T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİNA YAPI ELEMANLARINDA KULLANIMA UYGUN FAZ DEĞİŞTİREN DOLGULU MİKROKAPSÜLLERİN SENTEZİ

Esra MİRMAHMUTOĞULLARI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Gökhan ÇAYLI

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Aliihsan KOCA

Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı

Mühendislik Bilimleri Programı

Haziran, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Esra MİRMAHMUTOĞULLARI tarafından, **Doç. Dr. Gökhan ÇAYLI** danışmanlığında hazırlanan **"Tez Adı"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **07/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Doç. Dr. Gökhan ÇAYLI
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğretim Üyesi İlknur HOŞ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğretim Üyesi Burçin ÖZBAY KISASÖZ
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Tezimi canım annem ve babama ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

BİNA YAPI ELEMANLARINDA KULLANIMA UYGUN FAZ DEĞİŞTİREN MAZLEME DOLGULU MİKROKAPSÜLLERİN SENTEZİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda özellikle tamamen yeni öğrendiğim mikroenkapsülasyon alanında bilgisi, tecrübesi ve cesaretlendirmeleriyle bölüme ilk girdiğim andan ve dahi öncesinden itibaren destek olan danışman hocam Doç. Dr. Gökhan ÇAYLI'ya, yine aynı şekilde yeni öğrendiğim termal enerji depolama konusunda aynı zamanda da yürütücüsü olduğum TÜBİTAK-1501 projesindeki danışmanım ve kariyerimdeki en farklı basamaklarımdan biri olan Çevre ve Enerji Araştırmaları Birimi Ekip Liderliği görevimde, motivasyonumu düşürücü unsurların da olduğu birçok anda bana verdiği daimi motivasyon desteği için ikinci danışman hocam Doç. Dr. Aliihsan KOCA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez için gerçekleştirdiğim deney ve analizlerde büyük katkısı ve desteği olan çok kıymetli ilk personelim Betül ULUPINAR'a teşekkür ederim.

Rutin bir iş hayatından çok, keşif yapmayı ve ülkemizin bağımsızlığı için tek yolun kendi teknolojisini geliştiren bir ülke olmamızdan geçtiğini bizlere öğreten işyerim MİR Araştırma ve Geliştirme A.Ş'ye ve saygıdeğer kurucuları İbrahim Mirmahmutoğulları ve Adil Mirmahmutoğulları'na ayrıca tez çalışmam için de sağladıkları imkanlar için şükranlarımı arz ederim.

Sadece yüksek lisans tezim süresince değil, 5 yılı aşkın süredir hem amirim hem de eğitim-öğretim hayatımdaki en sevdiğim hocalarım arasında ilk 3'e çoktan girmiş olan, yeteneklerimi, başarabileceklerimi keşfetmemde 24 yaşımdan beri en büyük desteği veren, multidisipliner bir Ar-Ge Mühendisi olmam için emeği çok büyük olan Direktörümüz Dr. Mustafa Doğu'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Birlikte harika bir grup olduğumuz oda arkadaşlarıma, Büşra BIYIKLI, Dilara HATİPOĞLU ve Seda DEVECİ'ye teşekkür ederim. Ayrıca Emel Ablam, Dr. Emel EREN'e de teşekkür ederim.

Beni her türlü nazımla seven, hep yüreklendiren ve bana inanan dostlarım, kendi seçtiğim kız kardeşlerim, Zeynep Elif ALTUNTAŞ'a, Nisa AYZİT'e ve Gülsüm BAKAN'a teşekkür ederim.

Sevgilerini ve desteklerini doğduğum günden beri hissettiğim dedeme ve halama çokça teşekkür ederim.

Teşekkürlerin en büyüğü canım aileme. Başta anneme ve babama… Tüm güzel öğretileri için, kendini ifade edebilen, kendi yolunu çizebilen, inandıkları yolunda pes etmeyen, kendine ve çevresine değer veren, mutluluk veren bir birey olmamı sağladığınız için ne kadar teşekkür etsem az.

Haziran 2022 Esra MİRMAHMUTOĞULLARI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
ABSTRACT **15**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **3**
2.1. PATENT ARAŞTIRMASI ÖZETİ 3
2.2. DAHA ÖNCE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR 8
2.3. FDM'LERİN BİNA UYGULAMALARI 13
2.4. ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ 20
2.4.1. Mekaniksel Enerji Depolama 20
2.4.2. Elektriksel Enerji Depolama 21
2.4.3. Kimyasal Enerji Depolama 21
2.4.4. Isıl (Termal) Enerji Depolama 22
2.5. KATI-SIVI FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEMELER 25
2.5.1. Faz Değişim Teorisi 25
2.5.2. Katı-Sıvı Faz Değiştirici Maddelerin Sınıflandırılması 28
2.6. FDM'LERİN KAPSÜLLENMESİ 36
2.6.1. Organik Kabuklar 37
2.6.2. İnorganik Kabuklar 37
2.6.3. Organik-İnorganik Hibrit Kabuklar 38
2.7. MİKROENKAPSÜLASYON YÖNTEMLERİ 39
2.7.1. Kompleks Koaservasyon Yöntemi 41
3. YÖNTEM **43**

3.1. MATERYAL 43
3.2. KULLANILAN DENEY CİHAZLARI 44
3.3. KULLANILAN KARAKTERİZASYON CİHAZLARI 44
3.4. PROSES AKIŞ ŞEMASI 45
3.5. FDM MİKROENKAPSÜLASYONU 46
3.5.1. Deney-1, Deney-2 ve Deney-3 Prosedürü 46
3.5.2. Deney-4 ve Deney-5 Prosedürü 47
4. BULGULAR 50
4.1. Deney-1 Karakterizasyon Testleri 50
4.1.1. Deney-1 FT-IR Analizi Sonucu 50
4.2. Deney-2 Karakterizasyon Testleri 53
4.2.1. Deney-2 FT-IR Analizi Sonucu 53
4.3. Deney-3 Karakterizasyon Testleri 55
4.3.1. Deney-3 FT-IR Analizi Sonucu 55
4.4. Deney-4 Karakterizasyon Testleri 58
4.4.1. Deney-4 FT-IR Analizi Sonucu 58
4.4.2. Deney-4 Stereo Mikroskop İncelemesi 60
4.4.3. Deney-4 DSC Analizi Sonucu 61
4.4.4. Deney-4 TGA Analizi Sonucu 62
4.5. Deney-5 Karakterizasyon Testleri 64
4.5.1. Deney-5 FT-IR Analizi Sonucu 64
4.5.2. Deney-5 Stereo Mikroskop İncelemesi 67
4.5.3. Deney-5 DSC Analizi Sonucu 67
4.5.4. Deney-5 TGA Analizi Sonucu 69
5. TARTIŞMA 72
5.1. Deney-1 72
5.2. Deney-2 72
5.3. Deney-3 72
5.4. Deney-4 72
5.5. Deney-5 73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKLAR 78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Alçı sıva içindeki mikro-kapsüllenmiş FDM'lerin görüntüsü (alçı kristalleri arasında ortalama çapı 8 μm olan FDM mikro-kapsülleri) (P.Schossig, 2005) 12

Şekil 2.2. ThermalCORE faz değişimli alçıpan (National Gypsum Services Company, 2021). 13

Şekil 2.3. Çeşitli FDM entegre bina yüzey formları ve etkileri (Haghighat, 2015). 15

Şekil 2.4. Faz değiştiren malzemelerinin binalarda pasif uygulamaları (Yantong Li, 2020)... 17

Şekil 2.5.Termal enerji depolamanın iki yöntemi (a) sıcaklığı doğrusal olarak yükselten duyulur ısı (b) sıcaklığını yükseltmeden durumunu değiştiren gizli ısı (Eklas Hossain, 2020) 24

Şekil 2.6. FDM faz dönüşüm teorisi (Parashtmr weebly, 2021). 26

Şekil 2.7. FDM'nin çalışma prensibi (Climator, 2021). 26

Şekil 2.8. Erime-Katılaşma (Fleischer, 2015). 27

Şekil 2.9. Süper soğuma. 27

Şekil 2.10. Faz ayırışımı. 27

Şekil 2.11. Termal enerji depolama malzeme sınıfları (Abhat, 1983). 29

Şekil 2.12 Termal enerji depolayabilen FDM'ler. 30

Şekil 2.13. Mikrokapsül kabuk malzemelerinin sınıflandırılması. 37

Şekil 2.14. Farklı türdeki mikrokapsüllerin yapıları. 39

Şekil 2.15. Mikrokapsül Örneği: Parafin Çekirdek ve Polimer Duvar. 40

Şekil 2.16. Mikrokapsül üretim yöntemleri. 41

Şekil 3.1 Mikrokapsülleme prosesi akış şeması. 45

Şekil 3.2. Deney proses görselleri. 49

Şekil 4.1.Parafin mumuna ait FT-IR analiz sonucu. 50

Şekil 4.2. Jelatine ait FT-IR analiz sonucu. 51

Şekil 4.3. Arap zamkına ait FT-IR analiz sonucu. 52

Şekil 4.4. Deney-1'e ait FT-IR analiz sonucu. 52

Şekil 4.5. Parafin mumuna ait FT-IR analiz sonucu.....53
Şekil 4.6. Palmitik aside ait FT-IR analiz sonucu. 54
Şekil 4.7. Jelatine ait FT-IR analiz sonucu. 54
Şekil 4.8.Deney-2 numunesine ait FT-IR analiz sonucu. 55
Şekil 4.9. Oktadekana ait FT-IR analiz sonucu. 56
Şekil 4.10. Jelatine ait FT-IR analiz sonucu. 56
Şekil 4.11. Arap zamkına ait FT-IR analiz sonucu.....57
Şekil 4.12. Deney-3 numunesine ait FT-IR analiz sonucu. 57
Şekil 4.13. Kitosana ait FT-IR analizi sonucu. 58
Şekil 4.14. Polivinil alkole ait FT-IR analizi sonucu. 59
Şekil 4.15. Hegzadekena ait FT-IR analizi sonucu. 59
Şekil 4.16. Deney-4 numunesine ait FT-IR analizi sonucu. 60
Şekil 4.17. Deney-4 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsü. 60
Şekil 4.18. Hegzadekana ait DSC analizi sonucu. 61
Şekil 4.19. Deney-4 numunesine ait DSC analizi sonucu. 62
Şekil 4.20. Hegzadekana ait TGA analizi sonucu. 63
Şekil 4.21. Deney-4 numunesine ait TGA analizi sonucu. 64
Şekil 4.22. Kitosana ait FT-IR analizi sonucu. 65
Şekil 4.23. Polivinil alkole ait FT-IR analizi sonucu. 65
Şekil 4.24. Hindistan cevizi yağına ait FT-IR analizi sonucu. 66
Şekil 4.25. Deney-5 numunesine ait FT-IR analizi sonucu. 66
Şekil 4.26. Deney-5 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsü. 67
Şekil 4.27. Hindistan cevizi yağına ait DSC analizi sonucu. 68
Şekil 4.28. Deney-5 numunesine ait DSC analizi sonucu. 69
Şekil 4.29. Hindistan cevizi yağına ait TGA analizi sonucu. 70
Şekil 4.30. Deney-5 numunesine ait TGA analizi sonucu. 71

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1. Patent araştırması. 3

Tablo 2.2.FDM'li tavan, zemin ve duvarlar için temel bir değerlendirme. 17

Tablo 2.3. FDM'li çatı, tavan ve duvar uygulamalarından elde edilen sonuçlar. 18

Tablo 2.4. Isıl depolama amacıyla kullanılabilecek ticari olarak üretilen FDM'ler (Luisa F. Cabeza, 2005). 31

Tablo 2.5. Bazı ticari organik FDM'ler (AhmetSarı, 2004). 32

Tablo 2.6. Organik ve inorganik FDM'lerin karşılaştırması (Ahmed Hassan, 2016)..... 33

Tablo 2.7. Organik ve inorganik FDM'lerin termofiziksel özeliklerinin karşılaştırması. (Ahmed Hassan, 2016) 34

Tablo 2.8. Yağ asidi ötektik karışımlarına ait faz değişim sıcaklıkları ve entalpileri. 35

Tablo 2.9. FDM türlerinin karşılaştırılması (M.İten, 2014), (Tumirah Khadiran, 2016), (Manish K. Rathod, 2013). 35

Tablo 3.1 Deneyde kullanılan materyaller ve kullanım yeri. 43

Tablo 3.2. Deney için kullanılan FDM ve kabuk malzemeleri. 46

Tablo 5.1. Deney sonuçlarının malzeme maliyeti ve performans parametrelerince karşılaştırılması..... 75

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

FDM: Faz değiştiren malzeme
MFDM: Mikrokapsüle edilmiş faz değiştiren malzeme
PVA: Polivinil alkol
FT-IR: Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre
DSC: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
TGA: Termogravimetrik Analiz
EVA: Etil vinil asetat
HDPE: Yüksek yoğunluklu polietilen
SBS: Stiren-bütadien-stiren kopolimeri
LA: Laurik asit
CA: Kaprik asit
ASHRAE: Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği
SHS: Duyulur ısı depolama
LHS: Gizli Isı Depolama
PMMA: Polimetil metakrilat
rpm: Dakikadaki Devir Sayısı

Kısaltmalar **Açıklama**

°C: Santigrat derce
J: Jul
g: Gram
mm: Milimetre
kJ: Kilojul
kg: Kilogram
MPa: MegaPaskal
λ: Isıl iletkenlik
K: Kelvin

C_p: özgül ısı kapasitesi

T: Sıcaklık

Q_s: Depolanan ısı miktarı

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİNA YAPI ELEMANLARINDA KULLANIMA UYGUN FAZ DEĞİŞTİREN MAZLEME DOLGULU MİKROKAPSÜLLERİN SENTEZİ

Esra MİRMAHMUTOĞULLARI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı

Mühendislik Bilimleri Programı

Danışman : Doç. Dr. Gökhan ÇAYLI

II. Danışman : Doç. Dr. Aliihsan KOCA

Binaların işletme aşamasındaki enerji verimliliğinin iyileştirilmesi, aktif bir araştırma alanıdır. Enerji tüketiminin azaltılması ve enerji tasarrufunun iyileştirilmesi, enerji verimliliğini teşvik etmek ve binaların sürdürülebilirliği gün geçtikçe önem kazanan konulardır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, enerji arz ve talebinin verimli bir şekilde eşleştirilmesine katkıda bulunması hedeflenmektedir. Piyasalar, binaların fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak için kullanılabilecek, termal enerji depolama sistemleri gibi yeni teknolojiler aramaktadır.

Termal enerjiyi depolamanın en etkili yolu faz değiştiren malzemeleri (FDM'ler) kullanılması ile gerçekleşen gizli ısı depolama yöntemidir. Gizli ısıyı depolamak, yüksek enerjili bir depolama sağlar. Mikrokapsüle edilmiş faz değiştiren malzemeler (MFDM)'ler iklimlendirme sistemlerinin ve yapıların ısıtma-soğutma maliyetini enerjiden tasarruf sağlayarak azaltmaktadır. Mikro kapsülleme, yalnızca kendi kendini destekleyen bir FDM yapısı sağlamakla kalmaz aynı zamanda çekirdek maddeyi termik akışkanlardan ayırır ve ısı transfer oranını arttırır.

Mevcut çalışma, katı-sıvı faz değişiminden yararlanarak düşük maliyetli kapsüllemenin çeşitli kavramlarının incelenmesini içerir. Buna yönelik, maliyet, termal depolama kapasitesi ve proses hızı parametrelerince optimize bir proses üzerinde çalışılmış ve yapılan deneyler

arasında en verimli (kapsüllenme verimliliği) MFDM kapsülü belirlenmiştir. 5 ayrı deney gerçekleştirilmiş olup FDM olarak, organik FDM'lerden; parafin mumu, parafin mumu ile palmitik asit, hegzadekan, oktadekan ve hindistan cevizi yağıyla çalışılmıştır. Kabuk malzemesi olarak, arap zamkı ile jelatin, kitosan ile PVA (polivinil alkol) kabuklarıyla çalışılmıştır.

Elde edilen MFDM'lere (Deney-1 numunesi, Deney-2 numunesi, Deney-3 numunesi, Deney-4 numunesi ve Deney-5 numunesi) karakterizasyon testleri uygulanmıştır. Numunelerin tümüne, mikrokapsüllerin duvar oluşumu ve çekirdek madde varlığının tespit edilebilmesi için FT-IR (Fouirer Transform Infrared Spektrofotometresi) analizi yapılmıştır. İlk 3 deneye ait numunenin kapsüllenmediği görülmüştür. Deney-4 ve Deney-5 numunelerinin FT-IR sonuçları ve bunu destekleyen Stereo mikroskop, DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) ve TGA (Termogravimetrik Analiz) analizlerine göre kapsüllenme başarıyla gerçekleşmiştir. Yapılan tüm bu analiz sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen Deney-4'e ait MFDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin 95,0023 J/g mikrokapsülleme oranının ise %44,7 olduğu görülmüştür. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen Deney-5'e ait MFDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin 59,64 J/g mikrokapsüllenme oranının ise %72 olduğu görülmüştür.

Yapılan deneylerde maliyet, erime sıcaklığı, entalpi ve kapsüllenme verimliliği gibi ticari ürün vasfı taşıyan bir ürün elde edilmesi için önem arz eden parametrelere dikkat edilmiştir.

Çalışmanın yüksek enerji performanslı sürdürülebilir konutların ve iklimlendirme sistemlerinin geliştirilmesine olumlu katkı sağlayacağı görülmektedir.

Haziran 2022 , 103 sayfa.

Anahtar kelimeler: termal enerji depolama, faz değiştiren malzemeler, mikrokapsülleme, mikroenkapsülasyon

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

SYNTHESIS OF PHASE CHANGING FILLED MICROCAPSULES SUITABLE FOR USE IN BUILDING CONSTRUCTION ELEMENTS

Esra MİRMAHMUTOĞULLARI

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Engineering Sciences

Engineering Sciences

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan ÇAYLI

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aliihsan KOCA

It is an active research area for planning the operation of buildings. Developments in energy consumption.

Renewable energy sources are aimed to contribute to the efficient matching of energy supply and demand. Markets are looking for new technologies, such as thermal energy storage systems, that can be used to reduce buildings' dependence on fossil fuels.

The most effective way to store thermal energy is the latent heat storage method using phase change materials (PCMs). Storing latent heat provides high-energy storage. Microencapsulated phase change materials (MPCM) reduce the heating-cooling cost of air conditioning systems and buildings by saving energy. Micro-encapsulation not only provides a self-supporting PCM structure, but also separates the core material from thermal fluids and increases the heat transfer rate.

The current work includes examining various concepts of low-cost encapsulation by utilizing solid-liquid phase change. For this purpose, an optimized process was studied in terms of cost, thermal storage capacity and process speed parameters, and the most efficient (encapsulation efficiency) MPCM capsule was determined among the experiments. 5 separate experiments were carried out and as PCM, organic PCMs: paraffin wax, paraffin wax and palmitic acid, hexadecane, octadecane and coconut oil. As shell material, gum arabic and gelatin, chitosan and PVA (polyvinyl alcohol) shells were studied.

Characterization tests were applied to the obtained MPCMs (Experiment-1 sample, Experiment-2 sample, Experiment-3 sample, Experiment-4 sample and Experiment-5 sample). FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) analysis was performed on all samples to determine the wall formation of the microcapsules and the presence of core material. It was observed that the samples of the first 3 experiments were not encapsulated. According to the FT-IR results of Experiment-4 and Experiment-5 samples and the Stereo microscope, DSC (Differential Scanning Calorimetry) and TGA (Thermogravimetric Analysis) analyzes supporting this, encapsulation was successfully achieved. When the results of all these analyzes were evaluated, it was seen that the latent heat storage capacity of the MPCM belonging to the Experiment-4 developed was 95.0023 J/g microencapsulation rate of 44.7%. When the analysis results were evaluated, it was seen that the latent heat storage capacity of the MPCM of Experiment-5 was 59.64 J/g, and the microencapsulation rate was 72%.

In the experiments, attention was paid to the parameters that are important for obtaining a commercial product such as cost, melting temperature, enthalpy and encapsulation efficiency.

It is seen that the study will contribute positively to the development of sustainable houses with high energy performance and air conditioning systems.

June 2022, 103 pages.

Keywords: thermal energy storage, phase change materials, microencapsulation

1. GİRİŞ

Günümüzde, binaların işletme aşamasındaki enerji performanslarının iyileştirilmesi, bölgesel, ulusal ve uluslararası düzeylerde enerji politikası için temel bir hedeftir. Enerji tüketimimizin %40'ının bina kaynaklı olup bu oranın %85'i ısıtmada kullanılmaktadır. Bu durum yapılarda enerji verimliliğine verilmesi gereken önemi açıkça vurgulamaktadır (Y.P. Zhang, 2006).

Enerji depolama teknolojisi enerji gereksinimi olan alanlarda ortaya çıkan kullanılmayan (atık) enerjinin depolanması ve yalnız sınırlı zaman aralığında enerji ihtiyacını karşılayabilen yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjiyi depolanmasıdır. Enerjinin eldesi ile enerjiye duyulan ihtiyaç arasında doğabilecek farkın azaltılmasını hedeflemektedir. Ülkemizde ve diğer ülkelerde enerji kaynakları sınırlıdır. Bu sınırlı kaynakların gün geçtikçe tükenmesiyle yenilenebilir enerji kaynakları ve üretilmiş enerjinin depolanması kritik önem arz eden konular arasında sınıflandırılmaktadır (Mehmet Kozak, 2012).

Ülkemiz enerjisinin %70'ini dışa bağımlı olarak karşılamaktadır. Günümüzde, sürdürülebilir olmayan yakıtlara dair bağımlılıklarımız devletler nezdinde azaltılmaya çalışılmaktadır. Enerji kayıplarının düşürülerek enerjinin daha verimli kullanılması, karbon emisyonları ile hava kirlilik oranlarını da azaltarak sürdürebilirliğe önemli destek vermektedir. Enerji, ülkelerin sosyal ve ekonomik olarak gelişiminde bununla bağlantılı olarak toplumda refahın artmasında vazgeçilemeyecek bir etkendir.

Yönetmelikler ısıtma ve soğutma enerjisi giderlerinin düşürülmesine yönelik çeşitli uygulamaların gerçekleştirilmesini mecburi kılmıştır. Bu tez çalışmasının da amaçlarından biri olan, yapıların ısıl depolama yeteneklerinin yükseltilmesi ve yapıların enerji kullanımında oluşan pik yüklere dair tasarrufların maksimize edilmesi gerekmektedir. En önemlisi sağlıklı ve uzun bir yaşam için yapılarımızda, konutlarımızda ısıl konfor şartları uzun süreler korunabilmelidir. Tüm bunlar enerji performansı yüksek, sürdürülebilir yapıların ve bu yapılarda yer alacak anlamlı iklimlendirme sistemlerinin geliştirilmesinin önemini açıkça gözler önüne sermektedir (Esra Mirmahmutoğulları, 2022).

Binalarda yapılan gizli ısının depolanması içerikli uygulamalar, kışın soğuktan yazın ise sıcaktan korunmayı hedeflemektedir. Uygulanan faz değiştiren malzeme ile hayat standartları artmaktadır. Ülkemiz ve dünyamız için en kritik konu olan enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Yapıların iç ortam sıcaklığı, ısıtma, havalandırma, klima yani tüm bunları içeren kavram olarak iklimlendirme önemli konfor koşullarından biridir.

Yapılarda faz değiştiren malzeme kullanılmasına itici güç oluşturan nedenler: İklimlendirme sistemlerinde, enerji ve yakıt giderlerini azaltmak, kış ya da yaz iklim şartlarında gerekli termal konfor şartlarını sağlamak, artan verimlilik sayesinde daha düşük kapasiteli iklimlendirme cihazları kullanarak enerji masraflarını azaltmak, fosil yakıtların kullanım seviyesinin düşürülmesiyle atmosferdeki CO_2 ve metan emisyonlarını azaltarak, küresel ısınmayı önlemek ve canlı organizmalar ve bunların çevreleri ile arasındaki dengeyi korumaktır. Mevcut enerjiyi daha verimli kullanmak ve ortamın termal konforunu arttırmak amacıyla FDM'lerin kullanımı önem kazanmaktadır. Kısa süreli ya da sezonsal enerji depolamada faz değiştiren malzeme kullanımı oldukça yaygındır. FDM'ler doğrudan veya mikrokapsüllenmiş ya da makrokapsüllenmiş halde kullanılabilirler. FDM kapsülasyonunda amaç, malzemenin duvar malzemesi (kapsül) içinde kalarak faz değişimini bu duvar içerisinde gerçekleştirmesidir. Kapsüle edilmiş faz değiştiren malzemenin kullanımı ile hem çekirdek malzeme korunmuş olmakta hem de ısı transferi açısından yüzey alanı artacağından yüksek verim elde edilmesi için daha elverişli bir ortam oluşmaktadır.

Tez çalışmasında, FDM mikrokapsülleme prosesi ve yapılarda kullanıma uygun mikrokapsüllü FDM numunesi geliştirilmiştir. 5 ayrı deney gerçekleştirilmiş olup, elde edilen deney numunelerinin malzeme maliyeti ve performans parametreleri belirlenmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. PATENT ARAŞTIRMASI ÖZETİ

Yapı elemanlarına uygun mikrokapsüllü faz değiştiren malzeme (MFDM) sentezlenmesi ve yapı elemanlarına uygulanmasına yönelik patent araştırması Tablo 1.'de yer almaktadır.

Tablo 2.1. Patent araştırması.

KAYNAK	ÖZET BİLGİ
(Çin Patent No. CN106046229A, 2016)	Buluş ile bir yağ fazı bileşeni ve bir sulu faz bileşeni içeren faz değişim mikro küresi elde edilmiştir. Yağ fazı bileşeni ve sulu faz çözeltisi, süspansiyon polimerizasyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Burada yağ fazı bileşeni, çözeltinin kütle olarak %20-70'ini oluşturmaktadır. Yağ fazı bileşeni kütlece %10-60 oranında yağda çözünür. Monomerlerden, %1-50 'si faz değişim malzemesinden ve %0,1-5 yağda çözünür başlatıcıdan hazırlanmıştır. Sulu faz bileşeni su içermektedir. Süspansiyon polimerizasyon yöntemi ile hazırlanan faz değişim mikroküresi, faz değişim materyali ile makromoleküllerin çapraz bağlanmasıyla oluşturulmuştur.
(İspanya Patent No. ES2306624B1, 2009)	Buluş, püskürtmeli kurutma yöntemi ile faz değiştiren malzemelerin mikro kapsüllenmesi prosedürüdür. FDM'ler kapsül olarak polimer çözeltileri, daha spesifik kopolimer olarak polietilen ve etil vinil asetat (EVA) ile kapsüllenmiştir.
(United States Patent No. US10485739B2, 2019)	Buluşta, mikro kapsüllerinin hazırlanmasında ilk adım olarak, polivinil alkolün (PVA) 85°C'de 30 dakika deiyonize suda çözülmesiyle %5'lik bir PVA 523 stok solüsyonu hazırlanmıştır. Daha sonra, bir ana reaktörde suyun stok PVA çözeltisi ile birleştirilmesi, karıştırılması, sıcaklığın yükseltilmesi ve 55°C'de tutulmasıyla birinci su fazı bileşeni hazırlanmıştır. Ardından, ikinci su fazı bileşeni hazırlanmıştır. Stok PVA çözeltisi ortam sıcaklığında bir karıştırma tankında su ile birleştirilmiş ve karıştırılmıştır. Daha sonra, SR247 eklenmiş ve stok PVA/su çözeltisi içinde bir süspansiyon oluşturmak üzere

	yüksek hızda karıştırılmıştır. Çekirdek faz bileşimi, önce Polywax™ M90 mumunun oktadekan içinde 70°C'de 10 dakika eritilmesi ve ardından SR206 monomerinin eklenmesiyle karıştırılarak hazırlanmıştır. Karışım 55°C'ye soğutulmuş ve yağda çözünür başlatıcılar eklenmiştir. Sıcaklık 30 dakika süreyle 55°C'de tutulmuştur. Kapsülleme işleminin hazırlanmasında, ana reaktör saf nitrojen ile temizlenmiştir. Ardından çekirdek faz bileşimi eklenmiştir. İstenen damlacık boyutu elde edilene kadar prosedür devam etmiştir. Daha sonra, ikinci su fazı bileşeni (WP2) ana reaktöre ilave edilmiş ve karışımın sıcaklığı 30 dakikalık bir süre içinde 75°C'ye yükseltilmiştir. Bu sıcaklıkta ilave 4 saat süreyle çözelti bekletilmiştir. Bundan sonra, sıcaklık 30 dakikalık bir süre içinde 85°C'ye yükseltilmiş ve bu sıcaklıkta ilave 6 saat bekletilmiştir. Bu işlemin ardından reaktör karışımının, istenen mikrokapsüllerden oluşan bir çözelti ortam sıcaklığına kadar soğutulmuştur.
(United States Patent No. US20100087115A1, 2010)	Buluş, faz değiştiren malzeme özellikli çekirdek içeren ve çekirdeği içine alan aleve dayanıklı bir duvar malzemesidir. Mikrokapsüller, aşağıdakilerden en az birini içerir: duvar malzemesine uygulanan bir alev geciktirici, alev direnci sağlamak için yaklaşık 230°C ila yaklaşık 420°C arasında bir kaynama noktasına sahip olan malzeme. Bu faz değişim malzemelerinin kaynama noktası yaklaşık 280°C ila yaklaşık 400°C veya yaklaşık 300°C ila yaklaşık 390°C'dir.
(Çin Patent No. CN101437854B, 2012)	Buluş, faz değiştiren malzemelerin mikrokapsüllenmesi için aşağıdakileri içeren serbest radikal polimerizasyonuna dayalıdır: a) i- en azından bir hidrofilik sıvı ve bir stabilizatör (sürekli) içeren çözeltinin hazırlanması ve ii- a ile bir çözelti oluşturan faz değiştiren malzeme, serbest radikal başlatıcı ve polimerize olabilen bir malzeme (süreksiz faz); b) süreksiz olanı dağıtarak bir emülsiyonun hazırlanması için faz sürekli kuvvetli karıştırma altındadır

	c) monomerlerin polimerizasyonu,ile faz değiştiren malzeme mikrokapsüllü hale gelir. Bu işlem basit ve etkilidir ve tehlikeli bileşiklerin kullanımını önler. Buluş, aynı zamanda, elde edilen mikrokapsüller ile de ilgilidir. Bu mikro kapsüllerin termal koruma ve ısının depolanmasında kullanılmasını da kapsamıştır.
(European Patent Office Patent No. EP2806771B1, 2016)	Katı köpük beton açık ve kapalı hücreli olarak ikiye ayrılır. Kapalı hücreli köpüklerin özel bir sınıfı sentetik köpük, bir matris malzemesine gömülü içi boş parçacıklar içermektedir. Başka bir sentetik türden köpük beton ise şekil hafızalı reçine ve jel malzeme içeren sentetik köpük betondur. Jeller, kararlı halde iken çok az akış sergileyen veya hiç akış göstermeyen, büyük ölçüde seyreltik çapraz bağlı sistemler olarak tanımlanır. Bu patent çalışmasında, köpük betona jel katkısının yanında ek olarak faz değiştiren malzeme de eklenmiştir. FDM sıcaklık kontrolü için ince bir katman halinde uygulanmıştır. FDM substrat yapışma için bir polimerle karıştırılır ve FDM mikro kapsülleme sağlanır. Bu işlemler dizini köpük yatak yapımında kullanılan geliştirilmiş prosesler bütünüdür. Ek olarak, üst katmanlardan en az biri köpükte, yani köpüğün hücresel yapısına entegre edilmiş bir jel malzemeye sahiptir. Daha ayrıntılı olarak açıklandığı gibi, sıcaklık kontrol katkı maddesi tercihen, örneğin paketlenmiş veya mikro-kapsüller veya mikro küreler içinde yer alan ve köpük malzemeye uygulanan veya başka bir şekilde köpük malzeme ile entegre olan bir faz değişim malzemesi biçimindedir. Parafinik mum, arzu edilen bir erime sıcaklığına veya aralığına sahip olacak şekilde seçilebilir veya karıştırılabilir. Mikroküreler için polimer, köpük malzeme ile uyumuna uygun olarak seçilir. Tarif edilen şilte uygulamaları ve yapıları için, tercih edilen bir FDM, Outlast Technologies, Inc.'den ticari olarak temin edilmekte ve 28-32 derece ^{0}C olan bir faz geçiş sıcaklık aralığına sahiptir.

(Çin Patent No. CN107062474A, 2017)	Bu patentte, enerji tüketimi neredeyse sıfır bir evin bir duvarının dekoratif olarak inşa edilmesi ve ısı kaybı göz önünde bulundurularak duvar tasarımının değişmesi hakkında bilgi verilmektedir. Duvar elemanlarında cam perde duvarın iç yüzüne yerleştirilmiş bitki duvarı bulunmaktadır. Cam perde duvarın hemen altında omurga sedesi bulunur. İç tarafta boşluk ve boşluğu dolduran bir omurga sedesi yer almaktadır. Bitki duvarının hemen altına faz değiştirme enerjisini depolama plakası yer almaktadır. Faz dönüşüm enerji depolama tankı ise omurga sedesinin ve bitki sedesinin arasında yer almaktadır. Bu elemanlar " bitki gövdesi" olarak adlandırılmakta, ısı yalıtım malzemesi ve tuğladan oluşan bina gövdesine oturtulmaktadır. Faz değişim malzemesi olarak parafin kullanılmaktadır ve parafine ek olarak %5-10 parafin grafen ve karbon fiber pres eklenmiştir.
(United States Patent No. US9784509B2, 2017)	Bu patentte, bir mahali ısıtmak için termal kütleden yararlanılmıştır. Termal kütle, içerisinde radyant boruların bulunduğu ve beton malzemesinde mikro kapsüllü faz değiştiren malzeme bulunduran bir duvardır. Patentte, radyant borulara sıcak su taşıyan ısı değiştiricisi, ısıyı jeotermal enerjiden -yeraltındaki sıcak su kaynağından- almaktadır. Isınan su radyant borulara giderek termal kütleyi ısıtır. Isı değiştiricisinde soğuyan jeotermal su da tekrar kaynağına- yeraltına- gönderilmiştir.
(Japan Patent No. JP2013537270A, 2013)	Dış hava şartlarına dayanıklı dış duvar yapı malzemeleri kullanımı ısı transferinde etkili bir rol oynamaktadır. Bu patentte yapı elemanlarının kombinasyonu oluşturulmuş ve duvar katmanları binada kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. İlk tabaka seramik kaplama ahşap katman, ikinci tabaka bir metalle çerçevelenmiş ve faz değiştiren malzeme ile şekillendirilen ısı yalıtım malzemesi, orta katmanda hava tabakası, hava ile dolu dış ortam, son katmanda ise metalle çevrili hava koşullarına dayanıklı dış yapı malzemesi bulunmaktadır.
(United States Patent No.	Bu patentte akıllı ev uygulamasının bir örneği açıklanmaktadır. Akıllı ızgara karo döşeme ve tavan

US9566608B2, 2017)	panelleri, pencere ve akıllı yapı malzemelerinin kullanıldığı bu ev tasarımında faz değiştiren malzemeleri kullanılarak ısı depolaması planlanmıştır. Patentte belirtildiği gibi tavan ve zemin karosu hava dağıtım panellerinden oluşmaktadır. Karo yüzeylerine faz değiştiren malzeme püskürtülerek bir katman oluşturulmuş ve bu katman ısı kayıp hızını düşürmüştür. Kullanılan faz değişim malzemesi, çok bileşenli elyafın ham hali ile poliolefin malzemesinin karışımına eklenerek uygulanmıştır.
(Spain Patent No. ES1184908U, 2017)	Prefabrik konut modülünde çok fonksiyonlu, enerjiyi kendi üreten ve arıtma ekipmanları içeren elemanlar ve biyoklimatik kitler mevcuttur. Bu kitlerin tabana oturtulması için konut tabanına tek yönlü bir ızgara döşendikten sonra üzerine prefabrik beton dökülmektedir. Zemin katta kompozit plakalar mevcuttur. Onun üzerine çıtalar, kirişler, iskele ve destekler oturtulur. Ardından polipropilen küvetten oluşan bir kapak ve çok katmanlı prefabrik paneller yer alır. Hava odası ve faz değiştiren malzemeli alçıpan panellerinin iç astar olarak kullanıldığı bir katman eklenmiştir.
(China Patent No. CN109539602A, 2020)	Patent, yaz aylarında ortamı soğutabilmek için faz değişim malzemeli plakaya gömülü olan radyant sistem borularının çatıya eklenen radyant soğutucuya bağlanmasıdır. Suyun sirkülasyonu için bir sirkülasyon pompası ve tesisat düzeneği hazırlanmıştır. Aynı düzenek yardımı ile kış aylarında ise güneş kolektörü ile ısınan sıcak su radyant borular transfer edilerek mahal ısıtmasında kullanılmıştır. Faz değişim malzemesinin kışın güneşten borulara gelen sıcak su sayesinde bir miktar enerjiyi depolayarak ortam ısınma süresini uzatması sağlanmıştır. Aynı şekilde yazın çatıya konulan radyant soğutucu sayesinde borulardaki soğuk sudan dolayı soğuyan FDM plakası ortamı soğutma süresini artıracaktır. Duvar elemanları ise dıştan içe şu şekildedir: ısı yalıtım malzemesi, metal, ahşap, faz değişim malzemeli plaka ve FDM plakasının içine gömülü radyant borular.

(European Patent Office Patent No. EP1649221B1, 2007)	Bu patentte, güneş kolektörünün altına faz değişim malzemesi içeren bir duvar katmanı eklenerek duvara monte edilebilir bir yapı oluşturulmuştur. Duvarın dış tarafına eklenen bu katman dışarıdan içeriye doğru sırasıyla saydam bir katman, hava boşluğu, güneş radyasyonu emme katmanı, faz değişim malzemeli katman ve ısı yalıtım katmanı içerir. Bu yöntem ile ortam ısıtmasının doğrudan sağlanması hedeflenmiştir; borulama, ısı depolama tankı, dağıtım sistemi ve sirkülasyon pompası olmadan duvardan kontrollü ısı kazancı alınmaya çalışılmıştır.
(China Patent No. CN105570973A, 2016)	Patent, güneş enerjisi kullanan iç duvar termal ısıtma sistemi, bir güneş enerjisi ısı kolektörünün, faz değişim malzemeli katmanlarına gömülü bir dolaşım borusu ile bir yalıtım sirkülasyon borusu vasıtasıyla mahal ısıtmasını açıklamıştır.

2.2. DAHA ÖNCE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

M. Hunger (2009) çalışmasında, polimetil metakrilat mikrokapsüllerin içine gömülü parafinden elde edilen FDM kullanılmıştır. Mermer tozu içeren, mikrokapsüllenmiş FDM'li 3 ayrı beton arasında kıyaslama yapılmıştır. Isıl iletkenlik CT-METRE ile, özgül ısı sığası Diferansiyel Taramalı Kalorimetre ile mikro-yapısal analizi ise SEM Mikrografı ile ölçülmüştür. Karşılaştırmalarda beton karışımlarının ısıl iletkenliği azalırken, ısıl kapasitenin arttığı fakat mekanik dayanımın dramatik olarak düştüğü gözlemlenmiştir.

Beyza BEYHAN (2015)**,** yaptıkları çalışmada bina konfor sıcaklıklarına uygun aynı zamanda bina yapı malzemelerinde kullanılabilecek, mikro enkapsüle edilmiş FDM sentezlemişlerdir. Çalışma kapsamında yaptıkları test kulübelerinde kullanmak için yağ asidi karışımı içeren faz değiştiren malzeme kullanmışlardır. Bu karışımı mikrokapsüle ederek gizli ısı değeri 97,8 J/g olan mikrokapsül sentezlemişlerdir. Gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskobu analizlerinde (SEM) mikrokapsüllerin boyutlarının 250-480 nm arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Beton harcı içerisine eklenen MFDM'ler küresel görünümünü devam ettirmiştir. Mikroküreciklerin beton içerisinde homojen dağıldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca

mikrokapsüllerin kabuk bölümünün zarar görmeden işlevini gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir.

Y.P.Zhang (2006) faz değiştiren malzemelerin bina uygulamalarına dair yaptığı bir çalışmada, parafin olarak erime noktası 20,30 ^{0}C bir malzeme kullanmıştır. İlk olarak parafinin DSC analizi ile gizli ısı kapasitesini belirlemiştir. Ardından bu parafine yüksek yoğunluklu polietilen (high density polyethylene; HDPE) ve stiren-bütadien-stiren kopolimeri (styrene–butadiene–styrene copolymer; SBS) ve çeşitli kil türleri eklenmiştir. Çalışmasında kullandığı katkı maddelerinin erime noktasına ve gizli ısı kapasitesine etkilerini incelemiştir. İncelenen sonuçlara göre, eklenen SBS erime noktasında büyük bir farklılığa sebep olmazken, gizli ısı kapasitesinde düşüş gerçekleşmiştir. Erime sıcaklığı ile gizli ısı kapasitesinde HDPE'nin eklenmesi ile buna bağlı bir artış gözlemlenmiştir. HDPE kullanılan parafinin sertleşmesini sağlamıştır. Grafit ile de termal iletkenliğin arttırılması, SBS ile de erime sırasındaki stabilite arttırılmaya çalışılmıştır.

Yapılan çalışmada Lv Shilei (2007), ergime sıcaklığı 44 °C olan Laurik asit (Lauric Acid; LA)'tin %65: %35; ergime sıcaklığı 31,4 ^{0}C olan Kaprik asit (Capric Acid; CA) LA: CA ötektik karışımları yapılmış ve ergime sıcaklığı 19,6 °C olan ötektik bir karışım hazırlanmıştır. Elde edilen bu karışım alçıtaşı ile karıştırılarak 150 mm x l50 mm x 9,5 mm'lik bir duvar numunesi üretilmiştir. Deney sonucu oluşan numuneye 120,240,360 termal çevrim yaşamıştır. Numuneye diferansiyel taramalı kalorimetre analizleri yapılmış ve termal çevrimin gizli ısı kapasitesine olan efekti gözlemlenmiştir. Ergime sıcaklığında ve gizli ısı kapasitesinde anlamlı bir değişim gözlemlenmeyen LA:CA karışımının yapılarda uygulanması için olumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

ÖZONUR (2003) yapmış olduğu çalışmada, enerji depolamada, ısıl enerjinin depolaması yöntemlerinden kompleks koaservasyon metodu ile mikrokapsül çekirdek malzeme olarak parafin ile hazırlamışlardır. Çalışma kapsamında enkapsülasyondaki verimliliğe etkisi olan kalemler analiz edilmiştir. Kapsülün ölçülerini etkileyen etkenlerin, dış duvar materyallerinin sıcaklığı, karıştırma hızı ve süresi olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen numunelerin erime-katılaşma döngüsü boyunca yapısında fiziksel bir değişim gözlemlenmemiştir. Bunun yanında deneyde yer alan parafinin ve elde edilen parafin mikrokapsüllü numunenin mikroskop görüntüleri incelenmiştir.

Yeliz KONUKLU (2017) yaptıkları çalışmada enerji depolama materyali olarak kullanılabilecek termal enerji depolama uygulamaları için Diyatomit/FDM kompozitleri hazırlamışlardır. Gerçekleştirdikleri taramalı elektron mikroskobu analizleri ile numunelerin başarılı bir şekilde hazırlandığını gözlemlemişlerdir. Yapılan diferansiyel taramalı kalorimetre analizinden elde edilen çıktılar, sentezlenen kompozitlerin ergime ve katılaşma noktasının 41,97°C ve 45,77°C olduğunu göstermiştir. Bunun yanında gizli ısı depolama kapasitesinin +45 ve -44 J/g olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında, hazırlanan numunelerin ısıl enerji depolama malzemesi anlamında kullanım alanı bulabileceği görülmüştür.

HAWLADER (2002) gerçekleştirdikleri çalışmada, kompleks koaservasyon ve sprey kurutma yöntemleri ile elde edilen mikrokapsülleri kıyaslamışlardır. Farklı etkenlerin kapsülasyon verimililiği çalışılmış olup enerjinin depolanması, geri salınma ve gizli ısı kapasiteleri gözlemlenmiştir. Çeşitli oranlarda kullanılmış parafin ve kabuk malzemelerinin enerji depolama ve geri kazanma kapasitelerini inceleyebilmek için diferansiyel taramalı kalorimetre analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda çekirdek materyali olarak kullanılan parafinin oranının artması ile enerji depolama ve enerjinin geri kazanımı ve depolama kapasitesinin arttığı görülmüştür.

Özonur (2004), düşük sıcaklıkta ısıl enerji depolamasına uygun FDM'lerin mikroenkapsülasyonuna yönelik araştırmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada çekirdek materyali için koko yağ asidi ve parafin karışımları vardır. Koko yağ asidi kapsüllerinin 50 erime katılaşma çevrimi sonucunda, kapsül yapısının bozulmamış olduğu erime ve donma noktası aralıklarının değişmediği görülmüştür. Koko yağ asidinin ergime sıcaklığı aralığı 22-24^{0}C olup yapıların izolasyonunda kullanıma elverişli bir malzeme olabileceği sonucuna varılmıştır.

(Yeliz Özonur, 2006) çalışmasında, ısıl enerjinin depolaması amacıyla koko yağ asidinin kompleks koaservasyon metoduyla mikro enkapsülasyonuna dair bir deney gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen analizlerle elde edilen mikrokapsüllerin ısıl ve kimyasal özellikleri yönünden kararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Maria Natalia R. Dimaano (2002), gerçekleştirdiği soğutma üzerine yapılan bir çalışmada %65 kaprik asit ve%35 laurik asitten oluşan bir karışım kullanılmıştır. Bu karışımın erime sıcaklığını (18 °C) biraz daha düşürebilmek için erime noktası 9,9 ^{0}C olan pentadekandan farklı oranlarda eklenerek elde edilen karışımların termal özellikleri DSC analizi ile

incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, %90 kaprik asit laurik asit karışımı ve %10 pentadekandan oluşan kombinasyonun erime noktası 13 ˚C'ye ulaşmıştır. Fakat pentadekanın olumlu düşük erime sıcaklığı ve yüksek gizli ısısına rağmen pahalı bir ürün olmasının tek olarak kullanılmasını zorlaştırmakta olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

D. Kalz (2006)'ın çalışmasında radyant panel/duvar sistemlerinin FDM'ler ile kullanılmasının performansına ve potansiyeline değinilmiştir. Üç ayrı uygulama; i) Şartlandırılmış zemin betonu ii) FDM'li radyant asma tavan iii) radyant FDM'siz asma tavan karşılaştırılmıştır. Yıllık bina enerji simülasyonları yapılan bu üç uygulamada FDM'li sistem diğerlerine göre %20 tasarruf sağlamıştır. Ayrıca en verimli FDM'nin erime donma noktası 21-24 °C arası olan FDM olduğu belirtilmiştir.

R Millers (2019) çalışmasında, adyabatik soğutma koşulları altında farklı kalınlıklarda FDM katkılı levhalar aktif radyant (borulu) ve pasif (borusuz) olarak simüle edilmiştir. Termal olarak aktif FDM katman kalınlığının optimum 25 mm- 90 mm arasında, pasif uygulamada ise 180 mm ve fazlası olduğu tespit edilerek termal depolama kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Önemli bir sonuç olarak FDM'li aktif radyant sistemin termal konfor şartlarını ve süresini uzattığı vurgulanmıştır.

LF Cabeza I. M. (2015), termal depolama sistemlerinin temel fiziksel dinamikleri detaylı bir şekilde açıklanmış, bazı temel faz değiştiren malzemelerin özellikleri sunulmuştur. Özellikle binalarda enerji tasarrufu uygulamalarında FDM'nin yapı elemanlarında nasıl kullanılacağına dair fikirler ve tarifler uygulamalı olarak sunulmuştur.

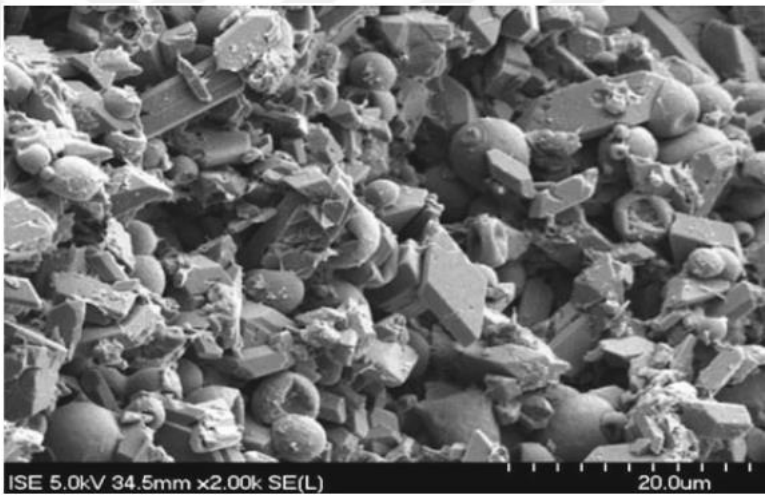
LF Cabeza C. C. (2007), bu çalışmada faz değişim malzemesi (ergime sıcaklığı= 26 °C ve termal depolama entalpisi = 110 kJ/kg) ve beton karıştırılmış levhanın termal performansındaki gelişmeleri saptamak amacıyla testler ve geliştirmeler yapılmıştır. Testin amacı FDM'li betonun karakteristik yapısını kaybetmeden soğutma yükünde yüksek enerji korunumunun binalarda mümkün olduğunu göstermektir. Bu çalışmada FDM'li betonun, sıcaklık ataleti daha yüksek olduğu için standart betondan 2 saat sonra tepe sıcaklığına ulaştığı gözlemlenmiştir.

D Heim (2004)'ün çalışmasında binalarda FDM entegre edilmiş alçı paneller kullanılmasının etkileri 1B bina enerji simülasyonu yazılımı aracılığı ile nümerik olarak hesaplanmıştır. Kullanılan sayısal model efektif ısı kapasitesi esasına göre çalıştırılıp tasarım

doğrulaması yapılmıştır. Sonuç olarak 22 ^{0}C katılaşma ısısına sahip FDM ile ısıtma sezonunda bina enerji talebi %80 azaltılmıştır.

D.Zhou (2012), binalarda FDM kullanılarak termal enerji depolama yapılması çalışmaları ve hali hazırdaki gelinen son durum vurgulamıştır. Bu yayında, yapılan birçok çalışmanın teorik ve deneysel detayları sunulmuş, konu birçok yönden ele alınmıştır (üretim teknikleri, sayısal analizler, yapılan farklı uygulamalar). FDM katkılı iklimlendirme uygulamalarının termal konfor ve enerji tasarrufu açısından önemi vurgulanmıştır.

Mikro-kapsüllenmiş FDM'ler binaların termal enerji depolamasında kullanılmaktadır. Mikro-kapsülleme, FDM partiküllerinin şeklini koruyan ve faz değişim işlemi sırasında FDM'nin sızmasını önleyen ince, kapalı ve yüksek moleküler ağırlıklı polimerik bir film içine alındığı bir teknolojidir (Şekil 2.1)



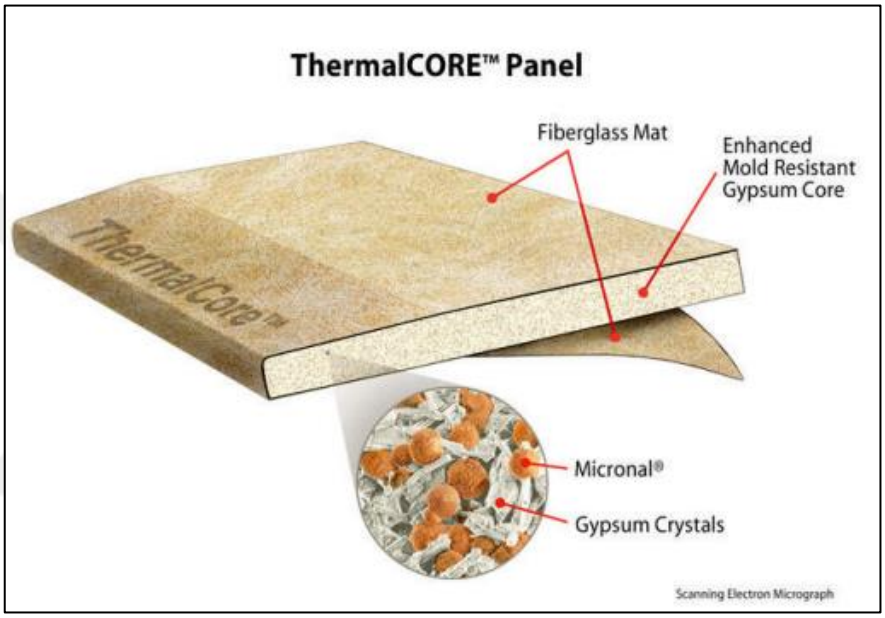
Şekil 2.1. Alçı sıva içindeki mikro-kapsüllenmiş FDM'lerin görüntüsü (alçı kristalleri arasında ortalama çapı 8 µm olan FDM mikro-kapsülleri) (P.Schossig, 2005)

Mikro-kapsüllü FDM'lerin yapı malzemeleri ile entegrasyonunun daha kolay ve ekonomik olduğu değerlendirilmektedir (Kaasinen, 1992). Yapılan bir çalışmada termal analizler neticesinde mikro-kapsüllenmiş parafinin, geometrik profilini ve ısı kapasitesini 1000 döngüden sonra hala koruduğu ortaya konmuştur. Aynı zamanda yaklaşık 145-240 kJ/kg'lık bir termal enerji depolama kapasitesine sahip olduğu ölçülmüştür (M.N.A.Hawlader, 2003).

Dikkat edilmesi gereken önemli hususların başında bina yapılarına dahil edilen mikro kapsüllenmiş FDM'lerin yapının mekanik mukavemetini etkileyebilecek olmasıdır (A.M. Khudhair, 2004). Yapılan bir çalışmada mikro-kapsüllenmiş FDM'lerin kullanıldığı (Mopcon

beton) ve kullanılmadığı aynı şekil ve boyutta iki beton tasarlanmış ve Mopcon betonun 25 MPa'nın üzerinde bir basınç dayanımına ve genel yapısal gereksinimleri karşılayan 6 MPa'ın üzerinde bir gerilme mukavemetine ulaştığı görülmüştür (LF Cabeza C. C., 2007).

Aşağıdaki şekilde National Gypsum adındaki firma tarafından üretilen ve "Termal-CORE Panel"i olarak adlandırılan bir örnek görülmektedir. Elde edilen ürünün kullanılan FDM özelliklerine bağlı olarak ergime noktası ve termal depolama kapasitesi sırasıyla 23 °C ve 22 BTU/ft^2 olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.2. ThermalCORE faz değişimli alçıpan (National Gypsum Services Company, 2021).

2.3. FDM'LERİN BİNA UYGULAMALARI

Binalarda ısıl konfor, yılın mevsimine göre değişen sıcaklıklar ile tanımlanabilir. Aynı zamanda bir ortamda bulunan kişilerin sıcaklık, rutubet (nem), hava akışı gibi iklimsel şartlar yönünden bilişsel ve bedeni aktiviteleri devam ettirirken belirli bir konfor içinde bulunmalarını da ifade eder. ASHRAE (Amerikan Isıtma, Soğutma ve Klima Mühendisleri Derneği), farklı bina türleri ve çevresel koşullar için önerilen sıcaklıkları ve hava akış oranlarını standart olarak belirlemiştir. ASHRAE'ye göre önerilen oda sıcaklığı yazın 23,5–25,5 °C ve kışın 21,0– 23,0 °C arasındadır. Bina uygulamalarında ısıl konfor ihtiyacını karşılamak için 18 - 30 °C arasında faz değişim sıcaklığına sahip FDM'ler tercih edilmektedir.

Bilindiği üzere birçok faktör binaların iç hava sıcaklığını etkilemektedir. Bunlar arasında; iklim koşulları (dış ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, güneş radyasyonu), bina yapısı ve bina malzemesinin termofiziksel özellikleri (duvar kalınlığı, pencerelerin duvar alanına oranı, ısıl iletkenlik ve duvar malzemesinin özgül ısısı), iç mekan ısı kaynağı, saatlik hava değişim oranı ve yardımcı ısıtma/soğutma tesisatları yer almaktadır (Y. Zhang, 2007).

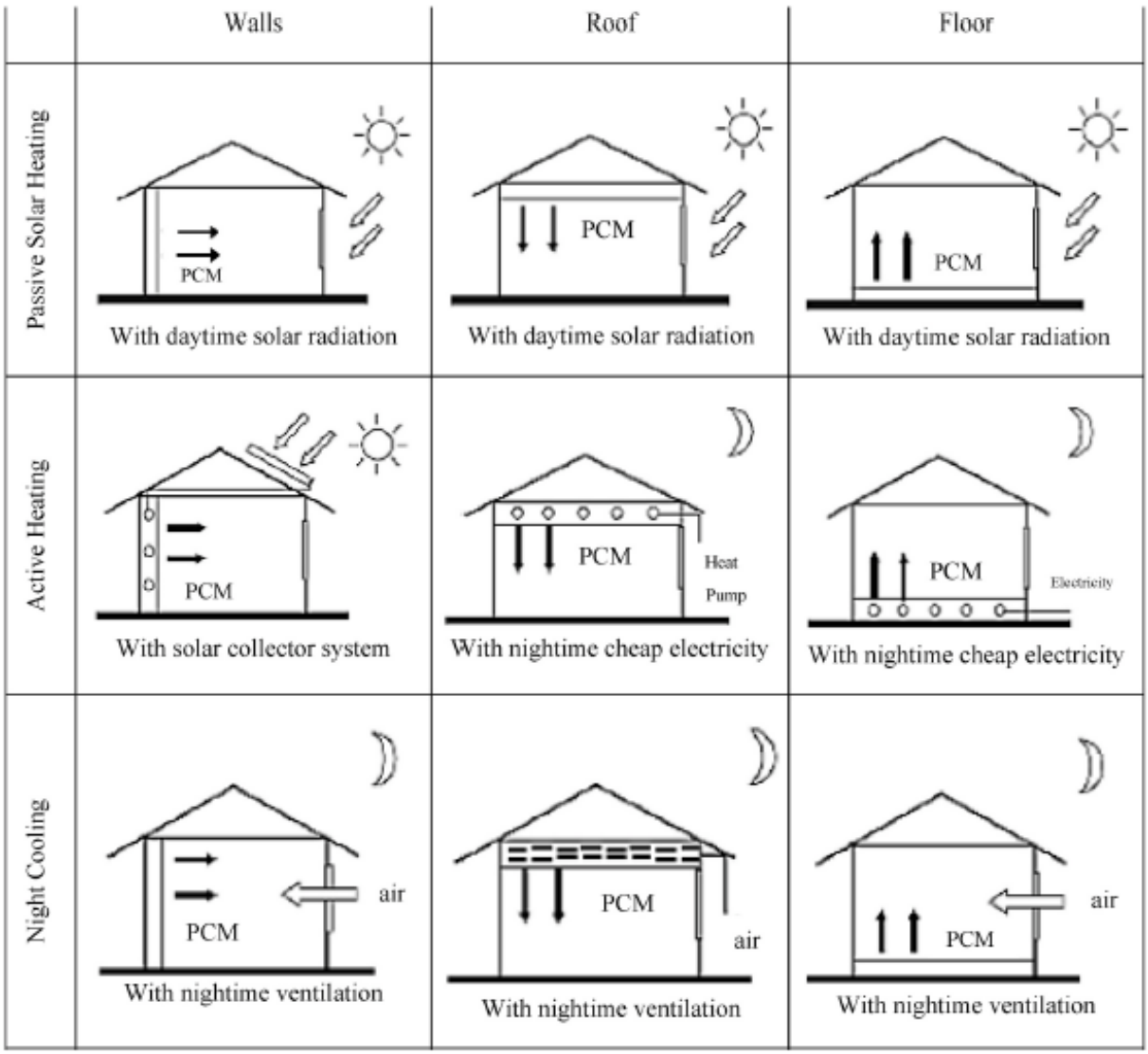
FDM'lere ısı uygulandığında katı fazdan sıvı faza geçerler. Gerçekleşen bu endotermik olayda FDM'ler enerjiyi hapseder. Ortam sıcaklığı yeniden azaldığında, katı faza geçen maddeler ekzotermik olay nedeniyle öncesinde hapsedilen ısıyı verir. Böyle bir faz değişim çevriminde yapı iç sıcaklığını dengeye getirirken soğutma ve ısıtma piklerini düşürür. Bu durum bina kapsülünün termal direncinin etkilenmesiyle gerçekleşmeyip yüzey sıcaklıklarının etkilenmesi ile sağlanır (ARGE YAPI İZOLASYON, 2022).

FDM'lerin bina yapılarında iki temel kullanım amacı vardır. Bunlar gündüz vakti güneşin yaydığı enerjinin kullanılması veya gece boyunca var olan soğuğun soğutma için kullanılmasının yanında ısıtma soğutma ekipmanları gibi ikincil kaynakların veriminin arttırılmasıdır. Temel olarak, bir binayı FDM kullanarak ısıtmanın veya soğutmanın üç farklı yolu vardır;

(i) Yapı duvarlarında FDM'ler
(ii) Diğer yapı bileşenlerinde FDM'ler
(iii) Sıcak ve soğuk depolama bileşenlerinde FDM'ler

İlk iki seçenek, iç veya dış ortam sıcaklığı FDM'nin erime noktasının üzerine çıktığında veya altına düştüğünde depolanan gizli ısı enerjisinin otomatik olarak gerçekleştirildiği pasif sistemlerdir. Üçüncü seçenekte ise, depolanan ısının veya soğuğun yalıtımla ısıl olarak binadan ayrı bir yerde bulunduğu aktif bir sistem söz konusudur. Bu nedenle ısıtma veya soğutma otomatik olarak değil sadece talep üzerine gerçekleştirilir (Haghighat, 2015).

,



Şekil 2.3. Çeşitli FDM entegre bina yüzey formları ve etkileri (Haghighat, 2015).

Binalarda pasif sistem uygulamaları FDM'nin "entegre" ve "bileşen" olarak değerlendirildiği şekilde iki ana kategoriye ayrılabilir. Aralarındaki temel fark, bileşenin bina inşa edilmeden önce üretilebilmesi ve belirli bir tasarıma sahip olmasıdır. Örneğin, entegre FDM'li panjurlar bileşen olarak kabul edilir (K. Biswas, 2014).

Kışın pasif güneş enerjisiyle ısıtma için kullanılan bina yapılarında (duvarlar, çatı veya tavan ve zemin) dahil edilen FDM'ler, hafif bina yapılarının termal kapasitesini artırabilir. Böylece pik ısı yükleri azaltılarak oda sıcaklığı dalgalanması azalmış olur. Binalardaki pasif solar ısıtma, aktif ısıtma ve gece soğutma gibi çeşitli FDM uygulamaları Şekil 2.4'te gösterilmektedir (Y.P. Zhang, 2006).

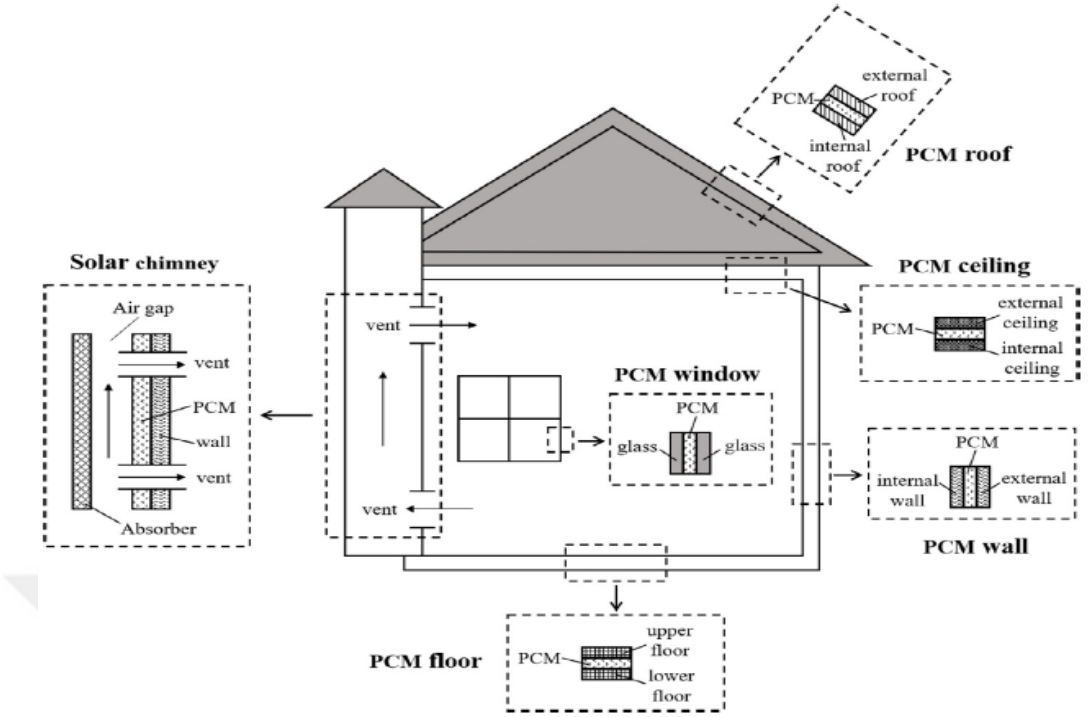
Sonuç olarak, yukarıdaki yöntemlerle, FDM'li duvarlar, FDM'li tavan, elektrik ısıtmalı FDM'li zemin ve gece havalandırması gibi binalarda FDM uygulamaları ile ısıl performansın arttırılmasına yönelik ilerlemeler kaydedilmiştir.

FDM'leri seçerken, faz değişim sıcaklıklarının ortalama oda sıcaklığına yakın olması, gizli ısı ve termal iletkenlik için uygun değerler aranmalıdır. Yanma özellikleri ve uzun vadeli kararlılık gibi özellikler de organik ve inorganik FDM'ler için dikkate alınmalıdır.

FDM'leri yapılara doğrudan dahil etme, daldırma ve kapsülleme yoluyla veya tek bir lamine panel olarak entegre edilebilir. Bu sebeple her bir uygulama kendi içerisindeki avantaj ve dezavantajlarına göre incelenerek değerlendirilebilir.

İncelenen literatürdeki ısıl performans analizleri, FDM kullanılan duvarlar, zemin, tavanın vb. uygulamaların ısıtma ve soğutma yükünün elektriğin yoğun olarak kullanıldığı zamanlardan yoğun olmayan periyotlara kaydırılmasında faydalı olduğu ve güneş radyasyonunun güneşsiz saatlerde kullanılmak üzere depolanmasında etkili olabildiğini göstermektedir.

FDM'lerin bina yapılarındaki pasif kullanımları, Şekil 2.4 'de gösterildiği gibi, temel olarak çatı, tavan, duvar, pencere, zemin ve güneş bacası dahil olmak üzere bina kabuğunun çeşitli bileşenlerinde uygulanabilmektedir. FDM, bina kabuğunun ana bileşenlerinin termal kütlesinin artmasına yardımcı olur ve özellikle yoğun dönemlerde (pik enerji ihtiyacı) dış ortam ile binalar arasındaki ısı transfer etkisinin azalmasını sağlar. Böylece bir binanın en pik zamanlarda yüksek ısıtma veya soğutma yüklerinin azaltılmasına katkı sağlanır (M. Song, 2018). Bu nedenle, oda sıcaklığının bina sakinlerinin termal konfor aralığında tutulmasında etkin bir yöntemdir.



Şekil 2.4. Faz değiştiren malzemelerinin binalarda pasif uygulamaları (Yantong Li, 2020).

Tablo 4'te farklı yapı bileşenlerindeki FDM uygulamalarının temel bir değerlendirmesi yer almaktadır.

Tablo 2.2.FDM'li tavan, zemin ve duvarlar için temel bir değerlendirme.

Yapı bileşeni	**Duvarlar**
Avantajlar	Hafif yapıların termal ataletinin artması; termal konforun arttırılması, ısıtma ve soğutma için bina enerji talebinin azaltılması
Trendler	Tuğla, beton, alçıpan, harç ile FDM entegrasyonu
Dezavantajlar	Tam katılaşmanın olmaması; gizli ısıdan tam olarak yararlanılamaması, düşük gizli ısı
Fırsatlar	Daha sonra kullanım için fazla ısının saklaması; bina enerji talebinin azalması, duvar sıcaklığı dalgalanmalarının azaltılması
Yapı bileşeni	**Tavan ve Zemin**
Faydalar	İç ortam sıcaklıklarında düşük dalgalanmalar; iç mekân termal konforunun sağlanması
Güncel eğilimler	Farklı mevsim ve iklim bölgelerinde uygun FDM'lerin belirlenmesi
Zararlar	Her mevsim aynı verimde çalışmaması; özellikle yaz ve kış aylarında yüksek performans farklarının oluşması
Fırsatlar	Yüksek enerji depolama yoğunlukları; aktif ısıtma/soğutma sisteminin kullanılması durumunda pik elektrik enerjisi taleplerinin önlenmesi

Bina ısıtma uygulamaları için FDM'li çatı, tavan ve duvar uygulamalarının ısıtma talebini azaltma potansiyeli, termal konforun artırılması ve güneş enerjisinin daha iyi kullanımı dahil olmak üzere avantajları çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur. Bu uygulamaların farklı iklim bölgelerinde yapılan geniş çapta araştırmalar ile elde edilen sonuçları Tablo 2.5'tedir.

Tablo 2.3. FDM'li çatı, tavan ve duvar uygulamalarından elde edilen sonuçlar.

Referanslar	İncelenen Konu	Anahtar Bulgular
(Mohammad Kheradmand, 2016)	FDM katkılı alçı levhanın ısıl davranış analizi	FDM alçı levha, geleneksel alçı duvar kaplamasına kıyasla binanın ısıtma talebini etkili bir şekilde azaltmıştır.
(Erlin Meng, 2017)	Kompozit bir FDM odası ile FDM'siz bir oda arasındaki termal performans karşılaştırması	Isıtma sezonu boyunca, FDM odasındaki iç hava sıcaklığı, geceleri FDM'siz odaya göre 6,93 K ila 9,48 K daha yüksektir.
(Xuming Mi, 2016)	Beş iklim bölgesi için ofis binalarında FDM duvar kaplamasının enerji ve ekonomik performans değerlendirmesi	FDM, duvarın termal depolama kabiliyetini etkili bir şekilde arttırılabilmiştir.
(Xu Wang, 2016)	FDM duvar panosu uygulamasının deneysel değerlendirmesi	Kışın, FDM duvar panelli odanın ısıtma talebi, geleneksel duvar panosuna göre %10 ila %30 daha düşük olduğu değerlendirilmiştir.
(Hasnat Jamil, 2016)	Avustralya'da bir evde FDM kullanımına ilişkin çalışma	FDM'nin binanın tavanlarına kurulması, termal konforsuz saatleri etkili bir şekilde azaltmıştır.
(Paula Marin, 2016)	Farklı iklimlere sahip tipik şehirlerde FDM duvar kaplamasının dünya çapında enerji tasarrufu analizi	FDM ile güçlendirilmiş alçı levhalar uygulandığında, kurak ve sıcak ılıman iklim bölgelerinde binaların enerji performansı iyileştirilmiştir.
(H.J. Akeiber, 2017)	Faz değiştiren malzemeli ve faz değiştiren malzemesiz binaların enerji performansının deneysel karşılaştırması	Faz değiştiren malzemeli binaların, faz değiştiren malzemesiz binalara kıyasla önemli ölçüde enerji tasarrufu potansiyeline ve iyi iç mekan termal konforuna sahip olduğu değerlendirilmiştir.
(Amirreza Fateh, 2017)	Binalarda FDM duvar kaplamasının sayısal ve deneysel analizi	FDM kullanıldığında binaların en yüksek ısıtma yükü yaklaşık %15 oranında azalmıştır.
(Francesco Guarino, 2017)	Bir pencerenin karşısındaki FDM duvar panosuna sahip bir odanın performans incelemesi	FDM duvar kaplaması, binalarda güneş enerjisinin etkinliğini önemli ölçüde artırabilmiş ve yıllık ısıtma talebini %17'den fazla azaltabilmiştir.
(Yuka Kusama, 2017)	FDM tavan ve duvarının deneysel incelenmesi	FDM alçı duvar panellerine sahip binalar, güneş enerjisinden daha iyi yararlanabilmiş, daha iyi termal konfor etkisi elde edebilmiş ve geleneksel alçı duvar

		panellerine göre daha yüksek enerji tasarrufu potansiyeli sağlayabilmiştir.
(Yannick Berthou, 2015)	Silika aerojelleri FDM tuğlası ile birleştiren yeni bir yarı saydam güneş duvar kaplaması	Bu tip bir duvar panosu, ısı kaybını etkili bir şekilde önleyebilmiş ve ısı kazanımını arttırabilmiştir.
(MT Plytaria, 2018)	Bir binada FDM duvarının simüle edilerek incelenmesi	Kuzey ve güney duvarlarında FDM kullanıldığında binanın ısıtma yükü yaklaşık %1,54 oranında azalmıştır.
(Alexander M.Thiele, 2015)	Bina kabuğuna uygulanan mikrokapsüllü FDM duvar kaplamasının ısıl davranışının numerik analizi	FDM'nin erime sıcaklığının ayarlanan iç ortam sıcaklığına yakın bir şekilde etkinleştirilmesi, termal enerji akışını azaltabilmiştir.
(N.Soares, 2016)	Hem doğal konveksiyon hem de aşırı soğutma fenomenini dikkate alan bina uygulamaları için FDM duvar kaplamasının termal performansının deneysel çalışması	Kanat eklemek, iletim yoluyla boşaltma sürecini iyi bir şekilde geliştirebilmiştir.
(Kaushik Biswas, 2014)	Bir tür düşük maliyetli FDM ile duvar kaplamasının sayısal ve deneysel çalışması	Ekonomik açıdan, FDM'nin duvarın sadece iç kısmında kullanılmasının, duvarın tamamında kullanılmasına göre daha avantajlı olduğu değerlendirilmiştir.
(Karunesh Kant, 2017)	Farklı FDM türleri ile bina kiriş termal performansı için sayısal analiz	Kaprik asit, ısı akışını azaltmak için parafine göre daha etkili olmuş ve bu da ısıtma mevsiminde daha düşük ısıtma talebine yol açmıştır.
(Mohamed Lachheb, 2017)	Kompozit sıvalarda duvar levhası kalınlığının ve FDM 'nin kütle fraksiyonunun sayısal analizi	Duvar levhası kalınlığının arttırılmasıyla bina ısıl konforu arttırılabilmiş ve sıva içindeki FDM kütle fraksiyonunun artmasıyla ısı akısı genliği azaltılabilmiştir.
(Mohammad Saffari, 2016)	FDM duvar panoları ile bina kaplamasının enerji kullanımı üzerindeki bina sakinlerinin kıyafet davranışlarının etkisine ilişkin sayısal çalışma	Biraz daha kalın giysiler giyme davranışı, sistemin enerji tasarrufu potansiyelini arttırmaya katkıda bulunmuştur.
(Reza Barzin, 2016)	Hava tahmini ve fiyat tabanlı kontrol yöntemini birleştirerek	Fiyata dayalı kontrol yöntemi kullanıldığında enerji tasarrufu potansiyeli %14'e kadar çıkabilmiştir.

	pasif bina ısıtma sisteminin FDM ile deneysel çalışması	Ayrıca hava tahmini dikkate alındığında %31 enerji tasarrufu oranı elde edilebilmiştir.

2.4. ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Enerji sektöründe kullanım için çok çeşitli enerji depolama seçenekleri mevcuttur. Enerjinin depolanması için geliştirilen teknolojiler dünya çapında geleceğin enerji sistemlerinde önemli bir bileşen haline geldikçe daha fazlası depolama yöntemi de ortaya çıkacaktır. Sektörde enerji depolama ihtiyacı arttıkça, talepler daha spesifik hale geldikçe ve son teknoloji malzeme ve teknolojilerden yararlanan yenilikler geliştirildikçe mevcut çözüm yelpazesi de genişlemektedir.

Örneğin, güneş enerjisi için depolama ihtiyacına dair uygulamalar, özellikle güneş enerjisinin en az bulunduğu kış aylarında daha büyük bir ihtiyaç haline gelmektedir. Bu sebeple enerji depolama sistemleri, daha verimli enerji ihtiyacını verimli olarak karşılamaya önemli ölçüde katkıda bulunabilir (İbrahim Dinçer, 2011).

Enerji depolama yöntemleri ile kaynağın olmadığı durumlarda kullanımı hazır halde olan enerji, bina ısıtma ve soğutmada, havacılıkta, kamu hizmet uygulamalarında büyük yer tutmaktadır. Enerji depolama sistemleri, belirli işlevlerine, tepki hızlarına, depolanan enerjinin şekline, sürelerine göre sınıflandırılabilir. Enerjiyi mekanik, elektrokimyasal, kimyasal veya termal enerjinin yanı sıra elektrik veya manyetik alanlar şeklinde sınıflandırmak mümkündür. (Eklas Hossain, 2020)

2.4.1. Mekaniksel Enerji Depolama

Yararlı iş yapabilen hareket enerjisi, mekanik enerji anlamına gelmektedir. Kinetik enerji (hareket enerjisi) bir işin gerçekleşmesi ile mekaniksel enerji olarak açığa çıkan enerjidir. Tornavida yardımıyla vida sıkıldığında ve pense ile kablo kesildiğinde mekanik enerji üretilmiş olur. Aynı şekilde elektrik santrallerinde türbine çarpan su mekaniksel enerjiye dönüşmektedir. Meydana gelen mekanik enerji ile elektrik enerjisi üretimi de gerçekleştirilebilmektedir (Mehmet Kozak, 2012).

Mekaniksel enerji, yüksek bir nesnenin potansiyel enerjisi, doğrusal ya da dönme hareketin kinetik enerjisi, elastomerlerin çekme ya da sıkıştırma enerjisi veya sıkıştırılmış gazlardaki enerji olarak depolanabilmektedir. Mekaniksel enerji depolama sistemleri basınçlı

hava enerji depolama sistemleri, pompaj depolamalı sistemler ayrıca volanlar olarak üç ana başlık altında ele alınmaktadır (İbrahim Dinçer, 2011).

2.4.2. Elektriksel Enerji Depolama

Elektrik enerjisi depolama yöntemleri yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ihtiyacında önemli bir yere sahiptir Elektriksel enerji depolama yöntemleri başlıca; yakıt hücreleri bataryaları, süper kapasitörler, süper iletken manyetik enerji ve ultra kapasitörler ile depolamadır.

Bataryalar; enerjiyi depolayarak daha sonra depolanan enerjinin kullanılmasına yönelik depolamanın kolay bir yöntemidir. Örnek olarak, talepteki bir artışı karşılamak veya şebeke dışı bir uygulamaya güç sağlamak verilebilir. Genel olarak tamamen şebeke gücünün yerini almak maksadı taşımamaktadır. Daha çok gürültü ya da kirlilikle ilgili endişelerden dolayı jeneratörlerin kullanılamadığı uygulamalarda, şebeke gücüne erişimin kesintili olduğu veya kısa vadeli çözümler sunma amacına hizmet etmektedirler.

Ultra kapasitörler/Süper kapasitörlerde kondansatörler iki adet iletken plaka (dielektrik malzeme) ile bu plakaları ayırmaya yarayan yalıtkanlardan oluşmaktadır. Enerjiyi negatif ve pozitif elektrostatik yüklerin ayrışması yoluyla depolamaktadır. Dielektrik malzeme iki levha arasında ark meydana gelmesini önler ve böylece daha fazla yüklemenin gerçekleşmesine destek olmaktadır.

Süper İletken Manyetik Enerji Depolamada depolama yöntemi, enerjiyi süper iletken bir bobinde akan bir elektrik akımı tarafından oluşturulan bir manyetik alanda depolamaktır.

Yakıt hücreleri, bataryalar gibi yakıt ve yakıcılarını kendi yapılarında bulundurmazlar. Bir yakıt hücresi, bir pil gibi, kendi yapısında bir yakıt ve bir brülör içermez. Bunun yerine, her iki kimyasalı da depolandıkları dış kaynaklardan düzenli ve sıklıkla almaktadırlar. Kaynak akışı sağlandığı sürece yakıt pili kesintisiz çalışabilir.

2.4.3. Kimyasal Enerji Depolama

Enerji kimyasal bileşiklerin bir araya geldiği bağlarda depolanabilmekte bununla beraber ekzotermik tepkimelerle geri kazanılabilmektedir. Bazen enerjinin depolanabilmesi amacıyla bir katalizör (ısı, enzim vb.) kullanımı gerekmektedir. Fazla tercih edilen katalizörler; amonyak ile hidrojendir. Gaz depolanabilmekte ve taşınabilmektedir (Boztepe, 2006). Gazlar

yakılmasıyla depoladıkları enerjiyi açığa çıkarılabilmektedir. Bu yanma tepkimesi sonucu açığa çıkan egzoz su olup bu sebeple çevreye zararı yoktur.

Günümüzde kullandığımız hidrojen gazı büyük oranda fosil yakıt eldesidir. Elektroliz işlemi ise çok daha yeni bir yöntemdir. Bu işlemin tespit edilen verimlilik oranı yaklaşık olarak %60'tır (Mehmet Kozak, 2012).

2.4.4. Isıl (Termal) Enerji Depolama

Termal enerji maddeyi meydana getiren moleküllerin ya da atomların potansiyel ve kinetik enerjilerinin bütünüdür. Bu enerji moleküler ya da atomik vibrasyonlar sonucunda açığa çıkmaktadır. Termal enerjisi, maddenin içindeki enerjinin değişiklik ve gizli ısı, duyulur ısı ve reaksiyon ısısı veya tümünün bileşkesi halinde depo edilir. Hissedilir ısının depolanma yönteminde, depolanmış olan maddenin sıcaklığındaki farklılık nedeniyle meydana gelen hissedilir ısı kullanılmaktadır. Gizli ısının depolamasında ise faz değişimine uğrayan malzemeler kullanılmaktadır (İbrahim Dinçer, 2011).

Depolama için belirlenen sıcaklığın aralığına uygun olarak depolama malzemesinin faz geçişiyle açığa çıkan gizli ısı belirlenmektedir. Bu amaçla belirli sıcaklıklarda buharlaşan, erime ya da başka faz değişimlerine uğrayan malzemeler kullanılır. Termo kimyasal depolama yönteminde, termal enerji bir bileşiğin bağ enerjisi şeklinde depolanır ve yine bu enerji tersinir bir kimyasal reaksiyonla özgür bırakılabilmektedir (Mehmet Kozak, 2012).

Isı enerjisi depolaması kullanım süresine bağlı olarak 2'ye ayrılmaktadır. Bunlar gece-gündüz depolama (kısa süreli) ve yaz kış mevsimlik depolama (uzun süreli)'dır. Sıcaklığına ve kullanım sebebine uygun olarak soğuk depo, sıcak depo veya her ikisi için de soğuk ve sıcak depolama kullanılabilir. Uzun süreli depolama yönteminin amacı, kışın elde edilen soğuk enerjiyi depolayıp yaz mevsiminde kullanmak, yazın güneş kaynaklı olarak elde edilen enerjiyi depolayarak kış mevsiminde kullanabilmektir. Termal enerjisinin depo edilmesi enerjinin elde edilmesiyle bu enerjinin kullanımı arasındaki mekân ve zamansal farklılıkları aza indirerek, soğutma ve ısıtma için farklı seçenekler ortaya çıkartmaktadır. Sanayi, zirai, ulaşım veya konut sektörlerinde de kullanılan depolama yöntemleri, doğal gaz, petrol elektrik enerjisi ve kömür gibi fosil yakıtların kullanımını azaltarak enerji verimliliğine büyük katkı sağlamaktadır. Isının fazla olduğu zamanda depolanması enerjinin sürdürülebilirliği ve verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir (Mehmet Kozak, 2012).

Günümüzde konunun önemine dair bilincin artması ile konuya yönelik gerçekleştirilen çalışmalar artmıştır. Halihazırda kullanılmakta olan depolama yöntemleri aşağıda belirtilmiştir (Mehmet Kozak, 2012).

- Faz değişimli maddelerle depolama
- Sıvılarda (Akışkanlarda) depolama
- Katılarda depolama
- Kimyasal depolama
- Sezonsal (mevsimsel) depolama

En önemli enerji depolama biçimlerinden biri termal enerji depolamadır ve uygulamaları, atık veya güneş enerjisi kullanarak ısıtma ve soğutmadan yüksek sıcaklıkta enerji depolama gücü üretimine ve endüstriyel sürece kadar çok geniştir (L.F. Cabeza, 2007). Depolama türüne karar verilmesinde birçok parametre aktif rol oynamaktadır. Depolamanın gerçekleştirileceği uygulanacak işlemin çeşidi ile direkt ilişkilidir. Buna örnek olarak, hava ısıtma sisteminde çakıl taşı yatakları öne çıkmakta iken su ısıtma sisteminde ise hissedilir ısı yolu ile depolama daha verimli sonuçlar alınmasını sağlayacaktır. Yapıların aktif olmaksızın ısıtılmasında termal enerjisinin yapı cephelerinde depolanması gerekmektedir (Mehmet Kozak, 2012). Bir cismin depolayabileceği enerji, o cismin ısı kapasitesine ve özgül ısısına bağlıdır. Isı depolama ortamı olarak da adlandırılan gövde ise katı veya sıvı gibi herhangi bir biçimde olabilmektedir (Eklas Hossain, 2020)

2.4.4.1. Duyulur Isı Depolama (SHS)

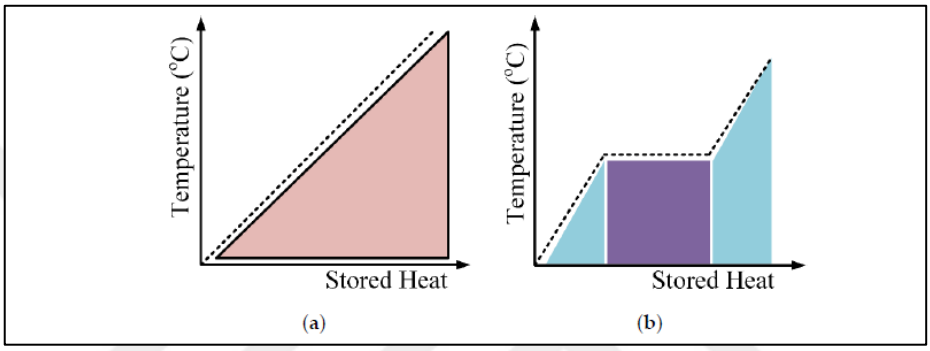
Duyulur ısı depolama (SHS) yöntemi, bir malzemenin fazının değiştirilmeden sıcaklığının arttırılması için enerjinin eklenmesi ile gerçekleştirilir (S. Scalat, 1996). Depolanan ısının miktarı aşağıdaki değişkenlere bağlıdır:

- Sıcaklık değişimi
- Malzeme ısı kapasitesi
- Depolama malzemesi miktarı

2.4.4.2. Gizli Isı Depolama (LHS)

LHS, depo malzemelerinin katıdan sıvıya veya sıvıdan gaza veya tam tersi faz değişimi sırasında ısı salınımı veya ısı absorpsiyonuna dayanır. FDM'lerin (parafin mumu, tuz hidratları ve erimiş tuzlar) duyulur ısı depolama malzemelerine göre gözle görülür bir avantajı vardır.

SHS ile karşılaştırıldığında LHS, sıfıra yakın sıcaklık değişiklikleri ile daha yüksek enerji depolama yoğunluğu sunar. Bununla birlikte, genellikle düşük yoğunluk değişimi, ısıl iletkenlik, faz değişim materyallerinin alt soğutması, uzun döngü altında özelliklerin kararlılığı ve bazen faz ayrımı nedeniyle gerçekte zorluklar ortaya çıkar. Faz değiştiren malzemeler özellikle gizli ısı enerjisi depolama sistemlerinde kullanılır ve bu nedenle FDM'ye gizli ısı depolama malzemesi de denebilir. FDM'nin termal enerji transferi, malzemenin halinin veya fazının sıvıdan katıya veya katıdan sıvıya değiştiği yükleme veya boşaltma (eritme veya katılaşma) işlemi sırasında gerçekleşir (Telkes, 1975).



Şekil 2.5.Termal enerji depolamanın iki yöntemi (a) sıcaklığı doğrusal olarak yükselten duyulur ısı (b) sıcaklığını yükseltmeden durumunu değiştiren gizli ısı (Eklas Hossain, 2020)

SHS, ucuz ve toksik olmamasının iki temel avantajını sunar. Depolanan ısı miktarı, depolanan malzemenin kütlesine, özgül ısısına ve sıcaklık değişimine bağlıdır ve şu şekilde verilir: (Eklas Hossain, 2020)

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_f} mc_p dt = mc_p(t_f - t_i) \quad \textbf{(2.1)}$$

Denklemde; Q_s, Joule cinsinden depolanan ısı miktarıdır; m, kg cinsinden ısı depolama ortamının kütlesidir; c_p özgül ısı, J/(kg.K); t_f , ℃ cinsinden başlangıç sıcaklığıdır; t_i °C cinsinden son sıcaklıktır.

2.4.4.3. Termokimyasal Depolama

Termokimyasal enerji depolama sisteminde enerji, enerjiyi açığa çıkaran moleküler düzeyde kimyasal bağların kırılma veya ayrışma reaksiyonundan sonra depolanır ve daha sonra tersine çevrilebilir bir kimyasal reaksiyonda geri kazanılır. Bu yöntemin avantajı, sistemin daha kompakt olmasıdır. SHS ve LHS'ye kıyasla daha yüksek enerji yoğunluklarına sahiptir (H. Mehling, 2007).

TCES teknolojileri temel olarak termokimyasal sorpsiyonlu depolama sistemi ve kimyasal reaksiyonlu depolama sistemi (sorpsiyonsuz termokimyasal) olmak üzere iki gruba ayrılır. Termokimyasal sorpsiyonlu depolama genellikle düşük dereceli ısıya odaklanırken, sorpsiyonsuz termokimyasal, nispeten daha yüksek sıcaklık uygulamaları için daha fazla kullanılır. Teorik potansiyelinden tam olarak yararlanmak ve yaygın pratik uygulamayı teşvik etmek için hala ele alınması gereken bazı zorluklar vardır (Huashan Bao, 2022).

2.5. KATI-SIVI FAZ DEĞİŞTİRİCİ MALZEMELER

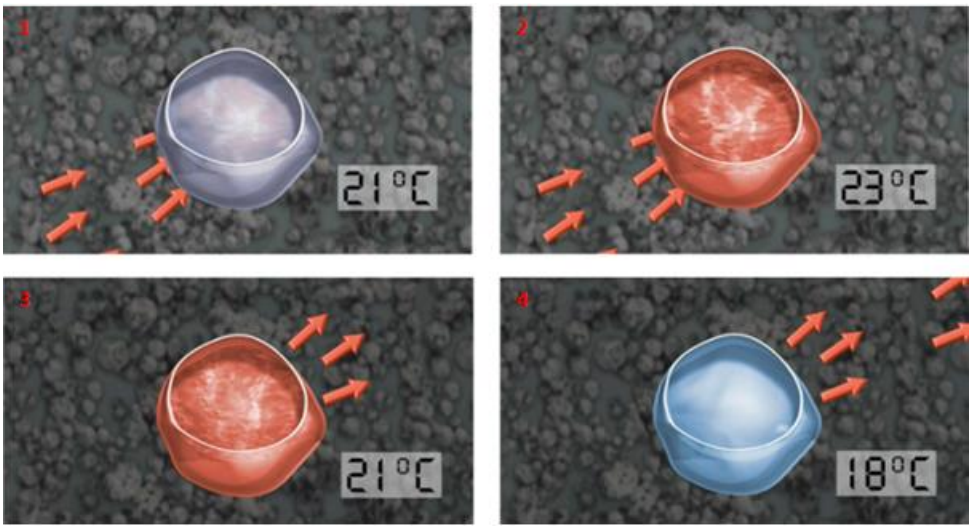
2.5.1. Faz Değişim Teorisi

FDM'ler faz değişiminde faydalı ısıtma ve soğutma sağlamak amacıyla yeterli enerjiyi serbest bırakan ya da emebilen maddelerdir.

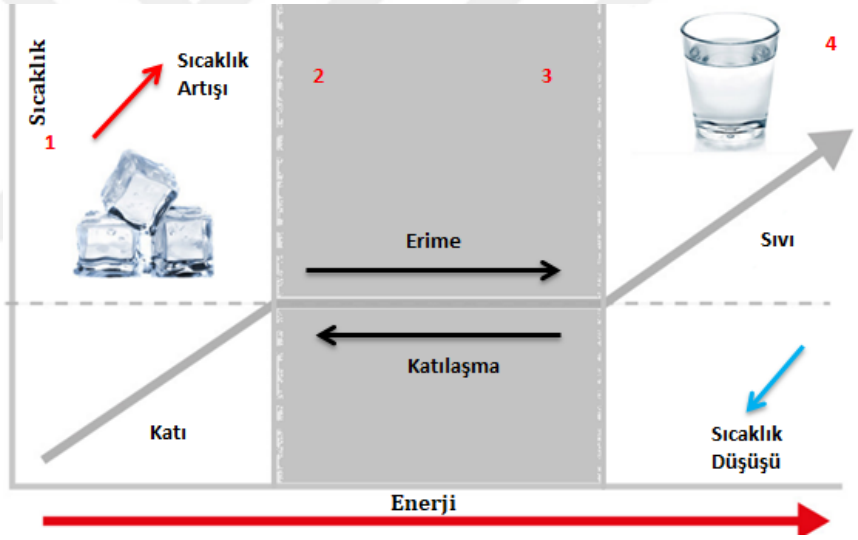
Maddelerdeki faz değişikliği; katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz ile sıvı-gaz olarak gerçekleşebilmektedir. Faz değiştiren malzeme kullanılarak yapılan farklı uygulamalar incelendiğinde, buharlaşmanın (sıvı-gaz veya katı-gaz) çoğu zaman gizli ısı depolama kapasitesi yüksek bir faz değişimidir. Fakat bu durum buharlaşma prosesi limit koşullarına oldukça bağlıdır. Buharlaşma prosesi sabit hacimde yüksek bir basınç ve ısı farkı ortaya çıkarır. Ayrıca teknik sebeplerden ötürü kullanımı zor hale gelmektedir. Yalnız suya mahsus limitli kullanım alanı bulunmaktadır. Faz değişim entalpisi, katı-katı faz değişimi esnasında genellikle yüksek değildir (Belén Zalba, 2003).

FDM'lerin basit bir çalışma prensibi vardır. Sıcaklık arttıkça malzeme katıdan sıvıya doğru faz değiştirir. Reaksiyon endotermik olduğundan, FDM ısıyı emer. Çekirdek maddenin fazı sıvıdan katıya yine aynı şekilde, sıcaklık düştüğünde ise dönüşmektedir. Bu durumda tepkime ekzotermik olduğundan, çekirdek malzeme ısıyı dışarıya atar.

Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de FDM çalışma prensibi ve ısıya davranışı görülmektedir (Parashtmr weebly, 2021), (Climator, 2021).

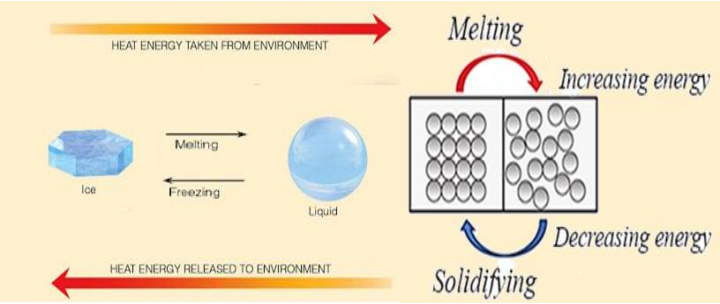


Şekil 2.6. FDM faz dönüşüm teorisi (Parashtmr weebly, 2021).



Şekil 2.7. FDM'nin çalışma prensibi (Climator, 2021).

Malzeme ve sıvı fazı, gizli ısı enerjisini depolamak için kullanılır. Katıdan sıvıya dönüşüme erime veya füzyon, sıvıdan katıya dönüşüm ise katılaşma olarak adlandırılır (Fleischer, 2015).



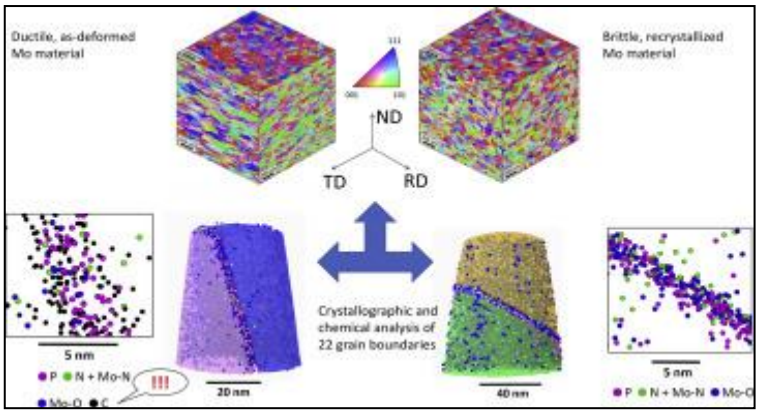
Şekil 2.8. Erime-Katılaşma (Fleischer, 2015).

Bazen sıvı, kristalleşme meydana gelmeden önce donma noktasının altındaki bir sıcaklığa kadar soğuyabilir ve buna süper soğutma veya aşırı soğutma adı verilir. Bu genellikle, ısı sıvı fazdan hızla uzaklaştırıldığında ve moleküllerin çekirdeklenme tohumları oluşturmak için yeterli zamanı olmadığında meydana gelir. Bu kristalleşmeyi tetikleyebilir (şeker alkolü, yağ asidi ve hidratlı tuzlar da görülür).



Şekil 2.9. Süper soğuma.

Faz ayrımı: dislokasyonlar, tane sınırları, istifleme hataları veya iki faz arasındaki arayüz gibi kusurlarda meydana gelir (Y. Zhang, 2007).



Şekil 2.10. Faz ayırışımı.

Duyulur ısı olarak depolanan enerji miktarı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p\, dt = mc_p(T_2 - T_1) \quad \textbf{(2.2)}$$

FDM'lerdeki enerji depolaması, katı ve sıvı fazlarda duyulur ısı ve faz geçişi sırasında gizli ısı şeklinde depolanır. Matematiksel olarak depolanan enerji miktarı şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = \int_{T_1}^{T_{pc}} mc_p\, dT + ma_{pc}\Delta h_{pc+} \int_{T_{pc}}^{T_2} m\, c_p dT \quad \textbf{(2.3)}$$

$$Q = mc_p(T_{pc} - T_1) + ma_{pc}\Delta h_{pc+}\, mc_p(T_{pc} - T_1) \quad \textbf{(2.4)}$$

m, kg cinsinden kütle, Cp'nin J / kgK cinsinden özgül ısı kapasitesi, katı haldeki T1 ve T2 başlangıç sıcaklıkları ve K cinsinden FDM'nin sıvı haldeki son sıcaklığı, K cinsinden FDM'nin Tpc faz geçiş sıcaklığı, hpc entalpisi J / kg cinsinden faz değişim malzemesi ve a_{pc} erimiş bir FDM fraksiyonudur (Duraković, 2020). Katı-sıvı faz değişimi yaşayan maddeler diğerlerine maddelere göre daha düşük hacimsel değişikliğe uğrarlar. Bu malzemeler limitli sıcaklık aralığında sınırlı hacim değişimi ile enerjiyi depo ederler.

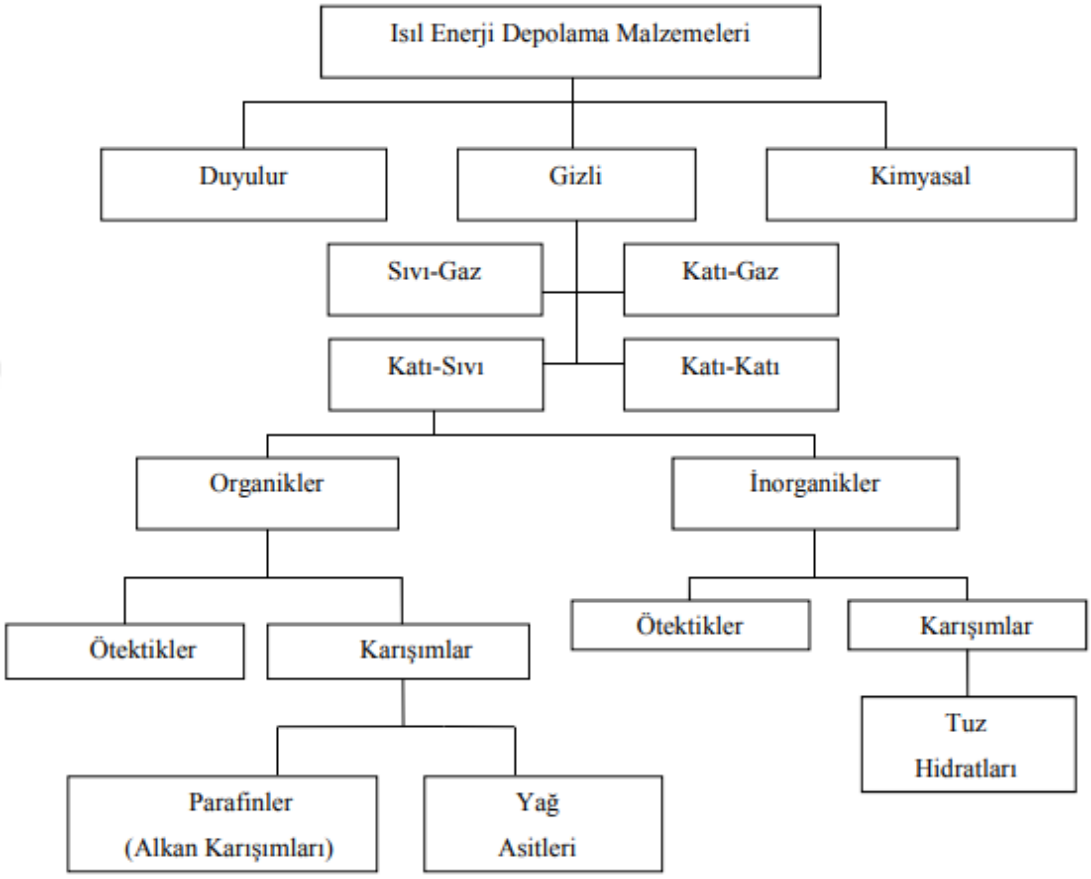
2.5.2. Katı-Sıvı Faz Değiştirici Maddelerin Sınıflandırılması

Faz değiştiren malzemeler inorganik ve organik olarak sınıflandırılır. Tüm faz değiştiren malzemeler bina yapılarında kullanım şartlarını sağlayamamaktadır. Bina uygulamaları için uygun olanlar ancak insan termal konfor sıcaklığına yakın faz değişikliği gerçekleştirebilenlerdir. Faz değişim malzemelerinin bina uygulamalarındaki kullanımının elverişli olabilmesine dair cevaplanması gereken temel sorular; farklı iklimsel yapılar için seçilecek malzemenin verimliliği ve seçilen malzemenin konsantrasyonudur (Y. Zhang, 2007).

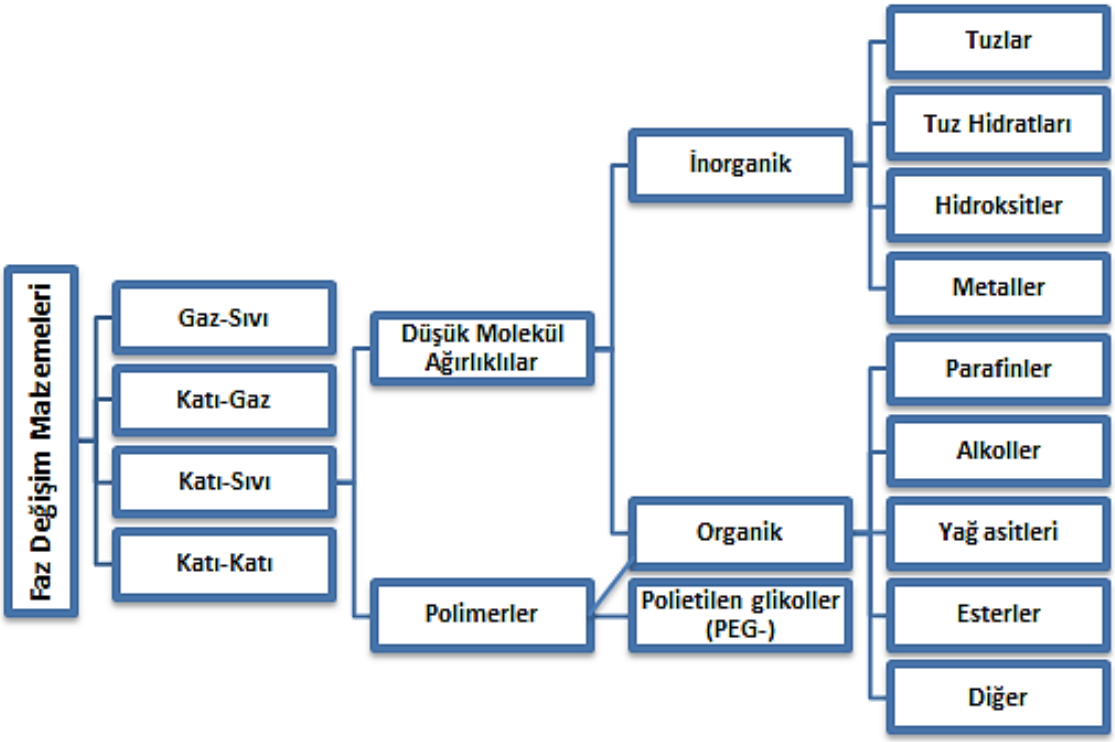
Faz değiştiren malzemeler değişkenlik gösteren sıcaklık aralıklarında faz değişikliği davranışı sergiler. FDM'lerin ısı enerjisi kapasitesi, birim kütle başına değişiklik göstermektedir. FDM türlerinden kaynaklı farklılıklar nedeniyle FDM'ler kullanım alanlarına hizmet ederler. Faz değiştirme sıcaklık aralıklarına bağlı olarak faz değiştiren malzemeler üç ana gruba ayrılırlar. Bu gruplar;

- Düşük sıcaklık FDM'leri : Faz değişim sıcaklığı 15 ℃ altında olanlar,
- Orta sıcaklık FDM'leri : Faz değişim sıcaklığı 15-90 ℃ aralığında olanlar,
- Yüksek sıcaklık FDM'leri : Faz değişim sıcaklığı 90 ℃ üstünde olanlar.

Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’ de termal enerji depolama malzemelerinin sınıflandırılması yer almaktadır



Şekil 2.11. Termal enerji depolama malzeme sınıfları (Abhat, 1983).



Şekil 2.12 Termal enerji depolayabilen FDM'ler.

2.5.2.1. İnorganik Faz Değiştiren Malzemeler

İnorganik faz değiştiren malzemeler hidratlanmış tuzlar, metaller ve alaşımlardan oluşur. Bina uygulaması için tuz Hidratları, önemli bir depolama kapasitesine sahiptir ve ortam sıcaklığında faz geçişini gerçekleştirirler. Bulunabilirlikleri, makul maliyetleri ve yanmazlıkları nedeniyle kullanımları yaygındır. İnorganik FDM'ler hacimsel olarak yüksek gizli erime ısına sahiptirler. Bununla birlikte yüksek ısıl iletkenliğe sahiptirler. Aynı zamanda ucuz ve kolay tedarik edilebilmektedirler. İnorganik malzemeler organik malzemelere oranla iki kat daha çok enerji depolama yeteneğine sahiptirler (Verma vd., 2008; Mohamed vd., 2017). Bununla beraber inorganik faz değiştiren malzemeler ergime ısısını (350 MJ/m3) yüksek sayıdaki erime/donma çevriminin ardından da koruyabilmektedirler fakat erime özelliklerinin uyumsuz olması dezavantajlarındandır (Sharma vd., 2015).

İnorganik FDMlerin dezavantajları ise, yüksek soğuma sergilemeleri, tuz ile tuz hidratlarının faz ayrışmasına sebebiyet vermeleri ayrıca birçok metalle korozif etki göstermeleri aynı zamanda da aşındırıcı etki göstermeleridir. Büyük oranda hacimsel değişikliğe uğramaları kontrol edilebilirliklerini etkilemektedir. Glauber Tuzu (Sodyum sülfat dekahidrat), kalsiyum

klorür hekzahidrat, sodyum asetat trihidrat, sodyum tiyosülfat pentahidrat, vb. tuz hidratları daha ekonomik oluşları sebebi ile araştırmalarda daha fazla yer almasına neden olmuştur (Prashant Verma, 2008). Tablo 2.6'da farklı firmalara ait ürün özellikleri yer almaktadır.

Tablo 2.4. Isıl depolama amacıyla kullanılabilecek ticari olarak üretilen FDM'ler (Luisa F. Cabeza, 2005).

Ürün	Tipi	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (kj/kg)	Termal İletkenlik (W/(mK))	Kaynak
RT 20	Parafin	22	172	0,88	Rubitherm GmbH
CLİMSEL C23	Tuz hidratları	23	148	-	Climator
E 23	Tuz hidratları	23	155	0,43	EPS Ltd.
CLİMSEL C24	Tuz hidratları	24	108	1,48	Climator
TH 24	Tuz hidratları	24	45,5	0,8	TEAP
RT 26	Parafin	25	131	0,88	Rubitherm GmbH
RT 25	Parafin	26	232	-	Rubitherm GmbH
STL 27	Tuz hidratları	27	213	1,09	Mitsubishi Chemical
S 27	Tuz hidratları	27	207	-	Cristopia
AC 27	Tuz hidratları	27	207	1,47	Cristopia

2.5.2.2. Organik Faz Değiştiren Malzemeler

Organik faz değiştiren malzemeler parafin ve parafin olmayan olmak üzere iki tiptir. Genel olarak, organik FDM'ler faz ayrışmasından muzdarip değildirler ve çok az süper soğutma ile veya hiç olmadan kristalleşirler (Manish K. Rathod, 2013).

Parafin genellikle genel formül yapısı itibariyle düz zincirli n-alkanların karışımıdır. Parafinler, CH3-(CH2)n-CH3, yoğunluk değeri yaklaşık 800 kg / m3 dolaylarında olan ve sıcaklık aralığı geniş olan malzemelerdir. Isı iletkenlikleri düşüktür (yaklaşık 0,2W / mK) ve plastik kaplarla uyumlu değildirler. Ayrıca orta derecede yanıcıdırlar (Manish K. Rathod, 2013). Tablo 2.7'de ticari organik FDM örnekleri yer almaktadır.

Tablo 2.5. Bazı ticari organik FDM'ler (AhmetSarı, 2004).

Malzeme	Kimyasal Formülü	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)	Termal İletkenlik (W/(mK))	Yoğunluk (kg/m^3)
n-Hexadecane	$C_{16}H_{34}$	18	210-238	0,2 (katı)	760 (sıvı 20 °C)
n-Heptadecane	$C_{17}H_{36}$	19	240	0,2	776 (sıvı 20 °C)
Paraffin	$C_{16}C_{18}$	20-22	152	-	-
Paraffin	C_{17}	21,7	213	-	-
Paraffin	$C_{13}C_{24}$	22-24	189	0,21 (sıvı)	760 (sıvı) 900 (katı)
Paraffin	C_{18}	28	244	0,15	774(sıvı) 814 (katı)
n-Octadecane	$C_{18}H_{38}$	28	200-245	0,15 (sıvı, 40 °C), 0,36 (katı 25°C)	760 (sıvı 70 °C) 814 (sıvı 20 °C)
n-Nondecane	$C_{19}H_{40}$	32-33	222	0,18(sıvı, 60°C) 0,26 (katı 19°C)	780
n-Eicosane	$C_{20}H_{42}$	36-37	247	0,15 (sıvı) 0,42 (katı)	-
n-Heneicosane	$C_{21}H_{44}$	39-41	201	-	-

Parafin olmayan bir organik FDM ailesi, ısıya uygun esterler, yağ asitleri, alkoller ve glikolleri içerir.

Yağ asitleri, örneğin inorganik FDM'lere göre bazı üstün özelliklere sahiptir:

- Erime uyumu
- İyi kimyasal stabilite
- Toksik değildirler
- Bina uygulamaları için uygun erime sıcaklık aralığına sahiptir.

Yağ asidi esterleri olan FDM'ler, oksidasyon riski olmadan binlerce faz değişim döngüsüne girme kabiliyetiyle yıllarca stabil kalır. Bu biyo-bazlı FDM'ler, parafin bazlı FDM'lere benzer şekilde, süper soğutma olmadan veya çok az süper soğuma ile büyük miktarlarda gizli ısıyı absorbe edebilir, depolayabilir ve serbest bırakabilir. Ek olarak, yağ asidi esterlerinin mikrokapsüllenmesi eşit derecede kolaydır. Asidik yapıları nedeniyle çevre ile reaksiyona girme eğilimindedir.

Genel olarak, organik FDM'ler onları bina uygulamaları için uygun kılan birçok özelliğe sahiptir. Ancak yanıcı olduğu düşünülen birçok organik FDM vardır. Bu durum organik FDM'lerin bina uygulamaları hedeflendiğinde güvenlik yönünü önemli ölçüde etkiler.

İnorganik ve organik faz değiştiren malzemelerin binayı oluşturan elemanların üretimindeki kullanımına yönelik olumlu ve olumsuz yönleri Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.6. Organik ve inorganik FDM'lerin karşılaştırması (Ahmed Hassan, 2016).

	Organik	**İnorganik**
Avantajlar	a. Sıcaklık aralığının geniş olması. b. Aşırı soğuma yaşamayışı. c. Erime dağılımının eşit olması. d. Kendinden çekirdeklenebilir olması. e. Geleneksel yapı elemanları ile uyumlu olması. f. Katmanlaşmanın olmayışı. g. Yüksek birleşme (füzyon) ısısı. h. Kimyasal karalık. i. Güvenlik problemi oluşturmaması ve reaksiyona girmemesi. j. Tekrarlı kullanılabilme yeteneğinin oluşu	a. Yüksek hacimsel gizli ısı depolama kapasitesi. b. Ekonomik ve kullanım kolaylığı. c. Kesin erime noktası. d. Isıl iletkenliğin yüksek olması. e. Yüksek birleşme (füzyon) ısısı. f. Hacimsel değişimin az olması. g. Yanmazlık.
Dezavantajlar	a. Katı halde termal iletkenliği düşük, katılaşma çevrimi esnasında yüksek ısı transfer oranları gerekliliği. b. Hacimsel gizli ısı depolama kapasitesi düşüklüğü. c. Yanıcılık (Bu uygun bir kap ile kolayca azaltılabilir).	a. Yüksek oranda hacimsel değişiklik b. Katı-sıvı geçişi esnasında aşırı soğuma. c. Çevrimlerde çekirdekleşme için yardımcı ajan gerekliliği.

d. Yüksek bütçeli olması sebebiyle yalnız parafin karışımları ile rafine kullanılabiliyor olması

Tablo 2.9'da Organik ve inorganik faz değişim malzemelerinin termofiziksel özeliklerine yönelik bir karşılaştırma yer almaktadır.

Tablo 2.7. Organik ve inorganik FDM'lerin termofiziksel özeliklerinin karşılaştırması. (Ahmed Hassan, 2016)

Özellik/karakteristik	Paraffin wax	Non-paraffin	Tuz Hidratları
Füzyon ısısı	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Termal iletkenlik	Çok düşük	Düşük	Yüksek
Erime sıcaklığı (°C)	-20- 100+	5- 120+	0- 100+
Gizli ısı (kj/kg)	200- 280	90 - 250	60 - 300
Aşındırıcı	Değil	Hafif	Aşındırıcı
Termal Çevrim	Kararlı	Yüksek sıcaklık ayrışmaya neden olabilir	Tekrarlanan döngülerde kararsız
Ağırlık	Orta	Orta	Ağır
Ekonomi	$$	$$$ - $$$$	$

2.5.2.3. Ötektik Faz Değiştiren Malzemeler

Ötektik karışımlar çoğunlukla iki veya daha fazla bileşenin birleşiminden oluşur. Ötektik malzemeler eş zamanlı ergime ve katılaşma özelliği gösterirler ve faz ayrımına uğramazlar (Atul Sharma, 2009). Avantajları, ısıl depolama yoğunluğunun yüksek olması aynı zamanda tek bir ergime sıcaklığına sahip olmasıdır.

Dezavantajı ise, termofiziksel özelliklerine yönelik şimdilik yapılan araştırmaların diğer FDM türlerine göre daha az olmasıdır (Memon, 2014). Tablo 2.10'da bazı yağ asidi ötektik karışımlarının faz değişim sıcaklıkları ve entalpileri yer almaktadır.

Tablo 2.8. Yağ asidi ötektik karışımlarına ait faz değişim sıcaklıkları ve entalpileri.

Yağ Asidi	İçerikleri (Kütlece %)	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Entalpisi (J/g)
Kaprik asit/Laurik asit	45/55	17-21	143
Kaprik asit/Palmitik asit	76,5/23,5	22	171
Laurik asit/Mistrik asit	66/34	34	167
Laurik asit/Palmitik asit	69/31	35	166
Laurik asit/Stearik asit	75,5/24,5	37	182
Misristik asit/Palmitik asit	58/42	43	170
Miristik asit/Stearik asit	64/36	44	182
Miristik asit/Stearik asit	67,7/34,3	51	162
Palmitik asit/Stearik asit	64,2/35,8	52	182

Tablo 2.11'de Organik, İnorganik ve Ötektik FDM'ler yapı elemanlarındaki uygulamalarına yönelik avantaj ve dezavantajları yönünden karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.9. FDM türlerinin karşılaştırılması (M.İten, 2014), (Tumirah Khadiran, 2016), (Manish K. Rathod, 2013).

FDM'ler	Avantajları	Dezavantajları
Organik FDM	Verimli ısıl kararlılık Aşırı soğuma olmadan donma Düşük buhar basıncı Özgün çekirdekleşme özelliği Tepkimeye girmeye yatkın değil Toksik olmayışı Uyumlu eriyebilme Sınırlı hacimsel değişim Geleneksel bina elemanları ile uyumluluk Çalışma sıcaklık aralığının geniş olması	Sıvı FDM'lerde sızma problemi Düşük termal iletkenlik (yaklaşık 0.2 W/mK) Yanıcılık
İnorganik FDM	Yüksek hacimli gizli ısı depolama kapasitesi Yanıcılık özelliği göstermemesi Düzgün faz değişimi Yüksek termal ısıl iletkenlik	Süper soğuma Ayrışma uyumlu eriyememe Yüksek hacim değişiklikleri Metallerle tepkimeye girmesi Tekrarlanan faz döngüleri üzerinde faz ayrılması
Ötektik FDM	Keskin ergime noktası İhtiyaca uygun karışımın elde edilebilmesi	Yüksek maliyet Termofiziksel özelliklerine dair sınırlı literatür verisi

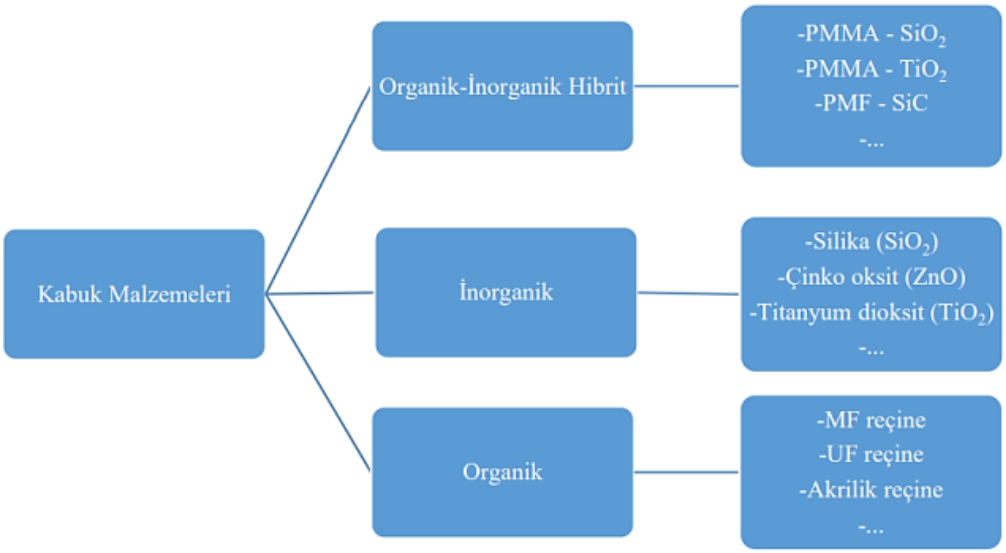
2.6. FDM'LERİN KAPSÜLLENMESİ

Çekirdek malzeme (FDM) seçimi, füzyon ısısı ile uygulamaya bağlıdır. Yoğunluk, ısıl iletkenlik, ısı kapasitesi, zehirlilik, korozyon ve yangına dayanıklılık potansiyel olarak önemli. Farklı FDM'ler farklı toksikolojik ve etkileşim özellikleri sergilediğinden, uygun kabuk malzemelerini belirlemek için bu tür özellikleri değerlendirmek son derece önemlidir. FDM kapsülleme yöntemleri üç ana kategoride sınıflandırılabilir: kimyasal süreçler, fiziko-kimyasal süreçler ve mekanik süreçler. Bu yöntemler tıpta, gıda muhafazasında, tekstilde, kozmetik, tarım, biyoteknoloji, sensör endüstrileri, savunma ve mühendislik alanlarında kullanılmaktadır (Ahmed Hassan, 2016).

Mikrokapsülasyon yöntemleri FDM'lerin katı-sıvı faz geçiş sırasında sızıntı yaşamasını engellemek ve FDM'leri çevre ile reaksiyona girmekten korumak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. FDM tabanlı ısı depolama işlemleri içinde mikrokapsülasyon yöntemi geniş ısı transfer alanı ve termal döngünün kararlılığını sağlar. Mikrokapsülleme işleminden hedeflenen sonuçların alınabilmesi için kapsül maddesinin doğru belirlenmesi, kompozit faz değiştiren malzeme kabuklarının yapısal özellikleri, faz değiştiren malzemenin stabil oluşu ve verimliliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Mikrokapsüllü FDM (MFDM)'nin gün içerisinde erime ve donma döngüsü gerçekleşmekte olup MFDM'nin 7300 döngü boyunca malzeme durum kararlılığı göstermesi beklenmektedir.

Kapsüllü FDM'den istenen sonuçların alınabilmesinde, kabuk malzemesi, üretilen mikrokapsüllerin morfolojik yapısı, mekaniksel ve termal özellikleri mühimdir. Kabuk malzemeleri, kimyasal yapılarına bağlı olarak organik-inorganik hibrit, inorganik ve organik malzemeler olarak 3 kategoride ele alınmaktadır.

Şekil 2.13'te mikrokapsül kabuk malzemelerinin sınıflandırılması yer almaktadır.



Şekil 2.13. Mikrokapsül kabuk malzemelerinin sınıflandırılması.

2.6.1. Organik Kabuklar

Genellikle organik kapsüllü maddeler faz değiştiren malzemelerin yinelenen faz dönüşümleri ile alakalı bulunarak sızdırmama özelliğine sahip, hacim değişikliğine uğramama ve yapısal esnekliğe sahip olan hem doğal hem de yapay (sentetik) polimerik maddelerden meydana gelir. Organik faz değiştiren maddelerin enkapsülasyonu için bir fonksiyonlu polimer kapsüller, polimetil metakrilat (PMMA), polistiren, üre formaldehit ve poliüretandan oluşmaktadır.

Boyutları daha küçük olan kapsüllerin daha büyük kapsüllerle kıyaslandığında daha yüksek gizli ısıya sahip oldukları görülmüştür. Çünkü FDM'nin ısı transferinin arttırılması, gizli ısıyı arttırmıştır. Küçük boyutlu kapsülün başka bir efekti ise, donma faz değişimi süresince çoklu kristal fazlarını açık hale getirmiştir. Faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı alanlarda, FDM davranımında, kristal fazların net (belirgin) olması önemlidir.

2.6.2. İnorganik Kabuklar

Mikrokapsüllerin organik kabuklarda kullanımlarında düşük ısı iletkenliği yayıcılık, ve zayıf mekaniksel özellikler sebebiyle bazı sınırlamalar meydana gelmektedir. Bu sınırlamalar nedeniyle inorganik malzeme kullanımı organik malzemeler yerine ön plana çıkmakta ve yapılan araştırmalar inorganik kabuklara doğru kaymaktadır. Ayrıca inorganik kabuklar organik kabuklarla karşılaştırıldıklarında yüksek mekanik mukavemete ve sertliğe aynı zamanda da daha iyi termal iletkenlik özellikleri göstermektedirler.

İnorganik kabuk malzemeleri olarak genellikle Silika (SiO2), çinko oksit (ZnO), kalsiyum karbonat (CaCO3) ve titanyum dioksit (TiO2) ile çalışılmaktadır. Silislerin kabuk malzemesi olarak tercih edilme sebepleri, kolay hazırlanabilir olmaları, termal iletkenliğinin yüksek olması, yangına karşı direnci (yanmazlığa yakın özellikler göstermesi). Silika ise daha çok inorganik hidrat tuzları, organik parazit mumları ve yağ asitlerinin mikrokapsülasyonuna yönelik kullanım alanı bulmuştur.

2.6.3. Organik-İnorganik Hibrit Kabuklar

İnorganik kabukların termal iletkenlik değerlerinde artış görülmesine rağmen erime sırasında FDM hacim değişikliklerinin neden olduğu gerilimden dolayı kırılabilir ve kararlı yapılarında bozulmalar görülebilmektedir. Bu ve benzeri sorunlar nedeniyle organik ve inorganik malzemelerin dezavantajlarının ortadan kaldırılarak avantajlarından yararlanmak amacıyla FDM'lerin mikrokapsüle edilmesinde organik-inorganik hibrit kabuk kullanılmaktadır. Organik-inorganik hibrit kabuklarda inorganik malzemeler mekanik sertlik, termal kararlılık ve termal iletkenlik değerlerini arttırken, organik malzemeler ise yapısal bir esneklik sunmaktadır.

Kabuk malzemesinin hazırlanması esnasında kullanılan malzeme ve metoda göre FDM mikrokapsüllerinin kabuk malzemesi çapı 0.5-1000 μm arasında değişiklik göstermektedir. Mikro kapsül hacminin %60-85'inin faz değiştiren malzemeden oluştuğu durumda mikrokapsül çapına bağlı olarak, yaklaşık 1-2 μm polimer duvar kalınlığı olmaktadır.

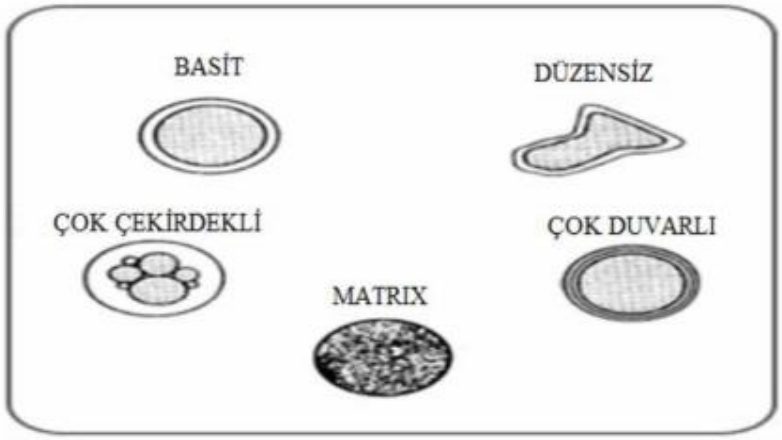
Faz değiştiren malzeme mikrokapsülleri için temel parametreler şu şekilde sıralanabilir:

1. Isıl iletkenliği
2. Mikrokapsül boyutu ve boyutsal dağılımı
3. FDM-kabuk oranı
4. Kabuk çeperinin termal ve kimyasal stabilitesi (korozyon direnci)
5. Mekaniksel etkilere karşı dayanımı (mukavemet ve esneklik)
6. Maliyetinin düşük olması
7. Faz değişim döngülerinin tekrarına karşı dayanımı

Mikrokapsüller düzgün veya düzgün olmayan şekillerde olabilmektedir (Şekil 2.14). Morfolojik olarak, tek çekirdekli, çoklu çekirdekli ve matriks yapıdadırlar. Matriks yapıda olan

kabuklarda çekirdek maddesi kabuk maddesi içinde homojen olarak dağılır. Mikrokapsül adet ölçüsü, duvar kalınlığı, yapısal durumu, FDM, kabuk malzemesi, katkı kimyasalları, geçirim özelliği vb. parametreler kapsüllerin uygulama alanına bağlı olarak seçilebilecek özellikleridir.

Melamin, fenol formaldehit veya üre maddelerin FDM'lerin mikrokapsüllenmesinde kapsül maddesi olarak çoğunlukla kullanılmaktadır. Fakat söz konusu maddelerin toksik etkileri sebebiyle son yıllarda yerini çevreye ve insana zararı olmayan doğal polimerler (arap zamkı, ipek fibroini, kitosan, jelatin, vb.) almıştır.



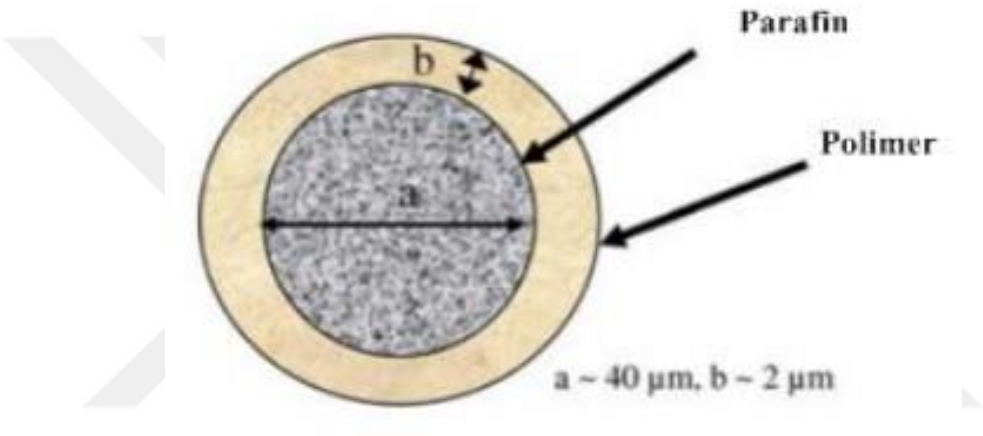
Şekil 2.14. Farklı türdeki mikrokapsüllerin yapıları.

2.7. MİKROENKAPSÜLASYON YÖNTEMLERİ

Mikrokapsül polimerik yapıdaki duvar (kabuk) malzemesi ve bu kabuk malzemesi tarafından kaplanan sıvı malzemeden (FDM) oluşmaktadır (Şekil 2.15). Kapsül duvarı, içindeki sıvı ile reaksiyona uğramayan bir malzemedir. Daha anlaşılır bir söyleyişle mikrokapsülleme işlemi etkin malzemelerin mikroskobik kabuk malzemeleri içinde paketlenmesi olarak tanımlanabilir. Faz değiştiren malzemenin yapı içerisinde hacim değişikliğine izin vermesi (yapı içerisinde dağılmasının önlenmesi), sıvı faz kaybını engellemesi, buharlaşmasının daha az olması ve çevre ile etkileşime girmesini en aza indirmek için mikrokapsülasyon yöntemleri kullanılmaktadır. FDM'nin mikroenkapsülasyonu, küçük boyutlu faz değiştiren malzeme parçacıkların veya damlacıkların kabuk maddesi ile kaplandığı heterojen ve homojen bir matrikse eklenmesiyle kimyasal ya da fiziksel prosesler neticesinde üretilmektedir. Faz

değiştiren malzemelerin mikro enkapsülasyonu en bilindik olan depolama çeşididir (Esra Mirmahmutoğulları, 2022).

Mikro boyuttaki kapsüller sıvı maddelerin katı biçimde kullanımını olanak sağlar. Faz değişimi sırasında gerçekleşecek olan hacim değişikliğine imkân oluşturur. Faz değiştiren malzemenin enkapsüle edilmesindeki hedef malzemenin kabuk içinde kalarak faz değişimini bu kabuk içerisinde yaşamasıdır. Böylelikle faz değiştiren malzemeden yararlanılması kolaylaşırken ısı iletimi için artan yüzey alanı sayesinde daha uygun bir transfer alanı ortaya çıkmaktadır (Esra Mirmahmutoğulları, 2022).



Şekil 2.15. Mikrokapsül Örneği: Parafin Çekirdek ve Polimer Duvar.

Mikrokapsülasyonda kullanılan teknolojiler aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır. Ayrıca Şekil 2.16'da bu yöntemler şema içerisinde gösterilmiştir.

1. Kimyasal yöntemler:
   - In-situ polimerizasyonu (yerinde),
   - Ara yüz polimerizasyonu
   - Süspansiyon polimerizasyonu,
   - Emülsiyon polimerizasyonu.
2. Fiziksel ve mekanik yöntemler:
   - Pan kaplama,
   - Hava süspansiyon kaplama,
   - Santrifüj ekstrüzyonu,

- Titreşimli başlık,
- Sprey kurutma,
- Çözücü buharlaştırma.

3. Fiziko-kimyasal yöntemler:
   - İyonik jelleşme,
   - Koaservasyon,
   - Sol-gel.



Şekil 2.16. Mikrokapsül üretim yöntemleri.

Genel olarak kimyasal yöntemler FDM'lerin yapı ve tekstil sektöründe kullanılan kapsülasyonunda en çok kullanım yeri bulan yöntemlerdir. Sol-gel ve Koaservasyon yöntemleri FDM'lerin mikrokapsülasyonunda en çok araştırma yapılmış kapsülasyon yöntemleridir.

2.7.1. Kompleks Koaservasyon Yöntemi

Yöntem, kompleks (karmaşık) ve basit koaservasyon olmak üzere 2 tiptir. Basit koaservasyon, çözünmüş bir polimerin tuz gibi düşük moleküllü bir madde ile reaksiyonu ile oluşmaktadır. Kompleks koaservasyon ise pozitif ve negatif yüklü iki kolloidal polimerin etkileşimi sonucu oluşmaktadır (Elif Köksal, 2017) .

İşlem, zıt yüklü polielektrolitlerin sulu formda etkileşimini içerir. Kompleks koaservasyon işleminde öncelikle faz değiştiren malzeme sulu polimer çözeltisi içinde dağıtılır.

Kabuk polimerinin çekirdek partikülleri üzerinde kapsül oluşumu ikinci bir polimer sulu çözeltisinin eklenmesi ve sonrasında tuzun eklenmesi, pH ve sıcaklığın değiştirilmesi gibi işlemlerle sağlanır. Son aşamada, oluşan mikrokapsüllerin stabilizasyonu için çapraz bağlama veya ısıl işlem yapılır. Jelatin ve arap zamkının kompleks koaservasyonu kağıt, ilaç, gıda sanayinde ve esans kapsülasyonunda kullanılmıştır (Elif Köksal, 2017).

3. YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Tablo 3.1 Deneyde kullanılan materyaller ve kullanım yeri.

Kimyasal Kullanım Yeri	Kullanılan Kimyasal
FDM	Parafin Mumu
	Hegzadekan
	Oktadekan
	Hindistan Cevizi Yağı
Kabuk malzemesi	Arap Zamkı+Jelatin
	Kitosan+PVA
Çapraz bağlayıcı	Gluteraldehit
Yüzey Aktif Madde	Tween 80
pH düzenleyici	HCL (%36,5-38-Merck)
	NaOH
	Asetik asit
	Sodyum bikarbonat
Yıkama kimyasalı	2-propanol

3.2. KULLANILAN DENEY CİHAZLARI

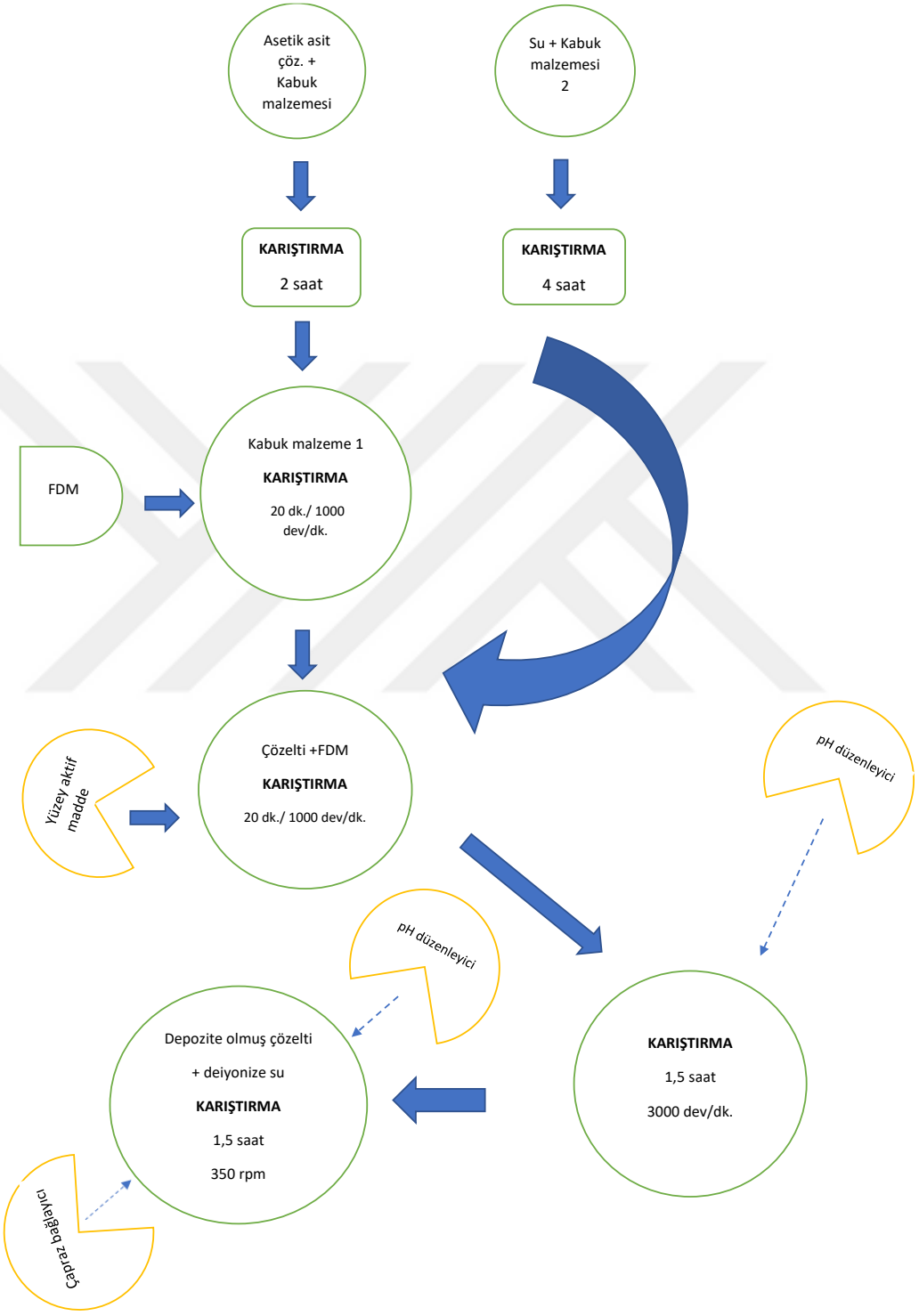
- Isıtıcılı manyetik karıştırıcı 1 (IKA C-MAG HS7)
- Deiyonize su cihazı (Marka: MILLIPORE Model: Direct Q UV 3)

3.3. KULLANILAN KARAKTERİZASYON CİHAZLARI

- Stereo Mikroskop (Unitron Z10 Stereo Mikroskop (160X))
- FT-IR (Perkin Elmer Precisely Spectrum One)
- Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Perkin Elmer DSC 4000)
- TGA (TA Instruments (TGA Q50)

3.4. PROSES AKIŞ ŞEMASI

Şekil 3.1'de Deney-4 ve Deney-5'e ait Kompleks Koaservasyon yöntemi ile mikrokapsülleme işleminin optimize edilmiş proses akış şeması yer almaktadır.



Şekil 3.1 Mikrokapsülleme prosesi akış şeması.

3.5. FDM MİKROENKAPSÜLASYONU

Farklı FDM ve kabuk türleri için mikro enkapsülasyon metodu olarak Kompleks Koaservasyon metodu kullanılmıştır. Mikro kapsülleme için (Güldemet BAŞAL, 2012)'ın yapmış olduğu çalışmadan faydalanılmıştır. En optimum kabuk, FDM için proses optimizasyonu için aşağıda yer alan 5 ayrı deney prosesi gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.2'de gerçekleştirilen deneylere ait FDM-Kabuk bilgisi ile deneyin gerçekleştirilmesi ile hedeflenen amaç yer almaktadır.

Tablo 3.2. Deney için kullanılan FDM ve kabuk malzemeleri.

DENEY NO	FDM	KABUK
1	Parafin Mumu	Arap Zamkı+Jelatin
2	Parafin Mumu+Palmitik asit	Arap Zamkı+Jelatin
3	Oktadekan	Arap Zamkı+Jelatin
4	Hegzadekan	PVA+Kitosan
5	Hindistan cevizi yağı	PVA+Kitosan

3.5.1. Deney-1, Deney-2 ve Deney-3 Prosedürü

Oda sıcaklığında şartlarında 100 ml deiyonize suya 2 g jelatin eklenerek manyetik karıştırıcı ile homojen bir karışım için 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra jelatin çözeltisinin sıcaklığı yavaşça 70 ℃'ye çıkarılmıştır. İstenen sıcaklığa ulaşıldığında çözeltinin pH'ı 3M NaOH ile 7,0'ye ayarlanmıştır. Çözelti, sıcaklık sabit kalacak şekilde 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Aynı işlemler arap zamkı için de tekrarlanmıştır.

FDM (parafin mumu ya da parafin mumu ile palmitik asit ya da oktadekan) bir beher içerisine alınmıştır. FDM'ye 70 ℃'de 3 saat boyunca ultrasonik banyoda sonikasyon yapılmıştır. FDM, hazırlanmış jelatin çözeltisi içerisine eklenmiş ve 350 rpm'de karıştırılmaya

devam edilmiştir. Arap zamkı çözeltisi damlalar halinde su içinde yağ fazına eklenmiş ve 350 rpm'de 15 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma sonunda emülsiyonun pH'ı 1M HCl ile 4,0-4,5 arasına ayarlanmış ve 70°C'de 90 dakika boyunca karıştırmaya bırakılmıştır (sıcaklığın sistem boyunca sabit kalması gerekmektedir). Koaservasyon işlemi sonrası ısıtıcı kapatılmış ve çözeltinin oda sıcaklığına inmesi için 600 ml soğuk deiyonize su çözelti içerisine eklenmiştir. Oda sıcaklığına soğutma işlemi sonrası çözelti 5-10 °C'ye soğutulmuştur. Soğuyan çözeltiye %1,5'lik gluteraldehit çözeltisi eklenmiştir (500 ml). Ardından çözeltinin sıcaklığı 3 saat boyunca sabit tutularak 350 rpm'de karıştırılmıştır. 3 saatin sonunda karıştırıcı kapatılarak çözelti oda sıcaklığında bir gece bekletilmiştir. Bekleme sonrası mikrokapsüller toplanarak çözeltiden ayrıştırılmıştır.

3.5.2. Deney-4 ve Deney-5 Prosedürü

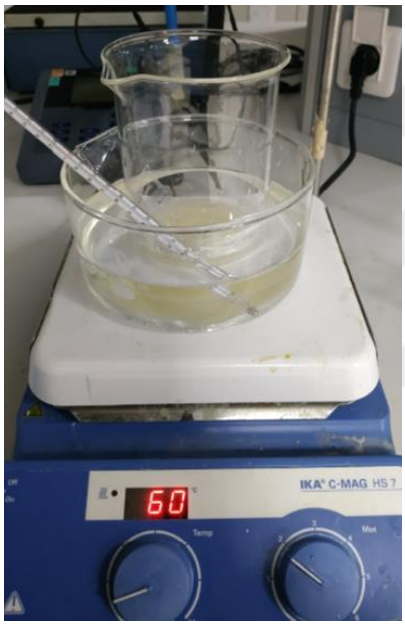
30 °C'de 20 ml %2'lik asetik asit çözeltisi içerisine 0,5 g kitosan eklenerek (%2,5'lik polimer konsantrasyonu) manyetik karıştırıcı ile homojen bir çözelti elde edilmesi için 2 saat süresince karıştırılmıştır.

95 °C'de 40 ml su içerisine 1 g PVA eklenerek (%2,5'lik polimer konsantrasyonu) manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen bir karışım için 4 saat süresince karıştırılmıştır (suyun buharlaşmasına dair kontrol için tartım yapılmış ve derişim çözündürme sonrası ayarlanmıştır). Hazırlanan kitosan çözeltisi içerisine damlalar halinde 2,25 g FDM (hekzadekan ya da hindistan cevizi yağı) eklenerek oda sıcaklığında 350 rpm'de 20 dakika karıştırılmıştır (mekanik karıştırıcıda ve 1000 dev/dk. karıştırılmıştır). Çözelti içerisine damlalar halinde 1,5 g Tween 80 eklenmiş ve 350 rpm'de 45 dakika karıştırılmaya devam edilmiştir (mekanik karıştırıcıda ve 3000 dev/dk. karıştırılmıştır). PVA çözeltisi damlalar halinde su içinde yağ fazına eklenmiş ve 350 rpm'de 15 dakika boyunca karıştırılmıştır (ekleme işlemi oldukça yavaş gerçekleştirilmiştir). Karıştırma sonunda emülsiyonun pH'ı asetik asit ile 3,00'e ayarlanmış ve oda sıcaklığında 1,5 saat boyunca faz ayrımının gerçekleştirilmesi için karıştırmaya devam edilmiştir (sıcaklığın sistem boyunca sabit kalması gerekmektedir). Çözelti mekanik karıştırıcıda ve 3000 dev/dk. karıştırılmıştır.

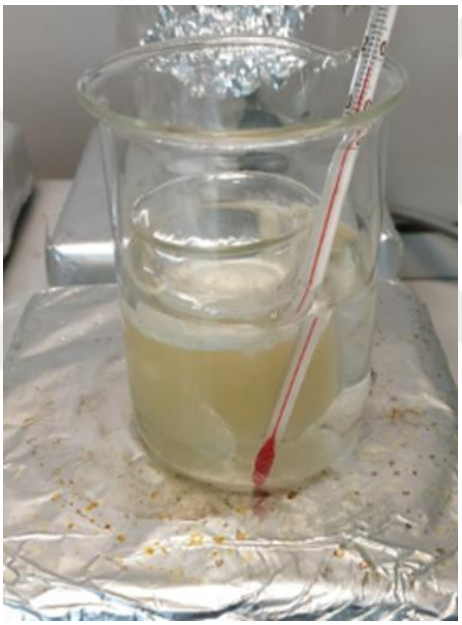
Duvar polimer yapının çekirdek madde üzerine depozite edilmesinden sonra reaksiyon ortamının pH'ı sodyum bikarbonat (sodyum bikarbonatın pH'ı 9'a sodyum hidroksit ile ayarlanmıştır) ile (yaklaşık 150 ml kullanıldı) 8,8'e ayarlanmıştır.

Oda sıcaklığındaki reaksiyon ortamı 5°C'ye soğutulmuştur. Soğuyan çözeltiye %50'lik gluteraldehit çözeltisinden 1,5 ml damla damla eklenmiştir. Çapraz bağlayıcı ilavesi sonrası yapının viskozitesi arttığı için 10 ml deiyonize su eklenmiştir. Gluteraldehit çözeltisi eklenmesi sonrası çözeltinin sıcaklığı 1,5 saat süresince sabit tutularak 350 rpm'de karıştırılmıştır (mekanik karıştırıcıda ve 3000 dev/dk karıştırılmıştır). 1,5 saatin sonunda karıştırıcı kapatılarak sistem oda sıcaklığında bir gece bekletilmiştir. Bekleme sonrası mikrokapsüller toplanarak çözeltiden ayrıştırılmıştır. Toplanan mikrokapsüller deiyonize su ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır.

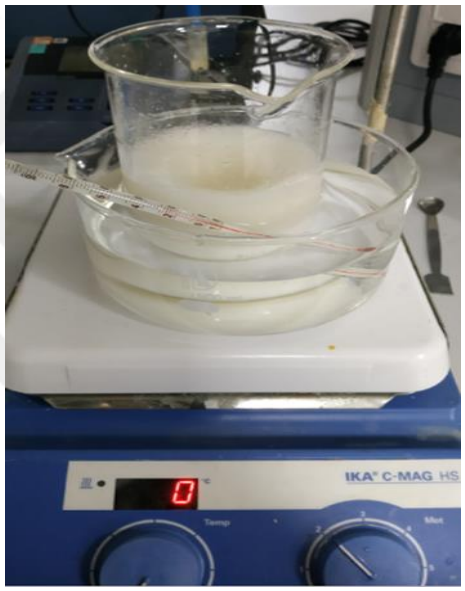
Şekil 3.2'de gerçekleştirilen deney prosedürüne uygun proses görselleri yer almaktadır.



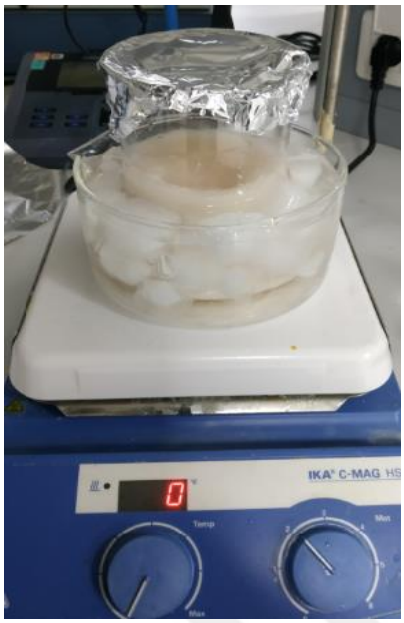
A: Jelatinin çözündürülmesi



B: Arap zamkı çözündürülmesi



C: pH ayarı yapılarak koaservat oluşumuna bırakılmış çözelti



C: Çapraz bağlayıcı eklenmiş çözelti.



D: 3,5 saat 5-10 ℃ arasında bekletilmiş çözelti.



E: 12 saat bekletilmiş çözelti.

Şekil 3.2. Deney proses görselleri.

4. BULGULAR

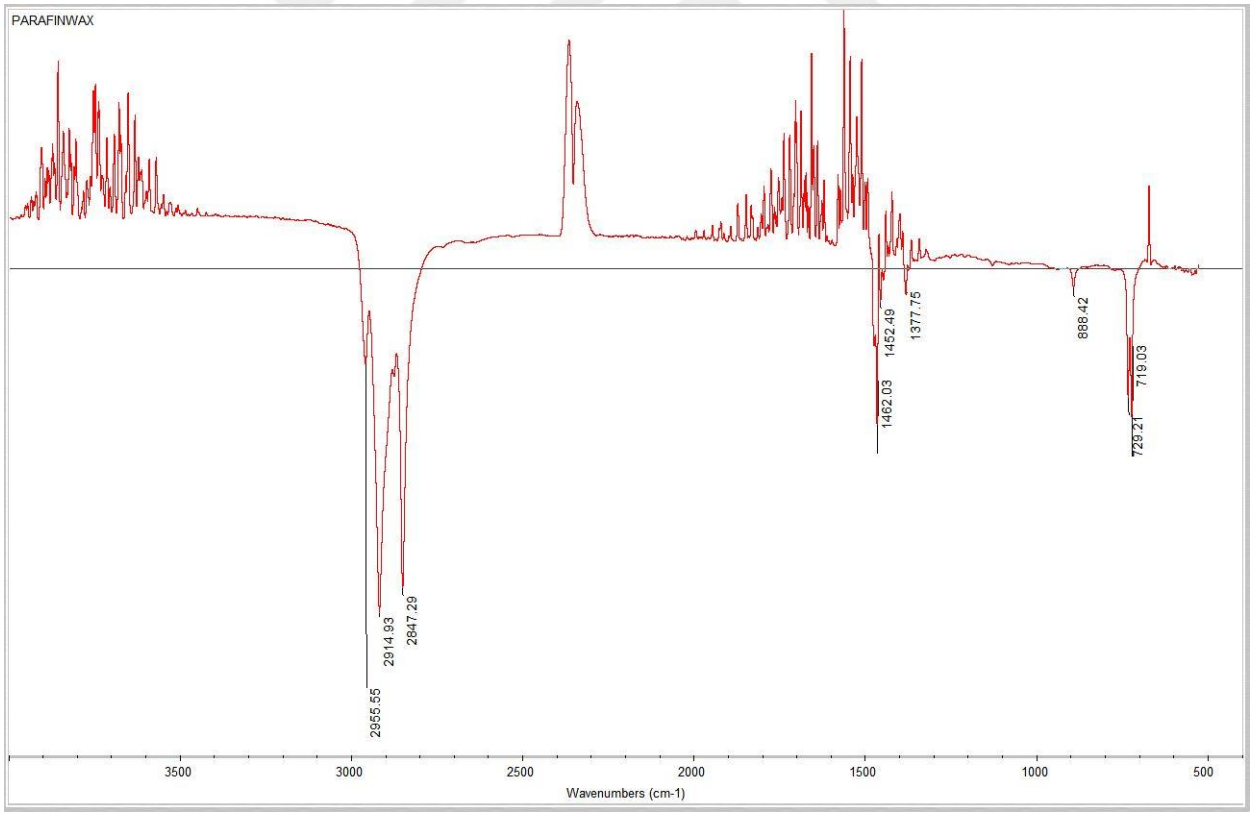
Yapılan 5 deneye karakterizasyon testleri uygulanarak kapsülleme verimi belirlenmiştir. Numunelere mikrokapsüllerin kabuk oluşumu ve faz değiştiren malzeme varlığı tespiti için FT-IR spektroskopisi analizi yapılmıştır. Kapsüllenme başarısının belirleyeceği karakterizasyon testi FT-IR analizidir. FT-IR analizinden olumlu sonuç alınan deney çıktısına (numunesine) Stereo mikroskop, DSC ve TGA analizleri yapılmıştır.

4.1. Deney-1 Karakterizasyon Testleri

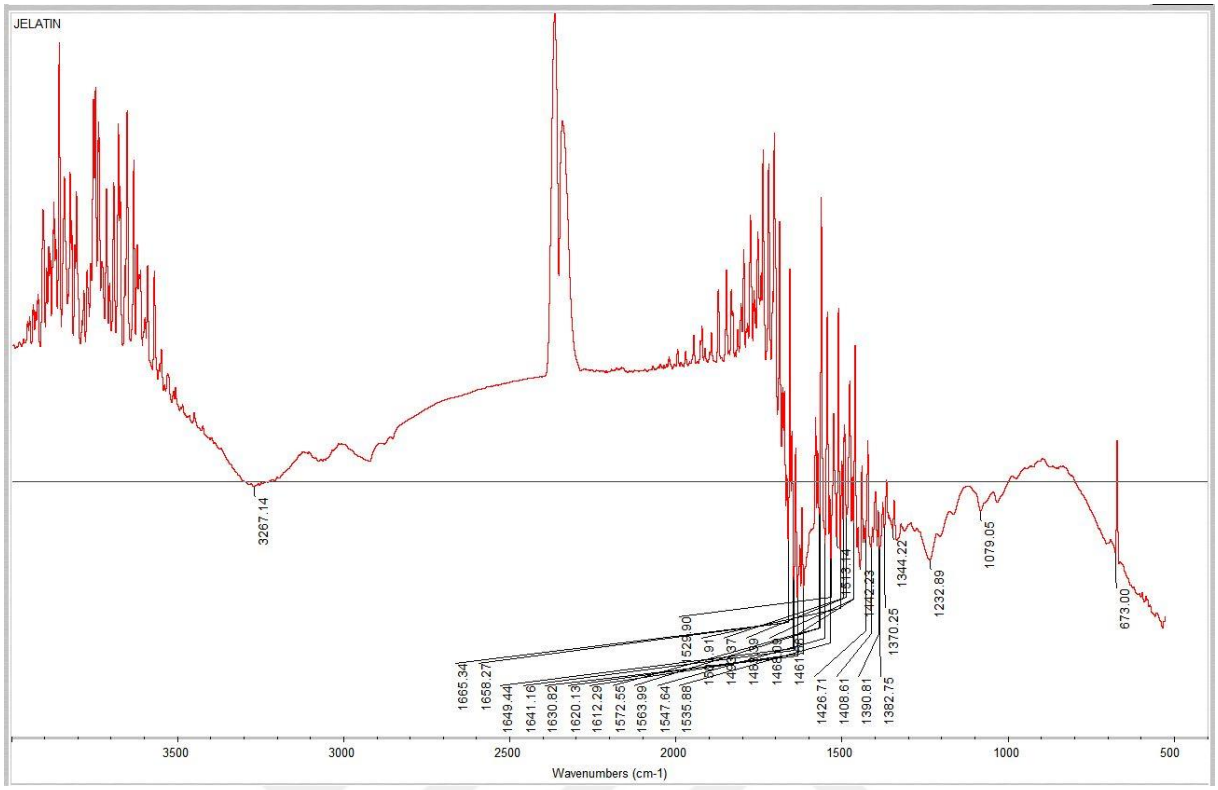
Numunelerin doğru kıyaslanabilmeleri için kullanılan FDM ve kabuk malzemelerine de FT-IR analizi yapılmıştır.

4.1.1. Deney-1 FT-IR Analizi Sonucu

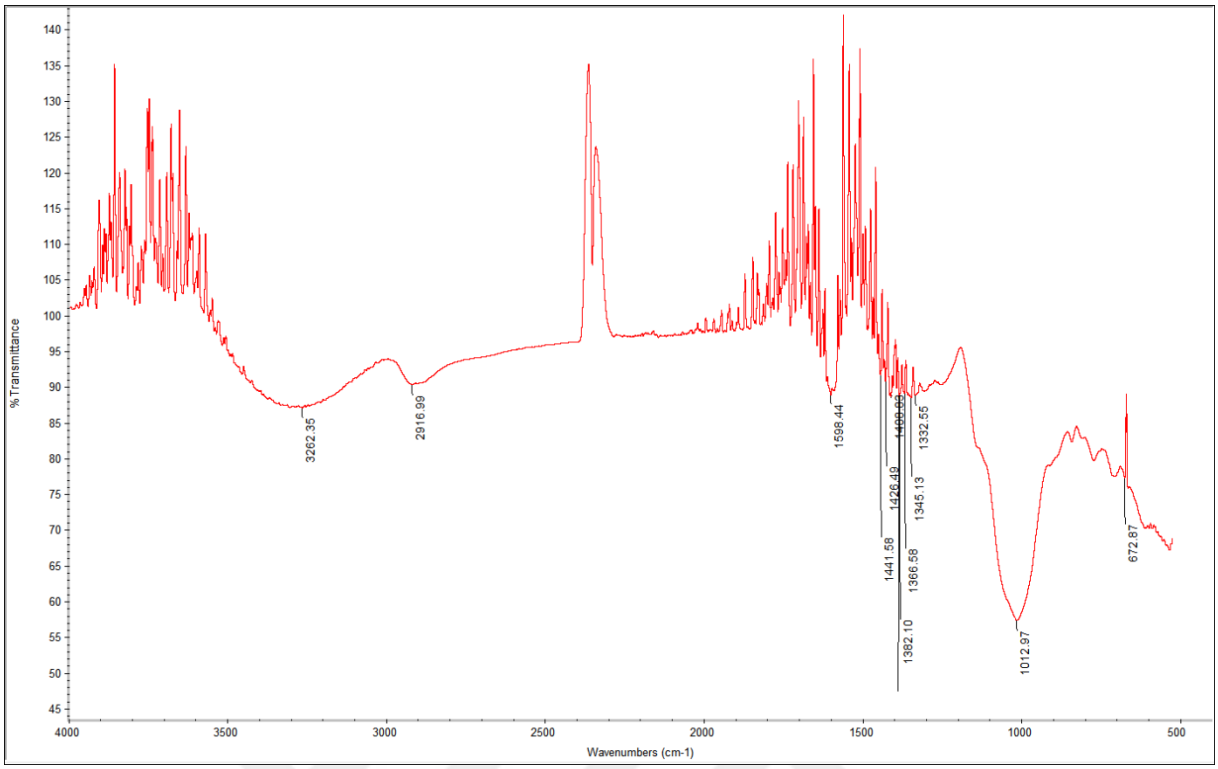
Deney-1 FT-IR analizi sonuçları Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' dedir.



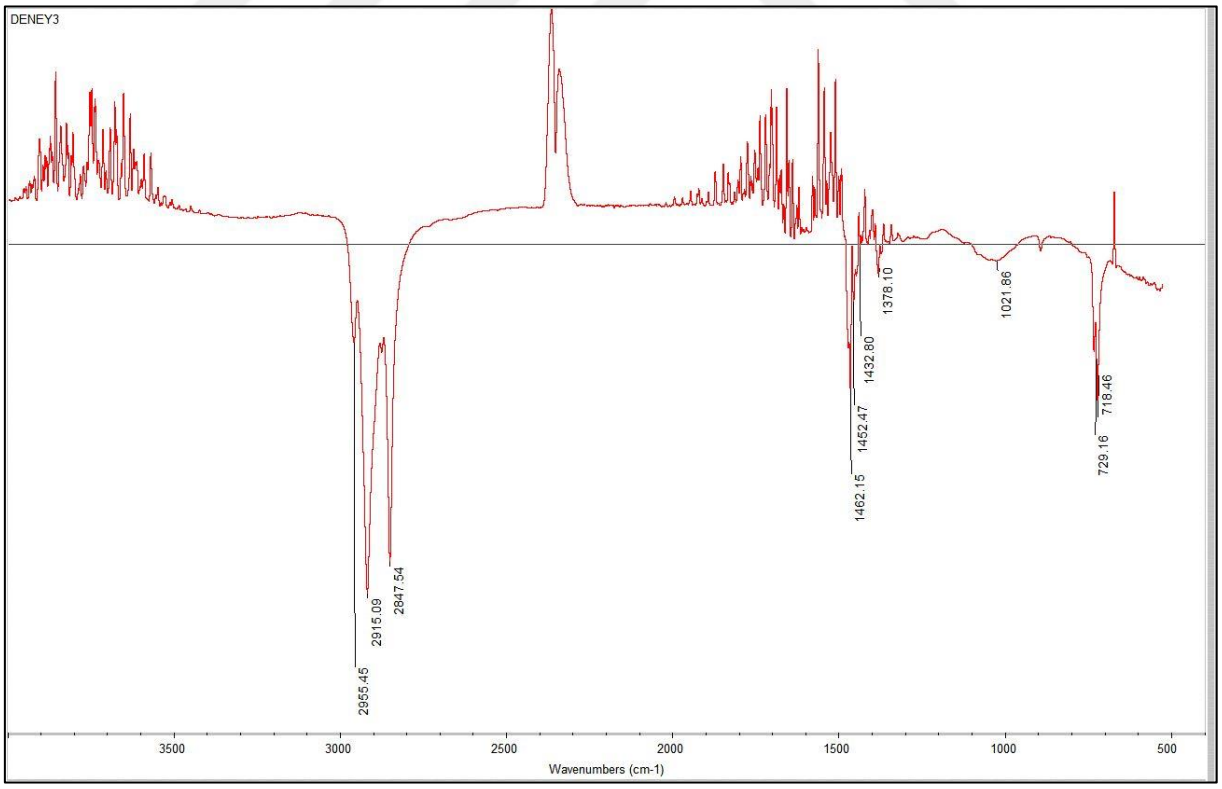
Şekil 4.1.Parafin mumuna ait FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.2. Jelatine ait FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.3. Arap zamkına ait FT-IR analiz sonucu.

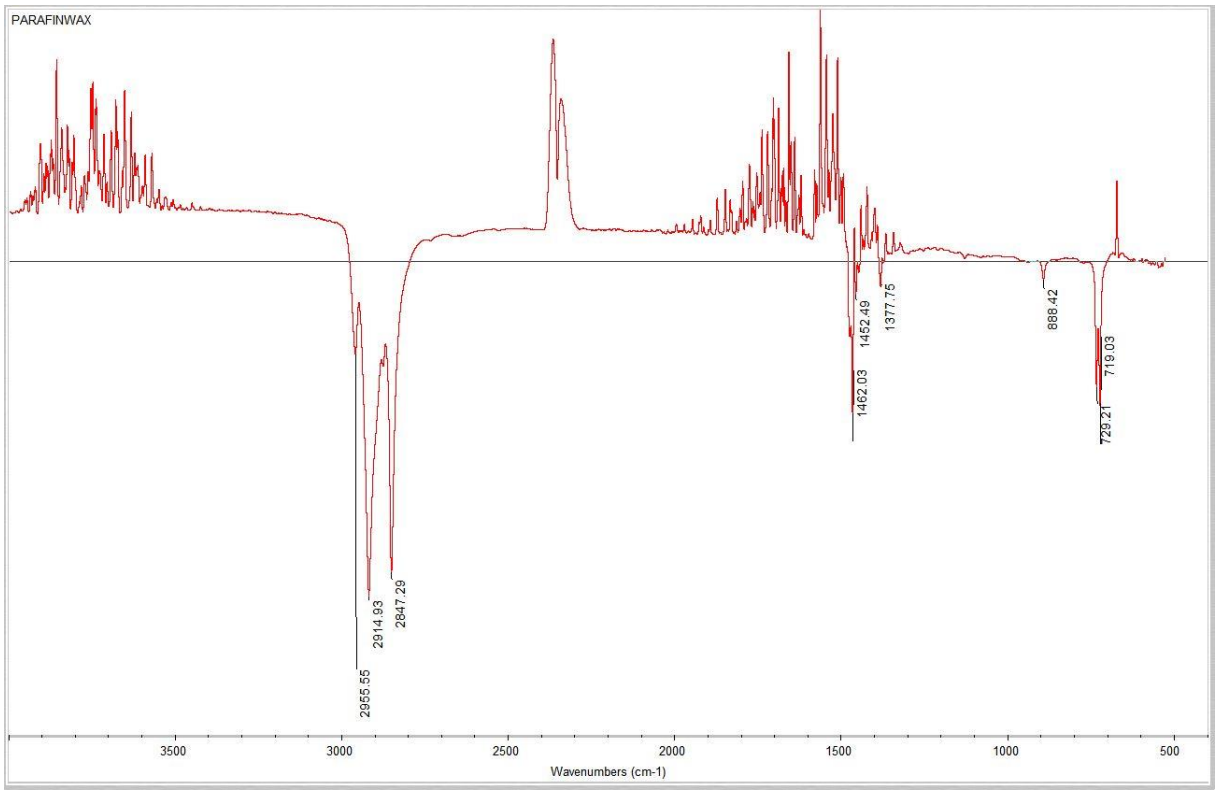


Şekil 4.4. Deney-1'e ait FT-IR analiz sonucu.

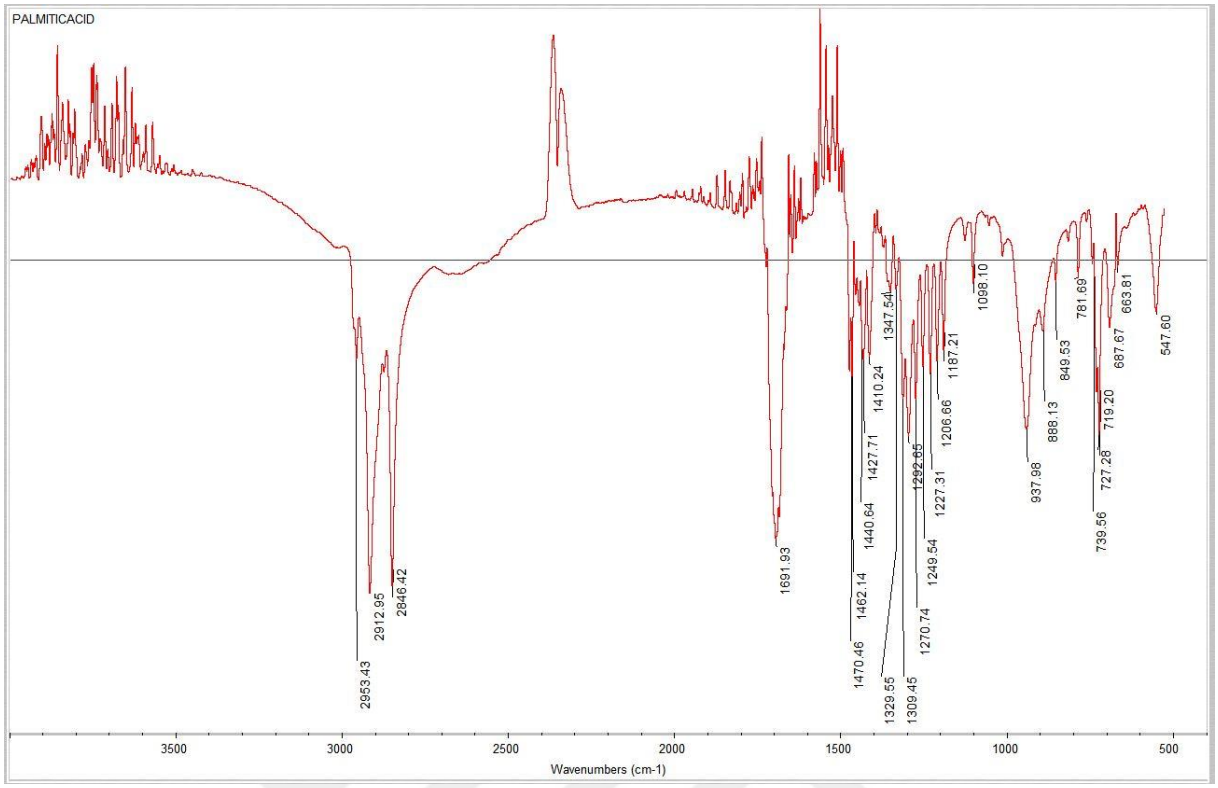
4.2. Deney-2 Karakterizasyon Testleri

4.2.1. Deney-2 FT-IR Analizi Sonucu

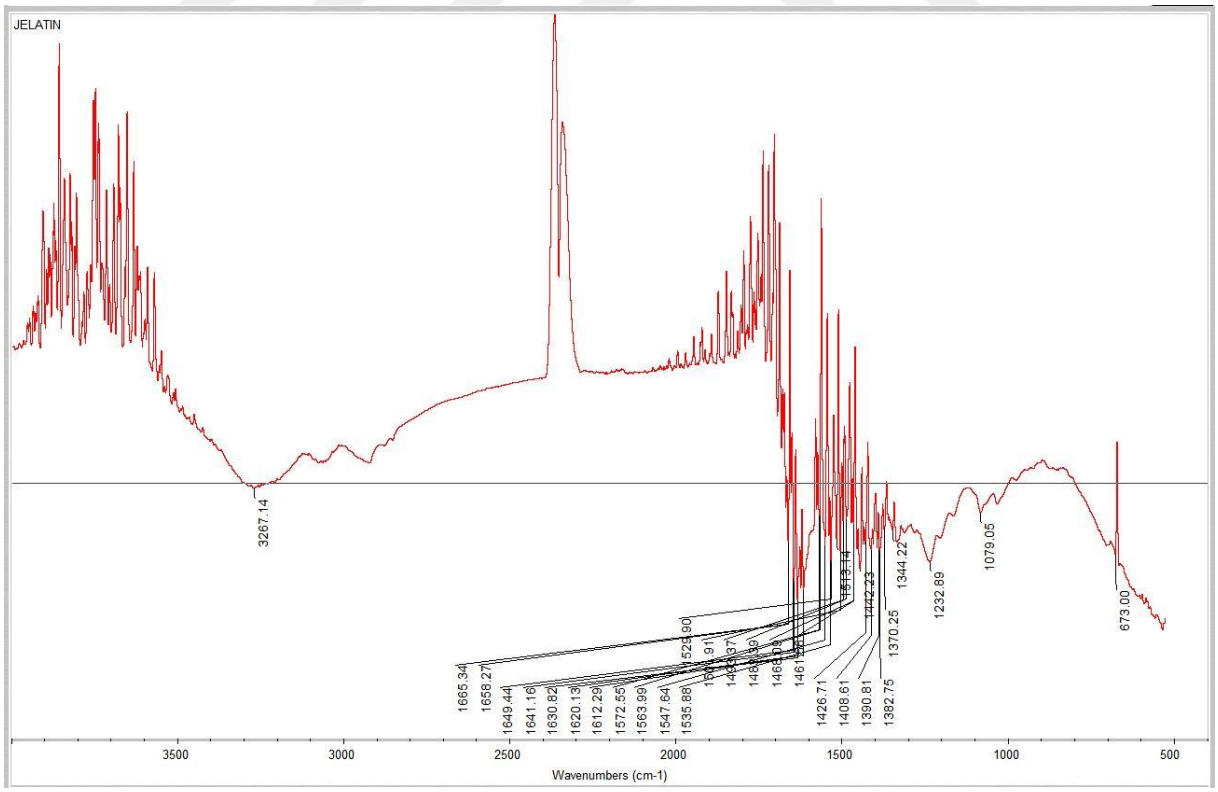
Deney-2'ye ait FT-IR analizi sonuçları Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'dedir.



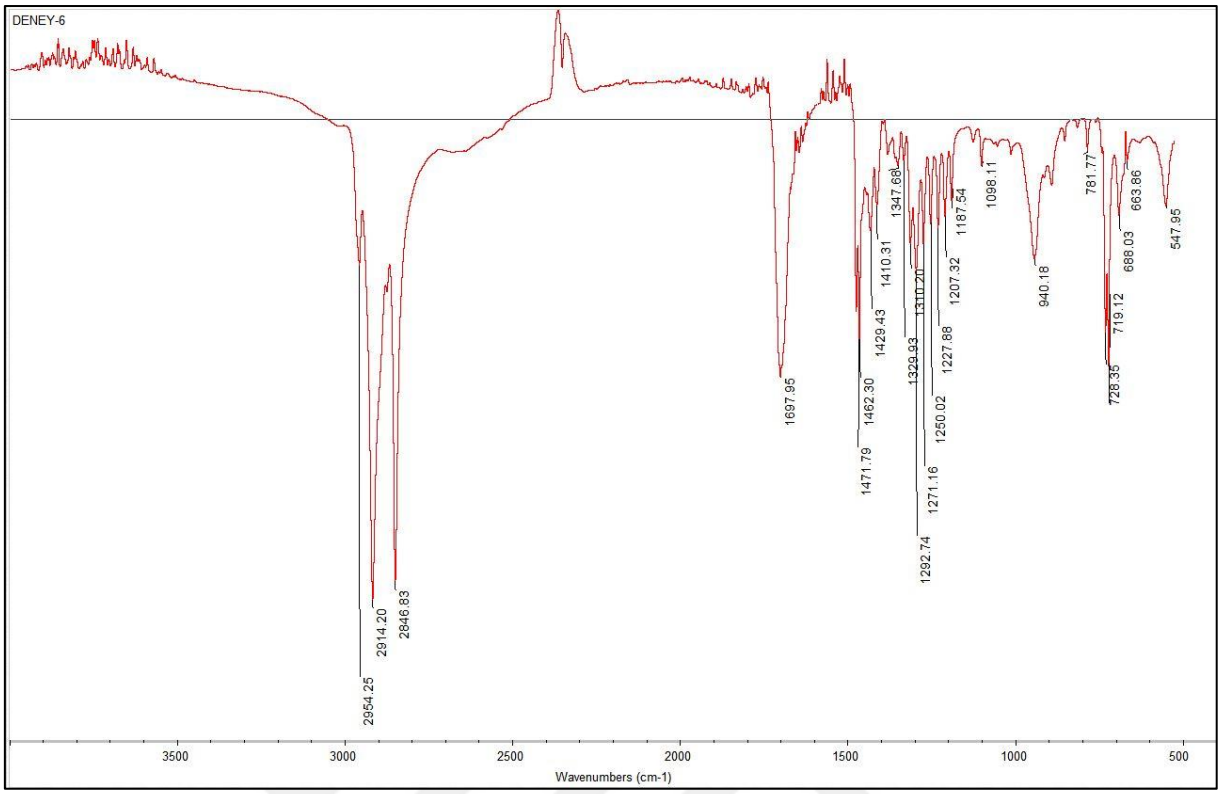
Şekil 4.5. Parafin mumuna ait FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.6. Palmitik aside ait FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.7. Jelatine ait FT-IR analiz sonucu.

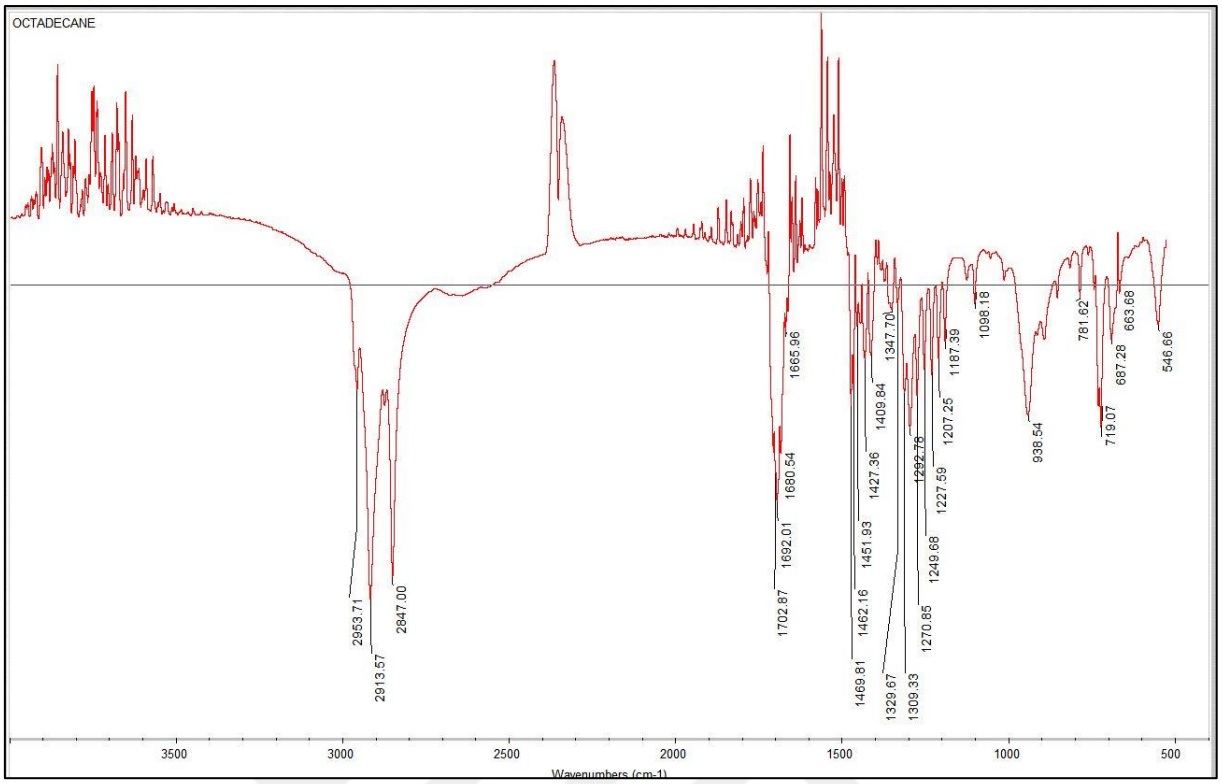


Şekil 4.8.Deney-2 numunesine ait FT-IR analiz sonucu.

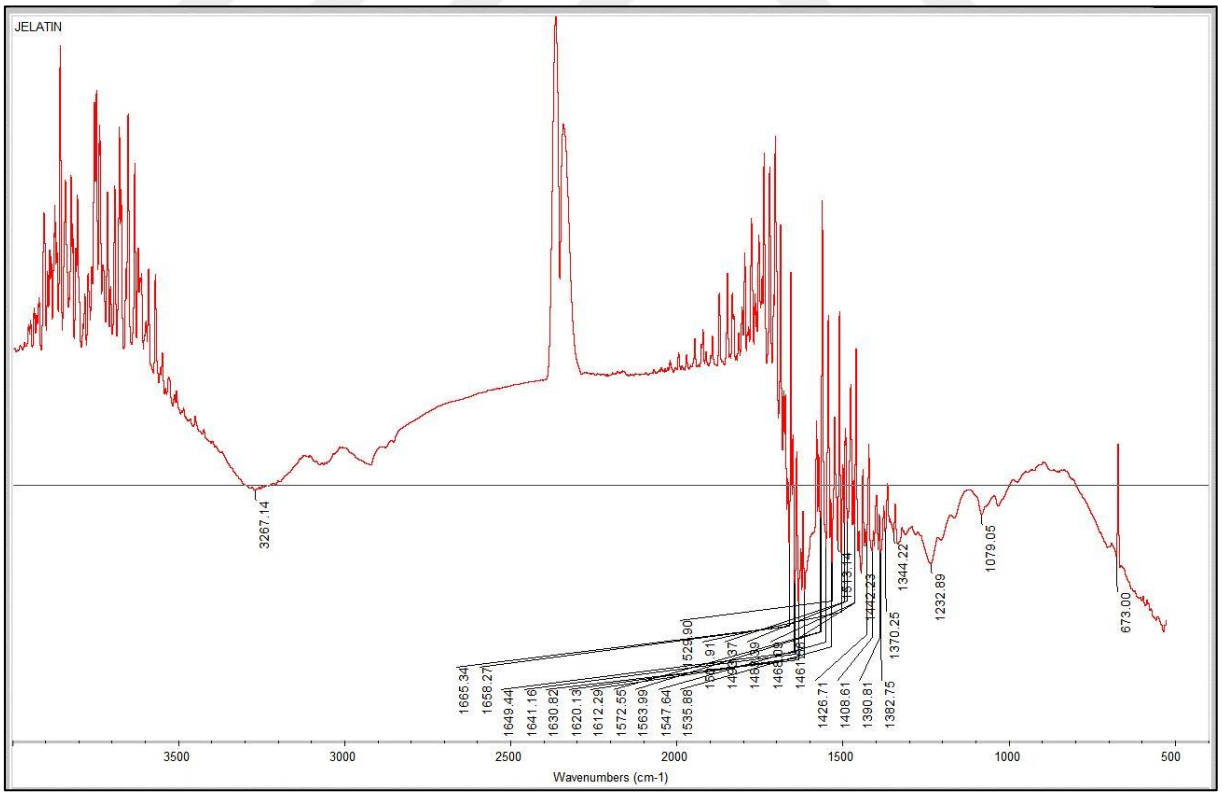
4.3. Deney-3 Karakterizasyon Testleri

4.3.1. Deney-3 FT-IR Analizi Sonucu

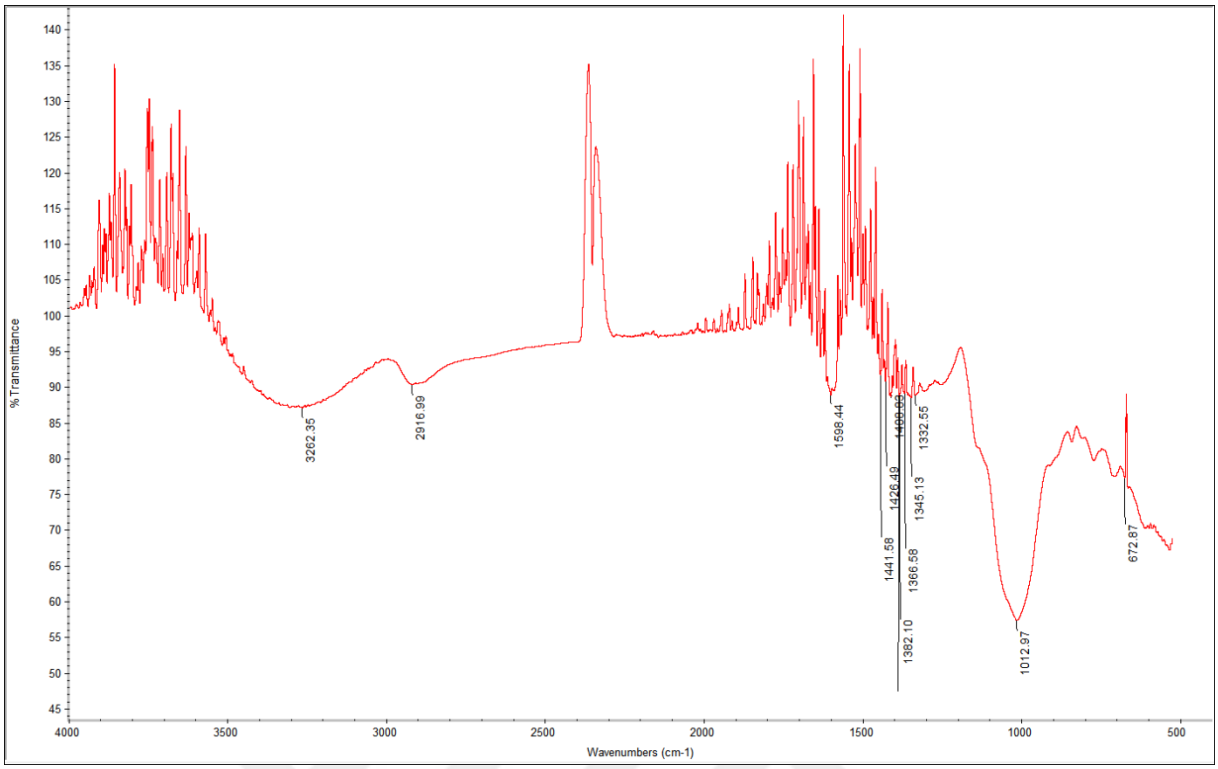
Deney-3'e ait FT-IR analizi sonuçları Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'dedir.



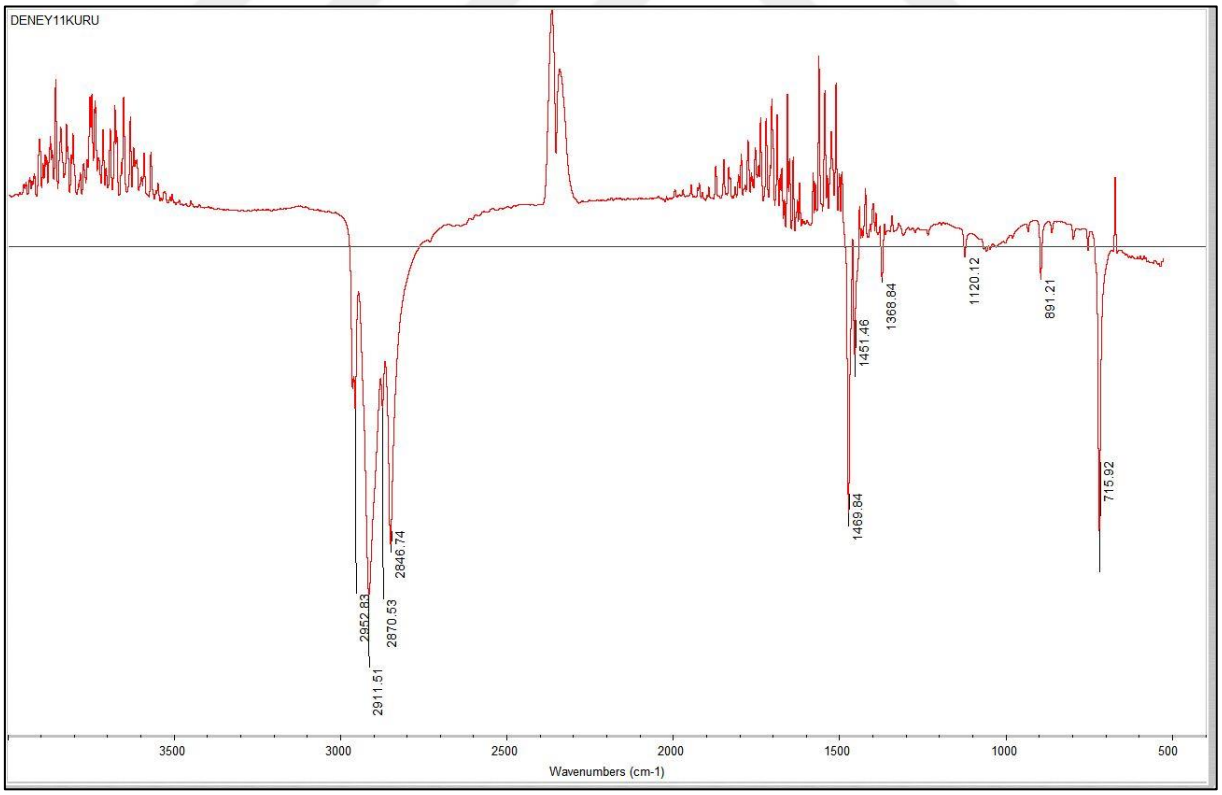
Şekil 4.9. Oktadekana ait FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.10. Jelatine ait FT-IR analiz sonucu.



Şekil 4.11. Arap zamkına ait FT-IR analiz sonucu.

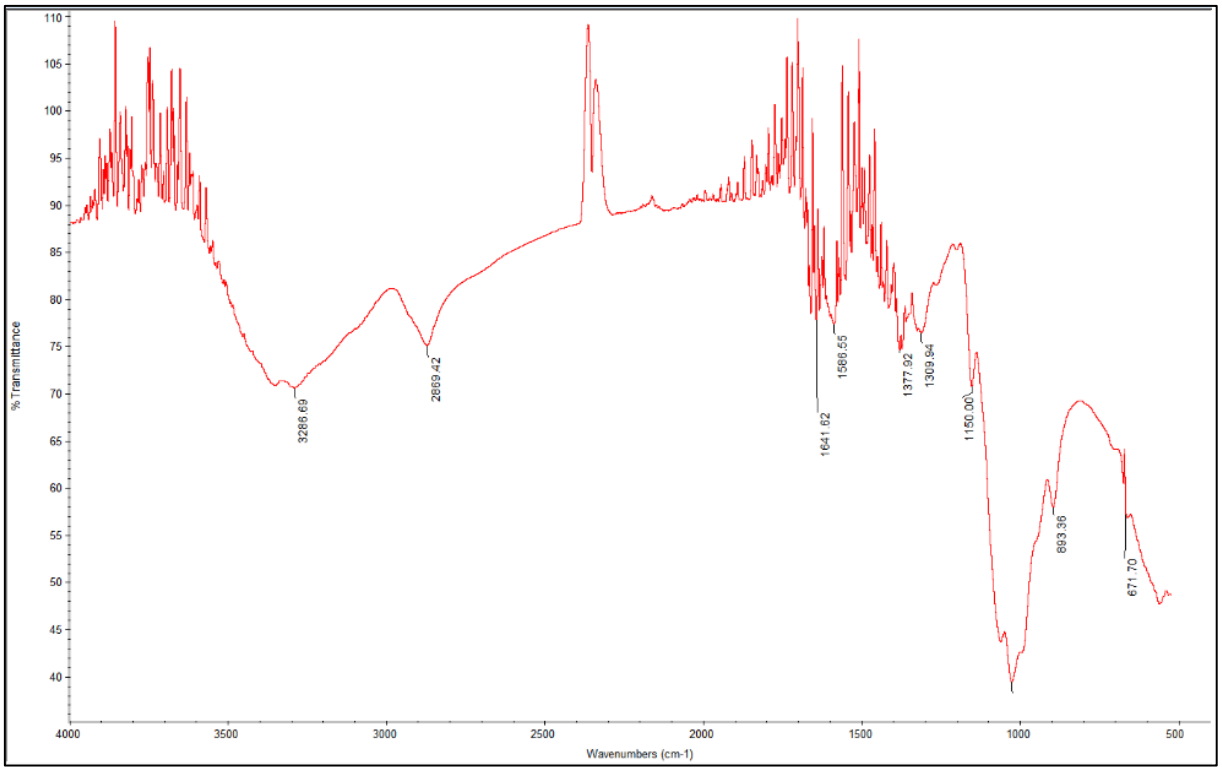


Şekil 4.12. Deney-3 numunesine ait FT-IR analiz sonucu.

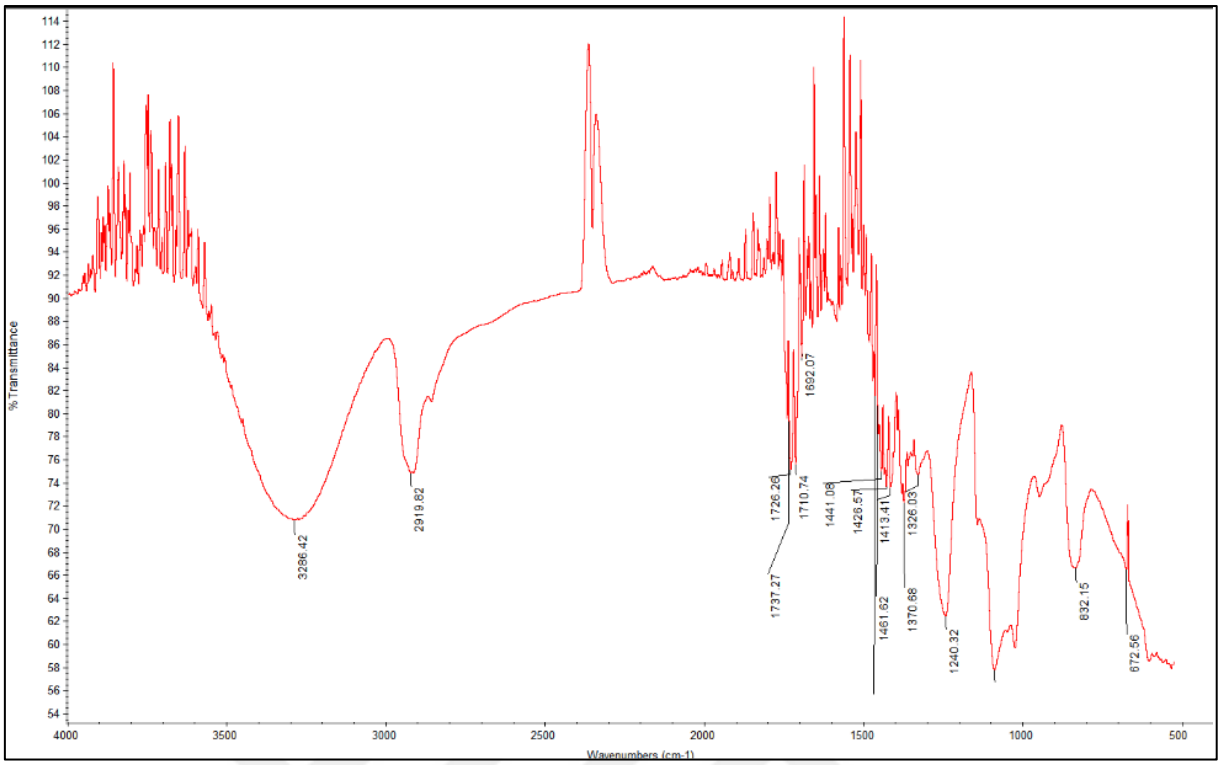
4.4. Deney-4 Karakterizasyon Testleri

4.4.1. Deney-4 FT-IR Analizi Sonucu

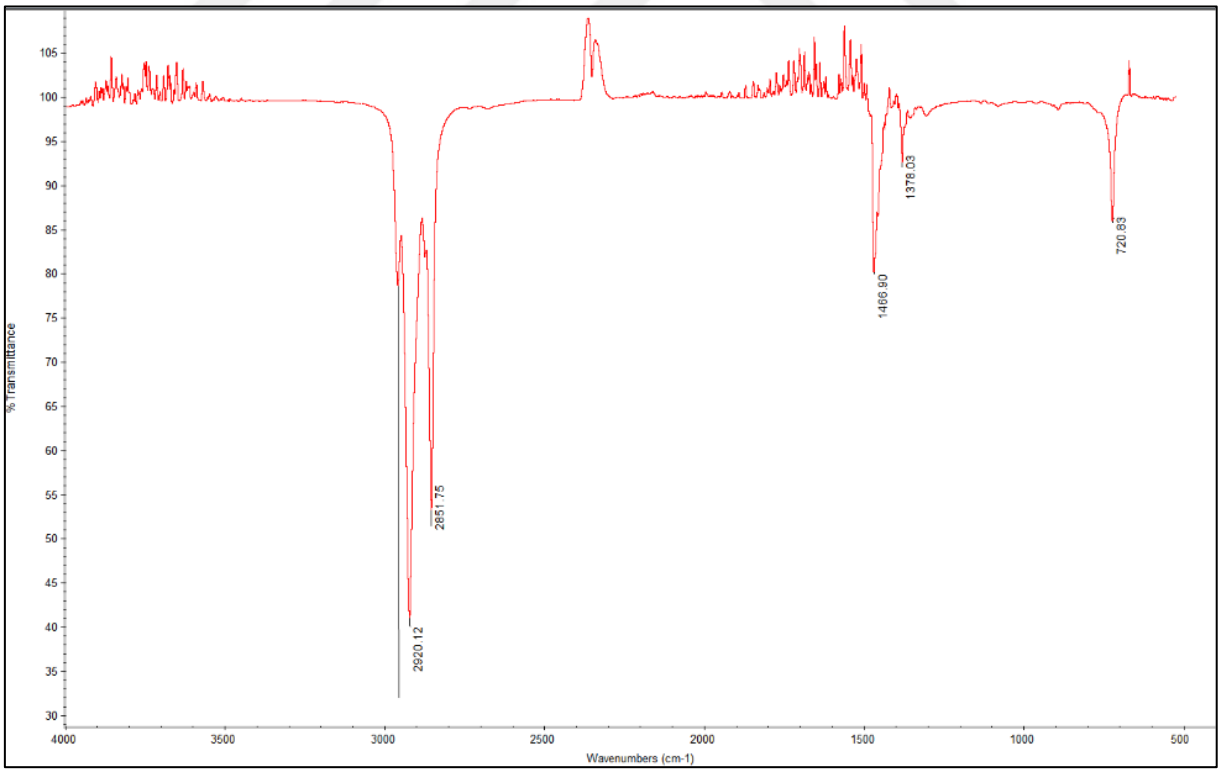
Deney-4'e ait FT-IR analizi sonuçları Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4,15 ve Şekil 4.16'dadır.



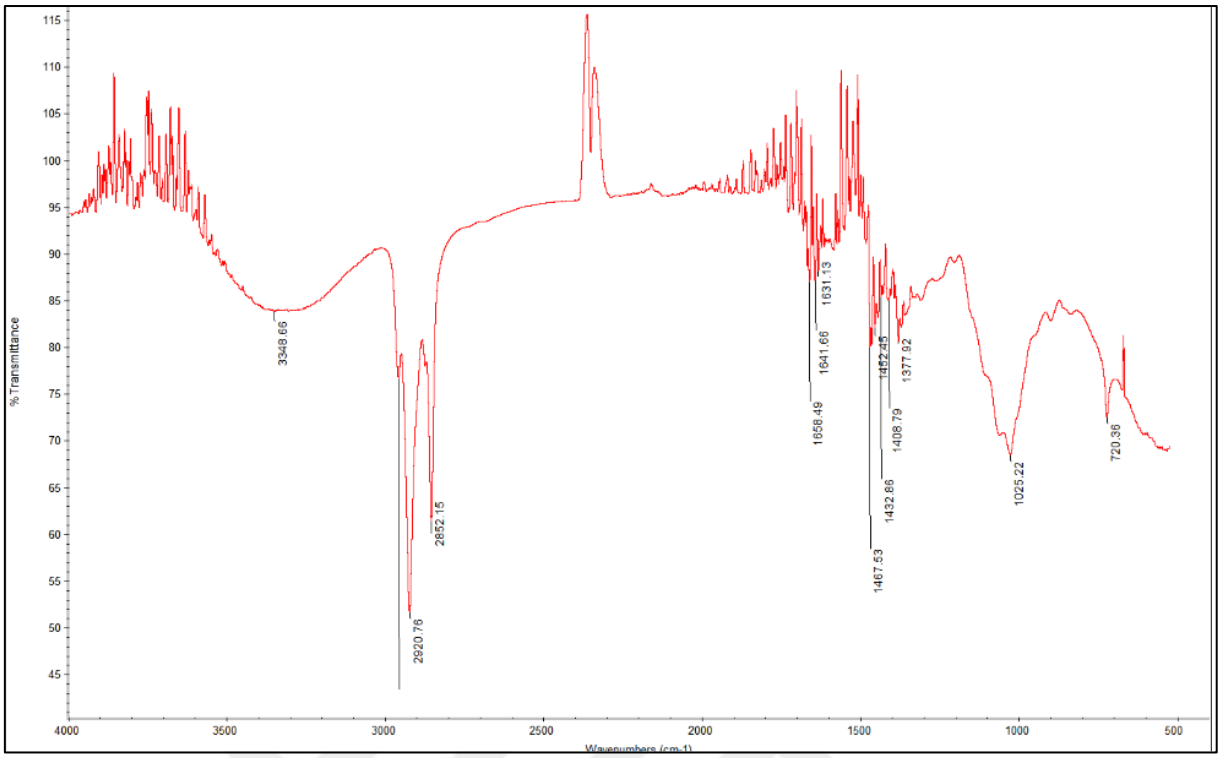
Şekil 4.13. Kitosana ait FT-IR analizi sonucu.



Şekil 4.14. Polivinil alkole ait FT-IR analizi sonucu.



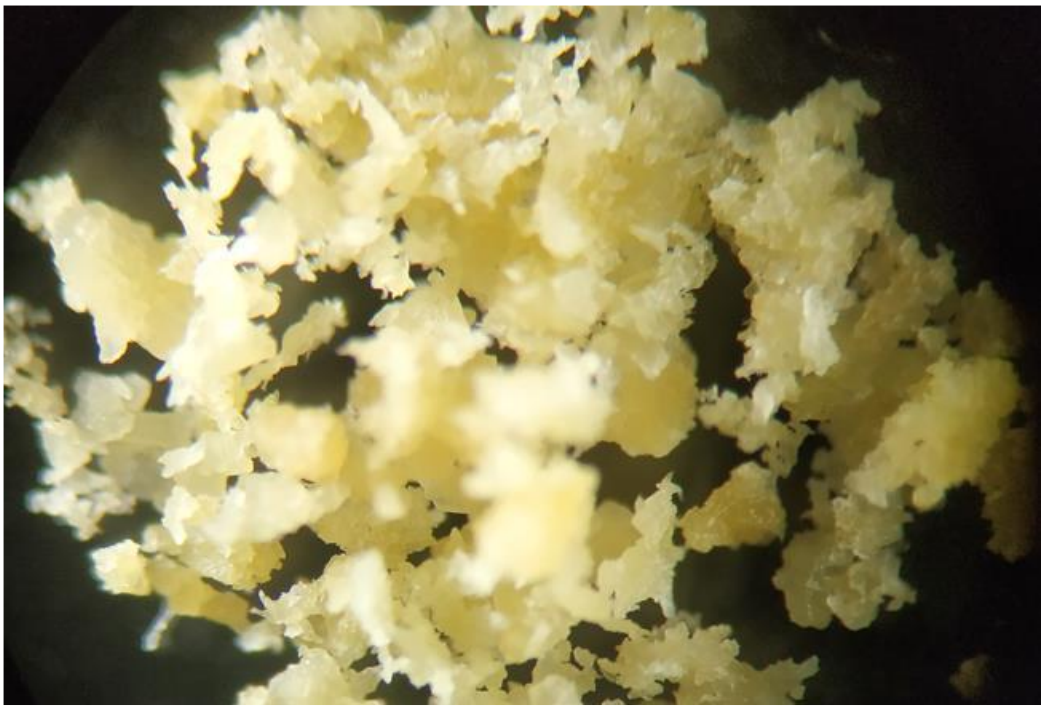
Şekil 4.15. Hegzadekena ait FT-IR analizi sonucu.



Şekil 4.16. Deney-4 numunesine ait FT-IR analizi sonucu.

4.4.2. Deney-4 Stereo Mikroskop İncelemesi

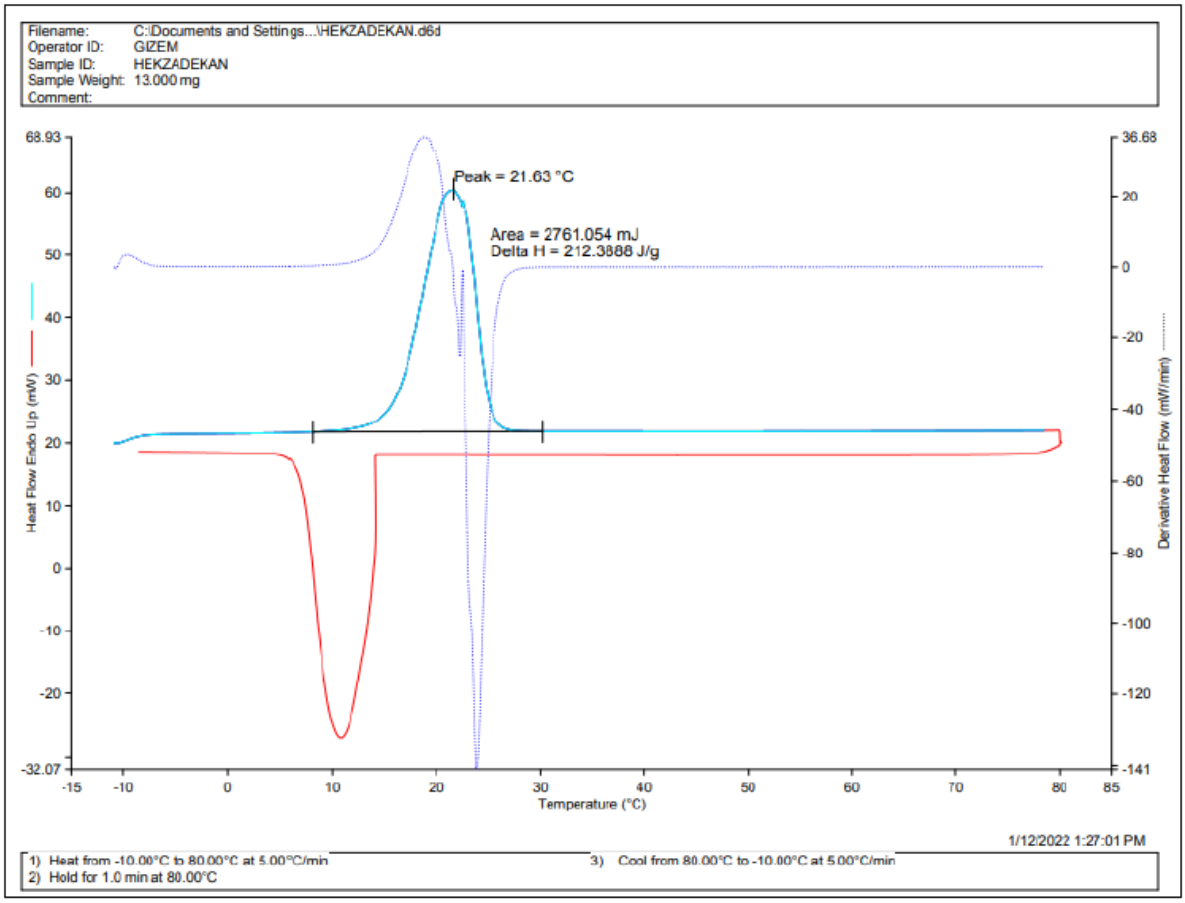
Deney-4'e ait stereo mikroskop görüntüsü Şekil 4.17'dedir.



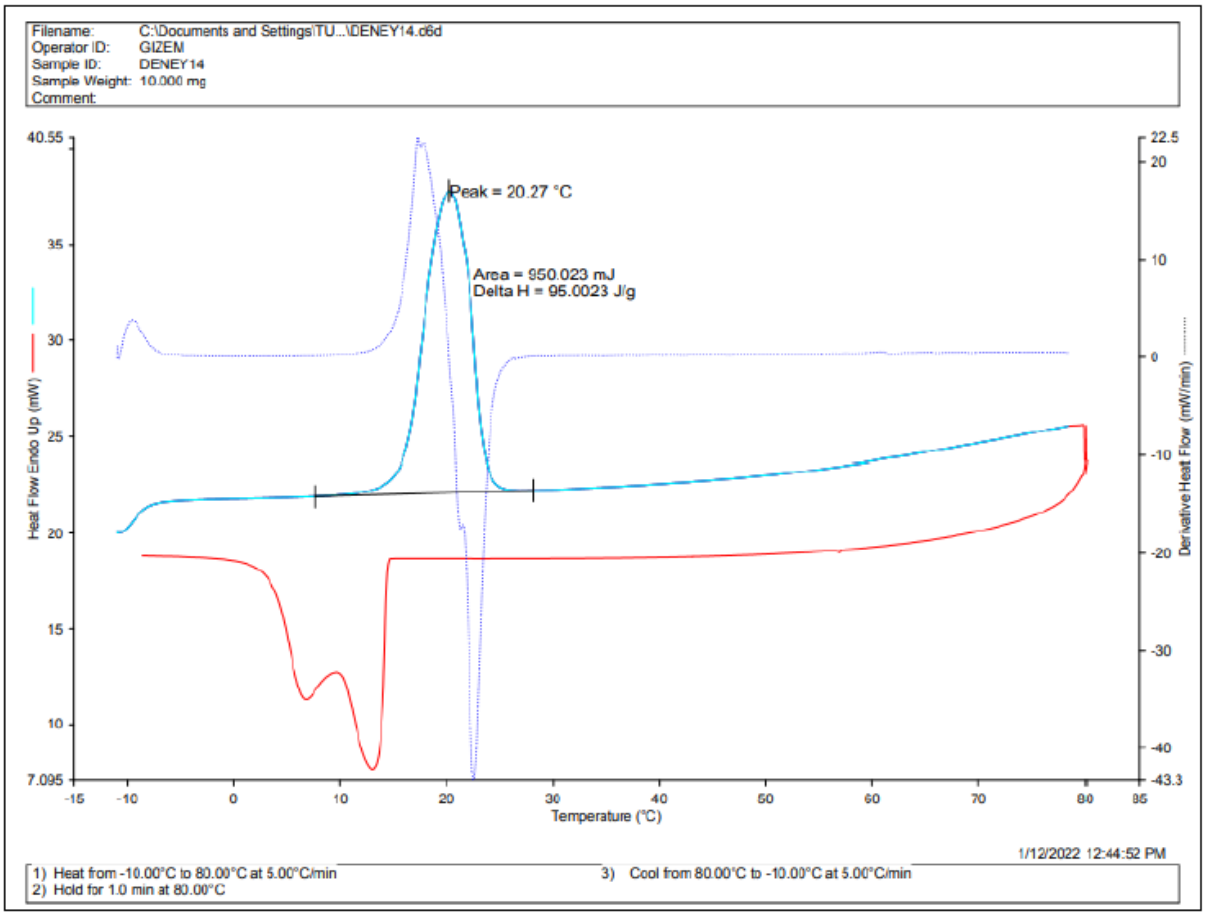
Şekil 4.17. Deney-4 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsü.

4.4.3. Deney-4 DSC Analizi Sonucu

Deney-4 için gerçekleştirilen FDM ve numuneye ait DSC analizi sonuçları Şekil 4.1 ve 4.19'dadır. Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi -10 ℃ ile +80 ℃ sıcaklıkları arasında 5 ℃/min. ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



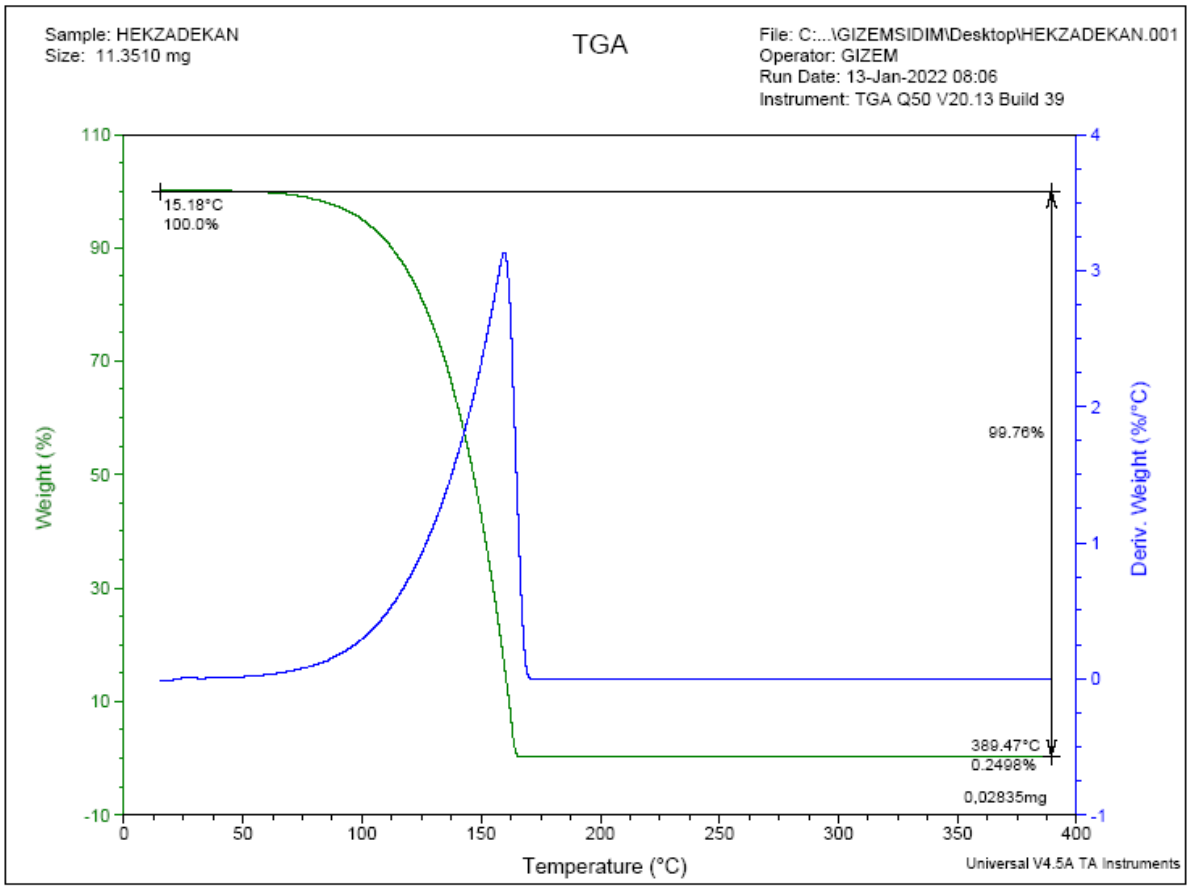
Şekil 4.18. Hegzadekana ait DSC analizi sonucu.



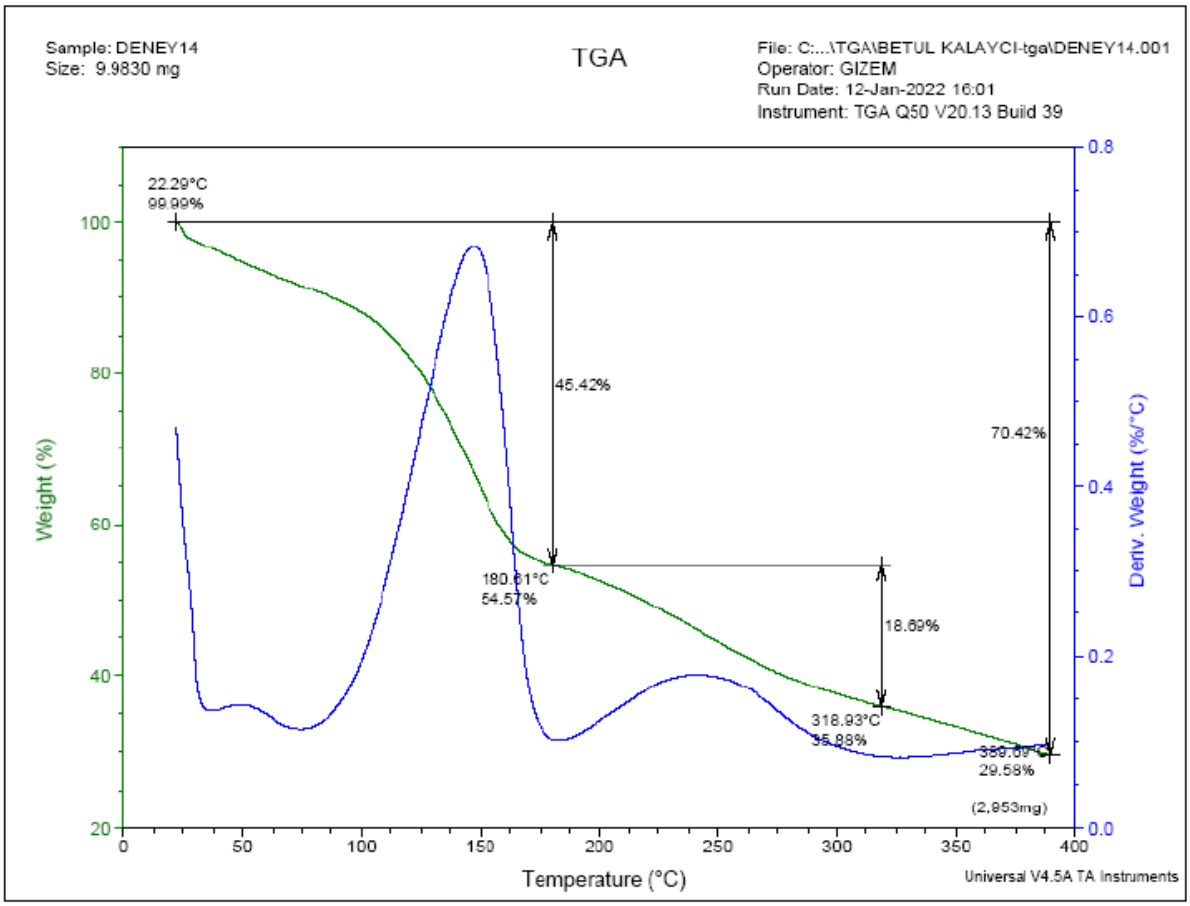
Şekil 4.19. Deney-4 numunesine ait DSC analizi sonucu.

4.4.4. Deney-4 TGA Analizi Sonucu

Deney-4 için gerçekleştirilen FDM'ye ve numuneye ait TGA analizi sonuçları Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'dedir. TGA analizi 0 ℃ ile 400 ℃ sıcaklıkları arasında 10 ℃/min. ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.20. Hegzadekana ait TGA analizi sonucu.

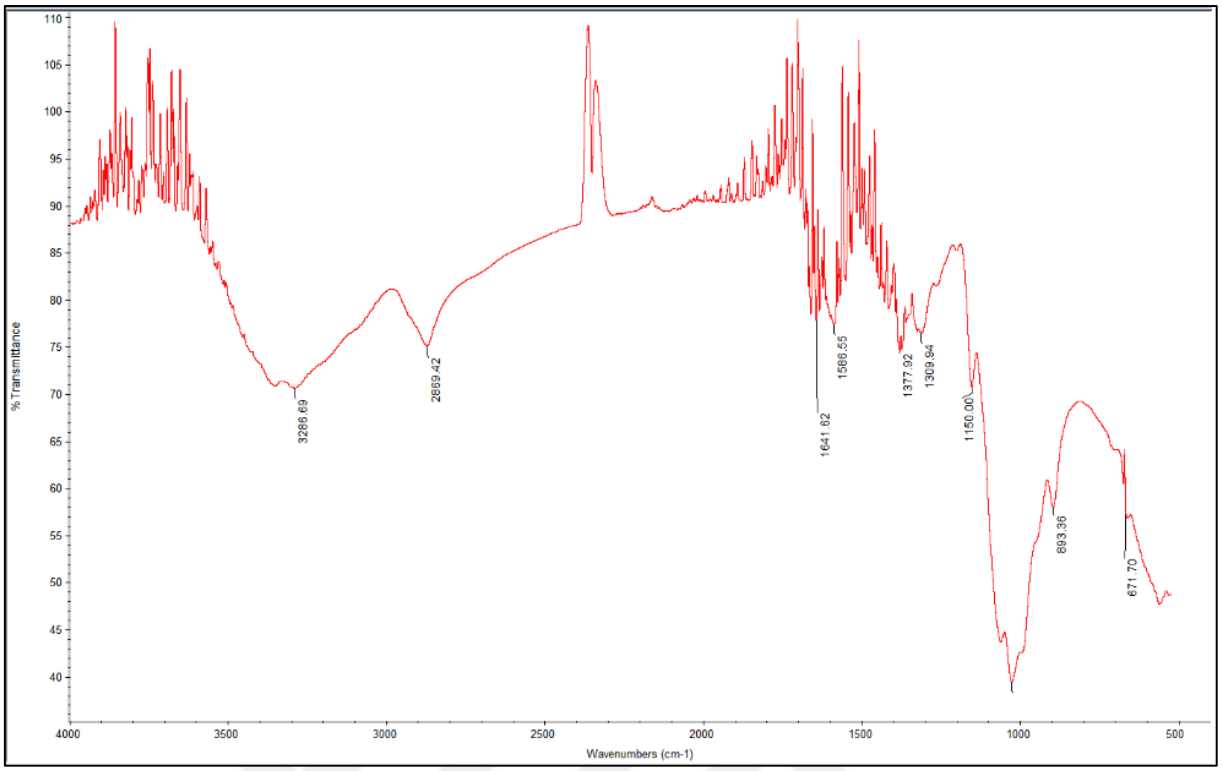


Şekil 4.21. Deney-4 numunesine ait TGA analizi sonucu.

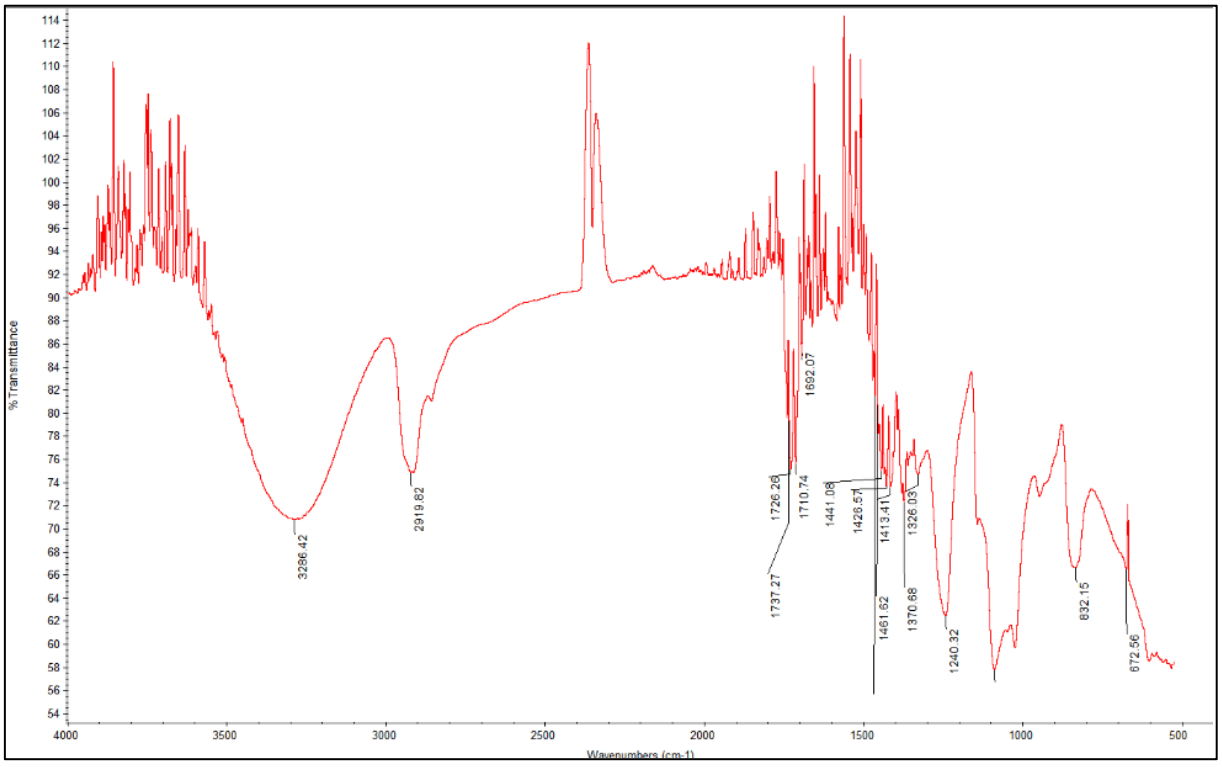
4.5. Deney-5 Karakterizasyon Testleri

4.5.1. Deney-5 FT-IR Analizi Sonucu

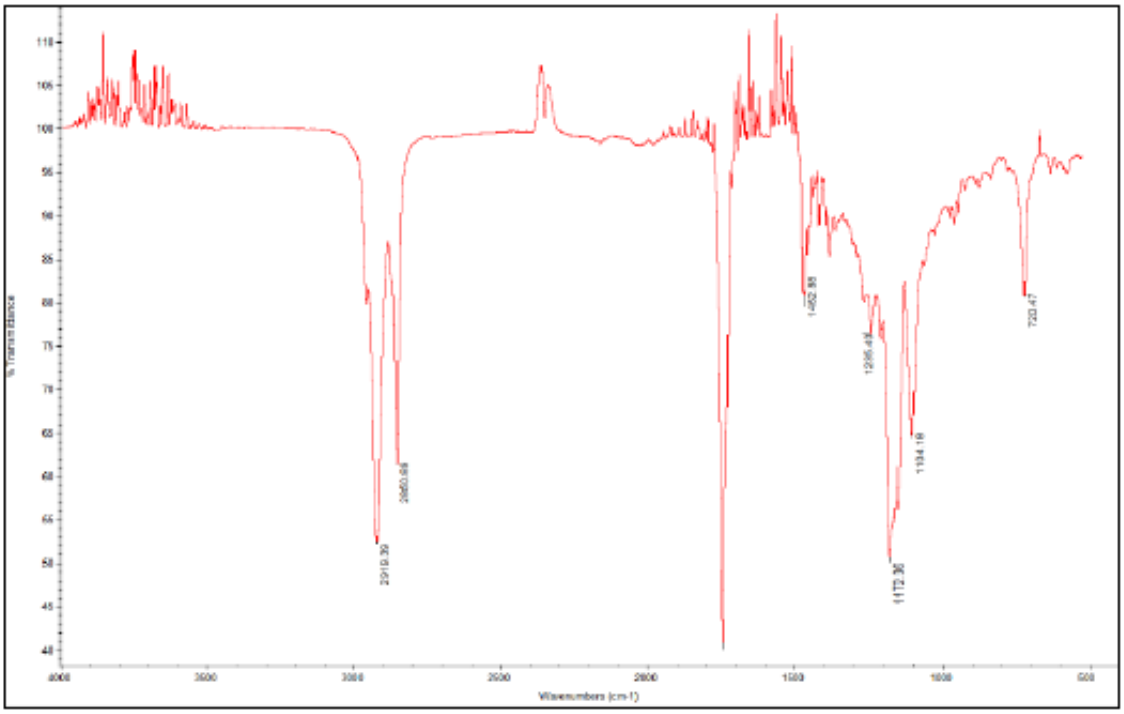
Deney-5'e ait FT-IR analizi sonuçları Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24, Şekil 4.25'tedir.



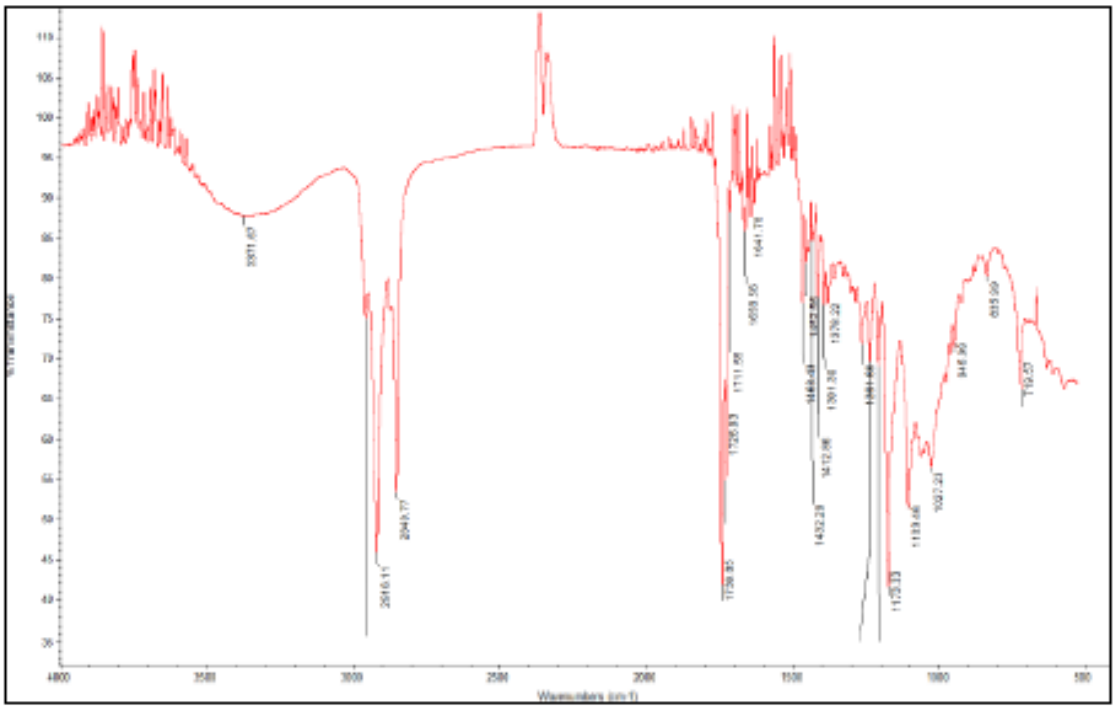
Şekil 4.22. Kitosana ait FT-IR analizi sonucu.



Şekil 4.23. Polivinil alkole ait FT-IR analizi sonucu.



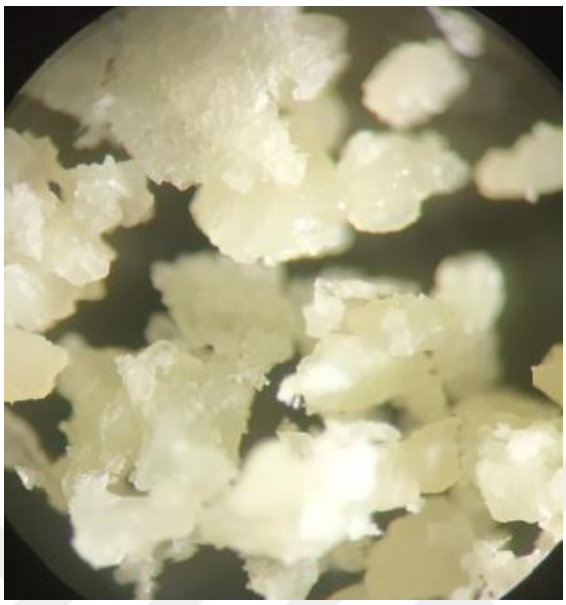
Şekil 4.24. Hindistan cevizi yağına ait FT-IR analizi sonucu.



Şekil 4.25. Deney-5 numunesine ait FT-IR analizi sonucu.

4.5.2. Deney-5 Stereo Mikroskop İncelemesi

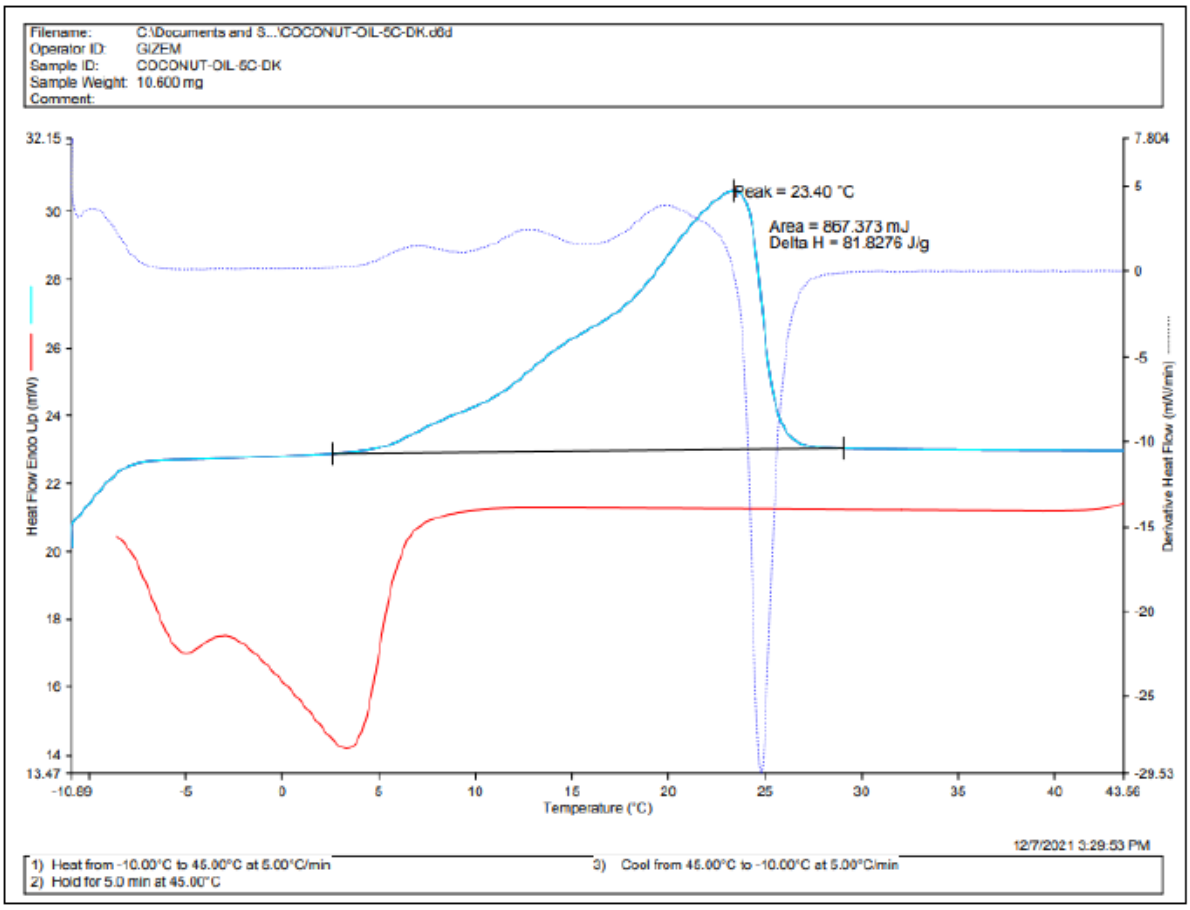
Deney-5 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsü Şekil 4.26'dadır.



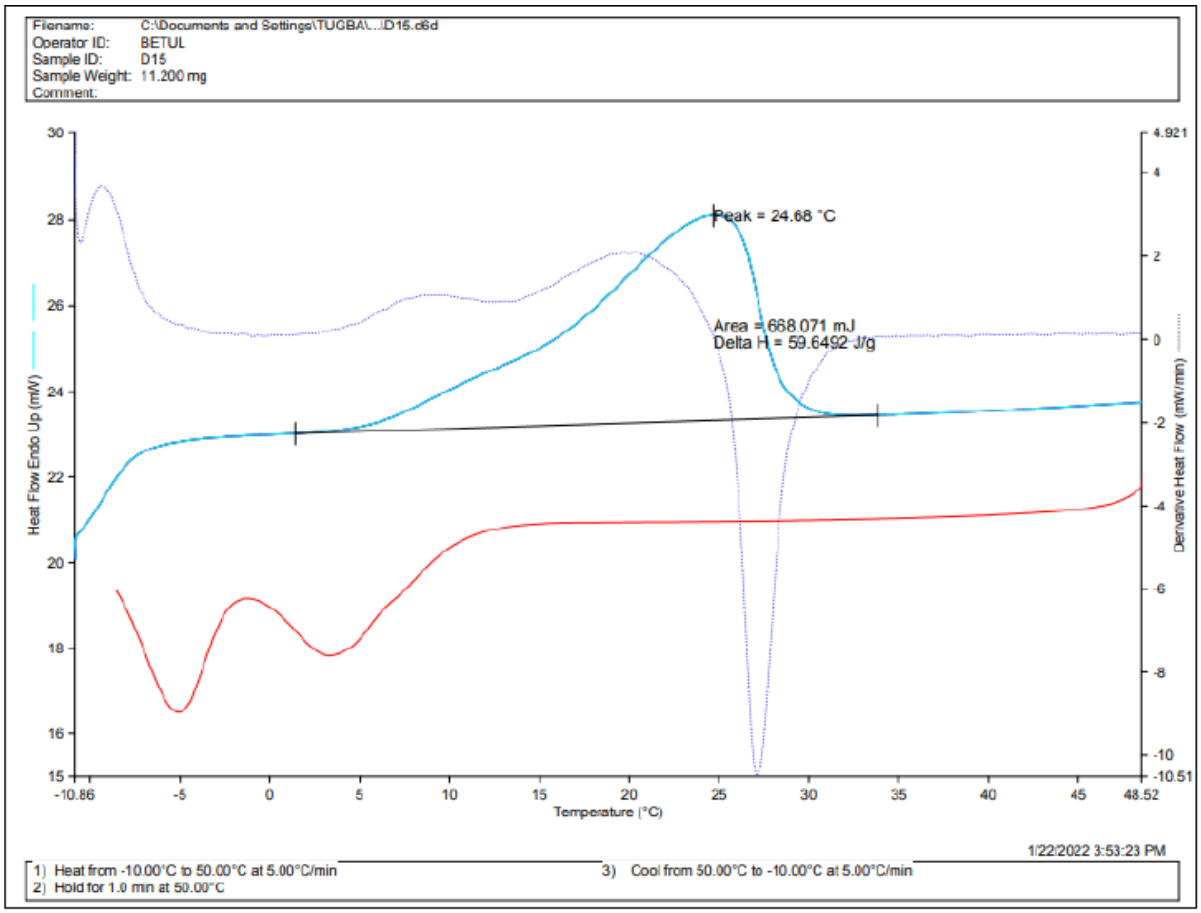
Şekil 4.26. Deney-5 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsü.

4.5.3. Deney-5 DSC Analizi Sonucu

Deney-5 için gerçekleştirilen FDM ve numuneye ait DSC analizi Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'tedir. Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi -10 ℃ ile +80 ℃ sıcaklıkları arasında 5 ℃/min. ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



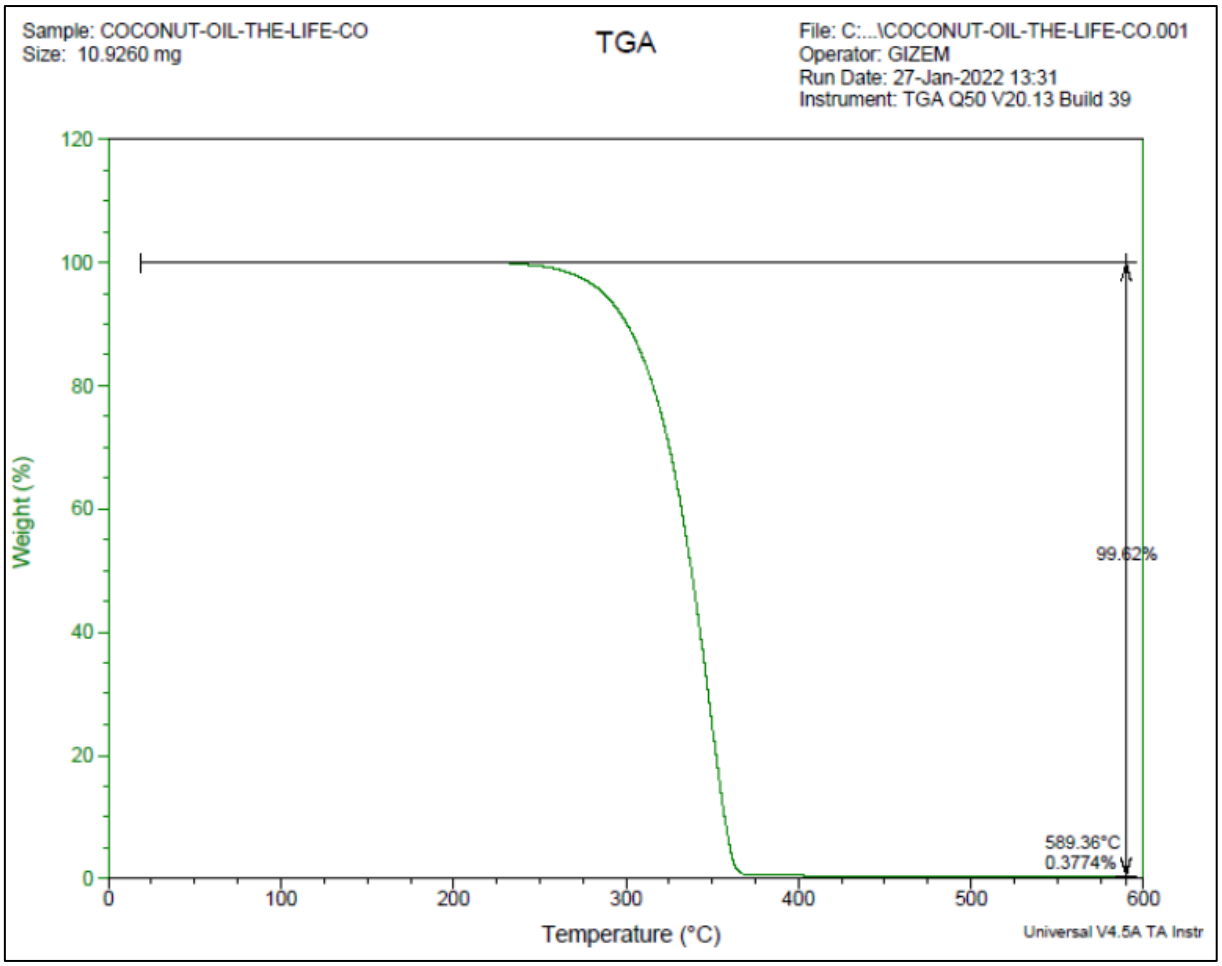
Şekil 4.27. Hindistan cevizi yağına ait DSC analizi sonucu.



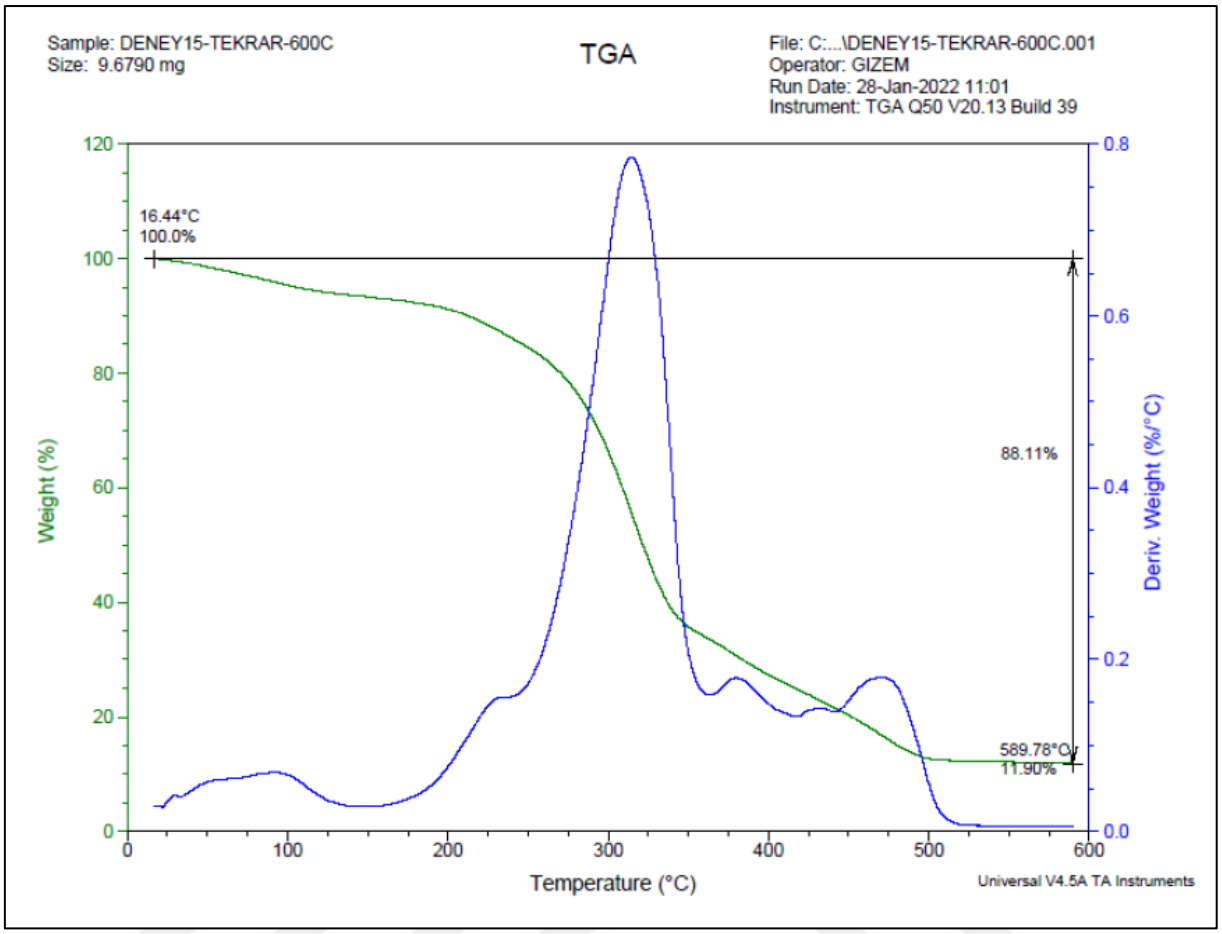
Şekil 4.28. Deney-5 numunesine ait DSC analizi sonucu.

4.5.4. Deney-5 TGA Analizi Sonucu

Deney-5 için gerçekleştirilen FDM ve numuneye ait TGA analizine dair sonuçlar Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'dadır. TGA analizi 0 ℃ ile 600 ℃ sıcaklıkları arasında 10 ℃/min. ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.29. Hindistan cevizi yağına ait TGA analizi sonucu.



Şekil 4.30. Deney-5 numunesine ait TGA analizi sonucu.

5. TARTIŞMA

5 ayrı mikroenkapsülasyon deneyi için karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerden elde edilen sonuçlar aşağıda detaylıca açıklanmıştır. Başarılı kapsülasyonun gerçekleştiği deneylere dair diğer parametreler için analiz yapılması amacıyla Stereo mikroskop, DSC ve TGA testleri yapılmış olup, aşağıda bu sonuçlar verilmiştir.

5.1. Deney-1

Deney-1 numunesine ait FT-IR analizi incelediğinde (Şekil 4.4), jelatin ve arap zamkına ait pikin yer almadığı görülmüştür. Kapsül malzemesine ait pikin olmayışı, kapsülasyonun başarısız gerçekleştiğini göstermektedir.

5.2. Deney-2

Deney-2 numunesine ait FT-IR analizi (Şekil 4.8) incelendiğinde, jelatin ve arap zamkına ait pikin yer almadığı görülmüştür. Kapsül malzemesine ait pikin olmayışı, kapsülasyonun başarısız gerçekleştiğini göstermektedir.

5.3. Deney-3

Deney-3 numunesine FT-IR analizi (Şekil 4.12) incelendiğinde, jelatin ve arap zamkına ait pikin yer almadığı görülmüştür. Kapsül malzemesine ait pikin olmayışı, kapsülasyonun başarısız gerçekleştiğini göstermektedir.

5.4. Deney-4

Deney-4 numunesine ait FT-IR analizi (Şekil 4.16) incelendiğinde FT-IR sonuçlarına göre 2851,75- 2920,12 cm^{-1} arasında gözlenen pikler C-H bağına ait piktir. Bu piklerin varlığı Hekzadekan'ın mikrokapsüllerin yapısındaki varlığını kanıtlamaktadır. Şekil 4.13'te yer alan kitosan polimerine ait FT-IR spektrumu incelendiğinde, 1641,62 cm^{-1} dalga boyunda ortaya çıkan pik amid N-H eğilme pikidir. Kitosan'ın yapısındaki amid grubu çapraz bağlayıcı olan glutaraldehitin yapısındaki aldehit grubu ile reaksiyona girmekte ve Schiff baz C = N (imin) bağı oluşturmaktadır. Nitekim, Deney-4'e ait FT-IR spektrumunda (Şekil 4.16) 1658,49 cm-1 dalga boyunda oluşan yeni bir tepe glutaraldehit ve kitosan reaksiyonu ile oluşan Schiff baz C

= N (imin) bağı gerilme titreşimini temsil eder. Mikrokapsül yapısında ortaya çıkan bu asetal ve imin bağlarının varlığı mikrokapsül yapısındaki kitosan ve polivinil alkolün varlığını açıklamaktadır. Elde edilen FT-IR sonucunda numunenin başarılı kapsüllendiği sonucuna varılmıştır.

Deney-4 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsünde (Şekil 4.17), mikrokapsül formlarının düzensiz yapıda olduğu görülmektedir.

Deney-4'ün faz değiştiren malzemesi hegzadekan ait DSC grafiği incelendiğinde (Şekil 4.18), hekzadekanın ısıtma ve soğutma eğrileri olmak üzere iki adet pik görülmektedir. Hekzadekan 21,63 ℃'de erime davranışı (katı-sıvı faz değişimini) göstermektedir. Hekzadekan erime faz değişimi esnasında ortamdan depoladığı enerji 212,3888 j/g'dır. Deney-4 numunesine ait DSC grafiğine göre (Şekil 4.19), numunenin erime sıcaklığı 20,27℃, ortamdan depoladığı enerji 95,0023 J/g'dir.

Deney-4'ün faz değiştiren malzemesi hegzadekana ait TGA grafiği incelendiğinde (Şekil 4.20), Hekzadekan'ın yaklaşık olarak 90˚C'de bozunmaya başladığı ve kütlesinin tamamını 160 ˚C'de kaybettiği görülmektedir. Hekzadekan'ın TGA bozunma davranışında tek ve keskin düşüş görülmektedir. Deney-4 numunesine ait TGA grafiği incelendiğinde (Şekil 4.21), numunenin kütlesinin %45,42'sini 30 ˚C- 180,61 ˚C'de arasında kaybettiği görülmektedir. Numunenin kütlesinin %18,69'unu 180,61˚C – 318,93 ˚C'de arasında kaybetmektedir. Numune, 389,69 ˚C'de 2,953 mg kalıntı oluşturmuştur. Numunenin TGA bozunma davranışında iki adet ve kademeli düşüş görülmektedir. Bu durum çapraz bağlı yapının varlığını, dolayısıyla kabuk oluşumunun doğru bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

5.5. Deney-5

Deney-5'in FT-IR grafiği incelendiğinde (Şekil 4.25), 2919,11 – 2849,77 cm-1 arasında gözlenen pikler C-H bağına ait piktir. Bu piklerin varlığı hindistan cevizi yağının mikrokapsüllerin yapısındaki varlığını kanıtlamaktadır. Polivinil alkol'e ait -OH grupları ve kitosandaki -OH gruplarının çapraz bağlayıcı (glutaraldehit) ile birleşmesiyle oluşan asetal bağları grafikte 1739,85 – 1711,55 cm-1 dalga boylarında ortaya çıkan pik ile açıklanabilir. Şekil 4.22'de yer alan kitosan polimerine ait FT-IR spektrumu incelendiğinde, 1641,78 cm-1 dalga boyunda ortaya çıkan pik amid N-H eğilme pikidir. Kitosan'ın yapısındaki amid grubu çapraz bağlayıcı olan glutaraldehitin yapısındaki aldehit grubu ile reaksiyona girmekte ve Schiff baz C = N (imin) bağı oluşturmaktadır. Nitekim, numuneye ait FT-IR spektrumunda 1641,78 cm-1 dalga boyunda oluşan yeni bir tepe

glutaraldehit ve kitosan reaksiyonu ile oluşan Schiff baz C = N (imin) bağı gerilme titreşimini temsil eder. Mikrokapsül yapısında ortaya çıkan bu asetal ve imin bağlarının varlığı mikrokapsül yapısındaki kitosan ve polivinil alkolün varlığını açıklamaktadır. Elde edilen FT-IR sonucunda Deney-5 numunesinin başaralı kapsüllendiği görülmektedir.

Deney-5 numunesine ait stereo mikroskop görüntüsünde (Şekil 4.26), mikrokapsül formlarının düzensiz yapıda olduğu görülmektedir.

Deney-5'in faz değiştiren malzemesi hindistan cevizi yağına ait DSC grafiği incelendiğinde (Şekil 4.27) Hindistan cevizi yağının ısıtma ve soğutma eğrileri olmak üzere iki adet pik görülmektedir. Hindistan cevizi yağı 23,40 ℃'de erime davranışı (katı-sıvı faz değişimini) göstermektedir. Hindistan cevizi yağının erime faz değişimi esnasında ortamdan depoladığı enerji 81,8276 j/g'dır. Bu değerler kullanılan ürünün ötektik bileşimine-kimyasal yapısına göre değişmektedir. Deney-5 numunesine ait DSC grafiğine göre (Şekil 4.28) erime sıcaklığı 24,68 ℃'dir. Numunenin ortamdan depoladığı enerji 59,6492 J/g'dir. Mikrokapsülleme işlemi sonrası kullanılan kabuk malzemesine göre entalpi değeri değişim göstermektedir. Polimer esaslı kabuk kullanımı ile entalpide düşüş olmaktadır.

Deney-5'in faz değiştiren malzemesi Hindistan cevizi yağına ait TGA grafiği incelendiğinde (Şekil xx) yaklaşık olarak 260˚C'de bozunmaya başladığı ve kütlesinin tamamını 370 ˚C'de kaybettiği görülmektedir. Hindistan cevizi yağı TGA bozunma davranışında tek ve keskin düşüş görülmektedir. Deney-5 numunesine ait TGA grafiğinde ise (Şekil 4.30), numunenin kütlesinin %66,17'sini 30 ˚C – 361,12˚C'de arasında kaybettiği görülmektedir. Numune, kütlesinin %21,55'ini 361,12 – 525,72˚C'de arasında kaybetmektedir. Numune, 589,78 ˚C'de 1,15 mg bozulmayan kalıntı oluşturmuştur. Numunenin TGA bozunma davranışında iki düşüş görülmektedir. Bu durum çapraz bağlı yapının varlığını dolayısıyla kabuk oluşumunun doğru bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

Deney-1,2,3 muhtemel kapsül malzemesi-FDM uyuşmazlığı sebebiyle kapsüllenmeyerek başarısız sonuçlanmıştır. Deney-4 ve Deney-5 ise başarıyla kapsüllenmiştir.

Ayrıca yapılan deneylerin seçilen parametrelerce uygun sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneylerin malzeme maliyeti ve performans parametrelerine göre değerlendirme sonuçları aşağıdaki tabloda özetlenmiştir (Tablo 5.1.). Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi sonuçlarından faydalanılarak mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Malzeme (FDM) oranı % olarak hesaplanmıştır.

$$\textbf{Mikrokapsüllenmiş FDM (\%)} = [\Delta H_{mikroFDM} / \Delta H_{FDM}] \times 100 \quad \textbf{(5.1)}$$

Burada $\Delta H_{mikroFDM}$ mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddenin erime entalpisini gösterirken, ΔH_{FDM} kapsülenmemiş faz değiştiren maddenin erime entalpisini ifade etmektedir.

Tablo 5.1. Deney sonuçlarının malzeme maliyeti ve performans parametrelerince karşılaştırılması

DENEY NO	FDM	KABUK	Malzeme maliyeti	MFDM Tm (℃)	MFDM ΔHm (J/g)	Kapsül verimi (%)
1	Parafin Mumu	Arap Zamkı+Jelatin	₺22,65	Kapsüllenemedi		
2	Parafin Mumu+Palmitik asit	Arap Zamkı+Jelatin	₺23,05	Kapsüllenemedi		
3	Oktadekan	Arap Zamkı+Jelatin	₺50,66	Kapsüllenemedi		
4	Hegzadekan	PVA+Kitosan	₺36,73	20,27	95,0	44,70%
5	Hindistan cevizi yağı	PVA+Kitosan	₺29,71	24,68	59,6	72%

İlk 3 deneyde kapsüllenme başarısız olmuştur. Sadece Deney-4 ve Deney-5'te başarılı kapsüllenme gerçekleşmiştir. Deney-5'in hem malzeme maliyeti hem de kapsül verimliliği açısından Deney-4'e göre daha uygun olduğu görülmüştür. Fakat Deney-5 FDM entalpisi değeri Deney-4'e göre daha düşüktür. Ayrıca Deney-4'ün faz değişim sıcaklığı Deney-5'e göre yaklaşık 4 ℃ daha düşüktür.

Sonuç olarak, iklim bölgesi ve uygulama amacına göre tablodaki ekonomik ve termal performans verileri için seçim yapılabilecektir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında, binalarda termal konfor şartlarını sağlayacak ve enerji verimliliğini arttıracak yapı malzemeleriyle uyumlu MFDM'ler (mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler) sentezlendi. FDM'lerin erime ve katılaşma özelliğinden faydalanılarak gizli ısıl

enerji depolama gerçekleştirildi. Çalışmada, termal konfor sıcaklığında 5 ayrı faz değiştiren malzeme enkapsüle edilerek yapı malzemeleriyle kullanılabilecek özelliklerde üretimi için proses optimizasyon çalışması gerçekleştirildi.

Yapılan deneylerde maliyet, erime sıcaklığı, entalpi ve kapsüllenme verimliliği gibi ticari ürün vasfı taşıyan bir ürün elde edilmesi için önem arz eden parametrelere dikkat edildi.

Elde edilen MFDM'lere karakterizasyon testleri yapıldı. Numunelere, mikrokapsüllerin kabuk oluşumu ve çekirdek malzeme varlığının tespit edilebilmesi için FT-IR spektroskopisi analizi yapıldı. İlk 3 deneye ait numunenin kapsüllenmediği görüldü. Deney-4 ve Deney-5 FT-IR sonuçları ve bunu destekleyen Stereo mikroskop, DSC ve TGA analizlerine göre kapsüllenme başarıyla gerçekleşti. Yapılan tüm bu analiz sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen Deney-4'e ait MFDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin 95,0023 J/g mikrokapsülleme oranının ise %44,7 olduğu görüldü. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen Deney-5'e ait MFDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin 59,64 J/g mikrokapsüllenme oranının ise %72 olduğu görüldü.

Yapılan çalışmanın yüksek enerji performanslı sürdürülebilir konutların ve iklimlendirme sistemlerinin geliştirilmesine olumlu katkı sağlayacağı görülmüştür.

Yapılarda enerji tüketiminin düşürülmesi ve yenilenebilir kaynaklardan faydalanılabilmesi için geliştirilen mikro kapsüllerin büyük ölçekte üretimi gerçekleştirilecek ardından da gerçek ölçekli bir yapı üzerinde MFDM'li yapı elemanının mekanik ve termal etkileri/termal performansı incelenecektir.

KAYNAKLAR

(2021, Mart 12). Parashtmr weebly: https://pareshtmr.weebly.com/home/category/energy adresinden alındı

(2021, Mart 12). Climator: https://www.climator.com/en/pcm-climsel adresinden alındı

A.M. Khudhair, M. F. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 264-275.

Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. . *Solar Energy*, 313-332.

Ahmed Hassan, M. S. (2016). Micro-Encapsulated Phase Change Materials: A Review of Encapsulation, Safety and Thermal Characteristics. *Sustainability*.

AhmetSarı. (2004). Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid–liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties. *Energy Conversion and Management*, 2033-2042.

Alexander M.Thiele, G. S. (2015). Diurnal thermal analysis of microencapsulated PCM-concrete composite walls. *Energy Conversion and Management*, 215-227.

Amirreza Fateh, F. K. (2017). Numerical and experimental investigation of an insulation layer with phase change materials (PCMs). *Energy and Buildings*, 231-240.

ARGE YAPI İZOLASYON. (2022). argeyapiizolasyon.com: https://www.argeyapiizolasyon.com/yuksek-performansli-isi-yalitim-malzemeleri adresinden alındı

Atul Sharma, V. T. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 318-345.

Belén Zalba, J. M. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 251-283.

Beyza BEYHAN, K. C. (2015). Bina Yapı Malzemeleri İçin Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Madde Geliştirilmesi. *Teskon 2015 Bildiriler Kitabı* (s. 1469-1480). Makina Mühendisleri Odası.

D Heim, J. C. (2004). Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r. *Energy and buildings*, 795-805.

D. Kalz, J. P. (2006). Thermally Activated Building Systems Using Phase-Change-Materials. *In Proc. of EUROSUN* , Vol. 293, No. 9.5.

D.Zhou, C. Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 593-605.

Duraković, B. (2020). *PCM-Based Building Envelope Systems: İnnovative Energy Solutions for Passive Desing.* Switzerland: Springer.

Eklas Hossain, H. M. (2020, Temmuz). A Comprehensive Review on Energy Storage Systems:Types, Comparison, Current Scenario,Applications, Barriers, and Potential Solutions,Policies, and Future Prospects. *energies*.

Elif Köksal, F. G. (2017). Kompleks Koaservasyon Yöntemi ile E Vitamini İçeren Mikrokapsül Üretimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi*, 1-14.

Erlin Meng, H. Y. (2017). Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter. *Applied Thermal Engineering*, 212-225.

Esra Mirmahmutoğulları, B. U. (2022). Faz Değiştiren Malzeme Enkapsülasyon Prosesinin Geliştirilmesi. *3rd International Academic Researches for Sustainability 2021 Kongresi* (s. 31-43). İstanbul: Artikel Akademi.

Feng, N. Y. (2019). *United States Patent No. US10485739B2.*

Fleischer, A. S. (2015). *hermal Energy Storage Using Phase Change Materials: Fundamentals and Applications.* USA: Springer.

Francesco Guarino, A. A. (2017). PCM thermal storage design in buildings: Experimental studies and applications to solaria in cold climates. *Applied Energy*, 95-106.

Garcia, J. M. (2017). *Spain Patent No. ES1184908U.*

Güldemet BAŞAL, S. K. (2012). MEDİKAL TEKSTILLER İÇİN ANTİMİKROBİYEL AJAN İÇEREN. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 174-178.

H. Mehling, L. C. (2007). *Phase Change Materials: Application Fundamentals. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption.* Berlin: Springer.

H.J. Akeiber, S. H. (2017). Thermal performance and economic evaluation of a newly developed phase change material for effective building encapsulation. *Energy Conversion and Management*, 48-61.

Haghighat, F. (2015). *Applying Energy Storage in Building of the Future Best Practice for Architects and Engineers.* Canada: ANNEX 23.

Hasnat Jamil, M. A. (2016). Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building. *Energy and Buildings*, 217-229.

HAWLADER, M. N. (2002). Microencapsulated PCM thermal energy storage system. *Applied Energy 74*, 195-202.

Huashan Bao, Z. M. (2022). Thermochemical energy storage. T. M. Letcher içinde, *Storing Energy* (s. 651-683). Elsevier Inc.

İbrahim Dinçer, M. A. (2011). *Thermal Energy Storage Systems and Applications.* United Kingdom: A Jhon Wiley and Sons, Ltd., Publication.

J·F·罗德里格斯罗梅罗M·L·桑切斯席尔瓦P·桑切斯帕雷德斯A·德卢卡斯马丁内斯M·L·托里斯巴雷托. (2012). *Çin Patent No. CN101437854B.*

K. Biswas, R. A. (2014). Low-cost phase change material as an energy storage medium in building envelopes: experimental and numerical analyses. *Energy Conversion and Management*, 1020–1031.

Kaasinen, H. (1992). Absorption of phase change substances into commonly used building materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 173–179 .

Karunesh Kant, A. A. (2017). Heat transfer studies of building brick containing phase change materials. *Solar Energy*, 1233-1242.

Kaushik Biswas, R. A. (2014). Low-cost phase change material as an energy storage medium in building envelopes: Experimental and numerical analyses. *Energy Conversion and Management*, 1020-1031.

L.F. Cabeza, C. C. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy Buildings*, 113-119.

LF Cabeza, C. C. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and buildings*, 113-119.

LF Cabeza, I. M. (2015). Introduction to thermal energy storage (TES) systems. *In Advances in thermal energy storage systems*, 1-28.

Luisa F. Cabeza, A. H. (2005). *Report of IEA Solar Heating and Cooling programme - Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings.* Spain: International Energy Agency.

Lv Shilei, F. G. (2007). Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. *Energy and Buildings 39(10)*, 1088-1091.

M. Hunger, A. E. (2009). The direct incorporation of micro-encapsulated Phase Change Materials in the concrete mixing process–A feasibility study. *Lifecycle Design of Buildings, Systems and Materials*, 141.

M. Song, F. N. (2018). Review on building energy performance improvement using phase change materials. *Energy Buildings*, 776–793.

M.İten, S. (2014). A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems. *Energy Conversion and Management*, 608-627.

M.N.A.Hawlader, M. M. (2003). Microencapsulated PCM thermal-energy storage system. *Applied Energy*, 195-202.

Manish K. Rathod, J. B. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 246-258.

Maria Natalia R. Dimaano, T. W. (2002). The capric–lauric acid and pentadecane combination as phase change material for cooling applications. *Applied Thermal Engineering 22 (4)*, 365-377.

Mehmet Kozak, Ş. K. (2012). Enerji Depolama Yöntemleri. *SDU International Technologic Science*.

Memon, S. A. (2014). Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.042*, 870-906.

Mohamed Lachheb, Z. Y. (2017). Thermal behavior of a hybrid PCM/plaster: A numerical and experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 49-59.

Mohammad Kheradmand, M. A.-G. (2016). Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings. *Energy*, JoãoCastro-Gomes.

Mohammad Saffari, A. G. (2016). Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model. *Energy and Buildings*, 159-172.

MT Plytaria, C. T. (2018). Thermal behavior of a building with incorporated phase change materials in the South and the North Wall. *Computation*, 2.

Murad, S. A.-H. (2017). *United States Patent No. US9784509B2.*

N.Soares, A. P. (2016). Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications. *Energy and Buildings*, 18-34.

National Gypsum Services Company. (2021, Mart 12). National gypsum: https://www.nationalgypsum.com/ adresinden alındı

Özonur, Y. (2004). Düşük Sıcaklıkta Termal Enerji Depolamasına Uygun. *Ç.Ü. Fen Bilimleri Ens. Yüksek Lisans Tezi*.

ÖZONUR, Y. M. (2003). Termal enerji depolanması için parafinin mikrokapsüllenmesi. İstanbul: Türkiye 9. Enerji Kongresi.

P.Schossig, H.-M. S. (2005). Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 297-306.

Palomino, J. G. (2009). *İspanya Patent No. ES2306624B1.*

Paula Marin, M. S. (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. *Energy and Buildings*, 274-283.

Prashant Verma, V. S. (2008). Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 999-1031.

R Millers, A. K. (2019). Thermally Activated Concrete Slabs with Integrated PCM Materials. *E3S Web of Conferences 111, 01080* (s. 6). Latvia: EDP Sciences.

Reza Barzin, J. J. (2016). Application of weather forecast in conjunction with price-based method for PCM solar passive buildings – An experimental study. *Applied Energy*, 9-18.

Riazzi, D. A. (2010). *United States Patent No. US20100087115A1*.

S. Scalat, D. B. (1996). Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 49–61.

Szymocha, K. (2007). *European Patent Office Patent No. EP1649221B1*.

Telkes, M. (1975). Thermal energy storage in salt hydrates. *Solar Energy Materials*, 381-393.

Tran, B. (2017). *United States Patent No. US9566608B2.*

Tumirah Khadiran, M. Z. (2016). Advanced energy storage materials for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 916-928.

TYREE, S. (2016). *European Patent Office Patent No. EP2806771B1*.

Xu Wang, H. Y. (2016). Experimental assessment on the use of phase change materials (PCMs)-bricks in the exterior wall of a full-scale room. *Energy Conversion and Management*, 81-89.

Xuming Mi, R. L. (2016). Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China. *Applied Energy*, 324-336.

Y. Zhang, G. Z. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 2197–2209.

Y.P. Zhang, K. L. (2006). Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 1262-1269.

Y.P.Zhang, K. R. (2006). Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 1262-1269.

Yannick Berthou, P. H. (2015). Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials. *Solar Energy*, 733-742.

Yantong Li, N. N. (2020). Building heating applications with phase change material: A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 101634.

Yeliz KONUKLU, O. E. (2017). TERMAL ENERJİ DEPOLAMA MATERYALİ OLARAK DİYATOMİT/FAZ DEĞİŞTİREN MADDE KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİLMESİ. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 283-243.

Yeliz Özonur, H. O. (2006). Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material. *Internatıonal Journal Of Energy Research*, 741-749.

Yuka Kusama, Y. I. (2017). Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster under different insulation and heating scenarios. *Energy and Buildings*, 226-237.

ゲスタ・ペル・サンドベリ. (2013). *Japan Patent No. JP2013537270A.*

朱沁萱韩如**冰唐中**华王晶王睿谭静黄虹卿玉涛. (2016). *China Patent No. CN105570973A.*

李水生孙鹏程俞准刘政轩秦迪孙芙蓉傅炎朝李贝刘世辉. (2017). *Çin Patent No. CN107062474A.*

蔡阳. (2016). *Çin Patent No. CN106046229A.*

高佳佳严天张源徐新华. (2020). *China Patent No. CN109539602A.*