ÇANKIRI KARATEKİN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TERMAL ENERJİ DEPOLAMA İÇİN TERMAL İLETKENLİĞİ ARTTIRILMIŞ DİATOMİT TABANLI YAPICA KARARLI KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

Miyase BULUT

KİMYA ANABİLİM DALI

ÇANKIRI
2021

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Miyase BULUT tarafından hazırlanan "Termal Enerji Depolama İçin Termal İletkenliği Arttırılmış Diatomit Tabanlı Yapıca Kararlı Kompozitlerin Hazırlanması ve Karakterizasyonu" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Ali KARAİPEKLİ

Jüri Üyeleri:

Başkan: Doç. Dr. Saliha ALYAR
(Çankırı Karatekin Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı)

Doç. Dr. Ali KARAİPEKLİ,
(Çankırı Karatekin Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı)

Doç. Dr. Alper BİÇER
(Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı)

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ

Enstitü Müdürü

ETİK İLKELERE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğine göre hazırlamış olduğum "TERMAL ENERJİ DEPOLAMA İÇİN TERMAL İLETKENLİĞİ ARTTIRILMIŞ DİATOMİT TABANLI YAPICA KARARLI KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU" konulu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu, çalışmanın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik, ilke ve kurallarına uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne uygun göre kaynak olarak gösterdiğimi, tezin Çankırı Karatekin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitütüsü'nden başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve bu çalışmanın Çankırı Karatekin Üniversitesi tarafından kullanılan "Bilimsel İntihal Tespit Programı ile tarandığını, "intihal içermediğini" beyan ederim. Çalışmam ile ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması halinde çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm. Çankırı Karatekin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim (21/06/2021).

Miyase BULUT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMAL ENERJİ DEPOLAMA İÇİN TERMAL İLETKENLİĞİ ARTTIRILMIŞ DİATOMİT TABANLI YAPICA KARARLI KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

Miyase BULUT

Çankırı Karatekin Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali KARAİPEKLİ

Faz değiştiren maddeler (FDM'ler) termal enerjinin depolanması ve enerji verimliliğinin arttırılması için kullanılabilir. FDM'lerin binalara entegrasyonu ile bina içerisindeki fazla ısı depolanabilir ve böylece iklimlendirme sistemlerinin elektrik tüketimi büyük oranda azaltılarak elektrik tasarrufu sağlanabilir. Bu çalışmada binalarda termal enerji depolama için parafin ötektik karışımı (n-eikosan-n-heptadekan) ve diatomitten oluşan yapıca kararlı kompozit FDM hazırlandı. Kompozit FDM diatomit içerisine parafin ötektik karışımı doğrudan emdirme yöntemiyle katılarak hazırlandı. n-eikosan-n-heptadekan/diatomit kompozitinin morfolojisi, kimyasal yapısı, kimyasal uyumluluğu, termal özellikleri ve termal kararlılığı, SEM, FT-IR spektroskopisi, DSC ve TG analizleri ile kapsamlı bir şekilde araştırıldı. FT-IR sonuçları, kompozit FDM'de n-eikosan-n-heptadekan ötektik karışımı ve diatomit arasında yalnızca fiziksel etkileşimler olduğunu gösterdi. DSC sonuçları, yapıca kararlı kompozitin parafin ötektik karışımı ile benzer faz değişim karakteristikleri sergilediğini gösterdi. TG analiz sonuçları hazırlanan kompozit FDM'nin 100 ºC'ye kadar bozunmadığını ve iyi termal kararlılığa sahip gösterdi. Kompozit FDM'nin termal iletkenliğini arttırmak için kompozite farklı kütle oranlarında (%0,5, 1,5 ve 2,5) bor nitrür (BN) ilave edildi ve kompozit FDM'nin termal iletkenliğinin ilave edilen BN oranıyla arttığı bulundu. Ayrıca, hazırlanan kompozit alçı sıva içerisine katılarak enerji depolayıcı kompozit bir sıva hazırlandı ve termal performansı laboratuvar ölçekli bir hücrede test edildi. Termal performans testleri, kompozitin enerji depolamasından dolayı oda içi sıcaklık dalgalanmalarını azaltabileceğini ve enerji tasarrufu sağlamak için büyük bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

2021, 74 sayfa

ANAHTAR KELİMELER: Faz değişim maddesi, Termal enerji depolama, Yapıca-kararlı kompozit, Diatomit, Termal iletkenlik

ABSTRACT

Master Thesis

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF DIATOMITE-BASED FORM-STABLE COMPOSITES WITH ENHANCED THERMAL CONDUCTIVITY FOR THERMAL ENERGY STORAGE

Miyase BULUT

Çankırı Karatekin University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Chemistry Sciences

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali KARAİPEKLİ

Phase change materials (PCMs) can be used to store thermal energy and improve energy efficiency. By integrating PCMs into buildings, excess heat inside the building can be stored, and thus electricity consumption of air conditioning systems can be greatly reduced and electricity can be saved. In this study, a form-stable composite PCM consisting of paraffin eutectic mixture (n-eicosane-n-heptadecane) and diatomite was prepared for thermal energy storage in buildings. The composite PCM was prepared by adding paraffin eutectic mixture into diatomite by direct impregnation method. The morphology, chemical structure, chemical compatibility, thermal properties and thermal stability of the n-eicosan-n-heptadecane/diatomite composite was extensively investigated by SEM, FT-IR spectroscopy, DSC, and TG analysis. FT-IR results showed that there are only physical interactions between n-eicosan-n-heptadecane eutectic mixture and diatomite. DSC results showed that the composite exhibited similar phase change characteristics with the paraffin eutectic mixture. TG analysis results showed that the prepared composite PCM does not decompose up to 100 ^{o}C and has good thermal stability. Boron nitride (BN) was added to the composite at different mass ratios (0.5, 1.5, and 2.5%) to increase the thermal conductivity of the composite PCM, and it was found that the thermal conductivity of the composite PCM increased with the added BN amount. In addition, an energy-storing composite plaster was prepared by adding the prepared composite PCM to the gypsum plaster and its thermal performance was tested in a laboratory scale cell. Thermal performance tests showed that the composite could reduce in-room temperature fluctuations due to energy storage and had great potential for energy savings.

2021, 74 pages

Key Words: Phase change material, Thermal energy storage, Form-stable composite, Diatomite, Thermal conductivity

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisansımın tüm aşamalarında bilgi ve tecrübesiyle bana her konuda destek veren, ufkumu genişleten ve yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Ali KARAİPEKLİ'ye teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince desteklerini gördüğüm Kimya Bölümü Fizikokimya Laboratuvarındaki tüm hocalarıma ve öğrenci arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini, dualarını eksik etmeyen ve hakları bir türlü ödenmeyecek olan sevgili babam Mahmut YILDIRIM'a, annem İmran YILDIRIM'a, abim Dursun YILDIRIM'a ve kardeşim Kadriye YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Sadece yüksek lisans tezim süresince değil hayatımın her anında bana her konuda destek olan aileme, varlığıyla hayatıma anlam katan ve hep daha iyisini yapabileceğime inandıran sevgili eşim Ümmet BULUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Miyase BULUT
Çankırı, Haziran 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI ..... **i**
ETİK İLKELERE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI ..... **ii**
ÖZET ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
SİMGELER DİZİNİ ..... **viii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **x**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL BİLGİLER **3**
2.1 Termal Enerji ve Termal Enerji Depolama Yöntemleri **3**
2.2 FDM Seçiminde İstenilen Başlıca Özellikler **6**
2.3 FDM'lerin Sınıflandırılması **7**
2.3.1 Organik FDM'ler **8**
2.3.2 İnorganik FDM'ler **11**
2.3.3 Ötektik FDM'ler **12**
2.4 FDM'lerin Enerji Tasarruf Potansiyeli **13**
2.5 FDM'lerin Yapı Malzemelerine ve Binalara Katılma Yöntemleri **13**
2.5.1 Doğrudan katma **13**
2.5.2 Daldırma **13**
2.5.3 Kapsülleme **14**
2.5.4 Makrokapsülleme **14**
2.5.5 Mikrokapsülleme **15**
2.5.6 Yapıca-kararlı FDM **16**
2.6 Diatomit Tabanlı Yapıca Kararlı Kompozit FDM'ler **18**
2.6.1 Diatomit **18**
2.6.2 Diatomitin modifiye edilmesi **19**
2.6.3 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin hazırlanması **20**
2.6.4 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin karakterizasyonu **20**
2.7 FDM/Diatomit Kompozitleri Üzerine Yapılan Çalışmalar **24**
3. MATERYAL VE YÖNTEM **32**
3.1 Kullanılan Kimyasal Maddeler **32**
3.2 Parafin Ötektik Karışımlarının Hazırlanması **32**
3.3 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'lerin Hazırlanması **33**
3.4 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Karakterizasyonu **34**
3.6 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Termal İletkenliğinin Arttırılması **36**
3.7 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Termal Performans Testi **36**
4. BULGULAR **38**
4.1 Hazırlanan Kompozit FDM'nin Karakterizasyonu **38**
4.1.1 SEM analizi sonuçları **38**
4.1.2 FT-IR analizleri **40**
4.1.3 DSC analiz sonuçları **43**
4.1.4 TG analiz sonuçları **46**
4.2 Termal İletkenlik Sonuçları **49**
4.3 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Termal Performansı **51**

5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....56
KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ.....63

SİMGELER DİZİNİ

°C	Santigrat derece
C	Özgül ısı
K	Kelvin
kg	Kilogram
J	Joule
kJ	Kilojoule
g	Gram
µm	Mikrometre
mD	Milidarcy
ΔH	Entalpi değişimi
FDM	Faz değiştiren madde
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
FT-IR	Fourier transform infrared
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
TG	Termogravimetri
BN	Bor nitrür
TED	Termal enerji depolama
PU	Poliüretan
PS	Polistiren
PVC	Polivinil klorür
CA	Kaprik asit
MA	Miristik asit
PEG	Polietilen glikol
SA	Stearik asit
LA	Laurik asit
PA	Palmitik asit
GG	Genişletilmiş grafit
XRD	X-Işını kırınım
CNTs	Karbon nanotüpler
DT	Diatomit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Enerji depolama yöntemleri 3
Şekil 2.2 Termal enerji depolama yöntemleri. (a) Duyulur ısı, (b) Gizli ısı, (c) Termokimyasal enerji depolama 3
Şekil 2.3 Termal enerji depolama amacıyla kullanılan FDM'lerin sınıflandırılması. . 8
Şekil 2.4 Farklı konfigürasyonlarda makrokapsüllenmiş FDM'ler 15
Şekil 2.5 FDM'nin bir polimerik kabuk içinde çekirdek malzeme olarak mikrokapsüllenmesi 16
Şekil 2.6 Yapıca kararlı kompozit FDM hazırlanışı (a) Polimer destekli ve (b) Gözenekli inorganik destek maddeli 18
Şekil 2.7 SEM görüntüleri (A) disk tipi diatomit ve (b) doğrusal tip diatomit 19
Şekil 2.8 Diatomitin SEM görüntüleri (a) ham diyatomit ve (b) kalsine edilmiş 20
Şekil 3.1 Ötektik oranların deneysel olarak belirlenmesi için seçilen n-alkanların ikili karışımlarının DSC eğrileri 33
Şekil 3.2 Sızma testi süresince hazırlanan parafin ötektik karışımı/DT kompozit peletlerin fotoğraf görüntüleri 34
Şekil 3.3 Test hücreleri ve deney düzeneğinin fotoğraf görüntüleri 37
Şekil 4.1 Kalsine diatomitin SEM görüntüsü 38
Şekil 4.2 Kompozit FDM'nin SEM görüntüsü 39
Şekil 4.3 Eriyik aglomerasyonunda granül oluşum mekanizmaları (a) Dağılma mekanizması (b) Daldırma mekanizması 40
Şekil 4.4 Kalsine edilmiş diatomitin FT-IR spektrumu 41
Şekil 4.5 Parafin ötektik karışımının FT-IR spektrumu 42
Şekil 4.6 Parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin FT-IR spektrumu 43
Şekil 4.7 n-eikosan - n-heptadekan ötektik karışımın DSC eğrisi 44
Şekil 4.8 Parafin ötektik karışımı/DT kompozit FDM'nin DSC eğrisi 44
Şekil 4.9 Kalsine edilmiş diatomitin TG termogramı 48
Şekil 4.10 n-eikosan - n-heptadekan ötektik karışımın TG termogramı 48
Şekil 4.11 Yapıca kararlı kompozit FDM'nin TG termogramı 49
Şekil 4.12 Diatomin, parafin ötektik karışımı, yapıca kararlı kompozit ve BN ilaveli kompozitlerin termal iletkenlikleri 50
Şekil 4.13 24 saatlik termal performas testi süresince hava sıcaklık değişimi 52
Şekil 4.14 Alçı sıva ve kompozit FDM içeren alçı sıva ile sıvanmış test hücrelerinin 24saat boyunca dış duvar sıcaklık değişim eğrileri 52
Şekil 4.15 Alçı sıva ve kompozit FDM içeren alçı sıva ile sıvanmış test hücrelerinin 24 saat boyunca iç duvar sıcaklık değişim eğrileri 53
Şekil 4.16 Alçı sıva ve kompozit FDM içeren alçı sıva ile sıvanmış test hücrelerinin 24 saat boyunca hücre içi sıcaklık değişim eğrileri 53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 TED uygulamaları için uygun bazı organik FDM'lerin erime sıcaklıkları ve gizli ısıları 9
Çizelge 2.2 Bazı parafinlerin erime sıcaklıkları ve erime gizli ısıları 10
Çizelge 2.3 Bazı tuz hidratların erime sıcaklıkları ve gizli ısıları..... 11
Çizelge 2.4 Bazı ötektik FDM'lerin erime sıcaklıkları ve erime ısıları..... 12
Çizelge 2.5 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal özellikleri..... 22
Çizelge 2.6 Genişletilmiş grafit ilaveli ve ilavesiz diatomit bazlı yapıca kararlı kompozitlerin termal özellikleri ve termal iletkenliği 23
Çizelge 4.1 Parafin ötektik karışımı ve kompozitin ölçülen termofiziksel özellikleri..... 45
Çizelge 4.2 Hazırlanan parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin termal özelliklerinin literatürdeki diatomit esaslı bazı malzemelerle karşılaştırılması 46
Çizelge 4.3 n-eikosan-n-heptadekan/DT/%2,5BN kompozitinin termal iletkenliğinin literatürdeki bazı diatomit bazlı kompozitlerinki ile karşılaştırılması 51

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun ve yaşam kalitesinin artması ile enerjiye duyulan ihtiyaç da hızla artmaktadır. Son tahminler birincil enerji tüketiminin 2040 yılında % 48 artacağını göstermektedir (European Commission 2016). Fosil kökenli kaynakların çevreye olumsuz etkilerinin yanı sıra tükenmesi de sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçişi hızlandırmıştır. Güneş radyasyonu, okyanus dalgaları, rüzgâr ve biyogaz gibi yenilenebilir enerjiler, doğal dengenin yeniden düzenlenmesinde ve artan nüfusa bağlı enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadır (Twidell and Weir 2015). Bununla birlikte, iklimsel belirsizlikler nedeniyle, yenilenebilir enerjiyi depolama araçlarının kullanımı acil hale gelmiş ve verimli ve sürdürülebilir enerji depolama yöntemlerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur (Iten et al. 2016). Enerji depolama, yenilenebilir enerji teknolojisi sistemlerinin önemli bir parçasıdır (International Renewable Energy Agency 2015). Termal enerji depolama (TED), bir depolama ortamını ısıtarak veya soğutarak termal enerjinin depolandığı bir teknolojidir. Depolanan enerji daha sonra ısıtma ve soğutma uygulamaları için kullanılabilir (Sarbu and Sebarchievici 2016). TED'in bir enerji sisteminde kullanılması genel verimlilikte bir artış, güvenilirlik, yatırım ve işletme maliyetlerinde azalma ve daha az çevre kirliliği, yani daha az karbondioksit (CO_2) emisyonu sağlar (Dincer and Rosen, 2002). Bu nedenle TED sistemleri özellikle binalarda ve endüstriyel proseslerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Binalarda enerji verimliliği sağlamak için enerji sistemleri ve yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine yapılan araştırmaların sayısı son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Enerji tasarruflu binalar, ısıtma ve soğutma için enerji tüketimini azaltacak, normal iç ortam sıcaklığına sahip bina oluşturulmasına ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasına yardımcı olacaktır. Binaların ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmaya yönelik araştırmacılar arasında büyük ilgi gören yeni bir yaklaşım faz değişim maddesi (FDM) kullanılarak TED yöntemidir. FDM'ler, belli bir sıcaklık aralığında katı-katı veya katı-sıvı fazlar arasındaki bir faz değişim süreci sırasında enerjiyi gizli ısı şeklinde absorbe etme ve serbest bırakma yeteneğine sahip bir tür enerji depolama malzemeleridir. FDM'leri TED için diğer malzemelerden daha kullanışlı kılan temel

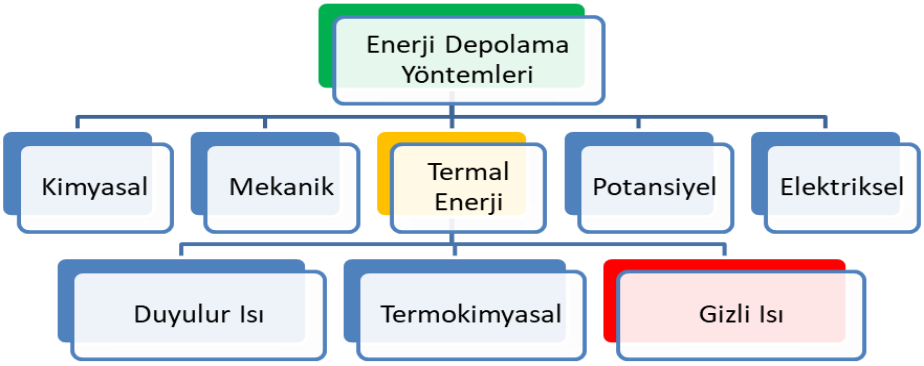
özellik, küçük sıcaklık aralığında ısı enerjisini birim hacim başına daha yüksek miktarda depolamalarıdır (Sharma et al. 2009, Tyagi et al. 2011). Bu nedenle, FDM'ler yapı bileşenleri ile binalara entegre edildiğinde, bina tarafından güneş radyasyonunun termal enerjisi depolanacak ve böylece binanın termal kapasitesi artacaktır (Hawes and Feldman 1992, Ling and Poon 2013, Memon, 2014; Soares et al. 2013). Sıcaklık yükseldiğinde, FDM katıdan sıvıya faz değiştirir ve bu şekilde enerjiyi depolar. Sıcaklık azaldıkça, FDM sıvıdan katıya faz değiştirir ve depoladığı enerjiyi serbest bırakır. FDM'ler enerji depolama ve boşaltma için sürekli olarak katıdan sıvıya ve sıvıdan katıya faz değiştirdiklerinden dolayı bunları doğrudan yapı malzemelerine katmak zordur. FDM'lerin yapı malzemesine entegrasyonu için doğrudan katma, daldırma, emdirme, yapıca kararlı kompozit oluşturma ve kapsülleme gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Hawes et al. 1992, Rathore and Shukla 2019). Doğrudan katma, daldırma ve emdirme yöntemlerinin sıvı FDM'nin sızması, düşük ısı transfer alanı ve yapı malzemesi ile kimyasal tepkimeye girme gibi dezavantajları bulunmaktadır (Navarro et al. 2016). Kapsüllenmiş FDM'ler, kapsül kenarlarının etrafında FDM'nin katılaşması nedeniyle düşük ısı transfer hızı ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir (Pasupathy et al. 2008). Ayrıca, binanın duvarlarında delme ve çivileme gibi çeşitli faaliyetler nedeniyle FDM kapsüllerinin hasar görme olasılığı yüksektir. Gözenekli kil mineralleri içerisine FDM'nin sıvı halde sızma göstermeyeceği oranda katılması ile oluşturulan yapıca kararlı kompozit FDM'ler korozyona neden olmama, hızlı ısı transferi sağlama, istenilen miktarda kolaylıkla ve düşük maliyetle hazırlanabilir olma avantajlarından dolayı ümit verici maddelerdir. Bu nedenle son zamanlarda yapılan çalışmalar, "yapıca kararlı FDM/kil mineral bazlı kompozit karışımlarının geliştirilmesi ve bunların termal enerji depolama özelliklerinin belirlenmesi" konusunda yoğunlaşmaktadır.

Bu çalışmada, termal enerji depolama uygulamalarında kullanılabilecek yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/diatomit kompozit karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit karışımın yapısal ve kimyasal karakterizasyonu yapılarak, termal özellikleri, termal kararlıkları ve termal performansları belirlenmiştir. Ayrıca, kompozit FDM'nin termal iletkenliği bor nitrür kullanılarak iyileştirilmiş ve küçük ölçekli bir test hücresinde termal performansı test edilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

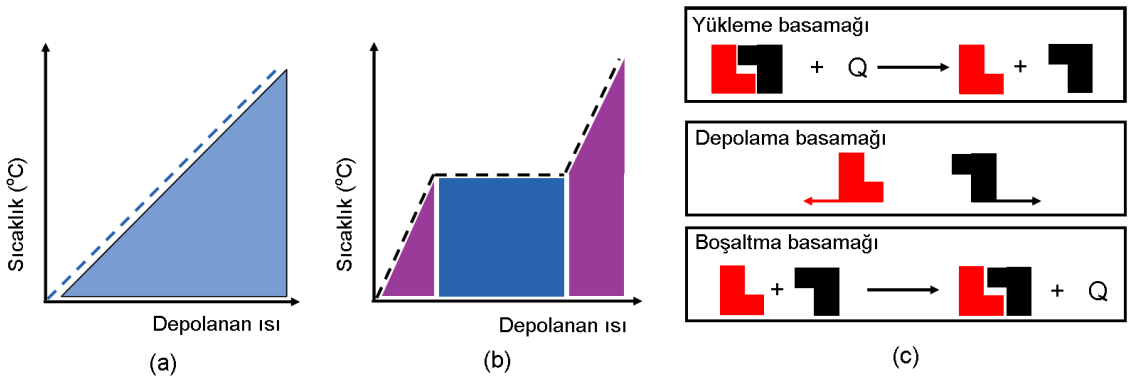
2.1 Termal Enerji ve Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Enerji genel olarak Şekil 2.1'de belirtilen şekillerde depolanabilir. Enerji depolama yöntemleri arasında kullanımı en eski çağlara dayanan ve günümüzde de yaygın olan yöntem termal enerji yöntemidir.



Şekil 2.1 Enerji depolama yöntemleri

Termal enerji depolama için temelde üç yöntem bulunmaktadır (Şekil 2.2). Bunlar; duyulur, gizli ve termokimyasal ısı depolamadır. Duyulur ısı ve gizli ısı depolama pasif sistemler kategorisine girerken, termokimyasal ısı depolama aktif sistemler içerisinde sayılmaktadır (Heier et al. 2015).



Şekil 2.2 Termal enerji depolama yöntemleri. (a) Duyulur ısı, (b) Gizli ısı, (c) Termokimyasal enerji depolama.

Duyulur ısı (Şekil 2.1a), termal enerjiyi depolamak için kullanılan en basit yöntemdir ve ısıyı depolamak ya da boşaltmak için bir ortamda (katı ya da sıvı) sıcaklık farkı oluşturulması temeline dayanır.

$$\Delta Q = m.\int_{T1}^{T2} Cp\,(T).\,dT \tag{1}$$

Depolanan ısıl enerji miktarı ortamın özgül ısısına (C_p), sıcaklık değişimine (ΔT) ve depolama maddesinin miktarına (m) bağlıdır. Enerjiyi duyulur ısı olarak depolamak için kullanılan en yaygın malzeme sudur. Seramik, mermer, granit, kil, kum, doğal taşlar ve polimerler (PU, PS, PVC) yaygın olarak duyulur ısı depolama maddesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, uygun termofiziksel özelliklere sahip endüstriyel atık maddelerde, duyulur ısı depolama amacıyla kullanım potansiyeli taşımaktadır. Duyulur ısı depolama iki önemli avantaja sahiptir. Birincisi duyulur ısı depolamada kullanılan maddeler ucuzdur. İkincisi ise toksik maddelerin kullanımından kaynaklanabilecek riskler oluşturmaz. Ayrıca, enerjiyi depolamak için kullanılan malzeme, depolama kabı içerisinde bulunur ve böylece sistem tasarımını kolaylaştırır. Binalarda duyulur ısı depolama uygulamasının temel dezavantajı, depolanması istenen ısı miktarına bağlı olarak büyük hacimde kullanım gerektirmeleridir (Dincer 2002).

Gizli ısı, sabit sıcaklıktaki bir işlem sırasında bir termodinamik sistem tarafından salınan veya absorplanan ısıdır (Şekil 2b). Örneğin maddenin katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz, sıvı-sıvı ve sıvı-gaz şeklindeki faz değişimi süresince enerji gizli ısı olarak depolanır ya da salınır. Enerjiyi bu şekilde depolayan maddeler "faz değişim maddesi (FDM)" olarak adlandırılır. Binalarda gizli ısı depolama katı-sıvı faz değişimi ile kolaylıkla sağlanabilir (Lizana et al. 2018). Bir gizli ısı depolama sisteminin enerji depolama kapasitesi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Zeinelabdein et al. 2018).

$$Q = \int_{T_o}^{T_e} mC_p dT + mH_E + \int_{T_e}^{T_s} mC_p dT = m\left[\ H_E + C_k\left(T_e - T_i\right) + C_s\left(T_s - T_e\right)\right] \tag{2}$$

Bu eşitlikte C_k ve C_s (kJ/kgK) sırasıyla katı ve sıvı fazın sabit basınçtaki özgül ısıları; T_o (K) başlangıç sıcaklığı, T_e (K) erime sıcaklığı ve T_s (K) son sıcaklık ve H_E (kJ/kg) erime gizli ısısıdır. Bu eşitlikteki birinci ve üçüncü terim FDM'nin duyulur ısısını, ikinci terim ise, erime gizli ısısını ifade eder. FDM'ler duyulur ısı depolama maddeleri ile karşılaştırıldığında üç önemli avantaja sahiptirler: (a) FDM birim hacim başına 5-14 kat daha fazla ısı depolar. (b) Enerji depolama ve geri kazanım işlemi sabit sıcaklıkta gerçekleşir ve erime sıcaklığına bağlı olarak hem ısıtma hem soğutma amaçlı kullanılabilirler. (c) Geniş bir sıcaklık aralığında (-10-300 ^oC) enerji depolama uygulamaları için mevcut çok sayıda FDM bulunmaktadır (Sahoo et al. 2016, Du et al. 2018, Pandey et al. 2018, Rathore et al. 2019).

Termokimyasal enerji depolama oldukça yeni bir yöntemdir. Bu yöntemde enerji, tamamen tersinir kimyasal bir tepkime şeklinde depolanır ve salınır (Şekil 2c). Tersinir tepkimelerle ısı, tepkimenin endotermik yönünde depolanır, ekzotermik yönünde geri kazanılır. Bu enerji depolama yöntemi, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha düşük ısı kaybı sağlama avantajlarından dolayı ilgi çekici bir yöntemdir. Bu yöntem en enerji verimli termal enerji depolama yöntemi olmasına rağmen araştırma ve geliştirme aşamasındadır ve inşaat sektöründe herhangi bir uygulaması yoktur. Bu bağlamda, bu yöntemin binalarda uygulamaları için termokimyasal maddelerin korozyon, zayıf ısı ve kütle transfer performansı, çevre dostu olmayan üretim, kimyasal kararsızlık ve yüksek maliyet gibi sınırlamalarının aşılması gerekmektedir (Krese et al. 2018).

FDM'ler binaların termal enerji depolama kapasitesini arttırmak için birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Binalarda FDM'lerin kullanımı termal konfor aralığında iç ortam sıcaklığının korunmasına yardımcı olur, sıcaklık salınımını kontrol eder ve pik yükünü kapalı saatlere kaydırarak enerji tüketimini azaltır (Kasaeian, et al. 2017).

2.2 FDM Seçiminde İstenilen Başlıca Özellikler

Termal enerji depolama sistemlerinin tasarımında kullanılacak FDM'ler istenilen bazı termal-fiziksel, kinetik, kimyasal, ekonomik ve çevresel özelliklere sahip olmalıdır. Gizli ısı depolamada kullanılacak herhangi bir maddenin ısıl-fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvar testlerinden geçirilmesi gerekir. Laboratuvar testlerinde maddenin ısıl-fiziksel özellikleri (faz değişim sıcaklığı, entalpi, özgül ısı, ısıl iletkenlik) ve ısı depolama açısından diğer özellikleri (tekrarlanan ısıtma-soğutma dönüşümlerinde maddenin özelliklerinin kararlılığı, aşırı ısınma ve soğuması) belirlenir (Konuklu et al. 2015). FDM'lerde istenen özellikler şöyle sıralanabilir:

Termal-fiziksel özellikler

• Bina uygulamaları için uygun faz değişim sıcaklığı

• Birim hacim başına yüksek gizli ısı (böylece daha küçük boyutta kap kullanılabilir)

• Belirli zaman aralığında FDM'nin daha hızlı enerji depolama ve boşaltılmasını sağlamak için yüksek ısı iletkenliği

• Yüksek özgül ısı (böylece duyulur ısı şeklinde ek bir enerji, termal enerji depolama sistemine ilave edilebilir)

• Faz değişimi süresince küçük hacim değişimi ve çalışma sıcaklık aralığında düşük buhar basıncı

• Düzenli olarak erime ve katılaşma (böylece katı ve sıvı fazlar homojendir)

• Termal olarak kararlılık (FDM'nin, faz değişim sıcaklığı ve gizli ısının sabit olması ve uzun vadede kullanılabilmeli)

Kinetik özellikler

• FDM'nin sıvı fazda aşırı soğumasını önlemek için çekirdekleşme hızı yüksek olmalı

• Depolama sisteminden ısı geri kazanımının optimum düzeyde olmasını sağlamak için kristal büyüme hızı yüksek olmalı

Kimyasal özellikler

• Yapı ya da kapsülleme malzemeleri ile kimyasal açıdan uyumlu olmalı

• Uzun vadeli kullanım için çok sayıda termal (erime/donma) dönüşümden sonra bozunmaya uğramamalı

• Güvenlik açısından toksik, yanıcı ve patlayıcı olmamalı

• Yapı ya da kapsülleme malzemelerinde korozyona neden olmamalı

Ekonomik özellikler

• Düşük maliyetli olmalı

• Ticari olarak kolay bulunabilir olmalı

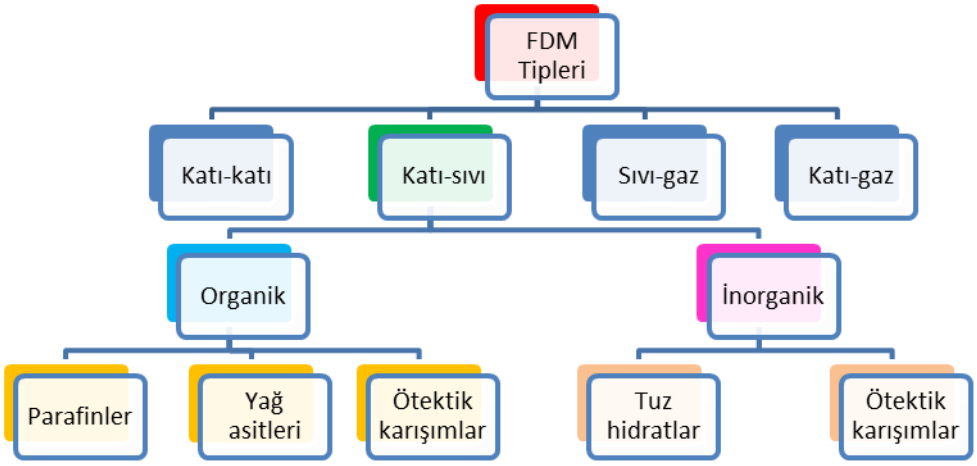
Çevresel özellikler

• Kullanım süresi boyunca çevreye etkisi olmamalı

• Geri dönüşüm potansiyeline sahip olmalı

2.3 FDM'lerin Sınıflandırılması

FDM'ler faz geçiş tipine bağlı olarak katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı- gaz olmak üzere dört şekilde sınıflandırılabilir. Uygulama kolaylığı açısından, soğutma veya ısıtma için katı-sıvı faz değişimine sahip maddeler kullanılmaktadır (Qian et al. 2015, Sun et al. 2016). Piyasada farklı erime aralığına sahip birçok FDM bulunmaktadır. Katı-sıvı faz değişimine sahip FDM'ler kimyasal bileşime göre organik, inorganik ve ötektik olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Termal enerji depolama amacıyla kullanılan FDM'lerin sınıflandırılması

2.3.1 Organik FDM'ler

Organik FDM'ler çok geniş bir madde sınıfı oluşturmalarına rağmen saf n-alkanlar, yağ asitleri ve esterler gizli ısı depolama için en bilinen maddelerdir (Kenisarin, 2014). Yüksek gizli ısı depolama kapasitesi, uygun faz geçiş sıcaklığı, kararlı fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı nedeniyle organik FDM'ler en çok kullanılan maddelerdir. Saf haldeki organik FDM'ler, düşük termal iletkenlik (organik FDM'ler için genellikle 0,2 W/mK'den az), faz değişimi esnasında yüksek hacim değişimi ve sızma davranışı gösterme gibi pratik uygulamalarda kullanımlarını sınırlayan bazı dezavantajlara sahiplerdir (Mehrali et al. 2014). Organik FDM'ler parafin veya parafin olmayan maddeler olarak da sınıflandırılırlar. Organik FDM'ler genelde korozif özellik göstermezler ve düzenli erime ve katılaşma davranışı sergilerler. Termal enerji depolama uygulamalarında enerji depolama amacıyla kullanılabilecek bazı organik FDM'lerin erime sıcaklığı ve gizli ısı değerleri Çizelge 2.1'de sunulmuştur.

Çizelge 2.1 TED uygulamaları için uygun bazı organik FDM'lerin erime sıcaklıkları ve gizli ısıları

FDM	Erime sıcaklığı (°C)	Gizli ısı (J/g)
Gliserin	17,9	198,7
Parafin C16	18,2	238
Butil stearat	19	140
Propil palmitat	19	186
Emerest 2325	20	134
Emerest 2326	20	139
Lityum klorür ethanolat	21	188
Dimetil sebakat	21	135
Parafin C17	21,7	213
RT20	22	172
Poliglikol E600	22	127,2
D-Laktik asit	26	184
1-dodekanol	26	200
n-oktadekan	27	243,5
Parafin C18	28	244
Metil palmitat	29	215
Kaprik asit	29,62	139,8
Heptadekan	20,8-21,7	172
Poli etilen glikol 600	20-25	146
Parafin C13–C24	22-24	189
RT27	26-28	179
Vinil stearat	27-29	122

2.3.1.1 Parafinler

Parafinler düz zincirli alkanlardan (CH_3-(CH_2)-CH_3)'dan oluşurlar. Parafinlerin zincir uzunluklarının artması, erime sıcaklığı ve erime gizli ısısında artışa neden olur. Erime aralığı -12 °C ile 71 °C arasında olan parafinler 128 kJ/kg ile 198 kJ/kg aralığında eneji

depolayabilir. Parafinler, korozif olmama ve aşırı soğuma davranışı göstermeme özelliklerinden dolayı en popüler FDM'lerdir. Parafinler, termal enerji depolama uygulamaları için güvenilir, ucuz ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olma gibi önemli avantajlara sahiptirler. Bunlara ek olarak, parafinler düşük sıcaklıklarda kararlı ve inerttirler ve faz değişimi süresince önemli hacim değişimi göstermezler. Bazı parafinlerin özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Parafinler istenilen özelliklerinin yanında sabit bir erime sıcaklığına sahip olmama, düşük termal iletkenliğe ve yanıcı özelliğe sahip olma gibi bazı istenmeyen özelliklere de sahiptirler.

Çizelge 2.2 Bazı parafinlerin erime sıcaklıkları ve erime gizli ısıları

FDM	"C" atomu sayısı	Erime Sıcaklığı (°C)	Gizli ısı (J/g)
n-Tetradekan	14	4,5-5,6	231
n-Pentadekan	15	10	207
n-Hekzadekan	16	18,2	238
n-Heptadekan	17	22	215
n-Oktadekan	18	28,2	245
n-Nonadekan	19	31,9	222
n-Eikosan	20	37	247
n-Heneikosan	21	41	215
n-Dokosan	22	44	249
n-Trikosan	23	47	234
n-Tetrakosan	24	51	255
n-Pentakosan	25	54	238
n-Hekzakosan	26	56	257
n-Heptakosan	27	59	236
n-Oktakosan	28	61	255

2.3.1.2 Parafin olmayan organik FDM'ler

Farklı özelliklere sahip çok çeşitli parafin olmayan FDM'ler bulunmaktadır. Bu maddeler termal enerji depolama uygulamaları için potansiyel FDM'ler olarak kabul

edilirler. Alkoller, esterler, glikoller ve yağ asitleri, iyi bilinen parafin olmayan FDM'lerdir. Bu FDM sınıfının en büyük dezavantajlarından biri, yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında yanıcı olmalarıdır. Bu sınıfta, yağ asitleri yüksek erime gizli ısısı, düşük aşırı soğuma davranışı, faz ayrımı göstermeme ve istenilen erime sıcaklığına sahip olma gibi birçok uygun özelliğinden dolayı bina soğutma uygulamaları için en uygun olan FDM alt sınıfını oluştururlar. Bununla birlikte, yağ asitleri parafinlere kıyasla daha pahalıdır ve bazı durumlarda korozif özellik gösterebilmektedirler.

2.3.2 İnorganik FDM'ler

İnorganik FDM'ler tuz hidratlar, tuz çözeltileri ve metallerden oluşur. Ancak tuz hidratlar en çok bilinen inorganik FDM'lerdir ve bu maddeler çok sayıda termal enerji depolama çalışmasında kullanmıştır. Tuz hidratlar yüksek ısı depolama yoğunluklarından dolayı ısı depolama maddelerinin önemli bir sınıfını oluştururlar ve daha çok 0-150 ºC sıcaklık aralığında kullanılırlar. Çizelge 2.3'de bazı tuz hidratların erime sıcaklıkları ve erime entalpileri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Bazı tuz hidratların erime sıcaklıkları ve gizli ısıları

FDM	Erime sıcaklığı (°C)	Gizli ısı (J/g)
$KF \cdot 4H_2O$	18,5	231
$K_2HPO_4 \cdot 4H_2O$	18,5	231
$FeBr_3 \cdot H_2O$	21	105
$Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	25,5	148
$LiBO_2 \cdot 8H_2O$	25,7	289
$FeBr_3 \cdot 6H_2O$	27	105
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29	191
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	30	189

Tuz hidratlar düzenli, düzensiz ve yarı düzenli olmak üzere üç tip erime davranışı gösterirler. Düzenli erime, susuz tuz erime sıcaklığında hidrat suyunda tamamen çözündüğü zaman meydana gelir. Düzensiz erimede, susuz tuz erime sıcaklığında hidrat

suyu içinde tamamen çözünmediği zaman oluşur. Yarı düzenli erime ise katı ve sıvı faz, faz değişimi süresince dengede olduğu zaman meydana gelir. Genellikle suda çözünebilen tuzlar enerji depolama amacıyla kullanılır.

2.3.3 Ötektik FDM'ler

Ötektik FDM'ler en az iki farklı FDM'nin belli kütle oranlarında ve sabit donma sıcaklığına sahip karışımından oluşur. Bu karışım inorganik-inorganik, inorganik-organik ve organik-organik ikili karışımlarından oluşabilir. Ötektik FDM'lerde bileşenlerin ayrılma olasılığı düşüktür. Çünkü bu karışımlar çoğunlukla faz ayrımı olmadan faz değişimine uğrarlar ve erime işlemi sırasında ötektik karışımı oluşturan tüm bileşenler aynı anda sıvı hale geçerler. Binalarda pasif soğutma uygullamalarında kullanılabilecek ötektik FDM'lerin bazıları Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Bazı ötektik FDM'lerin erime sıcaklıkları ve erime ısıları

Ötektik FDM	Erime sıcaklığı (°C)	Gizli ısı (J/g)
Kaprik + Laurik	21	143
Metil stearat + Setil stearat	22,2	180
Kaprik asit + Miristik asit	22,6	154,8
Metil stearat + Metil palmitat	23,9	220
$C_{14}H_{28}O_2 + C_{10}H_{20}O_2$	24	147,7
Tetradodekanol + Laurik asit	24,5	90
Kaprik asit + Stearik asit	24,7	178,6
$CaCl_2 . 6H_2O + MgCl_2 . 6H_2O$	25	95
$CH_3CONH_2 + NH_2CONH_2$	27	163
Metil stearat + Setil palmitat	28,2	189
$Ca(NO_3) . 4H_2O + Mg(NO_3)_2 . 6H_2O$	30	136
$CH_3COONa . 3H_2O + NH_2CONH_2$	30	200,5
$CaCl_2 + NaCl + KCl + H_2O$	26-28	188

2.4 FDM'lerin Enerji Tasarruf Potansiyeli

FDM'ler binalara entegre edildiğinde enerji tasarruf potansiyelleri, FDM'nin tipine ve bina ortamına bağlıdır. Genel olarak, FDM'ler ya yapı malzemesi ile ya da iklimlendirme sistemi ile birleştirilir. FDM'lerin ısıtma ve soğutma üzerine enerji kullanımındaki etkisi, binanın konumu ve iklim koşullarına göre değişir (Entrop et al. 2016). Binalarda enerji kullanım düzeyini etkileyen beş parametre bulunmaktadır. Bunlar çevresel özellikler, kullanıcı özellikleri, bina kaplama özellikleri, sistem özellikleri ve binalarda kullanılan cihazlardır. Tüm bu parametreler FDM'lerin performansını bir şekilde etkiler. Bu nedenle, FDM'ler ile enerji tasarruflu bir sistem tasarlanırken, yukarıda belirtilen parametrelerin tümü doğru bir şekilde analiz edilmelidir.

2.5 FDM'lerin Yapı Malzemelerine ve Binalara Katılma Yöntemleri

2.5.1 Doğrudan katma

Bu yöntem, FDM'nin doğrudan imalat sırasında alçı, çimento harcı veya beton gibi inşaat malzemeleri ile karıştırıldığı en basit, pratik ve ekonomik yöntemdir (Feldman et al. 1991). Bu yöntemde sıvı ya da katı haldeki FDM'ler alçı ve beton gibi yapı malzemeleri içerisine doğrudan ilave edilerek ya da sıvı FDM, kullanılan yapı malzemesi içerisine emdirilerek kullanılır. Bu yöntemin en bilinen örneği kütlece % 21-22 oranında ticari saflıktaki butil stearatın doğrudan katma metoduyla geleneksel alçı panel içerisine katılarak laboratuar ölçekli enerji depolayıcı alçı duvar yapımıdır.

2.5.2 Daldırma

Daldırma yönteminde, gözenekli yapı malzemesi (alçı, tuğla veya beton blok) erimiş haldeki FDM içerisine daldırılır ve bu esnada FDM kapiler kuvvetlerden dolayı gözenekler içerisine absorplanır. Daha sonra gözenekli yapı malzemesi sıvı FDM içerisinden çıkartılır ve gözenekler içerisindeki FDM'nin soğuması sağlanır. Bu yöntemin en büyük avantajı istenilen zamanda istenilen gözenekli yapı malzemesine

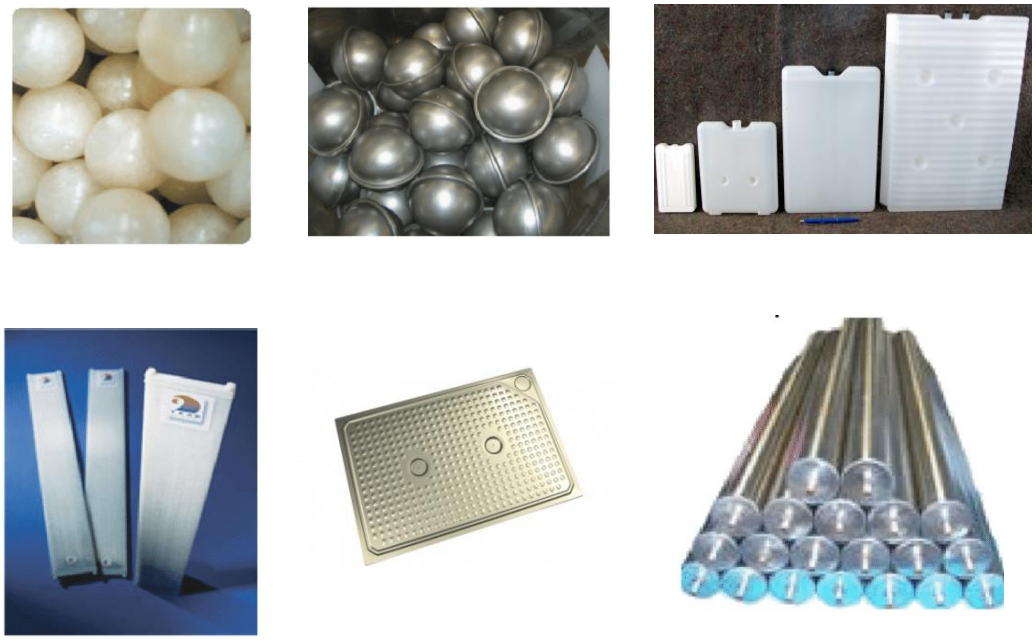
pratik olarak uygulanabilmesidir. Ancak bu yöntem ile elde edilen kompozit yapı malzemelerinde çok sayıda termal çevrimden sonra FDM sızıntısı gözlendiği ve yapı malzemelerinin mekanik dayanımının azaldığı rapor edilmiştir (Soares et al. 2013).

2.5.3 Kapsülleme

Bu yöntemde, FDM'lerin yapı malzemeleri üzerinde meydana getirebileceği olumsuz etkileri önlemek amacıyla FDM'ler yapı malzemesine katılmadan önce kapsüllenir. Kapsülleme için makrokapsülasyon ve mikrokapsülasyon olmak üzere iki temel yöntem vardır.

2.5.4 Makrokapsülleme

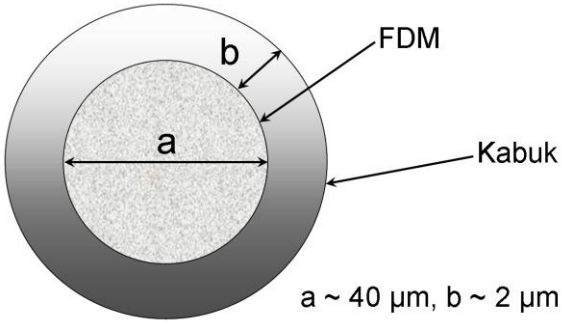
Bu yöntemde, yapı malzemelerinde kullanılmak üzere büyük miktarda FDM (birkaç litreye kadar) metalik tüpler içerisinde ya da plastik veya metalik kapsüller içerisine depolanır ve daha sonra yapı malzemelerine katılırlar. Makrokapsülleme kolay taşıma, istenilen uygulamaya göre istenilen boyutta üretilebilme, FDM için koruyucu bariyer olma gibi avantajlara sahiptir. Makrokapsüllemenin dezavantajları düşük termal iletkenlik, bina uygulaması için daha fazla çalışma gerektirme, depolama kabının köşelerinde ve kenarlarında katılaşma eğilimi göstermeleri ve etkin ısı transferini azaltmalarıdır. Bu nedenle, kapsülleme etkin ısı aktarım hızı için optimize edilmeli ve aynı zamanda korozyon direnci yüksek, termal olarak kararlı ve güvenilir olmalıdır. Makrokapsülleme küresel, paket, düz panel, silindir ve boru gibi çeşitli konfigürasyonlarda yapılabilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Farklı konfigürasyonlarda makrokapsüllenmiş FDM'ler

2.5.5 Mikrokapsülleme

Mikrokapsülleme katı, sıvı ve gazların 1 µm ile 1000 µm büyüklüğündeki partiküllerinin genellikle doğal ve sentetik polimerlerden yapılmış ince inert bir kabuk içine kapatılması işlemidir. Mikrokapsüllenmiş FDM (MFDM) Şekil 2.5'de gösterildiği gibi koruyucu tabakanın içinde FDM çekirdeğine sahip olan çok küçük boyutlu parçacıklardır. Kabuk kısmı koruyucu bir tabaka görevi görerek FDM'yi dış ortamdan korur. FDM, termal duruma göre koruyucu kabuk içinde faz değişimine uğrar ve böylece sıvı haldeki FDM'nin sızma olasılığını ve dış çevre ile her türlü kimyasal ve fiziksel etkileşimini azaltır. MFDM'ler, ısı transferi için arttırılmış yüzey alanı, sızma göstermeme, FDM'nin dış çevreye karşı reaktivitesini azaltma ve faz değişim sürecinin kontrol edilmesi gibi avantajlara sahiptir (Farid et al. 2004).



Şekil 2.5 FDM'nin bir polimerik kabuk içinde çekirdek malzeme olarak mikrokapsüllenmesi

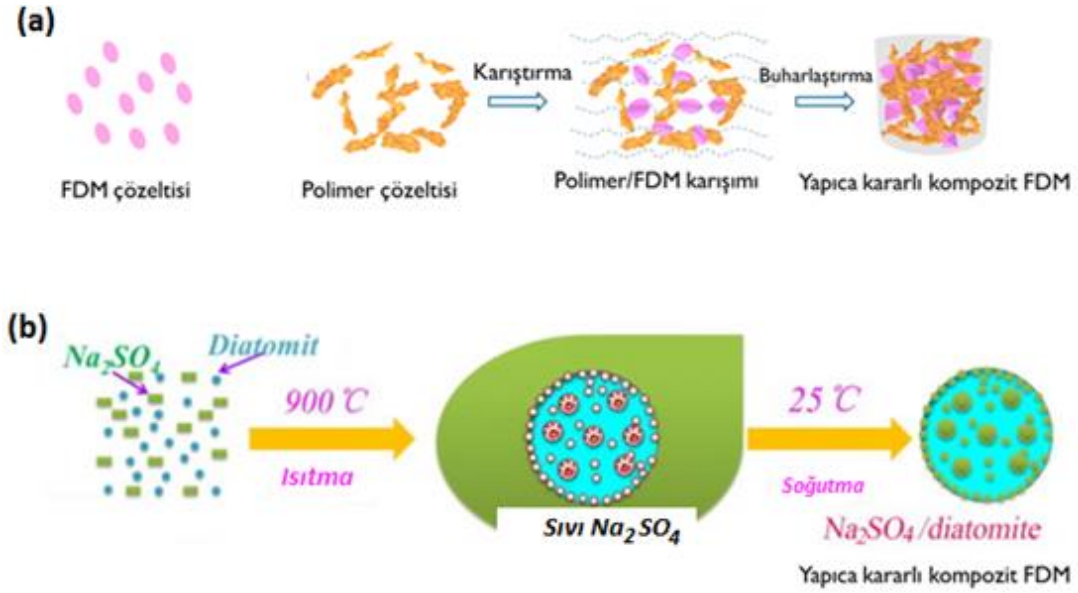
2.5.6 Yapıca-kararlı FDM

Yapıca-kararlı kompozit FDM'ler genişletilmiş perlit, vermikülit, genişletilmiş grafit, diatomit, yüksek yoğunluklu polietilen, bütadien, karbon nanotüpler, stiren vb. gibi destekleyici malzemeler içerisine FDM'lerin yerleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerdir (Şekil 2.6). Yapıca-kararlı kompozit FDM'ler herhangi bir kapsülleme olmaksızın çok sayıda termal dönüşümden sonra bile şeklini koruma konusundaki mükemmel yeteneklerinden dolayı son on yılda büyük ilgi görmüştür. Yapıca-kararlı kompozit FDM'lerin avantajları şöyle sıralanabilir: (1) Yüksek özgül ısı kapasitesine ve uygun termal iletkenliğe sahiptirler. (2) FDM destek malzeme içerisine hapsedildiği için, karışımın sıcaklığı FDM'nin erime sıcaklığının üzerinde iken herhangi bir FDM sızıntısı gözlenmez. (3) Uzun süreli kullanım periyodunda termal olarak güvenilirliğe sahiplerdir. (4) Bu tip bir karışımda FDM ek bir depolanma işlemi gerektirmez (5) Karışım istenilen miktarda ve aynı zamanda düşük maliyetle hazırlanabilir. Yapıca-kararlı kompozit FDM'ler, binalara entegre edildiği zaman bina içi sıcaklık dalgalanmalarını ve enerji taleplerini önemli ölçüde düşürebilir, tepe yükleri yoğun olmayan dönemlere kaydırabilir ve konforlu bir termal ortam sağlayabilir. Bu nedenle, bu tip kompozit FDM'lerin binalarda kullanılması binaların enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabilir.

Destek madde olarak polimer matrikslerin kullanıldığı yapıca kararlı kompozit FDM'ler iki farklı yöntemle hazırlanabilir. Birinci yöntemde FDM ve destek malzemesi eritilir ve

birbirleriyle yüksek sıcaklıkta karıştırılır. Diğer yöntemde hem FDM'yi hemde polimer destek maddeyi çözen bir ortak çözücü kullanılarak her iki bileşen çözülür ve çözeltiler birbirleriyle karıştırılır. Daha sonra çözücü uzaklaştırılarak kompozit FDM elde edilir. Polimer matrisli yapıca kararlı kompozit FDM'lerin üretim maliyetleri ve çevre problemleri nedeniyle birçok araştırmacı gözenekli matrikslerin kullanıldığı yapıca kararlı kompozitler üzerine yoğunlaşmıştır.

Destek madde olarak gözenekli matrislerin kullanıldığı yapıca kararlı kompozit FDM'ler genellikle doğrudan emdirme ve vakum adsorpsiyon yöntemleri kullanılarak hazırlanır. Doğrudan emdirme yönteminde, FDM'lerin ve destekleyici malzemelerin karıştırılması iki şekilde gerçekleştirilebilir. FDM eritilir ve daha sonra destekleyici malzeme ile karıştırılır ya da katı formdaki FDM destekleyici malzeme ile karıştırılır ve daha sonra erimesi için ısıtılır. İlk prosedür, düşük faz değişim sıcaklığına sahip yapıca kararlı kompozit FDM'lerin hazırlanması için, ikinci yöntem ise yüksek faz değişim sıcaklığına sahip kompozitlerin hazırlanması için uygundur. Vakum adsorpsiyon yönteminde, gözenekli malzemelerin yüzey gerilimi ve kılcal kuvvetlerin yanı sıra, çevresel basınç farkı da sıvı FDM'lerin adsorpsiyonuna yardımcı olur. Gözenekli matriks bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin gizli ısı depolama kapasitesi, kullanılan destek malzeme tarafından hapsedilen FDM'nin kütle kesrine bağlıdır. Destekleyici matristeki FDM'nin kütlesel oranı ne kadar yüksek olursa, gizli ısı depolama kapasitesi o kadar fazla olacaktır. Yapıca kararlı kompozit FDM'lerin hazırlanması için destek madde olarak potansiyel adaylar, diatomit, kaolin, montmorillonit, sepiyolit, vermikülit, genişletilmiş perlit ve uçucu kül gibi geniş yüzey alanına ve gözenekli yapılara sahip hemen hemen tümü kil mineral malzemeleridir. Bu malzeme arasında genişletilmiş vermikülit, genişletilmiş perlit, genişletilmiş grafit ve diatomit yüksek gözeneklilik, geniş yüzey alanı ve orta gözenek çapı (0,1 mikron-100 mikron) özelliklerine sahiptir. Ayrıca, bu dört destek malzeme, düşük fiyat ve bol miktarda bulunabilme avantajlarına sahiptir. Bu nedenle yapıca kararlı kompozitlerin hazırlanmasında ideal destek ortamı olarak nitelendirilebilirler.



Şekil 2.6 Yapıca kararlı kompozit FDM hazırlanışı (a) Polimer destekli ve (b) Gözenekli inorganik destek maddeli

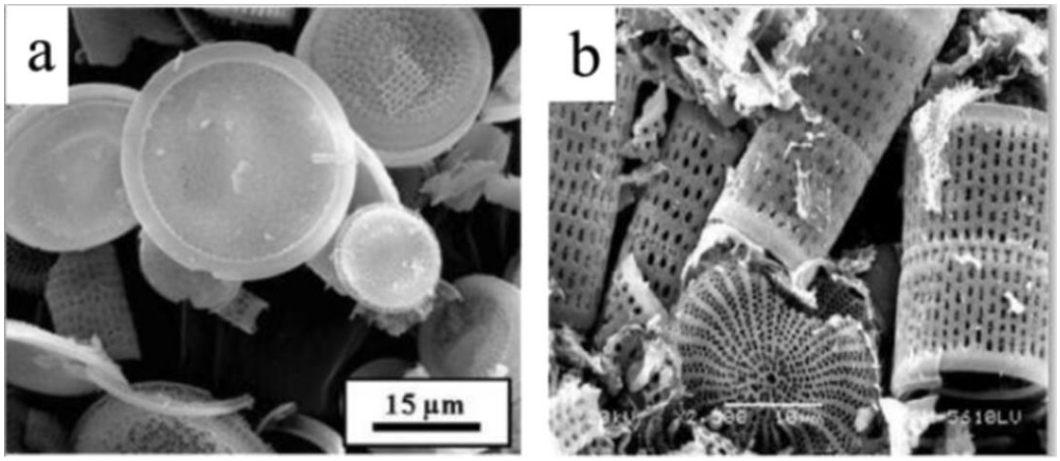
2.6 Diatomit Tabanlı Yapıca Kararlı Kompozit FDM'ler

2.6.1 Diatomit

Diatomit, diatom adı verilen mikroskobik tek hücreli su bitkilerinin fosilleşmiş iskelet kalıntılarından oluşan toz halinde, metalik olmayan bir mineraldir. Bu mikroskobik alglerin 10.000'den fazla türü, her biri 5 mikronun altından 100 mikronun üzerine kadar değişen, kendi farklı şekline sahip olarak tanımlanmıştır. Diatomite kızılötesi toprak veya kizelgur da denilmektedir. Amorf silika diatomitin ana bileşenidir, ancak farklı miktarlarda diğer malzemeler (metal oksitler, killer, tuzlar (esas olarak karbonatlar) ve organik madde) de diatomit içerisinde bulunabilir. Kimyasal çökeltme ve atmosferik temas ile birlikte hakim çevresel koşullar, bir diatomitin safsızlığını belirleyici faktörlerdir (Mendioroz et al. 1989). Şekil 2.7 a ve b'de farklı diatomit türlerinin SEM görüntüleri verilmiştir (Sun et al. 2013a, Guanghui et al. 2013).

Diatomit, hem kimyasal bileşimi hem de fiziksel yapısından dolayı, filtre yardımcıları, fonksiyonel dolgu maddeleri, aktif bileşenler ve seyrelticiler için taşıyıcılar ve agregalar dahil olmak üzere geniş bir kullanım yelpazesi için büyük ticari değere sahiptir

(Zhaolun et al. 2005). Diyatomit dünyanın birçok yerinde bol miktarda bulunur ve yüksek geçirgenlik (0,1-10 mD) ve gözeneklilik (% 35-65) (Murer et al. 2000), küçük parçacık boyutu, düşük ısıl iletkenlik, düşük yoğunluk (Hassan et al. 1999) ve yüksek yüzey alanı (Gao et al. 2005) gibi benzersiz fiziksel özelliklere sahiptir. Diatomit yüzeyinin hidrofobi, çözünürlük, yük, asitlik, iyon değişimi ve adsorpsiyon yeteneği gibi özellikleri diatomitin kristal ağına yapısal olarak bağlı olan ve yüzey üzerinde aktif hidroksil grupları oluşturan su tarafından yönetilir (Yuan et al. 1997).

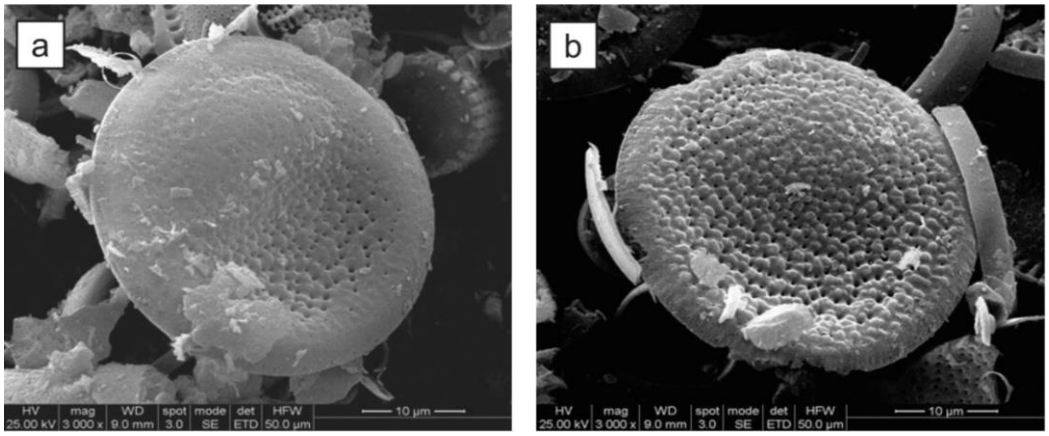


Şekil 2.7 SEM görüntüleri (a) disk tipi diatomit ve (b) doğrusal tip diatomit.

2.6.2 Diatomitin modifiye edilmesi

Diatomitin emiciliğini, saflığını ve diğer özellikleri iyileştirmek için, diatomit genellikle kullanımdan önce modifiye edilir. Önceki çalışmalarda, diatomiti modifiye etmek için saflaştırma, kalsinasyon, asit ile muamele gibi etkili birkaç yöntem kullanılmıştır. Santrifüjle ayırma ile birleştirilmiş yıkama tekniği, diatomitteki düşük dereceli safsızlıkları gidermek için kullanılabilir (Sun et al. 2013a). Yüksek enerjili elektron ışını ile muamele ve hidrotermal saflaştırma diatomit içerisindeki safsızlıkları giderebilir ve diatomitin gözenek boyutunu büyütebilir (Li et al. 2014). 450 – 650 °C arasındaki kalsinasyon sıcaklığı, diatomiti kalsine etmek için optimum aralıktır. Ayrıca organik safsızlıkları ve karbonat bileşiklerini tamamen uzaklaştırmak için, diatomit 2 saat kalsine edilmelidir (Sun et al. 2013). Şekil 2.8'de verilen SEM görüntüleri, kalsine diatomitin gözenek yapısının ham diatomitten daha belirgin olduğunu açıkça

göstermiştir (Wang and Zheng 2012). Zheng et al. (2006) kalsinasyon işleminden sonra asitle muamele işleminin diatomitin gözenek yapısı üzerindeki etkiyi daha iyi hale getireceğini bildirmişlerdir.



Şekil 2.8 Diatomitin SEM görüntüleri (a) ham diyatomit ve (b) kalsine edilmiş

2.6.3 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin hazırlanması

Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin hazırlanmasında doğrudan emdirme yöntemi (Fu et al. 2015, Xu ve Li 2013, Fu et al. 2016), interkalasyon hibrit yöntemi (Sun et al. 2013), vakum emdirme yöntemi (Karaman et al. 2011, Jeong et al. 2013, Qian et al. 2015) ve füzyon adsorpsiyon yöntemi (Sun et al. 2013b) yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Qian et al. (2015) diatomit bazlı yapıca kararlı FDM'leri, diatomit ve üç farklı FDM'nin (PEG, $LiNO_3$ ve Na_2SO_4) bir vakum emdirme yöntemi veya kolay bir karıştırma ve sinterleme yöntemi ile harmanlanmasıyla özel olarak hazırlamışlardır. Yukarıda bahsedilen hazırlama yöntemleri, diatomit bazlı kompozit FDM'lerin üretilmesi üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.

2.6.4 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin karakterizasyonu

Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'ler gözeneklilik ve yüzey aktiflik özellikleri nedeniyle büyük termal depolama kabiliyetine ve yaygın uygulamalara

sahiptirler. Diatomit ile birleştirilen yaygın malzemeler organik ve inorganik yapılı FDM'lerdir. Organik faz değişim malzemeleri genellikle parafinler, yağ asitleri ve yağ asidi ötektik karışımlarından oluşmaktadır. İnorganik malzemelerde esas olarak Na_2SO_4 ve $LiNO_3$'tır.

2.6.4.1 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal özellikleri

Yapıca kararlı FDM/diatomit kompozitlerin termal özellikleri, mineralin fiziksel özellikleri ve FDM'nin termofiziksel özellikleri gibi birçok faktörden etkilenebilir. Diatomitin parçacık boyutu, gözenek miktarı ve gözenek boyutu, diatomit bazlı yapıca kararlı kompozitlerin termal özelliklerini etkileyen temel faktörlerdir. Çizelde 2.5'de diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal özellikleri verilmiştir. Li et al. (2014), parçacık boyutu sırasıyla 5 μm(D1), 350 μm(D2) ve 350 μm(D3) olan üç farklı diatomit kullanarak yapıca kararlı kompozitler hazırlamışlardır. Çalışmada FDM olarak parafin kullanılmış ve D1 bazlı yapıca kararlı kompozitin entalpisinin, absorbe edilen parafinin miktarındaki farklılıklar nedeniyle diğer iki diatomit bazlı kompozitden daha yüksek olduğu bildirilmiştir. D1, D2 ve D3 bazlı kompozitler içindeki kütlece parafin oranlarının sırasıyla % 47,9, % 35,8 ve % 34,4 olduğu ve kompozitlerin faz değişim sıcaklığında önemsiz bazı değişimlerin bulunduğu rapor edilmiştir. Lei and Song (2015) yapıca kararlı Na-P/diatomit kompoziti hazırladılar ve sonuçlar, diatomit içerisine hapsedilen $Na_2SO_3 \cdot 10H_2O$ ile parafinin kütle oranlarının hazırlanan kompozitlerin gizli ısı depolama kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Diatomit bazlı kompozitin gizli ısı depolama kapasitesi, kompozit içindeki parafinin kütle kesrinin artışı ile arttığını ve kütle oranının değişmesi ile kompozitin faz değişim sıcaklığının küçük değişimler olduğunu bildirmişlerdir. Qian et al. (2015) düşük, orta ve yüksek sıcaklıklı FDM'ler olarak yapıca kararlı için PEG/diatomit, $LiNO_3$/diatomit ve Na_2SO_4/diatomit kompozitlerini hazırladı. Bu kompozitlerin faz değişim sıcaklıklarını DSC analiz yöntemiyle sırasıyla 57,92 °C, 250,70 °C ve 887,61 °C olarak ölçmüşlerdir. PEG/diatomit ve $LiNO_3$/diatomit kompozitlerinin erime entalpilerinin katılaşma entalpilerinden daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Bu durumun DSC analizlerinde yapılan eritme işlemi sırasında ısı etkisiyle kompozitin kütle kaybının artmasından kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir.

Çizelge 2.5 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal özellikleri

Örnekler	Erime süreci		Katılaşma süreci		% Bileşim	Kaynak
	T (°C)	ΔH (J/g)	T (°C)	ΔH (J/g)		
Parafin/diatomit	33,04	89,54	-	-	60,0	Sun et al. 2013b
Parafin/diatomit	22,3	63,98	-	-	47,9	Li et al. 2014
CA-MA/diatomit	22,75	67,03	14,52	66,85	45,6	Fu et al. 2013
1NA-3P/diatomit	31,22	79,81	34,18	42,171	60,0	Lei and Song 2015
PEG/diatomit	57,92	105,7	46,03	95,46	58,0	Qian et al. 2015
$LiNO_3$/diatomit	250,70	215,6	243,58	190,3	60,0	Qian et al. 2015
Na_2SO_4/diatomit	887,61	101,59	877,61	102,34	65,0	Qian et al. 2015
Parafin/diatomit	58,4	147,93	-	-	65	Fang and Zhang 2005
SA/diatomit	68,4	142,87	-	-	65	Xi and Yang 2009
PEG/diatomit	27,70	87,09	32,19	82,22	50	Karaman et al. 2011
Parafin/diatomit	47,81	70,51	44,21	71,96	47,4	Xu and Li 2014a
Parafin/diatomit	27,12	91,09	25,82	90,60	45,4	Xu and Li 2014b
N-H/diatomit	23,68	120,1	13,17	118,0	47	Jeong et al. 2013
N-O/diatomit	31,29	116,8	23,65	112,9	47	Jeong et al. 2013
Parafin/diatomit	54,24	61,96	50,23	59,74	42	Jeong et al. 2013
LA/diatomit	40,9	57,4	38,7	57.2	40,19	Fu et al. 2015a
LA/diatomit	40.7	43.2	37.6	42.38	29.78	Fu et al. 2015
CA-LA/diatomit	20,13	66,81	-	-	57,0	Li et al. 2011a
PA-CA/diatomit	28,7	104,0	19,7	96,1	66.6	Tang et al. 2015
SA/diatomit	52,3	57,1	48,4	57,1	40	Fu et al. 2015b

2.6.4.2 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal iletkenliği

Kompozitlerin termal iletkenliği enerji depolama ve boşaltma hızıları bakımından önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle, diatomit bazlı kompozit FDM'lerde termal iletkenlik ne kadar yüksek ise enerji depolama ve boşaltma performansı o kadar iyidir. Karaman et al. (2011) yapıca kararlı PEG/diatomit kompozitinin termal iletkenliğini arttırmak için kompozit içerisine farklı oranlarda genişletilmiş grafit (GG) ilave etmişlerdir. Çizelge 2.6'da gösterildiği gibi termal iletkenlik ilave edilen genişletilmiş grafit miktarı ile artarken, kompozitin termal özellikleri azalmıştır. Tang et al. (2015), PA-CA/diatomit kompozitinin termal iletkenliği üzerine GG ilavesinin etkisini incelediler. Kompozite ağırlıkça % 5 GG ilave ettiler ve termal iletkenliğin PA-CA katı halde iken % 25,2 sıvı halde iken % 53,7 arttığını bildirdiler.

Çizelge 2.6 Genişletilmiş grafit ilaveli ve ilavesiz diatomit bazlı yapıca kararlı kompozitlerin termal özellikleri ve termal iletkenliği

Kompozit	GG oranı (%)	Erime işlemi		Termal İletkenlik (W/m K)	Kaynak
		T (°C)	ΔH (J/g)		
PEG/diatomit	0	27,7	87,09	0,32	Karaman et al. 2011
PEG/diatomit	3	27,83	83,54	0,41	Karaman et al. 2011
PEG/diatomit	5	27,64	81,82	0,49	Karaman et al. 2011
PEG/diatomit	8	27,52	80,76	0,57	Karaman et al. 2011
PEG/diatomit	10	27,36	79,64	0,67	Karaman et al. 2011
PA-CA/diatomit	0	28,7	104,0	0,119	Tang et al. 2015
PA-CA/diatomit	5	28,9	98,3	0,295	Tang et al. 2015

2.6.4.3 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal kararlılığı

Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'ler için termal kararlılık ve güvenilirlik çok önemli faktörlerdir. Fu et al. (2015) laurik asit/diatomit kompozitinin termal kararlılığını araştırmışlardır. İncelenen kompozitin sıcaklığı 146 °C'nin altına düştüğünde önemli bir ağırlık kaybı olmadığını, sıcaklık 189 °C'ye çıktığında sadece % 0,61'lik ağırlık kaybı meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Jeong et al. (2013) n-hekzadekan/diatomit kompozitinin termal kararlılık testinde kompozitin 130 °C'ye kadar herhangi bozunmaya uğramadığını rapor etmişlerdir. Tang et al. (2015), yapıca kararlı PA-CA/diatomit kompozitinin bozunma sürecinin yaklaşık 100 °C'de başladığını, bozunmanın yaklaşık 250 °C'de sona erdiğini ve kompozitin termal kararlılığının iyi olduğunu bildirmişlerdir.

2.6.4.4 Diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal güvenilirliği

Termal güvenilirlik, termal dönüşüm testleri ile değerlendirilebilir. Karaman et al. (2011) PEG/diatomit kompoziti üzerinde 1000 termal dönüşüm testi gerçekleştirmişlerdir. Termal dönüşüm sonrasında kompozitin erime ve donma sıcaklıklarının sırasıyla 1,94 °C ve 0,41 °C ve gizli ısı depolama kapasitesinin % 1,1 oranında değiştiğini rapor etmişlerdir. Bu da PEG/diatomit kompozitinin termal güvenilirliğinin mükemmel olduğunu göstermektedir. Qian et al. (2015), PEG/diatomit, $LiNO_3$/diatomit, Na_2SO_4/diatomit kompozitlerinin 200 termal dönüşümden sonra iyi termal güvenilirliğe sahip olduklarını bildirmişlerdir. Ek olarak, termal güvenilirliğin, daha fazla termal dönüşüm testi ile kanıtlanabileceğini ve daha fazla sayıda termal dönüşümlerin, daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

2.7 FDM/Diatomit Kompozitleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Qian et al. (2015) düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta depolama maddeleri olarak polietilen glikol (PEG), lityum nitrat ($LiNO_3$) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) kullanarak diatomit bazlı bir seri yapıca kararlı kompozit FDM'ler hazırladılar. Kompozitlerin hazırlanmasında diatomit içerisine FDM yüklemesinde vakum emdirme yöntemi ve

sinterleme yöntemini kullandılar. Diatomit içerisinde hapsedilen PEG, $LiNO_3$ ve Na_2SO_4'ın maksimum yüklerini sırasıyla % 58, % 60 ve % 65 olarak belirlediler. Kompozitlerin karakterizasyonunda SEM, XRD ve FT-IR sonuçları, FDM'lerin diatomit gözenekleri içerisinde iyi bir şekilde dağıldığını ve ısıtma ve soğutma işlemi sırasında hiçbir kimyasal değişim olmadığını gösterdi. Ayrıca hazırlanan kompozitlerin, 200 termal dönüşüm işleminden sonra bile termal ve kimyasal açıdan oldukça kararlı olduklarını bildirdiler. Kompozitlerin, yüksek gizli ısı depolama kapasitesi ve uygun faz değişim sıcaklıklarına sahip olmalarının yanı sıra mükemmel kimyasal uyumluluk ve yüksek termal kararlılıkları nedeniyle farklı sıcaklık aralıkları için uygulama gereksinimlerini karşılama konusunda ümit verici olduklarını bildirdiler.

Li et al. (2014) yaptıkları çalışmada üç farklı tür diatomit (DP1, DP2 ve DP3)'in gözenekleri içerisine parafin emdirerek yapıca kararlı kompozit FDM'ler hazırladılar. Çalışmada en küçük parçacık boyuttuna sahip DP1'in absorpsiyon mekanizmasının, DP2 ve DP3'ünkinden farklı olduğunu buldular. Kompozitler doğrudan beton karışımında kullanıldıklarında % 67'ye varan önemli miktarda parafin sızdığını belirlediler. Sızıntıyı önlemek için bir yüzey modifikasyon yöntemi kullandılar ve umut verici sonuçlar elde ettiler. Çalışmada, FDM/DP1 kompoziti ve Micronal®DS5040X içeren ayrı ayrı beton paneller ürettiler ve ısıl davranışları kontrol paneli ile karşılaştırdılar. FDM katkısı ile panelin termal davranışının iyileştirildiği ve FDM/DP1 kompoziti kullanılan panelin termal davranışının, Micronal®DS5040X kullanılan panelin termal davranışı ile hemen hemen aynı olduğunu rapor ettiler.

Jeong et al. (2013) enerji tasarrufu için FDM/diatomit kompozitlerin termal performanslarını incelediler. FDM/diatomit kompozitlerinin hazırlanmasında, FDM olarak sırasıyla 20,84 °C, 30,4 °C ve 57,09 °C erime noktasına ve 254,7 J/g, 247,6 J/g ve 144,6 J/g gizli ısı depolama kapasitelerine sahip n-hekzadekan, n-oktadekan ve parafin wax kullandılar. FDM'lerin sıvı halde sızıntı olmaksızın diatomitin gözeneklerinde ağırlıkça % 50 oranında absorbe edildiğini belirlediler. Ayrıca, vakum emdirmenin termal özellikler üzerine etkisi numunelerin hazırlanması sırasında vakum uygulanarak analiz ettiler. Numunelerin termal özelliklerini, DSC ve TG analizleri ile numunelerin mikroyapı ve kimyasal özelliklerini SEM ve FT-IR analizleri ile

belirlediler. Çalışmada, SEM sonuçları, FDM'lerin diatomit yapısı içerisinde iyi dağıldığını, DSC analiz sonuçları, FDM/diatomit kompozitlerinin gizli ısı depolama kapasitelerinin saf FDM'lerin değerinin % 50'si olduğunu gösterdi. TG analiz sonuçları, FDM/diatomit kompozitlerinin saf FDM'ye kıyasla daha yüksek termal dayanıklılığa sahip olduğunu gösterdi.

Xu ve Li (2013) termal enerji depolama özelliğine sahip çimento esaslı kompozit parafin/diatomit FDM geliştirdiler. Parafin/diatomit kompoziti 0,9:1,0 karışım oranında üretildi. SEM ve FT-IR sonuçları, parafinin diatomit gözeneklerine iyi bir şekilde hapsedildiğini ve onunla iyi bir uyumluluğa sahip olduğunu gösterdi. DSC sonuçları, parafin/diatomit kompozit FDM'nin 41,11 °C erime sıcaklığına ve ve 70,51 J/g gizli ısıya sahip olduğunu gösterdi. Çalışmada, parafin/diatomit kompoziti, çimento esaslı kompozite ağırlıkça % 10, % 15, % 20 ve % 30 oranında ilave edildi. Kontrol olarak çimento ile karşılaştırıldığında, parafin/diatomit kompozit FDM ilavesi ile 28 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı, kuruma büzülme gerilimi ve ısıl iletkenlikte maksimum azalmalar sırasıyla % 48,7, % 47,5, % 80,7 ve % 33,6 olarak bulundu. Termal enerji depolama özelliğine sahip çimento esaslı parafin/diatomit kompozit faz değişim malzemesinin enerji depolama performansının, parafin/diatomit oranının artırılmasıyla önemli ölçüde iyileştirilebileceği sonucuna vardılar.

Karaman et al. (2011) yeni bir yapıca kararlı kompozit faz değişim malzemesi olarak polietilen glikol (PEG)/diatomit kompozitinin hazırlanması, karakterizasyonu ve enerji enerji depolama özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma yaptılar. Çalışmada kompozitten erimiş PEG sızıntısı olmadan PEG'in diyatomitin gözeneklerinde ağırlıkça % 50 oranında tutulabildiğini ve bu orandaki kompozitin erime sıcaklığının ve gizli ısısının sırasıyla 27,70 °C ve 87,09 J/g olduğunu belirlediler. Kompozit FDM'nin termal güvenilirliğini belirlemek için bir termal dönüşüm testi gerçekleştirdiler ve sonuçlar, kompozit FDM'nin iyi termal güvenilirliğe ve kimyasal stabiliteye sahip olduğunu gösterdi. Ayrıca kompozit FDM'nin termal iletkenliğini, farklı kütle oranlarında GG ekleyerek iyileştirdiler. Küçük ölçekte yapılan termal performans testi, kompozit FDM'nin oda sıcaklığını düzenlemek ve binalardaki aşırı ısınmayı en aza indirmek için uygulanabileceğini gösterdi. Elde ettikleri tüm sonuçlara göre PEG/diatomit

kompozitinin, tatmin edici termal özellikleri, iyi termal performansı ve ekstra bir kapsüllemeye ihtiyaç duymadan doğrudan kullanım avantajı nedeniyle enerji depolayan duvar kaplaması veya sıva malzemesinin hazırlanmasında ümit verici bir kompozit FDM olduğunu bildirdiler.

Tang et al. (2015) sıvı yağ asidi ötektiklerinin diatomit içerisine absorbe edilmesiyle yapıca kararlı diatomit bazlı kompozitler hazırladılar. Ötektik karışımların sızmasını önlemeye yardımcı olmak ve kompozit FDM'lerin termal iletkenliğini artırmak için GG kullandılar. DSC sonuçları, ötektik karışımın diatomite oranının 2:1 olduğu ve içerisine kütlece % 5 GG ilave edilmiş kompozitin 26,69 °C'de eridiğini ve bu esnada gizli ısı depolama kapasitesinin 98,26 kJ/kg olduğunu gösterdi. TG analizleri ile kompozitlerin termal kararlılığını incelediler ve sonuçlara göre, yapıca kararlı kompozitlerin, termal enerji depolama uygulamalarında kullanım için iyi bir termal kararlılığa sahip olduğunu rapor ettiler.

Li et al. (2011b) yaptıkları çalışmada, dekanoik asit, dodekanoik asit, hekzadekanoik asit ve oktadekanoik asit kullanarak bir seri ikili yağ asidi ötektik karışımları hazırladılar. İkili yağ asidi karışımlarının faz değişim sıcaklığı ve buna karşılık gelen karışım oranını termodinamik faz diyagramı yöntemi ile hesapladılar ve elde ettikleri sonuçları DSC analizleri ile doğruladılar. Dekanoik-dodekanoik asit ötektik karışımını diatomit içerisine ilave ederek kompozit faz değişim malzemesi hazırladılar ve kompozitin mikroyapı, termal özellik ve termal güvenilirliğini incelediler. Dekanoik-dodekanoik asit/diatomit kompozit FDM'nin faz değişim sıcaklığı ve gizli ısısını sırasıyla 16,74 °C ve 66,81 J/g olarak belirlediler. Termal dönüşüm testi sonrasında, hazırlanan kompozit FDM'nin erime sıcaklığında küçük değişimlerin olduğunu, 50 kez tekrarlanan termal dönüşüm sonrasında bile kompozitten herhangi bir FDM sızıntısının olmadığını ve kompozitin iyi bir termal güvenilirliğe sahip olduğunu rapor ettiler.

Li et al. (2011) faz diyagramı termal dinamik hesaplama yöntemi kullanarak kaprik asit, laurik asit, palmitik asit ve stearik asitten oluşan bir seri ikili yağ asidi ötektik karışımı hazırladılar. Daha sonra bu ikili yağ asidi ötektik karışımlarını yapıca kararlı

kompozitler hazırlamak için destek malzeme görevi gören, farklı spesifik yüzey alanlarına sahip dört tür diatomit içerisine absorbe ettiler. Hazırladıkları yapıca kararlı kompozit FDM'leri SEM ve DSC analiz yöntemi ile karakterize ettiler. Sonuçlar, ikili yağ asidi ötektik karışımları ve diatomit arasında optimum bir absorpsiyon oranının olduğunu gösterdi. Çalışmada kaprik-laurik asit ötektik karışımı diatomite absorbe edildiğinde, kaprik-laurik asit/diatomit kompozitinin gizli ısı değerinin saf ötektik karışımın % 57'sine tekabül ettiğini ve faz geçiş sıcaklığının 16,36'dan 16,74 °C'ye yükseldiğini belirlediler. Hazırlanan kaprik-laurik asit/diatomit kompozit FDM'nin, binalarda termal enerji depolama uygulamaları için uygun erime sıcaklığına ve gizli ısıya sahip olduğunu rapor ettiler.

Fu et al. (2013) yapıca kararlı enerji depolama maddesi olarak vakumda emdirme yöntemi ile kaprik asit-miristik asit ötektik karışımı/diatomit kompozitini hazırladılar. Çalışmada enerji depolama malzemesi olarak kaprik asit ve miristik asit ötektik karışımı, destek malzemesi olarak da diatomit kullanıldı. Yapıca kararlı kompozitin yapısı, mikro yapısı, termal özellikleri ve termal kararlılığı sırasıyla FT-IR SEM, DSC ve TG yöntemleri ile belirlendi. Sıvı FDM sızıntısı olmadan kompozit içerisinde absorbe edilen maksimum kaprik asit-miristik asit ötektik karışımı oranını kütlece % 45 olarak belirlendi. Kaprik asit-miristik asit ötektik karışımının diatomit gözenekleri içine iyi adsorbe edildiği ve ötektik karışım ile diatomit arasında fiziksel etkileşim olduğu ifade edildi. Yapıca kararlı kompozitin erime sıcaklığının ve gizli ısısının sırasıyla 22,75 °C ve 67,03 J/g olduğu ve iyi bir termal kararlılğa sahip olduğu rapor edildi.

Fu et al. (2016) doğrudan emdirme yöntemi ile yapıca kararlı faz değişim malzemesi olarak stearik asit/diatomit kompozitini hazırladılar. Kompozitin yüzey morfolojisini, kimyasal uyumluluğunu, termal özelliklerini ve termal kararlılığını sırasıyla SEM, FT-IR, XRD, DSC ve TG analizleri ile karakterize incelediler. Kompozit FDM'de stearik asit ve diatomit arasında yalnızca fiziksel etkileşimler olduğu belirlendi. XRD analizi, kristal tipinin yapıca kararlı SA/diatomit kompozitinin oluşumuyla etkilenmediğini ve SA/diatomit kompozitindeki SA'nın kristal boyutunun, diatomitteki sınırlı gözenekler nedeniyle azaldığını gösterdi. Yapıca kararlı SA/diatomit kompozitinin erime ve katılaşma sıcaklıkları sırasıyla 52,3 °C ve 48,4 °C ve erime gizli ısısı 57,1 J/g olarak

belirlenmiştir. TG sonucu, SA/diatomit kompozitinin 200 ºC'ye kadar bozunmaya uğramadığını ve kompozitin iyi bir termal kararlılığa sahip olduğunu göstermiştir. Çalışma ekibi elde ettikleri sonuçlar temelinde, hazırladıkları yapıca kararlı SA/diatomit kompozitinin termal enerji depolama uygulamaları için kaplama malzemeleri olarak büyük bir potansiyele sahip olduğu sonucuna vardılar.

Sun et al. (2013b) füzyon adsorpsiyon yöntemi ile parafin ve kalsine edilmiş diatomiti karıştırarak kompozit FDM'ler hazırladılar. Yapıca kararlı kompozit FDM'lerin hazırlanmasında taşıyıcı malzeme görevi gören diatomitin adsorpsiyon kapasitesini iyileştirmek için ham diatomiti bir ısıl işlemle saflaştırdılar. Farklı erime noktalarına sahip iki parafin (parafin wax ve sıvı parafin) füzyon yöntemi ile birlikte karıştırarak optimum bileşim oranını DSC analizi ile belirlediler. Hazırlanan parafin/kalsine diyatomit kompozitlernii, SEM ve FT-IR analiz teknikleri ile karakterize ettiler. Kompozit FDM'lerin termal enerji depolama özelliklerini belirlemek içim DSC yöntemini kullandılar. DSC sonuçları ile, kalsine diatomit içerisine absorbe edilen parafinin optimum oranının % 61 ve kompozit FDM'nin gizli ısısının 89,54 J/g olduğunu belirlediler. Hazırlanan kompozit FDM'nin, binalarda termal enerji depolama uygulaması için iyi bir gizli ısıya ve uygun erime sıcaklığına (33,04 °C) sahip olduğunu ifade ettiler. Kompozit FDM'lerin termal dönüşüm testleri, hazırlanan kompozitlerin termal olarak güvenilir ve kimyasal olarak kararlı olduğunu göstermiştir. Parafin/diatomit kompozitlerinin, tatmin edici termal performansı ve termal güvenilirliği nedeniyle enerji depolama için umut verici FDM'ler olarak düşünülebileceği sonucuna varmışlardır.

Fu et al. (2015) doğrudan emdirme yöntemini kullanarak laurik asit (LA)/diatomit kompozit FDM hazırladılar. Kompozitin kimyasal yapısını, kimyasal uyumluluğunu, bileşimini, kristal yapısını, termal özelliklerini ve termal kararlılığını FT-IR spektroskopisi, enerji dağıtıcı spektroskopi, XRD, DSC ve TG analiz yöntemleri ile kapsamlı bir şekilde araştırdılar. FT-IR ve XRD sonuçları temelinde, LA/diatomit kompozitinde LA ve diatomit arasında yalnızca fiziksel etkileşimlerin olduğunu belirlediler. Kompozit FDM'nin erime ve katılaşma sıcaklıklarını sırasıyla 40,9 ºC ve 38,7 °C ve erime gizli ısısını 57,2 J/g olarak ölçtüler. Kompozit FDM'nin 157 ºC'den

düşük sıcaklıklarda bozunmaya uğramadığını ve kompozitin çalışma aralığında iyi bir termal kararlılığa sahip olduğunu belirlediler. Tüm sonuçlara dayalı olarak, yapıca kararlı LA/diatomit kompozitinin iyi termal özellikleri, termal kararlılığı ve beton ile iyi uyumluluğundan dolayı pasif solar alan ısıtması veya binalarda iç ortam sıcaklık dalgalmalarını düşürülmesi için enerji depolama malzemesi olarak kullanılabileceği ve inşaat alanlarında geniş kapsamlı uygulama potansiyeline sahip olduğu sonucuna vardılar.

Xu and Li (2014) yaptıkları çalışmada, termal enerji depolama özelliğine sahip çimento bazlı kompozitlerin üretiminde ve daha ileri uygulamalarda kullanım için parafin/diatomit/(CNTs) kompozitini hazırladılar. Kompozit FDM için destek matris olarak kullanılacak en uygun diatomiti seçmek amacıyla, farklı tip diatomitlerin puzolanik reaktivitesi ve parafin emme kapasitelerini değerlendirdiler. 600 °C'de 2 saat kalsine edilen diatomitin, diğer diatomit örneklerine kıyasla en iyi puzolanik reaktiviteye ve karşılaştırılabilir parafin absorplama kapasitesine sahip olduğunıu belirlediler. DSC analizleriyle, hazırlanan kompozit FDM'nin erime sıcaklığını 27,12 °C ve gizli ısı değerini 89,40 J/g olarak belirlediler. FT-IR ve TG analiz sonuçlarına göre, kompozitin iyi bir kimyasal uyumluluğa ve termal kararlılığa sahip olduğunu bildirdiler. Ayrıca, CNTs kullanımının, kompozitin termal özelliklerini, kimyasal uyumluluğunu ve termal kararlılığını etkilemeksizin termal iletkenliği ve ısı depolama/ boşaltma hızını iyileştirmek için oldukça etkili olduğunu rapor ettiler.

Yukarıda verilen FDM/diatomit kompozitleri üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, çalışmaların diatomit içerisine farklı yöntemler ile farklı tip FDM'lerin katılması şeklinde olduğu açıkça görülmektedir. Parafin ötektik karışımlarının diatomit tabanlı kompozitlerin hazırlanmasında kullanılması yeni bir düşünce olmamakla birlikte, bu tip kompozitler üzerine yapılan çalışmaların sayısı birkaç makaleyle sınırlıdır. Bu nedenle yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/diatomit kompozit malzemelerinin hazırlanması, karakterizasyonu ve termal performanslarının belirlenmesi bu konudaki eksikliği gidermek bakımından önemlidir.

Binalarda enerji depolama ve termal düzenleme uygulamalarında kullanım amacıyla yapıca kararlı FDM/diatomit kompozitinin hazırlanmasına yönelik yapılan bu tez çalışmasında, n-eikosan ve n-heptadekan ötektik karışımının diatomit içerisine katılması tamamen yeni bir düşüncedir. Ayrıca hazırlanan n-eikosan ve n-heptadekan/diatomit kompozitinin termal iletkenliğinin BN kullanılarak arttırılması ve bu kompozitin laboratuvar ölçekli bir sistemde termal performansının incelenmesi bu alandaki literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

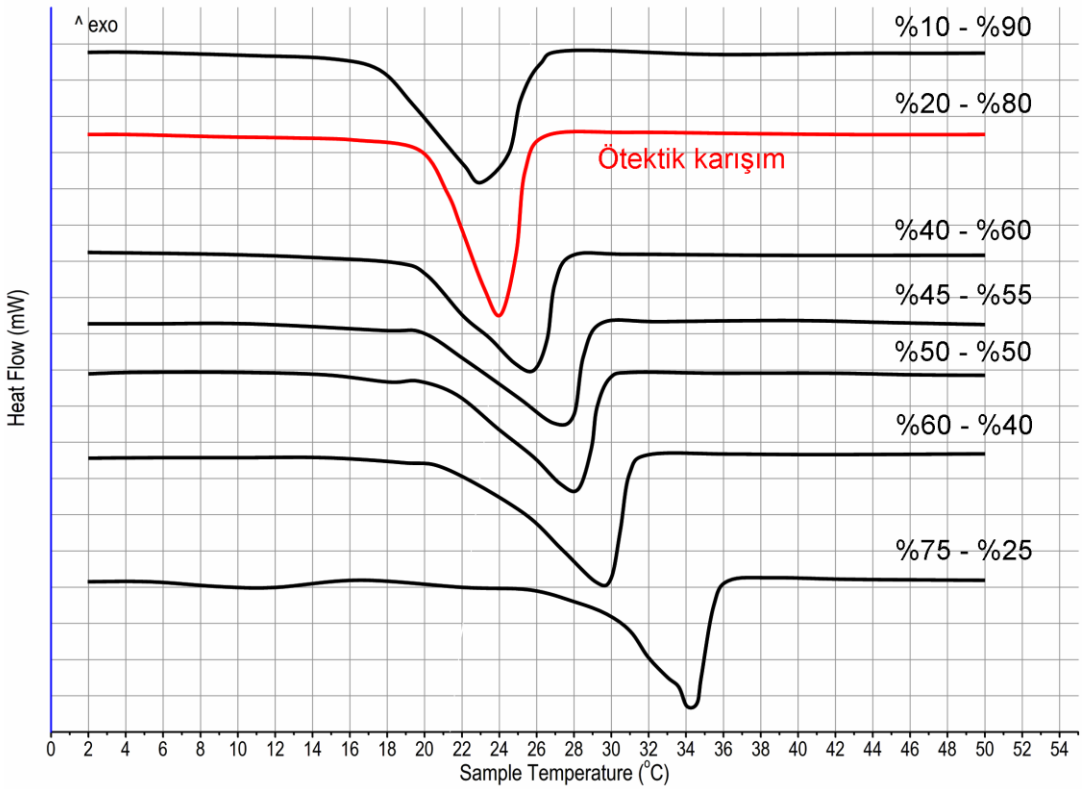
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Kimyasal Maddeler

Bu çalışmada enerji depolayıcı madde olarak parafin ötektik ötektik karışımının hazırlanmasında n-eikosan ve n-heptadekan kullanıldı. Bu maddeler Merck şirketinden temin edildi ve alındığı gibi kullanıldı. Kompozit karışım hazırlanmasında gözenekli destek madde olarak diatomit kullanıldı. Diatomit Apmineral (Adana) şirketinden temin edildi. Diatomit kullanılmadan önce kül fırını içerisine konuldu ve 2 saat boyunca 600 °C'de kalsine edildi. Termal iletkenlik arttırıcı olarak Dandong Kimya Mühendisliği Enstitüsü (Çin) limited şirketinden temin edilen bor nitrür (BN) kullanıldı. BN %99 saflığa, 0,3 g/cm^3 yoğunluğa, 4µm ortalama parçacık boyutuna ve 400 W/mK termal iletkenliğe sahiptir.

3.2 Parafin Ötektik Karışımlarının Hazırlanması

Parafin ötektik karışımının ötektik bileşim oranı ve faz değişim sıcaklığı deneysel olarak belirlenmeden önce Schröder Denklemine göre hesaplanmıştır (Kauranen et al. 1991). Gerçek orana ulaşmak için teorik oranlara yakın yedi farklı oranda ikili karışım hazırlandı. Bu amaçla iki parafin numunesi ayrı ayrı test tüplerine konuldu ve ardından her iki tüp içerisindeki parafinler eritildi. Eritme işleminden sonra sıvı haldeki numuneler tek bir test tüpünde birleştirilerek 30 dakika karıştırıldı ve ardından karışımlar katılaşmaları için soğutuldu. n-eikosan ve n-heptadekan ikili karışımlarının ötektik noktaları, farklı bileşim oranlarında karışımların DSC ölçümleri kullanılarak deneysel olarak belirlendi. n-eikosan ve n-heptadekanın 10/90, 20/80, 40/60, 45/55, 50/50, 60/40 ve 75/25 bileşim oranlarına göre hazırlanan ikili karışımlarının DSC eğrileri Şekil 3.1'de verilmiştir. DSC eğrilerindeki tek erime sıcaklıkları, ötektik nokta ve ötektik bileşim oranı olarak kabul edildi. Bu eğrilerden n-eikosan ve n-heptadekan ikili karışımının ötektik bileşimi %20 n-eikosan ve %80 n-heptadekan olarak belirlendi.



Şekil 3.1 Ötektik oranların deneysel olarak belirlenmesi için seçilen n-alkanların ikili karışımlarının DSC eğrileri

3.3 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'lerin Hazırlanması

Yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/DT kompozit FDM'leri vakum uygulamadan direkt emdirme yöntemi kullanılarak hazırlandı. Bunun nedeni, emdirme yöntemleri arasında vakumlu ve vakum uygulama yöntemleri ile üretilen kompozitlerin gizli ısı kapasitelerinde çok büyük farkların bulunmamasıdır (Nomura et al. 2009). Kalsine diatomit içerisinden erimiş halde parafin ötektik karışımının sızma davranışı göstermediği maksimum hapsetme oranı belirlemek için kütlece %30, 40, 50, 60, 65 ve 70 oranlarında parafin ötektik karışımı içeren kompozit karışımlar hazırlandı. Parafin ötektik karışımları oda sıcaklığında kuru DT ile karıştırıldı, ardından parafin ötektik karışımı/DT karışımları fırına konuldu ve 4 saat 30 ± 5 °C'de ısıtıldı. Karışım, homojen bir hazırlama sağlanması ve sıvı FDM'nin gözenekler içerisine hapsedilmesi için her 1 saat arayla karıştırıldı. Isıtma işleminden sonra kompozitler 10 °C'ye soğutuldu ve sızma testleri için manuel hidrolik laboratuvar pelet presi kullanılarak pelet haline getirildi. Parafin ötektik karışımı/DT kompozit peletleri bir ısıtıcı plate üzerine konulan

süzgeç kağıtlarının üzerine yerleştirildi. Bu çalışmada 150 mm çapında süzgeç kağıdı kullanılmış olup test alanı 70 mm'dir. Kompozitin yapıca kararlılık özellikleri parafin ötektik karışımının erime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklık olan 35 °C'de 30 dakika bekletildikten sonra FDM sızıntısı olup olmadığı gözlemlenerek belirlendi. Şekil 3.2 farklı bileşim oranlarında hazırlanan kompozit FDM peletlerinin optik fotoğraflarını göstermektedir. Şekilden görülebileceği gibi kütlece %60 oranına kadar kompozitlerden gözle görülebilen herhangi bir sıvı parafin ötektik karışımı sızıntısı gözlenmezken bu oranın üzerinde kompozitten sızma meydana geldiği belirlenmiştir. Kompozit karışımlardan sıvı halde FDM sızıntısının gözlenmediği maksimum oran %60 olarak belirlenmiş ve bu orana kadar parafin ötektik karışımı içeren kompozitler, yapıca kararlı kompozit FDM'ler olarak nitelendirilmiştir. Bu çalışmada kompozit karakterizasyonu ve diğer çalışmalarda maksimum içeriğe sahip kompozit karışım kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Sızma testi süresince hazırlanan parafin ötektik karışımı/DT kompozit peletlerin fotoğraf görüntüleri

3.4 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Karakterizasyonu

Kalsine diatomit ve hazırlanan yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin gözenek yapısı ve morfojileri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelendi. Bu

analizler FE-SEM, Carl Zeiss Ultra Plus model cihaz kullanılarak 10 kV voltaj değerinde gerçekleştirildi.

Parafin ötektik karışımı ve destek malzeme diatomitin gözenek yüzeyleri arasında meydana gelecek muhtemel etkileşimler Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FT-IR) spektroskopi yöntemi ile incelendi. FT-IR spektrumları bölümümüz altyapısında mevcut olan Perkin Elmer Spectrum 100 model cihaz kullanılarak 450-4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında kaydedildi. Kalsine diatomit, n-eikosan - n-heptadekan ötektik karışımı ve yapıca kararlı kompozit FDM için FT-IR spektrumları birbirleriyle mukayese edildi.

Parafin ötektik karışımı ve hazırlanan yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin erime sıcaklığı (°C), katılaşma sıcaklığı (°C), erime gizli ısısı (J/g) ve katılaşma gizli ısısı (J/g) DSC cihazı ile ölçüldü. DSC analizleri fakültemiz alt yapısında bulunan SETARAM DSC 131 EVO model DSC cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Ölçüm öncesi DSC cihazı referans olarak indiyum kullanılarak kalibre edildi. Analizler, 5-10 mg kütlede nunume kullanılarak 10-50 ^{o}C sıcaklık aralığında, argon atosferinde ve 10 ^{o}C/dakika ısıtma hızında yapıldı. Numuneler için faz değişim sıcaklıkları ilgili DSC pikinin maksimum eğimli kısmından temel çizgiye teğet çizilerek belirlendi. Ekstrapolasyon ile belirlenen başlangıç sıcaklık değeri, faz değişim (erime ve donma) sıcaklığı olarak alındı. Faz değişim gizli ısıları, DSC eğrilerinde erime ve donma piklerinin altında kalan alanın integrasyonuyla belirlendi.

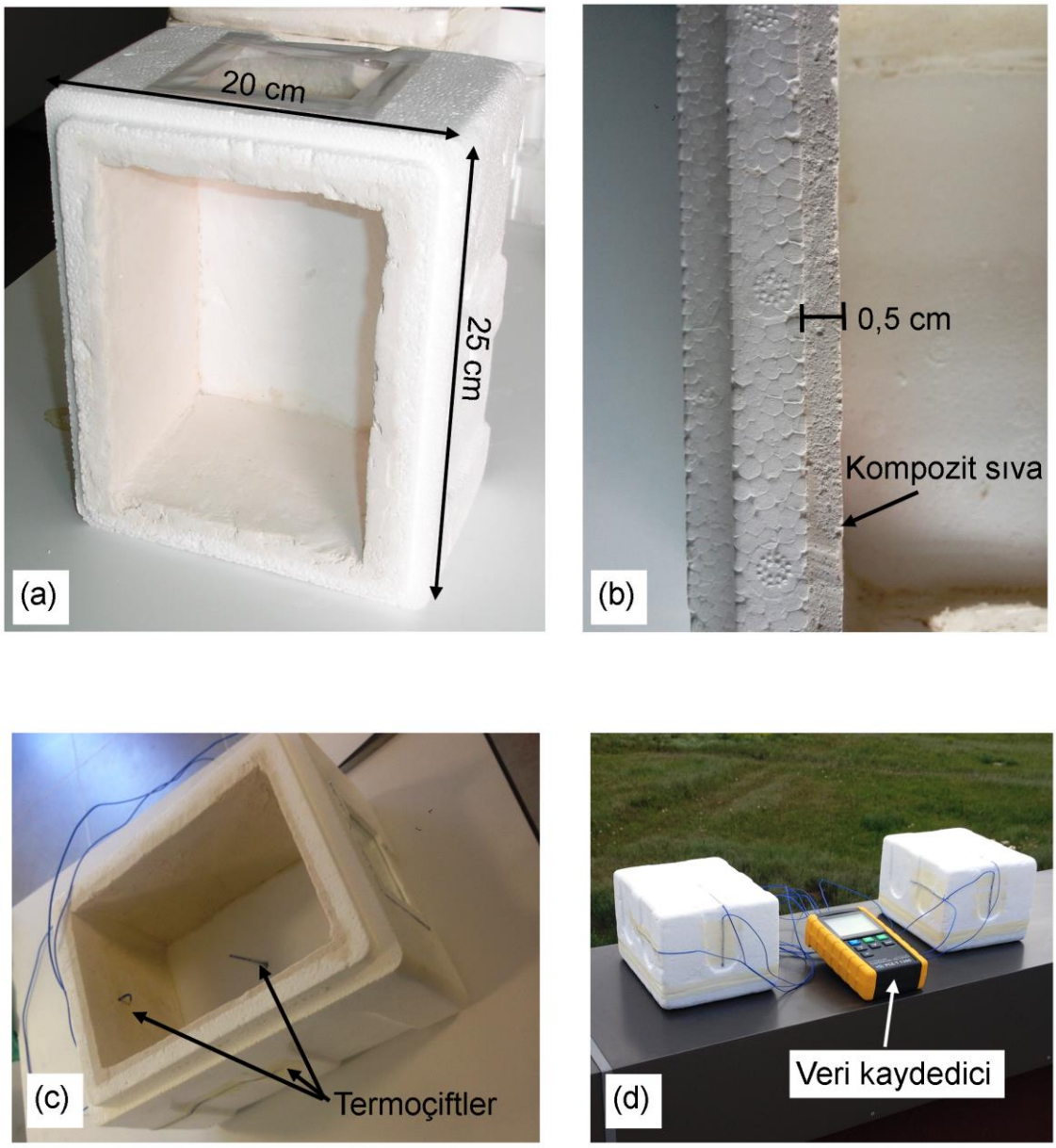
Yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin termal kararlılığı termogravimetri (TG) analizleriyle belirlendi. Analizler, Çankırı Karatekin Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünde mevcut TA SDT Q600 model TGA cihazında gerçekleştirildi. Analizler yapılmadan önce cihaz kalsiyum okzalat ile 20 ^{o}C ile 700 ^{o}C sıcaklık aralığında 10 °C/dak ısıtma hızında kalibre edildi. TG analizleri 5-10 mg numune kullanılarak 10 mL/dak akış hızına sahip azot atmosferi ortamında 10 °C/dak ısıtma hızında 25-700 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirildi. Elde edilen TG termogramlarından kompozitin uygulamada kullanılabileceği maksimum sıcaklık belirlendi.

3.6 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Termal İletkenliğinin Arttırılması

Yapıca kararlı kompozit FDM'nin termal iletkenliği diatomitin düşük termal iletkenliğinden dolayı düşük olacaktır. Bu durum da kompozitin enerji depolama uygulamalarında kullanımını sınırlayacaktır. Bu nedenle kompozit karışıma kütlece belli oranlarda (%0,5, 1,5 ve 2,5) BN ilave edilerek termal iletkenliğin arttırılması sağlandı. Termal iletkenlik ölçümleri, termal özellik analizörü (Decagon KD2 modeli, ABD) kullanılarak gerçekleştirildi. Analizör katı ve sıvı numuneler için -20 ^{o}C ile 100 ^{o}C sıcaklık aralığında ± %5 doğrulukta ölçüm yapabilmektedir. Ölçümlerden önce, kompozit numuneler bir baget kullanılarak bir cam test tüpü (dış çap: 15 mm ve uzunluk: 100 mm) içerisine konuldu. Termal iletkenlik ölçümleri 20 ^{o}C'de (ötektik karışımın katı fazda olduğu sıcaklık) üç kez tekrarlandı ve elde edilen ölçüm değerlerinin ortalaması alındı.

3.7 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Termal Performans Testi

Termal performansı test etmek amacıyla yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/DT kompoziti kütlece %20 oranında sıva içerisine ilave edilerek enerji depolayıcı kompozit sıva hazırlandı. Öncelikle 1 kg alçı bir kap içerisine alındı ve üzerine 700 ml su ilave edilerek karıştırıldı. Daha sonra bu karışım üzerine 200 g kompozit FDM ilave edilerek mekanik karıştırıcı ile 10 dak karıştırıldı. Polistirenden yapılı bir test hücresinin iç yüzeyi elde edilen sıva ile 0,5 cm kalınlığında sıvandı (Şekil 3.3a ve b). Oluşturulan test hücresinin performansını karşılaştırmak için aynı yöntemle sadece alçı sıva kullanılarak kontrol amaçlı test hücresi hazırlandı. Sıvalar kuruduktan sonra hücrelerin merkez, iç duvar ve dış duvar yüzeylerindeki sıcaklık değişimlerini ölçmek için termoçiftler yerleştirildi (Şekil 3.3c). Hücrelerin hem ısınma hem de soğuma sürecinde performanslarını karşılaştırmak için bu hücreler Çankırı Karatekin Üniversitesi Araştırma Merkezi (ÇANKAM)'nin çatı katındaki açık alana konuldu ve 24 saatlik süre için burada bırakıldı. Bu süreçte sıcaklık değişimleri bir veri kaydedici vasıtasıyla kaydedildi. (Şekil 3.3d) Her iki test hücresi için 24 saat boyunca ölçülen sıcaklıklar grafiğe geçirilerek mukayese edildi.



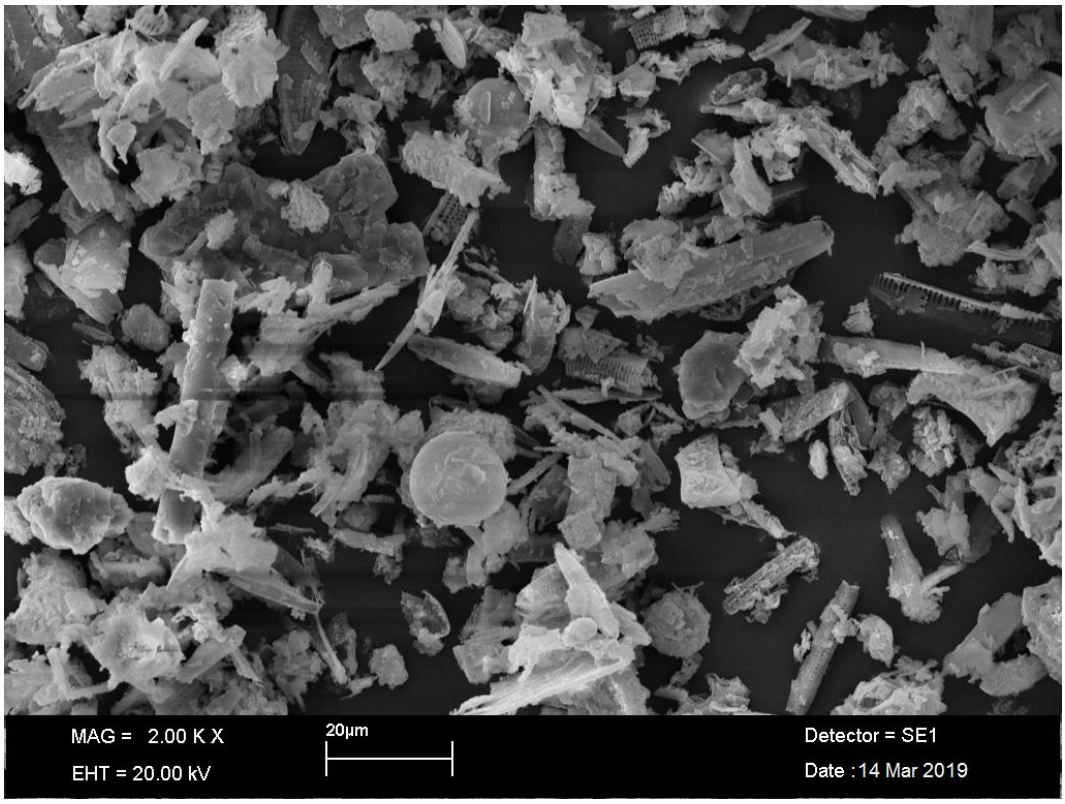
Şekil 3.3 Test hücreleri ve deney düzeneğinin fotoğraf görüntüleri

4. BULGULAR

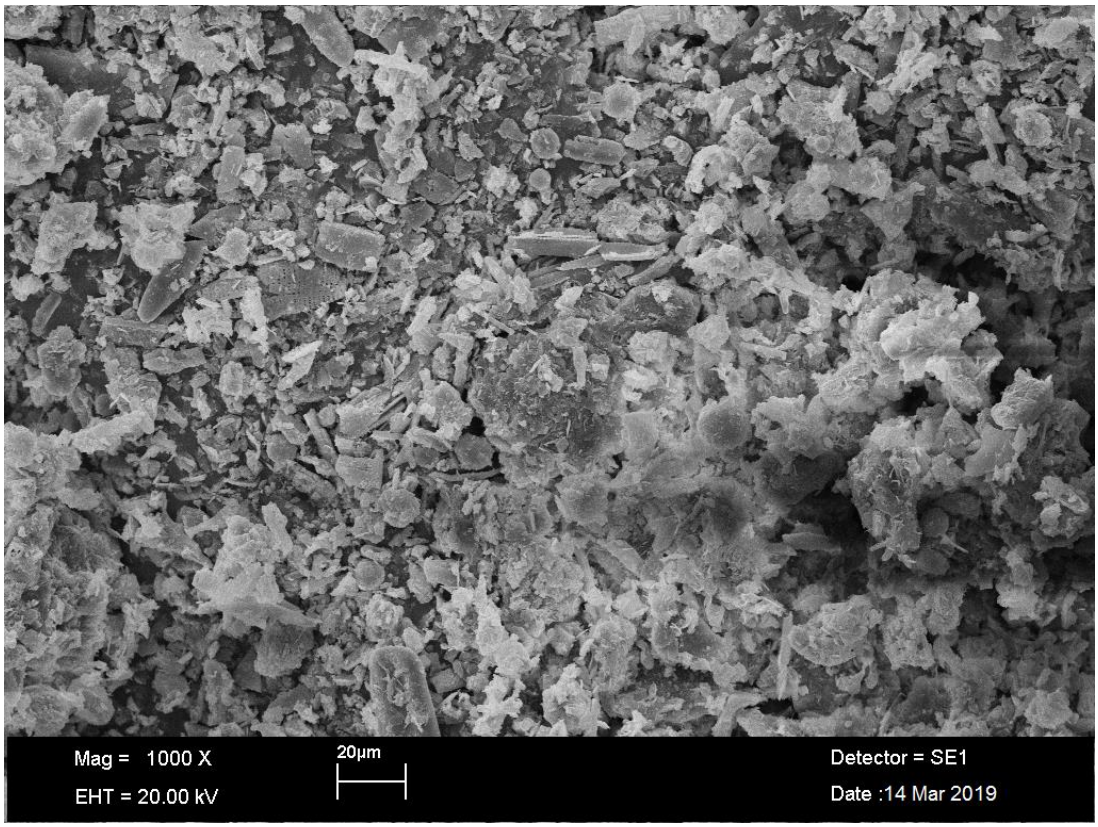
4.1 Hazırlanan Kompozit FDM'nin Karakterizasyonu

4.1.1 SEM analizi sonuçları

Şekil 4.1 ve 4.2'de n-heptadekan-n-eikosan ötektik karışımı emdirilmeden önce ve sonra diatomitin SEM görüntüleri verilmiştir. Diatomitin SEM görüntüsü diatomitin küçük ve gözenekli parçacıklardan oluştuğunu göstermektedir. Şekil 4.2'den görülebileceği gibi, kütlece %60 parafin ötektik karışımı emdirildikten sonra, diatomitin morfolojisi korumuştur. Diatomit partikül içi yüksek gözenekliliğe sahip olduğundan, sıvı halde parafinin ötektik karışımının bu gözenekler içerisine hapsedildiğini varsaymak mantıklıdır. Ötektik karışım emdirildikten sonra diatomitin gözeneklerinin sayısı azalmıştır. Bu da parafin ötektik karışımının destek malzemesi olarak kullanılan diatomitin gözeneklerini dolduğunu göstermektedir.

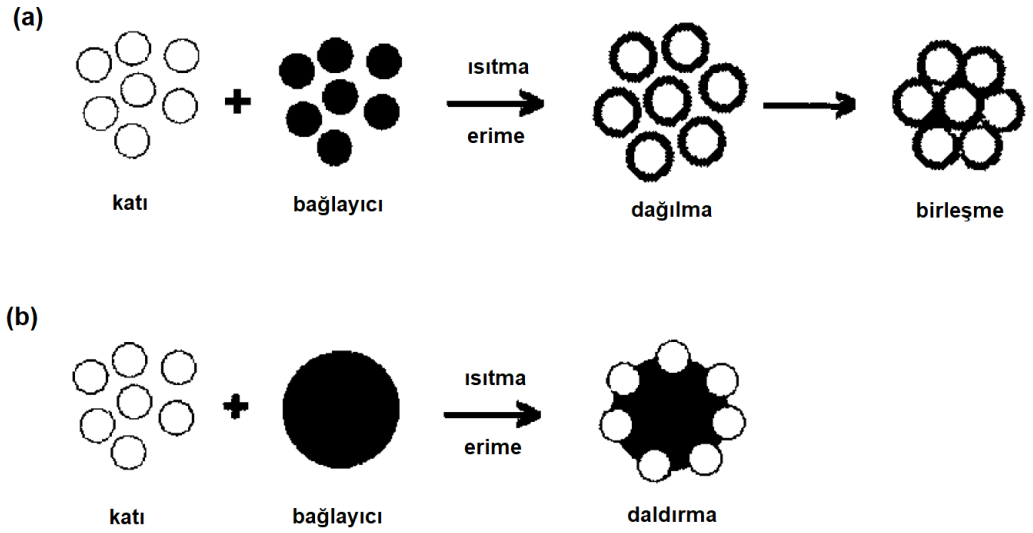


Şekil 4.1 Kalsine diatomitin SEM görüntüsü



Şekil 4.2 Kompozit FDM'nin SEM görüntüsü

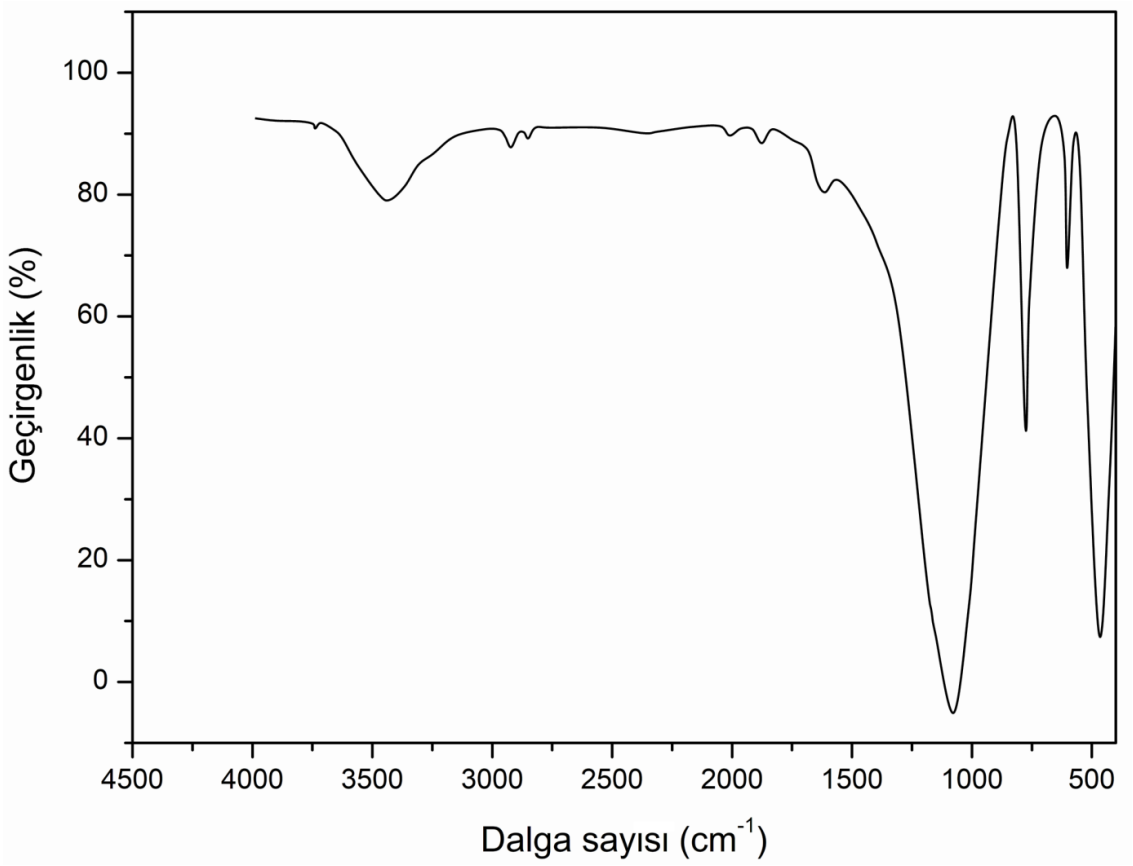
Bu çalışmada yapıca-kararlı kompozitin üretimi, sırasıyla katı ve bağlayıcı olarak görev yapan diatomit ve parafinin çekirdeklenme işlemidir. Schaefer and Mathiesen (1996) dağıtım ve daldırma olmak üzere iki farklı çekirdeklenme mekanizması önermişler ve belirli bir mekanizmanın oluşumunun katı malzemeye göre bağlayıcının boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 4.3'den de görülebileceği gibi bağlayıcı madde katı parçacıklara göre küçükse, çekirdeklenme işlemi bağlayıcı malzemeyi parçacıkların yüzeyine dağıtır. Bağlayıcı, katı parçacıklara kıyasla daha büyükse çekirdeklenme işlemi daha küçük parçacıkları daha büyük bağlayıcı malzemeye daldırır ve bu da doymuş gözeneklere sahip çekirdekler üretir. Bu çalışmada, SEM analizleri, daha büyük parçacık boyutlarına sahip katı parçacıklar kullanılarak hazırlanan kompozit FDM'nin dağılma mekanizmasına uyduğunu gösterir. Diatomit gözenekli parçacıklardan oluştuğundan, sıvı parafin ötektik karışımının parçacıkların yüzeyinde değil, iç gözeneklerde emildiği gözlenmiştir. Diatomitin nispeten büyük parçacık boyutlarına sahip olması nedeniyle birleşme meydana gelmemiştir.



Şekil 4.3 Eriyik aglomerasyonunda granül oluşum mekanizmaları (a) Dağılma mekanizması (b) Daldırma mekanizması

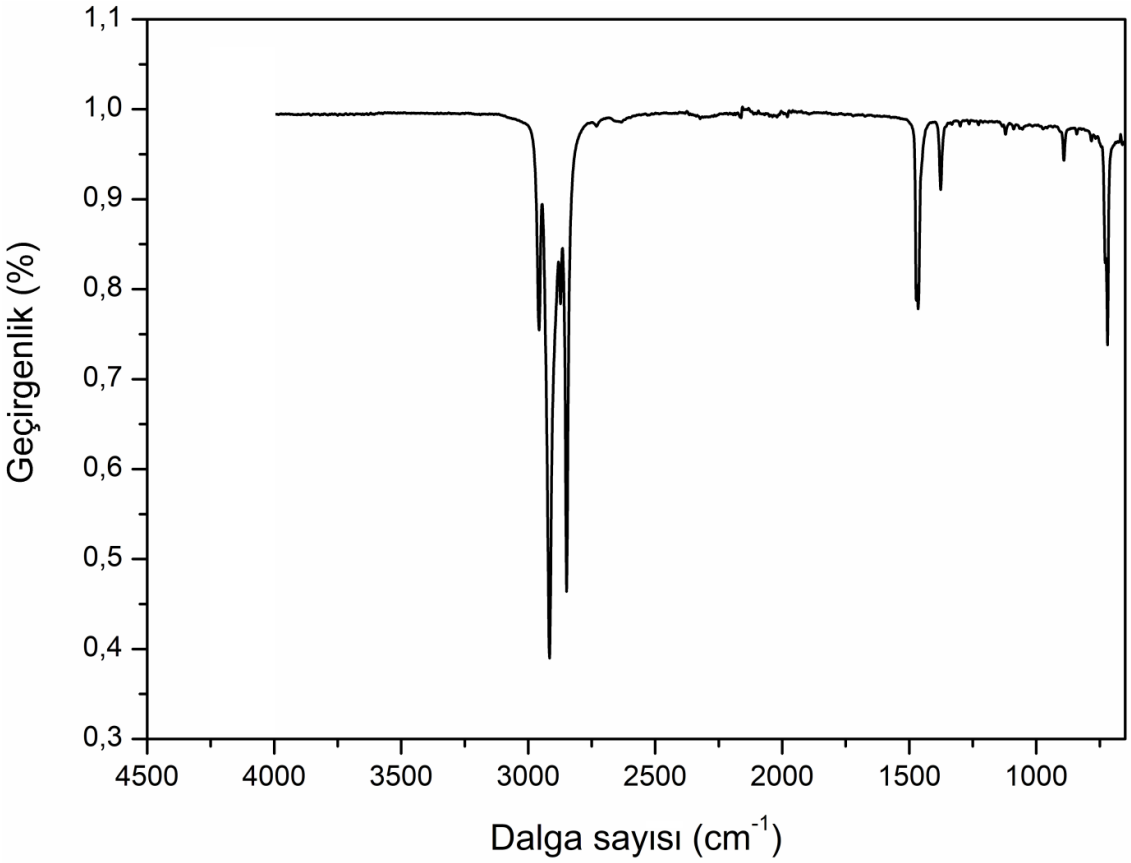
4.1.2 FT-IR analizleri

Parafin ötektik karışımı ve diatomit arasındaki kimyasal uyum, FT-IR spektroskopi analiz yöntemi kullanılarak belirlendi. Şekil 4.4 kalsine edilmiş diatomitin FT-IR spektrumunu göstermektedir. Diatomitin 3432, 1625, 1098 ve796 cm^{-1} olmak üzere dört karakteristik absorpsiyon bandına sahip olduğu şekilden açıkça görülmektedir. Bu pikler sırasıyla diatomit yüzeyindeki serbest silanol grubunu (SiO-H), suyun bükülme titreşimini (H-O-H), siloksan grubunun (Si-O-Si) gerilme titreşimini ve Si-OH bükülme titreşimi temsil ederler (Li et al. 2011).



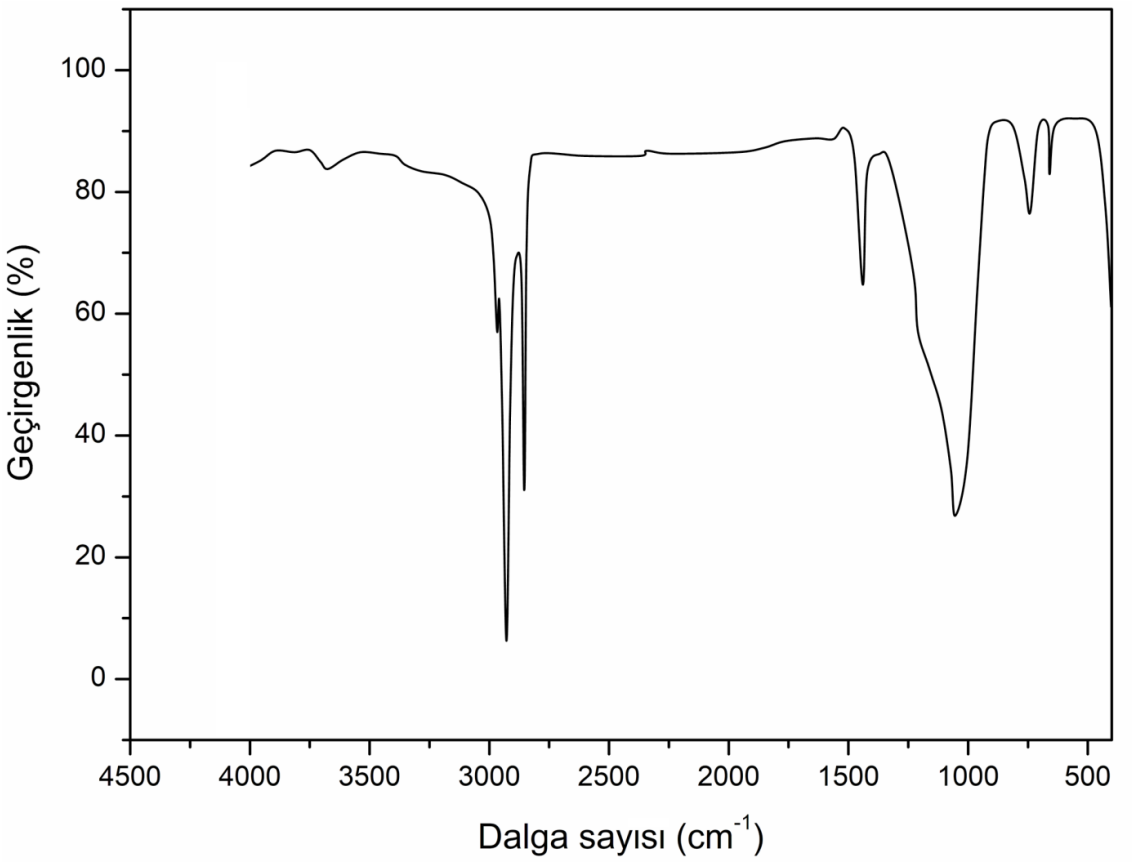
Şekil 4.4 Kalsine edilmiş diatomitin FT-IR spektrumu

Şekil 4.5'de n-eikosan-n-heptadekan ötektik karışımının FT-IR spektrumu verilmiştir. Parafin ötektik karışımının FT-IR spektrumunda 718 cm^{-1}, 1468 cm^{-1}, 2850 cm^{-1} ve 2916 cm^{-1} dalga sayılarında karakteristik absorpsiyon bantları gözlenmiştir. 2850 ile 2916 cm^{-1} arasında gözlenen pikler $–CH_2$ ve $–CH_3$'ün gerilme titreşimlerini, 1468 ve 718 cm^{-1}'deki pikler ise sırasıyla ötektik karışımı oluşturan alkanların $–CH_2$ ve $–CH_3$ gruplarına ait deformasyon titreşimi ve CH_2 gurubunun sallanma titreşimini temsil eder.



Şekil 4.5 Parafin ötektik karışımının FT-IR spektrumu

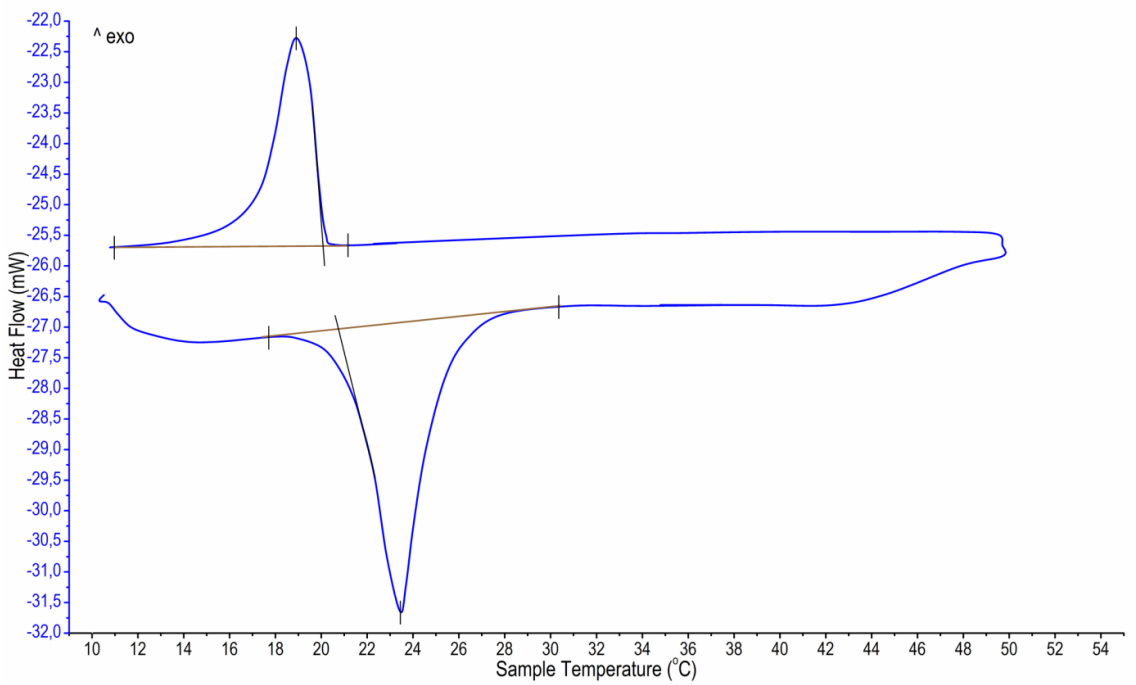
Şekil 4.6 hazırlanan yapıca-kararlı kompozit FDM'nin FT-IR spektrumunu göstermektedir. Diatomit ve parafin ötektik karışımının FT-IR spektrumları ile karşılaştırıldığında, parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin FT-IR spektrumunun hem parafin ötektik karışımının hem de DT'nin tüm karakteristik absoprsiyon bantlarını içerdiği açıkça görülebilir. Ayrıca, parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin spektrumunda yeni oluşan ya da kaybolan pik bulunmamaktadır. Bu sonuç, parafin ötektik karışımını oluşturan n-alkanlar ve destek madde olarak kullanılan DT arasında hiçbir kimyasal etkileşimin olmadığını göstermektedir. Ancak kompozite ait spektrumda Si–O–Si karakteristik bandının konumunun DT'ninkine kıyasla biraz kaydığı belirlenmiştir. Bu durumun gözenekler içerisindeki parafin ötektik karışımı ve DT matrisi arasındaki fiziksel etkileşimlerle açıklanabilir. Benzer sonuç Karaman et al. (2011) ve Xu ve Li (2013) tarafından yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir. FT-IR sonuçları, parafin ötektik karışımı ve DT arasında iyi bir uyumluluk olduğunu gösterir.



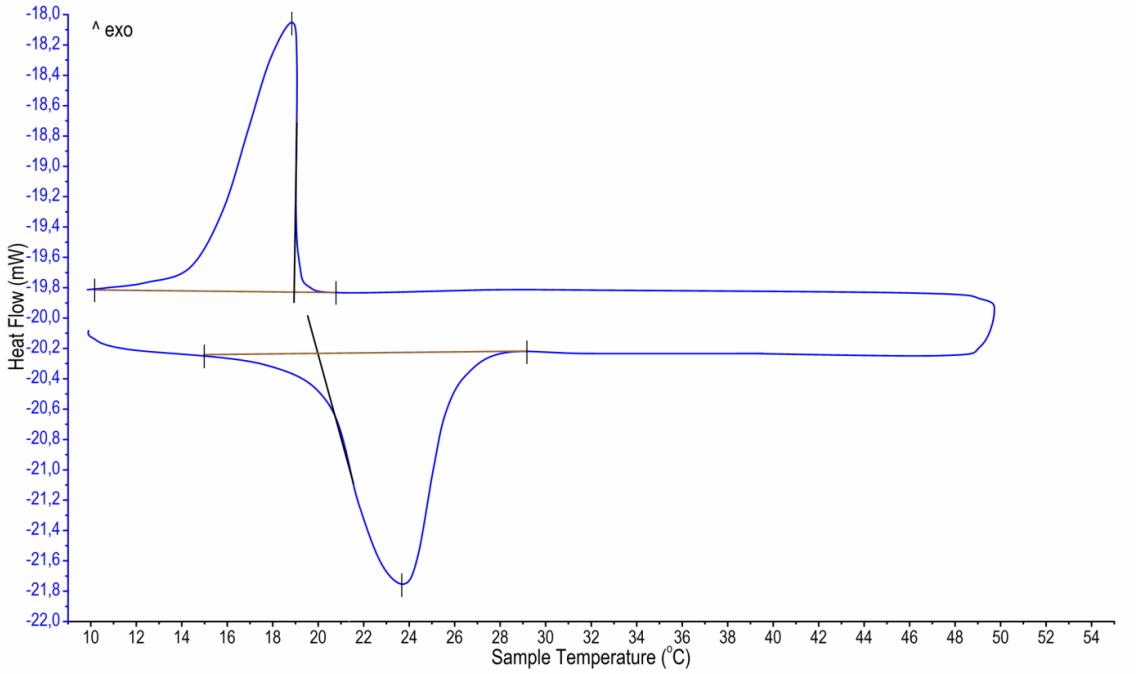
Şekil 4.6 Parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin FT-IR spektrumu

4.1.3 DSC analiz sonuçları

Erime sıcaklığı ve gizli ısı değerleri bir FDM'nin termal enerji depolama uygulamalarında kullanılması için önemli özellikleridir. Şekil 4.7 ve 4.8 parafin ötektik karışımı ve hazırlanan kompozit FDM'nin ısıtma ve soğutma işlemlerinde elde edilen DSC eğrilerini göstermektedir. Bu eğrilerden elde edilen DSC verileri Çizelge 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.7 n-eikosan - n-heptadekan ötektik karışımın DSC eğrisi



Şekil 4.8 Parafin ötektik karışımı/DT kompozit FDM'nin DSC eğrisi

Parafin ötektik karışımı ve hazırlanan kompozit FDM'nin DSC eğrilerinde erime ve katılaşma işlemlerine karşılık gelen bir endotermik ve bir ekzotermik olmak üzere

toplam iki pik bulunmaktadır. DSC eğrileri karşılaştırıldığında kompozitin faz değişim davranışının saf parafin ötektik karışımınınkine benzer olduğu görülebilir. Hem Şekil 4.6 hem de Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi, ısıtma sürecinde parafin ötektik karışımın erime işlemine ait başlangıç sıcaklığı (T_{onset}) ve entalpisi sırasıyla 20,8 °C ve 216,4 J/g, katılaşma işemine ait başlangıç sıcaklığı ve entalpisi ise sırasıyla 20,1 °C ve 209,6 J/g olarak belirlendi. Parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin erime işleminde ölçülen T_{onset} ve faz değişim entalpisi 19,9 °C ve 123,8 J/g ve katılaşma işleminde ise sırasıyla 19,2 °C ve 121,4 J/g'dır.

Çizelge 4.1 Parafin ötektik karışımı ve kompozitin ölçülen termofiziksel özellikleri

FDM	Erime sıcaklığı (°C)	Erime ısısı (J/g)	Katılaşma sıcaklığı (°C)	Katılaşma ısısı (J/g)
n-heptadekan - n-eikosan	20,8	216,4	20,1	209,6
n-heptadekan - n-eikosan /DT kompoziti	19,9	123,8	19,2	121,4

Çizelge 4.1'den görülebileceği gibi parafin ötektik karışımı ve hazırlanan kompozit FDM'nin erime ve katılaşma sıcak değerlerinde önemli bir farklılık bulunmamaktadır. Bu sonuç parafin ötektik karışımı için destek malzemesi olarak kullanılan diatomitin erime ve katılaşma sıcaklığı üzerinde hiçbir etkisi olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, kompozitin faz değişim entalpisi (gizli ısı) değerleri belirgin bir şekilde değişir. Diatomit gizli ısıya sahip olmadığı için kompozit FDM'nin gizli ısısı, parafin ötektik karışımınınkine kıyasla azalmıştır. Bu nedenle, diatomit içerisindeki parafin ötektik karışımının kütle kesri, hazırlanan kompozit malzemenin termal performansını belirlemek için önemlidir. Kompozit FDM içerisindeki parafin ötektik karışımının kütle kesri entalpi temelinde aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Liang et al. 2014).

$$\eta_i = \frac{\Delta H_{mi}}{\Delta H_{m'}} \; x \; \%100 \qquad (3)$$

Bu eşitlikte η_i kütle kesrini, $\Delta H_{m'}$ ve ΔH_{mi} ise sırasıyla parafin ötektik karışımının ve kompozit FDM'nin J/g cinsinden gizli ısı değerini göstermektedir. Kompozit FDM içerisindeki parafin ötektik karışımının kütle kesri (η_i) % 57,2 olarak bulunmuştur ve bu oran kompozitin hazırlanması sürecinde sızma testi ile belirlenen deneysel değerden biraz düşüktür. Ancak bu oran literatürde diatomit kullanılarak hazırlanan kompozitler için bildirilen maksimum orana çok yakındır (Çizelge 4.2). Bu çalışmada hazırlanan parafin ötektik karışımı/DT kompoziti, uygun erime sıcaklığı ve gizli ısı kapasiteleri bakımından literatürde bildirilen malzemelere göre bariz avantajlar göstermiştir. Bu özellikler kompozitin özellikle binalarda termal enerji depolama ve bina içi sıcaklık düzenlemede uygulama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.2 Hazırlanan parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin termal özelliklerinin literatürdeki diatomit esaslı bazı malzemelerle karşılaştırılması.

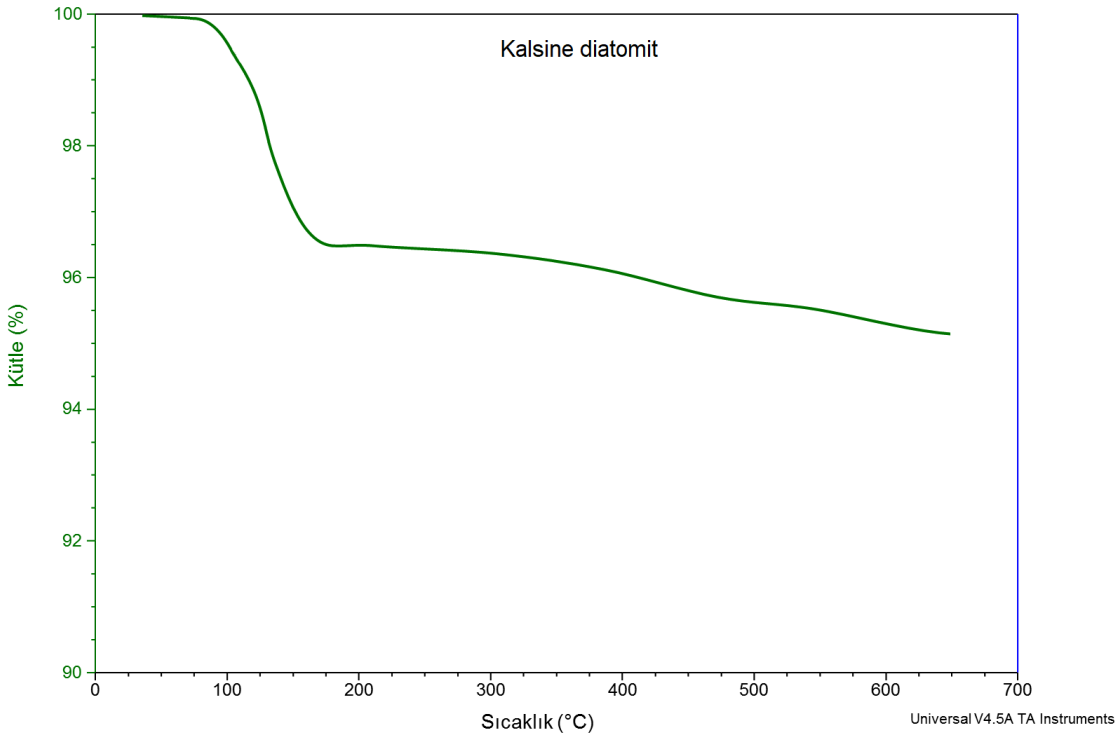
KompozitFDM	Metot	Erime sıcaklığı (°C)	Erime ısısı (J/g)	Maksimum oran	Kaynak
Parafin/DT	Emdirme	22,30	69,38	%50	Li et al. 2014
PEG/DT	Vakum emdirme	27,70	87,09	%50	Karaman et al. 2011
Parafin/DT	Emdirme	33,04	89,54	%61	Nomura et al. 2011
Parafin/DT	Emdirme	47,81	70,51	%47,4	Xu ve Li 2013
Stearik asit/ DT	Doğrudan katma	52,3	57,10	%28,85	Fu et al. 2016
Parafin ötektik karışımı/DT	Emdirme	19,9	123,8	%60	Bu çalışmada

4.1.4 TG analiz sonuçları

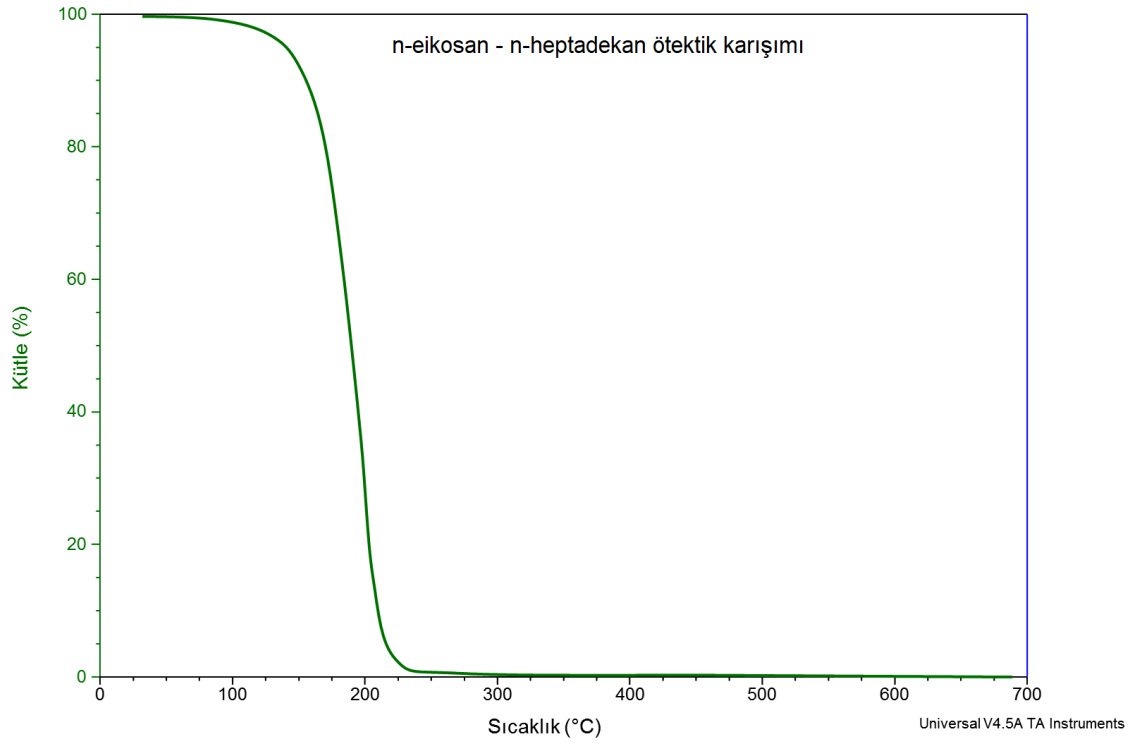
Bir kompozit FDM için termal direnç, temel termal parametrelerden biridir ve bu nedenle, kompozit yüksek sıcaklığa kadar ısıtılsa bile yüksek termal dirence sahip olması gerekir. Bu yönüyle, TG analiz tekniği ile hazırlanan kompozit FDM'nin termal bozunma sıcaklık limitinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kalsine diatomit, saf parafin

ötektik karışımı ve parafin ötektik karışımı/DT kompozitinin TG termogramları sırasıyla Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11'de gösterilmiştir. Kalsine diatomitin TG eğrisinde tek bir bozunma basamağı gözlenmiştir. 98 ^{o}C'nin üzerinde başlayan bu kütle kayıp basamağının, fiziksel olarak adsorbe edilmiş su moleküllerinin buharlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Saf parafin ötektik karışımının termogramından görülebileceği gibi 100 ^{o}C - 275 ^{o}C sıcaklık aralığında tek basamakta buharlaşmadan kaynaklanan kütle kaybı meydana gelmiştir. TG termogramına göre parafin ötektik karışımı 100 ^{o}C'ye kadar kararlılığını korumaktadır. Hazırlanan parafin ötektik karışımı/DT kompoziti, TG termogramına göre tek basamakta bozunmaktadır. 100 ^{o}C'nin altındaki sıcaklıklarda, numune kütlesi hemen hemen sabit kalır ve bu sıcaklığın üzerinde numune kütlesinin azalmaya başladığı görülmektedir. Sıcaklık 100 ^{o}C - 280 ^{o}C aralığında sıcaklık etkisiyle diatomitten uzaklaşan parafin ötektik karışımına ait olan kütle kayıp basamağı gözlenmektedir. Sıcaklık 280 ^{o}C'nin üzerine çıktıktan sonra kompozit FDM'nin kütlesi sabit kalmıştır. Kompozit FDM'nin TG eğrisi diatomit içerisindeki parafin ötektik karışımının tamamen buharlaştığını göstermektedir. Kütle kayıp basamağında kompozit FDM yaklaşık % 58 oranında kütle kaybına uğramış olup bu oran, sızma testi sonuçları ve DSC analizleri ile belirlenen absorpsiyon oranına çok yakındır.

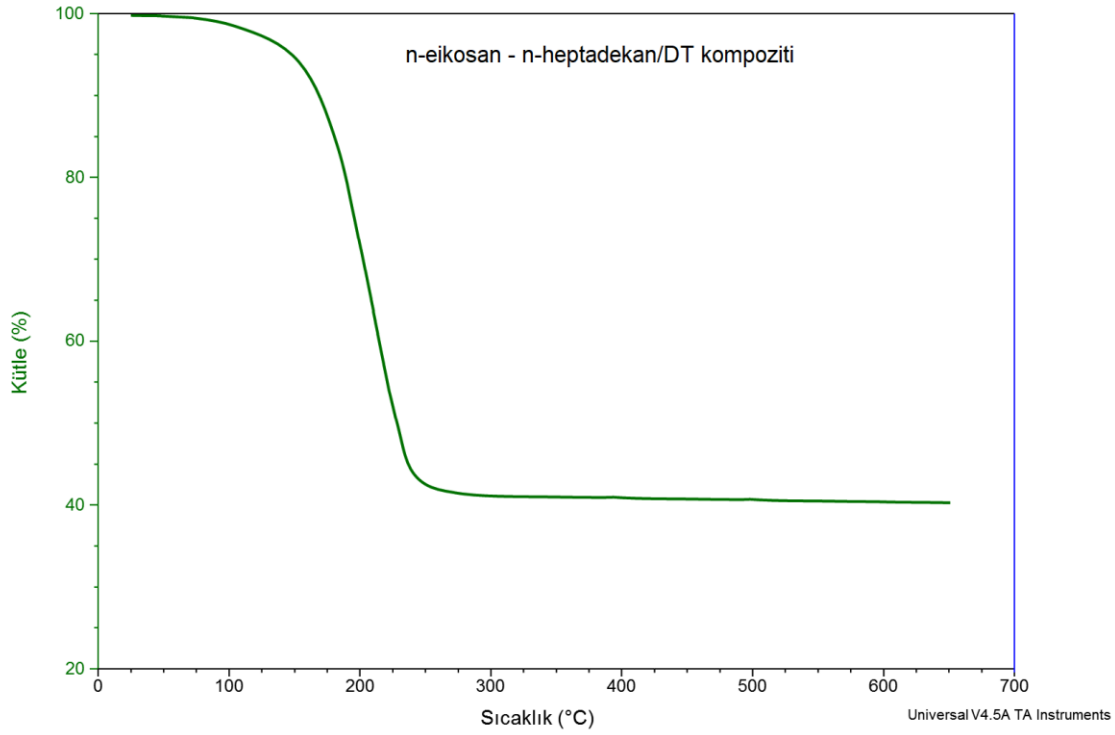
TG analiz sonuçlarına göre kompozitin kütle kaybetmeye başladığı sıcaklık değeri kompozit FDM'nin bina uygulamaları için kullanım sıcaklığının oldukça üzerindedir. Bu sonuç, kompozit FDM'nin yaklaşık olarak 100 °C'ye kadar parafin ötektik karışımı buharlaşmaya uğramadan, binalarda termal enerji depolama uygulamalarında rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.9 Kalsine edilmiş diatomitin TG termogramı



Şekil 4.10 n-eikosan - n-heptadekan ötektik karışımın TG termogramı

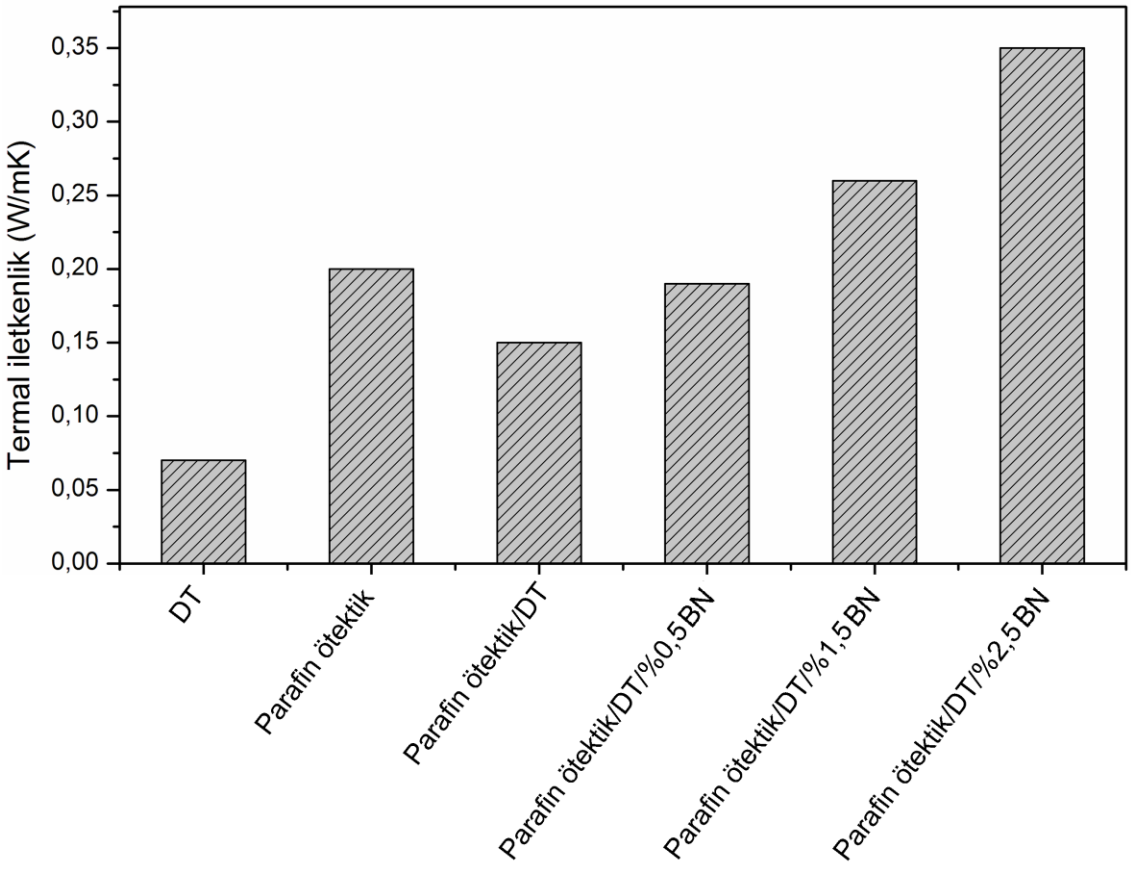


Şekil 4.11 Yapıca kararlı kompozit FDM'nin TG termogramı

4.2 Termal İletkenlik Sonuçları

Termal iletkenlik, yapıca kararlı kompozit FDM tabanlı enerji depolama sisteminin enerji depolama ve boşaltma hızını belirleyen önemli özelliklerden biridir. Bu nedenle enerji depolama sistemlerinde ısı transfer verimi bakımından kullanılacak kompozit FDM'lerin yüksek termal iletkenliğe sahip olmaları gerekir. Bu çalışmada, termal iletkenlik arttırıcı olarak BN kullanılmıştır. Hazırlanan yapıca kararlı kompozit FDM'ler içerisine kütlece %0,5, 1,5 ve 2,5 oranlarında BN eklenerek elde edilen kompozitlerin termal iletkenlikleri, 20 °C'de üç kez ölçülmüş ve ortalama değerler elde edilmiştir. Kalsine diatomit, n-eikosan-n-heptadekan, n-eikosan-n-heptadekan/DT kompoziti ve BN katkılı kompozitlerin ölçülen termal iletkenlikleri Şekil 4.12'de verilmiştir. n-eikosan-n-heptadekan/DT kompozit FDM'nin termal iletkenliği 0,16 W/mK olarak ölçülürken, %0,5, 1,5 ve 2,5 oranlarında BN eklenerek elde edilen kompozitlerin termal iletkenlikleri sırasıyla 0,19 ve 0,26 ve 0,35 W/m K olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, BN miktarı artarken kompozitlerin termal iletkenliklerinin de

arttığını göstermektedir. Yapıca kararlı kompozit FDM'nin termal iletkenliğindeki bu artış sırasıyla %18,8, %63 ve %118,8 oranlarına karşılık gelir. Termal iletkenlikteki bu zenginleşme, n-eikosan - n-heptadekan/DT kompoziti için geniş bir ısı transfer alanı sağlayan BN katkı maddesinin yüksek termal iletkenliğinden ve ölçüm test tüpü içerisinde sıkıştırılan kompozit FDM içindeki boşlukların azalmasından ve kompozit partiküller için temas yüzey alanının genişlemesinden kaynaklanabilir.



Şekil 4.12 Diatomin, parafin ötektik karışımı, yapıca kararlı kompozit ve BN ilaveli kompozitlerin termal iletkenlikleri

Çizelge 4.3'de n-eikosan-n-heptadekan/DT/%2,5BN kompozitinin termal iletkenliğinin literatürdeki termal iletkenlik arttırıcı olarak genişletilmiş grafit (GG) ve karbon nanotüpler (CNT)'in kullanıldığı diatomit bazlı kompozitlerin termal iletkenliği ile mukayesesi verilmiştir. Bu çizelgeden açıkça görüldüğü gibi, yapıca kararlı diatomit bazlı kompozitlerin termal iletkenklerindeki iyileşme, iletkenlik arttırıcı malzemenin

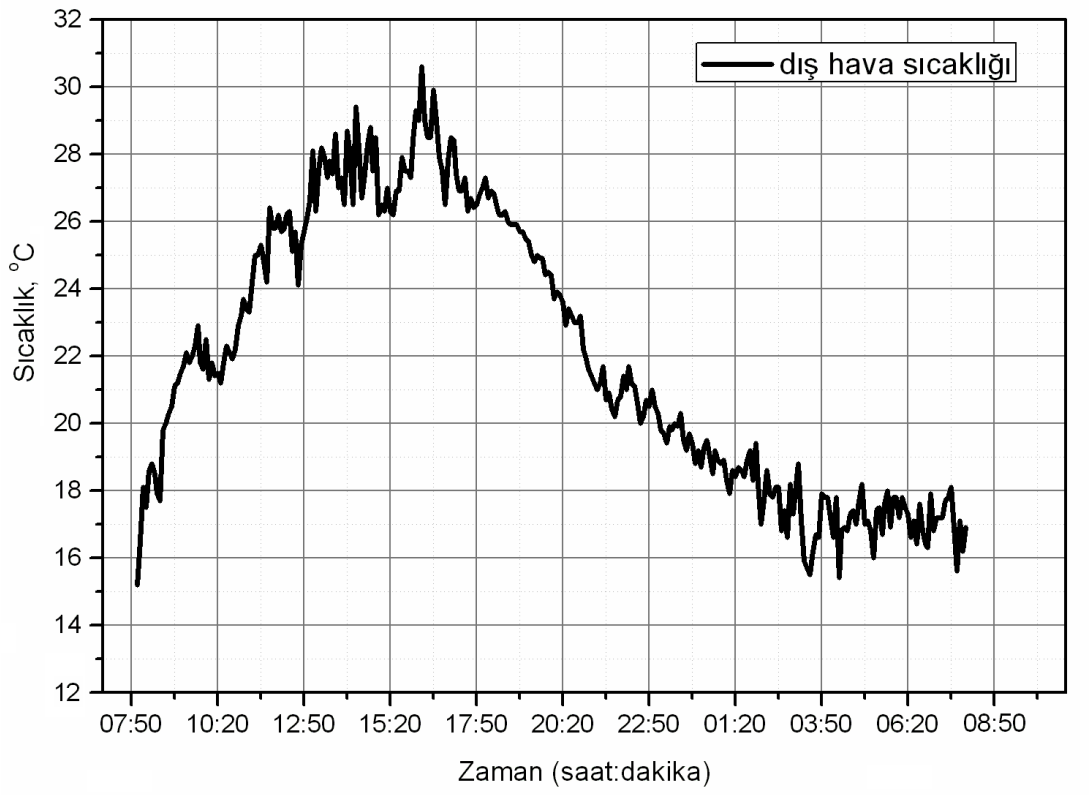
termal iletkenliğine ve bunların kompozit içindeki kütle oranlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Termal iletkenlik artış oranının literatürdeki diatomit bazlı kompozitler için elde edilen verilerle karşılaştırıldığında yüksek olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.3 n-eikosan-n-heptadekan/DT/%2,5BN kompozitinin termal iletkenliğinin literatürdeki bazı diatomit bazlı kompozitlerinki ile karşılaştırılması

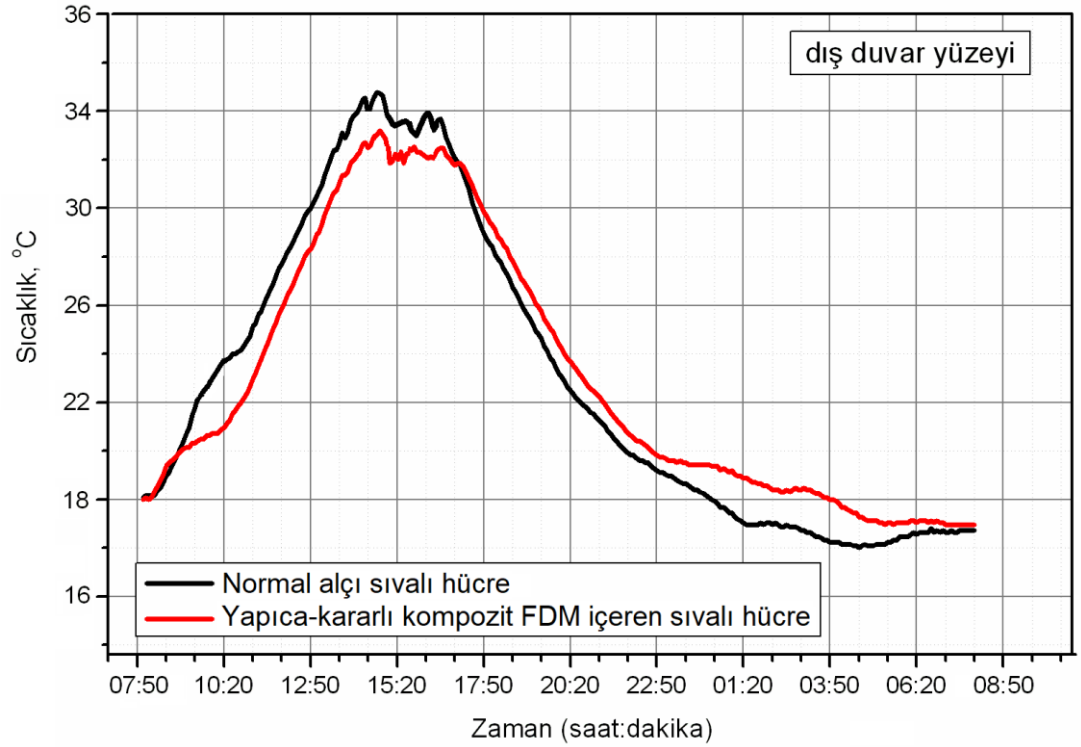
Kompozit FDM	İletkenlik arttırıcı	İlave edilen miktar (%)	Termal İletkenlik artışı (%)	Kaynak
Galactitol hexa myristate/DT	GG	5	43	Sarı and Biçer 2012
Galactitol hexa laurate/DT	GG	5	41	Sarı and Biçer 2012
PEG4000/diatomite	GG	10	97,2	Qian et al. 2016
PA-CA/DT	GG	5	25,2	Tang et al. 2015
CA-LA/DT	GG	3	39,7	Wen et. al 2018
PEG/DT	GG	3	28,13	Karaman et al. 2011
Parafin/DT	CNTs	0,26	42,45	Xu and Li 2014
PEG6000/DT	CNTs	2	180	Qian et al. 2017
PEG/DT	CNTs	2,5	93	Sarı et al. 2018
LA-SA/DT	GG	2,5	27,8	Li et al. 2020
n-eikosan - n-heptadekan/DT	BN	2,5	118,8	Bu çalışmada

4.3 Yapıca Kararlı Kompozit FDM'nin Termal Performansı

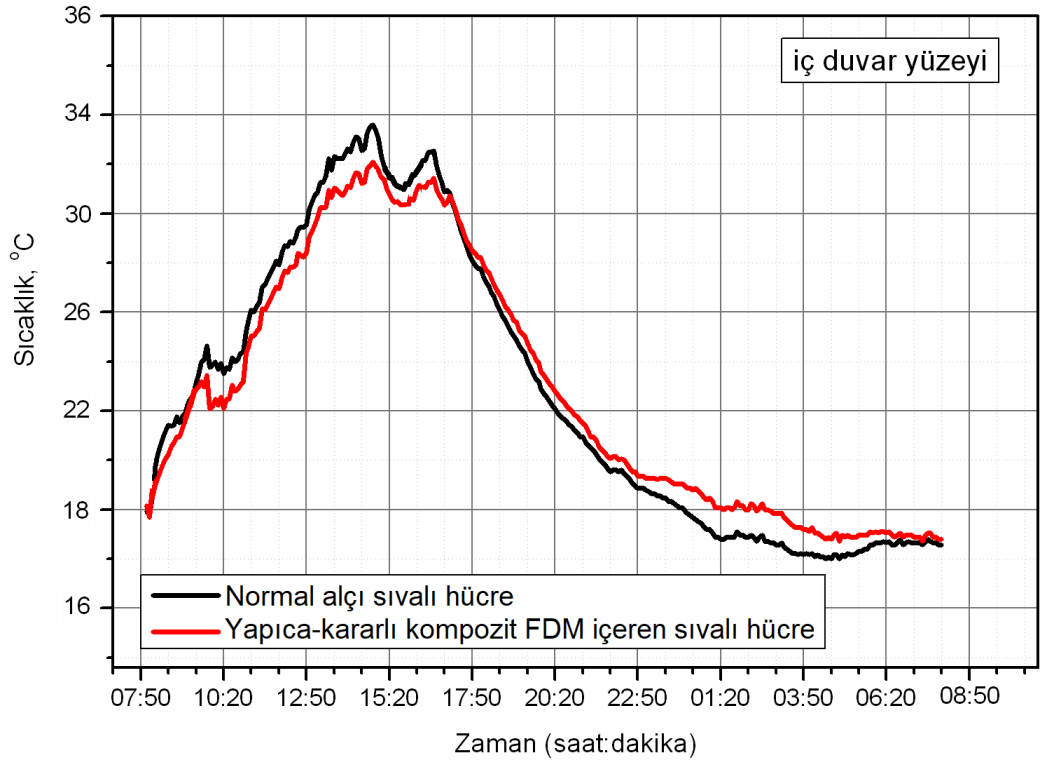
Sadece alçı sıva ve n-eikosan - n-heptadekan/DT kompoziti ilave edilmiş alçı sıva kullanılarak hazırlanan iki test hücresine ait termal performans deneyleri 15-16 Mayıs 2021 tarihleri arasında 08:00–08:00 saatleri arasında 24 saatlik süreci kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu tarihler arasında hava sıcaklığını, hücrelerin dış duvar yüzeyleri, iç duvar yüzeyleri ve hücre iç merkezlerindeki sıcaklık değişimlerini gösteren eğriler Şekil 4.13-4.16'da verilmiştir.



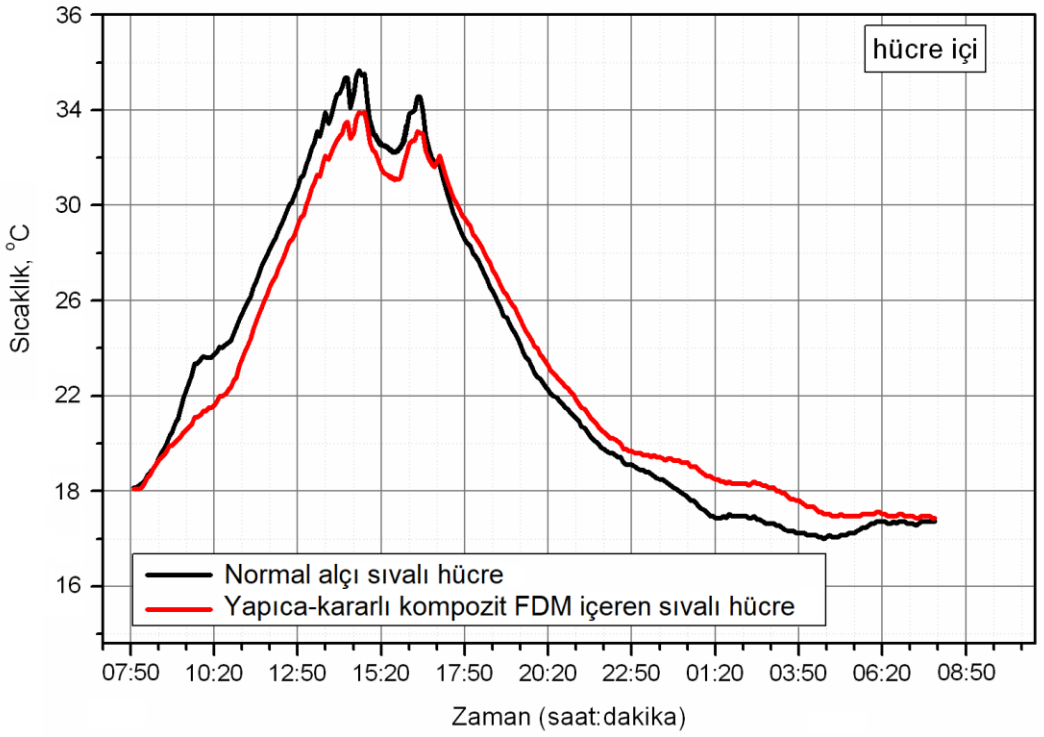
Şekil 4.13 24 saatlik termal performas testi süresince hava sıcaklık değişimi



Şekil 4.14 Alçı sıva ve kompozit FDM içeren alçı sıva ile sıvanmış test hücrelerinin 24 saat boyunca dış duvar sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.15 Alçı sıva ve kompozit FDM içeren alçı sıva ile sıvanmış test hücrelerinin 24 saat boyunca iç duvar sıcaklık değişim eğrileri



Şekil 4.16 Alçı sıva ve kompozit FDM içeren alçı sıva ile sıvanmış test hücrelerinin 24 saat boyunca hücre içi sıcaklık değişim eğrileri

Şekil 4.13'den görülebileceği gibi saat 11:00-16:00 saatleri arasında sıcaklığın 24-29,5 ^{o}C aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Test hücrelerinin ölçülen sıcaklıklarının öğle saatlerinde dış ortama göre yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni test hücrelerine yerleştirilen ve güney cephede bulunan cam aracılığıyla hücrelerin pasif yolla güneşten enerji kazanması ve ısınmasıdır. İki test hücresi için ölçülen sıcaklıklar termoçift konumları için paralellik göstermektedir.

Şekil 4.14'de alçı sıva ve kompozit FDM ilaveli sıva ile sıvanan test hücrelerinin dış duvar yüzeylerinin sıcaklık değişimleri görülmektedir. Test hücrelerine yerleştirilen termoçiftlerin gün içerisinde göstermiş oldukları sıcaklık değişimleri birbirlerine paralellik göstermektedir. Elde edilen bu eğriler incelendiğinde alçı sıva ile sıvanmış test hücresinin dış duvar yüzeyindeki sıcaklık artışının kompozit FDM katkılı sıva ile sıvanmış test hücresine kıyasla daha fazla olduğu görülebilir. Sıcaklığın maksimum olduğu saatlerde, kompozit FDM katkılı sıva ile hazırlanmış hücrenin dış duvar yüzey sıcaklığının alçı sıvalı hücrenin sıcaklığından yaklaşık 1,5-2 ^{o}C daha düşük olduğu da açıkça görülebilmektedir. Kompozit FDM ilaveli alçı sıva ile sıvanmış hücrede, termal enerjinin depolamasından faydalanılır. Kompozit FDM'li sıva ile sıvanmış hücrenin sıcaklık artış hızı alçı sıvalı hücreye kıyasla daha düşüktür. Bu süreçte kompozit içerisindeki parafin ötektik karışımı eriyerek enerji depolamaktadır. Sıcaklık 20 ^{o}C'nin üzerine çıktığı zaman faz değişimi başlamaktadır. Bu süreç bir miktar termal enerji gerektirir ve ortamdaki ısının bir miktarı parafin ötektik karışımı tarafından depolanır. Böylece alçı sıvalı hücreye kıyasla kompozit FDM içeren sıvalı hücrenin sıcaklık artışında gecikme gözlenir.

Diğer taraftan 16:30'dan itibaren hava sıcaklıkğının düşmesi ile test hücrelerinin dış duvar yüzey sıcaklığının düştüğü fakat kompozit FDM içeren sıva ile sıvanmış hücrenin dış duvar yüzey sıcaklığındaki düşüşün daha yavaş olduğu görülebilir. Söz konusu bu durum kompozit FDM'nin termal tampon oluşturarak sıcaklığı belirli düzeyde tutma eğiliminde olması ile açıklanabilir.

Şekil 4.15'de alçı ile sıvanmış hücrenin iç duvar yüzey sıcaklığının maksimum 33,5 ^{o}C (pik sıcaklığı) ve kompozit FDM katkılı sıva ile sıvanmış test hücresinin iç duvar yüzey sıcaklığının maksimum 32 ^{o}C (pik sıcaklığı) olduğu görülebilir.

Şekil 4.16'de gündüz boyunca ısınma periyodu süresince iki test hücresinin merkez sıcaklıkları arasındaki yaklaşık 2 ^{o}C'lik sıcaklık farkı, ısının bir kısmının enerji depolayıcı sıva içerisindeki kompozit FDM tarafından gizli ısı şeklinde depolanmasından kaynaklanmıştır. Kompozit FDM içeren sıvalı hücrede ise gündüz sıcaklığın yükselmesi ile termal enerji depolanmakta, gece saatlerinde ise sıcaklık düşüşüyle birlikte sıvı-katı faz değişimi sırasında ısı açığa çıkmaktadır ve bu sayede hücre içi ortam sıcaklığının korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu sonuçlara dayanılarak; n-eikosan-n-heptadekan/DT kompozit FDM kullanılarak hazırlanan enerji depolayıcı sıvanın termal performansının (ortam sıcaklığını komfor sıcaklığında tutabilme özelliği) normal alçı sıvadan oldukça iyi olduğu söylenebilir.

Termal performans deneyinde elde edilen sonuçlar temelinde yapıca kararlı n-eikosan-n-heptadekan/DT kompozit FDM ilaveli alçı sıva kullanılarak hazırlanan test hücresinin sadece alçı sıva kullanılarak hazırlanan test hücrelerine kıyasla hücre içi sıcaklık dalgalanmalarını azaltabildiği ve termal yalıtım oluşturabildiğini söylemek mümkündür. Sonuç olarak, kompozit FDM katkılı alçı sıvanın, enerjiyi duyulur ısının yanı sıra gizli ısı şeklinde de depolama ve boşaltma yeteneğinden dolayı uygulanacağı bir binada önemli derecede enerji tasarrufu sağlayabileceği söylenebilir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Binalarda enerji tasarrufu ve iklimlendirme sağlanması amacıyla öncelikle enerji tüketimini düşürecek, enerjinin daha verimli kullanımını sağlayacak etkili yöntemlerin geliştirilmesi gittikçe önem kazanır hale gelmiştir. Bu çalışmada, bu ihtiyaç gözetilerek binalarda enerji muhafazası ve sıcaklığın uzun süreli istenilen seviyede tutulması amacıyla kullanılabilecek yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/diatomit kompoziti hazırlandı. Yapıca kararlı kompozit FDM'nin hazırlanmasında n-eikosan - n-heptadekan ötektik karışımı ve kalsine edilmiş diatomit kullanıldı. Kompozitin morfolojik, kimyasal ve termal karakterizasyonları SEM, FT-IR, DSC ve TG analiz teknikleri ile yapıldı. Yapıca kararlı kompozit karışımın termal iletkenliği bor nitrür kullanılarak iyileştirildi. Hazırlanan kompozit karışım kütlece %20 oranında alçı içerisine ilave edilerek kompozit sıva hazırlandı ve laboratuvar ölçekte test hücresinin içerisine uygulanarak termal performansı test edildi.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

(1) SEM görüntüleri parafin ötektik karışımının kalsine edilmiş DT'in gözenekleri içerisine başarılı bir şekilde hapsedildiğini gösterdi.

(2) FT-IR spektroskopi sonuçları parafin ötektik karışımı ve DT arasında kimyasal etkileşimin olmadığını ve bileşenlerin karakteristik pik konumlarındaki kaymalara göre bu etkileşimlerin fiziksel olduğunu gösterdi.

(3) DSC analiz sonuçları, hazırlanan yapıca kararlı n-eikosan-n-heptadekan/DT kompozitinin erime ve katılaşma sıcaklıkları ve entalpi değerlerinin sırasıyla 19,9 °C, 19,2 °C, 123,8 J/g ve 121,4 J/g olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar hazırlanan kompozit FDM'nin binalarda termal enerji depolama uygulamaları için uygun faz değişim sıcaklık aralığına ve termal enerji depolama kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Faz değişim entalpileri temelinde kalsine diatomit içerisine hapsedilen n-eikosan-n-heptadekan ötektik karışımı oranı kütlece %57,2 olarak hesaplanmıştır.

(4) TG analiz sonuçları kompozitin kütle kaybının başladığı sıcaklık alt limitinin (kompozitten parafin ötektik karışımının uzaklaşmaya başladığı sıcaklık) 100 °C olduğunu ve bu değerin kompozit FDM'nin çalışma sıcaklık aralığının oldukça üzerinde olduğunu göstermektedir.

(5) Hazırlanan yapıca kararlı kompozit FDM içerisine farklı oranlarda BN ilave edilerek, kompozitin termal iletkenliğinde önemli derecede artış sağlanmıştır. Kütlece %0,5, 1,5 ve 2,5 oranlarında BN ilave edilerek yapılan termal iletkenlik ölçümlerinde sırasıyla %18,8, %63 ve %118,8 oranlarında iyileşme kaydedilmiştir.

(6) Termal performans testi sonuçları, enerji depolayıcı sıva ile hazırlanan test hücresinin merkez sıcaklığının sadece alçı ile hazırlanan hücrenin merkez sıcaklığına kıyasla önemli oranda azaldığını göstermiştir. Ayrıca, kompozit içerisindeki ötektik karışımının erimesiyle, hücre içi sıcaklık artışının daha az olduğu gözlenmiştir. Hücre içi sıcaklık dalgalanmasının daha yavaş olması ve enerji depolayıcı kompozitin termal tampon oluşturarak sıcaklığı belirli düzeyde tutma eğiliminde olması binalarda enerji muhafazası açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu sonuç hazırlanan enerji kompozitin binalarda termo-düzenleyici elemanlar olarak değerlendirilebileceği anlamına gelir.

Sonuç olarak bu çalışmadan elde edilen bulgular, hazırlanan yapıca kararlı parafin ötektik karışımı/DT kompozit FDM'nin binalarda enerji tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir kaynaklardan yararlanılması için önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Diatomit bazlı kompozit FDM'ler ile ilgili araştırmalar mevcut çalışmalarda mikro alanla sınırlıdır. Bu nedenle, diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin termal özellikleri ve termal kararlılığı ile ilgili çalışmaların gelecekte daha derinlemesine araştırılması gerekmektedir. Diatomit bazlı kompozit FDM'lerin üretilmesi için yapılacak bir yatırım ekonomiktir ancak gerçek ölçekli uygulamalardaki performansı henüz belirlenmemiştir. Bu nedenle, diatomit bazlı yapıca kararlı kompozit FDM'lerin pratik uygulamalardaki etkisi daha fazla araştırılmalıdır. Ayrıca bu kompozitlerin uygulanması için hazırlanacak sıvanın mekanik mukavemetini, yangına karşı dayanıklılığını ve toksisitesini belirlemek için başka çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Dincer, I. 2002. On thermal energy storage systems and applications in buildings. Energy and buildings, 34(4), 377-388.

Dincer, I. and Rosen, M. 2002. Thermal energy storage: systems and applications. John Wiley & Sons.

Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y. and Liu, H. 2018. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. Applied Energy, 220, 242–273.

Entrop, A.G., Halman, J.I., Dewulf, G.P. and Reinders, A.H. 2016. Assessing the implementation potential of PCMs: The situation for residential buildings in the Netherlands. Energy Procedia, 96, 17–32.

European Commission. European Union Energy in Figures; Statistical Pocketbook. 2016. Publications Office of the EU: Luxembourg, Luxembourg.

Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S.A.K. and Al-Hallaj, S. 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications. Energy conversion and management, 45(9-10), 1597-1615.

Feldman, D., Banu, D., Hawes, D. and Ghanbari, E. 1991. Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. Solar energy materials, 22(2-3), 231-242.

Fu, L. J., Dong, F. Q., He, P. and Yang, Y. S. 2013. Study on preparation and properties of capric-myristic acid/diatomite form-stable phase change energy storage materials. Journal of Functional Materials, 44(10), 1465-1468.

Fu, X., Liu, Z., Xiao, Y., Wang, J. and Lei, J. 2015. Preparation and properties of lauric acid/diatomite composites as novel form-stable phase change materials for thermal energy storage. Energy and Buildings, 104, 244-249.

Fu, X., Liu, Z., Wu, B., Wang, J., and Lei, J. 2016. Preparation and thermal properties of stearic acid/diatomite composites as form-stable phase change materials for thermal energy storage via direct impregnation method. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 123(2), 1173-1181.

Gao, B., P. Jiang, An, F., Zhao, S. and Ge, Z. 2005. Studies on the surface modification of diatomite with polyethyleneimine and trapping effect of the modified diatomite for phenol. Applied Surface Sci., 250: 273-279.

Guanghui, L.E.N.G., Yue, Q.I.N., Feng, Y.E., Xiang, Y.U. and Yulong, D.I.N.G. 2013. Recent progress in diatomite based composite phase change materials for thermal energy storage. Energy Storage Science and Technology, 2(3), 199.

Hassan, M.S., Ibrahim I.A. and Ismael, I.S. 1999. Diatomaceous deposits of Fayium, Egypt: Characterization and evaluation for industrial application. Chinese J. Geochemis., 18: 233-241.

Hawes, D. W. and Feldman, D. 1992. Absorption of phase change materials in concrete. Solar Energy Materials and Solar Cells, 27(2), 91–101.

Heier, J., Bales, C. and Martin, V. 2015. Combining thermal energy storage with buildings–a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42, 1305-1325.

International Renewable Energy Agency (IRENA). 2015. The Energy Technology Systems Analysis Programmes (ETSAP): Technology Brief E17; International Energy Agency: Paris, France, 2013. Available online: http://www.irena.org/Publications (accessed on 8 July 2015).

Iten, M., Liu, S. and Shukla, A. 2016. A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 175-186.

Jeong, S. G., Jeon, J., Lee, J. H. and Kim, S. 2013. Optimal preparation of PCM/diatomite composites for enhancing thermal properties. International Journal of Heat and Mass Transfer, 62, 711-717.

Karaman, S., Karaipekli, A., Sarı, A. and Bicer, A. 2011. Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(7), 1647-1653.

Kasaeian, A., Pourfayaz, F., Khodabandeh, E. and Yan, W. M. 2017. Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review. Energy and Buildings, 154, 96-112.

Kauranen, P., Peippo, K. and Lund, P.D. 1991. An organic PCM storage system with adjustable melting temperature. Solar Energy, 46(5), 275-278.

Kenisarin, M.M. 2014. Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review. Solar Energy, 107, 553-575.

Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H. O. and Charvat, P. 2015. Review on using microencapsulated phase change materials (PCM) in building applications. Energy and Buildings, 106, 134-155.

Krese, G., Butala, V. and Stritih, U. 2018. Thermochemical seasonal solar energy storage for heating and cooling of buildings. Energy and Buildings, 164, 239–253

Lei, L. and Song, B. 2015. The preparation and characterization of diatomite supported composite phase change material. Henan Science and Technology, 131–134.

Li, M., Wu, Z. and Kao, H. 2011a. Study on preparation and thermal properties of binary fatty acid/diatomite shape-stabilized phase change materials. Solar Energy Materials and Solar Cells, 95(8), 2412-2416.

Li, M., Kao, H., Wu, Z. and Tan, J. 2011b. Study on preparation and thermal property of binary fatty acid and the binary fatty acids/diatomite composite phase change materials. Applied energy, 88(5), 1606-1612.

Li, X., Sanjayan, J. G. and Wilson, J. L. 2014. Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites. Energy and Buildings, 76, 284-294.

Li, C., Wang, M., Xie, B., Ma, H. and Chen, J. 2020. Enhanced properties of diatomite-based composite phase change materials for thermal energy storage. Renewable Energy, 147, 265-274.

Liang, W., Chen, P., Sun, H., Zhu, Z. and Li, A. 2014. Innovative spongy attapulgite loaded with n-carboxylic acids as composite phase change materials for thermal energy storage. Rsc Advances, 4(73), 38535-38541.

Ling, T.C. and Poon, C S. 2013. Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: An overview. Construction and Building Materials, 46, 55–62.

Lizana, J., Chacartegui, R., Barrios-Padura, A. and Ortiz, C. 2018. Advanced low-carbon energy measures based on thermal energy storage in buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 3705–3749.

Mehrali, M., Latibari, S. T., Mehrali, M., Mahlia, T. M. I., Sadeghinezhad, E. and Metselaar, H.S.C. 2014. Preparation of nitrogen-doped graphene/palmitic acid shape stabilized composite phase change material with remarkable thermal properties for thermal energy storage. Applied energy, 135, 339-349.

Memon, S.A. 2014. Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 870–906.

Mendioroz, S., Belzunce, M.J. and Pajares, J.A. 1989. Thermogravimetric study of diatomites. J. Thermal Anal. Calorimetry, 35: 2097-2104.

Murer, A.S., E. Mobil, K.L. Mc-Clennen, T.K. Ellison and E. Mobil et al., 2000. Steam injection project in heavy-oil diatomite. SPE. Reservoir Evaluation Eng., 3: 2-12.

Navarro, L., De Gracia, A., Colclough, S., Browne, M., McCormack, S.J., Griffiths, P. and Cabeza, L.F. 2016. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. Renewable Energy, 88, 526-547.

Nomura, T., Okinaka, N. and Akiyama, T. 2009. Impregnation of porous material with phase change material for thermal energy storage. Materials Chemistry and Physics, 115(2-3), 846-850.

Pandey, A.K., Hossain, M. S., Tyagi, V.V., Rahim, N.A., Jeyraj, A., Selvaraj, L. and Sari, A. 2018. Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 281–323.

Pasupathy, A., Velraj, R. and Seeniraj, R.V. 2008. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(1), 39–64.

Qian, T., Li, J., Min, X., Deng, Y., Guan, W. and Ning, L. 2015. Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material. Energy Conversion and Management, 98, 34-45.

Qian, T., Li, J., Ma, H. and Yang, J. 2016. Adjustable thermal property of polyethylene glycol/diatomite shape-stabilized composite phase change material. Polymer Composites, 37(3), 854-860.

Rathore, P. K. S. and Shukla, S.K. 2019. Potential of macroencapsulated pcm for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review. Construction and Building Materials, 225, 723–744.

Sahoo, S. K., Das, M. K. and Rath, P. 2016. Application of TCE-PCM based heat sinks for cooling of electronic components: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 59, 550–582.

Sarbu, I. and Sebarchievici, C. 2016. Solar heating and cooling systems: Fundamentals, experiments and applications. Academic Press.

Sarı, A., Bicer, A., Al-Sulaiman, F. A., Karaipekli, A. and Tyagi, V.V. 2018. Diatomite/CNTs/PEG composite PCMs with shape-stabilized and improved thermal conductivity: Preparation and thermal energy storage properties. Energy and Buildings, 164, 166-175.

Schaefer, T. and Mathiesen, C. 1996. Melt pelletization in a high shear mixer. IX. Effects of binder particle size. International journal of pharmaceutics, 139(1-2), 139-148.

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C. R., and Buddhi, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable energy reviews, 13(2), 318-345.

Soares, N., Costa, J. J., Gaspar, A. R. and Santos, P. 2013. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. Energy and buildings, 59, 82-103.

Sun, Z., Yang, X., Zhang, G., Zheng, S. and Frost, R. L. 2013a. A novel method for purification of low grade diatomite powders in centrifugal fields. International Journal of Mineral Processing, 125, 18-26.

Sun, Z., Zhang, Y., Zheng, S., Park, Y. and Frost, R. L. 2013b. Preparation and thermal energy storage properties of paraffin/calcined diatomite composites as form-stable phase change materials. Thermochimica Acta, 558, 16-21.

Sun, X., Zhang, Q., Medina, M.A. and Lee, K.O. 2016. Experimental observations on the heat transfer enhancement caused by natural convection during melting of solid–liquid phase change materials (PCMs). Applied energy, 162, 1453-1461.

Tang, F., Su, D., Tang, Y. and Fang, G. 2015. Synthesis and thermal properties of fatty acid eutectics and diatomite composites as shape-stabilized phase change materials with enhanced thermal conductivity. Solar Energy Materials and Solar Cells, 141, 218-224.

Tyagi, V.V., Kaushik, S.C., Pandey, A.K. and Tyagi, S.K. 2011. Experimental study of supercooling and pH behaviour of a typical phase change material for thermal energy storage.

Twidell, J. And Weir, T. 2015. Renewable Energy Resources; Routledge: London, UK.

Wang, J. and Zheng S. 2012. Research on preparation technology of diatomite composite phase change material. Non-Matallic Mines, 55–57.

Wen, R., Zhang, X., Huang, Z., Fang, M., Liu, Y., Wu, X., ... and Huang, S. 2018. Preparation and thermal properties of fatty acid/diatomite form-stable composite phase change material for thermal energy storage. Solar Energy Materials and Solar Cells, 178, 273-279.

Xu, B. and Li, Z. 2013. Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage. Applied energy, 105, 229-237.

Xu, B. and Li, Z. 2014. Paraffin/diatomite/multi-wall carbon nanotubes composite phase change material tailor-made for thermal energy storage cement-based composites. Energy, 72, 371-380.

Yuan, P., Wu, D.Q. He, H.P. and Lin, Z.Y. 1997. The hydroxyl species and acid sites on diatomite surface: A combined IR and raman study. Applied Surface Sci., 227: 30-39.

Zhaolun, W., Yuxiang, Y., Xuping, Q., Jianbo, Z., Yaru, C. andLinxi, N. 2005. Decolouring mechanism of Zhejiang diatomite. Application to printing and dyeing wastewater. Environmental Chemistry Letters, 3(1), 33-37.

Zeinelabdein, R., Omer, S. and Gan, G. 2018. Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2843-2868.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:	Miyase BULUT
Yabancı Dili	:	İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	:	Çankırı Anadolu Lisesi
Lisans	:	Balıkesir Üniversitesi Necatibey Eğitim Fakültesi Fen Bilimleri Öğretmenliği
Yüksek Lisans	:	Çankırı Karatekin Üni. Kimya Bölümü

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

2012-2016 Ardahan damal Süleyman Demirel ortaokulu

2016-2019 Hatay Kırıkhan Atatürk ortaokulu

2019- Halen Çankırı Merkez Mehmetçik Ortaokulu