbal ve diğ., 2014).



Şekil 2.7. Organik FDM'lerin şekil stabilizasyonunda kullanılan destekleyici malzemelerin sınıflandırılması (Teggar ve diğ., 2021).

Gözenekli malzemeler üstün emilim özelliğine sahiptir ve üstün emilim özelliği düşük yoğunluk, geniş yüzey alanı ve geniş gözenek boyutu dağılımından kaynaklanmaktadır. FDM'lerin şekilce kararlılıklarının sağlanması durumunda gözenekli karbon yapılar, grafit içeren yapılar, gözenekli polimerler, silika içerikli yapılar ve çeşitli kil mineralleri; sepiyolit, vermikülit, halloysit vb. kullanılabilmektedir (Borg ve diğ., 1999).

FDM'ler, yenilenebilir enerjinin entegrasyonu ve yönetimi açısından bakıldığında giderek daha fazla ilgi oluşmakta ve özellikle polijenerasyon sistemlerine yönelik gelişmiş termal enerji depolama çözümlerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Kasaeian ve Zhang, 2017). Termal enerji genellikle bakıldığında duyulur ısı veya gizli ısı yoluyla depolanmaktadır. Duyulur ısı depolaması, malzemenin sıcaklık değişimi halinde ısının biriktirilmesini sağlarken; gizli ısı depolaması, malzemenin faz geçişi sırasında ısıyı absorbe etmesine veya salmasına dayanmaktadır (Zhang ve Ianniciello, 2020).

Yüksek enerji yoğunluğu ve dar sıcaklık aralığında çalışma yeteneğiyle, gizli ısı depolama malzemeleri; akıllı mikro şebekeler (Kuznik ve diğ., 2015), taşınabilir termal piller (Cunha ve Eames, 2016), iç mekân iklimlendirme sistemleri (Han, 2017), termoregülatör tekstiller (Lee ve Iqbal, 2018) ve güneş enerjisiyle çalışan çeşitli cihazların (Gao ve Kee, 2018) geliştirilmesinde etkin biçimde kullanılmaktadır. Bu kapsamda göz önünde bulundurulduğunda parafin türevleri, yağ asitleri ve polietilen glikol gibi organik katı-sıvı faz değişim malzemeleri en yaygın tercih edilen alternatifler arasında yer almaktadır (Khan ve Kenisarin, 2017).

Organik FDM'ler, etkili termal enerji depolama kapasitelerine karşı, sızıntı problemleri nedeniyle özellikle bakıldığında elektronik cihazlar ve paketleme uygulamalarında ciddi kirlenmelere ve donanımsal arızalara yol açabilmektedir. Bu sorunun önlenmesi durumunda en yaygın ve etkili yöntemlerden biri, FDM'lerin destekleyici bir matris içerisinde fiziksel olarak sabitlenerek şekilce sabitleme (shape-stabilization) tekniği gerçekleşir (Kasaeian ve Zhang, 2017). Bu teknik sayesinde endüstriyel ölçekte toz veya granül formda kompozit SSPCM'lerin üretilmesine olanak tanıyarak, organik FDM'lerin uygulama alanlarını genişletmiştir. Şekil sabitlenmiş faz değişim malzemeleri (SSPCM'ler), termal enerjiyi faz geçişi sırasında depolayan aktif FDM bileşeni ile beraber, eriyik haldeki malzemenin dışarı sızmasını engellemiş olur ve sistemin formunu koruyan destekleyici yapıyı oluşturur (Zhang ve Ianniciello, 2012).

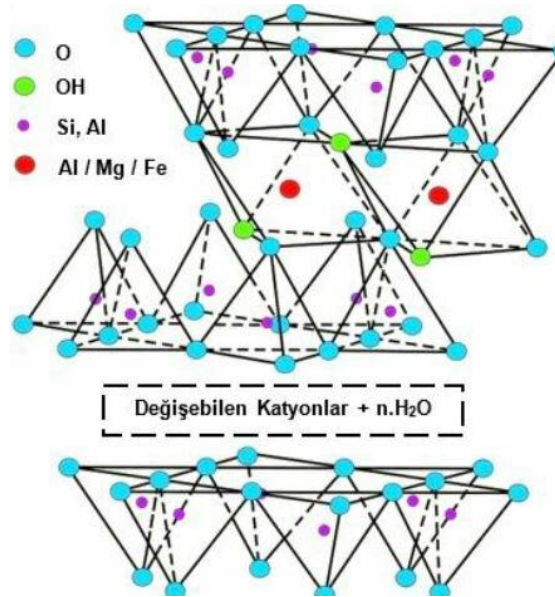
Uygulama alanına elverişli destekleyici malzeme seçiminde uygun şekil sabitleme stratejisinin belirlenmesi, SSPCM sistemlerinin performansı açısından belirleyici öneme sahiptir. Literatürde bulunan çeşitli çalışmalar, yüksek oranda FDM yüklemesine olanak tanıyarak ve aynı zamanda yüksek termal enerji depolama yoğunluğu sağlayarak destekleyici malzemelerin başarıyla geliştirildiğini ortaya koymuştur (Kuznik ve diğ., 2011).

Belirli bir şekil sabitleme yönteminde, FDM'lerin enerji depolama kapasitesi ve termal performansını minimize etmek için çeşitli tasarım parametrelerini dikkate alması gerekmektedir. Örnek olarak, mikro kapsülleme yönteminde kapsülleme verimliliği ve kabuk malzemesinin mekanik dayanımı oldukça önemlidir ve bu malzemeler polimer matris tabanlı şekil sabitleme sistemlerinde, polimerin kimyasal uyumluluğu ve termal kararlılığı, kompozitin uzun vadeli işlevselliğini belirleyen başlıca faktörlerdir (Zhang ve diğ., 2012).

Nanomalzeme destekli FDM kompozitlerinde ise sentez yöntemi kullanılır ve destek yapının gözenekli morfolojisi, FDM'nin tutulum kapasitesini ve yapısal kararlılığını doğrudan etkilemektedir (Han, 2017). Bu teknik sayesinde, yalnızca organik FDM'lerin sızma gibi temel zayıflıklarını gidermez, aynı zamanda dış uyarılara yanıt verebilen akıllı gizli ısı depolama sistemlerinin geliştirilmesine de imkan tanımaktadır. Ayrıca, katı-katı faz değişimi gösteren yeni FDM'ler ile yapılan şekil sabitleme uygulamaları, sıvı FDM'lerin sınırlanma ihtiyacını ortadan kaldırarak; daha az faz ayrımı, daha küçük hacim değişimi ve yüksek geçiş entalpisi gösteren sızdırmaz SSPCM'lerin elde edilmesine olanak sağlamıştır (Pandey ve diğ., 2018).

2.5. Killer ve Killerin Destek Materyali Olarak Kullanımı

Kil mineralleri, alüminyum silikat bileşenleri içeren (Şekil 2.8) ve genellikle yüksek su emme özelliğine sahip doğal minerallerdir. Bu mineraller, özellikle yapılarındaki porozite ve su tutması sayesinde inşaat sektöründe önemli bir malzeme grubunu oluşturmaktadır. Binalarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla FDM'lerin kullanılması, iç mekan sıcaklıklarını dengelemede etkili bir yöntem olmuştur. Fakat, FDM'lerin sıvı hale geçmesi esnasında sıvı sızıntıları meydana gelebilir ve bu da malzemenin verimliliğini ve stabilitesini olumsuz yönde etkiler. Bu durumdan dolayı, FDM'ler yaygın olarak taşıyıcı malzemelerle birleştirilerek daha stabil hale getirilmektedir (Hekimoğlu ve diğ., 2021).



Şekil 2.8. Kil Minerallerinin Tabaka Yapısı (Kök ve diğ., 2018).

Kil mineralleri, yüksek poroziteye sahip olmaları ve sıvı emme özellikleri sebebiyle, FDM'lerin taşıyıcı malzemesi olarak kullanılması için oldukça uygun bir özellik taşımaktadır. Kil mineralleri, FDM'lerin sıvı faza geçerken dışarı sızmalarını engelleyerek, hem ısı hem de yapısal stabiliteyi artırır ve FDM'ler etkin bir şekilde enerji depolama kapasitesine sahip olarak sıcaklık dalgalanmaları minimize eder. Kil mineralleri arasında attapulgit, bentonit ve genişletilmiş perlit gibi türler, FDM taşıyıcıları olarak karşımıza çıkmaktadır. Attapulgit, magnezyum-alüminosilikat yapısı ile dikkat çeker ve yüksek su emme kapasitesine sahip olduğundan dolayı FDM'lerin sıvı hale geçtiklerinde sızıntıları engellemeye yardımcı olur (Li ve diğ., 2018).

Bu mineral, porozitesi sayesinde FDM'leri emerek ısı kararlılığı artırır ve uzun sürelerde malzemenin performansını iyileştirmektedir. Bentonit ile benzer özelliklere sahip bir kil minerali olan ve özellikle yüksek alumina ve silika içeriği ile FDM'lerin stabilitesine katkıda bulunur. Bentonit, FDM'lerin yapısal bütünlüklerini koruyarak, ısı depolama özelliklerini artırır (Jia ve diğ., 2020).

Genişletilmiş perlit, düşük yoğunluklu ve yüksek yüzey alanına sahiptir ve FDM'lerin taşıyıcısı olarak kullanıldığında yüksek termal depolama kapasitesine sahiptir. Bu malzemeler, ısıyı etkin bir şekilde depolar ve sıcaklık dalgalanmalarını düşürerek, binaların iç ortamını daha konforlu hale getirir. Bunun yanında, bu mineralin düşük maliyetli ve çevre dostu olmasından dolayı, sürdürülebilir inşaat uygulamaları için dikkat çekici bir seçenek haline getirir (Lv ve diğ., 2017). Faz değişim malzemelerinin şekilce kararlılığının sağlanmasında killer yaygın olarak tercih edilmektedir. Killerin destek malzemesi olarak kullanımına yönelik çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

- Lv ve arkadaşları (Lv ve diğ., 2016), kaolinin farklı parçacık boyutlarının parafin/kaolin kompozitlerinin faz değişimi ve sızdırmazlık özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu amaçla, öncelikle kaolin örnekleri 75 °C'de 12 saat boyunca vakum altında kurutularak gözeneklerdeki nem uzaklaştırılmıştır. Farklı yüzey alanlarına sahip dört kaolin türü (K1–K4) değerlendirilmiş; bu değerler sırasıyla 1211, 753,3, 730,8 ve 663,1 m²/kg olarak ölçülmüştür. Kompozit malzemeler, %0–60 arasında değişen parafin kütle oranlarıyla, 75 °C'de 30 dakika vakum altında hazırlanmıştır.

DSC analizleri, %40 parafin içeren kompozitlerin gizli ısılarının K1–K4 için yaklaşık 117–119 J/g aralığında değiştiğini ve bu değerlerin saf parafine (200,23 J/g) göre daha

düşük olduğunu göstermiştir. Yapılan sızdırmazlık testleri sonucunda, özellikle daha küçük yüzey alanına sahip kaolin türleriyle (K3 ve K4) üretilen örneklerde ciddi sızıntılar gözlemlenirken, en yüksek yüzey alanına sahip K1 ile hazırlanan kompozitin daha kararlı olduğu belirlenmiştir.

- Ramakrishnan ve çalışma arkadaşları (Ramakrishnan ve diğ., 2015), genişletilmiş perlitin (EP) yüzey özelliklerinin çimentolu faz değişim malzemesi (FDM) kompozitlerinin performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, hidrofobik kaplamalı (EPO) ve kaplamasız (EPW) perlit örnekleri kullanılarak hem doğrudan hem de vakumlu emdirme yöntemleriyle FDM kompozitleri hazırlanmış, ardından bu kompozitler çimento ile karıştırılarak çimento içerikli yapı malzemeleri elde edilmiştir. Yapılan sızıntı testleri, parafin içeriği %35 olan EPW tabanlı kompozitlerin belirgin sızıntı sorunları yaşadığını göstermiştir. Buna karşılık, %50 parafin içeren EPO tabanlı kompozitlerde sızıntı gözlenmemiştir. Bu durum, EPO'nun hidrofobik yapısının gözenekli yapıyla su arasındaki etkileşimi sınırlandırarak şekil kararlılığını artırmasına bağlanmıştır. DSC analizleri, EPO içeren kompozitlerin ısı depolama kapasitesinin ($\Delta H_m = 60,9 \text{ J/g}$, $\Delta H_f = 61,8 \text{ J/g}$) EPW içerenlere ($\Delta H_m = 35,5 \text{ J/g}$, $\Delta H_f = 32,8 \text{ J/g}$) kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.
- Xu ve çalışma arkadaşları (Xu ve diğ., 2015), parafin ve genişletilmiş vermikülit (EV) esaslı şekil kararlı faz değişim malzemesi (SSPCM) içeren çimentolu kompozitler geliştirmiştir. Çalışmada, vermikülit 700, 800 ve 1000 °C'de kalsinasyon işlemine tabi tutulmuş ve 800 °C'de 1 saat süreyle işlem gören örneğin optimum mikroyapı ve kristallik özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir. Vakum emdirme yöntemiyle farklı parafin/EV-800 oranlarında hazırlanan kompozitlerde, 0,6/1,0 oranından daha yüksek parafin içeriğinin sızıntıya yol açtığı tespit edilmiştir. Termal analiz sonuçları, %37 parafin içeren şekilce kararlı FDM'nin 27,0 °C'de erimeye başladığını ve 77,6 J/g gizli ısıya sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, uygun işlem koşullarında elde edilen genişletilmiş vermikülitin, ısı enerjisi depolama uygulamaları için etkili bir taşıyıcı matris olabileceğini göstermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında yukarıda özetlenen çalışmalardan farklı olarak ticari bir firmadan temin ettiğimiz refraktif killerin laurik asitin şekilce kararlılığının sağlanmasında destek materyali olarak kullanım potansiyelini inceledik. Yapılan deneysel çalışmalar ve analiz sonuçları Bölüm 3 ve 4'de yer almaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kimyasallar

Refrakter kil (RC) Yalova ilinde bulunan ticari bir firmadan, laurik asit (LA, %98 saflıkta, $C_{12}H_{24}O_2$, molekül ağırlığı=200,32 g.mol⁻¹, erime noktası: 44-46 °C) ise Sigma-Aldrich'ten temin edildi. Genişletilmiş grafit (EP, %96 saflıkta, boyut 70 µm) Nanografi, Türkiye'den satın alındı. Organik çözücüler Merck (Darmstadt, Almanya) firmasından alındı. RC'nin, deneylerde kullanılmadan önce vakum etüvünde nemi giderildi.

3.2. Deneysel Metod

3.2.1 Laurik Asit/Refraktif Kil (LA/RC) kompozitlerinin hazırlanması

Farklı kompozisyonda LA/RC kompozitleri çözücü destekli impregnasyon yöntemiyle hazırlandı. Öncelikle FDM belli bir sıcaklığa ısıtıldı ve eritildi. Daha sonra taşıyıcı çözücü içerisinde dağıtıldı. Karıştırma işleminden sonra üzerine belirli oranda RC eklendi ve çözelti homojenizasyon için ultrasonik banyoya yerleştirildi. Daha sonra çözelti belli sıcaklıkta belirli süre mekanik olarak karıştırıldı ve ardından önceden ısıtılmış vakumlu fırına yerleştirildi. Çözücü uzaklaştırıldıktan sonra toz LA/RC kompozitleri elde edildi. Bir sonraki adımda maksimum LA içeren kararlı kompozit FDM'yi belirlemek için sızıntı testi yapıldı. Bu amaçla farklı kompozisyonlardaki LA/RC kompozit FDM'ler filtre kağıdına konuldu ve FDM erime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa önceden ısıtılmış olan vakumlu bir fırına yerleştirildi. 2 saat sonra numunelerde herhangi bir sızıntı olup olmadığı değerlendirildi.

LA/RC kompozitlerinin termal iletkenliğini artırmak için, sızdırmaz özellikte olduğu belirlenen en yüksek FDM içerikli kompozit, yüksek iletkenliğe sahip genişletilmiş grafit (EP) parçacıkları ile katkılındı. EP parçacıkları (%5 ağırlıkça) organik çözücüde dağıtılmış ve homojenizasyon için önceden ısıtılmış ultrasonik banyoya konulmuştur. Kompozit FDM, EP çözeltisine eklenmiş ve belirli süre mekanik olarak karıştırılmıştır. Elde edilen çözelti belli sıcaklıktaki vakumlu bir fırına yerleştirilmiş ve çözücü uzaklaştırılmıştır. Farklı kompozisyonlarda hazırlanan kompozit FDM'lerin üretim adımları Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. LA/RC kompozit FDM'lerin üretim süreci

3.3. Kompozit FDM'lerin Karakterizasyonu

RC'nin kimyasal bileşimi X-ışını Floresan spektroskopisi (XRF, Spectro, Xepos II) ile belirlendi. Numunelerin morfolojik ve kimyasal yapı analizleri sırasıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI, Quanta FEG 250) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) (Perkin Elmer, Spectrum 100) ile gerçekleştirildi. Kompozitlerin faz geçiş sıcaklıkları ve erime/kristalleşme gizli ısısı diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) (Perkin Elmer DSC 4000) ile belirlendi. Ölçümler 0 ila 80 °C sıcaklık aralıklarında, N₂ atmosferinde gerçekleştirildi. Kompozitlerin termal kararlılığı, 25-600 °C sıcaklık aralığında, termogravimetrik (TG) analiz (TGA, HITACHI, STA 7300) ile araştırıldı. RC'nin özgül yüzey alanı ve gözenek özellikleri, Micromeritics Gemini VII 2390t Tam Otomatik BET Cihazı ile Brunauer-Emmet-Teller (BET) adsorpsiyon modeline göre belirlendi.

Kompozit FDM'nin termal güvenilirliğini test etmek için Ruicheng MTC 3200 termal döngü cihazı kullanıldı ve 100 ardışık ısıtma/soğutma çevrimi gerçekleştirildi. Numunelerin termal davranışı, laboratuvar ölçekli kurulan deney sisteminde T-kayıt testi uygulanarak izlendi.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Refraktif Kilin ve Kompozit FDM'lerin Karakterizasyon Sonuçları

4.1.1 Refraktif kilin kimyasal bileşiminin belirlenmesi

RC'nin kimyasal bileşimi X-ışını Floresan spektroskopisi ile belirlendi ve sonuçlar Tablo 4.1'de sunuldu. Tablo 4.1'den görüldüğü üzere RC'de bulunan başlıca bileşenler SiO_2 (%56,01), Al_2O_3 (%41,96) ve TiO_2 (%1,26)'dir.

Tablo 4.1. RC'nin XRF ile belirlenen kimyasal bileşimi

Element Formu			Oksit Formu		
Sembol	Element	Konsantrasyon (ppm)	Sembol	Element	Konsantrasyon (%)
Si	Silisyum	261800	SiO_2	Silisyum	56,01
Al	Alüminyum	222100	Al_2O_3	Alüminyum	41,96
K	Potasyum	8911	TiO_2	Titanyum	1,26
Ti	Titanyum	7565	K_2O	Potasyum	<1,0
Fe	Demir	5917	Fe_2O_3	Demir	<1,0
Na	Sodyum	5770	Na_2O	Sodyum	<1,0
Mg	Magnezyum	2625	MgO	Magnezyum	<1,0
Ca	Kalsiyum	2179	CaO	Kalsiyum	<1,0
S	Sülfür	408,9	SO_3	Sülfür	<1,0
P	Fosfor	296,3	P_2O_5	Fosfor	<1,0

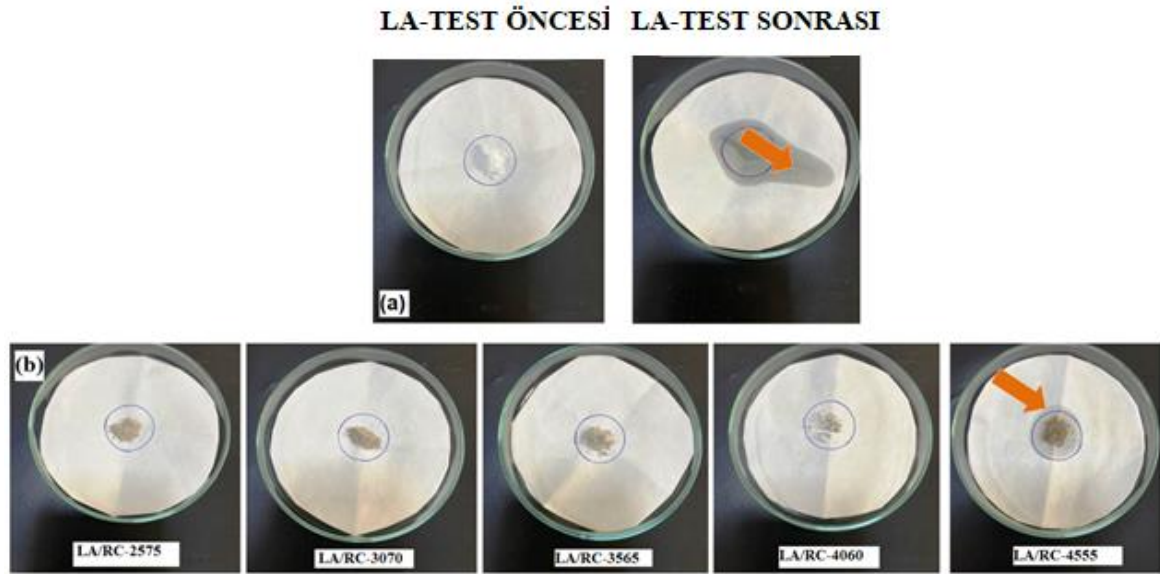
4.1.2 Kompozit FDM'lerin sızdırma testi sonuçları

Farklı kompozisyonlarda üretilen kompozit FDM'lerin sızdırma testi sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir ve testten sonra alınan numunelerin fotoğrafları Şekil 4.1'de sunulmuştur. Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, LA oda sıcaklığında kararlı ve katı olmasına rağmen, testin sonunda sıvı forma dönüşmüştür. Öte yandan, kompozit FDM'ler şekilce kararlılıklarını korudu ve filtre kağıdında LA/RC-4555 kompozitinin dışında herhangi bir sızıntı tespit edilmedi.

Bu sonuca göre, LA/RC-4060 herhangi bir sızıntı olmadan maksimum LA içerikli şekil stabilize kompozittir.

Tablo 4.2. Üretilen kompozit FDM'lerin kompozisyonları

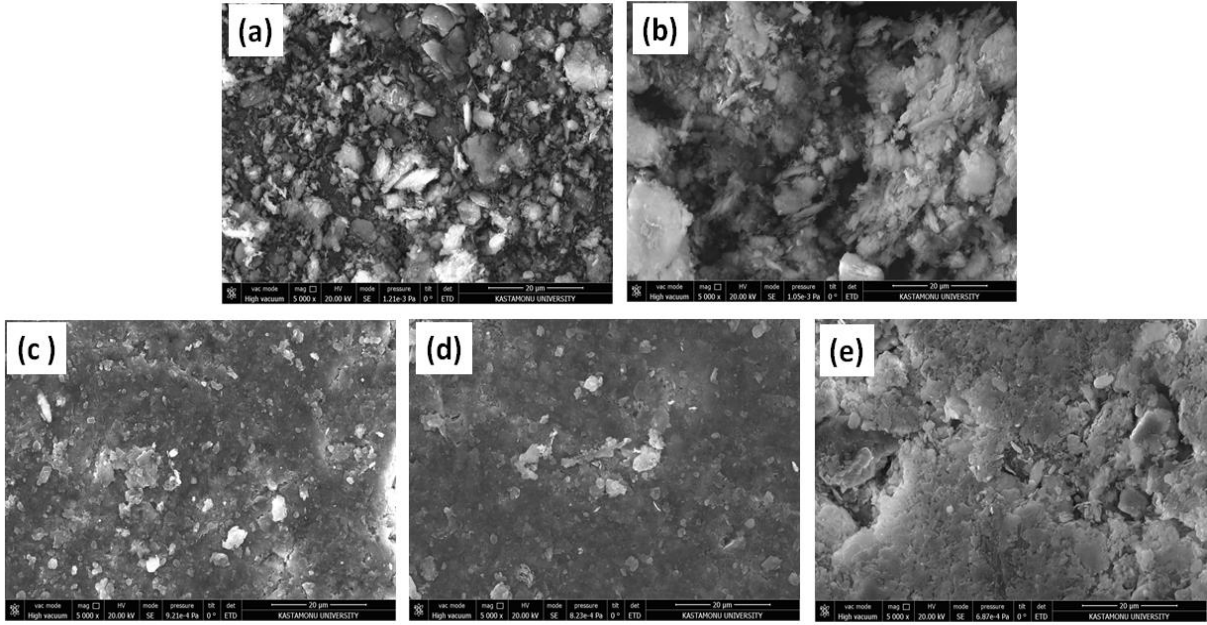
Örnek	Kompozisyon oranı	Sızdırma davranışı
LA/RC-2575	%25LA-%75RC	Sızma yok
LA/RC-3070	%30LA-%70RC	Sızma yok
LA/RC-3565	%35LA-%65RC	Sızma yok
LA/RC-4060	%40LA-%60RC	Sızma yok
LA/RC-4555	%45LA-%55RC	Sızma var



Şekil 4.1. Sızdırma testi sonuçları (a) LA ve (b) LA/RC kompozit FDM'ler

4.1.3 Morfolojik analiz sonuçları

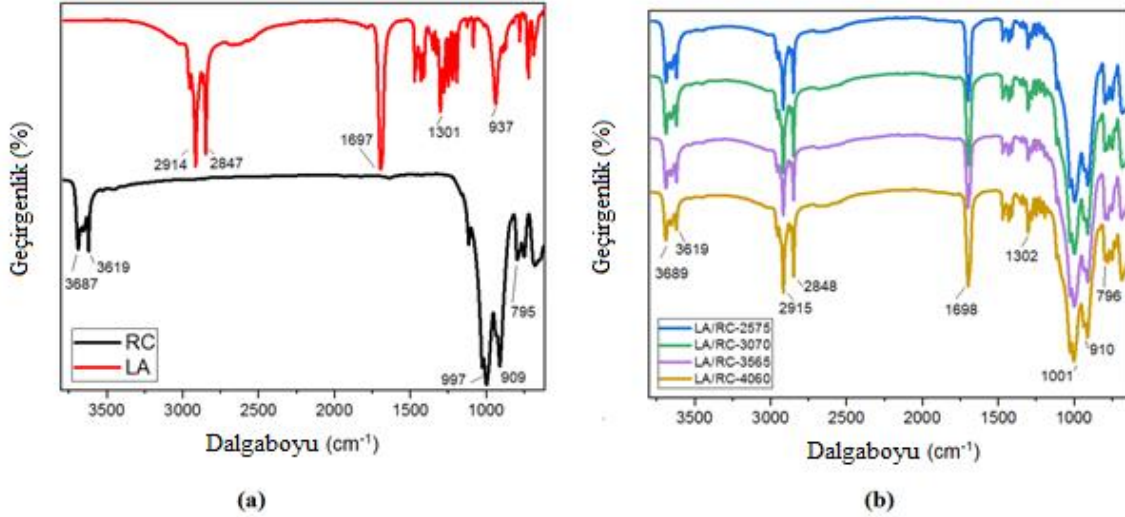
Şekil 4.2'de refraktif kilin ve üretilen kompozitlerin SEM analizi ile belirlenen morfolojik yapıları verilmiştir. Şekil 4.2(a)'da açıkça görüldüğü gibi, RC yığılmış katmanlı parçacıklardan ve düzensiz gözeneklerden oluşmaktadır. Öte yandan, LA/RC kompozitlerinin SEM görüntülerinde (Şekil 4.2 (b) -(e)), artan LA oranıyla gözeneklerin dolduğu ve LA'nın kılcal ve yüzey gerilim kuvvetleri sayesinde yapışarak yüzeyleri kapladığı görülmektedir. SEM analizi ile yapıdaki FDM varlığı ispatlanmıştır.



Şekil 4.2. Refraktif kil ve kompozit FDM'lerin SEM görüntüleri **(a)** RC, **(b)** LA/RC-2575, **(c)** LA/RC-3070, **(d)** LA/RC-3565, **(e)** LA/RC-4060.

4.1.4 Kimyasal analiz sonuçları

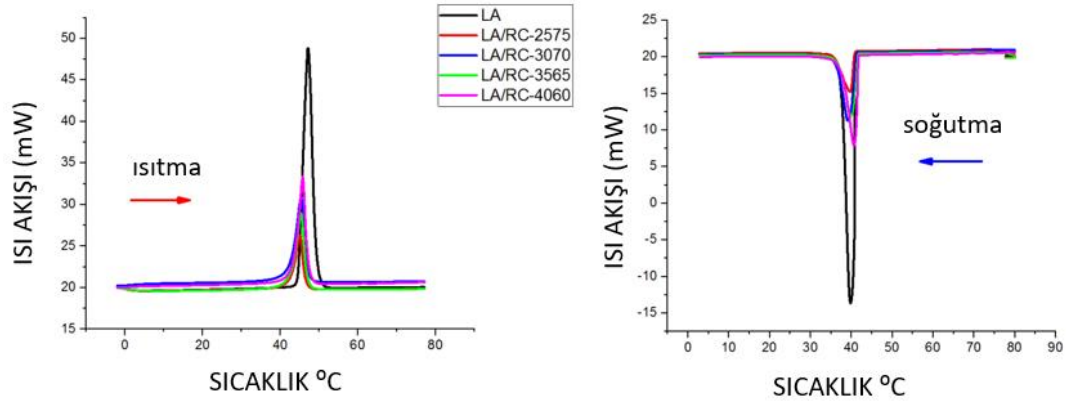
RC, LA ve LA bazlı kompozit FDM'lerin kimyasal yapısı FT-IR ile incelendi ve elde edilen spektrumlar Şekil 4.3a ve b'de gösterildi. LA'a ait spektrumda (Şekil 4.3a), metilen gruplarının asimetrik ve simetrik gerilme titreşimleri 2914 ve 2847 cm^{-1} 'de görülmektedir (Liu ve diğ., 2020a, Liu ve diğ. 2020b) 1697 cm^{-1} 'de tespit edilen absorpsiyon bandı yağ asitleri için karakteristiktir ve C=O grubunun gerilme titreşimine karşılık gelir (Alkhazaleh ve diğ., 2023; Kekevi vd., 2024). RC spektrumunda, 3687 cm^{-1} ve 3619 cm^{-1} 'de bulunan pikler RC'nin hidroksil gruplarından kaynaklanırken, $1100\text{-}997\text{ cm}^{-1}$ 'de ortaya çıkan pikler ise Si-O bağları nedeniyledir (Louati ve diğ., 2016). 909 cm^{-1} 'deki absorpsiyon piki ise Al-OH deformasyon titreşimine atfedilebilir (Louati ve diğ., 2016, Rezende ve diğ., 2018). 795 ve 749 cm^{-1} 'de bulunan çift pik Si-O ve Si-O-Al titreşimlerine karşılık gelmektedir (Louati ve diğ., 2016, Rezende ve diğ., 2018). Üretilen kompozit FDM'lerde karakteristik bu piklerin bulunması şekilce kararlı kompozit FDM oluşumunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.3. FTIR spektrumları (a) RC ve LA, (b) LA/RC kompozit FDM'leri

4.1.5 Isıl enerji depolama özelliklerine ait sonuçlar

LA ve kompozit FDM'lerin faz değişim davranışı ve termal enerji depolama özellikleri DSC ile analiz edildi. DSC analizi ile elde edilen ısıtma ve soğutma eğrileri ve ilgili veriler Şekil 4.4 ve Tablo 4.3'te sunuldu. Faz geçiş eğrilerinden açıkça görülebileceği gibi, kompozit FDM'ler LA ile benzer faz değişim karakteristiği gösterdi ve bu da kompozitlerin termal enerjiyi gizli ısı olarak depolama yeteneğini doğruladı. LA'nın erime ve kristalleşme gizli ısıları 176,5 J/g ve -180,9 J/g olarak ölçülürken, başlangıç erime ve kristalleşme sıcaklıkları sırasıyla 44,67 °C ve 40,86 °C olarak belirlendi. Öte yandan, kompozit FDM'lerin erime ve kristalleşme gizli ısıları LA/RC-2575 için 39,3 J/g ve -37,6 J/g; LA/RC-3070 için 52,0 J/g ve -50,7 J/g; LA/RC-3565 için 52,7 J/g ve -52,2 J/g ve LA/RC-4060 için 64,2 J/g ve -66,0 J/g olarak tespit edildi. Elde edilen sonuçlara göre, gözenekli bir destek malzemesinde LA'nın kısıtlanması nedeniyle başlangıç erime ve kristalleşme sıcaklıklarının bir miktar ötelendiği tespit edildi. Tablo 4.3'ten görülebileceği gibi, kompozitlerdeki LA oranının artmasıyla erime gizli ısı değeri nispeten artmıştır. LA/RC-4060 kompoziti, herhangi bir sızıntı olmaksızın en yüksek erime entalpisi değerine sahip olan ve üretilen kompozitler arasında öne çıkan bir enerji malzemesidir. Bu sonuca göre, LA/RC-4060 kompoziti, uygun enerji depolama özelliği ile güneş enerjisi depolama, bina termal yönetimi gibi uygulamalarda kullanıma potansiyeline sahiptir.



Şekil 4.4. LA ve kompozit FDM'lerin DSC grafikleri

Tablo 4.3. LA ve LA/RC kompozit FDM'lerin DSC analizinden elde edilen faz geçiş özellikleri

ÖRNEK	ISITMA				SOĞUTMA			
	^a T _{om} (°C)	^b T _{pm} (°C)	^c T _{em} (°C)	^d ΔH _m (J.g ⁻¹)	^e T _{oc} (°C)	^f T _{pc} (°C)	^g T _{ec} (°C)	^h ΔH _c (J.g ⁻¹)
LA	44,67	47,25	49,18	176,5	40,86	39,80	37,78	-180,9
LA/RC-2575	42,77	45,02	46,54	39,3	40,79	39,73	36,25	-37,6
LA/RC-3070	42,67	45,45	46,89	52,0	41,23	39,15	36,64	-50,7
LA/RC-3565	42,87	45,32	46,88	52,7	41,54	39,96	36,77	-52,2
LA/RC-4060	43,46	45,80	47,23	64,2	41,77	40,70	37,89	-66,0

^a başlangıç erime sıcaklığı

^b pik erime sıcaklığı

^c son erime sıcaklığı

^d erime gizli ısı

^e başlangıç kristallenme sıcaklığı

^f pik kristallenme sıcaklığı

^g son kristallenme sıcaklığı

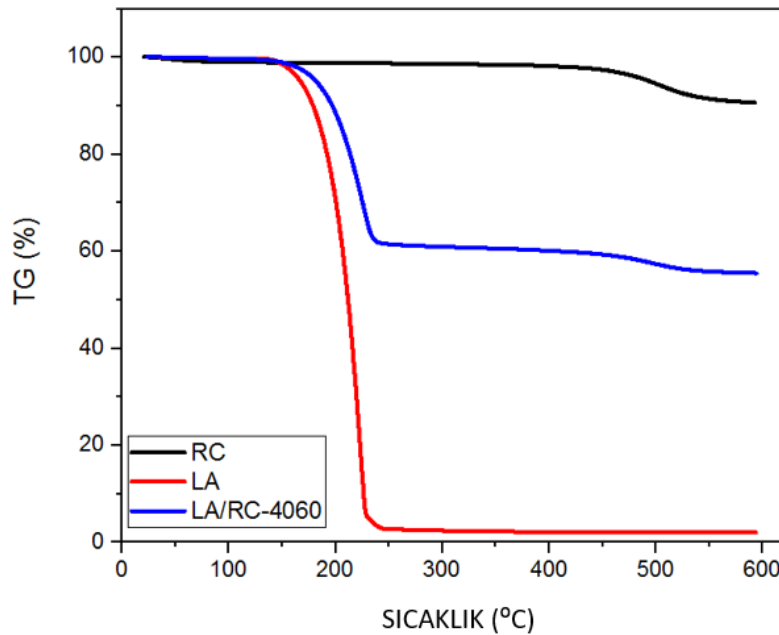
^h kristallenme gizli ısı

4.1.6 Termogravimetrik analiz ve BET spesifik yüzey alanı sonuçları

Üretilen kompozit FDM'nin (LA/RC-4060) termal kararlılığı incelenmiş ve elde edilen TG termogramı, Şekil 4.5'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.5'de görülebileceği gibi, LA tek adımda termal olarak bozunmaktadır.

LA'nın 212,0 °C'de ağırlığının %50'sini kaybettiği ve en yüksek ağırlık kaybına sahip pik maksimum sıcaklık değerinin 225,68 °C olduğu bulunmuştur. LA'nın 550 °C'deki toplam kütle kaybı %98,04 olarak belirlenmiştir.

Destek malzeme olan refraktif kil (RC), dehidroksilasyon nedeniyle bir adımda bozunmuş ve en yüksek ağırlık kaybının 505,22 °C'de olduğu tespit edilmiştir. RC'nin 550 °C'deki toplam kütle kaybı %8,62 olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kompozit FDM iki adımda bozunmuştur. İlk adımda, LA'nın termal ayrışması yaklaşık 226,4 °C'de, ikinci adımda ise RC'nin dehidroksilasyonu 505,06 °C'de gerçekleşmiştir. Kompozit FDM sırasıyla 197,07 ve 225,56 °C'de kütle kaybının %10 ve %30'unu kaybederken, saf LA için bu değerler sırasıyla 179,14 ve 200,72 °C olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RC'nin organik moleküllerin uçuculuğunu geciktirdiği açıktır. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi, LA'nın termal bozunma sıcaklığı RC ile şekil stabilizasyonu sayesinde daha yüksek bir sıcaklığa kaymıştır.



Şekil 4.5. LA, RC ve LA içerikli kompozit FDM'nin karşılaştırmalı TG analiz sonucu

RC ve LA/RC-4060'ın özgül yüzey alanı ve gözenek hacmi BET analizi ile tespit edildi ve Tablo 4.4'te verildi. RC'nin özgül yüzey alanı ve gözenek hacmi sırasıyla $20,08 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ ve $0,1156 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$ olarak belirlendi.

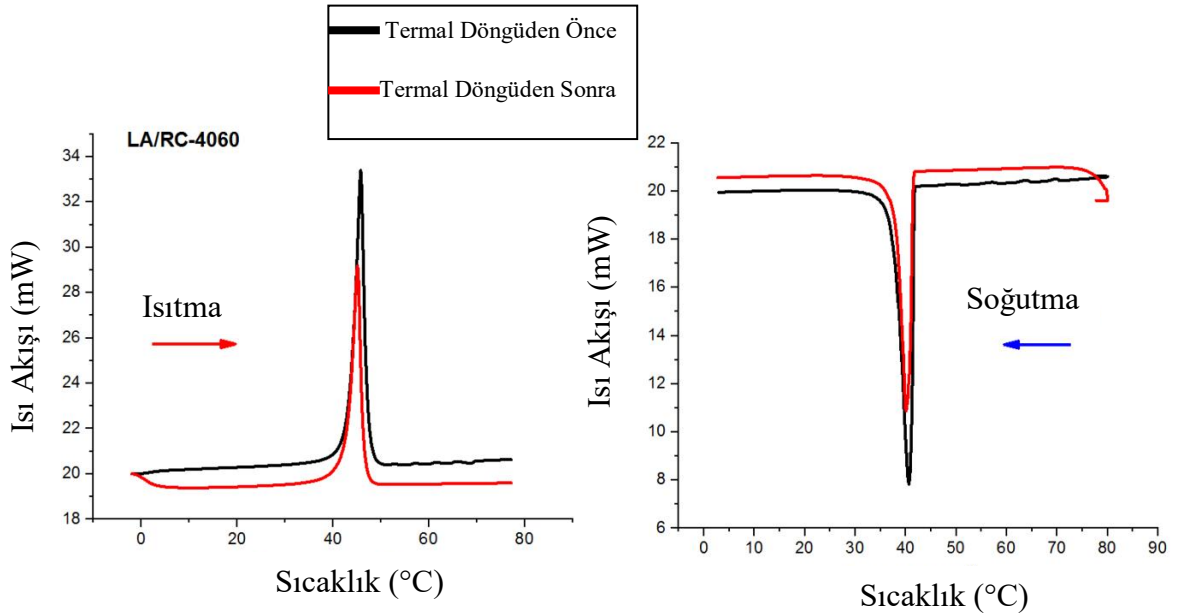
Bu sonuç, RC'nin LA'nın yüklenmesi için yeterli potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Kompozit FDM'nin üretilmesinden sonra, RC'nin özgül yüzey alanı ve gözenek hacmi önemli ölçüde azaldı ve sırasıyla $1,65 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ ve $0,0121 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$ olarak bulundu.

Tablo 4.4. RC ve kompozit FDM'nin BET sonuçları

Örnek	Spesifik yüzey alanı ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)	Gözenek hacmi ($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)
RC	20,08	0,1156
LA/RC-4060	1,65	0,0121

4.1.7 Termal güvenilirlik testi sonuçları

Termal güvenilirlik termal enerji depolaması için önemli bir parametredir ve enerji depolama malzemelerinin potansiyel uygulaması durumunda dikkate alınmalıdır. Bu amaçla, en yüksek enerji depolama kapasitesine sahip LA/RC-4060 kompoziti termal döngü testi ile değerlendirildi. LA/RC-4060 kompozitinin 100 ısıtma/soğutma döngüsünden önce ve sonra elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.6'da, ilgili veriler ise Tablo 4.5'te verilmiştir. Tablo 4.5'te görüldüğü gibi, döngü testinden sonra kompozitin erime ve kristalleşme gizli ısıları sırasıyla sadece $3,4 \text{ J/g}$ ve $3,6 \text{ J/g}$ azalmaktadır. Erime ve kristalleşme entalpilerinde gözlenen kayıpların sırasıyla %5,3 ve %5,5 olduğu bulunmuştur. Ayrıca, 100 termal döngüden sonra erime için pik sıcaklıklarındaki sapmanın $0,65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ve kristalleşme için $0,55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu bulunmuştur. Sonuçlara göre LA/RC-4060 kompoziti potansiyel uygulamalar için iyi bir termal güvenilirliğe sahiptir.



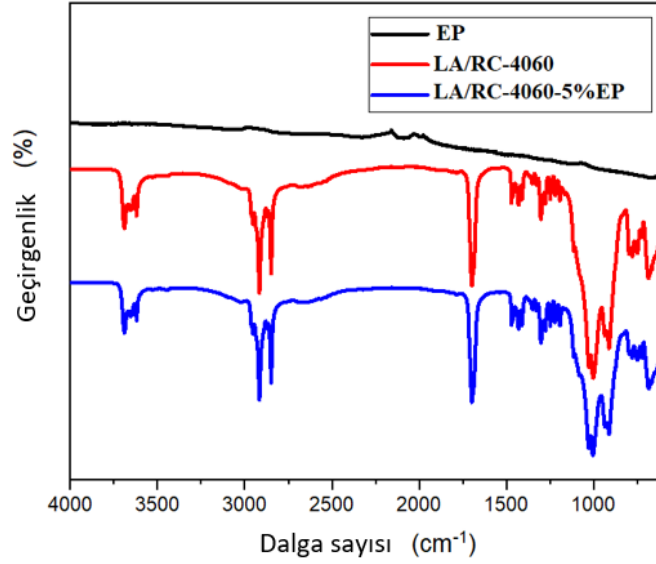
Şekil 4.6. LA/RC kompozitinin termal döngü testi öncesi ve sonrası karşılaştırmalı DSC grafikleri

Tablo 4.5. Isıl döngü testi öncesi ve sonrası faz geçiş özellikleri

LA /RC-4060 kompoziti	Erime		Kristallenme	
	T_{pm} (°C)	ΔH_m (J.g ⁻¹)	T_{pc} (°C)	ΔH_c (J.g ⁻¹)
Test öncesi	45,80	64,2	40,70	-66,0
100 ısıl çevrim sonrası	45,15	60,8	40,15	-62,4

4.2 Genişletilmiş Grafit (EP) Yüklü Kompozit FDM'nin Karakterizasyon Sonuçları

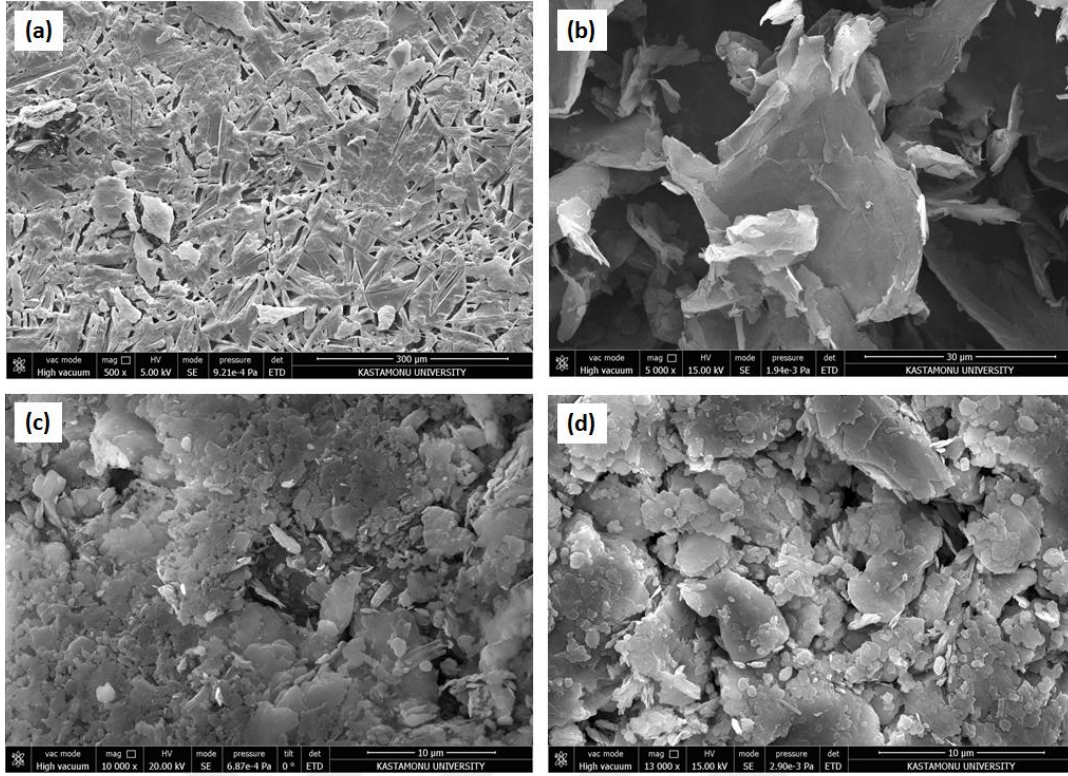
En yüksek ısıl enerji depolama kapasitesine sahip olan, sızdırmaz özellikteki LA/RC-4060 kompoziti ısıl özelliklerinin iyileştirmesi amacıyla genişletilmiş grafit (EP) ile modifiye edilmiştir. EP ile modifiye edilmiş kompozitin kimyasal yapısı FT-IR spektroskopisi ile analiz edildi ve elde edilen spektrumlar Şekil 4.7'de karşılaştırmalı olarak verildi. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi, EP kimyasal olarak inert olduğundan herhangi bir karakteristik pik vermemiştir. LA/RC-4060-5%EP kompozitinde, piklerin yoğunluğu biraz azalsa da, LA/RC-4060 kompozitine kıyasla piklerde herhangi bir kayma gözlenmedi. Diğer bir deyişle, modifikasyon yalnızca fiziksel olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.7. EP ve EP yüklü kompozit FDM'nin FT-IR spektrumları

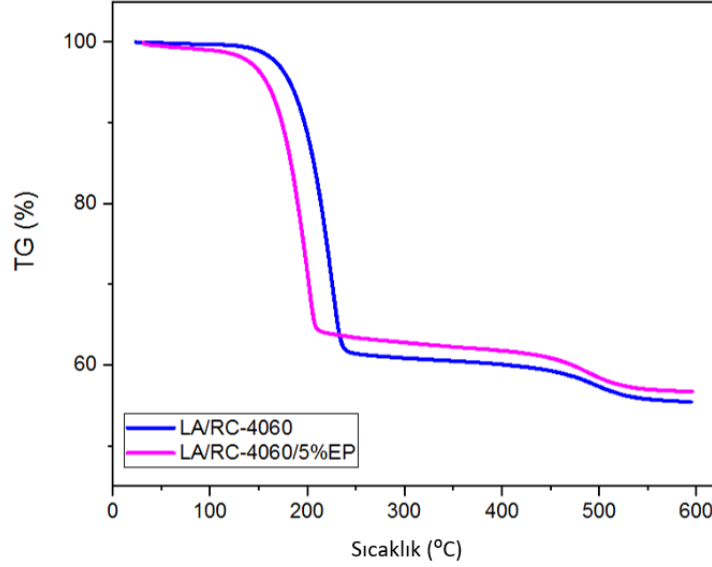
EP, LA/RC-4060 ve LA/RC-4060-5%EP örneklerinin morfolojisi SEM ile incelenmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 4.8'de verilmiştir.

LA/RC-4060 kompozitinin SEM görüntüsünde (Şekil 4.8c) görüldüğü gibi, RC yüzeyi pullu tabakalar halindeki LA ile kaplanmışken, pürüzsüz tabakalar halindeki yüksek iletkenliğe sahip EP yapılarının (Şekil 4.8b) modifikasyondan sonra yüzeye dahil olduğu görüldü (Şekil 4.8d). Modifikasyon işleminin başarısı bu SEM görüntüleriyle doğrulandı.



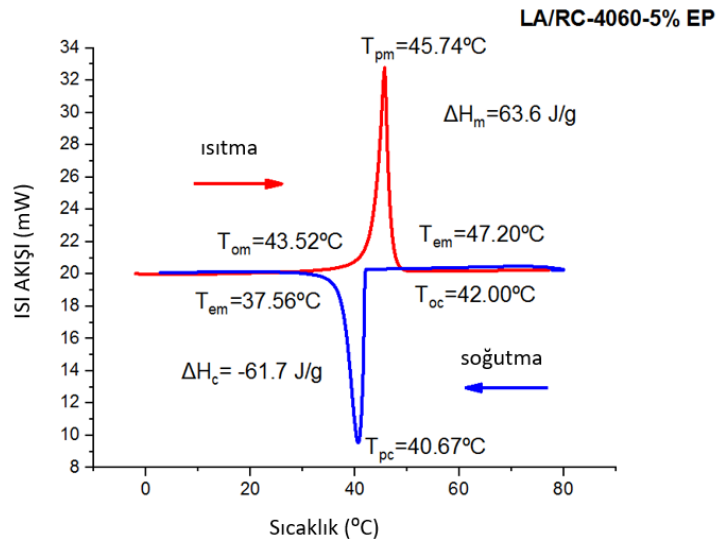
Şekil 4.8. SEM görüntüleri LA (a), EP (b), LA/RC-4060 (c) ve LA/RC-4060-5%EP (d)

Şekil 4.9’da EP ile modifiye edilmiş kompozitin termal kararlılığını gösteren TGA termogramları sunulmuştur. LA’nın bozunmasına karşılık gelen ilk adımda termal ayrışma, modifiye edilmemiş kompozite kıyasla daha erken gerçekleşse de, gözlenen toplam kütle kaybı EP parçacıklarıyla modifikasyondan sonra daha düşüktür. Modifiye edilmiş kompozit LA/RC-4060-5%EP için toplam kütle kaybı 550 °C’de %44,23 olarak bulunmuştur. Ayrıca, en yüksek ağırlık kayıplarının görüldüğü maksimum sıcaklık değerleri (T_{maks1} ve T_{maks2}) sırasıyla 201,67 °C ve 496,15 °C olarak belirlenmiş olup, bu değerler LA/RC-4060 kompoziti için de benzer şekilde gözlenen faz değişim sıcaklıklarından önemli ölçüde yüksektir. Dolayısıyla her iki kompozitin de iyi termal kararlılığa sahip olduğu ve faz değişim sıcaklıklarına uygun termal depolama uygulamalarında güvenle kullanılabileceği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.9. EP ile modifikasyon öncesi ve sonrası elde edilen TG termogramları

EP ile modifiye edilmiş kompozit FDM'nin faz değişim karakteristiklerindeki değişim DSC analizi ile incelenmiş ve ısıtma ve soğutma sırasında elde edilen DSC termogramları Şekil 4.10'da verilmiştir. Termogramlardan da görülebileceği gibi, EP'nin varlığı faz değişim özelliğini bozmamış ve EP ile modifiye edilmiş kompozit, LA ve LA/RC-4060 kompoziti ile benzer faz değişim özellikleri göstermiştir. LA/RC-4060-5%EP kompozitinin gizli ısısının erime için 63,6 J/g ve kristalleşme için -61,7 J/g olduğu bulunmuştur. Ayrıca, yüksek iletkenliğe sahip EP parçacıklarının varlığı nedeniyle faz değişim sıcaklıkları biraz ötelenmiştir.



Şekil 4.10. EP ile modifiye edilmiş kompozit FDM'nin DSC termogramı

LA/RC-4060 ve LA/RC-4060-5%EP kompozitlerinin literatürde bulunan diğer yağ asidi bazlı şekil stabilizeli FDM'lerle karşılaştırılması Tablo 4.6'da gösterilmiştir. Açıkça görülebileceği gibi, hazırlanan kompozitler yüksek erime gizli ısısı değerlerine sahiptir. Bu veriler ışığında elde edilen şekil kararlı kompozitlerin güneş enerjisi depolama, binaların ısı düzenlenmesi gibi enerji depolama uygulamaları için potansiyel enerji malzemeleri olduğu söylenebilir.

Tablo 4.6. Üretilen kompozitlerin ısı enerji depolama özelliklerinin literatürle karşılaştırılması

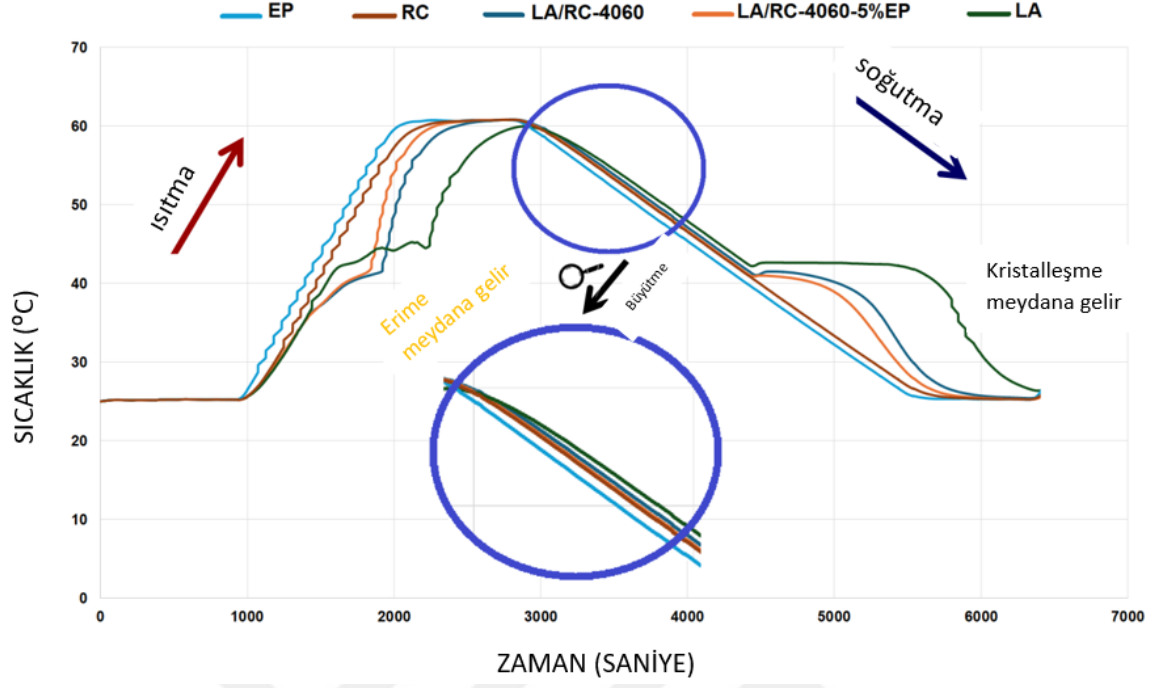
LA içeren kompozit FDM'ler	T _m	$\Delta H_m (J.g^{-1})$	Referans
Laurik-Miristik-Palmitik asit/Diatomit	29,8	65,8	(Ren ve diğ., 2022)
Alçıtaşı/Laurik asit-grafit-zeolit	42,0-45,7	54,3-81,0	(Kumar ve diğ., 2023)
Kaprik-Laurik asit/ Kömür serisi-kaolinit	16,9	42,3	(Liu ve diğ., 2015)
Laurik asit/ham uçucu kül	45,7	44,9	(Liu ve diğ., 2020)
Laurik asit/ham uçucu kül/karbon nanotüp	45,3	37,8	(Liu ve diğ., 2020)
Laurik asit-miristik asit /uçucu kül	31,1	45,3	(Hekimoğlu ve diğ., 2021)
Laurik asit/nano-Cu/attapulgit	42,1	87,1	(Wen ve diğ., 2022)
LA/RC-4060	43,4	64.,2	Bu çalışma
LA/RC-4060-5%EP	43,5	63,6	Bu çalışma

EP, RC, LA/RC-4060, LA/RC-4060-5%EP ve LA'nın ısı davranışı, ısıtma ve soğutma adımları sırasında T-kayıt (Temperature-History) testi ile değerlendirildi. Bu amaçla, sirküle edilmiş bir banyo, veri toplama sistemi ve termokupllar içeren deneysel bir test düzeneği kuruldu. Numuneler test tüplerine eşdeğer şekilde yerleştirildi ve tüpler, içinde homojen sıcaklık dağılımı sağlayan bir dahili pompa bulunan sirküle edilmiş banyoya daldırıldı. Daha sonra, sirküle edilmiş banyo 25°C - 60°C - 25°C sıcaklık aralığında çalışacak şekilde ayarlandı. Numuneler 25°C'deki başlangıç sıcaklığına ulaştığında test başlatılmış ve numunelerin sıcaklık değişimleri takılı termokupllar ile ölçülerek veri toplama sistemi ile toplanmıştır. Şekil 4.11, yapılan T-kayıt testine göre numunelerin termal davranışını karşılaştırmalı olarak gösteren sıcaklık ölçümlerini göstermektedir.

Şekil 4.11’de görüldüğü gibi, LA, LA/RC-4060 ve LA/RC-4060-5%EP numunelerinin faz geçiş süreci hem ısıtma hem de soğutma adımlarında açıkça gözlemlenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, T-kayıt testi bulgularının DSC analizlerinden elde edilen verilerle tutarlı olduğu ortaya çıkmıştır.

Öte yandan, EP ve RC enerji depolama yeteneğine sahip olmadıkları için faz geçiş pikleri vermemiştir. Ayrıca, numunelerin ısı iletim özellikleri hedef sıcaklığa ulaşmak için gereken süre dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Soğutma adımı açıkça görüldüğü gibi, EP yüksek iletkenliğe sahip genişletilmiş grafit olduğundan beklendiği gibi daha önce hedef sıcaklığa (60°C'den 25°C'ye) ulaştı.

Ayrıca, tüm numunelerin ısı transfer hızları hedef sıcaklığa ulaşma süresine bağlı olarak karşılaştırıldığında, ısı iletim özelliklerinin $EP > RC > LA/RC-4060-5\%EP > LA/RC-4060 > LA$ şeklinde olduğu görüldü. Şekil 4.11'den de görülebileceği gibi, RC desteği ile sağlanan şekilce kararlılıktan sonra LA'nın uzun şarj/deşarj süreleri, RC destek malzemesinin daha yüksek termal iletkenliği nedeniyle kısaldı. Ayrıca, $LA/RC-4060-5\%EP > LA/RC-4060 > LA$ olduğundan, yapıya yalnızca %5 ağırlıkça EP eklenmesinin bile termal iletkenlikteki iyileşme nedeniyle LA/RC-4060 kompozit FDM'nin ısı transfer hızını önemli ölçüde iyileştirdiği açıkça görüldü.



Şekil 4.11. Örneklerin termal davranışının T-kayıt testi ile incelenmesi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ısııl özellikleri iyileştirilmiş şekilce kararlı kompozit faz değıştiren malzemeler başarıyla hazırlandı ve karakterize edildi. Destek malzemesi olarak ticari bir firmadan elde edilen ve yapılan XRF analiziyle başlıca SiO_2 , Al_2O_3 ve TiO_2 bileşenlerinden oluştuğı belirlenen RC kullanılırken, organik bazlı FDM olarak laurik asit kullanıldı. Farklı kompozisyonlarda seri olarak LA/RC kompozit FDM'ler hazırlandı. Yapılan sızdırma testiyle sızdırmaz özellikteki, şekilce kararlılığını koruyan ve en yüksek LA içeriğine sahip kompozit olarak LA/RC-4060 kompoziti tespit edildi. LA ve tüm kompozit FDM'lerin ısııl enerji depolama karakteristikleri DSC analizi ile tespit edildi ve morfolojileri SEM analizi ile incelendi. LA'nın destek malzemedeki varlığı SEM görüntüleri, FT-IR analizi, BET analizi ve DSC ile ispatlandı. Hazırlanan kompozitler arasında LA/RC-4060, erime için 64,2 J/g ve kristalleşme için -66,0 J/g gizli ısıyla en yüksek enerji depolama kapasitesini göstermiştir. Faz değışim sıcaklıklarının da erime sırasında 43,46 °C ve katılaşma sırasında 41,77 °C olduğu bulunmuştur. Ayrıca, LA/RC-4060 kompoziti yapılan termal çevrim testi ile iyi bir termal güvenilirliğe sahip olduğunu göstermiştir. LA/RC-4060 kompoziti ısııl özelliklerini geliştirmek amacıyla yüksek iletkenliğe sahip genişletilmiş grafit (EP) parçacıkları ile modifiye edilmiş ve yapılan performans testi ile ısı depolama ve salma hızının önemli ölçüde iyileştiğı tespit edilmiştir. Her iki kompozit de iyi termal kararlılık gösterirken, EP'nin varlığı LA/RC-4060 kompozitinin termal depolama özelliklerini olumsuz yönde etkilememiştir.

Elde edilen şekilce kararlı kompozitlerin güneş enerjisi depolama ve binaların termoregülasyonu gibi enerji depolama uygulamaları için muhtemel adaylar olabileceğı öngörülmektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan refrakter kil gibi diğier endüstrilerde başka amaçlarla kullanılan çeşitli inorganik yapıların FDM'lerin şekilce kararlılığının sağlanmasında kullanılabileceğı ve yapılacak gelecekte yapılacak çalışmalarda bu potansiyellerin değerlendirilebileceğı sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Abhat, A. (1994). *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*. *Sol Energy* 1983,7-10.
- Abhat, A. (1983). *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*. *Sol Energy* 1983,10.
- Abhat, A. (2004). *Thermal energy storage materials and systems*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 5.
- Abhat, A., Heine, D., Heinisch, M., Malatidis, AN., Neuer, G. (1981). *Development of a modular heat exchanger with integrated latent heat energy store*. Report no BMFT FBT 81-050. Stuttgart, Germany: Institut fuer Kemtechnik und Energiewandlung e.V, 10.
- Agyenim, F. Hewitt, N. Eames, P. Smyth, M. A. (2010). *review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)*. *Renew Sustain Energy Rev* 2010,20.
- Arkar, C., Medved, S. (2007). Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, 81(9), 1078-1087,15.
- Baetens, B.P. Jelle and A. Gustavsen, (2010). "Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review", *Energy and Buildings*, 3.
- Borg, H.J.R., Woudenberg, J., Magn, Mater. (1999),20.
- Buddhi, D., Sawhney, RL. (1994). In: *Proceedings of thermal energy storage and energy conversion*; 1994,18.
- Cabeza, L.F. Castell, A. Barreneche, C. Gracia, A. Fernández, A.I. (2011). *Cabeza, L.F.; Castell, A.; Barreneche, C.; de Gracia, A.; Fernández, A.I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 1.

- L.F. Cabeza, J. Roca, M. Nogues, B. Zalba, J.M. Marin, *Transportation and conservation of temperature sensitive materials with phase change materials: state of the art*, IEA ECES IA Annex 17 2nd Workshop, Ljubljana (Slovenia), 2002,18.
- Chen, C., Liu, W., Yang, H., Zhao, Y., Liu, S. (2011). *Synthesis of solid–solid phase change material for thermal energy storage by crosslinking of polyethylene glycol with poly (glycidyl methacrylate)*. Sol Energy 2011,13.
- Choi, JK. Lee, JG. Kim, JH. Yang, HS. (2011). *Preparation of microcapsules containing phase change materials as heat transfer media by in-situ polymerization*. J Ind Eng Chem 2001,7.
- Demirbas, MF. (2006). *Thermal energy storage and phase change materials: an overview*. Energy Sources Part B 2006,10.
- Dincer, I. Rosen, MA. (2002). *Thermal energy storage, systems and applications*. Chichester (England): John Wiley & Sons; 2002, 21.
- Erlbeck, L. Schreiner, P. Fasel, F. Methner, F.J. Rädle, M. (2018). *Investigation of different materials for macroencapsulation of salt hydrate phase change materials for building purposes*. Constr. Build. Mater. 2018, 2.
- Farid, M. M., (1983). *A review on phase change materials for thermal energy storage systems*. Energy, 5-7.
- Farid, MM. Khudhair, AM. Razack, SAK. Al-Hallaj, S. A. (2004). *review on phase change energy storage: materials and applications*. Energy Convers Manage 2004,15.
- Feldman, D., Banu, D., Hawes, D. (1995). *Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings*. Sol Energy Mater Sol Cells 1995,10.
- Feldman, D., Shapiro, MM., Banu, D., Fuks, CJ. (1989). *Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage*. Sol Energy Mater 1989,12.
- Gao, T., Yang, Z., Chen, C., Li, Y., Fu, K., Dai, J. (2017). *Three-dimensional printed thermal regulation textiles*. ACS Nano 2017,13.

- Giro Paloma, J. Martínez, M. Cabeza, L.F. Fernández, A.I. (2016). *Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 14.
- Guan, W., Li, J., Qian, T., Wang, X., Deng, Y. (2015). *Preparation of paraffin/expanded vermiculite with enhanced thermal conductivity by implanting network carbon in vermiculite layers*, Chem. Eng. J., 2015, 32.
- Han, GGD., Li, H., Grossman, J.C. (2017). *Optically-controlled long-term storage and release of thermal energy in phase-change materials*. Nat Commun 2017
- Harald, M., Michael, B., Thomas, H. (2020). *PCM products and their fields of application - An overview of the state in 2020/2021* sciencedirect.com/journal/journal-of-energy-storage
- Hasnain, S.M. (1983). *Latent heat thermal energy storage for solar heating applications*. PhD thesis. University of Leeds; 1983, 9.
- Hasnain, S.M. (1998). *Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques*. Energy Convers Manage 1998, 5-10.
- Hekimoğlu, G., Nas, M., Ouikhalfan, M., Sarı, 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, 22.
- Himran, S., Suwono, A., Mansoori, G.A. (1994). *Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium*. Energy Sources 1994, 22.
- Huang, X. Chen, X. Li, A. Atinafu, D. Gao, H. Dong, W. Wang, G. (2019). *Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications*. Chem. Eng. J. 2019, 14-15.
- Ianniciello, L., Biwolé, P.H., Achard, P. (2018). *Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials*. J Power Sources 2018, 17.

- Iqbal, K., Sun, D. (2014). *Development of thermo-regulating polypropylene fibre containing microencapsulated phase change materials*. Renew Energy 2014,19.
- Kasaeian, A., Bahrami, L., Pourfayaz, F., Khodabandeh, E., Yan, W-M. (2017). *Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: a critical review*. Energy Build 2017,16.
- Kee, SY., Munusamy, Y., Ong, KS. (2018). *Review of solar water heaters incorporating solidliquid organic phase change materials as thermal storage*. Appl Therm Eng 2018
- Kekevi, B., Mert, H. H., Mert, M. S., & Mert, E. H. (2024). Preparation and characterization of palmitic acid/polymer composite phase change materials supported with cross-linked poly (limonene-co-ethylene glycol dimethacrylate) copolymers for low-temperature thermal applications. *Reactive and Functional Polymers*, 198, 105884.
- Kenisarin, MM. (2014). *Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage*. A review. Sol Energy 2014
- Khan, MMA., Saidur, R., Al-Sulaiman, FA. (2017). *A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems*. Renew Sustain Energy Rev 2017,20.
- Khudhair, AM., Farid, MM. A. (2004). *review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*. Energy Convers Manage 2004,4.
- Kim, D., Jung, J., Kim, Y., Lee, M., Seo, J., Khan, S.B. (2016). *Structure and thermal properties of octadecane/expanded graphite composites as shape-stabilized phase change materials*, Int. J. Heat Mass Transf., 2016,26.
- Konuklu, Y., Ersoy, O., Erzin, F. (2019). *Development of pentadecane/diatomite and pentadecane/sepiolite nanocomposites fabricated by different compounding methods for thermal energy storage*, Int J Energy Res., 2019,25.

- Kök, O. E. , Tanrıverdi, İ., Erdoğan, Y., 2018. *Usage of Vermiculite as Additive Material Water-Based Drilling Muds. Natural and Engineering Sciences*, 3(2), 179-186,22.
- Kumar, N., Rathore, P. K. S., Sharma, R. K., & Gupta, N. K. (2023). *Integration of lauric acid/zeolite/graphite as shape stabilized composite phase change material in gypsum for enhanced ther*,16.
- Kuznik, F. David, D. Johannes, K. Roux, J.-J. (2011). *review on phase change materials integrated in building walls. Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011, 15, 21.
- Kuznik, F., Johannes, K., David, D. (2015). *Integrating phase change materials (PCMs) in thermal energy storage systems for buildings. In: Cabeza LF, editor. Adv therm energy storage syst.* Woodhead Publishing; 2015,15.
- Lane, GA. (1983). *Solar heat storage: latent heat materials*, vol. I. Florida: CRC Press,Inc.; 1983, 4.
- Lane, GA. (1986). *Solar heat storage: latent heat materials. Technology*, vol. II. Florida: CRC Press; 1986, 15.
- Lee, KO., Medina, MA., Sun, X., Jin, X. (2018). *Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls.* Sol Energy 2018,1.
- Li, M. Shi, J. (2019). *Review on micropore grade inorganic porous medium based form stable composite phase change materials: Preparation, performance improvement and effects on the properties of cement mortar.* Constr. Build. Mater. 2019, 2-17.
- Liang, W., Zhang, G., Sun, H., Zhu, Z., Li, A. (2013). *Conjugated microporous polymers/n-carboxylic acids composites as form-stable phase change materials for thermal energy storage*, RSC Adv., 2013,32.
- Liu, P., Gu, X., Rao, J., Liu, S., Wang, B., & Bian, L. (2019). *Preparation and thermal properties of lauric acid/raw fly ash/carbon nanotubes composite as phase change material for thermal energy storage.* Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 28(11), 934-944,13.

- Liu, S., Han, J., Gao, Q., Kang, W., Ren, R., Wang, L., Wu, D. (2020a). *Lauric acid/bentonite/flake graphite composite as form-stable phase change materials for thermal energy storage*. *Materials Express*, 10(2),
- Liu, S., Han, J., Wang, L., Gao, Y., Sun, H., Li, W. (2020b). *A lauric acid-hybridized bentonite composite phase-changing material for thermal energy storage*. *RSC advances*, 10(43), 25864-25873.
- Liu, S., & Yang, H. (2015). *Composite of Coal-Series Kaolinite and Capric–Lauric Acid as Form-Stable Phase-Change Material*. *Energy Technology*, 3(1), 77-83, 14.
- Lorsch, HG. Kauffman, KW. Denton, JC. (1976). *Thermal energy storage for heating and air conditioning, future energy production system*. *Heat Mass Transfer* 1976,18.
- Lorsch, HG., Kauffman, KW., Denton, JC. (1975). *Thermal energy storage for solar heating and off-peak air conditioning*. *Energy Convers* 1975,24.
- Louati, S., Baklouti, S., & Samet, B. (2016). *Geopolymers Based on Phosphoric Acid and Illito-Kaolinitic Clay*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(1), 2359759, 12.
- Lv, P., Liu, C., Rao, Z. (2016). *Experiment study on the thermal properties of paraffin/kaolin thermal energy storage form-stable phase change materials*. *Appl Energy* 2016,34.
- Malayoğlu, U., Akar, A. (2021). *Killerin Sınıflandırmasında ve Kullanım Alanlarının Saptanmasında Aranan Kriterlerin İrdelenmesi*, Malayoğlu U. , Akar A. (Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. Köse ve Kızıl (eds) © İzmir / Türkiye 21-22 Nisan 1W5) 1.
- M. Dayarathna, Y. Wen, and R. Fan, “Data center energy consumption modeling: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 1, pp. 732–794, 1st Quart., 2016,16.
- Mehling, H., Cabeza, LF. (2008). *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 2008,16-17.

- Mert, E.H., Mert, H.H. (2021). *Preparation of polyHIPE nanocomposites: Revealing the influence of experimental parameters with the help of experimental design approach*, *Polym. Compos.*, 42 2021,35.
- Mert, H.H. (2020). *PolyHIPE composite based-form stable phase changematerial for thermal energy storage*, *Int. J. Energy Res.*,2020,1.
- Mert, H.H., Mert S., (2020). *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 8(1), 229 – 239, H. MERT H. , M.MERT S., E.MERT H. 13.
- Mert, H.H., Mert, M.S., Mert, E.H. (2019). *A statistical approach for tailoring the morphological and mechanical properties of polystyrene PolyHIPEs: looking through experimental design*, *Mater. Res. Express*, 2019,35
- Milián, Y.E. Gutiérrez, A. Grágeda, M. Ushak, S. A. (2017). *review on encapsulation techniques for inorganic phase change materials and the influence on their thermophysical properties*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 1.
- Nepomuceno, M. C. S. ve Silva, P. D. (2014). *Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate*. *Construction and Building Materials*, 63, 89-96. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.027,4.
- Pandey, AK., Hossain, MS., Tyagi, VV., Rahim, N., Selvaraj, JAL., Sari, A. (2018). *Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy*. *Renew Sustain Energy Rev* 2018
- Paris, J., Falardeau, M., Villeneuve, C. (1993). *Thermal storage by latent heat: a viable option for energy conservation in buildings*. *Energy Sources* 1993,23.
- Parks, GS., West, TJ., Naylor, BF., Fujii, PS., McClaine, LA. (2001). *Thermal data on organic compounds. XXIII. Modern combustion data for fourteen hydrocarbons and five polyhydroxy alcohols*. *J Am Chem Soc* 2001,7.
- Pereira da Cunha, J., Eames, P. (2016). *Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials-A review*. *Appl Energy* 2016

- Qian, T., Li, J., Min, X., Fan, B. (2018). *Integration of pore confinement and hydrogen-bond influence on the crystallization behavior of C18 PCMs in mesoporous silica for form-stable phase change materials*, ACS Sustainable Chem. Eng., 6 2018,31.
- Ramakrishnan, S., Sanjayan, J., Wang, X., Alam, M., Wilson, J. A. (2015). *novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites*. Appl Energy 2015,34.
- Raul Augustin, M. Daniela, B. Cristian, M. (2018). *Phase change materials based on mesoporous silica*. Curr. Org.Chem. 2018,14
- Ren, M., Zhao, H., & Gao, X. (2022). *Effect of modified diatomite based shape-stabilized phase change materials on multiphysics characteristics of thermal storage mortar*. Energy, 241, 122823, 10.
- Rezende, J. C. T., Ramos, V. H. S., Oliveira, H. A., Oliveira, R. M. P. B., & Jesus, E. (2018, February). Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using clay from Calumbi geological formation, N. Sra. Socorro, SE State, Brazil. In *Materials Science Forum* (Vol. 912, pp. 1-6). Trans Tech Publications Ltd, 2.
- Rodrigues, L.S. Ferreira, J.A.F. (2021). Costa, Household Thermal Energy Storage in the Context of Smart Grids. TEchMA, in: *4th International Conference on Technologies for the Wellbeing and Sustainable Manufacturing Solutions*, 2021,18.
- Rozanna, D., Chuah, TG., Salmiah, A., Choong, TSY., Sari, M. (2005). *Fatty acids as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage: a review*. Int J Green Energy 2005,10.
- Sánchez Silva, L., Rodríguez, JF., Romero, A., Borreguero, AM., Carmona, M., Sánchez, P. (2010). *Microencapsulation of PCMs with a styrene-methyl methacrylate copolymer shell by suspension-like polymerisation*. Chem Eng J 2010;157,7.
- Sari, A., Kaygusuz, K. (2001). *Thermal performance of myristic acid as a phase change material for energy storage application*. Renew Energy 2001,12.

- Sari, A., Sari, H., Onal, A. (2004). *Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials*. Energy Convers Manage 2004,21-23.
- Sarier, N., Onder, E. (2012). *Organic phase change materials and their textile applications: an overview*. Thermochim Acta 2012,7.
- Schröder, K. Gawron, (2010). J. Schröder and K. Gawron, "Latent heat storage", *Energy Research*, 5, 1981, 3.
- Sharma, A., Sagara, K. (2005). *Phase change materials for low temperature thermal energy storage: A review*. International Journal of Low-Carbon Technologies, 15.
- Sharma, A., Tyagi, VV., Chen, CR., Buddhi, D. (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renew Sustain Energy Rev 2009,10.
- Sharma, R.K. (2015). / *Energy Conversion and Management* 95 (2015),8.
- Teggar M., Ajarostaghi S.S.M., Yıldız Ç., Arıcı M., Ismail K.A.R., Niyas H., Lino F.A.M., Mert M.S., Khalid M., Performance enhancement of latent heat storage systems by using extended surfaces and porous materials: A state-of-the-art review, *Journal of Energy Storage*, 44, 103340, 2021,6.
- Tyagi, VV., Buddhi, D. (2007). *PCM thermal storage in buildings: a state of art*. Renew Sustain Energy Rev 2007,26.
- Wang, C., Feng, L., Li, W., Zheng, J., Tian, W., Li, X. (2012). *Shape-stabilized phase change materials based on polyethylene glycol/porous carbon composite: The influence of the pore structure of the carbon materials*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2012,14.
- Waqas, A., Ji, J., Xu, L., Ali, M., Zeashan, A. J. (2018). *Thermal and electrical management of photovoltaic panels using phase change materials-A review*. Renew Sustain Energy Rev 2018,6.
- Wei, Y., Li, J., Sun, F., Wu, J., Zhao, L. (2018). *Leakage-proof phase change composites Supported by biomass carbon aerogels from succulents*, Green Chem., 2018,26.

- Wen, R., Zhu, X., Yang, C., Sun, Z., Zhang, L., Xu, Y., ... & Huang, Z. (2022). A novel composite phase change material from lauric acid, nano-Cu and attapulgite: Preparation, characterization and thermal conductivity enhancement. *Journal of Energy Storage*, 46, 103921. mal energy storage in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120088, 4.
- Xu, B., Ma, H., Lu, Z., Li, Z. (2015). *Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cementbased composites*. *Appl Energy* 2015,35.
- Zábransky M, RuzickaV, Domalski ES. *Heat capacity of liquids: critical review and recommended values. Supplement I*. *J Phys Chem Ref Data* 2001,4.
- Zalba, B. Mari'n, JM. Cabeza, LF. Mehling, H. (2003). *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. *Appl Therm Eng* 2003,5.
- Zhang, J., Zhang, X., Wan, Y., Mei, D., Zhang, B. (2012). *Preparation and thermal energy properties of paraffin/halloysite nanotube composite as form-stable phase change material*, *Sol. Energy*, 2012,21.
- Zhang, K., Zhang, Y., Liu, J., Niu, X. (2020). *Recent advancements on thermal management and evaluation for data centers*. *Appl Therm Eng* 2020,13.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa’da tamamladı. 2018 yılında girdiği Yalova Üniversitesi Kimya ve Süreç Mühendisliği Bölümünden 2022 yılında mezun oldu. 2022 yılında Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Sönmez ASF İplik, Dokuma ve Boya San. A.Ş firmasında Sürdürülebilirlik Yöneticisi olarak 2 yıldır çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Erben, Y., Mert, H.H. (2024, 26-28 Haziran). *Use of clays in latent heat storage and production of shape-stabilized composite phase change material*. 5th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2024), Türkiye