

**YALOVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ISIL ENERJİNİN FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER
KULLANILARAK DEPOLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cansu GÜMÜŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

**ISIL ENERJİNİN FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER
KULLANILARAK DEPOLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CANSU GÜMÜŞ
145103010**

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Selçuk MERT
İkinci Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hatice Hande MERT**

HAZİRAN 2019

YALOVA Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 145103010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **CANSU GÜMÜŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**ISIL ENERJİNİN FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER KULLANILARAK DEPOLANMASI**" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.


Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Selçuk MERT**
Yalova Üniversitesi



İkinci Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Hatice Hande MERT**
Yalova Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Emel AKYOL**
Yıldız Teknik Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Selçuk MERT
Yalova Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Korkut AÇIKALIN
Yalova Üniversitesi



Teslim Tarihi : 16 Mayıs 2019
Savunma Tarihi : 12 Haziran 2019





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında faz değıştiren maddeler incelenmiş olup bu tez çalışmasının planlanmasında, yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her türlü desteği sağlayan danışman hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi M. Selçuk MERT ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi H. Hande MERT'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasını destekleyen, Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (BAP Proje No:2016/YL067) teşekkür ederim.

Ayrıca beni her konuda destekleyen ve her zaman yanımda olan Aileme ve Eşime sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2019

Cansu GÜMÜŞ
Enerji Sistemleri Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Enerji Depolama Yöntemleri	3
1.1.1 Isı enerjisi depolama yöntemleri	4
1.1.1.1 Duyulur ısı enerjisi depolama	4
1.1.1.2 Termokimyasal ısı enerjisi depolama.....	5
1.1.1.3 Gizli ısı enerjisi depolama.....	6
2. FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER	9
2.1 Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması	9
2.2 Faz Değiştiren Maddelerin Avantajları ve Dezavantajları	13
2.3 Faz Değiştiren Maddelerin Seçim Kriterleri	14
2.4 Faz Değiştiren Maddelerin Uygulama Alanları	15
2.5 Faz Değiştiren Maddelerin Kapsüllemesi	16
2.6 Önceki Çalışmalar	17
3. MATERYAL VE METOT	27
3.1 Materyal	27
3.1.1 Kimyasallar	27
3.2 Metot	30
3.2.1 Kullanılan cihazlar	30
3.3 Faz Değiştiren Maddelerin Sentezlenmesi	30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1 Faz Değiştiren Maddelerin Isıl Analizleri	37
4.2 Faz Değiştiren Maddelerin Kimyasal Analizi	43
4.3 Faz Değiştiren Maddelerin Morfolojik Analizi	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	55

KISALTMALAR

FDM	: Faz değiştiren madde
TGA	: Termogravimetrik Analiz
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
MikroFDM	: Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren madde
XRD	: X-Işını Kırınımı
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
OD	: n-oktadekan
HD	: n-hekzadekan
DVB	: Divinilbenzen
CTAB	: Setiltrimetilamonyum bromür
AIBN	: 2,2'-azobisisobütironitril



SİMGELER

c_k	: Katı haldeki özgül ısı (kJ/kg.K)
c_p	: Sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kg.K)
c_s	: Sıvı haldeki özgül ısı (kJ/kg.K)
$C_{\text{sümf}}$: Sürfaktan konsantrasyonu (mmol/L)
H_e	: Erime gizli ısısı (kJ/kg)
\dot{m}	: Kütlesek debi (kg/s)
T_e	: Erime sıcaklığı (K)
T_{ep}	: Erime pik sıcaklığı (°C)
T_d	: Donma sıcaklığı (K)
T_i	: İlk sıcaklık (K)
T_s	: Son sıcaklık (K)
\dot{Q}	: Depolanan enerji miktarı (kW)
ΔH	: Entalpi değişimi (kJ/kg)
ΔT	: Sıcaklık farkı (K)



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: İnorganik faz değiştiren maddelerin özellikleri.....	11
Çizelge 2.2: Bazı organik faz değiştiren maddelerin özellikleri.....	12
Çizelge 2.3: Bazı ötektik faz değiştiren maddelerin özellikleri.....	13
Çizelge 2.4: Organik ve inorganik faz değiştiren maddelerin özellikleri. (Zalba ve diğ, 2003).	14
Çizelge 2.5: Parafin ve parafin olmayan organik faz değiştiren maddelerin özellikleri. (Khana ve diğ, 2017).	14
Çizelge 2.6: Faz Değiştiren Maddelerin Özellikleri (Kapsalis ve Karamanis, 2016).	15
Çizelge 2.7: Faz Değiştiren Maddelerin Mikrokapsülleme Yöntemleri (Jamekhorshid ve diğ, 2014).	17
Çizelge 3.1: Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin hazırlanma reçetesi.....	30
Çizelge 3.2: Emülsiyon polimerizasyon yöntemi ile hazırlanan mikro FDM'lerin bileşimleri.	30
Çizelge 4.1: Sentezlenen FDM'lere ait özellikler.....	37
Çizelge 4.2: TGA/DTG sonuçları.....	42



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Enerji depolama yöntemleri (Chen ve diğ, 2009).	3
Şekil 1.2: Isı eneji depolama çeşitleri (Dinçer ve Rosen, 2002).	4
Şekil 2.1: Faz değiştiren maddelerin, madde çeşidine göre sınıflandırılması (Memon, 2014).	10
Şekil 3.1: Su fazı ve yağ fazı hazırlama proses şeması.	31
Şekil 3.2: Yağ fazı karışım proses şeması.	31
Şekil 3.3: Su fazının yağ fazına eklenme proses şeması.	32
Şekil 3.4: Ötektik faz değiştiren maddenin emülsiyon polimerizasyon yöntemi ile mikrokapsüllenme şeması.	32
Şekil 3.5: Ötektik faz değiştiren maddenin süzme ve yıkama proses şeması.....	33
Şekil 4.1: n-oktadekan/n-hekzadekan ikili ötektik karışımının DSC termogramı.....	39
Şekil 4.2: Mikrokapsüllenmiş oktadekan/hekzadekan ötektik karışımının DSC termogramı.	40
Şekil 4.3: Poli(St-ko-DVB) kabuk malzemenin DSC termogramı.....	41
Şekil 4.4: (a) saf FDM karışımı (%50/50, hacimce), (b) mikrokapsüllenmiş FDM (Ç/K=2/1) ve (c) kabuk malzemenin (%90/10, hacimce) TG eğrileri.....	41
Şekil 4.5: (a) saf FDM karışımı (%50/50, hacimce), (b) mikrokapsüllenmiş FDM (Ç/K=2/1) ve (c) kabuk malzemenin (%90/10, hacimce) DTG eğrileri... ..	42
Şekil 4.6: (a) Mikrokapsüllenmiş FDM (Ç/K=2/1), (b) kabuk malzeme (hacimce %90/10) ve (c) saf ötektik FDM karışımının (hacimce %50/50) FT-IR spektrumları.	43
Şekil 4.7: Mikrokapsüllenmiş parafin karışımı ve boş kabuk malzemenin SEM analiz görüntüleri.	44
Şekil 4.8: Mikrokapsüllenmiş parafin karışımının (mikroFDM) partikül boyut dağılımı.....	45



ISIL ENERJİNİN FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER KULLANILARAK DEPOLANMASI

ÖZET

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte enerji talebinin sürekli artması, ülkeleri enerji arz güvenliğini sağlamada çeşitli enerji politikalarına ve araştırmalarına yönlendirmiştir. Özellikle enerjinin bir lüks olmaktan çıkıp bir ihtiyaç haline geldiği bu son yüzyılda, enerjiye her daim, kaliteli, güvenilir ve ekonomik olarak ulaşmak büyük önem arz etmektedir. Enerjinin etkin ve verimli kullanılmasının yanında enerjinin depolanması konusu da son dönemde ülkelerin enerji politikaları arasında yer almaya başlamıştır. Faz değiştiren maddeler ile gerçekleştirilen gizli ısı enerjinin depolanması ile ilgili çalışmalar geçtiğimiz on yılda yoğunlaşmış ve günümüzde de artarak devam etmektedir.

Faz değiştiren maddeler (FDM'ler), enerjiyi ısı formunda bünyelerinde depolama olanağı sağlayan maddeler olarak tanımlanmaktadır. Bu maddelerin artan ortam sıcaklığı ile sıcaklığı artmakta ve faz değişim sıcaklığına ulaştığında maddede faz değişikliği meydana gelmektedir. Bu süreç sırasında madde daha yüksek enerjili bir hale geçerek faz değişimi gerçekleştirmekte ve böylece bünyesinde bir miktar ısıyı depolamaktadır. Sonrasında ortam sıcaklığının düşmesi ile maddede meydana gelen sıcaklık düşüşü faz değişim sıcaklığının altına ulaştığında ise madde tekrar daha düşük enerjili hale geçerek faz değişimine uğramakta ve bünyesindeki ısıyı dış ortama vermektedir. Faz değiştiren maddeler ile ilgili birçok çalışma olmakla beraber bu maddelerin binalarda pasif ve aktif ısıtma-soğutma uygulamaları, uzay uygulamaları, tekstil uygulamaları gibi bir çok alanda kullanımları mevcuttur.

Bu çalışmada, ısı konforun sağlanması ve enerjinin korunumu amacıyla binalarda iç mekan sıcaklıklarının ısı kontrolünde ve klima sistemleri gibi düşük sıcaklıkta çalışan ısı enerji depolama uygulamalarında kullanılabilme potansiyeline sahip n-oktadekan ve n-hekzadekandan oluşan ötektik FDM'ler hazırlanmıştır. Hazırlanan ikili karışım stiren-divinilbenzenden oluşan kabuk ile ters emülsifikasyon yöntemiyle mikroyutta kapsüle edilmiştir. Yapılan seri halde deneylerde çekirdek/kabuk oranı ve emülgatör konsantrasyonunun ısı özellikler ve kapsülasyon oranı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Gerçekleştirilen ısı ve morfolojik analizler sonucunda en yüksek gizli ısı depolama kapasitesi (88 kJ/kg), en yüksek çekirdek/kabuk oranı (2/1) ve en düşük emülgatör oranında (45 mmol/L) hazırlanan numune de elde edilmiştir. Ayrıca bu numuneye ait en yüksek kapsülasyon oranı %56,77 olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, elde edilen mikrokapsüllenmiş FDM'lerin sahip oldukları ısı enerji depolama kapasiteleri, faz geçiş sıcaklık aralıkları ve ısı kararlılıkları ile özellikle 18-30°C aralığında çalışan düşük sıcaklıklı enerji depolama uygulamalarında kullanılacak potansiyel enerji depolama malzemeleri olduğunu göstermiştir.



THERMAL ENERGY STORAGE USING PHASE-CHANGE MATERIALS

SUMMARY

Today, with the rapid growth of technology, the constant increase of energy demand has led the countries to carry out their energy supply security in various energy policies and researches. Especially in this last century, when energy has become a necessity rather than a luxury, every energy source has become one of the most basic necessities to be achieved in a simple way and to deliver quality to consumers with high quality, reliable and economical. In addition to the efficient use of energy, the topic of energy storage has also recently started to take its place among the energy policy headings of the countries. The studies related to latent heat energy storage realized with phase change materials have been intensified in the past ten years and continue to increase today.

Phase change materials (PCMs) are defined as materials that allow storage in their own form in the form of heat energy. With increasing ambient temperature, the temperature of the material increases and when the temperature of the phase reaches the temperature of change, the phase changes. During this process, the material undergoes a phase change by passing through a higher energy source, thus storing a certain amount of heat. Subsequently, when the ambient temperature falls and the temperature drop in the field reaches below the phase change temperature, the material undergoes a phase change by passing through a lower energy source again, and the external heat is given to the internal heat. While there are many studies about phase change materials, there are many uses of these materials in the buildings such as passive and active heating-cooling applications, space applications, textile applications.

In this study, eutectic FDMs consist of n-octadecane and n-hexadecane which have the potential to be used in low temperature thermal energy storage applications such as air conditioning systems and thermal control of the indoor temperatures in buildings were prepared for providing thermal comfort and conservation of energy. The prepared binary mixture is encapsulated shell which consists of styrene and divinylbenzene by reverse emulsification in micro size. In the series experiments, the effects of core/shell ratio and surfactant concentration on the thermal properties and encapsulation ratio of PCMs were investigated. As a result of thermal and morphological analyzes, the highest latent heat storage capacity (88 kJ/kg) were obtained in the highest core/shell ratio (2/1) and the lowest emulsifier ratio (45 mmol/L). Moreover the highest capsulation rate for this sample was found of 56,77%. The result of study showed that microencapsulated PCMs that have thermal energy storage capacities, phase transition temperature ranges and thermal stabilities can be used low thermal energy storage applications especially in the range of 18-30°C.



1. GİRİŞ

Günümüzde ülkelerin ekonomilerinin ve endüstrilerinin gelişmesi ile birlikte enerjinin daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılması gerektiği bir gerçeklik olmaktan çıkmış ve bir zorunluluk halini almıştır. Özellikle, son yüzyılda teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte her bir bireyin tüketmiş olduğu enerji miktarında da büyük bir artış meydana gelmiştir ve bu artışın büyüyerek devam edeceği beklenmektedir. Bu bağlamda, ülkeler, enerji arz güvenlikleri konusunda enerji arz kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve ithal kaynaklar için ise kaynak ülke çeşitlendirmesinin üzerinde önemle durmaktadırlar. Bununla birlikte, enerjinin üretilmesinden tüketilmesine kadar ki sürecin en verimli şekilde yönetilmesinin de enerji arz güvenliğini sağlamada ülkelere büyük katkılar sağladığı aşikardır. Enerji verimliliği bilincinin oluşması ile ülkelerin ulusal stratejik planlarında enerji verimliliği başlığına yer verdikleri ve bu konu üzerinde çokça çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Enerji verimliliği ve enerjinin etkin kullanılması konusu gündeme geldiğinde enerji sistemlerinin önemli bir parçası olarak enerji depolama teknolojileri dikkat çekmektedir. Enerji depolama teknolojilerinden biri olan ve tez kapsamında incelenen ısı depolama, son dönemde ilgi çeken depolama yöntemlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

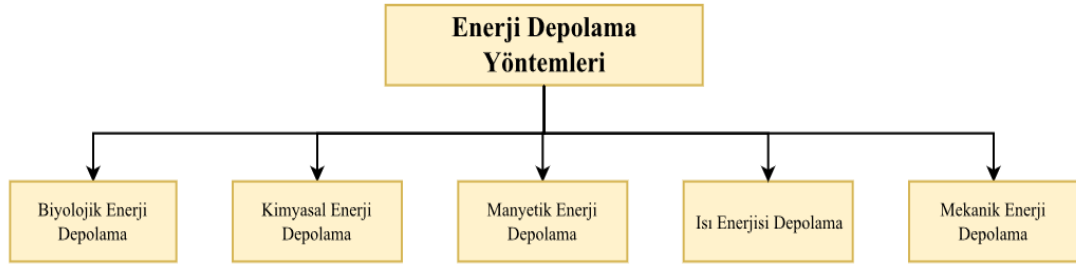
Isı depolanması; duyulur, gizli ve termokimyasal ısı olarak üç şekilde gerçekleştirilebilir. Gizli ısı depolaması amacıyla kullanılan faz değiştiren maddeler (FDM'ler), duyulur ısı depolamasına göre küçük sıcaklık aralıklarında yüksek miktardaki ısı enerjisini depolayıp gerektiğinde kullanıma sunabilmektedirler. Bu sebeple, duyulur ısı depolamaya göre daha yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Faz değiştiren maddeler (FDM'ler), faz değişim s¼reci boyunca sabit bir sıcaklıkta y¼ksek miktardaki ısının depolanmasını ya da dış ortama salınmasını sağlayan maddelerdir. Organik, inorganik ve ¼tektik faz değiştiren maddeler olmak ¼zere ¼ sınıfta incelenmektedirler. Enerji kaynaklarından daha fazla yararlanmayı sağlayarak kaynakların kullanımı sırasında oluşan kirliliklerin azaltılması konusunda yarar sağlamaktadırlar. FDM'ler; binalarda, iklimlendirme sistemlerinde, g¼neř enerjisinden elde edilen ısı enerjisinin depolanmasında, akıllı kumaşlarda ve sera uygulamaları gibi ¼oęu end¼striyel uygulamada kullanılmaktadırlar.

Bu tez ¼alıřması kapsamında; d¼ř¼k sıcaklıklı ısı enerjisi depolama uygulamalarında kullanılabilme potansiyeli bulunan mikroboyutta kaps¼le edilmiş FDM'lerin hazırlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla n-hekzadekan/n-oktadekandan oluşan ikili karışım, faz değişim maddesi olarak kullanılmıştır. N-oktadekan (OD) bir parafin olup oldukça y¼ksek erime gizli ısısı değerine (200-244 kJ/kg) sahip bir maddedir ve erime sıcaklığı 28 - 28,4 °C arasında yer almaktadır. Diğer yandan organik FDM sınıfında yer alan diğer bir parafin olan n-hekzadekan (HD), n-oktadekana kıyasla oldukça d¼ř¼k erime sıcaklığına sahiptir (18-20 °C). Bu ¼zellikleri nedeniyle bu iki parafin tercih edilmiş ve d¼ř¼k sıcaklıklı uygulamalarda kullanılmak ¼zere erime sıcaklığının 28,4 °C'nin altında olduğu n-oktadekan/n-hekzadekandan meydana gelen ¼tektik bir FDM'nin tasarlanması ve kaps¼llenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, ¼ekirdek olarak n-hekzadekan/n-oktadekandan oluşan ikili FDM karışımı, poli(stiren-*ko*-divinilbenzen) kabuk malzeme ile em¼lsiyon polimerizasyonu y¼ntemiyle mikroboyutta kaps¼le edilmiştir. Bu sayede, n-oktadekanın y¼ksek erime gizli ısısına karşılık yine y¼ksek olan erime sıcaklığı, n-hekzadekan ile ¼tektik karışımı sağlanarak d¼ř¼r¼lmeye ¼alıřılmıřtır. Ayrıca, yapılan seri halde deneylerde ¼ekirdek/kabuk oranının ve em¼lgat¼r miktarının kaps¼lasyon oranı, gizli ısı depolama kapasitesi ve erime pik sıcaklığı ¼zerindeki etkisi de araştırılmıştır. Hazırlanan mikroFDM'lerin kimyasal yapısı ve morfolojik ¼zellikleri, sırasıyla; FT-IR spektroskopisi ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile karakterize edilirken, ısı ¼zellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) ile belirlenmiştir.

1.1 Enerji Depolama Yöntemleri

Doğrudan elektrik enerjisinin düşük maliyetli olarak depolanması zor olsa da enerji, değişik formlarda depolanabilir ve talep edildiğinde elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılabilir (Chen ve diğ, 2009). Enerji depolaması için birçok yöntem bulunmakla birlikte enerji; mekanik, ısı, manyetik, biyolojik ve kimyasal olarak değişik formlarda depolanabilmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Enerji depolama yöntemleri (Chen ve diğ, 2009).

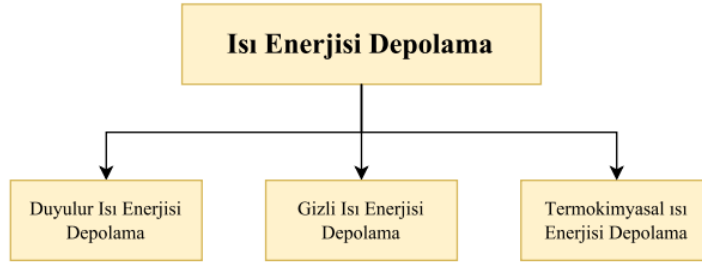
Mekanik enerji depolama; enerjinin doğrusal ya da dönme hareketi ile kinetik enerjisi, yükseltilmiş nesnenin potansiyel enerjisi, elastik bir nesnenin germe-sıkıştırma enerjisi olarak depolanmasıdır. Pompaj depolamalı hidroelektrik, sıkıştırılmış hava enerji depolaması ve volanlarda enerji depolaması mekanik enerji depolaması çeşitlerindedir. Pompaj depolamalı hidroelektrik ve sıkıştırılmış hava depolaması sistemleri, büyük ölçekli depolama sistemleri olarak sınıflandırılmaktayken volanlarda enerji depolaması sistemleri orta ölçekli depolama sistemleri olarak sınıflandırılmaktadır (Kumar ve diğ, 2017). Biyolojik enerji depolama; enerjinin biyolojik süreçler sonucunda kimyasal enerji olarak depolanabilmesi olarak ve manyetik enerji depolama; enerjinin elektromıknatis gibi manyetik bir alan içerisinde depolanabilmesi olarak tanımlanmaktayken kimyasal enerji depolama ise bileşiklerin kimyasal tepkimeler sonucu açığa çıkan enerjisinin depolanması şeklinde gerçekleştirilen depolama şekli olarak karşımıza çıkmaktadır (Dincer ve Rosen, 2002). Ayrıca depolanan kimyasal enerji, direkt elektrik üretimi için elektron transfer tepkimelerinde kullanılabilir. Kimyasal depolama ile ilgili en bilinen yöntem, enerjinin elektrokimyasal tepkimeler yoluyla elde edildiği yakıt pilleridir (Güney ve Tepe, 2017). Bu tez çalışmasının ana konusu olan ısı enerjisi depolama yöntemi ise, maddenin sıcaklığının artırılması veya azaltılması, maddenin faz değiştirmesi veyahut bir kimyasal tepkime gerçekleştirilmesi yoluyla açığa çıkan ısı enerjisinin maddeler içerisinde depolanmasıdır. Isı enerjisi depolama yöntemi;

duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal (absorbsiyon-adsorbsiyon) enerji depolaması olmak üzere üç farklı teknolojiye ayrılmaktadır (IEC, 2011).

1.1.1 Isı enerjisi depolama yöntemleri

Enerjinin ısı formda geçici olarak depolanması işlemi, ısı enerjisi depolama yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Evsel ya da endüstriyel amaçlı alan ısıtma-soğutma, proses ısıtma-soğutma, sıcak su üretimi ya da elektrik enerjisi üretimi gibi uygulamalar için ısı depolaması gerçekleştirilebilmektedir (Cabeza ve diğ, 2015). Endüstriyel, hizmet ya da konut kullanıcılarının enerji talepleri mevsimlik, günlük veya saatlik olarak değişebilmektedir. Bu değişiklikler, özellikle pik enerji taleplerini karşılamaya yardımcı olması amacıyla ısı depolaması uygulamaları ile karşılanabilmektedir.

Isı enerjisi depolama yöntemleri daha önce de bahsedildiği gibi duyulur, gizli ve termokimyasal ısı depolama yöntemleri olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Şekil 1.2)



Şekil 1.2: Isı enerjisi depolama çeşitleri (Dinçer ve Rosen, 2002).

1.1.1.1 Duyulur ısı enerjisi depolama

Duyulur ısı; maddede faz değişimi olmaksızın, maddenin sıcaklığında meydana gelen değişim ile depolanan ısı enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Çift yönlü olarak gerçekleşen duyulur ısı depolama sürecinde; kullanılan ısı depolama maddesinin dış ortamdan ısı alarak sıcaklığında bir artış meydana getirilmekte ve böylece ısı enerjisi depolanmaktadır. Isı depolaması süresince sistem sıcaklığında artış meydana gelirken maddenin fazında herhangi bir değişiklik gözlenmemektedir. Sürecin tersi yönünde ise depolanan ısı enerjisi, sistemde kullanılan ısı depo maddesinin sıcaklığının azalması yolu ile dış ortama verilmektedir. Yine depolama sürecinde olduğu gibi ısı

enerjisinin dış ortama verilmesi sürecinde de madde fazında herhangi bir değişiklik meydana gelmemektedir.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T = \dot{m} \times c_p \times (T_s - T_i) \quad (1.1)$$

Eşitlikte,

\dot{m} : maddenin kütleli debisini (kg),

c_p : maddenin özgül ısı değerini (kJ/kg.K)

ΔT : sıcaklık farkını (K) göstermektedir.

Duyulur ısı depolaması sisteminde; depolanan enerji miktarı (\dot{Q}), ortamın ısı kapasitesinin bir fonksiyonudur ve sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Bununla birlikte, sistemdeki ilk ve son sıcaklık arasındaki fark ne kadar fazla olursa süreç boyunca depolanacak duyulur enerji miktarı o kadar fazla olmaktadır (Pfleger ve diğ., 2015). Diğer taraftan depolanan duyulur enerji miktarı, depo maddesinin özgül ısıyla (c_p) orantılı olması her depo maddesinin farklı enerji depolama kapasitesine sahip olmasına yol açmaktadır. Örneğin birim hacim başına demirin ısı kapasitesi $3,57 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ iken duyulur ısı depolamada çok yoğun kullanılan suyun ısı kapasitesi $4,17 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ 'dir. Bu da aynı miktardaki sıcaklık değişimindeki su ve demir depo maddesi için farklı enerji depolanması miktarına ulaşılacağını ifade etmektedir (Dinçer ve Rosen, 2002).

Bu tarz sistemlerde, ısının depolanması süresince artan sıcaklığın düzensizliği arttırması sebebiyle sistemde fazla miktarda ısı kaybı gözlenmektedir. Isının açığa çıktığı yani dış ortama verilmesi sırasında ise sıcaklığın sürekli azalmasından dolayı sistemin ısı depolama etkinliği azalmaktadır. Dahası ısı depolama sisteminin yalıtım yapılması zorunluluğu sebebiyle sistemde maliyet artışı yaşanmaktadır (Dinçer ve Dost, 1996).

1.1.1.2 Termokimyasal ısı enerjisi depolama

Termokimyasal ısı enerjisi depolamada; ısı, duyulur ya da gizli olarak değil fizikokimyasal olarak depolanmaktadır. Adsorbsiyon ve adsorbsiyon prensibi ile ısı enerjisi depolaması gerçekleştirilmektedir (Bales, 2005). Kimyasal tepkimeler, tepkimeye katılan bileşiklerin moleküler dizilimlerinde meydana gelen rekombinasyon-ayırışma gibi bir değişiklik ile karakterize edilmektedirler. Endotermik bir tepkimede, madde ısı alarak diğer bir deyişle absorblayarak

termokimyasal ısı depolaması gerçekleştirirken tepkime bir katalizör eklenerek tersinir yönde hareket ettirildiğinde ekzotermik tepkime sonucu depoladığı ısı enerjisini desorblayarak dış ortama verecektir (Tatsidjodoung ve diğ, 2013).

Termokimyasal depolama sistemlerinde, enerji depolama kapasitesi yüksek olmasına rağmen tepkime süresince oluşabilecek yan tepkimeler bu tarz depolama sistemleri için sorun teşkil etmektedir. Ayrıca, diğer ısı enerji depolama yöntemlerine göre daha karmaşık bir sisteme sahiptirler (Öztürk, 2008).

1.1.1.3 Gizli ısı enerjisi depolama

Bir maddenin faz değişimi sırasında meydana gelen ısı transferi *gizli ısı* olarak adlandırılmaktadır. Faz değişimi, bir maddenin sıcaklığının artırılması veya azaltılması ile maddenin iç enerjisindeki değişim sonucu, halinde meydana gelen değişim olarak tanımlanmaktadır. Faz değişimi; katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz faz değişimleri olmak üzere dört sınıfa ayrılabilir. Katı-katı faz değişiminde madde halinde bir değişim olmaksızın madde, bir kristal yapıdan bir başka kristal yapıya geçiş yapmaktadır. Katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz faz değişimlerinde ise maddenin halinde değişim gözlenmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \int_{T_o}^{T_e} \dot{m} \times c_p \times dT + \dot{m} \times H_e + \int_{T_e}^{T_s} \dot{m} \times c_p \times dT \\ &= \dot{m}[H_e + c_k(T_e - T_i) + c_s(T_s - T_e)]' \end{aligned} \quad (1.2)$$

Eşitlikte;

c_s ve c_k sırası ile sıvı ve katı haldeki faz değiştiren maddenin özgül ısı değeri (kJ/kg.K)

T_o : Başlangıç sıcaklığı (K)

T_e : Erime sıcaklığı (K)

T_s : Son sıcaklık (K)

H_e : Erime gizli ısısı (kJ/kg)

Isıl iletkenlik, gizli ısı depolaması için önemli bir özellik olmakla birlikte, hacimsel depolama kapasitesini belirleyen faz değişim entalpisi ve yoğunluğu da depolama için önemli özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır (Pfleger ve diğ, 2015).

Gizli ısı depolama faz değiştiren maddeler ile gerçekleştirilmektedir (IEC, 2011).

Bahsedilen maddeler, ortamda sıcaklık artışı olmadan faz değişimi esasına göre

madde bünyesinde ısının depolanmasını gerçekleştirmektedirler. Faz değişiminin formlarından olan katı-sıvı faz değişimi; düşük hacimsel değişim açısından karşılaştırıldığında sıvı-gaz faz değişimine, yüksek gizli ısı açısından karşılaştırıldığında ise katı-katı faz değişimine göre daha verimlidir. Uygulama türüne göre çok çeşitli faz değiştiren madde bulunmaktadır (Kuravi ve diğ, 2013).

Genellikle gizli ısı depolama yöntemi, belirli bir ortam için meydana gelen duyulur ısı depolamasından daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptirler. Birim hacim ya da kütle başına depoladıkları enerji kapasiteleri yüksek olduğundan dolayı ise depo hacimleri, duyulur ısı depolama yöntemindeki depo hacmine göre daha küçük olmaktadır. Bu da faz değiştiren maddeler ile gerçekleştirilen gizli ısı depolama sistemlerinin, duyulur ısı depolaması sistemlerine daha düşük maliyetli ve daha verimli bir alternatif oluşturabileceğini göstermektedir (Abhat, 1983).



2. FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER

Gizli ısı depolamasında kullanılan faz değıştiren maddeler, enerjinin ısıl formda depolanmasını sağlamaktadırlar. Faz değışimi sırasında sıcaklığı sabit kalan maddelerin ısı depolama mekanizması aşağıdaki gibi özetlenebilir;

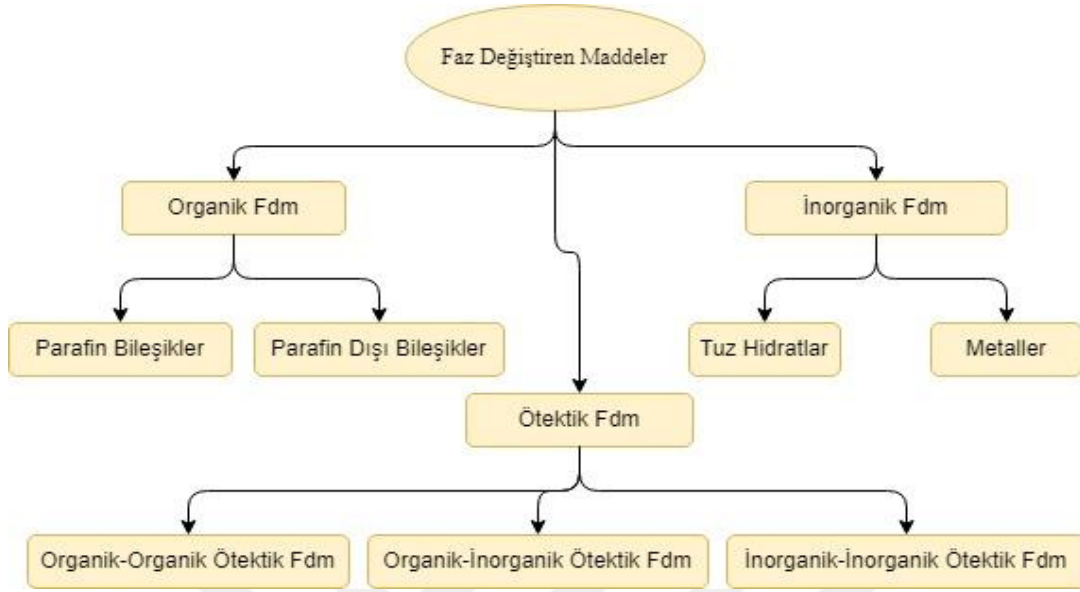
- Sistemin sıcaklığının, faz değıştiren maddenin erime sıcaklığının üstüne çıkması ile madde ısı soğurarak faz değıştirir ve enerjiyi ısıl formda bünyesinde bulundurmaktadır.
- Diğer yandan sistemin sıcaklığının, faz değıştiren maddenin erime sıcaklığının altına düşmesi ile madde, bünyesinde bulunan ısı enerjisini dış ortama vererek faz değışimi göstermektedir.

2.1 Faz Değıştiren Maddelerin Sınıflandırılması

Faz değıştiren maddeler; faz dönüşüm sıcaklıkları bakımından düşük sıcaklık, orta sıcaklık ve yüksek sıcaklık FDM'ler olarak; faz dönüşüm biçimine göre katı-sıvı, katı-katı, sıvı-gaz ve katı-gaz faz değışimi gösteren FDM'ler olarak; genellikle kullanılan sınıflandırma çeşidi olan madde çeşidine göre ise organik, inorganik ve ötektik faz değıştiren maddeler olmak üzere çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadırlar (Pielichowska ve Pielichowski, 2014).

Faz değışimine göre gerçekleştirilen sınıflandırmada, katı-katı faz değışimde, madde sıcaklığı arttıkça bir kristal yapıdan bir başka kristal yapıya geçiş yaparken katı-sıvı ve sıvı-gaz faz değışiminde, madde sıcaklığı arttıkça moleköl titreşimlerini arttırarak moleküller arası bağlarını gevşetir ve faz değışimi gerçekleştirmektedir. Sıvı-gaz faz değışimi gösteren FDM'ler, faz değışimi ile yüksek hacim değışimi yaşadıkları ve gaz faz için basınçlı kaplara ihtiyaç duyulduğundan tercih edilmemekle birlikte araştırmalar, katı-katı faz değışimi gösteren FDM'lere göre daha fazla ısı depolama kapasitesi sağlayan katı-sıvı faz değışimi gösteren FDM'ler üzerinde yoğunlaşmıştır (Dinçer ve Dost, 1996).

Şekil 2.1’de faz değıştiren maddelerin, madde çeşidine göre sınıflandırılması ve bu sınıflandırmaların alt başlıkları gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Faz değıştiren maddelerin, madde çeşidine göre sınıflandırılması (Memon, 2014).

İnorganik faz değıştiren maddeler, tuz hidratlar ve metallerden oluşmaktadır. Düşük maliyetli olmaları sebebiyle faz değıştiren maddelerle ilgili yapılan çalışmalarda tercih edilmektedirler.

Tuz hidratlar: Karbonatların, sülfatların, halojenürlerin, oksitlerin ve nitratların belirli oranlarda su ile birleşimi sonucu oluşmaktadır. Genel formülleri $X_nY_m \cdot aH_2O$ şeklindedir. Oda sıcaklığında katı halde bulunmaktadır. Erime noktaları -33 ile $120^\circ C$, gizli ısıları ise $86-328$ kJ/kg arasındadır. Daha çok güneş enerjisi uygulamaları için kullanılan tuz hidratların aşırı soğuma göstermesi ve korozif etki göstermesinden dolayı bina uygulamalarındaki kullanımları kısıtlanmaktadır. Tuz hidratla ilgili yapılan çalışmalarda, aşırı soğuma ve faz ayrışması sorunlarının önenebilir olduğu fakat bunun sistem maliyetini arttırdığı gözlemlenmiştir (Herrick, 1997).

Metaller: Yüksek ısı iletkenliğe, düşük buhar basıncına ve düşük özgül ısıya sahiptirler. Erime noktaları 30 ile 125 °C arasında ve gizli ısıları 25 ile 91 kJ/kg arasındadır. Geniş erime sıcaklığı aralığına ve organik faz değıştiren maddelere göre yüksek ısı iletkenliğe sahiptirler (Fleischer A. S., 2015).

Çizelge 2.1’de bazı inorganik faz değıştiren maddelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1: İnorganik faz değiştiren maddelerin özellikleri.

Madde	Erime Noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)	Referans
$\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	8	253	Naumann ve Emons, 1989.
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	34	256	Nagano ve diğ, 2003.
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	36	146,9	Dincer ve Rosen 2002.
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	48-55	201	Paris ve diğ, 1993.
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$	78	266	Naumann ve Emons, 1989.
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	89,3	150	Naumann ve Emons, 1989.
$\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	58	226	Heckenkamp ve Baumann 1997.
$\text{LiNO}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	30	256	Nagano ve diğ, 2003.
$\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	70	184	Heckenkamp ve Baumann 1997.

Organik faz değiştiren maddeler, içeriğinde hidrojen (H) ve karbon (C) bulunan ve doğada bol miktarda karşılaşılan hidrokarbonlardır. Yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri ve fiziksel-kimyasal özellikleri açısından kararlı olmaları gibi özellikleri ile dikkat çekmektedirler. Parafinler ve parafin olmayan organik faz değiştiren maddeler olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Parafinler: Petrol türevi olan ve alkan ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) olarak adlandırılan düz zincir yapılı hidrokarbonlardır. 1-4 C'lular gaz, 5-17 C'lular sıvı, 17 ve üzeri C'na sahip olanlar ise katı haldedir. Organik faz değiştiren maddeler içerisinde en çok çalışılan gruptur. Erime noktaları -17 ile 135 °C, gizli ısıları ise 60 ile 268 kJ/kg arasındadır. Bu sınıfta değerlendirilen FDM'ler düşük ısı iletkenliğine sahiptirler. Tuz hidratlara göre daha pahalı olan parafinler, doğada bolca bulunmaları sebebiyle kolay erişilebilir faz değiştiren maddelerdendirler (Fleischer A. S. 2015; Sharma D. ve diğ, 2004).

Parafin olmayan organik faz değiştiren maddeler: Yağ asitleri, esterler, alkoller ve glikoller gibi maddeleri kapsamaktadırlar. Bu sınıfa giren maddelerden daha iyi özellikler sergileyen yağ asitleri, düz zincir hidrokarbon ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}$) ve buna bağlı bir karboksil grubundan (-COOH) meydana gelirler. Yağ asitleri, karbonlar arası bağların-tek-ya da çift olmasına göre doymuş ya da doymamış olabilirler. Doymamış hidrokarbonlar yapılarındaki bağların zayıf olmasından dolayı daha düşük erime noktasına sahiptirler. Genellikle, yüksek gizli ısı değerine sahip olan yağ asitlerinin erime noktaları -7 ile 187 °C, gizli ısıları ise 125 ile 250 kJ/kg arasındadır ve parafinlere göre daha pahalıdırlar (Fleischer, A. S. 2015; Abhat, A. 1983).

Çizelge 2.2’de bazı organik faz değiştiren maddelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.2: Bazı organik faz değiştiren maddelerin özellikleri.

Madde	Erime Noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)	Referans
n-Oktadekan	28-28,4	200-244	Paris ve diğ, 1993.
n-Hekzadekan	18-20	216-236	Nagano ve diğ, 2003.
n-Pentakosan	53,5	238	Paris ve diğ, 1993.
Kaprilik Asit	16,3	148	Bailey, 1950.
İzopropil Palmitat	11	100	Feldman ve diğ, 1986.
Oktadesil Tioglikolat	26	91	Feldman ve diğ, 1986.
Tetradesil karbonat	33,7	227	Kenar JA, 2010.
Asetemit	82	241	Sharma ve diğ, 2009.
Desil karbonat	-2,2	144	Kenar JA, 2010.

Ötektik faz değiştiren maddeler, iki ya da daha fazla kimyasal bileşiğin ya da elementin minimum erime noktalı birleşimi şeklinde elde edilmektedirler. Daha çok soğutma uygulamalarında kullanılan ötektik birleşimler; organik-organik, inorganik-inorganik ve organik-inorganik şeklinde geręekleřtirilerek farklı özellikte sayısız ötektik faz değiştiren madde üretilebilmektedir (Giro-Paloma ve diğ, 2016). Ötektik faz değiştiren maddeleri meydana getiren bileşik ya da elementler erime sırasında eř zamanlı olarak faz değişimi geręekleřtirirler ve bu süreçte ötektik faz değiştiren maddelerde faz ayrımı gözlenmemektedir (Akeiber ve diğ, 2016). Bu ötektik bileşimlerin erime noktaları genel olarak 13 °C ile 64 °C arasında değişmektedir (Muñoz ve diğ, 2015).

Bazı ötektik faz değiştiren maddelerin özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3: Bazı ötektik faz değiştiren maddelerin özellikleri.

Madde	Erime Noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)	Referans
91,67% tetradekan + 8,33% hegzadekan	1,7	156,2	Kenisarin, 2010.
94% Tetradekan + 6% tetradekonol	5,5	202,1	Alvarado ve diğ, 2007a.
Oktadekan + dokosen	25,5-27	203,8	Kenisarin, 2010.
Kaprik asit + laurik asit	18	120	Roxas-Dimaano, ve Watanabe, 2002b.
65–90% metil palmitat + 35–10% metil stearat	22-25,5	120	Cabeza ve diğ, 2001.
Pentadekan + oktadekan	8,5-9	271,93	Roxas-Dimaano, ve Watanabe, 2002b.
59% Mg(NO₃)₂.6H₂O + 41% MgBr₂.6H₂O	66	168	Sharma ve diğ, 2009.
45% CaCl₂.6H₂O + 55% CaBr₂.6H₂O	14,7	140	Sharma ve diğ, 2009.
58,7% Mg(NO₃)₂.6H₂O + 41,3% MgCl₂.6H₂O	59	132	Sharma ve diğ, 2009.

2.2 Faz Değiştiren Maddelerin Avantajları ve Dezavantajları

Duyulur ısı ve termokimyasal ısı depolama yöntemleri ile karşılaştırıldığında, faz değiştiren maddelerin diğer yöntemlere göre birçok üstünlüğü ile karşılaşılmaktadır. Gizli ısı depolama sistemleri, duyulur ısı depolama sistemlerine göre daha yüksek ısı enerji depolamasına sahipken termokimyasal ısı depolama sistemlerine göre ise daha kolay uygulanabilir bir sisteme sahiptir. Öncelikle faz değiştiren maddeler işlem süresince sabit bir sistem sıcaklığı üstünlüğüne sahiptir. Bunun dışında, FDM sistemleri; hafif, güvenilir, taşınabilir ve herhangi bir akış kaynağına gerek duymamaktadırlar. Depolama sürecindeki faz değişimi sırasında düşük yoğunluk değişimi yaşandığından FDM ile gerçekleştirilecek depolama sistemlerinde, küçük boyutlar ve daha az destekleyici elemanlar karşımıza çıkmaktadır (Fleischer A. S., 2015).

Genel olarak organik faz değiştiren maddelerde, korozif ve toksik etkiler gözlenmemektedir. Aynı zamanda organik FDM'ler faz değişimi süresince faz ayrıştırması göstermemekle birlikte kimyasal açıdan kararlıdırlar. Organik FDM'lerde karşılaşılan dezavantajlı durumlar ise uçucu ve yanıcı olmalarıdır. Ayrıca düşük ısıl iletkenliğe sahip olmaları sebebiyle sistemde performans iyileştirmesine gerek duyulmaktadır. Organik FDM'lerin faz değişimi süresince yüksek hacim değişimine uğramaları da bir diğer dezavantajlı durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

İnorganik faz değiştiren maddeler ise yüksek ısıl iletkenliğe sahiplerdir ve faz değişimi sũresince düşük hacim değişimi gũstermektedirler. Ucuz ve ulaşılabilir maddeler olmalarına rağmen faz değişimi boyunca ısıl kararlılığa sahip değillerdir. Ayrıca faz ayrımı, aşırı soğuma ve korozif Ȗzellikler gũstermektedirler. Çizelge 2.4'te organik FDM ve inorganik FDM'lerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmalı olarak verilirken, izelge 2.5'te parafin ve parafin olmayan FDM'lerin bir kıyaslaması sunulmuştur.

Çizelge 2.4: Organik ve inorganik faz değiştiren maddelerin Ȗzellikleri. (Zalba ve diğ, 2003).

	Organik FDM	İnorganik FDM
Avantaj	Kimyasal açıdan kararlı Korozif ve toksik Ȗzellik gũstermez Aşırı soğuma gũstermez Ulaşılabilir Faz ayrımı gũstermez	Yüksek ısıl iletkenlik Düşük hacim değişimi Yüksek yoğunluk Düşük maliyetli Ulaşılabilir
Dezavantaj	Düşük ısıl iletkenliğe sahip Yüksek hacim değişimi Uçucu Yanııcı	Korozif Faz ayrımı gũsterir Isıl kararlılığa sahip değil Aşırı soğuma

Çizelge 2.5: Parafin ve parafin olmayan organik faz değiştiren maddelerin Ȗzellikleri. (Khana ve diğ, 2017).

	Avantaj	Dezavantaj
Parafin FDM'ler	Güvenilir Emniyetli Düşük maliyet Düşük buhar basıncı Korozif Ȗzellik gũstermez	Düşük ısıl iletkenlik Yüksek hacim değişimi Yanııcı
Parafin olmayan organik FDM'ler	Isıl kararlılık Kimyasal dayanıklılık Aşırı soğuma gũstermez Toksik-korozif Ȗzellik gũstermez	Yüksek yanıcılık Düşük ısıl iletkenlik Düşük gizli ısı değeri Yüksek sıcaklıkta kararsızlık

2.3 Faz Değiştiren Maddelerin Seçim Kriterleri

Birçok faz değiştiren madde sınıflandırma çeşidi olsa da faz değiştiren maddeler temelde organik, inorganik ve Ȗtektik faz değiştiren maddeler olarak ayrılmaktadırlar. Bu maddelerin birbiriyle kıyaslandığında ise pek çok avantaj ve dezavantaja sahip oldukları gũrũlmektedir. Ȗnemli olan nokta, kullanılacak sistem için hangi tũr FDM olursa olsun sistem için en uygun faz değiştiren maddeye karar verip bu malzemeyi sisteme uyarlamaktır. Basit olarak, bir sistemden beklenen en temel şey istenileni ya da gerekeni karşılamasıdır.

Herhangi bir uygulama için seçilecek faz değiştiren maddenin değişim sıcaklığı ile sistemin ısıtma ya da soğuma operasyon sıcaklığının eşleşmesi gerekmektedir. Aşırı soğuma, faz değiştiren maddeler ile uygulanan sistemlerde ısı deposunun geri kazanımını engelleyeceğinden faz değiştiren maddelerin aşırı soğuma eğilimi göstermesi istenilmeyen özelliklerdendir. Erime ve donma boyunca faz kararlılığı, ısı depolanmasının ayarlanmasında ve küçük depolama hacminde sistemden istenilen büyük yoğunluğun elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Faz değiştiren maddelerin; güvenlik açısından toksik, korozif ve yanıcı olmaması gerekmektedir. Ayrıca faz değiştiren maddelerin ucuz ve geniş ölçüde ulaşılabilir olması önemli kriterlerdendir. Nasıl bir sisteme karar verilirse verilsin bir faz değiştiren maddeden beklenebilecek en genel özellikler Çizelge 2.6'da özetlenmiştir (Kapsalis ve Karamanis, 2016).

Çizelge 2.6: Faz Değiştiren Maddelerin Özellikleri (Kapsalis ve Karamanis, 2016).

Isıl Özellikler	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Uygun faz değişim sıcaklığı ➤ Küçük boyutlu bir sistem ile en iyi ısı transferi ➤ İyi enerji ve çevresel performans ➤ Yüksek gizli ısı depolaması ➤ Yüksek ısı iletkenliği
Kimyasal Özellikler	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Sistem malzemeleri ile uyumluluk ➤ Kimyasal bozulmalara uzun süre dayanıklılık ➤ Toksik, korozif ve yanıcı olmama
Fiziksel Özellikler	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Yüksek yoğunluk ➤ Uygun faz dengesi ➤ Düşük buhar basıncı ➤ Küçük hacim değişimi
Kinetik Özellikler	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aşırı soğuma göstermemeli ➤ Yeterli çekirdekleşme hızı
Ekonomik Özellikler	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ucuz olmalı ➤ Ulaşılabilir olmalı

2.4 Faz Değiştiren Maddelerin Uygulama Alanları

Faz değiştiren maddeler, geniş sıcaklık aralıklarına sahip olmaları sebebiyle çok geniş uygulama alanına sahiplerdir. Özellikle çeyrek yüzyılda enerjinin önemli bir faktör olarak yaşamımızda yer alması ve gerek çevresel gerekse ekonomik yönden dikkatleri üzerine çekmesi enerji depolama yöntemleriyle ilgili çalışmaları arttırmaktadır.

- Uzay endüstrisinde,

- Elektronik endüstrisinde,
- Solar soğutma sistemleri ve güneş enerji santrallerinde,
- Tarım endüstrisinde solar yıkayıcılar,
- Yiyecek koruma ve ilaç endüstrisinde,
- Atık ısı geri kazanım sistemlerinde,
- Evsel sıcak su sistemlerinde,
- Aktif ve pasif sistemler olarak bina yapı elemanlarında

olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadırlar (Akeiber ve diğ, 2016).

2.5 Faz Değiştiren Maddelerin Kapsüllemesi

Kapsülleme prosesi temel olarak gaz moleküllerinin, sıvı damlacıklarının ya da katı maddenin uygun bir malzeme ile tamamen sarılması işlemidir. Bu kapsüle; kabuk, manto ya da membran adı verilebilmektedir. Kapsülleme işleminde amaç, faz değişimi sırasında meydana gelebilecek madde sızıntılarını ve kayıplarını önlemektir. Ayrıca, kapsülleme ile FDM'in ısı transfer alanı artırılmakta ve dış çevreden faz değişim davranışını etkileyebilecek etkiler azaltılmaktadır. Kapsülleme malzemeleri, kapsül boyutuna göre nanokapsüller, mikrokapsüller ve makrokapsüller olmak üzere üçe ayrılmaktadırlar. Eğer kapsül çapı 1 mikrometre ile 1 milimetre arasındaysa mikrokapsül, 1 mikrometreden küçükse nanokapsül ve 1 milimetreden büyükse makrokapsül olarak sınıflandırılmaktadırlar. Mikrokapsülleme tanım olarak ise küçük partiküllerin ya da damlacıkların heterojen ya da homojen bir matris gömülmesi veya bir kabuk tarafından sarılması yöntemidir (Shannaq ve Farid, 2015).

Mikrokapsülleme; kapsüllerin çeşidine göre tek çekirdekli, çok çekirdekli ve matris olmak üzere üç farklı morfolojide isimlendirilmektedirler. Klasik kabuk-çekirdek modeli tek çekirdekli mikrokapsül morfolojisi olarak tanımlanmaktayken çok çekirdekli mikrokapsül morfolojisindeyse çekirdek birçok parçaya ayrılmaktadır. Matris mikrokapsül morfolojisinde ise çekirdek kendini çevreleyen bir kabuk olmaksızın eşit olarak dağılmaktadır (Shannaq ve Farid, 2015).

Mikrokapsülleme yöntemleri; fiziksel, kimyasal ve fiziko-kimyasal yöntemler olarak üç ana başlık altında incelenmektedir. Bu mikrokapsülleme yöntem ana başlıkları ise aşağıda belirtilen alt ana başlıklara ayrılmaktadırlar (Çizelge 2.7).

Çizelge 2.7: Faz Değiştiren Maddelerin Mikrokapsülleme Yöntemleri (Jamekhorshid ve diğ, 2014).

Mikrokapsülleme Yöntemleri		
Fiziksel Yöntem	Fiziko-kimyasal Yöntem	Kimyasal Yöntem
Hava süspansiyonu kaplama Santrifüjlü ekstrüzyon Titreşim nozulu Sprey kurutma Çözücü buharlaştırma	İyonik jelasyon Koaservasyon Sol-jel	Ara yüzey polimerizasyonu Süspansiyon polimerizasyonu Emülsiyon polimerizasyonu

Bu tezin kapsamında gerçekleştirilmiş olan FDM üretiminde mikrokapsülleme yöntemi olarak emülsiyon polimerizasyon metodu kullanılmıştır.

Emülsiyon polimerizasyon yöntemi; organik mikro/nanoFDM üretiminde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerinden biridir. Daha çok başlatıcının sulu faz çözücünde çözünebildiği fakat monomerlerin sulu faz çözücüleri içinde ya çözünemediği ya da çok az çözünebildiği sistemlerde tercih edilmektedir. Emülsifikasyon süreci boyunca, sadece FDM ve monomerler, ayrı damlacıklar halinde kararlı bir sulu sistemde yayılarak yağ fazını oluşturmaktadırlar. Başlatıcılar ise sulu fazda çözdürülmektedir. Karışıma emülgatör eklenmesi yoluyla ve sürekli mekanik karıştırma işlemi ile de emülsifikasyon sürecine yardımcı olunabilmektedir. Radikal bir polimerizasyon işlemi olan emülsiyon polimerizasyon yönteminde; başlatıcılar, ısı ile aktifleşip sistemde radikallerini serbest bırakarak polimerizasyonu tetiklemektedirler (Alva ve diğ, 2017). Diğer bir anlatımla, emülsiyon polimerizasyon metodunda emülgatör eklenen bir yağlı sistemde polimer karışımı meydana getirilmektedir. Öncelikle çözücü içinde çözünemeyen monomer madde; emülgatör, yüzey aktif madde ve mekanik karıştırıcı yardımıyla tepkime ortamında homojen bir şekilde dağıtılmaktadır. Daha sonra polimerizasyon tepkimesini başlatmak için eklenen başlatıcı vasıtasıyla çekirdek madde yüzeyinde polimer membran oluşturulmaktadır. Sistemde emülgatöre ihtiyaç duyulmasının sebebi ise bir yağ/su emülsiyonu oluşturup kimyasal, ısıl ya da bir enzimatik yol ile bağlı bir sistem oluşturulmasıdır. Yöntemin son adımında ise emülsiyon yıkanarak, yağdan arındırılıp izole edilmiş mikrokapsüller elde edilmektedir (Giro-Paloma ve diğ, 2015).

2.6 Önceki Çalışmalar

Chaurasia (2000) tarafından gizli ısı ve duyulur ısı üzerinde yapılan karşılaştırmalı çalışmada, biri su ile dolu diğeri faz değiştiren madde ile desteklenmiş ısı

değiştiricisi içeren özdeş iki depo ünitesi kullanılmıştır. Depo üniteleri ise özdeş düz plakalı güneş kolektörleri ile gün boyu şarj edilmiştir. Çalışma sonucunda gizli ısı depolama sisteminin daha fazla sıcak su ürettiği ortaya konulmuştur.

Aldoss ve Rahman (2014) yaptıkları çalışmada bir ısı enerji deposu için tekli ve çoklu faz değiştiren madde yapısını karşılaştırmışlardır. Farklı özelliklere sahip faz değiştiren maddelerle dolu küresel kapsüller, ısı enerji depolama sistemine entegre edilmiştir. Çalışmada tek faz değiştiren madde ile iki-üç-çoklu faz değiştiren madde tasarımları karşılaştırılmıştır. İki sistemin de performansı, şarj-deşarj oranı, ısı transfer hızı ve ısı depolama kapasitesi analizleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çoklu faz değiştiren madde ile gerçekleştirilen ısı enerji depolama tasarımının, şarj-deşarj döngülerinde tekli faz değiştiren madde ile gerçekleştirilen ısı depolama tasarımına göre daha yüksek performansa sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, çoklu faz değiştiren madde ile gerçekleştirilen ısı depolama tasarımındaki kademeler arttıkça, ısı enerji depolama sisteminin daha iyi bir performans gösterdiği fakat üç kademedan sonra uygulanan faz değiştiren maddenin performansının çok fazla değişiklik göstermediği gözlenmiştir.

Zhou ve diğ. (2007) pasif-güneş evinde faz değiştiren madde ile oluşturulmuş plakaları kullanarak hibrit bir ısıtma sisteminin performansını nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler, faz değiştiren maddelerle oluşturulmuş plakaların evin ısı konfor şartlarını geliştirdiği ve kış aylarında enerji tüketimini %12 oranında azalttığını göstermiştir.

Tomizawa ve diğ. (2016) faz değiştiren maddelerle mobil cihazların enerji yönetimini sağlamak üzere çalışma yapmışlardır. Çalışmada, mikrokapsüllenmiş parafin/polietilen kompozit madde içeren levhalar basitçe modellenmiş bir mobil cihaza monte edilerek deneysel ve nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. FDM levhalarının konfigürasyonunun sıcaklık değişimine etkilerinin yanı sıra maddenin gizli ısı ve ısı iletkenliğini belirlemek üzere deneyler ve bununla birlikte deneysel veriler ile karşılaştırmak adına mikrokapsüllenmiş parafin/ polietilen kompozit maddenin termofiziksel özelliklerini belirleyebilecekleri nümerik bir analiz yapılmıştır. Sonuç olarak, FDM'in mobil cihazdaki sıcaklık artışında azalmayı sağladığı gözlemlenmiştir. Yapılan nümerik analiz ile de deneysel verilerin doğrulandığı ifade edilmiştir.

Paul ve diğ. (2015) galaktitol ve manitol ötektik karışımının gizli ısı depolaması için potansiyelini araştırmışlardır. Çalışmada DSC ve XRD cihazları kullanılarak söz edilen şekerlerin termofiziksel özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Abhijit ve arkadaşları, %30 galaktitol/%70 manitol ötektik karışımının erime noktasını 153 °C ve gizli ısı değerini ise 292 kJ/kg olarak belirlemişlerdir. Bunun dışında çalışmada galaktitol/manitol ötektik karışımının kristallenme entalpisini geliştirmek için karışıma ağırlıkça %5 oranında gümüş iyodür ya da grafit gibi bir çekirdekleştirme ajanı eklemişlerdir. Yapılan FT-IR analizlerine göre karışımın iyi bir kararlılık gösterdiği ve gizli ısı depolaması uygulamaları için kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Baran ve Sarı (2003) palmitik asit/stearik asit ötektik karışımının faz değişim ve ısı transfer özelliklerini belirlemek üzerine üç ana aşamadan oluşan bir çalışma yapmışlardır. İlk aşamada, palmitik asit ve stearik asidin ötektik bileşim oranının ve DSC analizi ile termofiziksel özelliklerinin belirlenmesine çalışmışlardır. İkinci aşamada ötektik karışımın faz geçiş karakterizasyonunu, erime-donma sıcaklıkları ve zamanlarını, faz geçiş davranışı üzerinde ısı transfer akışkanının Stefan ve Reynolds sayılarının etkisini araştırmışlardır. Üçüncü aşamada ise faz değiştiren maddenin konulduğu ve ısı depolamanın gerçekleştiği borunun dış duvar ve faz değiştiren madde arasındaki ısı transfer katsayısının hesaplamalarını yapmışlardır. DSC analizleri sonucunda ağırlıkça (%64,2 palmitik asit- %35,8 stearik asit) ötektik karışımının erime noktasını 52,3 °C ve gizli ısıyı ise 181,7 kJ/kg olarak belirlemişlerdir. Oluşturulan ötektik karışımın evsel su ısıtma uygulamalarında ve pasif bina uygulamalarında kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Fauzi ve diğ. (2014) miristik asit/palmitik asit ötektik faz değiştiren madde karışımına sürfaktan malzemesinin eklenmesi ile ötektik faz değiştiren madde karışımının ısı özelliklerinin ve termal iletkenliğinin iyileştirmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada sürfaktan malzeme olarak sodyum laurat kullanılmıştır. Çeşitli oranlarda karıştırılan sodyum laurat malzemesinin, miristik asit/palmitik asit ötektik karışımın aşırı soğumasını azaltacağı ve ısı enerji depolama kapasitesini arttıracığı öngörülmüştür. Kütleli olarak %70 oranında miristik asit ile %30 oranında palmitik asidin karıştırılması ile ötektik faz değiştiren madde oluşturulmuştur. İki numune şeklinde hazırlanan ötektik karışımın birine ise %10 oranında sürfaktan malzeme eklenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %10 oranında

süfaktan malzemenin eklendiği ötektik karışımın alt soğuma sıcaklığı 0,43 °C ve faz değişim sıcaklığı ise 4,73 °C düştüğü görülmüştür. Aynı zamanda süfaktanın ötektik karışımın gizli ısı değerini 15,14 kJ/kg ve ısı iletkenliğini ise 0,010 W/m.K arttırmıştır.

Bo ve diğ. (1999) bir soğutma sistemi için tetradekan/hekzadekan ikili karışımını hazırlamışlardır. Çalışmada tetradekan, pentadekan ve hekzadekan maddelerinin ayrı ayrı ve tetradekan/hekzadekan ikili ötektik karışımının ısı özelliklerini karşılaştırmış ve bir soğutma sistemi için kullanılabilme potansiyellerini araştırmışlardır. Çalışmada kullanılan tetradekanın erime noktası 5,8 °C ve gizli ısısı 227 kJ/kg, pentadekanın erime noktası 9,9 °C ve gizli ısısı 206 kJ/kg, hekzadekanın erime noktası 18,1 °C ve gizli ısısı 236 kJ/kg olarak belirlemişlerdir. Buna karşılık tetradekan/hekzadekan karışımında ise farklı oranlarda bileşimler hazırlanarak 15 farklı numune oluşturulmuştur. Tetradekan oranını %6,67'den başlamak üzere %96,67'ye kadar değiştirmişlerdir. Oluşturulan numunelerin en büyük gizli ısı değeri; (%96,67 tetradekan-%3,33 hekzadekan) karışım oranında 194,7 kJ/kg olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, organik-organik ötektik karışımın aşırı soğuma göstermeden donduğu ve soğutma uygulamaları için uygulanabilir olduğunu görülmüştür.

Kahwaji ve diğ. (2016) dekanolik asit ve tetradekanoik asidin ötektik karışımını bina uygulamaları için kullanılmasını araştırmışlardır. Çalışmada ötektik karışımın ısıl özelliklerinin belirlenmesiyle birlikte ısıl kararlılığını da araştırmışlardır. Hazırlanan numunelerle yapılan deneyler sonucunda en iyi ötektik bileşiminin (0,82 tetradekanoik asit+0,02 dekanolik asit) olduğu belirlenmiştir. Ötektik karışımın erime noktasının 21 °C ve gizli ısı değerinin ise 153 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. Dahası tetradekanoik asit/dekanolik asit ötektik karışımının 3000 ısıl çevrim boyunca ısıl kararlılık gösterdiğini belirlemişlerdir. Erime noktası sıcaklığı ve yüksek gizli ısı değerinin bina uygulamaları için umut vaat ettiği, bina uygulamaları için bu ötektik karışımın kullanımının kararlı ve düşük maliyetli bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Ayrıca makalede yağ asitlerinin düz panel güneş kolektörleri ile birlikte kullanılabilme üzerinde de durulmuştur. Samer ve arkadaşları uygun ötektik karışım bileşenin seçilememesi durumunda karışımında bir faz homojenliğinin sağlanamadığı ve bunun sonucunda bir geçiş sıcaklığı aralığı olduğunu

görmüşlerdir. Bu sorunun ise enerji depolamasının verimliliğini düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.

Mert ve diğ. (2019a) oleik asit-kaprik asit/hekzadekan karışımının St-ko-DVB kabuk ile mikrobayutta başarıyla kapsülle etmişler ve elde ettikleri mikrokapsüllerin enerji depolama performanslarını ısıtılmalı bir plaka içeren hava akışlı yatay bir kanal sisteminde test etmişlerdir. Analiz sonuçları elde edilen mikrokapsüllerin uygun faz değişim sıcaklıkları (14.1–24.0 °C) ve yüksek enerji depolama kapasiteleri (127.3 J g⁻¹) ile düşük sıcaklıklı enerji depolama sistemleri için uygun malzemeler olduklarını göstermiştir.

Mert ve diğ. (2019b) bir başka çalışmalarında, yanıt yüzey deneysel tasarım metodolojisini kullanarak mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddelerin ısı enerji depolama özelliklerinde etkin olan parametreleri istatistiksel olarak araştırmışlardır. Çekirdek/kabuk oranı, emülsifikasyon süresi ve çapraz bağlayıcı miktarı deneysel parametreler olarak belirlenmiş ve bunların erime gizli ısı, üretilen mikrokapsüllenmiş faz değiştiren madde miktarı ve kapsülasyon oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen matematiksel model denklemler ve bunların analizi sonucunda belirlenen cevaplar üzerinde en etkin parametrenin çekirdek/kabuk oranı olduğu görülmüştür.

Sarı ve diğ. (2015) düşük sıcaklık gizli ısı depolama sistemi için n-tetrakosan ve n-oktadekan ötektik karışımı ile bir çalışma yapmışlardır. Emülsiyon polimerizasyon metodu ile mikrokapsüllenen ötektik karışımın FT-IR ile kimyasal karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ötektik karışımın yüzey morfolojisi ve sentezlenen kapsülün parçacık boyutu POM, SEM ve PSD teknikleri ile incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu sentezlenen kapsülün boyutunun 0,01-115 mikrometre aralığında değiştiği ve tamamıyla bir küresel kapsül elde edilemediği gözlemlenmiştir. DSC ve TGA analizleriyle ötektik karışımın ısı karakterizasyonu hakkında; karışımın erime noktasının 25,96 °C, gizli ısı değerinin ise 156,39 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. Ayrıca analizler sonucu karışımın yüksek ısı dayanıklılığa ve yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu gözlenmiştir. ½ kabuk/çekirdek oranıyla test edilen n-tetrakosan/n-oktadekan ötektik karışımının 5000 ısı çevrim sonrasında bile iyi ısı dayanıklılığa sahip olduğu belirlenmiştir.

Su ve diğ. (2016) ısı enerji depolaması için altıgen bor nitrür içeren n-oktadekan/stearik asit ötektik karışımını hazırlamışlar ve performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda n-oktadekan/stearik asit ötektik karışımı ile bor nitrür arasında herhangi bir kimyasal tepkime oluşmadığı ve ötektik karışımın ısı iletkenliğinin bor nitrür eklenmesi sonrası arttığı gözlemlenmiştir. Erime noktası 28,31 °C ve gizli ısısı 234,15 kJ / kg olan n-oktadekan ve erime ısısı 55,52 °C ve gizli ısısı 185,57 kJ / kg olan stearik asit ile oluşturulan ötektik faz değiştiren maddenin erime noktasının 27,89 °C ve gizli ısı değerinin de 207,8 kJ / kg olduğu belirlenmiştir. Bor nitrür, karbon ile birlikte iyi bir elektrik izolatörüdür. Aynı zamanda yüksek sıcaklık direncine, kimyasal kararlılığa ve yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Hazırlanan %10 oranındaki bor nitrür ve n-oktadekan/stearik asit ötektik karışımının bina uygulamaları için kullanımının çok uygun olduğu belirtilmiştir.

Wei ve diğ. (2016) ötektik karışımlar ile ilgili çalışma yapmışlardır. N-oktadekan-miristik asit ve n-oktadekan-palmitik asit ötektik faz değiştiren maddelerin termokimyasal özelliklerini belirlemiş ve ısı enerji depolaması uygulamalarında kullanılabilirliklerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda n-oktadekan-miristik asit ötektik karışımının ötektik sıcaklığını 299,65 K ve erime gizli ısısını 236 J/g olarak ve n-oktadekan-palmitik asit ötektik karışımının ise ötektik sıcaklığını 300,35 K ve erime gizli ısısını 238 J/g olarak belirlemişlerdir. Elde edilen veriler sonucunda her iki ötektik karışımının da büyük bir gizli ısıya sahip olduğu ve ısı enerji depolama uygulamalarına uygun oldukları ispatlanmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında, elde edilen deneysel veriler kullanılarak ötektik karışımlar için çözüm modelleri oluşturulmuştur.

Qiu ve diğ. (2013) ısı enerji depolaması için n-oktadekanın ısı özelliklerini ve ısı güvenilirliğini belirlemek üzere çalışma yapmışlardır. Mikrokapsül kabuk malzeme olarak akrilik tabanlı polimer kabuk- çapraz bağlı bütül metakrilat (PBMA) ve bütül akrilat (PBA) ve süspanسیون polimerizasyon yöntemi kullanılmıştır. Divinilbenzen ve pentaeritritol triakrilat (PETA) ise çapraz bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile mikrokapsüllemiş faz değiştiren maddenin (mikroFDM) yüzey morfolojisi belirlenmiş olup diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ve termogravimetrik analiz (TGA) ile mikroFDM'in ısı özellikleri, ısı kararlılığı ve ısı güvenilirliği analiz edilmiştir. Mikrokapsüllemiş oktadekan partiküllerinin küresel profile sahip olduğu ve divinilbenzen kullanılarak üretilen

mikroFDM'in, PETA kullanılarak üretilen mikroFDM'e göre daha yüksek ısı kapasiteye ve ısı kararlılığına sahip olduğu ifade edilmiştir. Bütil metakrilat-divinilbenzen/oktadekan maddesinin erime gizli ısı değerinin 126,4 kJ/kg olduğu belirlenmiştir. 1000 ısı çevrim sonunda mikroFDM'in gizli ısı ve faz değiştirme sıcaklığında değişimler gözlenmiştir.

Zhu ve diğ. (2016) organosilika kabuk malzemesi ile nanokapsüllenmiş n-oktadekanın morfolojisi ve faz değişim özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Su/etanol oranının azaltılması, setiltrimetillamonyum bromür (CTAB) konsantrasyonunun artırılması ya da $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonunun artırılması ile nanoFDM'in morfolojisi, nanokapsülün ince kabuklu ya da kalın kabuklu olarak düzenlenebildiğini ifade etmişlerdir. Su/etanol oranının fazla, CTAB konsantrasyonunun az ya da $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ konsantrasyonunun az olduğu durumlarda ince kabuklu nanokapsül elde edildiği, tam tersi durumda ise kalın kabuklu nanokapsül elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, yapılan analizlerde ince kabuklu nanokapsüllü FDM'in aşırı soğuma özelliği gösterdiği, kalın kabuklu nanokapsüllü FDM'de ise aşırı soğuma özelliği göstermediği ifade edilmiştir.

Yu ve diğ. (2013) n-oktadekanın ısı iletkenliğini ve dayanıklılığı geliştirmek amacıyla kalsiyum karbonat (CaCO_3) kabuk ile kapsüle etmiş ve bu sentezlenen malzemenin mikroyapısal ve performans değerlendirmesi çalışmalarını yürütmüşlerdir. FT-IR analizi sonucunda CaCO_3 kabuğun n-oktadekan çekirdeğinin etrafında başarılı bir şekilde üretildiği kanıtlanmıştır. SEM analizi ile n-oktadekan mikrokapsüllerinin küresel bir morfolojiye sahip olduğu ve iyi tanımlanmış bir çekirdek/kabuk mikroyapısına sahip olduğu kanıtlanmıştır. Geniş açılı X ışını saçılması analizi ile de n-oktadekan çekirdeğinin mikrokapsül içinde kristal yapısını korurken CaCO_3 'ün vateritin kristal fazında oluştuğunu göstermiştir. Mikrokapsüllenmiş n-oktadekanın iyi faz değişim performansı sergilediği ve yüksek ısı depolama kabiliyeti elde edildiği görülmüş, ancak kapsülasyon oranı ve kapsülleme verimliliğinin çekirdek/kabuk kütle oranına bağlı olduğu belirlenmiştir. Sentezlenen FDM'in TGA analizi, CaCO_3 ile kapsüllemesi sonucunda n-oktadekanın buharlaşma sıcaklığını arttırarak ısı kararlılığını geliştirdiğini göstermiştir. N-oktadekanın ısı iletkenliği, ısı açıdan yüksek bir iletken olan CaCO_3 kabuğu ile kapsüllemesi nedeniyle önemli ölçüde geliştirilmiştir. Ayrıca CaCO_3 kabuğunun yoğun koruması altında n-oktadekanın dayanıklılığı ve anti-osmoz

özelliği arttırılmıştır. CaCO_3 'ın düşük maliyeti ve kolay elde edilebilir olması sayesinde bu sentez tekniği, inorganik kabuklarla mikrokapsülenmiş FDM'ler için endüstriyel üretimde iyi bir beklenti ve yüksek bir uygulanabilirlik göstermektedir.

Zhang ve diğ. (2009) sol-jel işlemi aracılığıyla n-oktadekanı silika ile kapsülleyerek mikrokapsülenmiş FDM'in ısı iletkenliğini ve performansını arttırmayı amaçlamışlardır. Çalışmada n-oktadekan çekirdek malzeme ve inorganik silika kabuk malzeme olarak tasarlanmıştır. Silika mikrokapsüller, bir inorganik kaynak olarak tetraetoksisilen (TEOS) kullanılarak sol-jel işlemi ile sentezlenmiştir. FT-IR analizi ile silika kabuk malzemesinin, n-oktadekan çekirdeğinin yüzeyinde başarılı bir şekilde üretildiği kanıtlanmıştır. SEM analizi ile silika mikrokapsüllerin iyi tanımlanmış çekirdek/kabuk mikroyapısı ile birlikte küresel bir morfoloji sergilediği görölmüştür. Dahası 2,45 pH'ta sentezlenen silika mikrokapsüllerin pürüzsüz ve yoğun bir yüzey sergilediği, ayrıca bu mikrokapsüllerin boyutlarının 7-16 μm aralığında olduğu belirlenmiştir. Geniş açılı X-ışını saçılması analizi ile n-oktadekanın silika mikrokapsül içinde iyi bir kristallik sürdürdüğu görölmüştür. TGA analizi, silika mikrokapsüllerin iki belirgin basamakta bozunduğu ve iyi bir ısı kararlılığına sahip olduğunu göstermiştir. Silika ile mikrokapsülenmiş n-oktadekanın iyi faz değişim gösterdiği, sol-jel prosesi boyunca çözeltinin reaksiyon asiditesi ve çekirdek malzemenin yüklenmesi kontrol edilerek anlaşılmıştır. Çalışma sonunda mikrokapsülenmiş n-oktadekanın ısı iletkenliğinin, yüksek ısı iletkenlikli silika kabuk varlığı nedeniyle önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekteşirilen çalışmada, düşük sıcaklık uygulamaları kullanımına uygun faz değiştiren madde elde edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma için seçilen n-oktadekanın yüksek erime gizli ısısına (200-244 kJ/kg) sahip olmasına rağmen erime sıcaklığının (28-28,4°C) oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Çekirdek malzeme olarak n-oktadekana göre erime sıcaklığı daha düşük olan n-hekzadekanın (18-20°C) n-oktadekan ile bir karışım şeklinde hazırlanmasına karar verilmiştir. Karışım sonucunda elde edilecek FDM'in 28,4°C'den daha düşük bir erime sıcaklığına sahip olması amaçlanmıştır. Ayrıca, çekirdek/kabuk oranı ve emülgatör konsantrasyonunun elde edilecek FDM'lerin ısı özellikleri ve kapsülasyon oranı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi de tezin amaçları arasındadır. Bu kapsamda, elde edilen parafin karışımının farklı çekirdek/kabuk oranlarında ve farklı emülgatör konsantrasyonlarında stiren/divinilbenzen kabuk ile emülsiyon

polimerizasyon yöntemi ile mikrokapsülleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sentez sonucunda FDM'lerin kimyasal analizi FT-IR ile gerçekleştirilmiş ve analiz sonucunda mikrokapsülleme işleminin başarıyla gerçekleştiği belirlenmiştir. Morfolojik karakterizasyonu SEM analizi ile yapılmış ve mikrokapsülleme parafin karışımının küresel bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. DSC ve TGA ile yapılan ısıl analizler ise FDM'lerin düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılacak uygun gizli ısı değerine ve erime sıcaklığına sahip olduğunu göstermiştir.





3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Deneysel çalışmada, oktadekan-hekzadekan ötektik faz değiştiren maddesi hazırlanmıştır. FDM olarak parafinlerin tercih edilme sebebi ise yüksek gizli ısı değerlerine sahip olmaları, aşırı soğuma göstermemeleri, düşük buhar basıncı özellikleri, ısı ve kimyasal kararlılıkları ve öz-çekirdekleşme gibi özelliklere sahip olmalarıdır. Ayrıca parafinler; kimyasal olarak inertler ve toksik, korozif özellikler göstermemektedirler. Düşük ısı iletkenliğine sahip olmaları bir dezavantaj olsa da bu sorun geniş yüzey alanı ile giderilebilmektedir. Son yıllardaki çalışmalar daha çok parafinlerin kapsüllenmesi süreci sırasında parafine geniş ısı transfer yüzey alanı sağlanması üzerine yoğunlaşmıştır.

Faz değiştiren maddenin, divinilbenzen-stiren monomer karışımı kullanılarak emülsiyon polimerizasyon metodu ile mikrokapsülleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Emülsiyon polimerizasyon yöntemi, yüksek kapsülleme verimine sahip olması sebebiyle tercih edilmiştir.

3.1.1 Kimyasallar

Çalışmada; kabuk malzemeyi oluşturacak monomer olarak stiren (St, Merck, Darmstadt, Almanya), çapraz bağlayıcı olarak ise divinilbenzen (DVB, Aldrich Chemistry, Steinheim, Almanya) kullanılmıştır. Başlatıcı olarak ise 2,2'-azobisizobutironitril (AIBN, Aldrich Chemistry) kullanılmıştır. n-hekzadekan ve n-oktadekan (Merck, Darmstadt, Almanya) çekirdek kısmı oluşturan malzemelerken, emülsiyon kararlılığını sağlayan emülgatör olarak setil trimetilamonyum bromür (CTAB, Sigma) kullanılmıştır.

Tasarlanan ötektik FDM'i meydana getiren çekirdek ve FDM'i saran kabuk malzeme ile mikrokapsüllenmeye ve polimerleşmeye yardımcı olan maddelerin kullanım amaçları aşağıda verilmektedir:

Çekirdek: Faz değişiminin gerçekleşip, ısı depolamasının sağlandığı faz değiştiren maddenin bulunduğu bölümdür. Çekirdek malzeme, kimyasal açıdan inert olmalı, aşırı soğuma ve faz ayrışması özelliği göstermemelidir. Ayrıca çevresel açıdan zararsız olmalı, korozif ve toksik olmamalıdır. Deney kapsamında çekirdek malzeme olarak hekzadekan/oktadekan ötektik karışımı hazırlanmıştır. Çekirdek malzeme olarak hekzadekan/oktadekan ötektik karışımının tercih edilmesinin nedeni ise içinde buldukları parafin sınıfının korozif olmama, aşırı soğuma göstermeme, toksik olmama..vb özelliklerini göstermelerinin yanı sıra malzemelerin uygun erime sıcaklıklarına, n-oktadekan 28,4°C ve n-hekzadekan 18°C, sahip olmasıdır. Ayrıca seçilen çekirdek malzemeler, suda çözünmeme özellikleri ile kolayca emülsiyon oluşturulabilmektedir.

Kabuk: Kabuk malzemeler, faz değiştiren maddeyi içinde bulunduran kapsülleri oluşturmakta ve faz değişimi sırasında madde kaybının önlenmesini sağlamaktadırlar. Kabuk malzemeler, organik ya da inorganik malzemelerden seçilebilmekte hatta organik-inorganik kombinasyonlarında hibrit kabuk malzeme tercih edilebilmektedir. Kabuk malzemelerin yüksek sıcaklıklarda ısıl kararlılığa sahip olması, yüzey yapısının pürüzsüz ve minimum gözeneklilik ile FDM erime noktasının üstündeki sıcaklıklarda herhangi bir sızıntıyı önlemesi beklenmektedir. Bununla birlikte kabuk malzemeler, FDM'e mekanik mukavemet ve şekil kararlılığı sağlamaktadırlar. Çapraz bağlayıcı ise kabuk malzeme üzerinde bir polimer zincirinin, bir kimyasal bağ vasıtasıyla başka bir polimer zinciri ile bağlanmasını sağlamaktadır. Çapraz bağlama, kabuk malzemesine mekanik mukavemet katmaktadır (Alva ve diğ, 2017). Deney kapsamında kabuk malzeme olarak stiren, çapraz bağlayıcı olarak ise divinilbenzen kullanılmıştır.

Başlatıcı: Süspansiyon ve emülsiyon polimerizasyonu gibi radikal polimerizasyon tekniklerinde kullanılmakta olan başlatıcı madde, polimerizasyonun gerçekleşmesine yardımcı olmaktadır. Radikal polimerizasyonda başlatıcı, sıcaklık, ışık gibi dış tetikleyicilerin etkisi altında iki serbest radikale ayrılmaktadır. Açığa çıkan bu serbest radikal, monomer molekülüne saldırıp, burada monomer ile bir bağ oluşturarak polimerizasyon sürecini başlatmaktadır. İkinci monomer molekülü ise bir polimer zinciri meydana getiren ilk monomerin reaktif bölümü ile tepkimeye girmekte ve zincirde yeni bir reaktif bölüm meydana getirmektedir. Polimerizasyon, polimer zincirinin büyüdüğü reaktif bölüm ile yeni monomer molekülleri arasında ve

her büyüme basamağının sonunda yeni reaktif bölüm meydana getirerek devam etmektedir. Yaklaşık bin ekleme sonunda ya zincir sonlandırma ya da zincir aktarma tepkimesi ile polimerizasyon süreci sonlandırılmaktadır. Zincir sonlandırma durumunda bir ölü polimer zinciri yani reaktif bölümsüz bir zincir oluşturulmakta ve reaktif bölüm tersinmez bir şekilde kaybedilmektedir. Zincir aktarma tepkimesi durumunda ise yine bir ölü polimer zinciri oluşturulmakta fakat reaktif bölüm yeni bir zincir başlatabilecek başka bir türe aktarılmaktadır (Lena ve Matyjaszewski, 2010). Deney kapsamında başlatıcı madde olarak 2,2'-azobisisobütironitril (AIBN) kullanılmıştır.

Emülgatör: Emülsiyon çözeltiler, birbiri içinde çözünmeyen sıvı-sıvı karışım sistemidir. Temel mikrokapsülleme tekniği; FDM'in yağ fazı olarak bulunduğu su emülsiyonunda, yağ fazının hazırlanmasını içermektedir. FDM, ultrasonik veya mekanik karıştırıcı ile sürekli bir karışım prosesi altında, su fazı içerisinde mikron boyutlu yağ damlacıkları olarak dağılmaktadır. Buna karşılık olarak emülsiyon, ara yüzey alanını ve enerjisini minimuma indirmek ve ayırmak için sıvı-sıvı sistemin doğal eğilimi (yüzey gerilimi) sonucu kararsız haldedir. Emülgatör, yağ damlacıkları ile sulu çözelti ara yüzeyi arasında ince bir film oluşturmakta ve iki farklı yağ damlacığı arasında doğrudan teması engelleyerek yüzey gerilimini azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu da emülsiyona kinetik kararlılık vermektedir ve böylece sürekli bir emülsiyon karışımı oluşturulmaktadır (Alva ve diğ., 2017). Deney kapsamında emülgatör madde olarak setil trimetilamonyum bromür (CTAB) kullanılmıştır.

3.2 Metot

3.2.1 Kullanılan cihazlar

Çalışma kapsamında ısıtmalı manyetik karıştırıcı (Daihan Scientific marka MSH-20D) ve mekanik karıştırıcı (Daihan Scientific marka HS-100D model) kullanılmıştır. Vakumlu kurutma fırını, hazırlanan FDM maddelerinin vakum atmosferi altında kontrollü kurutulması amacıyla kullanılmıştır.

3.3 Faz Değiştiren Maddelerin Sentezlenmesi

N-oktadekan/n-hekzadekan ötektik karışımının kapsülasyon işlemi Çizelge 3.1.'deki reçeteye uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1: Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin hazırlanma reçetesi.

Çekirdek içeriği	Hacim yüzdesi	Kabuk içeriği	Hacim yüzdesi
OD	50	St	90
HD	50	DVB	10

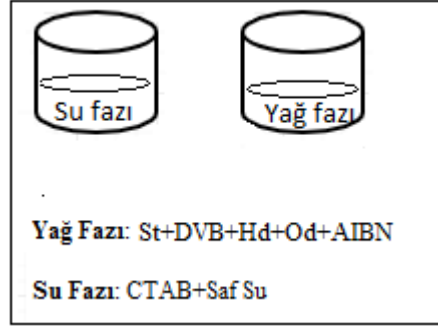
Sentezlenen numunelerin çekirdek/kabuk hacimsel oranları ve sürfaktan konsantrasyonu ise Çizelge 3.2.'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.2: Emülsiyon polimerizasyon yöntemi ile hazırlanan mikro FDM'lerin bileşimleri.

Numuneler	Çekirdek/Kabuk Oranı (Ç/K)	Sürfaktan Konsantrasyonu (C _{süf.}) (mmol/L)
1	1/1	50
2	1/1	60
3	1/1	70
4	1,5/1	50
5	1,5/1	60
6	1,5/1	70
7	2/1	45
8	2/1	55
9	2/1	60

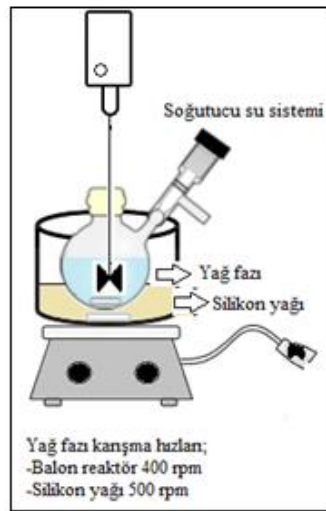
Deney kapsamında gerçekleştirilen yağ/su fazı emülsiyonunun hazırlanması aşamasında; yağ fazı olarak adlandırılan ve kabuk malzeme (mikrokapsül) ile çekirdek malzemeyi (FDM) içinde bulunduran karışım ayrı bir cam beher içinde hazırlanmıştır (Şekil 3.1). Su fazı olarak adlandırılan emülgatörü (sürfaktan) ve saf suyu içinde barındıran karışım ise başka bir cam beherde, ayrı bir biçimde hazırlanmıştır. Tezin önceki bölümlerinde de bahsedildiği gibi deneyde mikrokapsül

malzeme olarak stiren/divinilbenzen, FDM olarak n-oktadekan/n-hekzadekan ötektik karışımı tercih edilmiştir. Bu malzemeler yağ fazını meydana getirmektedir. Emülgatör olarak ise CTAB kullanılmıştır. Su fazı ve yağ fazının birbirlerine karıştırılma işlemi ise damlatma hunusu yardımı ile su fazının yağ fazı içine damla damla eklenmesi ile gerçekleştirilmiştir.



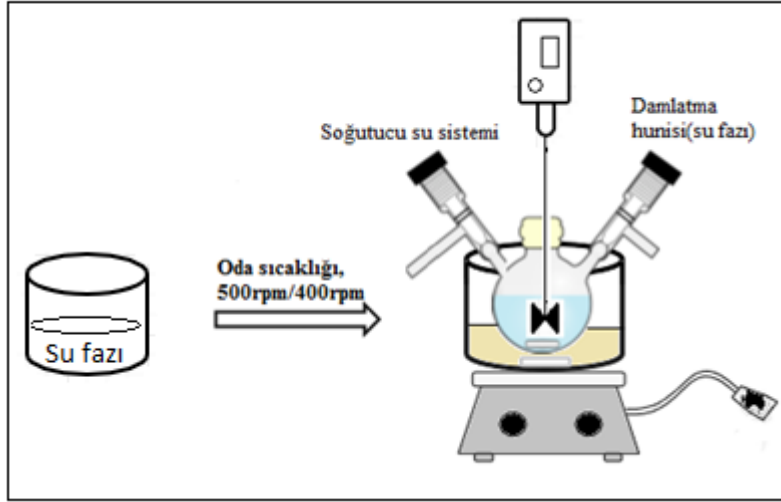
Şekil 3.1: Su fazı ve yağ fazı hazırlama proses şeması.

Yağ fazı, kabuk malzeme olarak stiren ve divinilbenzen; çekirdek malzeme olarak hekzadekan ve oktadekan ve ayrıca polimerizasyonda başlatıcı olarak kullanılan AIBN'nin (toplam çözelti miktarının %1'i oranında) bir balon reaktör içinde belirlenen miktarlarda karıştırılmasıyla hazırlanmış ve daha sonra Şekil 3.2'de gösterildiği gibi karışım mekanik karıştırıcıya alınmıştır. Balon reaktör, sistemde ısı iletimini sağlayacak miktarda silikon yağını içinde bulunduran kristalizuarın içerisine daldırılmıştır. Daha sonra silikon yağı 500 rpm, balon reaktördeki karışım ise 400 rpm hızında oda sıcaklığında 10 dakika boyunca karıştırılmıştır.



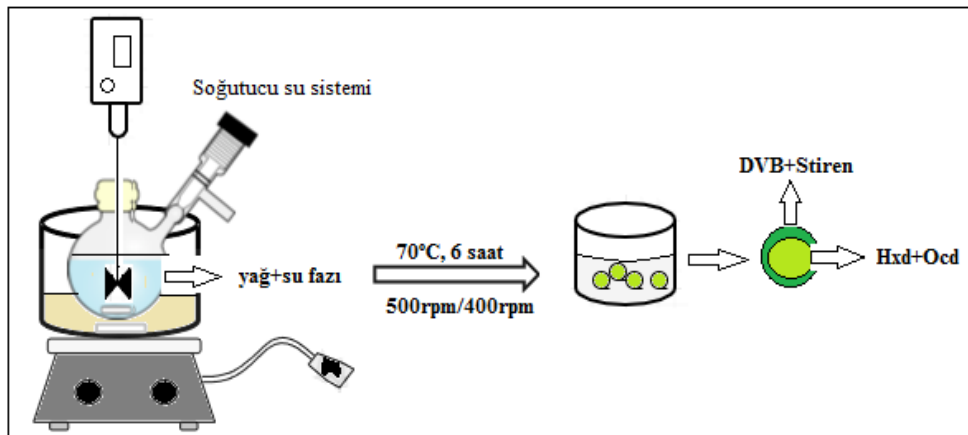
Şekil 3.2: Yağ fazı karışım proses şeması.

Deneyin ikinci aşaması olan su fazının hazırlanması ise CTAB ve deiyonize suyun oda sıcaklığında 500 rpm hızında ayrı bir manyetik karıştırıcıda karıştırılması ile elde edilmiştir.



Şekil 3.3: Su fazının yağ fazına eklenme proses şeması.

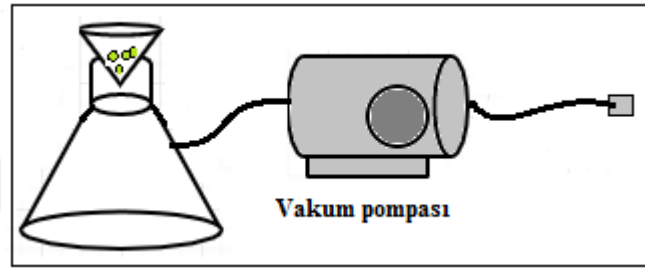
Son olarak su fazı, yağ fazı içine damlatma yöntemi ile alınmıştır. Damlatma işlemi sürecinde su fazının, yağ fazı içindeki miktarı arttıkça faz evirmesi (phase inversion) adı verilen durum gerçekleşmiş ve su/yağ sistemi yağ/su sistemine dönüşerek emülsiyon oluşmuştur. Hazırlanan yağ/su fazı, emülsiyon oluşumunun tamamlanması için oda sıcaklığında 60 dakika boyunca mekanik karıştırıcıda karıştırılmıştır. 60 dakikalık emülsifikasyon süresi sonunda ise yağ/su emülsiyonunun polimerizasyonu için ısıtıcı 70 °C'ye set edilerek 6 saat boyunca Şekil 3.4'te gösterildiği üzere karışması sağlanmıştır.



Şekil 3.4: Ötektik faz değiştiren maddenin emülsiyon polimerizasyon yöntemi ile mikrokapsülleme şeması.

6 saat sonunda elde edilen ürün oda sıcaklığına soğutulmuş ve etil alkol içerisinde alınarak çökelmenin sağlanması için en az 24 saat boyunca -17°C 'de bekletilmiştir.

Elde edilen ve -17°C 'de 24 saat bekletilen çözelti halindeki numune, Şekil 3.5'te gösterildiği üzere vakum altında ince filtre kağıdından süzümüştür. Filtre edilen mikroFDM bünyesinde bulunan nemi giderilmek üzere 40°C sıcaklığındaki vakum etüvüne konulmuştur. Sentezlenen mikroFDM vakum etüvünde en az 24 saat bekletilmiştir. Son olarak ise etüvde nemini kaybeden mikroFDM tartım işlemleri gerçekleştirilerek numune kaplarına alınmış ve desikatörde muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.5: Ötektik faz değıştiren maddenin süzme ve yıkama proses şeması.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, emülsiyon polimerizasyon yöntemiyle çekirdek malzeme olarak n-oktadekan/n-hekzadekan ötektik karışımı ve kabuk malzeme olarak poli(stiren-kodivinilbenzen)den oluşan, düşük sıcaklıklı ısı enerji depolama uygulamalarında kullanılması öngörülen seri halde mikrokapsüllenmiş FDM'ler (mikroFDM) hazırlanmış ve bu malzemelerin kimyasal, ısı ve morfolojik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda elde edilen mikroFDM'lerin kimyasal karakterizasyonları oda sıcaklığında $650-4000 \text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralığında FT-IR spektrofotometresi (Perkin Elmer, Spectrum 100) ile, ısı karakterizasyonları inert azot atmosferi altında $5 \text{ }^{\circ}\text{C}.\text{dk}^{-1}$ ısıtma hızında DSC 7020 (HITACHI) cihazı ve $10 \text{ }^{\circ}\text{C}.\text{dk}^{-1}$ ısıtma hızında TGA (Seiko TG/DTA 6300 ısı analiz sistem aracı, Seiko Instruments, Tokyo, Japonya) cihazı ile, morfolojik değerlendirmeleri ise SEM görüntüleme (FEI Inc. Inspect S50 SEM-EDAX) cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikrokapsüllerin boyut dağılımının belirlenmesinde CoralDRAW X8 programı kullanılmıştır.

N-oktadekan/n-hekzadekan karışımının kapsülasyon oranı DSC ile belirlenen entalpi değerlerine dayanan eşitlik (4.1)'de gösterilen formül ile hesaplanmıştır:

$$\text{Mikrokapsülün FDM içeriği (\% ağırlıkça)} = \frac{\Delta H_{\text{mikroFDM}}}{\Delta H_{\text{FDM karışımı}}} \times 100 \quad (4.1)$$

Burada, $\Delta H_{\text{mikroFDM}}$ mikrokapsüllenmiş FDM'e ait entalpi (kJ/kg) değerini, $\Delta H_{\text{FDM karışımı}}$ ise kapsülenmemiş ötektik karışım halindeki FDM'e ait entalpi (kJ/kg) değerini ifade etmektedir.

Bu çalışma kapsamında çekirdek/kabuk (Ç/K) oranı ve sürfaktan konsantrasyonunun ($C_{\text{süf.}}$) FDM'lerin ısı özellikleri ve kapsülasyon oranına etkisi de değerlendirilmiştir. Çizelge 4.1'de yapılan analizler sonucunda üretilen mikroFDM'lerin farklı çekirdek/kabuk oranlarında ve değişen sürfaktan konsantrasyonlarında elde edilen erime gizli ısıları değerleri (ΔH_e), erime pik sıcaklıkları (T_{ep}) ve Eşitlik 4.1'de verilen

denkleme göre hesaplanan kapsülasyon oranları verilmiştir. Çizelge 4.1'den görüldüğü üzere, çekirdek/kabuk (Ç/K) oranı, mikrokapsüllerin erime gizli ısı değeri (ΔH_e) üzerinde önemli bir etkiye sahipken 19,97-21,77 °C aralığında değişim gösteren erime pik sıcaklıklarının (T_{ep}) her iki parametreden de çok fazla etkilenmediği ifade edilebilir. Bundan başka, tez çalışmasının başında ifade edildiği gibi çekirdek malzeme olarak n-oktadekan ve n-hekzadekan ötektik karışımı hazırlayıp mikroFDM'in erime sıcaklığını 28,4 °C altına düşürmek bu tezin amaçları arasındadır. Dolayısıyla elde edilen mikroFDM'lerin erime sıcaklıkları değerlendirildiğinde bu amaca ulaşıldığı görülmektedir. Diğer yandan Çizelge 4.1 incelendiğinde sürfaktan konsantrasyonunun erime gizli ısı değeri ve FDM içeriği (%) değerlerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Buna göre, erime gizli ısı ve kapsülasyon oranı ilk anda sabit Ç/K oranında (1/1 veya 1.5/1) $C_{süf.}$ artmasıyla artarken, $C_{süf.}$ değeri 60 mmol/L aştığında nispeten azalma göstermiştir. Bu durum sürfaktan konsantrasyonu 60 mmol/L'nin üzerinde olduğunda emülsiyon sisteminin bozulmasına atfedilebilir. Sudaki CTAB konsantrasyonunun artmasıyla artan serbest CTAB molekülleri partiküllerin aglomerasyonuna ve koloidal destabilizasyona neden olmaktadır. Kritik misel konsantrasyonu (CMC) olarak adlandırılan belirli sürfaktan konsantrasyonu üzerindeki fazla miktardaki CTAB konsantrasyonu durumunda yağ fazı damlacıklardan serbest misellere doğru transfer olmaktadır. Böylelikle, uygun sürfaktan konsantrasyonunda hazırlanan mikrokapsüllere göre elde edilen bu mikrokapsüller çekirdek malzeme olarak daha az miktarda FDM içermekte ve FDM içerikleri (%) daha düşük olmaktadır. Bununla beraber, sabit Ç/K=2/1 oranında sürfaktan konsantrasyonunun ($C_{süf.}$) 45 mmol/L'den 60 mmol/L artırılmasıyla erime gizli ısı değerlerinde azalma olmuştur. Tüm bu sonuçlara göre literatürle uyumlu olarak (Sánchez ve diğ., 2008) hazırlanan mikroFDM'ler içinde en yüksek gizli ısı depolama kapasitesi (88 kJ/kg) ve en yüksek kapsülasyon oranı (%56,77), en yüksek Ç/K (2/1) oranına ve en düşük sürfaktan konsantrasyonuna $C_{süf.}$ (45 mmol/L) sahip 7 nolu numunede elde edilmiştir. Hazırlanan mikroFDM'lerden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, erime gizli ısı değeri Çekirdek/Kabuk (Ç/K) oranına ve emülsiyon sisteminin dengesine bağlı olarak belirlenebilen optimum sürfaktan konsantrasyonuna ($C_{süf.}$) önemli derecede bağlıdır.

Çizelge 4.1: Sentezlenen FDM'lere ait özellikler.

Numuneler	Ç/K	C _{süf.}	Erime gizli ısı (ΔH _e) (kJ/kg)	Erime pik sıcaklığı T _{ep} (°C)	FDM içeriği (%ağır.)
Saf OD	-	-	191,70	34,24 ^a	-
Saf HD	-	-	191,10	25,51 ^b	-
OD/HD ikili karışımı (%50/50, hacimsel)	-	-	155,00	24,37	-
1	1/1	50,00	38,00	21,44	24,51
2	1/1	60,00	70,80	20,49	45,67
3	1/1	70,00	47,70	20,18	30,77
4	1,5/1	50,00	67,80	21,23	43,74
5	1,5/1	60,00	72,00	19,97	46,45
6	1,5/1	70,00	69,50	21,77	44,83
7	2/1	45,00	88,00	21,06	56,77
8	2/1	55,00	79,70	20,98	51,42
9	2/1	60,00	64,80	21,52	41,80

^a: DSC ısıtma eğrisinde saf OD'nin erime başlangıç sıcaklığı, T_{eb}=28.58 °C

^b: DSC ısıtma eğrisinde saf HD'nin erime başlangıç sıcaklığı, T_{eb}=20.22 °C

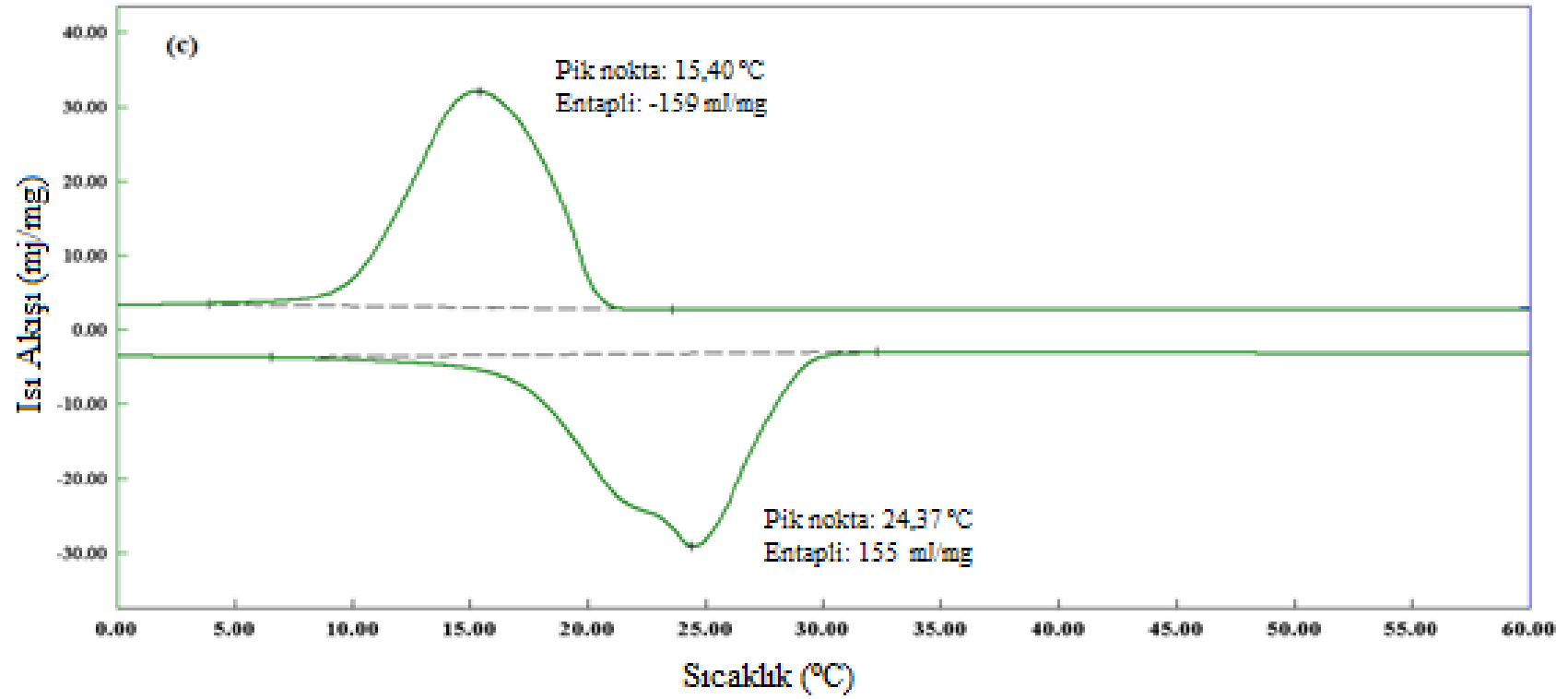
4.1 Faz Değiştiren Maddelerin Isıl Analizleri

Elde edilen FDM'lerin DSC ve TGA analizleri yapılarak bu maddelerin faz değişim sıcaklıkları, gizli ısı depolama kapasiteleri, ısıl kararlılıkları ve ısıl bozunma sıcaklıkları belirlenmiştir.

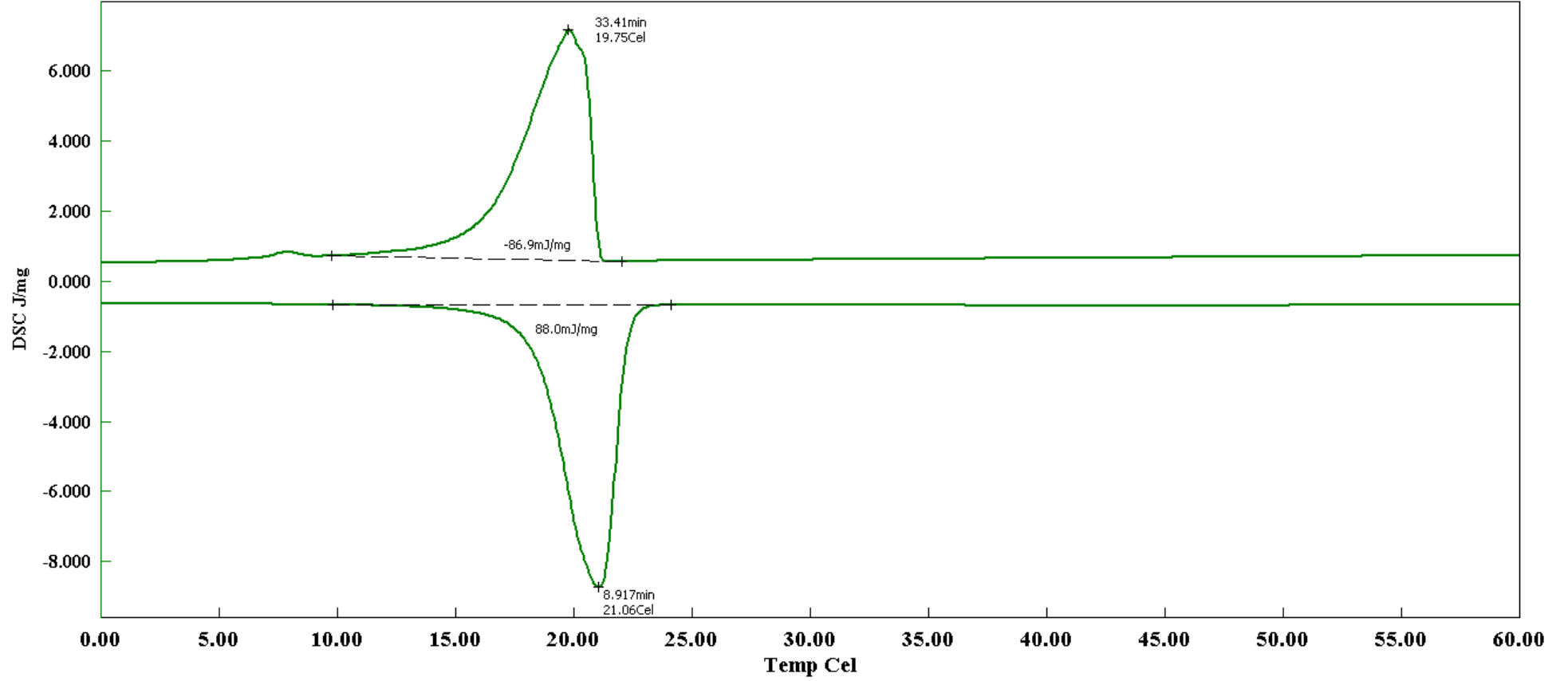
Hazırlanan saf n-oktadekan/n-hekzadekan ikili ötektik karışımının DSC analizi Şekil 4.1'de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda n-oktadekan/n-hekzadekan'ın erime gizli ısı 155 kJ/kg ve erime pik sıcaklığı 24,37 °C olarak, kristallenme gizli ısı -159 kJ/kg ve kristallenme pik sıcaklığı ise 15,40 °C olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1'den verilen DSC analizine göre, karışımdaki HD ile OD'nin yüzde hacmi (% v / v) yaklaşık % 50 ile % 50 olduğunda, her iki bileşen de aynı anda 24,37 °C'lik sabit bir sıcaklıkta erime göstermiştir. Bu sıcaklık, hazırlanan ötektik karışım oranında katı fazda bir moleküler yeniden düzenlemeye atfedilen, ötektik geçiş sıcaklığı olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla, gözlenen erime sıcaklığının (24,37 °C) HD/OD ikili karışımının ötektik geçiş sıcaklığı olduğu ve HD'nin OD'ye hacimce yüzde oranının % 50/% 50 olduğu durumda elde edildiği ifade edilebilir. Hazırlanan mikroFDM'ler içinde en yüksek FDM (%) içeriğine ve gizli ısı depolama kapasitesine sahip 7 numaralı, poli(stiren-ko-divinilbenzen) ile mikrokapsüllenmiş oktadekan/hekzadekan ötektik karışımının DSC analizi ise Şekil 4.2'de sunulmuştur. Analiz sonucunda numunenin; ısıtma eğrisinden elde edilen erime gizli ısı 88 kJ/kg ve erime sıcaklığı 21,06 °C olarak, soğutma eğrisinden elde edilen kristallenme gizli

ısıısı -86,9 kJ/kg ve kristallenme sıcaklığı ise 19,75 °C olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda daha önce belirtildiği gibi 7 nolu numunenin Eşitlik (4.1)'e göre hesaplanan kapsülasyon oranı %56,77 olarak bulunmuştur. Şekil 4.3'te ise stiren/divinilbenzen kabuk malzemenin DSC analizi gösterilmiştir. Şekil 4.3'ten görüldüğü üzere, ne ısıtma ne de soğutma aşamalarında termogramda herhangi bir pike rastlanmamıştır. Beklenildiği gibi elde edilen bu sonucun sebebi kabuk malzemenin içerisinde herhangi bir faz değıştiren maddenin bulunmamasıdır.

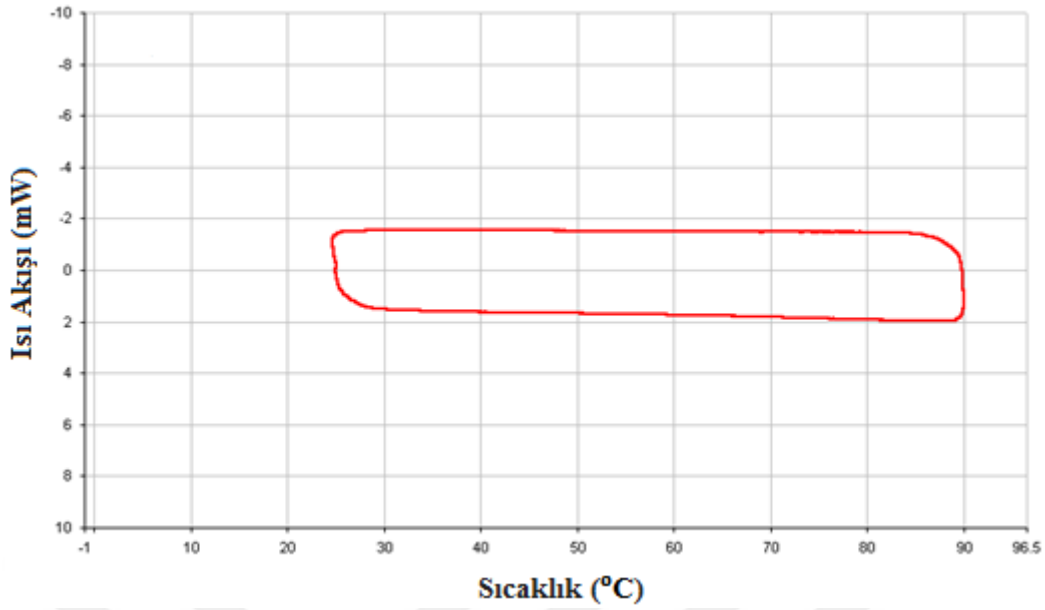




Şekil 4.1: n-oktadekan/n-hekzadekan ikili ötektik karışımının DSC termogramı.

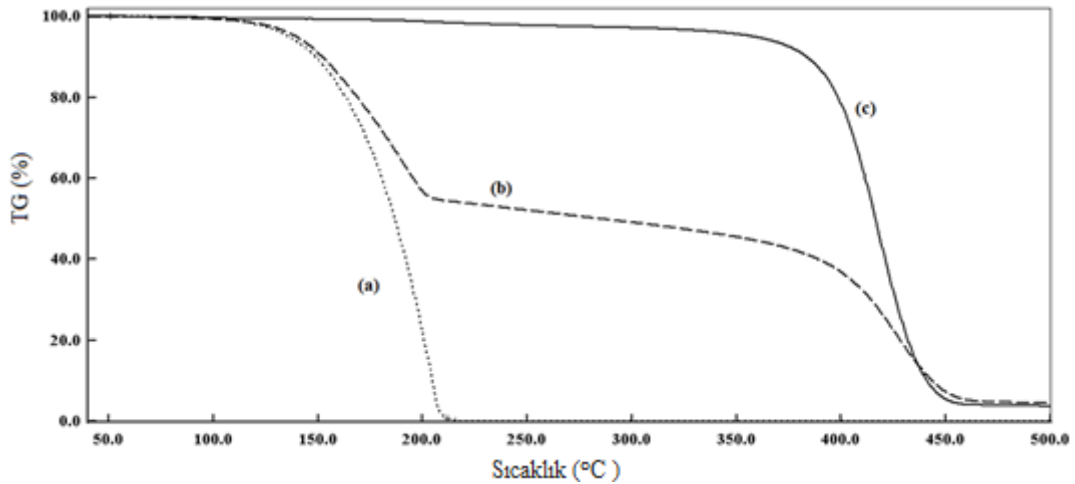


Şekil 4.2: Mikrokapsüllenmiş oktadekan/hekzadekan ötektik karışımının DSC termogramı.

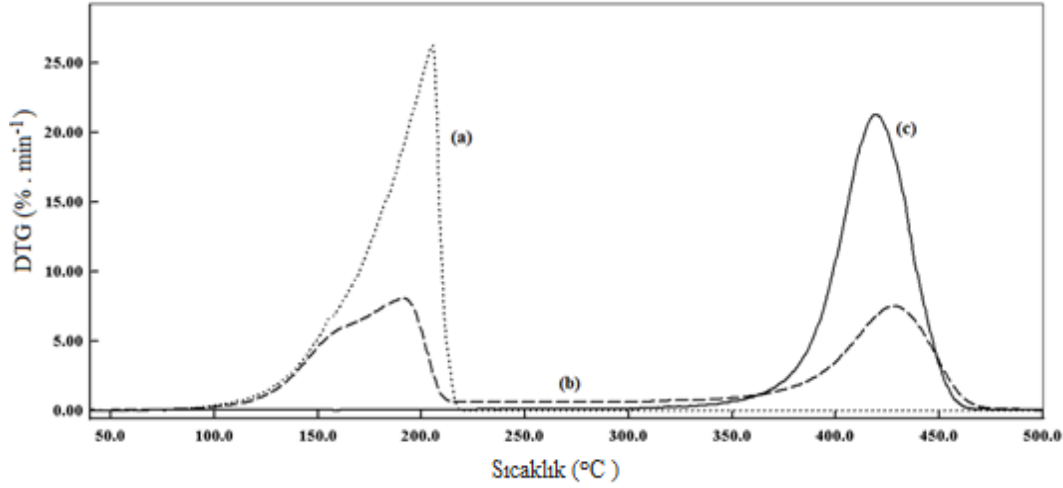


Şekil 4.3: Poli(St-ko-DVB) kabuk malzemenin DSC termogramı.

Hazırlanan saf ötektik parafin karışımının, kabuk malzemenin ve mikrokapsüllenmiş parafin karışımının (7 nolu örnek) ısıl kararlılıkları TGA yöntemi ile analiz edilmiştir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te 7 nolu mikroFDM, saf ötektik FDM karışımı ve kabuk malzemenin sırasıyla TG ve DTG eğrileri verilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin ısıl bozunma karakteristikleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.4: (a) saf FDM karışımı (%50/50, hacimce), (b) mikrokapsüllenmiş FDM (Ç/K=2/1) ve (c) kabuk malzemenin (%90/10, hacimce) TG eğrileri.



Şekil 4.5: (a) saf FDM karışımı (%50/50, hacimce), (b) mikrokapsüllenmiş FDM (Ç/K=2/1) ve (c) kabuk malzemenin (%90/10, hacimce) DTG eğrileri.

Şekil 4.4 ve 4.5'te görüldüğü üzere n-hekzadekan ve n-oktadekandan oluşan saf parafin karışımının ve boş kabuk malzemenin tek bir basamakta bozunduğu gözlenmektedir. Saf parafin karışımı 160,3-211,6 °C sıcaklık dereceleri arasında bozunma gösterirken kabuk malzeme 382,5-450,8 °C sıcaklıkları arasında bozunmaya uğramaktadır. Belirtilen sıcaklık aralıklarında kabuk malzeme ve saf FDM karışımının ağırlık kayıpları ise sırasıyla %96,2 ve %100 olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, sentezlenen mikrokapsüllenmiş n-oktadekan/hekzadekan karışımının ise iki basamakta bozunduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.2: TGA/DTG sonuçları.

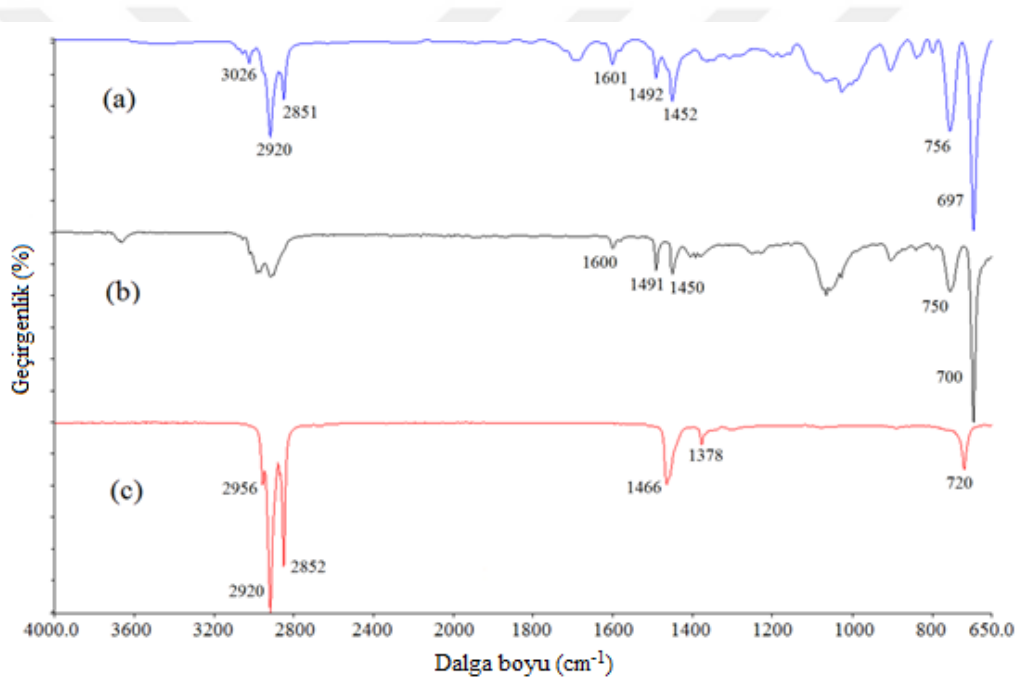
Numune	TGA birincil bozunma sıcaklık aralığı (°C)	DTG birincil bozunma piki (°C)	Yüzde kütle kaybı (%)	TGA ikincil bozunma sıcaklık aralığı (°C)	DTG ikincil bozunma piki (°C)	Yüzde kütle kaybı (%)
St/DVB kopolimer kabuk	-	-	-	382,5-450,8	418,9	96,2
MikroFDM	125,4-209,0	191,5	50,3	384,8-461,8	428,1	45,5
Saf ötektik FDM karışımı	160,3-211,6	205,1	100,0	-	-	-

Çekirdeği malzemeyi oluşturan FDM karışımının evaporasyonu/bozunmasına karşılık gelen ilk bozunma basamağı 125,4-209 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiş ve ağırlık kaybı %50,3 olarak bulunmuştur. İkinci bozunma adımı ise 384,8-461,8 °C sıcaklık aralığında

gerçekleşmiş ve poli(St-ko-DVB) kabuk malzemenin bozunmasına karşılık gelen bu adımda ağırlık kaybı % 45,5 olarak bulunmuştur. Analiz sonuçlarından görüldüğü üzere tasarlanan mikroFDM'nin ilk bozunma adımı çekirdek malzemesinin buharlaşması ve ayrışmasına karşılık gelirken, ikinci bozunma adımı kabuk malzemenin degradasyonu sebebiyle gerçekleşmiştir.

4.2 Faz Değiştiren Maddelerin Kimyasal Analizi

Hazırlanan mikroFDM (7 numaralı numune), saf ötektik FDM karışımı ve kabuk malzemenin kimyasal karakterizasyonları FT-IR spektroskopisi ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu numunelerin FT-IR spektrumları Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6: (a) Mikrokapsüllenmiş FDM (Ç/K=2/1), (b) kabuk malzeme (hacimce %90/10) ve (c) saf ötektik FDM karışımının (hacimce %50/50) FT-IR spektrumları.

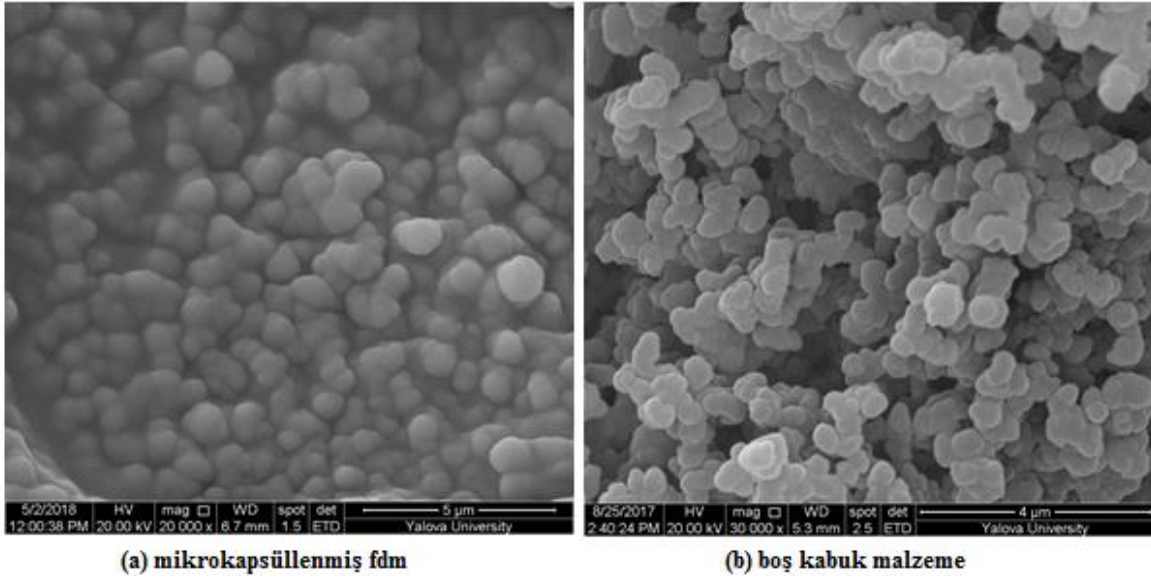
Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, saf parafin karışımının, alifatik zincirlerinin C-H gruplarının gerilme titreşimleri sebebiyle meydana gelen absorbans bant değerleri 2956, 2920 ve 2852 cm⁻¹ de görülmektedir. Karışımı oluşturan parafin bileşiklerinin karakteristik bantları ise 1466, 1378 ve 720 cm⁻¹ de gözlenmektedir. 720 cm⁻¹'de gözlenen pik -CH₂ gruplarının sallanma titreşiminden meydana gelirken, 1466 ve 1378 cm⁻¹'de gözlenen pikler ise C-H grubuna ait bükülme titreşiminden dolayı meydana gelmektedir. Kabuk malzemenin

spektrumuna bakıldığında ise $1600-1450\text{ cm}^{-1}$ ve $750-700\text{ cm}^{-1}$ de yer alan piklerin polistirene ait sırasıyla aromatik C=C ve C-H grupları sebebiyle oluştuğu belirlenmiştir.

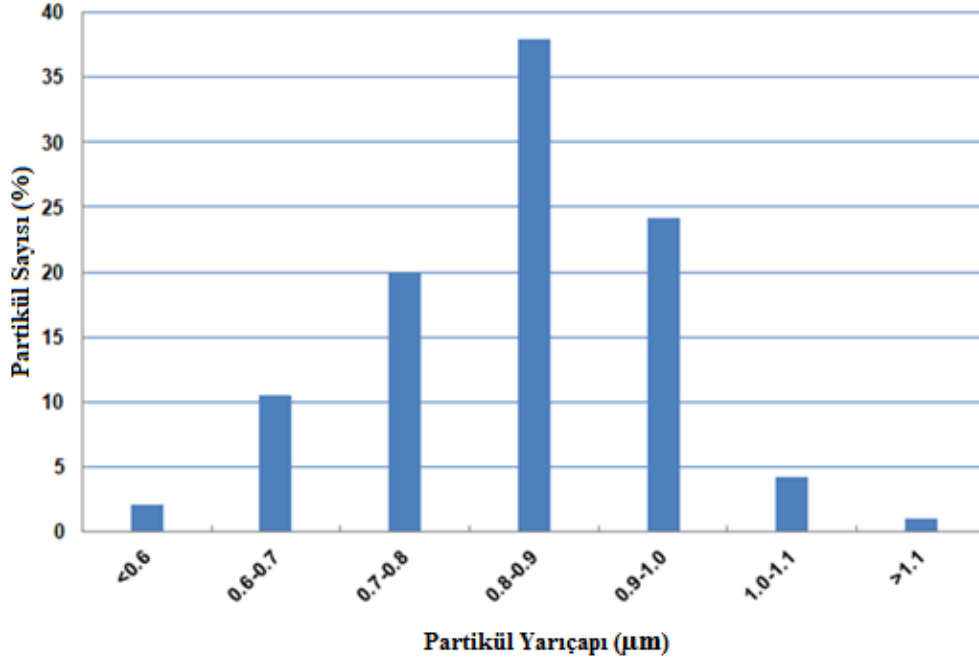
Şekil 4.6a'dan görüldüğü üzere, saf parafin karışımı ve kabuk malzemenin karakteristik pikleri, mikroFDM'in FT-IR spektrumunda da gözlenmektedir. Bu gözlem hazırlanan ötektik FDM karışımının başarılı bir şekilde kapsüllendiğini kanıtlamaktadır.

4.3 Faz Değiştiren Maddelerin Morfolojik Analizi

Hazırlanan mikroFDM'ler içinde en yüksek ısı depolama kapasitesine ve kapsülasyon oranına sahip mikroFDM (7 nolu numune) ve boş kabuk malzemenin morfolojik özellikleri SEM analizi ile belirlenmiştir. Şekil 4.7'de sırasıyla mikroFDM ve boş kabuk malzemeye ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Ayrıca mikroFDM'e ait partikül boyut dağılım analizi ise Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: Mikrokapsüllenmiş parafin karışımı ve boş kabuk malzemenin SEM analiz görüntüleri.



Şekil 4.8: Mikrokapsülenmiş parafin karışımının (mikroFDM) partikül boyut dağılımı.

Şekil 4.7’de de görüldüğü gibi elde edilen FDM mikrokapsülleri hemen hemen pürüzsüz, kompakt ve küresel bir görünüme sahiptir. Şekil 4.8’de ise mikrokapsüllerin partikül boyutunun 0,6 ilave 1,1 µm arasında değiştiği görülmektedir. Mikrokapsüllerin görüntüleri literatürle uyumludur (Tumirah K. ve diğ, 2014; Sarier, ve diğ, 2015; Konuklu ve diğ, 2015). Tanecik boyut dağılım analizine göre mikrokapsüllerin ortalama çaplarının $0,840 \pm 0,11 \mu\text{m}$ olduğu ve tek model dağılım sergiledikleri belirlenmiştir. Literatürde de belirtildiği üzere (Kwon ve Kim, 2016) şekil ve büyüklük bakımından neredeyse tek tip mikrokapsüllerin oluşumu, emülsiyon sistemine ikincil parçacık oluşumunu önleyebilecek bir çapraz bağlayıcı olarak DVB'nin eklenmesine bağlanabilir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, düşük sıcaklıklı ısı enerji depolama uygulamalarında kullanılma potansiyeli olan mikroFDM'ler hazırlanmıştır. Bu amaçla, n-oktadekan/n-hekzadekan ötektik paraffin karışımı hazırlanmış ve stiren/divinilbenzen kabuk malzeme ile mikrokapsülleme gerçekleştirilmiştir. Mikrokapsülleme yöntemi olarak emülsiyon polimerizasyon yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan MikroFDM'lerin gizli ısı depolama kapasitesi ve kapsülasyon oranı üzerinde farklı çekirdek/kabuk oranlarının ve farklı sürfaktan konsantrasyonlarının etkileri de araştırılmıştır.

Yapılan FT-IR analizi sonucunda hazırlanan ötektik paraffin karışımının başarılı bir şekilde mikro boyutta kapsüllendiği belirlenmiştir. SEM analizi sonucunda mikrokapsüllerin hemen hemen küresel bir yapıya sahip olduğu anlaşılmış ve partikül boyut analizi ile de partikül boyutlarının 0,60 - 1,10 µm arasında tek model dağılıma uygun olarak değiştiği görülmüştür. Isıl enerji depolama özellikleri ve kapsülasyon oranı üzerinde sürfaktan konsantrasyonu ve çekirdek/kabuk oranının etkileri DSC analizi ile belirlenmiştir. En yüksek gizli ısı depolama kapasitesi ve en yüksek kapsülasyon oranına, 7 nolu numune ile ulaşılmıştır. Söz konusu numunenin gizli ısı depolama kapasitesi 88,00 kJ/kg ve kapsülasyon oranı ise % 56,77 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, en yüksek çekirdek/kabuk oranı olan 2/1 oranı ve en düşük sürfaktan konsantrasyonu olan 45,00 mmol/L'de elde edilmiştir. Numunenin erime sıcaklığı 21,06 °C ve kristallenme sıcaklığı 19,75 °C olarak, gizli ısı depolama değerleri ise sırasıyla 88,00 kJ/kg ve -86,90 kJ/kg olarak belirlenmiştir. TGA analizi sonucuna göre ise mikroFDM'nin iki basamakta ve yüksek sıcaklıklarda bozunmaya uğradığı anlaşılmıştır. Bu analiz sonucuna göre, hazırlanan mikroFDM'in iyi bir ısı dirence sahip olduğu ifade edilebilir.

Tüm yapılan bu analiz sonuçlarına göre, elde edilen n-oktadekan-n-hekzadekan / poli(St-ko-DVB) (2:1) mikrokapsüllerinin sahip oldukları uygun faz değişim sıcaklığından dolayı binalardaki iç mekan sıcaklık dalgalanmalarının ısı düzenlemesi gibi düşük sıcaklıkta çalışan termal enerji depolama uygulamalarında kullanım için uygun bir malzeme olduğu sonucuna

varılabilir. Bu çalışmada üretilen mikroFDM'nin, sahip olduğu yeterli gizli ısı depolama kapasitesi (88,00 kJ/kg) ve iç mekan konfor sıcaklığı (18-30°C) aralığında bulunan uygun geçiş sıcaklığıyla (19,75-21,06 °C) duvarlar, tavan veya döşemeler gibi bina yapılarına yerleştirilmek suretiyle kullanılma potansiyeli vardır. Tasarlanan bu malzemenin bu yapılardaki performansının belirlenmesi yanında termal iletkenliklerinin ve ısı depolama / bırakma hızlarının saptanması ve iyileştirilmesi gelecek için planlanan diğer çalışmalardır.



KAYNAKLAR

- Abhat, A.** (1983): Low temperature latent heat thermal energy storage materials, *Solar Energy*: Vol. 30. (pp. 313-332).
- Akeiber H., Nejat P., Majid M. Z. A., Wahid. M. A., Jomehzadeh F., Famileh I. Z., Calautit J. K., Hughes B. R. Ve Zaki S. A.** (2016): A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 60. (pp. 1470-1497).
- Aldoss, T. K. ve Rahman, M. M.** (2014): Comparison between the single-PCM and multi-PCM thermal energy storage design, *Energy Conversion and Management*: Vol. 83. (pp. 79-87).
- Alva G., Lin Y., Liu L. ve Fang G.** (2017): Synthesis, characterization and applications of microencapsulated phase change materials in thermal energy storage: A review, *Energy and Buildings*: Vol. 144. (pp. 276-294).
- Bailey A.E.** (1950): Melting and solidification of fats, New York, USA-Wiley Interscience.
- Bales C.** (2005): Thermal Properties of Materials for Thermo-chemical Storage of Solar Heat, Report B2. (http://www.iea-shc.org/publications/downloads/task32-Thermal_Properties_of_Materials.pdf).
- Baran G. ve Sarı A.** (2003): Phase change and heat transfer characteristics of a eutectic mixture of palmitic and stearic acids as PCM in a latent heat storage system, *Energy Conversion and Management*: Vol. 44. (pp. 3227-3246).
- Bo H., Gustafsson E.M. ve Setterwall F.** (1999): Tetradecane and hexadecane binary mixtures as phase change materials (PCMs) for cool storage in district cooling systems, *Energy*: Vol. 20. (pp. 1015-1028).
- BP Statistical Review of World Energy** (2017): <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>, alındığı tarih: 05.04.2018.
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A. ve Fernandez, A.I.** (2001): Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 12. (pp. 1675– 1695).
- Cabeza L.F., Martorell I., Miro L., Fernandez A.I. ve Barreneche C.** (2015): Introduction to thermal energy storage (TES) systems, *Advances in Thermal Energy Storage Systems*: (pp. 1-28).

- Chaurasia P.B.L.** (2000): Phase change material in solar water heater storage system, In Proceedings Of the 8th International Conference on Thermal Energy Storage.
- Chen H., Cong T.N., Yang W., Tan C., Li Y. ve Ding Y.** (2009): Progress in electrical energy storage system: a critical review, *Progress in Natural Science*: Vol. 19. (291-312).
- Dinçer, İ. ve Dost, S.** (1996): A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications, *International Journal of Energy Research*: Vol. 20. (pp. 547-557).
- Dinçer İ. ve Rosen M.A.** (2002): Thermal energy storage: systems and applications, Chichester, England- Wiley: Second edition.
- Electrical energy storage, White paper** (2011): International Electrotechnical Commission, Geneve (www.iec.ch).
- ETKB.** <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Anasayfa>, alındığı tarih: 05.04.2018.
- Fauzi H.,Metselaar H. S. C.,Mahlia T. M. I. Ve Silakhori M.** (2014): Sodium laurate enhancements the thermal properties and thermal conductivity of eutectic fatty acid as phase change material (PCM), *Solar Energy*: Vol. 102. (pp. 333-337).
- Feldman D.,Shapiro M. M. ve Banu D.** (1986): Organic phase change materials for thermal energy storage, *Solar Energy Materials*: Vol. 13. (pp. 1–10).
- Fleischer A. S.** (2015): Thermal energy storage using phase change materials fundamentals and applications, Villanova, PA, USA.
- Giro-Paloma J., Martinez M., Cabeza L. F. ve Fernandez A. I.** (2016):Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 53. (pp. 1059-1075).
- Guney M. S. ve Tepe Y.** (2017): Classification and assessment of energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 75. (pp. 1187-1197).
- Hasnain S. M.** (1998): Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management*: Vol. 39. (pp. 1127-1138).
- Heckenkamp J. ve Baumann H.** (1997): Latent warme Speicher, Sonderdruck aus Nachrichten: Vol. 11. (pp. 1075–1081).
- Herrick C. S.** (1982): Melt-freeze-cycle life-testing of Glauber's salt in a rolling cylinder heat store, *Solar Energy*: Vol. 28. (pp. 99-104).
- IEA,** Energy Efficiency Raporu 2017. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Energy_Efficiency_2017.pdf, alındığı tarih: 05.04.2018.
- IEA,** International Energy Outlook 2017. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf), alındığı tarih: 05.04.2018.

- IEA,** International Energy Outlook 2017. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)), alındığı tarih: 05.04.2018.
- IEA** (2017): Tracking Clean Energy Progress 2017, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>, alındığı tarih: 05.04.2018.
- IEC** (International Electrotechnical Commission) White Paper (2011) , Electrical Energy Storage-Executive summary, Geneva, Switzerland.
- Jamekhorsid A., Sadrameli S. M. ve Farid M.** (2014):A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 31. (pp. 531-542).
- Kahwaji S., Johnson M. B., Kheirabadi A. C.,Groulx D. Ve White M. A.** (2016): Stable, low-cost phase change material for building applications: The eutectic mixture of decanoic acid and tetradecanoic acid, *Applied Energy*: Vol. 168. (pp. 457-464).
- Kapsalis V. ve Karamanis D.** (2016): Solar thermal energy storage and heat pumps with phase change materials, *Applied Thermal Energy*: Vol. 99. (pp. 1212–1224).
- Kenar J.A.** (2010): Latent heat characteristics of biobased oleochemical carbonates as potential phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*: Vol. 94. (pp. 1697–1703).
- Kenisarin, M.M.** (2010): High-temperature phase change materials for thermal energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 14. (pp. 955–970).
- Khana M. M. A., Saidura R. ve Al-Sulaimana F. A.** (2017): A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 76. (pp. 105-137).
- Konuklu Y., Paksoy H.Ö., Unal M.** (2015): Nanoencapsulation of n-alkanes with poly(styrene-co-ethylacrylate) shells for thermal energy storage, *Applied Energy*: Vol. 150. (pp.335–340).
- Kwon J.Y. ve Kim H.D.** (2006): Preparation and application of polyurethane-urea microcapsules containing phase change materials, *Fibers and Polymers*: Vol. 7(1). (pp. 12-19).
- Kumar A. ve Shukla S.K.** (2015): A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application, *Energy Procedia*: Vol. 74. (pp. 462-469).
- Kuravi S., Trahan J.,Goswami Y.,Rahman M.M. ve Stefanakos E. K.** (2013): Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, *Progress in Energy and Combustion Science*: Vol. 39. (pp. 285-319).
- Lena F. D. ve Matyjaszewski** (2010): Transition metal catalysts for controlled radical polymerization, *Progress in Polymer Science*: Vol. 35. (pp. 959-1021).

- Memon S. A.** (2014): Phase change materials integrated in building walls: a state of the art review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 31. (pp. 870-906).
- Mert, M.S., Mert, H.H., ve Sert, M.** (2019a): Microencapsulated oleic–capric acid/hexadecane mixture as phase change material for thermal energy storage, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*: Vol. 136 (pp. 1551–1561).
- Mert, M.S., Mert, H.H., ve Sert, M.** (2019b): Investigation of thermal energy storage properties of a microencapsulated phase change material using response surface experimental design methodology, *Applied Thermal Engineering*: Vol.149 (pp.401-413).
- Michels H. ve Pitz-Paal R.** (2007): Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants, *Solar Energy*: Vol. 81. (pp. 829-837).
- Moreno P.,Castell A.,Sole C.,Zsembinski G. Ve Cabeza L.F.** (2014): PCM thermal energy storage tanks in heat pump system for space cooling, *Energy and Buildings*: Vol. 82. (pp. 399-405).
- Muñoz G. F., Solé A., Barreneche C.,Martorell I, ve Cabeza L. F.** (2015): Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials, *Renewable and Sustainable Energy Review*: Vol. 50.
- Nagano K, Mochida T, Takeda S, Domanski R, Rebow M.** (2003): Thermal characteristics of manganese (II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems, *Applied Thermal Engineering*: Vol. 23. (pp. 229–241).
- Naumann R, Emons H.H.** (1989): Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials, *Thermochimica Acta*: Vol. 35. (pp. 1009–1031).
- Öztürk, H.H.** (2008): Isı Depolama Tekniği, Söz Kesen Matbaacılık, Ankara.
- Paris J., Falardeau M. ve Villeneuve C.** (1993): Thermal storage by latent heat: a viable option for energy conservation in buildings, *Energy Sources*: Vol. 15. (pp. 85–93).
- Paul A.,Shi L. ve Bielawski C.W.** (2015): A eutectic mixture of galactitol and mannitol as a phase change material for latent heat storage, *Energy Conversion and Management*: Vol. 103. (pp. 139-146).
- Pfleger N., Bauer T., Martin C., Eck M. Ve Wörner A.** (2015): Thermal Energy Storage – Overview And Specific Insight Into Nitrate Salts For Sensible And Latent Heat Storage, *Beilstein J Nanotechnol*: Vol. 6. (pp. 1487–1497).
- Pielichowska K. ve Pielichowski K.** (2014): Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science*: Vol. 65. (pp. 67-123).
- Rohit A.K., Devi K.P. ve Rangnekar S.** (2017): An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector Part I – Technologies and Comparison, *Journal of Energy Storage*: Vol. 13. (pp. 10-23).

- Roxas-Dimaano M.N. ve Watanabe, T.** (2002b): The capric lauric acid and pentadecane combination as phase change material for cooling applications, *Applied Thermal Energy*: Vol. 22. (pp. 365–377).
- Sánchez L., Lacasa E., Carmona M., Rodríguez J. F., Sánchez P.** (2008): Applying an experimental design to improve the characteristics of microcapsules containing phase change materials for fabric uses, *Ind. Eng. Chem. Res.*: Vol. 47(23). (pp. 9783-9790).
- Sarı A., Alkan C., Döğüşcü D. K. ve Kızıl Ç.** (2015): Micro/nano encapsulated n-tetracosane and n-octadecane eutectic mixture with polystyrene shell for low-temperature latent heat thermal energy storage applications, *Solar Energy*: Vol. 115. (pp. 195-203).
- Sarıer, N., Önder, E., Ukuser, G.** (2015): Silver incorporated microencapsulation of n-hexadecane and n-octadecane appropriate for dynamic thermal management in textiles, *Thermochimica Acta*: Vol. 613. (pp. 17-27).
- Shannaq R. A. ve Farid M. M.** (2015): Microencapsulation of phase change materials (PCMs) for thermal energy storage systems, *Advance in Thermal Energy Storage Systems*: (pp. 247-248).
- Sharma S. D., Kitano H. ve Sagara K.** (2004): Phase change materials for low temperature solar thermal applications: Vol. 29, (pp. 31-64).
- Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R. ve Buddhi D.** (2009): Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 13. (pp. 318–345).
- Su D., Jia Y., Alva G., Tang F. Ve Fang G.** (2016): Preparation and thermal properties of n–octadecane/stearic acid eutectic mixtures with hexagonal boron nitride as phase change materials for thermal energy storage, *Energy and Buildings*: Vol. 131. (pp. 35-41).
- Tatsidjodoung P., Pierres N. L. ve Luo L.** (2013): A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: Vol. 18. (pp. 327-349).
- TEİAŞ** <https://www.teias.gov.tr>, alındığı tarih: 05.04.2018
- Tomizawa Y., Sasaki K., Kuroda A., Taakeda R. ve Kaito Y.** (2016): Experimental and numerical study on phase change material (PCM) for thermal management of mobile devices, *Applied Thermal Engineering*: Vol. 98. (pp. 320-329).
- Tumirah K., Hussein M.Z., Zulkarnain, Z., Rafeadah, R.** (2014): Nano-encapsulated organic phase change material based on copolymer nanocomposites for thermal energy storage, *Energy*: Vol. 66. (pp. 881-890).
- U.S. Army Materiel Command** (1969): Engineering design handbook experimental statistics section 3 planning and analysis of comparative experiments, Headquarters United States Army Materiel Command Washington, D.C.
- Wang J. ve Wan W.** (2009): Experimental design methods for fermentative hydrogen production: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*: Vol. 34. (pp. 235-244).

- Wei D., Han S. ve Shen X.** (2016): Solid–liquid phase equilibria of (n octadecane with myristic, and palmitic acid) binary mixtures used as phase change materials (PCMs), *The Journal of Chemical Thermodynamics*: Vol. 101. (pp. 7-11).
- Qiu X., Song G., Chu X., Li X. ve Tang G.** (2013): Preparation, thermal properties and thermal reliabilities of microencapsulated n-octadecane with acrylic-based polymer shells for thermal energy storage, *Thermochimica Acta*: Vol. 551. (pp. 136-144).
- Yu S., Wang X. ve Wu D.** (2013): Microencapsulation of n-octadecane phase change material with calcium carbonate shell for enhancement of thermal conductivity and serving durability: Synthesis, microstructure, and performance evaluation, *Applied Energy*: Vol. 114. (pp. 632-643).
- Zalba B., Maşın J. M., Cabeza L.F. ve Mehling H.** (2003): Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Energy*: Vol. 23. (pp. 251–283).
- Zhang H., Wang X. ve Wu D.** (2009): Silica encapsulation of n-octadecane via sol–gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance, *Journal of Colloid and Interface Science*: Vol. 343. (pp. 246-255).
- Zhou G., Zhang Y., Zhang Q., Lin K. ve Di H.** (2007): Performance of a hybrid heating system with thermal storage using shape-stabilized phase-change material plates, *Applied Energy*: Vol.84. (pp. 1068-1077).
- Zhu Y., Liang S., Wang H., Zhang K., Jia X., Tian C., Zhou Y. ve Wang J.** (2016): Morphological control and thermal properties of nanoencapsulated n-octadecane phase change material with organosilica shell materials, *Energy Conversion and Management*: Vol. 119. (pp. 151-162).

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Cansu GÜMÜŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: Yalova / 05.11.1989

E-Posta: cansu.ylmazz.cy@gmail.com

Lisans: Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü / 2009-2014

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı - Uzman Yardımcısı / 2018-devam ediyor

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

1. Mehmet Selçuk Mert, Hatice Hande Mert, **Cansu Yılmaz**, “The Use of Phase Change Materials for Energy Savings” Proc. PPM2017, 3rd International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, PPM2017 (3.Uluslararası Uluslararası Gözenekli ve Toz Malzemeler Sempozyumu ve Sergisi, PPM 2017), Kuşadası, Aydın, Türkiye, 12-15 Eylül, 2017.
2. Mehmet Selçuk Mert, Hatice Hande Mert, **Cansu Yılmaz Gümüş**, “Preparation and Characterization of Paraffin Microcapsules for Energy Saving Applications” Journal of Applied Polymer Science, 2019, DOI: 10.1002/app.47874.