

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**Güneş Enerjisi Uygulamaları İçin Akışkan Yatakta
Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji
Depolama**

Gizem BİÇER GÖKTEPE

Kimya Anabilim Dalı

Eylül, 2023

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

**Güneş Enerjisi Uygulamaları İçin Akışkan Yatakta
Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji
Depolama**

Gizem BİÇER GÖKTEPE

Kimya Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi ./../... Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof. Dr. Halime Ömür PAKSOY
: Prof. Dr. Gülfeza KARDAŞ
: Prof. Dr. Hasan Hüseyin ÖZTÜRK
: Doç. Dr. Başak Doğru MERT
: Doç. Dr. Murat FARSAK

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

**Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2019-11848**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Termal Enerji Depolama Sistemleri.....	2
1.1.1. Duyulur Termal Enerji Depolama.....	3
1.1.2. Gizli Isı Depolama ve Faz Değiştiren Malzemeler	3
1.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama	5
1.2. Akışkan Yatak Reaktör	6
1.3. Çalışmanın Amacı ve Özgün Değeri	7
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	9
3. MATERYAL VE METOT	13
3.1. Materyal	13
3.1.1. Mikrokapsüllenmiş FDM'ler	13
3.2. Metot.....	14
3.2.1. MgCO ₃ @parafin42-44 Kapsülünün Sentezi	14
3.2.2. CaCO ₃ @parafin42-44 Kapsülünün Sentezi	15
3.2.3. Akışkan Yatak TED Sistemi	16
3.2.4. Mikrokapsüllerin Karakterizasyonu.....	17
3.3. Akışkan Yatak TED Sistem Deneşleri	19
3.3.1. Deney Öncesi	19
3.3.2. Depolama	20
3.3.3. Geri Kazanma	20
3.3.4. Depolanan ve Geri Kazanılan Enerjinin Hesaplanması	20
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	23
4.1. Akışkan Yatak Uygulamaları.....	23
4.1.1. Mikrokapsüllerin Akışkan Yatak TED Sonuçları	23
4.1.2. Termal Kamera Analizi.....	47
4.2. Mikrokapsüllerin Karakterizasyonu.....	50
4.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	50
4.2.2. Isınma Soğuma Deneşleri	54
4.2.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi (DSC)	55

4.2.4. Sızdırmazlık Testi	57
4.2.5. Termal İletkenlik Analizi	59
4.3. Enerji Tasarrufu ve Çevresel Kazanımların Analizi	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	67



**Güneş Enerjisi Uygulamaları İçin Akışkan Yatakta
Mikrokapsüllemiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal
Enerji Depolama**

Gizem BİÇER GÖKTEPE

Danışman: Prof. Dr. Halime Ömür PAKSOY

Kimya Anabilim Dalı

ÖZ

Akışkan yataklar, etkili ısı ve kütle transferi uygulamaları için kimya endüstrilerinde kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmanın hızlı ve verimli bir yolunu sunmak için termal enerji depolamada (TED) da kullanılabilirler. Mikrokapsüllemiş FDM'ler, bu uygulamalarda TED ortamı ve akışkanlaştırılmış faz olarak kullanılabilirler. Termal enerji depolaması için akışkan yatak kullanımını araştıran az sayıda deneysel çalışma vardır. Bu çalışmalar, mikrokapsüllemiş FDM özelliklerinin, akışkan yatak kullanımına uygun hale getirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu uygulamalarda önemli olan mikrokapsül özellikleri arasında boyutlar, termal iletkenlik, termal kararlılık ve dayanıklılık yer almaktadır. Bu çalışmada, 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında mikrokapsüllemiş FDM'lerin havayla akışkanlaştırılmış deneysel bir yatakta performansı araştırılmıştır. Sonuçlar, Geldart şemasına göre A-tipi ve C-tipi parçacıklara karşılık gelen mikrokapsüllü FDM'lerin TED'de kullanımının mümkün olduğunu göstermektedir. Akışkanlaştırma işlemi, mikrokapsüllemiş FDM'lerin morfolojisini etkilememiştir. Depolama ve geri kazanım uygulamaları %81'e varan verimlerle çok hızlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akışkan yatak reaktör, FDM, TED, Mikrokapsül, Mikronal.

**Thermal Energy Storage in Microencapsulated Phase
Change Materials in Fluidized Bed for Solar Energy
Applications**

Gizem BİÇER GÖKTEPE

Advisor: Prof. Dr. Halime Ömür PAKSOY

Department of Chemistry

ABSTRACT

Fluidized beds are used in chemical industries for effective heat and mass transfer applications. They can also be used in thermal energy storage (TES) to offer fast and efficient way of exploiting renewable energy sources. Microencapsulated PCMs can serve as TES medium and as the fluidized phase in these applications. There are few experimental studies that investigated using fluidized bed for thermal energy storage. These studies show that properties of microencapsulated PCMs need to be adjusted for use in fluidized bed. Among the microcapsule properties that are important in this application are dimensions, thermal conductivity, thermal stability and durability. In this paper, the performance of an experimental air-fluidized bed of microencapsulated PCM as a thermal storage system is being investigated at different storage temperatures of 55°C and 65°C. The results show that the use of microencapsulated FDMs corresponding to A-type and C-type particles according to the Geldart scheme is possible in TED. The fluidization process did not affect the morphology of the microencapsulated FDMs. Storage and recovery could be accomplished very fast at efficiencies reaching 81%.

Keywords: Fluidized bed reactor, PCM, TES, Microcapsule, Micronal.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam süresince, sabrını ve yol göstericiliğini esirgemeyen, çalışmalarımda beni cesaretlendiren, tecrübelerinden yararlandığım değerli danışmanım Prof.Dr. Halime Ömür PAKSOY'a,

Değerli yorum ve yönlendirmeleriyle tezimin şekillenmesine katkı sağlayan hocalarım Prof. Dr. Gülfeza Kardaş ve Prof. Dr. Hasan Hüseyin Öztürk'e,

Laboratuvar çalışmalarını sırasında ilgi, sabır ve tüm yardımlarından dolayı birlikte çalıştığım değerli arkadaşlarıma,

Analizlere göstermiş oldukları ilgi ve hassasiyetten dolayı Çukurova Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına,

Doktora çalışmalarım sırasında, sarf malzeme ve kimyasal imkanı sağlayan Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, FDK-2019-11848 nolu projeye, sağlamış olduğu burs desteği için YÖK 100/2000 Doktora Bursu Programı'na, TÜBİTAK 120N663 ve 218M182 nolu projelere,

Hayatımın her aşamasında göstermiş oldukları sonsuz sabır, maddi ve manevi destekleri için minnettar olduğum değerli aileme,

Son olarak çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen eşime, sevgi ve sabrı için çok teşekkür ederim.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Malzemelerin sentez ve karakterizasyonunda kullanılan cihazlar.....	14
Çizelge 4.1. Üç mikrokapsüllemiş FDM'nin akışkan yatakta TED performanslarının karşılaştırılması.....	46
Çizelge 4.2. Mikrokapsüllemiş FDM'lerin DSC analiz sonuçları.....	57
Çizelge 4.3. Mikrokapsüllemiş FDM'lerin termal iletkenlik sonuçları.....	59
Çizelge 4.4. 50 m ² 'lik ısıtma yükü 30 kWh/m ² -yıl olan konutun referans sistemle ısıtılması için yıllık harcanan enerji bedeli ve CO ₂ salınımları.....	60
Çizelge 4.5. Akışkan yatakta TED sistemiyle 50 m ² 'lik konutun ısıtılması için Mikronal ile elde edilebilecek enerji tasarrufu çevresel kazanım hesaplamaları	60



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Dünyada ürün başına yakıt yanmasından kaynaklanan toplam sera gazı emisyonları	1
Şekil 1.2.	Dünyada ürüne göre sera gazı emisyonlarının ve toplam enerji arzının pay	2
Şekil 1.3.	TED sisteminde bulunması gereken adımlar	2
Şekil 1.4.	Duyulur ve gizli ısı depolama kapasiteleri.....	4
Şekil 1.5.	Akışkan yatak sistemi	6
Şekil 3.1.	MgCO ₃ @parafin42-44 mikrokapsül sentez reaksiyon şeması	15
Şekil 3.2.	MgCO ₃ @parafin42-44 mikrokapsül sentezi.....	15
Şekil 3.3.	CaCO ₃ @parafin42-44 mikrokapsül sentez reaksiyon şeması.....	16
Şekil 3.4.	Akışkan yataklı deney düzeneği.	17
Şekil 3.5.	Taramalı Elektron Mikroskobu Cihazı	18
Şekil 3.6.	Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı	18
Şekil 3.7.	Termal iletkenlik analiz cihazı.....	19
Şekil 3.8.	Termal kamera cihazı.....	19
Şekil 3.9.	Akışkan yatak deney düzeneği	20
Şekil 4.1.	150 g Mikronal için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında	24
Şekil 4.2.	225 g Mikronal için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında	25
Şekil 4.3.	300 g Mikronal için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında	26
Şekil 4.4.	150 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı.....	28
Şekil 4.5.	225 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı.....	29
Şekil 4.6.	300 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı.....	30
Şekil 4.7.	150 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji	31
Şekil 4.8.	225 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji	32
Şekil 4.9.	300 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji	33
Şekil 4.10.	150 g Mikronal için zamanla geri kazanılan enerji.....	34
Şekil 4.11.	225 g Mikronal için zamanla geri kazanılan enerji.....	34

Şekil 4.12. 300 g Mikronal için zamanla geri kazanılan enerji.....	35
Şekil 4.13. 150 g mikronal için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi.....	35
Şekil 4.14. 225 g mikronal için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi.....	36
Şekil 4.15. 300 g mikronal için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi.....	36
Şekil 4.16. Kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında	37
Şekil 4.17. (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı	38
Şekil 4.18. (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji	39
Şekil 4.19. MgCO ₃ @parafin42-44 için zamanla geri kazanılan enerji.....	40
Şekil 4.20. MgCO ₃ @parafin42-44 için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi	40
Şekil 4.21. Kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında	42
Şekil 4.22. (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı	43
Şekil 4.23. (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji	44
Şekil 4.24. CaCO ₃ @parafin42-44 için zamanla geri kazanılan enerji.....	45
Şekil 4.25. CaCO ₃ @parafin42-44 için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi	45
Şekil 4.26. Boş kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika).....	47
Şekil 4.27. Mikronal ile dolu kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika).....	48
Şekil 4.28. MgCO ₃ @parafin42-44 ile dolu kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika)	49
Şekil 4.29. CaCO ₃ @parafin42-44 ile dolu kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika)	50
Şekil 4.30. Mikronalin SEM görüntüsü (a) Akışkanlaştırmadan önce (b) Akışkanlaştırmadan sonra.....	51
Şekil 4.31. Akışkan yataklarda parçacık sınıflandırması için Geldart diyagramı	52
Şekil 4.32. Mikrokapsülenmiş MgCO ₃ @parafin42-44 FDM'nin SEM görüntüsü (a) Akışkanlaştırmadan önce (b) Akışkanlaştırmadan sonra.....	53
Şekil 4.33. Mikrokapsülenmiş CaCO ₃ @parafin42-44 FDM'nin SEM görüntüsü (a) Akışkanlaştırmadan önce (b) Akışkanlaştırmadan sonra.....	53

Şekil 4.34. Mikronal'in ısınma ve soğuma eğrisi.....	54
Şekil 4.35. MgCO ₃ @parafin4244 'ün ısınma ve soğuma eğrisi.....	54
Şekil 4.36. CaCO ₃ @parafin4244 'ün ısınma ve soğuma eğrisi.....	55
Şekil 4.37. Mikrokapsüllenmiş FDM'nin DSC analizi.....	56
Şekil 4.38. Mikrokapsüllenmiş MgCO ₃ @parafin42-44 FDM'nin DSC analizi.....	56
Şekil 4.39. Mikrokapsüllenmiş CaCO ₃ @parafin42-44 FDM'nin DSC analizi.....	57
Şekil 4.40. Sızdırmazlık testi öncesi a) Parafin42-44, b) MgCO ₃ @parafin42-44, c) CaCO ₃ @parafin42-44 mikrokapsüllerinin görüntüsü.....	58
Şekil 4.41. Sızdırmazlık testi sonrası a) Parafin42-44, b) MgCO ₃ @parafin42-44, c) CaCO ₃ @parafin42-44 mikrokapsüllerinin görüntüsü.....	58



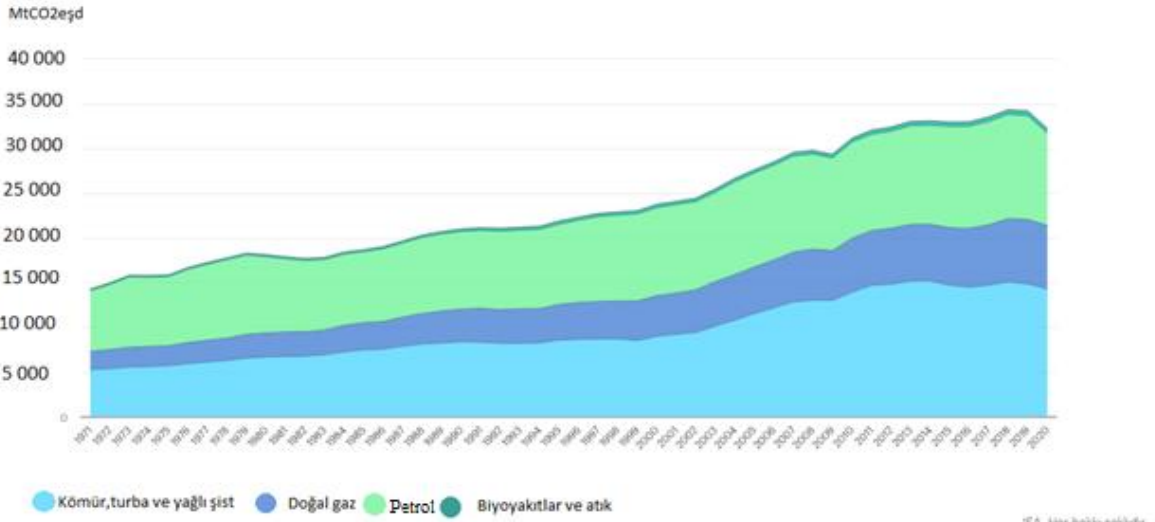
SİMGELER VE KISALTMALAR

FDM	: Faz değiştiren malzeme
mFDM	: Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler
TED	: Termal nerji depolama
XRD	: X ışını difraksiyonu
FTIR	: Fourier dñnüşümlü kızılötesi spektroskopisi
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
TG	: Termogravimetrik analiz
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
°C	: Derece santigrat
T_e	: Erime sıcaklığı
T_d	: Donma sıcaklığı
ΔH_e	: Erime entalpisi
ΔH_d	: Donma entalpisi
Q	: Depolanan enerji
C_p	: Özgöl ısı
ΔT	: Sıcaklık farkı
m	: Kütle

1. GİRİŞ

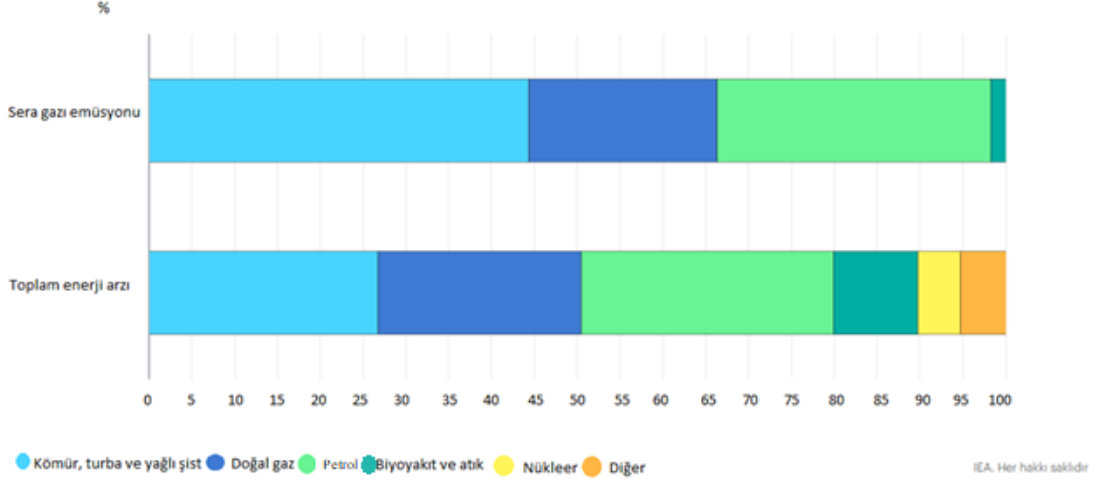
Teknolojik büyüme, modern yaşam tarzı ve nüfus artışı ile birlikte dünyadaki enerji tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Sınırlı kaynakları ve iklim krizinin en önemli sorumlusu fosil yakıtların, katlanarak artan enerji talebini karşılaması mümkün görünmemektedir. Bilim insanları bu talebi karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Güneş, hidro, rüzgar, biyoyakıtlar ve diğer enerji kaynakları da dahil olmak üzere yenilenebilir enerji kaynakları, karbon yoğunluğu daha az ve daha sürdürülebilir bir sisteme geçişin merkezinde yer almaktadır (IEA).

2020'de, fosil yakıtlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları, COVID-19 salgınının küresel enerji talebini düşürmesi sebebiyle benzeri görülmemiş bir düşüş göstermiştir. Şekil 1.1. ve şekil 1.2.'de görüldüğü gibi fosil yakıtlar hala küresel olarak toplam enerji arzının %80'ini oluşturmaktadır, %29'unu petrol temsil etmektedir, ardından ise kömür (%27) ve doğal gaz (%24) gelmektedir. Bu yakıtların yanmasından kaynaklanan küresel emisyonların büyük bölümüne, kömür (%45), petrol (%32) ve doğal gaz (%22) sebep olmaktadır (IEA2020).



Şekil 1.1. Dünyada ürün başına yakıt yanmasından kaynaklanan toplam sera gazı emisyonları (IEA,2020)

Kyoto ve Paris gibi uluslararası anlaşmaların amacı, 2060 yılına kadar fosil yakıtlardan atmosfere yayılan toplam emisyonları azaltmaktır. Bu amacın gerçekleşmesi için, küresel olarak enerjinin nasıl kontrol edilebileceği ve kullanılacağı konusunda ciddi bir düzenleme yapılması gerekmektedir. Bu hedefe güneş, hidro, rüzgar gibi yenilenebilir kaynaklardan sağlanan diğer enerji çeşitlerinin entegrasyonu ile ulaşılabilir (Olabi ve ark.,2021).

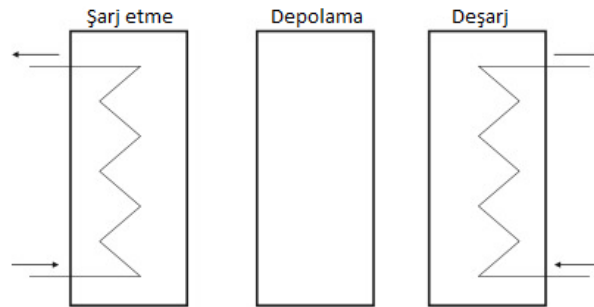


Şekil 1.2. Dünyada ürüne göre sera gazı emisyonlarının ve toplam enerji arzının pay (IEA,2020)

Doğada bol miktarda bulunması ve temininin kolay oluşu sebebiyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş, sürdürülebilir ve çevre dostu bir seçenektir. (Saleemve ark., 2019). Bu cazip kaynaktan verimli, kesintisiz ve istediğimiz zaman yararlanabilmek için uygun bir termal enerji depolama (TED) sistemiyle depolanması gerekmektedir. TED sistemleri bize sürdürülebilir, verimli ve güvenli çalışmayı sağlayacak ortamlar sunmaktadır.

1.1. Termal Enerji Depolama Sistemleri

Termal enerji depolama, sürekli ve verimli temiz enerji üretmek için yenilenebilir enerji kesintileri arasında köprü görevi görmektedir. Güneş enerjisinin hava koşullarına, mevsimlere ve zamana göre farklılık göstermesi, enerji arz ve talebi arasındaki tutarsızlık, yaygın uygulamaları engellemektedir (Jiang ve ark., 2023). Şekil 1.3.'de gösterildiği gibi TED süreci üç adımdan oluşmaktadır: şarj etme (ısı depolama), depolama (bekleme), deşarj (geri kazanma) (Dinçer ve Rosen, 2021). Bir ısıtma/soğutma sisteminde şarj etme aşamasında termal enerji depolanır, tekrar ihtiyaç olana kadar depolama aşamasında bekletilir ve daha sonra yenilenebilir enerji kesintilerini gidermek için deşarj edilerek kullanılabilir.



Şekil 1.3. TED sisteminde bulunması gereken adımlar

Genellikle TED teknolojileri kurulum maliyeti, depolama süresi, depolama kapasitesi, ısı kaybı, giriş ve çıkış sıcaklıkları ve kapladığı alan gibi enerji depolama performanslarıyla karakterize edilebilir. Duyulur termal enerji depolama, gizli termal enerji depolama ve termokimyasal enerji depolama yöntemleriyle olmak üzere üç yöntemler termal enerji depolaması yapılmaktadır.

1.1.1. Duyulur Termal Enerji Depolama

Duyulur TED sistemlerinde, malzemelerinin sıcaklığı değiştirilerek depolama sağlanır. Depolama malzemesi olarak yağ, su, kayalar, beton, kum gibi katı veya sıvı malzemeler kullanılabilir. Her malzemenin kendi içinde avantajları ve dezavantajları mevcuttur, ama çoğunlukla seçim özgül ısı ve depolama hacmine göre yapılmaktadır (Fernandez ve ark.,2010). Yüksek ısı kapasitesi, kolay erişilebilirliği ve düşük maliyeti sebebiyle su en çok kullanılan depolama malzemesidir. Sistemin avantajı defalarca depolama ve geri kazanım çevriminin yapılabilmesiyle dezavantajı gereken depo hacminin çok büyük olmasıdır. Daha geniş depolama hacmi gerektiren büyük kapsamlı yerel ısıtma veya mevsimsel depolama için akiferler, kuyular, çukurlar gibi yeraltı jeolojik yapılarında TED tercih edilen yöntemlerdendir (Jiang ve ark., 2023).

Duyulur termal enerji depolama sisteminde depolanan enerji (Q) depolama malzemesinin kütlesi (m) ve özgül ısı (C_p) ile depolama başlangıç ve son durumları arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) ile denklem 1.1'de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

1.1.2. Gizli Isı Depolama ve Faz Değiştiren Malzemeler

Gizli ısı depolama faz değiştiren malzemenin (FDM) katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya faz geçişi sırasında gizli ısının depolanmasına/salınmasına dayanır (Nomura ve ark.,2017). Gizli ısı depolama sistemleri, yüksek ısı depolama performansı ve neredeyse izotermal ısı emilimi/salımı gibi avantajlar sunar.

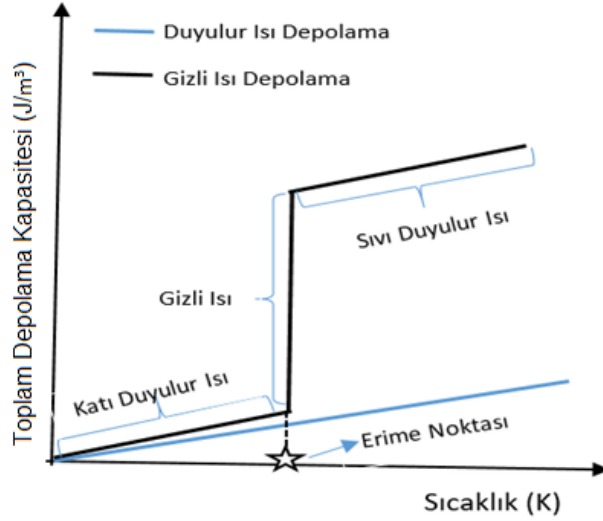
FDM'ler yüksek ısı kapasitesi ve iyi çevrim kararlılığı sebebiyle gizli ısı depolama teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan ısı depolama malzemeleridir (Li ve ark.,2023).

Duyulur ve gizli ısı arasındaki katı sıvı faz geçişi farkları şekil 1.4. göstermektedir. Duyulur ısı yöntemiyle toplam depolanan ısı eşitlik 1.1'de gösterildiği gibidir.

Duyulur ısı depolama sırasında malzeme faz değiştirmez. Bununla birlikte, gizli ısı depolamada ilk sıcaklık (T_i) ve son sıcaklık (T_s) arasındaki toplam depolanan enerji (Q) eşitlik 1.2 deki gibi hesaplanır:

$$Q = m \{ C_{p,i} (T_s - T_m) + L + C_{p,s} (T_m - T_i) \} \quad (1.2)$$

Burada, $C_{p,l}$ sıvının özgül ısısı, $C_{p,s}$ katının özgül ısısı, T_m , erime noktası ve L , gizli ısıdır. Gizli ısı depolamada, faz değiştiğinde termal enerjiyi depolar/serbest bırakır. Bu yüksek ısı kapasitesi, izotermal bir ısı kaynağı olarak kullanım fonksiyonu ve tekrarlanabilir kullanım sağlar (Nomura ve ark.,2017).



Şekil 1.4. Duyulur ve gizli ısı depolama kapasiteleri

Önemli olan bir başka parametre ise enerji depolama sistemlerinde kullanılan FDM'lerin maliyetidir. Uygulanabilirliği kolay olması için seçilen FDM'nin maliyeti uygun ve kolay erişilebilir olmalıdır. Bu özellikleri karşılayan FDM'lerle düşük sıcaklıklarda daha düşük hacimde depolama yapılabilir, ısı depolama kapasitesi yüksek olması sebebiyle de daha çok ısının depolanmasına olanak sağlar. Yanıcı, zehirli ve korozif olmayan, kararlı bir kimyasal yapıya sahip olan gizli ısı depolama özelliği yüksek, yüksek ısıl iletkenliğe sahip, faz değişimi esnasında hacimsel değişimi küçük olan FDM'ler termal enerji depolama için uygundur. Organik FDM'ler; ısı depolama kapasiteleri yüksek, kararlı kimyasal yapıya sahip, zehirli ve korozif olmayan maddelerdir. Bunun yanı sıra organik FDM'lerin, ısıl iletkenlikleri düşük, büyük hacim değişimi ve yanıcılık gibi dezavantajları vardır. İnorganik FDM'ler; gizli ısı depolama ve ısıl iletkenlikleri yüksek, ucuz ve yanıcı olmayan maddelerdir. Bunun yanı sıra inorganik FDM'lerin, korozif olması, inkongruent erimesi gibi dezavantajları vardır(Sharma ve ark., 2009).

Parafinler, tuz hidratları, yağ asitleri, yağ asidi esterleri ve bunların ikili/üçlü karışımları TED uygulamalarında en çok kullanılan organik FDM'lerdir. Diğer FDM'lerle kıyaslandığında parafinler, TED uygulamalarında uygun fiyat, iyi gizli ısı, kararlılık ve uygun termal özellikler gibi avantajlar sağlamaktadır (He ve ark., 2004).

FDM'lerin Mikrokapsüllemesi

TED uygulamalarında faz değişimi sırasında FDM'lerde sıvı hale geçişte ortama sızıntı olması özellikle parafinlerin doğrudan kullanımını sınırlar. Bu sorunu ortadan kaldırmak için FDM'ler kullanılmadan önce mikrokapsülendir ya da kompozit halinde hazırlanır. Mikrokapsülleme, parçacıkların kaplama malzemeleri ile sarıldığı veya faz değişimi sırasında hacim değişikliklerini karşılamak için çekirdek ile kabuk arasında fazlardan bir hava tabakasına sahip olabilecek mikrokapsüller oluşturmak üzere matrise gömülme işlemi ifade eder (Nazir ve ark., 2019). Çekirdek/kabuk yapısının içinde kapsüllenen FDM'ye çekirdek malzemesi, dışta oluşan kaplamaya ise kabuk malzemesi adı verilir. Hazırlanan kapsüllerin boyutu genelde birkaç nanometre ile yüzlerce mikron arasında değişmektedir (Xu ve Ghossein, 2018). Faz değişim malzemelerinin mikrokapsüllemesi, sızıntı ve korozyon problemlerini çözmekle kalmaz aynı zamanda verimli ısı transferi için çok geniş bir yüzey alanı sağlaması bakımından önemli bir ısı transferi katkısı sağlayabilmektedir (Jamekhorshid et.al.,2014),(Chen ve Fang, 2011). Mikrokapsülasyon teknolojisi ilaç üretimi, kozmetik, gıda, inşaat, tekstil, kimya endüstrisi ve TED gibi pek çok alanda mikrokapsüllemiş FDM'lerin kullanımı mevcuttur (Erzin ve ark.,2021). Mikrokapsüllerin kabuğu, çekirdek malzemeyi ortam ile etkileşime girmekten korur, bu da malzemenin stabilitesini artırır ve partikül agregasyonunu önler. Mikrokapsülleme, faz değişim malzemesinin yüzey-hacim oranını artırır ve partiküller akışkanla etkileşime girer, bu da kapasiteyi ve ısı transfer verimliliğini önemli ölçüde artırır (Chen ve Fang, 2011). Bazı TED uygulamalarında mikrokapsüller bir miktar taşıyıcı sıvı ile karıştırılarak mikrokapsüllemiş faz değişim malzemesi süspansiyonu (mFDS) olarak da kullanılabilir.

Geleneksel FDM mikrokapsülleme yöntemleri, sentez mekanizmalarına göre değişiklik gösterektedir. Fizikomekanik yöntemler püskürtme- kurutma (Borreguero A.G. ve ark., 2011), vakum emdirme (Yang Y. ve ark., 2018) gibi yöntemlerdir. Kimyasal yöntemler arasında ise arayüz polimerizasyonu, yerinde polimerizasyon, kendiliğinden montajlama, süspansiyon polimerizasyonu, emülsiyon polimerizasyonu, arayüz çöktürme ve galvanik kaplama yer almaktadır. Ayrıca sol-jel, koaservasyon ve iyonik jelleşme gibi fiziksel/kimyasal yöntemlerin karışımından oluşan yöntemler de kullanılmaktadır. (Wang ve ark., 2022).

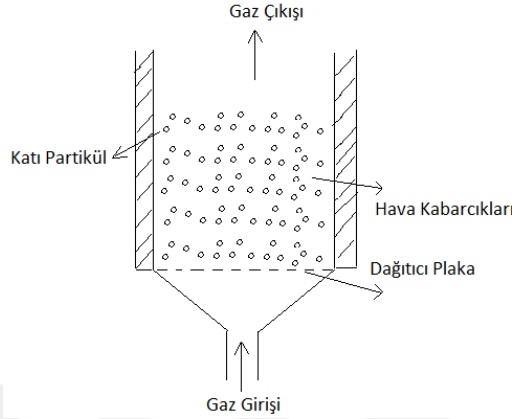
1.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama

Termokimyasal enerji depolamada, tersinir kimyasal reaksiyonlardan yararlanarak endotermik yönde ısı depolanırken ve ekzotermik yönde ısı geri kazanılır (Chate ve ark., 2023). TED doğrudan tepkimeye giren/çıkan kimyasalların malzeme olarak depolanmasıyla yapıldığından, ısı kayıpları ortadan kaldırılır. Bu yöntemle TED ünitesi uzak mesafelere de taşınabilir. Termokimyasal enerji depolama duyulur ve gizli ısı depolama ile kıyaslandığında, yüksek enerji depolama yoğunluğuyla ısı kaybı olmadan uzun süreli depolama sayesinde kararlı ve verimli enerji üretimi için

daha büyük bir imkan sağlar (Chen ve ark 2018). Ancak Ar-Ge çalışmaları devam etmekte ve henüz ticari uygulamaları bulunmamaktadır.

1.2. Akışkan Yatak Reaktör

Akışkan yatak, kimya ve kimya mühendisliğinde, üstün faz teması ve karıştırma özellikleriyle etkin kütle ve ısı transferi sağlayan önemli bir temel işlemdir.



Şekil 1.5. Akışkan yatak sistemi

Tipik bir akışkan yatak (şekil 1.5.); yukarı doğru çıkan gaz ve katı parçacıklar içeren silindirik bir kolon şeklindedir. Tanecikli yatak içerisine düşük hızla giren akışkan, tanecikleri hareket ettirmeksizin aralarından yukarı doğru akarken taneciklerin üzerine sürtünme kuvveti uygulanır. Akışkanın hızının artmasıyla sürtünme kuvveti artar, yatak içinde basınçta bir düşme meydana gelir. Akışkan hızı arttırılmaya devam ettirildiğinde öyle bir noktaya ulaşır ki bu noktada tanecikler artık hareketsiz kalmaz ve akışkanlaşır. Bu nokta basınç düşmesinin tanecikler üzerindeki yerçekimi kuvvetine eşit olduğu noktadır. Yatak akışkanlaştığında akışkan/katı sistemi akışkan gibi özellik gösterir.

Son yıllarda akışkan yatak uygulamaları, depolanacak toplam enerji miktarına, depolama süresine, sıcaklığa ve enerjinin uygulamasına bağlı olarak TED'nin farklı yolları arasında değerlendirilmektedir. Akışkan yatak uygulamalarında çoğunlukla akışkanlaştırma için hava kullanılmaktadır (Almendros-Ibáñez ve ark., 2019).

Hava kaynaklı güneş enerji ısıtma sistemleri güvenilirdir. Isı transfer akışkanı olarak hava kullanıldığı için kaynama/donma olasılığı ortadan kalkmış olur. Aynı zamanda akışkanın sızması ve korozyon oluşumunun da önüne geçilerek farklı uygulama alanlarında kullanılması sağlanır. Bu sistem temelde enerji tasarrufu açısından yüksek bir potansiyel sunsa da bina uygulamaları zor olmaktadır. Hava kaynaklı güneş enerji sistemlerinin entegre edilebileceği TED sistemleri; depolama ortamı olarak kullanılan dolgulu yataklarda, depolama ünitelerinde kaya, çakıl, kum vb. kullanımına dayanan sistemlerdir.

Akışkan yataklar da ise daha yüksek ısı transfer katsayıları, yataklardaki homojen sıcaklıklar ve aynı şartlar altında dolu bir yatağa kıyasla boşaltma zamanının az olması gibi birçok avantaj sunar (Belmonte ve ark. 2016).

1.3. Çalışmanın Amacı ve Özgün Değeri

Ülkemiz güneş enerjisi açısından yüksek bir potansiyele sahip olmasına rağmen mevcut durumda bu kaynaktan termal olarak sadece sıcak su üretiminde yararlanılmaktadır. Binaların ısıtılmasında dış kaynaklı ve çevreye zarar veren fosil yakıtların yerine güneş enerjisinin etkin olarak kullanılabilmesi için TED teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Binalarda sürekli, istenilen kapasitede ve miktarda ısıtma talebini karşılayacak TED sisteminin aynı zamanda daha kompakt olması ve az yer kaplaması da önemlidir. Kimya sektöründe yaygın olarak kullanılan akışkan yatak teknolojisinin güneş enerjisi ısıtma sisteminde uyarlanması TED performansını artırabilecektir. Bu kapsamda çalışmanın amaçları şunlardır:

1. Güneş enerjisi kaynaklı ısıtma sistemi uygulanması için akışkan yatak sisteminin tasarımı,
2. Akışkan yatakta TED deney düzeneğinin hazırlanması,
3. Farklı mikrokapsüllenmiş FDM akışkan yatakta kullanılarak TED performansının belirlenmesi,
4. Referans bir ısıtma sistemine göre ekonomik ve çevresel kazanımların analiz edilmesidir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

İnsan nüfusunun hızla artmasıyla birlikte enerji talebi de artmaktadır. Enerji arzı temel olarak fosil yakıtlardan sağlanmaktadır (Chen ve Fang, 2011). Çevre sorunları, azalan fosil yakıt kaynakları ve iklim değişikliği, ülkeleri daha sürdürülebilir enerji sistemlerine geçmeye zorlamaktadır. Bu geçişte fosil yakıt dışındaki kaynakların daha fazla kullanılması çok önemlidir. Enerji arz ve talebinin birbirini karşılayamadığı durumlarda, birçok uygulama için enerji depolamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Termal enerji depolama, yenilenebilir kaynaklar ve endüstrideki atık ısı gibi kesintili kaynakların verimli kullanımı için anahtar teknolojidir (Farid vd., 2014). Faz değişim malzemelerinin (FDM'ler) ve bunların ısıtma, soğutma, termal yönetim gibi termal enerji depolama uygulamalarının incelenmesi kapsamlı bir araştırma alanı olmuştur (Farid vd., 2019). Bu kapsamda pek çok araştırma ve inceleme yapılmaktadır.

Hathal ve ark. 2023, mum, tuz hidrat ve tuz hidrat karışımları gibi farklı FDM türlerinin termal enerji depolama kapasitesinin sayısal ve deneysel bir araştırmasını yapmıştır. Bu çalışmada kullanılan tüm FDM'ler için sıcaklık aralığını gösteren erime ve aşırı soğuma sıcaklıklarını belirlemek için deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar mumun en kararlı FDM olduğunu göstermiştir. Sayısal depolama sonuçları, C örneğinin ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}:\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 8:2) termal tepkisinin diğer numunelerden (yani numune A ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). ve B ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}:\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)) nispeten daha iyi olduğunu göstermiştir. Özetle FDM numuneleri, termal enerji depolama sisteminde kullanım için uygun bulunmuştur.

Shi ve ark. 2019, parafin çekirdeği ve kalsiyum karbonat (CaCO_3) kabuktan oluşan FDM mikrokapsülü, termal enerji depolama için başarıyla sentezlemiştir. SEM sonuçları, kompozitlerin genel olarak küresel morfolojiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Anyonik yüzey aktif madde olarak sodyum dodesil sülfonat (SDS) kullanılarak hazırlanan kompozitler ile sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS) kullanılarak hazırlanan kompozitler kıyaslandığında, DSC ve TG sonuçları enkapsülasyon veriminin arttığını fakat termal kararlılığın azaldığını göstermiştir. Ayrıca CaCl_2 'ün farklı konsantrasyonları ile anyonik sürfaktanların mikrokapsüllerin performansı üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Sonuçlar, SDBS'li mikrokapsüllerin, SDS'den on kat daha yüksek kapsülleme verimliliği olduğunu göstermiştir.

Dixit ve ark. 2022, inorganik kalsiyum karbonat kabuğu kullanılan organik bir faz değiştiren malzeme olan heksadekan çekirdeğin mikrokapsüllemesi, kendiliğinden montajlama tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Sodyum dodesil sülfat/polar olmayan polivinilpirolidon (1:1 kütle oranı) karışımı yüzey aktif maddelerle, 1:1 çekirdek/kabuk kütle oranına sahip mikrokapsüller hazırlanmıştır. Alan emisyon taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden gözlemlenen küresel morfoloji ürettiği bulunmuştur. Gizli ısı ve değişen çekirdek/kabuk kütle oranlarına göre öngörülen kapsülleme verimleri sırasıyla %59,48 J/g–95,92 J/g ve %26,85–%43,12 dir. Eşit miktarda çekirdek/kabuk (1:1) oranına sahip numunenin, morfoloji ve gizli ısı değerlerine göre en iyi

mikrokapsüller olduğu bulunmuştur. 100 termal çevrim sonunda (0 ila 30 °C) tekstil uygulamalarında kullanılabilir termal stabiliteyi sağladığı görülmüştür.

Ji ve ark. 2021, faz değiştiren malzemelerin termal enerji depolama kapasitelerini arttırmak için, grafen oksit (GO) nano tabakaları ve mikrokapsüllenmiş parafin TiO₂ kabuk malzemesi kullanılarak verimli bir kompozit yapı tasarlamıştır. Kompozit, küresel bir çekirdek-kabuk yapısal morfolojisi ortaya çıkartılarak, GO nano-tabakaları, mikrokapsüllerin yüzeyinde kendiliğinden montajlama yöntemiyle bir araya gelmiştir. Mikrokapsüllerin gizli ısısı 160,75 J/g'dan fazladır ve termal iletkenlikleri GO nano-yapraklarının yüksek termal iletkenliği sayesinde 0,195'ten 0,297 Wm⁻¹K⁻¹'e yükselmiştir. Hazırlanan GO/TiO₂@parafin mikrokapsüller, yüksek termal iletkenliğe ve termal enerji depolama yoğunluğuna sahip kompozit FDM'ler, düşük sıcaklıkta ısı depolama için geniş ölçüde umut verici malzemeler olmuştur.

Wang ve ark. 2016, kalsiyum karbonat kabuklu ve parafin bazlı iki çekirdekli yeni mikrokapsüllü faz değişim malzemeleri, kendiliğinden montaj yöntemiyle hazırlanmıştır. Mikrokapsüllerin faz değişim sıcaklığı, 25 ila 50 °C arasında ikili çekirdeklerin ağırlık oranı değiştirilerek ayarlanabilmektedir. SEM ve TEM, mikrokapsüllerin küresel bir morfolojiye ve 1 ila 5 µm arasında değişiklik gösteren çaplarda kompakt yüzeylere sahip olduğunu göstermiştir. Yüksek termal iletkenliğe sahip kalsiyum karbonat kabuğun varlığı nedeniyle mikrokapsüllerin termal iletkenliği önemli ölçüde arttırılmıştır. Düşük maliyet ve üstün özellikleri nedeniyle sentezlenen mikrokapsüller termal enerji depolama ve termal yönetimde beklentileri karşılamıştır.

Chinnasamy ve ark. 2023, termal enerji depolama ve ısı transfer uygulamaları için mikrokapsüllenmiş stearyl alkolün (C₁₈H₃₈O) (SA) hazırlanması ve termofiziksel karakterizasyonunu incelemiştir. Geliştirilen mikrokapsüller, bir organik faz değiştiren malzeme (FDM) çekirdek malzemesi olan SA ve melamin formaldehit (MF) kabuk malzemesinden oluşmaktadır. Yerinde polimerizasyon tekniğiyle FDM mikrokapsülleri, sodyum dodesil sülfat yüzey aktif maddesi kullanılarak sentezlenmiştir. Malzemelerin termal ve yapısal karakterizasyonları yapılmıştır. Sonuçlar, 0,25 g yüzey aktif madde ve 5 g FDM ile hazırlanan mikrokapsüllenmiş FDM'nin (mFDM) ortalama 4,7 µm çapında daha iyi morfolojik yapı sergilediğini ortaya koymuştur. Başlangıç erime noktası ve gizli ısısı sırasıyla 42 °C ve 137,7 J/g olarak hesaplanmıştır. En yüksek kapsülleme oranı %51,9 ve %52,3, 5:8,4 çekirdek/kabuk oranı için gözlenmiştir. Geliştirilen mFDM, faz değiştirme işlemi sırasında iyi bir kimyasal kararlılık göstermiş olup sızıntı gözlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen mFDM'nin termal enerji depolama uygulamalarına uygun olduğunu göstermiştir.

Naresh ve ark. 2022, yerinde polimerizasyon yöntemiyle yeni bir biyo-bazlı mikrokapsüllü faz değişim malzemesi sentezlenmiştir ve termal enerji depolama özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yüksek ısı depolama kapasitesine sahip biyo-bazlı n-dodekanoik asit, bir melamin-formaldehit (MF) polimerik kabuk ile kapsüllenmiştir. Biyo-bazlı mikrokapsüllü faz değişim malzemesi kimyasal olarak kararlı ve kristalliği değişmemiştir. Hazırlanan

mikrokapsüllerin termal olarak 165,02 °C'ye kadar kararlı olduğu ve faz geçiş sıcaklığının oldukça üzerinde sızdırmaz olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, mikrokapsüllerin termal dayanıklılığı 1000 termal döngüden sonra iyi olarak tanımlanmıştır. Biyo-bazlı mikrokapsüllü faz değişim malzemesi , orta sıcaklıkta termal enerji depolama uygulamaları için uygun bir aday olduğuna karar verilmiştir.

Yuan ve ark. 2021, bu çalışmada çekirdek malzemesi olarak n-eikosan ve kabuk malzemeleri olarak polidopamin/poli(melamin-formaldehit) reçinesi (PDA@MF) içeren yeni çift katmanlı organik faz değiştiren mikrokapsüller tasarlanmış ve iki aşamalı bir polimerizasyon yoluyla imal edilmiştir. Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM), düzenli küresel bir şekil sergileyen PDA@MF/n-eikosan mikrokapsüllü faz değişim malzemelerinin (PMFDM'ler) başarılı bir şekilde üretildiğini doğrulamıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) sonuçları, PMFDM'lerin son derece yüksek faz değişim entalpilerine (PMFDM-85, 199,4 J/g) ve mükemmel termal dayanıklılığa sahip olduğunu göstermiştir. Güneş ışınımı deneyleri, PMFDM'lerin güneş-termal dönüşüm verimliliğinde iyileşme olduğunu göstermiştir. Termogravimetrik analiz (TGA) ile geliştirilen mikrokapsüllerin iyi bir termal güvenilirlik ve kararlılık sergilediği gösterilmiştir. Sonuç olarak, çift katmanlı PMFDM'ler, verimli güneş enerjisi depolaması için çok iyi bir potansiyel sunmuştur.

Akışkan yatak, yoğunlaştırılmış kütle ve ısı transferine izin veren birçok kimyasal proseste önemli bir işlemdir (Mahmoudi ve ark., 2012). Son yıllarda FDM'lerin geliştirilmesi, bu malzemelerin yüksek gizli ısı ve yüksek depolama yoğunluğu nedeniyle depolama kapasitesini ve depolanan enerjiyi artırmanın yeni yollarını bulmuştur (Barrientos ve ark, 2015). Termal enerji depolama sisteminde akışkan yatak uygulaması ilgi çeken bir konu haline gelmiştir (Almendros-Ibáñez ve ark., 2019).

Belmonte ve ark. 2016, ortalama çapı 0,54 mm olan granül faz değiştiren malzemeler (FDM'ler) içeren bir akışkan yataklı enerji depolama ünitesinin güneş enerjisiyle çalışan hava bazlı ısıtma sistemlerine entegrasyonunu incelenmiştir. Bu simülasyon çalışmasının sonuçları, iklim koşullarına bağlı olarak binanın ısıtma ihtiyacının %20 - %50'sinin akışkan yatakta depolama kullanılarak 1000–5000 kg granül FDM kullanımı ile karşılanabileceğini göstermiştir. 42°C, 50°C ve 80°C'lik farklı faz geçiş sıcaklıklarına sahip granül FDM'ler akışkan yatakta test edilmiş ve düzgün akışkanlaşma gösteren GR50 (geçiş sıcaklığı 50°C) dışında topaklanma sorunları gözlemlenmiştir. Yaklaşık 75 saatlik çalışma süresinde GR50 15 erime dondurma döngüsü boyunca kararlılığını korumuştur.

Barrientos ve ark. 2015, bu çalışmada bir enerji depolama cihazı olarak çalışan FDM'ler ile bir akışkan yatağın depolama sürecini modellemiştir. Akışkan yatağın depolama işlemi sırasında yataktaki sıcaklık, iki fazlı akışkanlaştırma teorisi kullanılarak modellenmiştir. Sunulan sayısal model, yatak malzemesinin faz değişim sürecinin bir sıcaklık aralığında meydana geldiğini hesaba katarak, yatağın duvarıyla dağıtım plakasında depolanan enerjiyi tahmin etmektedir. Yoğun fazın enerji denklemi, bir sıcaklık aralığında oluşan faz değişiklikleri için entalpinin sıcaklığa bağımlılığı

dikkate alınarak sayısal olarak entalpi formunda çözülmüştür. Modelin geçerliliği, iki tanecikli malzeme için deneysel verilere karşı doğrulanmıştır. Akışkan yataklarda kullanılan tipik bir malzeme olan kum, ortalama parçacık çapı 0,54 mm ve faz değişim sıcaklığı yaklaşık 50 °C olan tanecikli bir FDM'dir. Kum için sayısal olarak bulunan sıcaklık profilleri, deneysel olarak ölçülen değerlerle tamamen uyumlu bulunmuştur.

Beemkumar ve ark. 2017, alüminyum, pirinç ve bakır gibi farklı kapsülleme malzemeleriyle akışkan yataklı ve sabit yataklı gizli ısı termal depolama sisteminin termal analizi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Faz değiştiren malzeme olarak D-Mannitol tercih edilmiştir. Isı transfer sıvısı olarak ise Terminal-66 kullanılmıştır. Sabit yatak ve akışkan yatak performansı arasında karşılaştırma yapılmıştır. Akışkan yataklı enerji depolama sisteminde ekonomik açıdan alüminyumun bakır ve pirinçten daha yüksek verime sahip olduğu görülmüştür. Sabit yataklı enerji depolama sisteminde ise etkili ısı transferini sağlamak için ısı transfer sıvısının kütleli debisinde değişiklik yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Keshavars ve ark. 2022, deneysel ve sayısal bir araştırma için enerji depolama cihazı olarak çalışan mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler (mFDM'ler) ile titreşimli bir akışkan yataklı süreci araştırmıştır. Deneyler, mFDM (PX52) ile 0,2 m iç çapı ve 1 m yüksekliği olan bir akışkan yataklı gerçekleştirilmiştir. Simetrik iki boyutlu modelde Euler-Lagrangian yaklaşımı kullanılarak sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Deney ve simülasyonda 200 µm ortalama çap için 1–10 Hz frekans aralığında 60°C sıcaklıkta titreşim kullanılmıştır. Titreşimin enerji depolamanın verimliliği üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, minimum akışkanlaştırma hızı (Umf) 1,5, 2 ve 2,5 olarak incelenmiştir. Çalışmada simülasyon ve deneysel veri sonuçlarının uyum içinde olduğu fark edilmiştir.

Uros ve ark. 2018, Ljubljana'daki makine mühendisliği ofis binasının dış cephesine sıcak hava güneş enerjisi kolektörü monte ederek ısıtılan hava, gizli ısı termal enerji depolamanın bir uygulaması olarak sunulmuştur. Bu uygulama sırasında TRNSYS simülasyonu kullanılmış ve deneysel sonuçlarla desteklenmiştir. Geliştirilen model kullanılarak hava ısıtma sisteminin yıllık tasarrufu hesaplanmıştır. Yıllık maliyet tasarrufu, tüm maliyetler dikkate alındığında gizli ısı termal enerji depolamalı sistem için %91 ve gizli ısı termal enerji depolamasız sistem için %93'tür. Yatırımın amortisman maliyetleri dikkate alınmadan sadece enerji kullanımına yönelik işletme maliyetleri dikkate alındığında, gizli ısı termal enerji depolamasız sistem için yıllık tasarruf %58, gizli ısı termal enerji depolamalı sistem için ise %68'dir. Sadece işletme maliyetlerine ilişkin tasarrufu %24 olarak hesaplanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu tezde, farklı mikrokalsülennmiş FDM'lerin gizli ısı depolama performanslarını akışkan yatakta belirlemek için laboratuvar ölçekli termal enerji depolama sistemi geliştirilmiştir. Bu amaca ulaşmak için kullanılan materyal ve yöntemler bu bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.1. Materyal

3.1.1. Mikrokapsülennmiş FDM'ler

Bu tezde üç farklı mikrokapsülennmiş FDM ile çalışılmıştır. Bu materyaller:

- Mikronal 5005X(BASF)
- $MgCO_3@parafin42-44$
- $CaCO_3@parafin42-44$

Mikronal 5001X(BASF)

Mikronal 5001X(BASF) ticari olarak satın alınmıştır. Çekirdek malzemesi olarak parafin içermektedir. Mikronal'in erime sıcaklığı aralığı ve gizli ısısı 23-26°C ve yaklaşık 110 kJ/kg'dır (Siddiqui ve diğerleri 2017). Kütle yoğunluğu 350 kg/m³tür ve parçacık boyutu 50 ila 300 µm arasındadır (Bajare ve diğerleri 2015).

MgCO₃@parafin42-44

$MgCO_3@parafin42-44$ laboratuvarımızda geliştirilmiş ve literatürde ilk defa sentezlenmiştir. $MgCO_3$ kabuğu için $CaCl_2$ (Riedel-de Haen), $MgCl_2$ (Merck), $NaHCO_3$ (Merck) ve Na_2CO_3 (Atabay) kullanılmıştır. Yüzey aktif madde olarak Triton X-100 (Merck) ve Tween 80(Merck) seçilmiş, çözücü olarak etanol (Merck) kullanılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak erime noktası 42-44 °C olan Parafin 42-44 (Merck) kullanılmıştır. Tüm deneylerde deiyonize su kullanılmıştır. Tüm kimyasallar analitik dereceli olup saflaştırılmadan kullanılmıştır.

CaCO₃@parafin42-44

$CaCO_3@parafin42-44$ laboratuvarında sentezlenen bir diğer mikrokapsüldür. $CaCO_3$ kabuğu için $CaCl_2$ (Riedel-de Haen), $MgCl_2$ (Merck), $NaHCO_3$ (Merck) ve Na_2CO_3 (Atabay) kullanılmıştır. Yüzey aktif madde olarak Triton X-100 (Merck) ve Tween 80(Merck) seçilmiş, çözücü olarak etanol (Merck) kullanılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak erime noktası 42-44 °C olan Parafin 42-44 (Merck) kullanılmıştır. Tüm deneylerde deiyonize su kullanılmıştır. Tüm kimyasallar analitik dereceli olup saflaştırılmadan kullanılmıştır.

Sentez ve Karakterizasyon için Kullanılan Cihazlar

Çizelge 3.1 de sentez ve karakterizasyon sırasında kullanılan cihazlar ve hangi amaçlarla kullanıldıkları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Malzemelerin sentez ve karakterizasyonunda kullanılan cihazlar

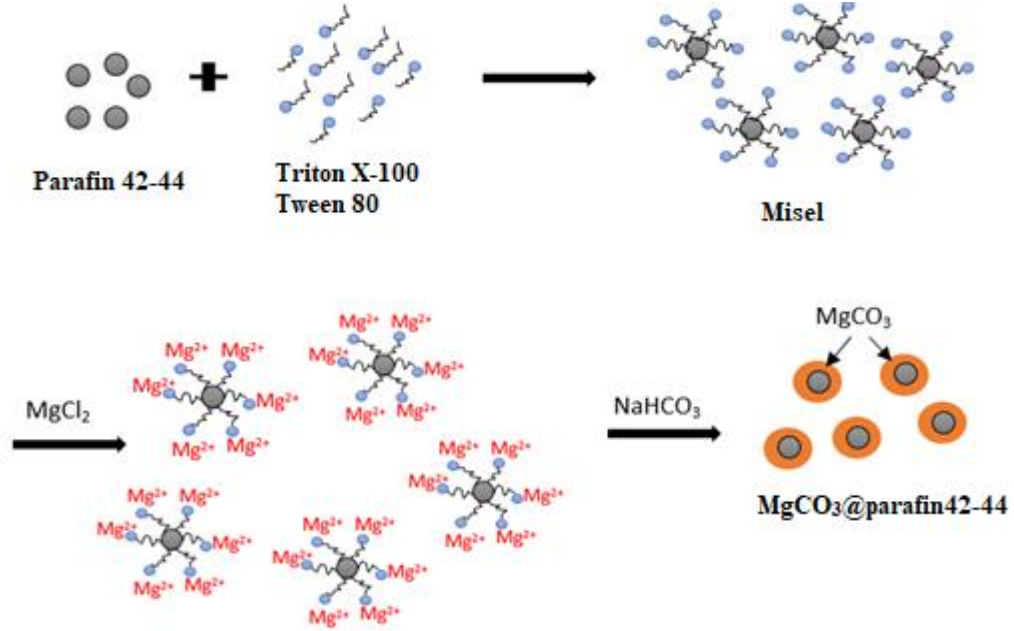
Cihazın Adı	Kullanım Amacı	Marka/Model
Hassas terazi	Malzeme tartımı	Precisa
Datalogger	Belirli aralıklarla sıcaklık kaydetme ve ısınma-soğuma analizi	Agilent 34972A LXI Data Acquisition/Switch Unit
Su banyosu	Deneyler için sabit sıcaklık sağlama, ısınma-sağuma analizi	Huber K6-NR
Mekanik karıştırıcı	Malzemelerin homojen karışımını sağlama	Ika werke RW16 basic
Isıtıcı	Polimerizasyon basamağı için gerekli ısıyı sağlama	Ika C Mag HS 7
Peltier	Reaktöre reaksiyon sırasında sabit sıcaklık sağlama	Peltier temperature controller PTC-2
Termal kamera	Termal görüntü	Testo 875
DSC (Diferansiyel taramalı kalorimetri)	Termal karakterizasyon	Mettler Toledo DSC3
SEM (Taramalı elektron mikroskobu)	Yüzey morfolojisi	FEI Quanta 650 Field Emission
Termal iletkenlik	Termal karakterizasyon	Hot Disk Thermal Constants Analyzer TPS 2500S

3.2. Metot

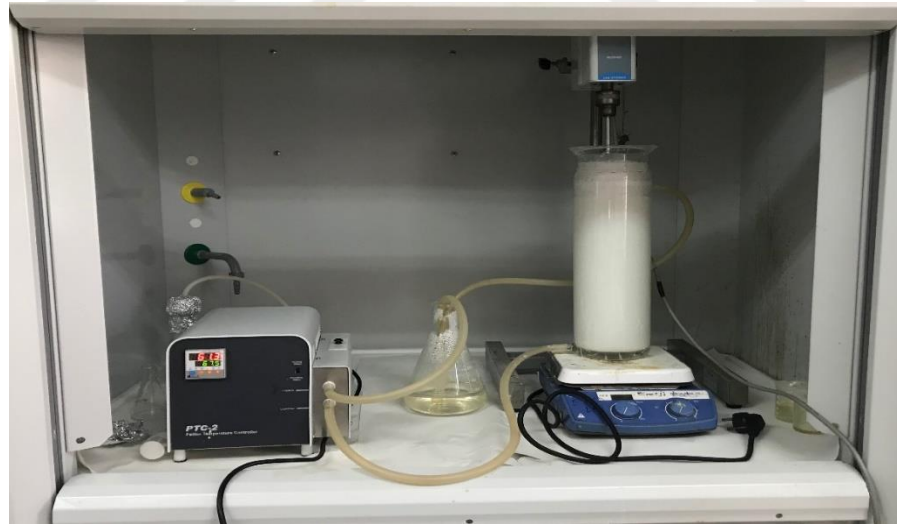
3.2.1. MgCO₃@parafin42-44 Kapsülünün Sentezi

MgCO₃@parafin42-44 mikrokapsülünün sentezinde daha önce birçok araştırmacı tarafından kullanılan kendiliğinden montajlama yöntemi uyarlanarak kullanılmıştır (Yu ve ark.,2014). 100 g CaCl₂, 1000 mL deiyonize suda çözülmüştür. Tween 80 (10 g) ve Triton X-100 (5 g) iyonik olmayan ve hidrofilik yüzey aktif maddeler olarak kullanılmıştır. Yüzey aktif maddeler, su-yağ emülsiyonu elde etmek için 50 °C'de reaktörde, parafin 42-44 (150 g) ile karıştırılmıştır. MgCl₂ sulu solüsyonu, parafin ve yüzey aktif maddeler karışımına damla damla ilave edilmiştir. Daha sonra uygun emülsiyonu elde etmek için 1000 rpm 50°C 'de 3 saat sürekli karıştırılmıştır. Farklı bir beherde hazırlanan sulu Na₂HCO₃ solüsyonu (1000 mL'de 150 g) damla damla parafin emülsiyonuna

eklenmiştir. Reaksiyon sonunda beyaz bir toz halinde $MgCO_3$ kabuk malzemeli mikrokapsüllenmiş FDM elde edilmiştir. Ürün süzülerek birkaç kez deiyonize su ile yıkanmıştır. Ardından diğer karakterizasyon ve testlerde kullanılmak için $80\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Sentez mekanizması şematik olarak şekil 3.1.'de verilmiş olup deney esnasındaki görüntü şekil 3.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. $MgCO_3@parafin42-44$ mikrokapsül sentez reaksiyon şeması

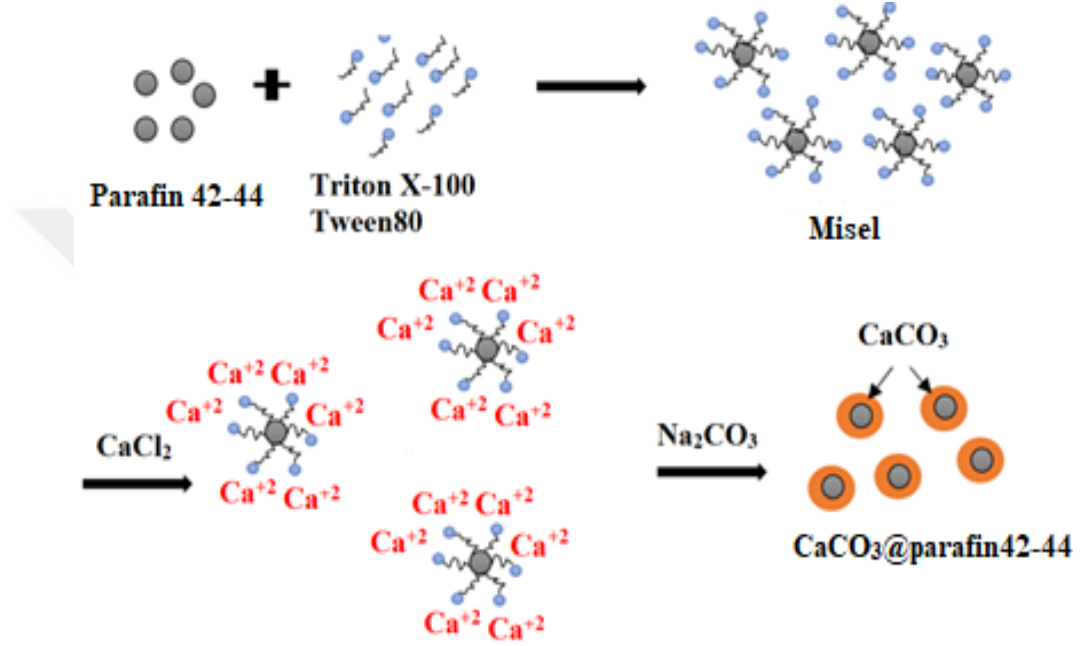


Şekil 3.2 $MgCO_3@parafin42-44$ mikrokapsül sentezi

3.2.2. $CaCO_3@parafin42-44$ Kapsülünün Sentezi

$CaCO_3@parafin42-44$ mikrokapsülünün sentezinde de kendiliğinden montajlama yöntemi uygulanmıştır (Yu ve ark.,2014). 100 g $CaCl_2$, 1000 mL deiyonize suda çözülmüştür. Tween 80 (10 g) ve Triton X-100 (5g) iyonik olmayan ve hidrofilik yüzey aktif maddeler olarak kullanılmıştır. Yüzey aktif maddeler, su-yağ emülsiyonu elde etmek için $50\text{ }^\circ\text{C}$ 'de reaktörde, parafin 42-44 (150 g)

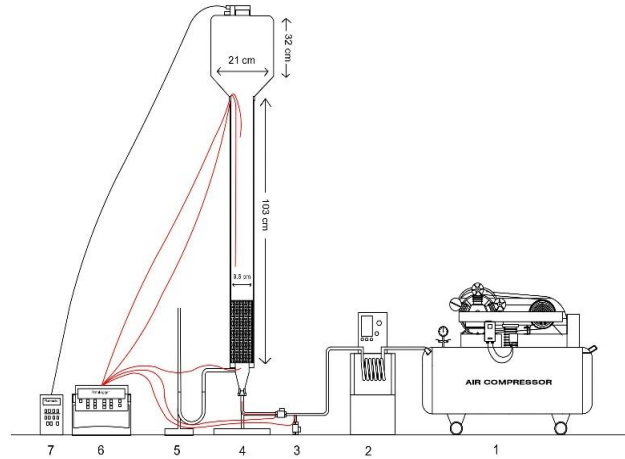
ile karıştırılmıştır. CaCl_2 sulu solüsyonu, parafin ve yüzey aktif maddeler karışımına damla damla ilave edilmiştir. Daha sonra uygun emülsiyonu elde etmek için 1000 rpm'de 3 saat sürekli karıştırılmıştır. Farklı bir beherde hazırlanan sulu Na_2CO_3 solüsyonu (1000 mL'de 150 g) damla damla parafin emülsiyonuna eklenmiştir. Reaksiyon sonunda beyaz bir toz halinde CaCO_3 kabuk malzemeli mikrokapsüllenmiş FDM elde edilmiştir. Ürün süzülerek birkaç kez deiyonize su ile yıkanmıştır. Ardından diğer karakterizasyon ve testlerde kullanılmak için $80\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Mikrokapsüllenmiş FDM'nin sentez mekanizması şematik olarak şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. $\text{CaCO}_3@$ parafin42-44 mikrokapsül sentez reaksiyon şeması

3.2.3. Akışkan Yatak TED Sistemi

Faz değiştiren malzemelerin termal enerji depolama deneyleri şekil 3.4. de gösterilen akışkan yatak sisteminde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4, aşağıdaki bileşenlerle deneysel akışkan yatak kurulumunu göstermektedir: 1. Hava kompresörü, 2. Programlanabilir termostatik su banyosu, 3. Kontrol vanaları, 4. Akışkan yatak kolonu, 5. Manometre, 6. Datalogger ve 7. Debimetre. Deneyler sırasında akışkanlaştırma işlemi için önceden ısıtılmış havayı sabit sıcaklıkta üfleme amacıyla vidalı tip kompresör (Cengiz, CM80) kullanılmıştır. Giriş havasının sıcaklığı, programlanabilir termostatlı bir su banyosu (Huber K6-NR) ile kontrol edilmiştir. Bu amaçla kompresörden gelen hava banyo içine yerleştirilen serpantin içinden dolaştırılarak istenilen sıcaklığa getirilmiştir.



Şekil 3.4. Akışkan yataklı deney düzeneği 1. Hava kompresörü, 2. Programlanabilir termostatik su banyosu, 3. Kontrol vanaları, 4. Akışkan yataklı kolon, 5. Manometre, 6. Veri kaydedici, 7. Debimetre.

PU100 poliüretan esaslı bir malzemeden yapılmış akışkan yataklı kolon üç bölümden oluşmaktadır: havanın üniform dağılımını sağlamak ve mikrokapsüllü FDM'yi desteklemek için alttaki elek kısmı, akışkanlaştırma için 0,096 m çapında ve 1,03 m yüksekliğindeki orta kısım, 0,210 m çapında ve 0,320 m yüksekliğinde genişleme için üst kısım kullanılmıştır. Üst kısım, akışkanlaştırma sırasında mikrokapsüllemiş FDM'nin kolonun dışına saçılmasını önlemek için kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri, kurulumda dikey yön boyunca beş farklı konumda $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle T tipi ısıl çiftlerle yapılmıştır: Tgiriş (dağıtım plakasının altında), T1 (0,09 m), T2 (0,16 m), T3 (0,25 m), Tçıkış (0,68 m). Ölçümler bir bilgisayara (Agilent 34972A LXI Data Acquisition/Switch Unit) bağlı veri kaydedici kullanılarak 30 saniyede bir kaydedilmiştir. Hava akış hızı, bir akış ölçer (Omega HHF710) kullanılarak ölçülmüştür.

3.2.4. Mikrokapsüllerin Karakterizasyonu

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM, örnek yüzeyini odaklanmış bir elektron demeti ile tarayarak görüntü elde eden elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar örnekteki atomlarla etkileşerek örnek yüzeyindeki topografi ve bütünlük hakkında bilgiler sunan farklı sinyaller verir. Bu sinyaller ilgili dedektörlerce alınarak bilgisayar ortamına aktarılır ve görüntü elde edilerek kaydedilir.

Mikrokapsüllemiş FDM'lerin yüzey morfolojisi, akışkanlaştırmadan önce ve sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI Quanta 650 Field Emission SEM) ile analiz edilmiştir.



Şekil 3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu Cihazı

Isınma Soğuma Deneyleri

Mikrokapsüllenmiş FDM'ler, termostatik programlanabilir bir su banyosu (Huber K6-NR) kullanılarak 15°C ile 65°C arasında ısıtma ve soğutmaya tabi tutulmuştur. Ölçülen veriler bir datalogger (Agilent 34972A LXI Data Acquisition/Switch Unit) ile kaydedilmiştir.

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri Analizi (DSC)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri malzemelerin ısıl analizi için kullanılan termoanalitik bir tekniktir. DSC, numune ısıtılırken/soğutulurken ya da sabit bir sıcaklıkta tutulurken soğurulan ya da salınan enerji miktarını ölçmektedir. Bu teknikte referans ile numuneden gelen ya da uzaklaşan ısı farkı sıcaklığa veya zamana bağlı olarak gösterilmektedir.

Mikrokapsüllerin termal özellikleri (gizli ısı ve faz değişim sıcaklıkları), diferansiyel taramalı kalorimetre (Mettler Toledo DSC3) ile analiz edilmiştir. Analizler, 10°C ila 100°C sıcaklık aralığında, 10°C/dak, 40 ml/dak'da sabit bir nitrojen akışı altında gerçekleştirilmiştir. DSC'nin kalorimetri doğruluğu $\pm 0,1$ 'dir.



Şekil 3.6. Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı

Termal İletkenlik Analizi

Maddelerin ısıl özellikleri TED performansı açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Termal iletkenlik, maddelerin ısı taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için kullanılan termofiziksel özelliklerden en önemli olanıdır. Termal iletkenlik analiz cihazı ile örneklerin termal iletkenlik

sabitleri (k) W/mK cinsinden belirlenebilmektedir. Örneklerin yüzeyi cihazın sensörü ile temas ettirilerek sensör ile örnek arasındaki sıcaklık temasından malzemenin termal iletkenlik katsayısı bulunmaktadır.

Örneklerin termal iletkenlikleri Hot Disk Thermal Constants Analyzer TPS 2500S termal iletkenlik ölçer ile ölçülmüştür. 25°C'de 10mW güç 5 saniyede uygulanmış ve 5501F1 capton sensör kullanılarak ölçüm yapılmıştır.



Şekil 3.7. Termal iletkenlik analiz cihazı

Termal Kamera Analizi

Akışkan yatak deneyleri gerçekleştirilirken belirli zaman aralıklarında boş ve dolu kolonun termal kamera görüntüleri Testo 875 (Thermal Imager) termal kamera ile görüntülenmiştir.



Şekil 3.8. Termal kamera cihazı

3.3. Akışkan Yatak TED Sistem Deneyleri

3.3.1. Deney Öncesi

Deneylere başlamadan önce, akışkan yatağın sıcaklığının ortam sıcaklığına yakın sıcaklıkta olmasına dikkat edilir. Kompresörden üflenen hava, sabit sıcaklıktaki su banyosuna daldırılmış bir serpantinden geçirilerek ısıtılmaktadır. Deney düzeneği ile yapılan ön testlere göre minimum akışkanlaştırma hızı olarak belirlenen 0,49 m/s'lik bir hava hızı elde etmek için kolon girişindeki valf kullanılarak debi manuel olarak ayarlanmıştır. Deneyler hem boş kolon hem de mikrokapsüllenmiş FDM'ler içeren kolon için yapılmıştır.

3.3.2. Depolama

Depolama deneyleri ilk önce boş kolon için gerçekleştirilir. Daha sonra kullanılacak olan mikrokapsüllenmiş FDM'ler şekil 3.9.'da gösterilen düzende sırayla kolon içerisine alınarak deneyler tekrarlanır. Deneylerde termostatik banyo sıcaklığı 55°C ve 65°C'ye ayarlanarak iki farklı giriş havası sıcaklığında termal enerji depolama deneyleri yapılır. Boş ve dolu kolon için depolama işlemi yapılırken her 10 dakikada bir termal kamera ile görüntüler alınıp kaydedilir. Kolon içerisine yerleştirilen ısılı çiftlerden gelen sıcaklık değerleri dataloggerda kaydedilir ve bilgisayara aktarılır. Ölçülen sıcaklık verileriyle anlık depolanan enerji miktarları hesaplanır. Hesaplanan değerler zamana karşı grafiğe geçirilerek elde edilen eğrinin altında kalan alanlar bulunarak toplam depolanan/geri kazanılan enerji belirlenir. Depolama ve geri kazanım grafiklerinin altında kalan alanlar MATLAB'ın trapezoid numerik integrasyon (Trapz) yöntemiyle hesaplanarak bulunmuştur.

3.3.3. Geri Kazanma

Depolama deneyleri tamamlandıktan hemen sonra (boş ve dolu kolon için) geri kazanma deneyleri yapılır. Bu deneylerde hava, giriş sıcaklığı termostatik su banyosu sıcaklığı 15°C olacak şekilde ayarlanarak kolona aynı akış hızıyla alt kısımdan vermeye başlanır. Geri kazanma deneyleri sırasında depolamada olduğu gibi 30 saniyede bir ısılı çiftlerden gelen ölçümler kaydedilir ve bilgisayara aktararak geri kazanılan enerji miktarları hesaplanır.



Şekil 3.9. Akışkan yatak deney düzeneği

3.3.4. Depolanan ve Geri Kazanılan Enerjinin Hesaplanması

Ölçülen hava sıcaklık verileriyle anlık depolanan ve geri kazanılan enerji miktarları $Q(W)$, denklem (3.1.) ile ölçülen sıcaklıklar kullanılarak hesaplanabilir:

$$Q(t) = u \rho A C_p (T_{\text{çıkış}}(t) - T_{\text{giriş}}(t)) \quad (3.1)$$

burada t (s) zaman, u (m/s) havanın ortalama hızı, ρ (kg/m³) havanın yoğunluğu, C_p (kJ/kg°C) havanın özgül ısısı, A (m²) kolonun kesitidir ve $T_{\text{giriş}}$ ve $T_{\text{çıkış}}$ giriş ve çıkış hava sıcaklıklarıdır. Havanın tüm özelliklerinin verilen sıcaklık aralığında sabit olduğu varsayılmıştır.

Hesaplanan değerler zamana karşı grafiğe geçirilerek elde edilen eğrinin altında kalan alanlar bulunarak toplam depolanan/geri kazanılan enerji belirlenir. Depolama ve geri kazanım grafiklerinin altında kalan alanlar MATLAB'ın trapezoid numerik integrasyon (Trapz) yöntemiyle hesaplanarak bulunmuştur.

Geri kazanılan enerjinin, Q_G (kJ) depolanan enerjiye Q_D (kJ) oranı olarak verim (η) eşitlik 3.2'den hesaplanır:

$$\eta = \frac{Q_G}{Q_D} \times 100 \quad (3.2)$$



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Akışkan Yatak Uygulamaları

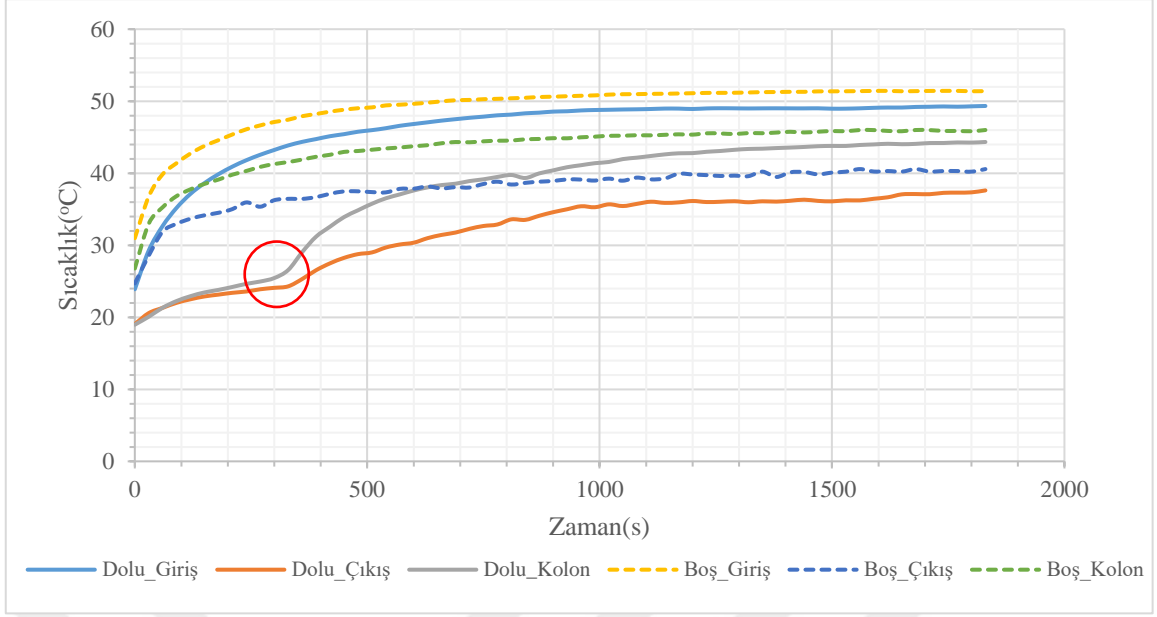
4.1.1. Mikrokapsüllerin Akışkan Yatak TED Sonuçları

Mikronalin Akışkan Yatak Deney Sonuçları

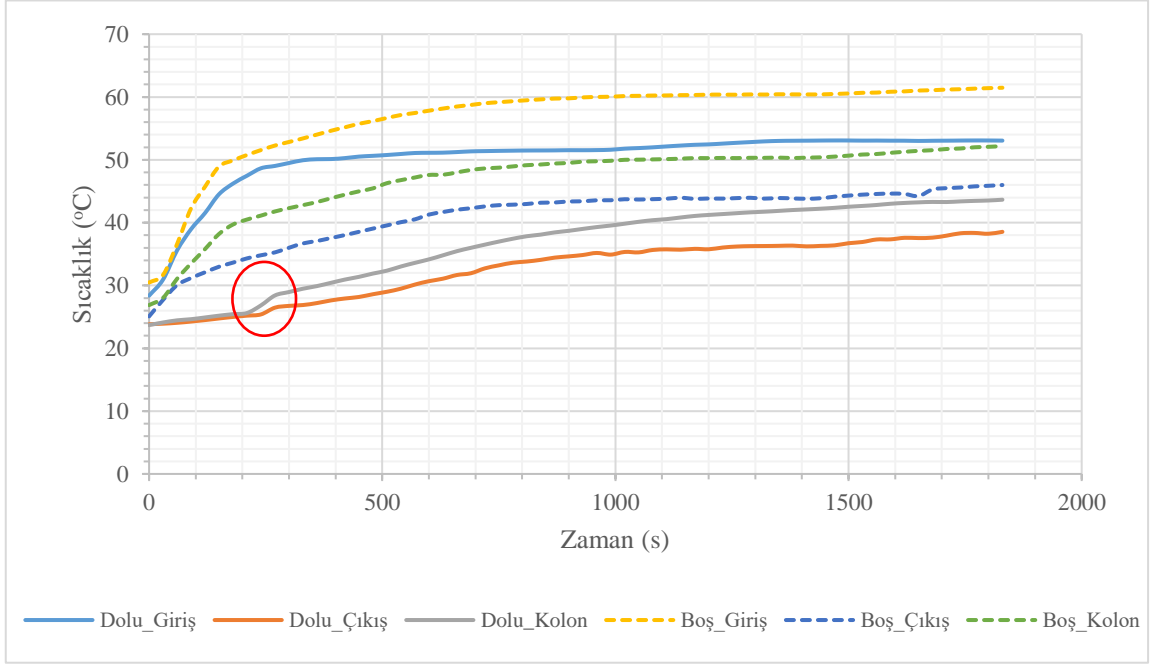
Akışkan yatakta TED deneyleri iki farklı giriş sıcaklığında (55°C ve 65°C) ve üç farklı FDM miktarıyla (150 g, 225 g ve 300 g) gerçekleştirilmiştir.

T1 (0,09 m), T2 (0,16 m) ve T3 (0,25 m) ölçümleri neredeyse birbiriyle örtüşür ve yatak boyunca sabit bir sıcaklığın korunduğunu gösteren sonuçlar vermiştir. Bu nedenle T1, T2 ve T3 sıcaklıklarının ortalaması alınarak, ortalama kolon sıcaklığı olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.1. (a) ve (b) 150 g 55°C ve 65°C giriş havası sıcaklıkları için mikrokapsüllü FDM içeren ve içermeyen akışkan yataktaki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Deneylere başlamadan önce kolonun sıcaklığı ile ortam sıcaklığı aynıdır. Hava giriş sıcaklığı 55°C ve 65°C'deki su banyosuyla ayarlanmıştır. Ancak ısı kayıpları nedeniyle, 55°C'de boş ve mikrokapsüllü FDM kolonu için 51,4°C ve 49,3°C'de, 65°C'de ise boş ve mikrokapsüllü FDM kolonu için 52,2°C ve 61,4°C'de kararlı hale gelmiştir. Deneyler kararlı duruma ulaşılan kadar 30 dakika sürdürülmüştür. Şekil 4.1.'de kırmızı daire içine alınmış kırılma noktaları, mikrokapsüllenmiş FDM'nin faz değişimine karşılık gelmektedir. Boş kolon için kesikli çizgilerle gösterilen sıcaklık dağılımlarında, FDM bulunmadığından, benzer kırılma noktaları görülmemektedir. 55°C giriş havasında Mikronal'den beklendiği gibi 23 - 26°C aralığında 5,5 dakikada erime tamamlanmıştır. 65°C deneyi için erime 4,5 dakikada tamamlanmıştır. Mikrokapsüllü FDM ile giriş ve çıkış hava sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı, deney sonunda 55°C ve 65°C için sırasıyla 11,7°C ve 14,5°C'ye ulaşmıştır. Bu farklar boş kolonda 55°C ve 65°C için 10,8°C ve 15,5°C dir. Bu işlemler sırasında, mikrokapsüller düzgün bir şekilde akışkanlaştırılmıştır.



(a)

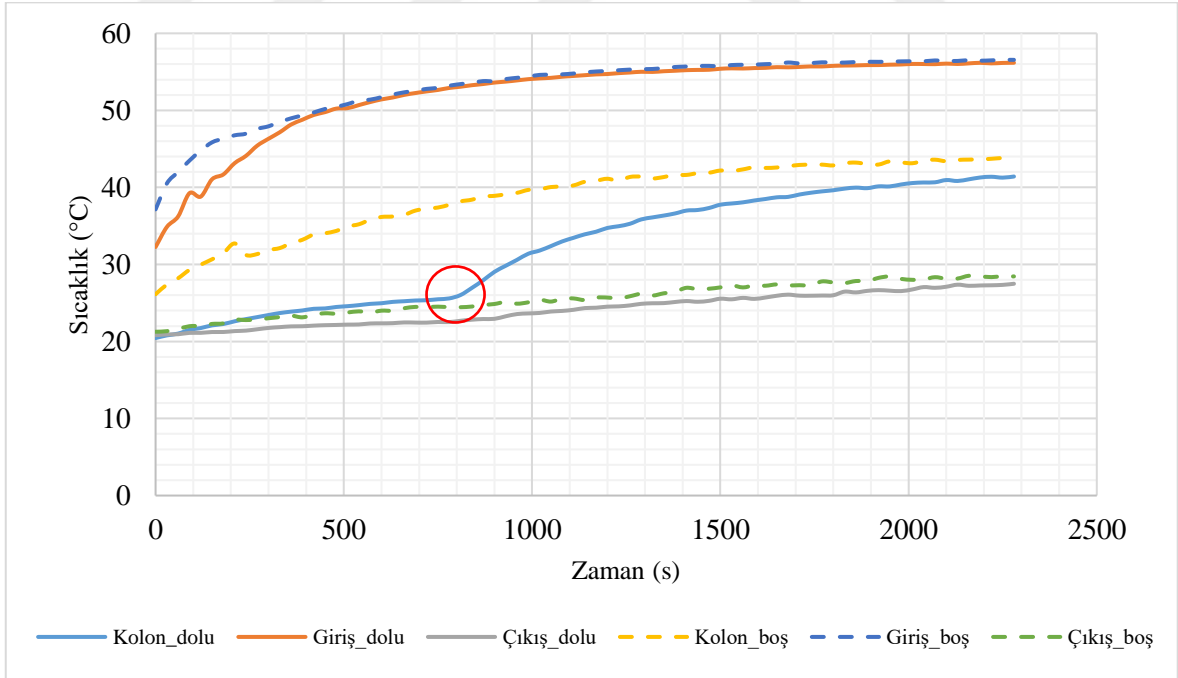
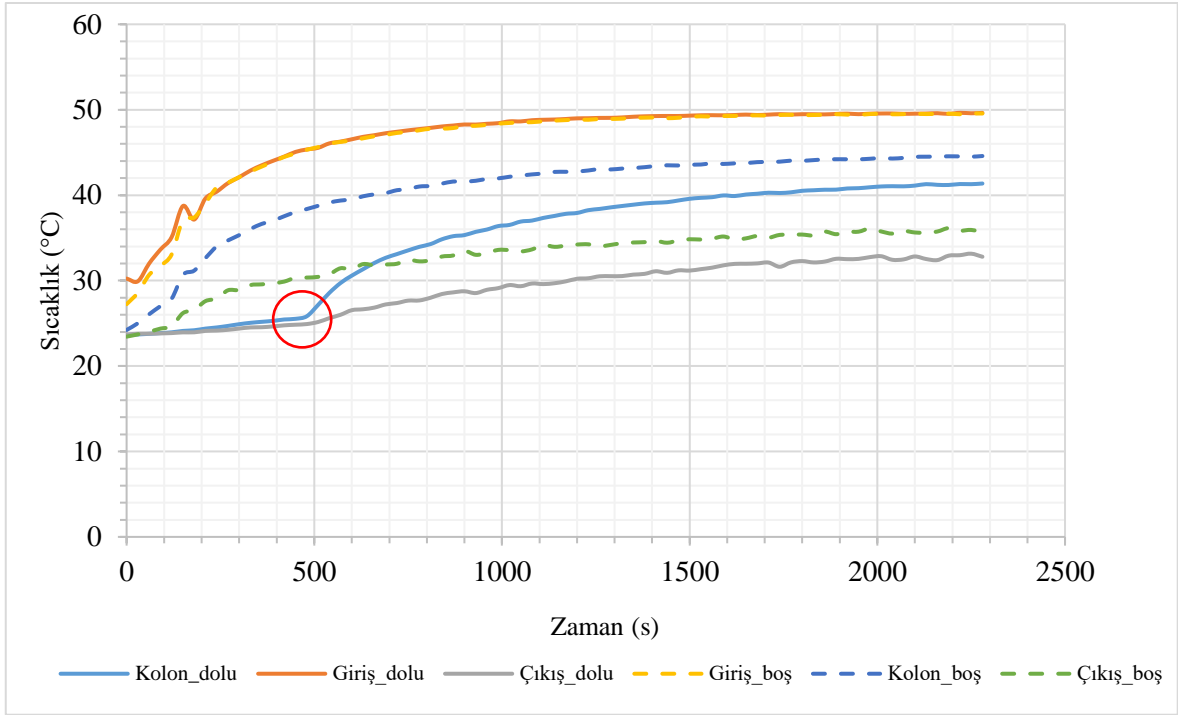


(b)

Şekil 4.1. 150 g Mikronal için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında

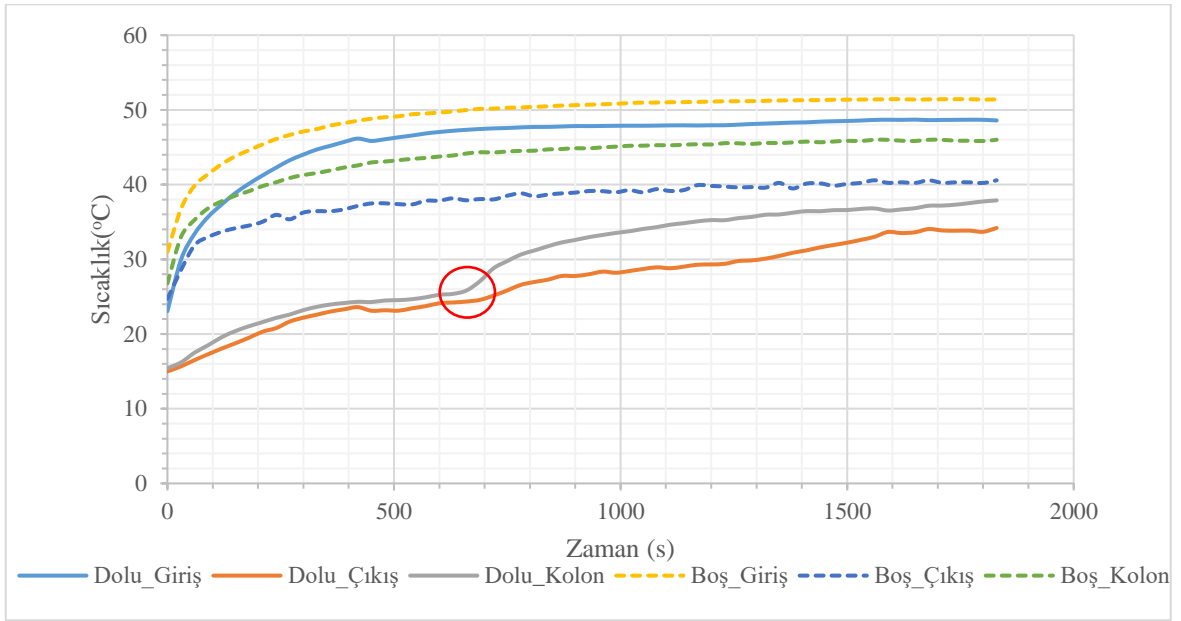
Şekil 4.2 (a) ve (b) 225 g 55°C ve 65°C giriş havası sıcaklıkları için mikrokapsüllü FDM içeren ve içermeyen kolondaki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Boş ve mikrokapsüllü FDM kolonu için 50°C ve 56,4°C'de kararlı hale gelmiştir. 55°C giriş sıcaklığında 23-26°C aralığında 8,5 dakikada erime tamamlanmıştır. 65°C deneyi için erime 13 dakikada tamamlanmıştır. Erime süresindeki fark, mikronal miktarının artışı ile açıklanabilir. Deney, kararlı durum elde edilene kadar 40 dakika sürmüştür. Mikrokapsüllü FDM ile giriş ve çıkış hava sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı,

deney sonunda 55°C ve 65°C için sırasıyla 16,7°C ve 28,9°C'ye ulaşmıştır. Bu farklar boş kolonda 55°C ve 65°C için 13,7°C ve 26,4°C dir.

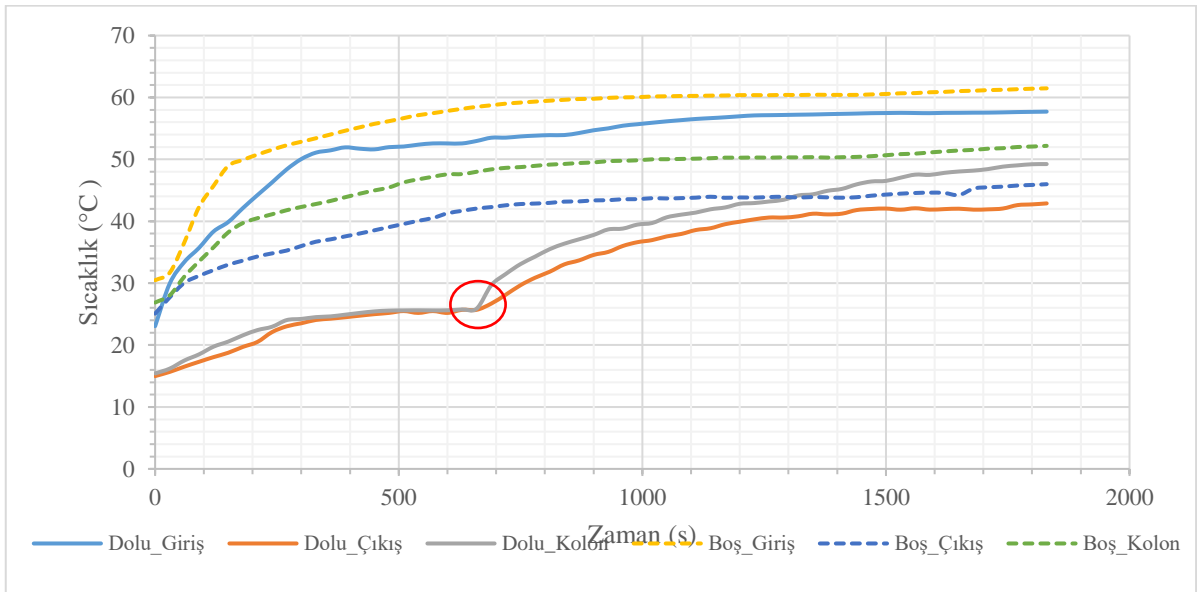


Şekil 4.2. 225 g Mikronal için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında

Şekil 4.3. (a) ve (b) 300 g 55°C ve 65°C giriş havası sıcaklıkları için mikrokapsüllü FDM içeren ve içermeyen kolondaki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Boş ve mikrokapsüllü FDM kolonu için 48,6°C -51,4°C ve 58,0°C-61,5°C'de kararlı hale gelmiştir. 55°C giriş sıcaklığında 11 dakikada erime tamamlanmıştır. 65°C deneyi için erime 11 dakikada tamamlanmıştır. Deney, kararlı durum elde edilene kadar 30 dakika sürmüştür. Mikrokapsüllü FDM ile giriş ve çıkış hava sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı, deney sonunda 55°C ve 65°C için sırasıyla 14,4°C ve 12,5°C'ye ulaşmıştır. Bu farklar boş kolonda 55°C ve 65°C için 10,9°C ve 15,5°C dir. Bu işlemler sırasında, mikrokapsüllerin akışkanlaşması düzgün bir şekilde olmuştur.



(a)



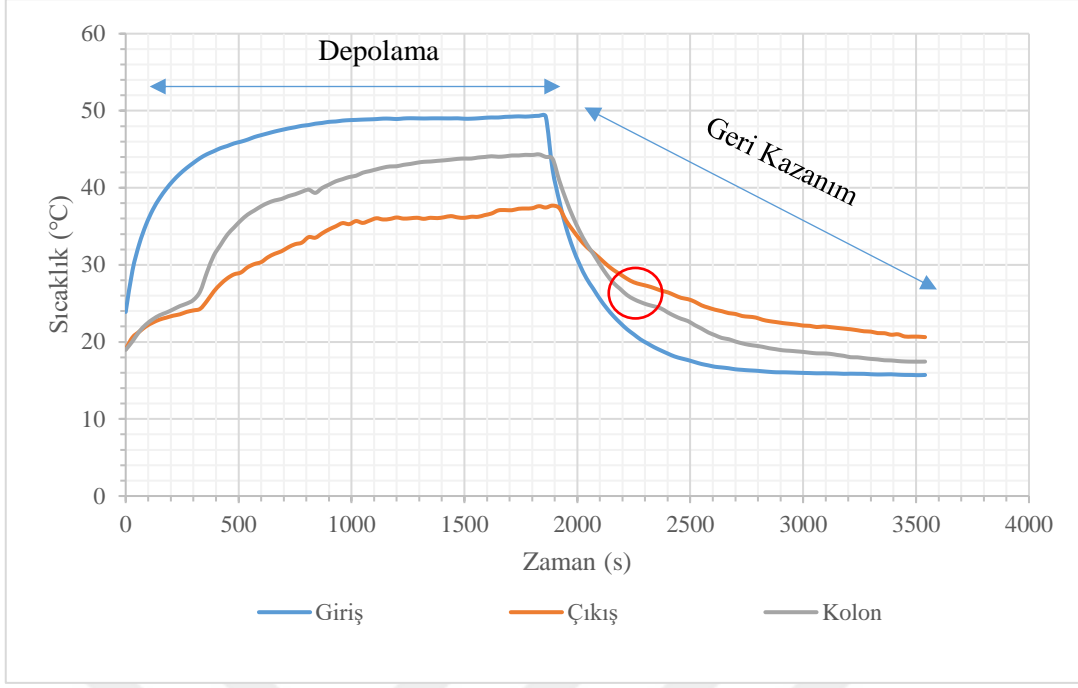
(b)

Şekil 4.3. 300 g Mikronal için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında

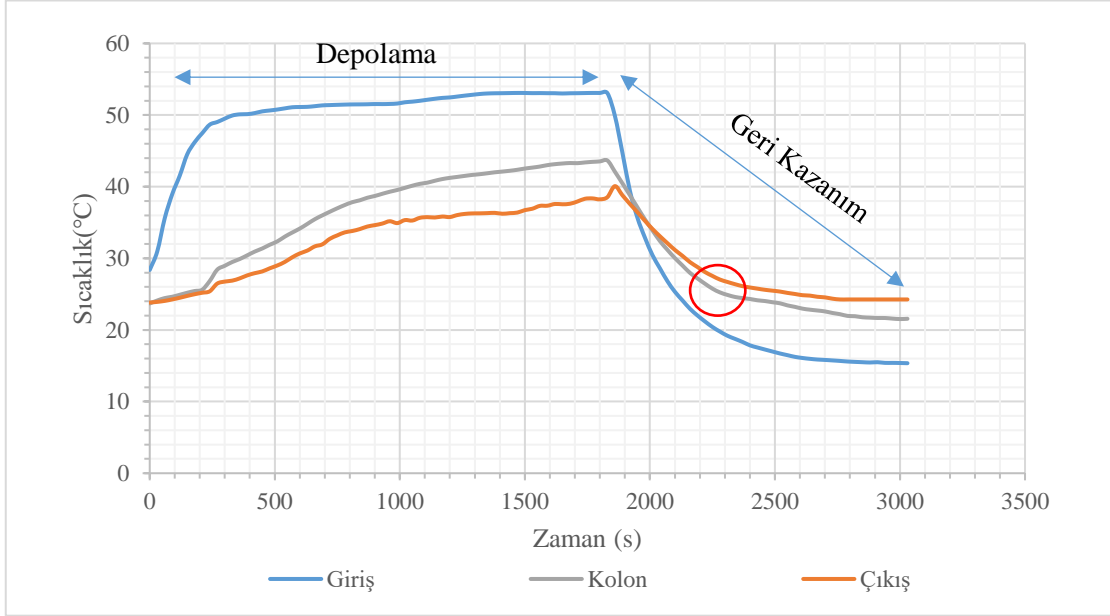
150 g, 225 g ve 300 g FDM miktarları için ısı depolama deneylerinin arkasından 15°C'deki hava giriş sıcaklığında ısı geri kazanım testleri yapılmıştır. Şekil 4.4., şekil 4.5. ve şekil 4.6. (a) ve (b), 55°C ve 65°C giriş depolama sıcaklıkları için tüm ısı depolama ve geri kazanım döngüsünde kolon boyunca sıcaklık dağılımını göstermektedir. 150 g Mikronal (Şekil 4.4) için; 55°C ve 65°C giriş depolama sıcaklıklarında depolama deneyleri sonunda maksimum kolon sıcaklığı 44,3°C ve 43,5°C'ye ulaşmıştır. Kararlı hale ulaşana kadar 28 dakika devam edilen geri kazanma deneyi sonunda, kolona giriş sıcaklığı 15°C iken ısı geri kazanılarak 55°C depolama sıcaklığı için hava çıkış sıcaklığı 20,6°C'ye ve 65°C depolama sıcaklığı için 24,2°C'ye ulaşmıştır.

225 g Mikronal (Şekil 4.5) ile yapılan deneylerde; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında depolama deneyleri sonunda maksimum kolon sıcaklığı 41,8°C ve 47,6°C'ye ulaşmıştır. Geri kazanıma 32 dakika devam edilmiş ve 55°C depolama sıcaklığı için hava çıkış sıcaklığı 24,8°C'ye ve 65°C için 23,5°C'ye ulaşmıştır.

300 g Mikronal (Şekil 4.6) için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında depolama deneyleri sonunda maksimum kolon sıcaklığı 37,9°C ve 49,0°C'ye ulaşmıştır. Geri kazanıma 29 dakika devam edilmiş ve 55°C depolama sıcaklığında için hava çıkış sıcaklığı 24,8°C'ye ve 65°C için 22,2°C'ye ulaşmıştır. Grafikler üzerinde kırmızı daire içerisine alınan bölgeler geri kazanım deneyleri sırasındaki faz değişimlerini göstermekte ve ısı depolama sırasında gerçekleşen faz değişim aralıklarıyla uyumludur.

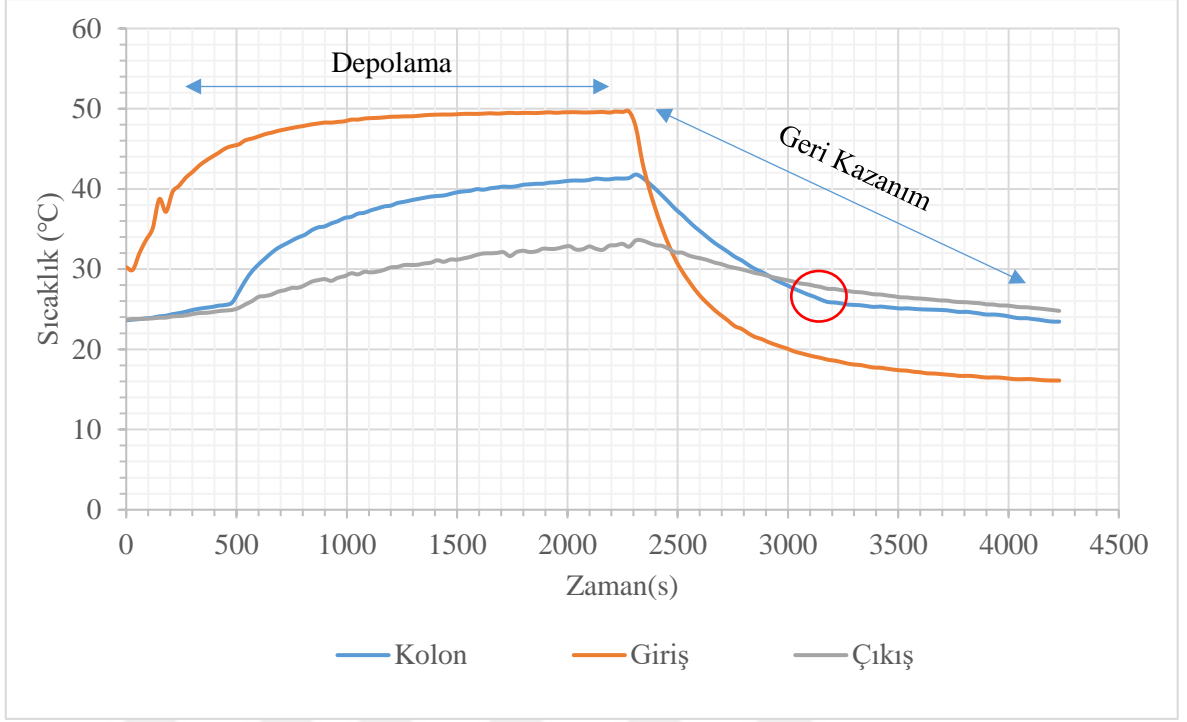


(a)

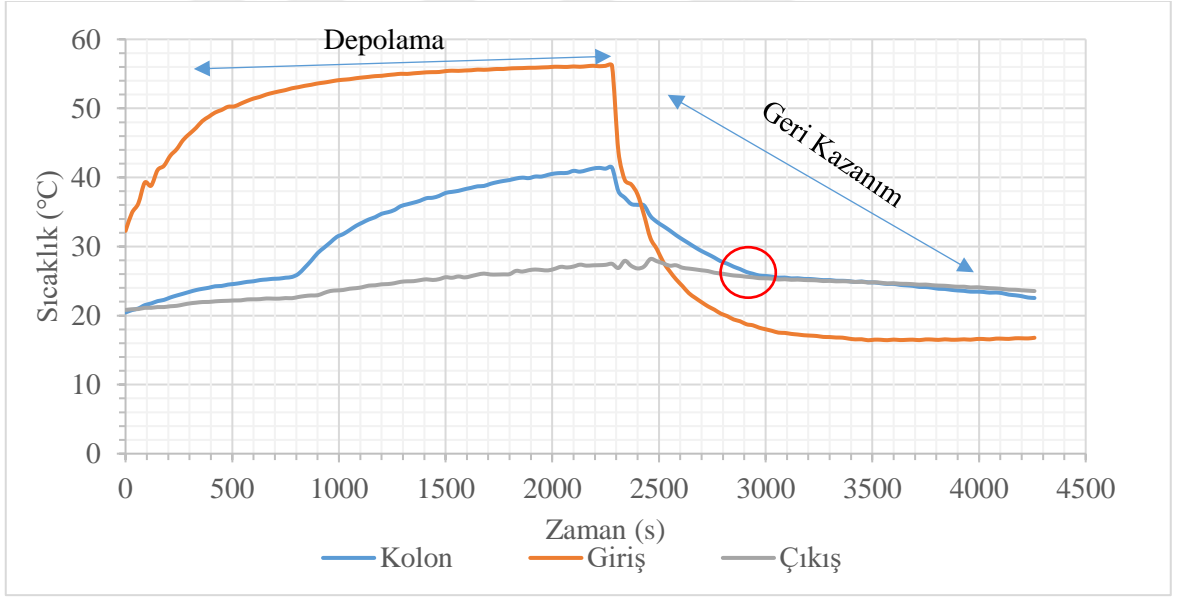


(b)

Şekil 4.4. 150 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı

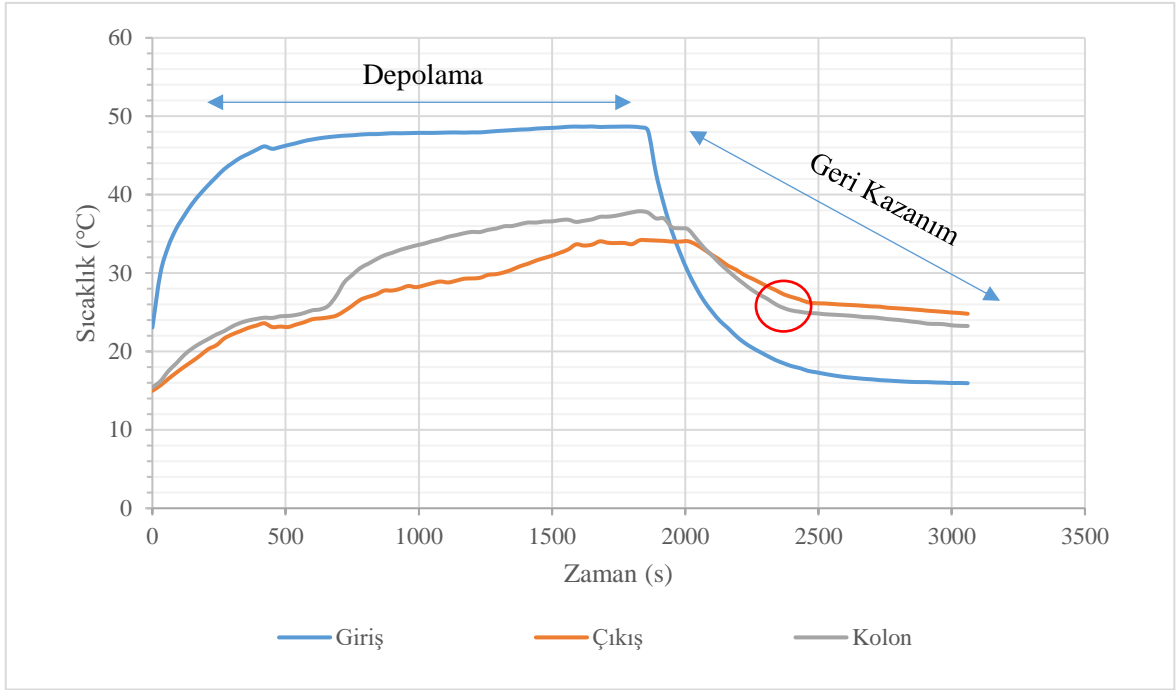


(a)

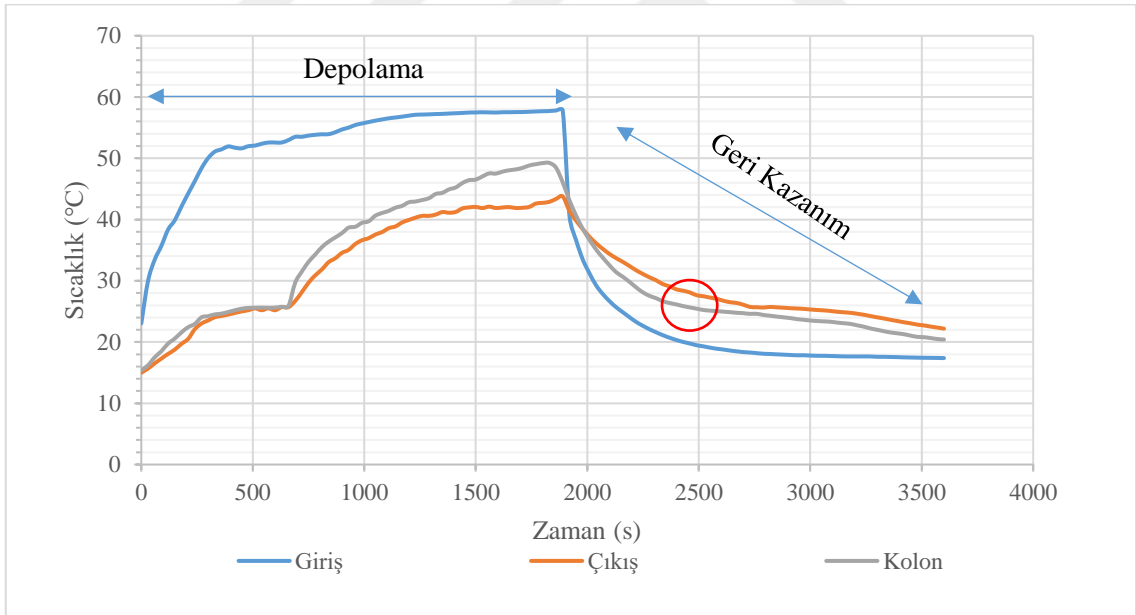


(b)

Şekil 4.5. 225 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı



(a)

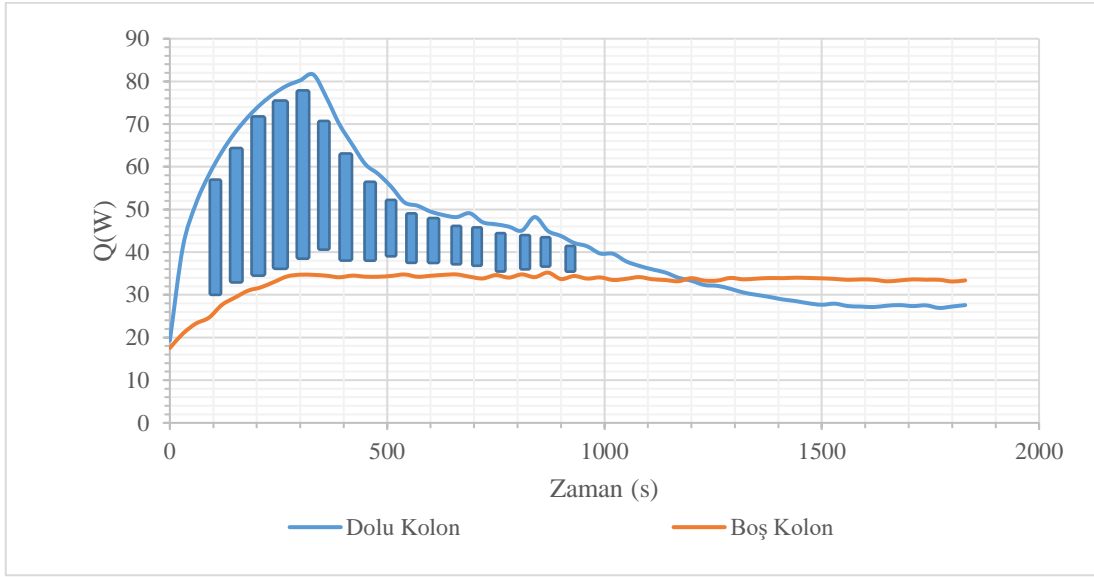


(b)

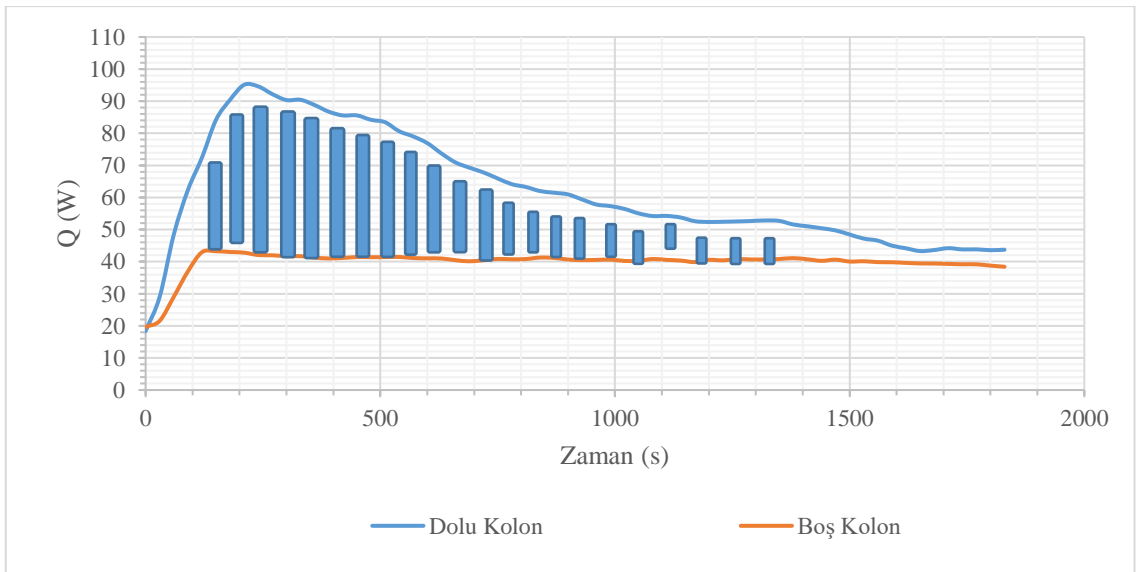
Şekil 4.6. 300 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı

150 g, 225 g ve 300 g FDM için akışkan yataкта depolanan ve geri kazanılan anlık enerji $Q(W)$, denklem (3.1.) ile ölçülen sıcaklıklar kullanılarak hesaplanmıştır. Hem boş kolon hem de akışkanlaştırılmış mikrokapsüllü FDM'li kolon için hesaplanan Q sırasıyla 55°C ve 65°C ısı depolama deneyleri için Şekil 4.7., şekil 4.8. ve şekil 4.9. (a) – (b)'de gösterilmiştir. Boş sütun ve

mikrokapsüllü FDM eğrilerine sahip sütun arasındaki alan, mikrokapsüllü FDM tarafından depolanan enerjiye karşılık gelir. Şekil 4.7. a-b'deki işaretli alan, MATLAB trapezoid numerik integrasyon yöntemi kullanılarak 55°C giriş sıcaklığında 22,3 kJ ve 65°C'de 40,9 kJ, şekil 4.8. a-b'deki işaretli alan 55°C giriş sıcaklığında 68,1 kJ ve 65°C'de 44,6 kJ ve şekil 4.9. a-b'deki işaretli alan ise, 55°C giriş sıcaklığında 83,2 kJ ve 65°C'de 51,9 kJ olarak hesaplanmıştır. 65°C giriş sıcaklığında daha düşük depolanan ısı, kolon ile dış ortam sıcaklık farkının daha yüksek olmasıyla görülen daha fazla ısı kayıpları ile açıklanabilir.

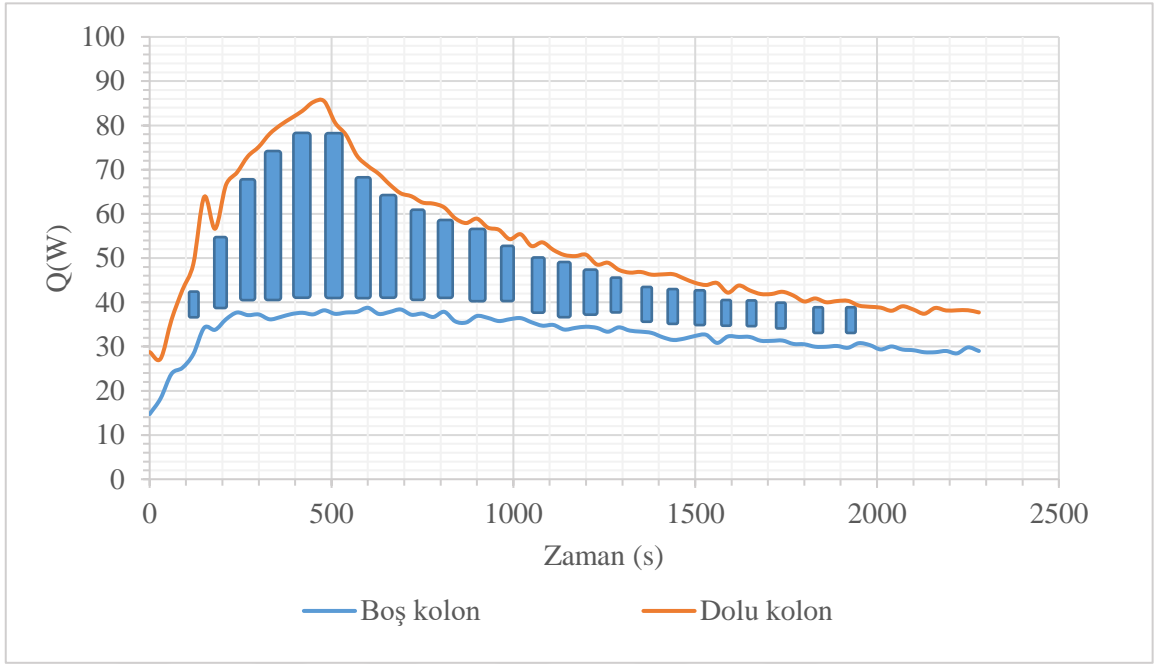


(a)

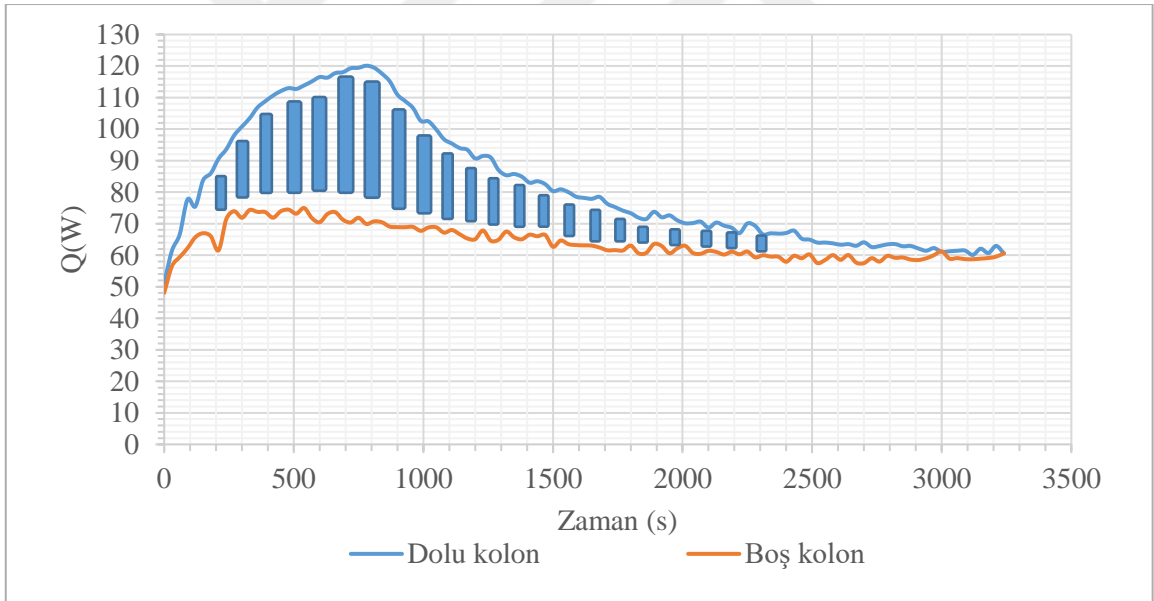


(b)

Şekil 4.7. 150 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji

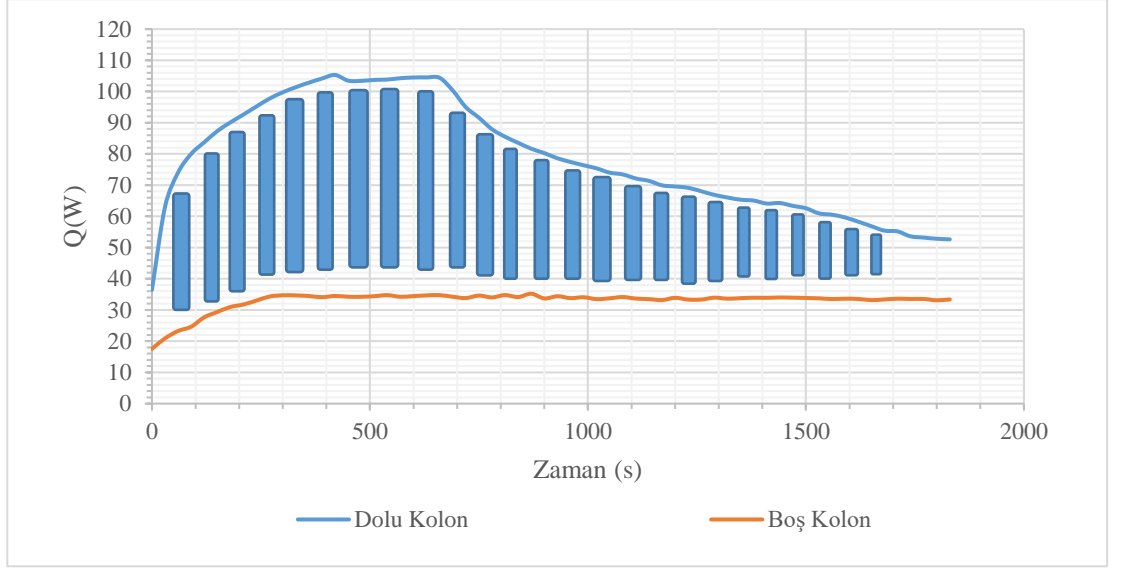


(a)

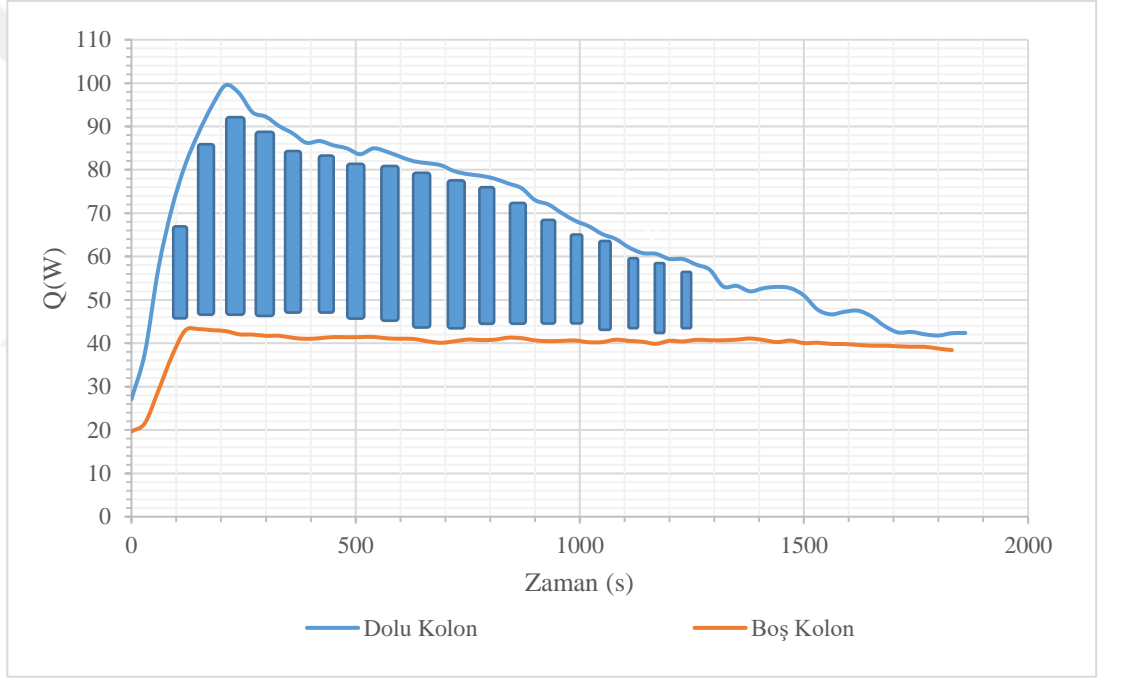


(b)

Şekil 4.8. 225 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji



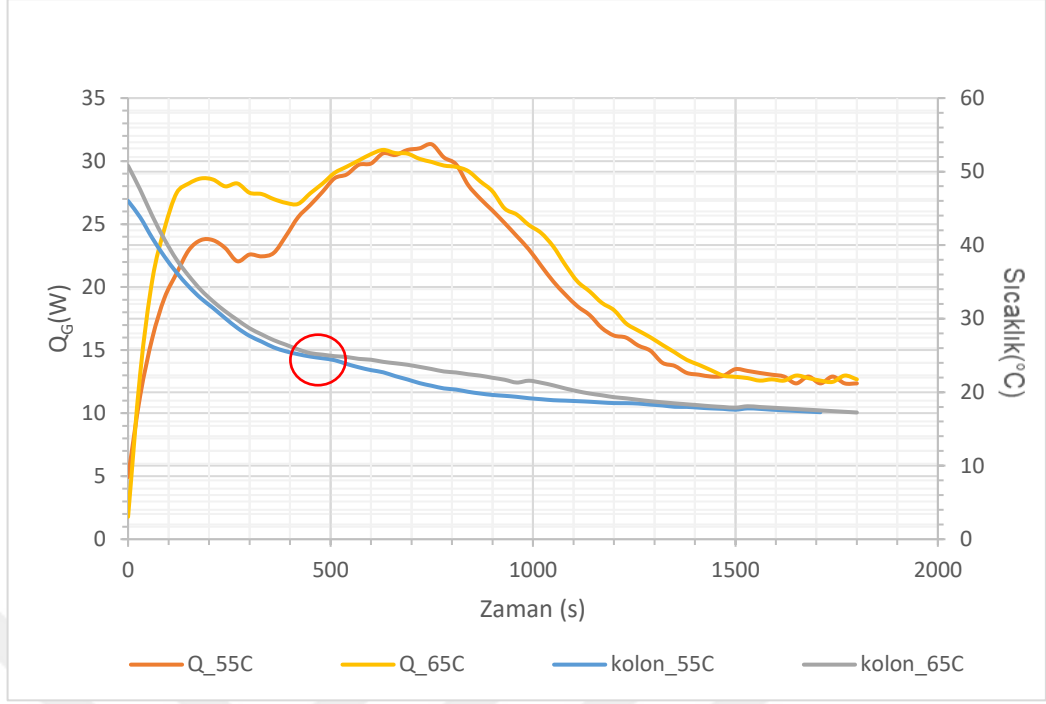
(a)



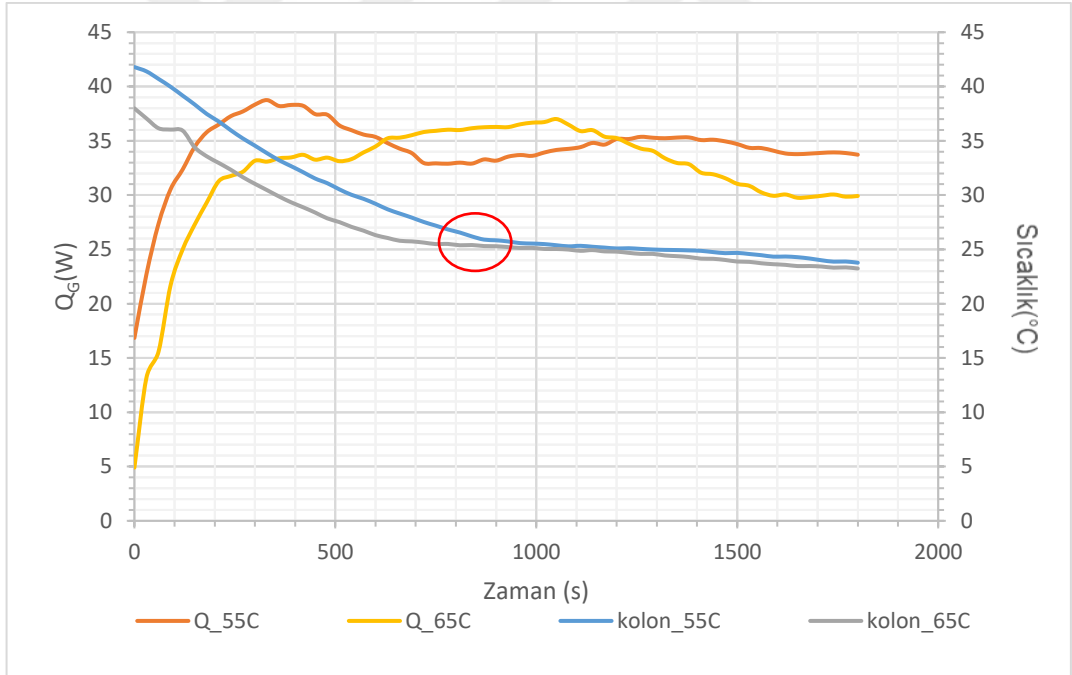
(b)

Şekil 4.9. 300 g Mikronal için (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji

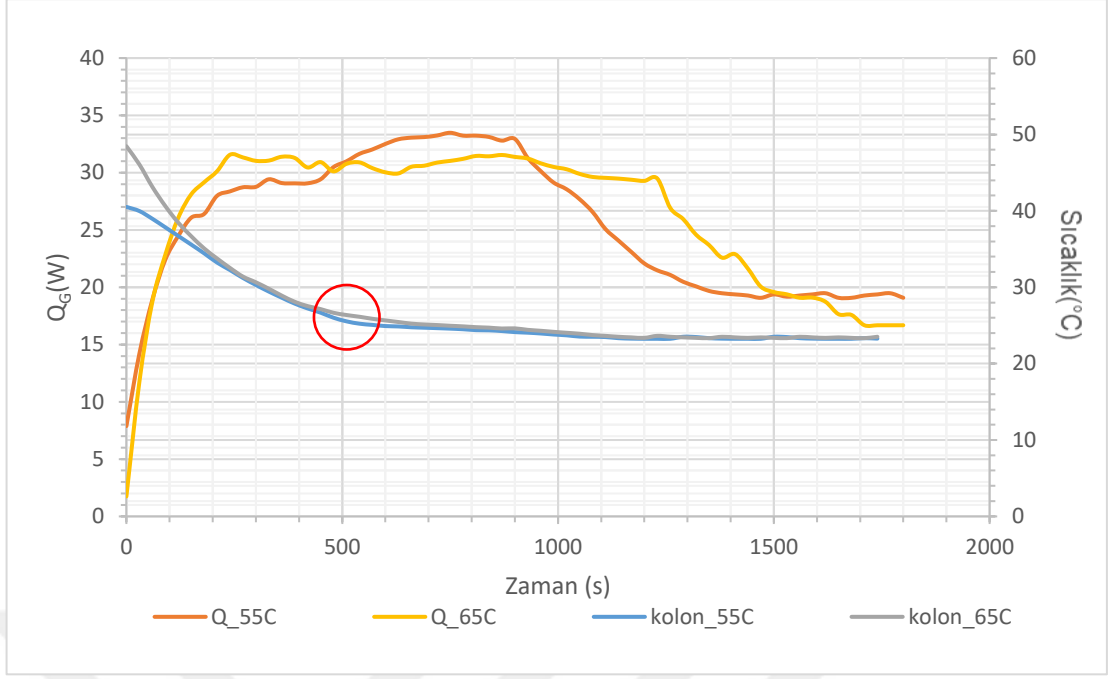
Şekil 4.10,4.11 ve 4.12' de zamanla geri kazanılan enerji (Q_G) gösterilmektedir. Q_G , denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Geri kazanım deneylerinde hava akışkan yatağa girmeden önce 15°C'de sabit tutulmuştur. Yaklaşık olarak 10 dakikada geri kazanım eğrilerinde hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Mikronalin donma sıcaklığına (25 °C) yaklaştıkça kolon sıcaklığının sabit kaldığı kırmızı daire içerisine alınarak gösterilmiştir.



Şekil 4.10. 150 g Mikronal için zamanla geri kazanılan enerji

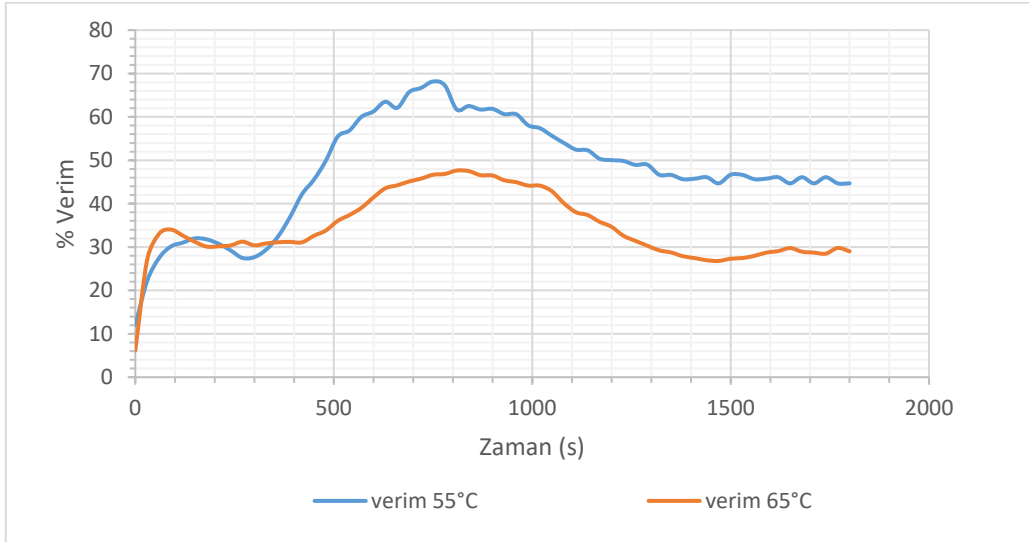


Şekil 4.11. 225 g Mikronal için zamanla geri kazanılan enerji

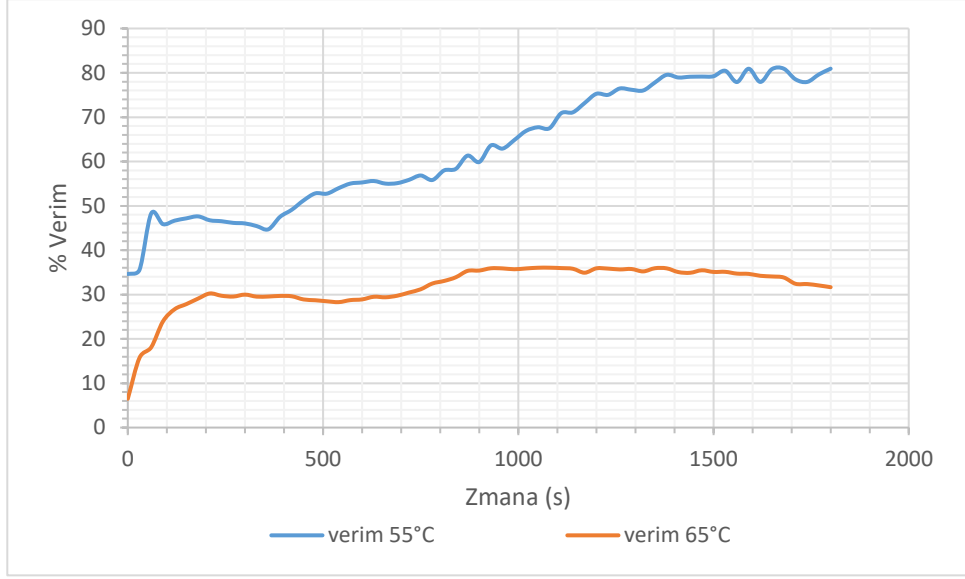


Şekil 4.12. 300 g Mikronal için zamanla geri kazanılan enerji

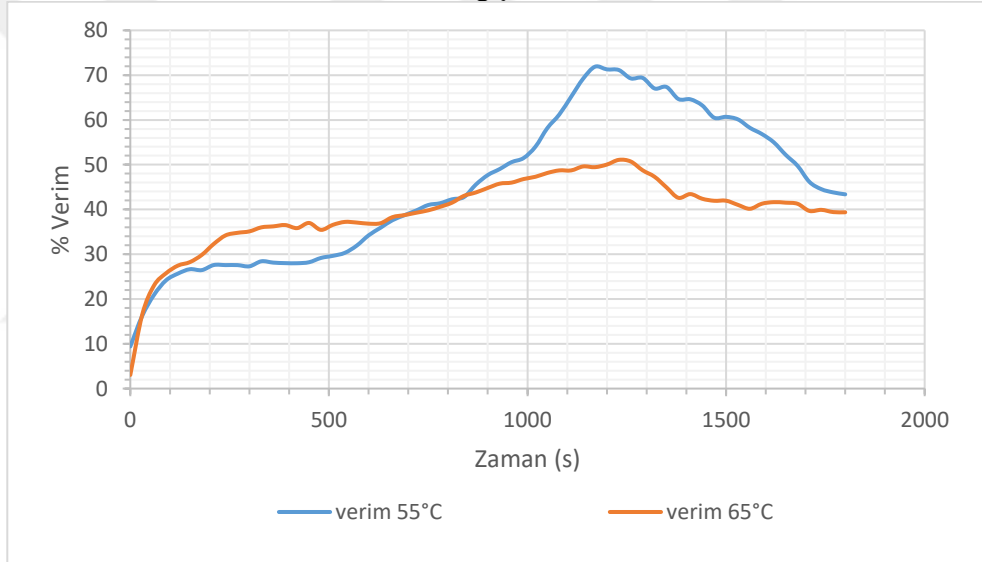
Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16, 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimini göstermektedir. Verim hesabı yapılırken denklem (3.2) 'den yararlanılmıştır. 150 g mikronal için 55°C ve 65°C 'de bulunan verimler sırasıyla % 68,1 ve 47,6'dır. 225 g mikronal için 55°C ve 65°C 'de bulunan verimler sırasıyla %81 ve %36' dır. 300 g mikronal için ise 55°C ve 65°C 'de bulunan verimler sırasıyla %72 ve % 51' dir.



Şekil 4.13. 150 g mikronal için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi



Şekil 4.14. 225 g mikronal için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi

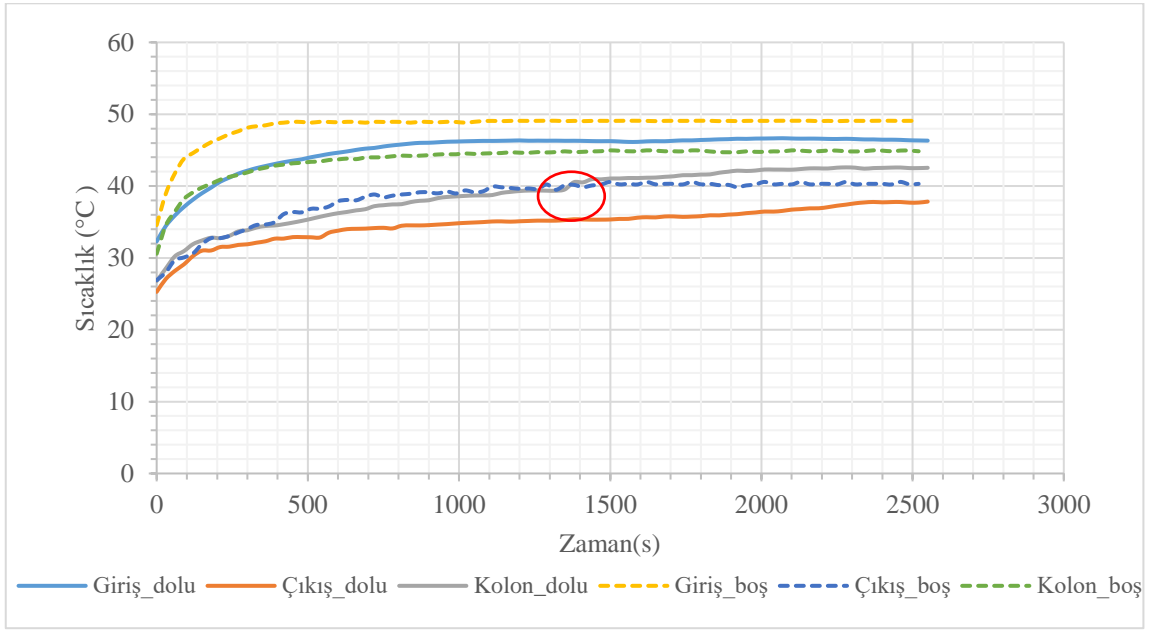


Şekil 4.15. 300 g mikronal için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi

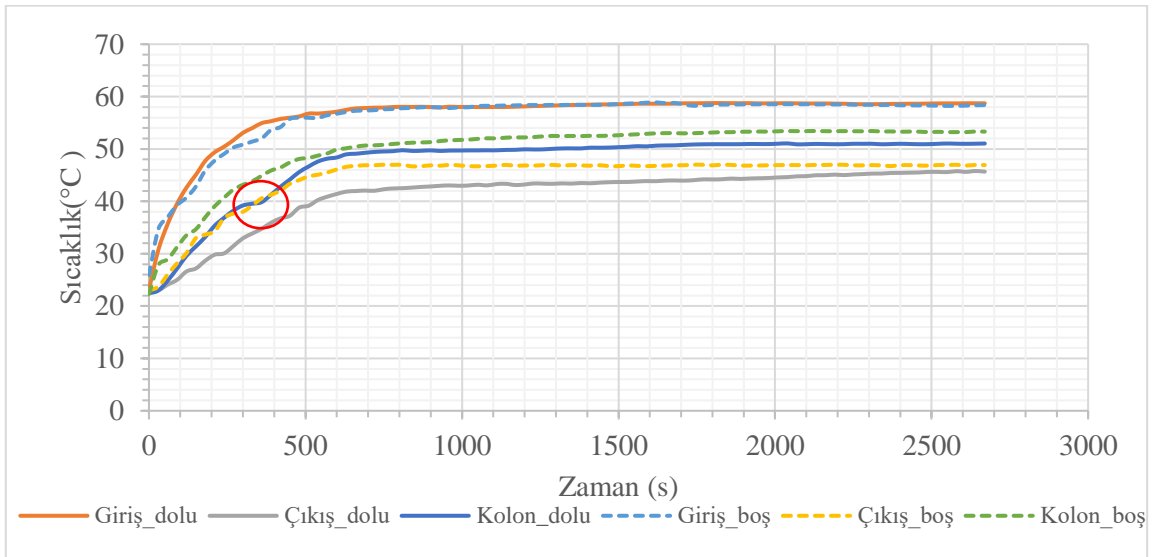
MgCO₃@parafin42-44 Akışkan Yatak Deney Sonuçları

Akışkan yatakta TED deneyleri iki farklı giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. T1 (0,09 m), T2 (0,16 m) ve T3 (0,25 m) ölçümlerinin neredeyse birbiriyle örtüştüğü ve yatak boyunca sabit bir sıcaklığın korunduğu gözlenmiştir. Bu nedenle T1, T2 ve T3 sıcaklıklarının ortalaması alınarak, ortalama kolon sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Şekil 4.16. (a) ve (b) 55°C ve 65°C giriş havası sıcaklıkları için mikrokapsüllü FDM içeren ve içermeyen kolondaki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Deneylere başlamadan önce kolonun sıcaklığı ile ortam sıcaklığı aynıdır. Hava giriş sıcaklığı 55°C ve 65°C'deki su banyosuyla ayarlanmıştır. Ancak ısı kayıpları nedeniyle, 55°C'de boş ve mikrokapsüllü FDM kolonu için 49,0°C ve 44,8°C, 65°C'de ise hem boş hem de mikrokapsüllü FDM kolonu için 58,3°C'de kararlı hale gelmiştir. Şekil 4.16.'te kırmızı daire içine

alınmış kırılma noktaları, mikrokapsüllenmiş FDM'nin sırasıyla 40,5°C ve 41°C'de faz değişimi olduğuna karşılık gelmektedir. Boş kolon için kesikli çizgilerle gösterilen sıcaklık dağılımlarında benzer kırılma noktaları görülmemektedir. 55°C giriş hava sıcaklığında MgCO₃@parafin42-44' ün faz değişimi 25 dakikada tamamlanmıştır. 65°C deneyi için erime 6 dakikada tamamlanmıştır. Deney, kararlı durum elde edilene kadar 40 dakika sürmüştür. Mikrokapsüllü FDM ile giriş ve çıkış hava sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı, deney sonunda 55°C ve 65°C için sırasıyla 7,0°C ve 11,5°C'ye ulaşmıştır. Bu farklar boş kolonda 55°C ve 65°C için 8,7°C ve 11,4°C dir. Bu işlemler sırasında, mikrokapsüller düzgün bir şekilde akışkanlaştırılmıştır.



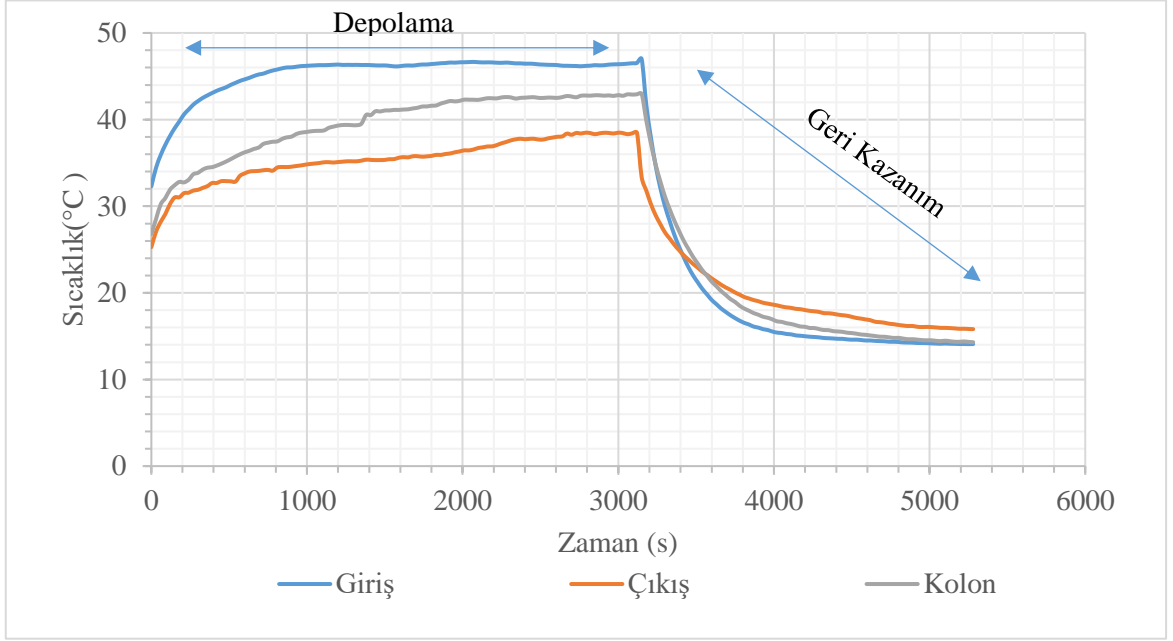
(a)



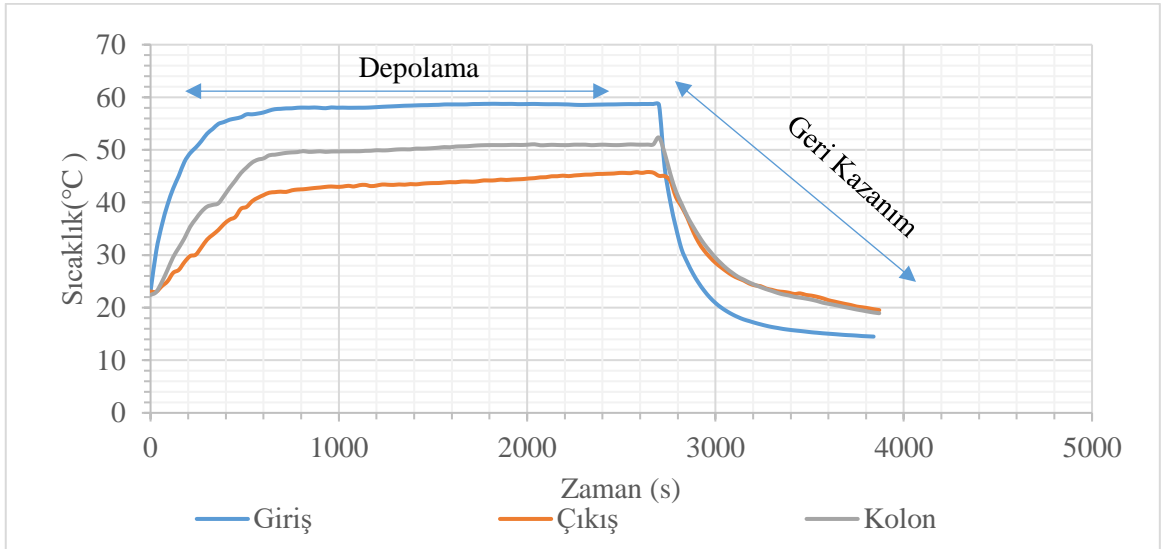
(b)

Şekil 4.16. MgCO₃@parafin42-44 için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında

Isı depolama deneylerinin arkasından 15°C'deki hava giriş sıcaklığında ısı geri kazanım testleri yapılmıştır. Şekil 4.17. (a) ve (b), 55°C ve 65°C depolama sıcaklıkları için tüm ısı depolama ve geri kazanım döngüsünde kolon boyunca sıcaklık dağılımını göstermektedir. 55°C ve 65°C giriş depolama sıcaklıkları için depolama deneyleri sonunda maksimum kolon sıcaklığı 42,9°C ve 52,3°C'ye ulaşmıştır. Geri kazanıma 35 dakika devam edilmiş ve çıkış hava sıcaklığı, 55°C depolama giriş sıcaklığı için 15,8°C'ye ve 65°C için 18,9°C'ye ulaşmıştır.



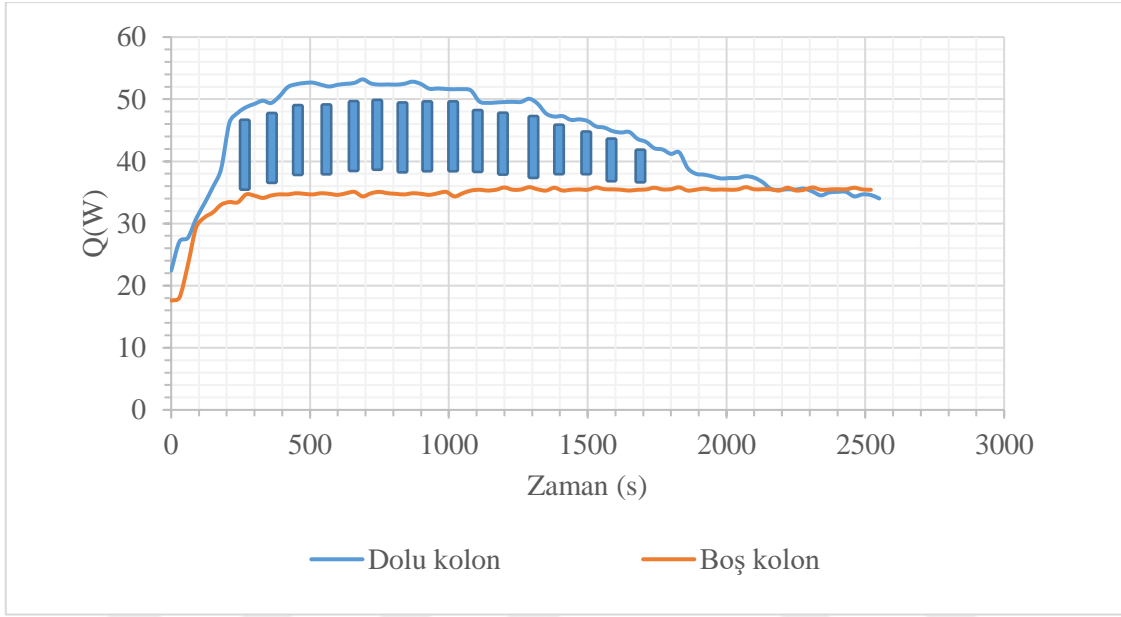
(a)



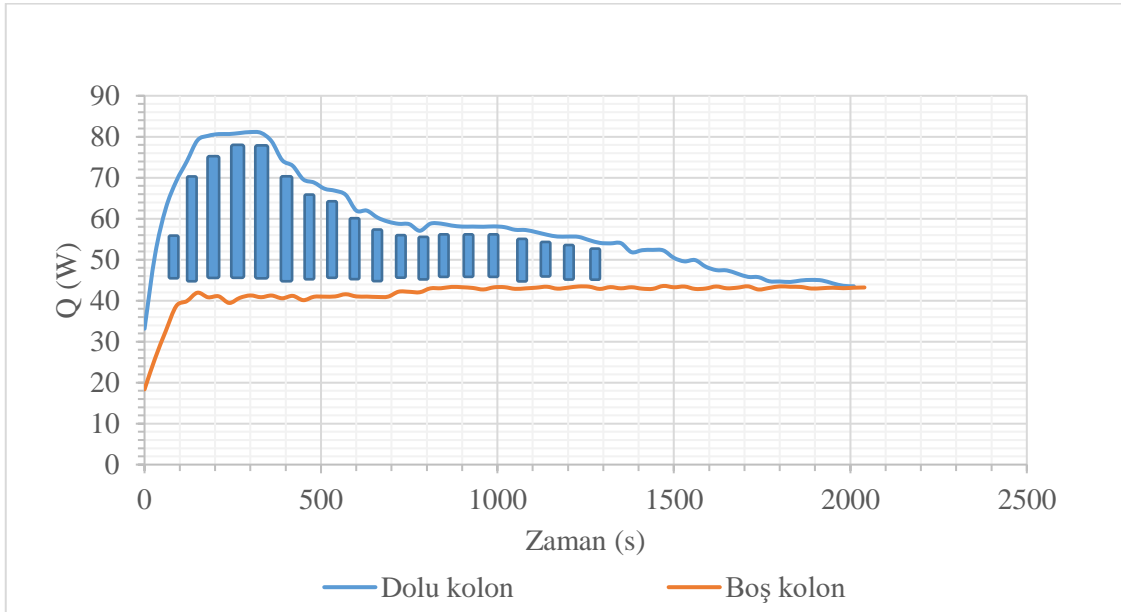
(b)

Şekil 4.17. $MgCO_3@parafin_{42-44}$ için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı

Akışkan yatakta depolanan ve geri kazanılan ısı $Q(kW)$, denklem 4.1. kullanılarak hesaplanmıştır. Hem boş kolon hem de akışkanlaştırılmış mikrokapsüllü FDM'li kolon için hesaplanan Q sırasıyla $55^{\circ}C$ ve $65^{\circ}C$ ısı depolama deneyleri için Şekil 4.18. (a) – (b)'da gösterilmiştir. Şekil 4.18. a-b'daki eğriler arasındaki alan, MATLAB trapezoid numerik integrasyon yöntemi kullanılarak $55^{\circ}C$ giriş sıcaklığında 25,5 kJ ve $65^{\circ}C$ 'de 32,7 kJ olarak hesaplanmıştır.



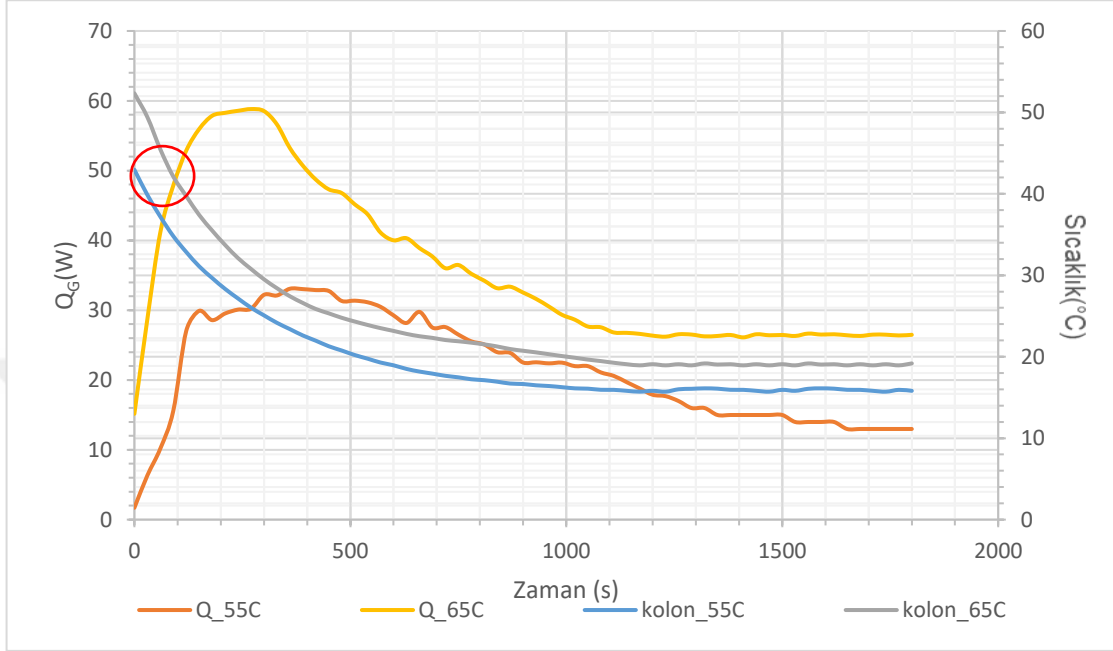
(a)



(b)

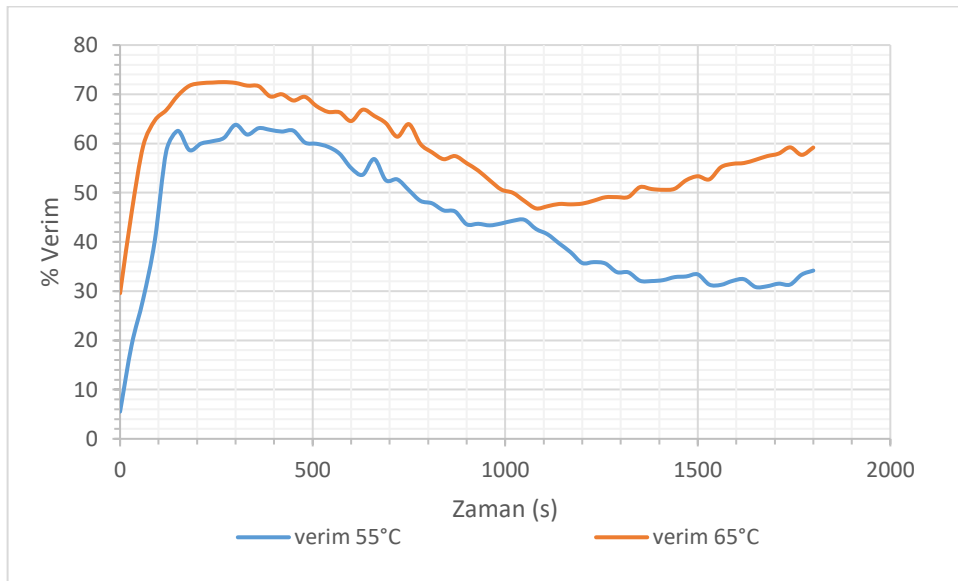
Şekil 4.18. $MgCO_3@parafin42-44$ için (a) $55^{\circ}C$ (b) $65^{\circ}C$ derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji

Şekil 4.19’ da gösterilmiş olan geri kazanılan enerji (Q_G), denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Geri kazanım deneylerinde hava akışkan yatağa girmeden önce 15°C ’de sabit tutulmuştur. Yaklaşık olarak 5 dakikada geri kazanım eğrilerinde hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Kırmızı daire içine alınan bölge MgCO_3 @parafin42-44’ ün faz değişim noktasını göstermektedir.



Şekil 4.19. MgCO_3 @parafin42-44 için zamanla geri kazanılan enerji

Şekil 4.20 ’de MgCO_3 @parafin42-44 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimini göstermektedir. Verim hesabı yapılırken denklem (3.2) kullanılmıştır. MgCO_3 @parafin42-44 için 55°C ve 65°C ’lerde bulunan verimler sırasıyla %64 ve %72,4 ’tür.



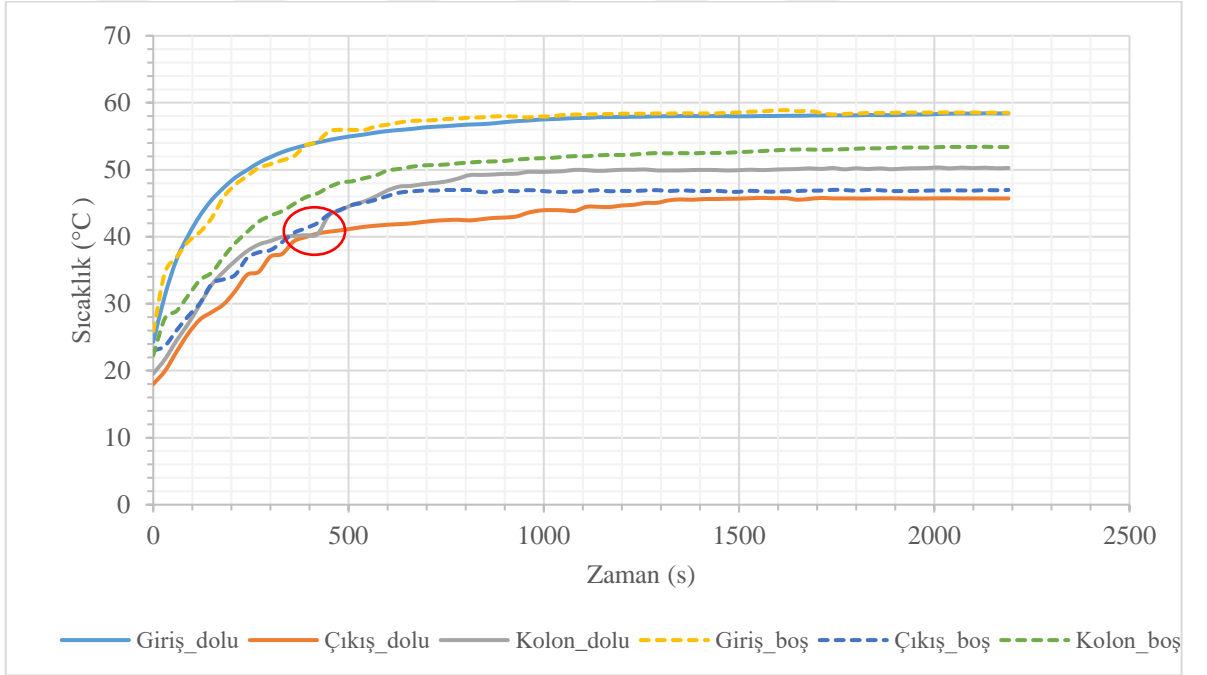
Şekil 4.20. MgCO_3 @parafin42-44 için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi

CaCO₃@parafin42-44 Akışkan Yatak Deney Sonuçları

Akışkan yatakta TED deneyleri iki farklı giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. T1 (0,09 m), T2 (0,16 m) ve T3 (0,25 m) ölçümlerin burada da yakın değerler olması ve yatak boyunca sabit bir sıcaklığın korunduğunu göstermektedir. Bu nedenle T1, T2 ve T3 sıcaklıklarının ortalaması alınarak, ortalama kolon sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Şekil 4.21. (a) ve (b) 55°C ve 65°C giriş havası sıcaklıkları için mikrokapsüllü FDM içeren ve içermeyen kolondaki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Deneylere başlamadan önce kolonun sıcaklığı ile ortam sıcaklığı aynıdır. Hava giriş sıcaklığı 55°C ve 65°C'deki su banyosuyla ayarlanmıştır. Ancak ısı kayıpları nedeniyle, 55°C'de boş ve mikrokapsüllü FDM kolonu için 49,1°C ve 44,8°C, 65°C'de ise hem boş hem de mikrokapsüllü FDM kolonu için 58,5°C'de kararlı hale gelmiştir. Şekil 4.21.'de kırmızı daire içine alınmış kırılma noktaları, mikrokapsüllenmiş FDM'nin faz değişimine karşılık gelmektedir. Boş kolon için kesikli çizgilerle gösterilen sıcaklık dağılımlarında benzer kırılma noktaları görülmemektedir. 55°C giriş hava sıcaklığında CaCO₃@parafin42-44' ün faz değişimi 25 dakikada tamamlanmıştır. 65°C deneyi için erime 16,5 dakikada tamamlanmıştır. Deney, kararlı durum elde edilene kadar 40 dakika sürmüştür. Mikrokapsüllü FDM ile giriş ve çıkış hava sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı, deney sonunda 55°C ve 65°C için sırasıyla 9,5°C ve 10,8°C'ye ulaşmıştır. Bu farklar boş kolonda 55°C ve 65°C için 8,5°C ve 11,6°C dir. Bu işlemler sırasında, mikrokapsüller düzgün bir şekilde akışkanlaştırılmıştır.



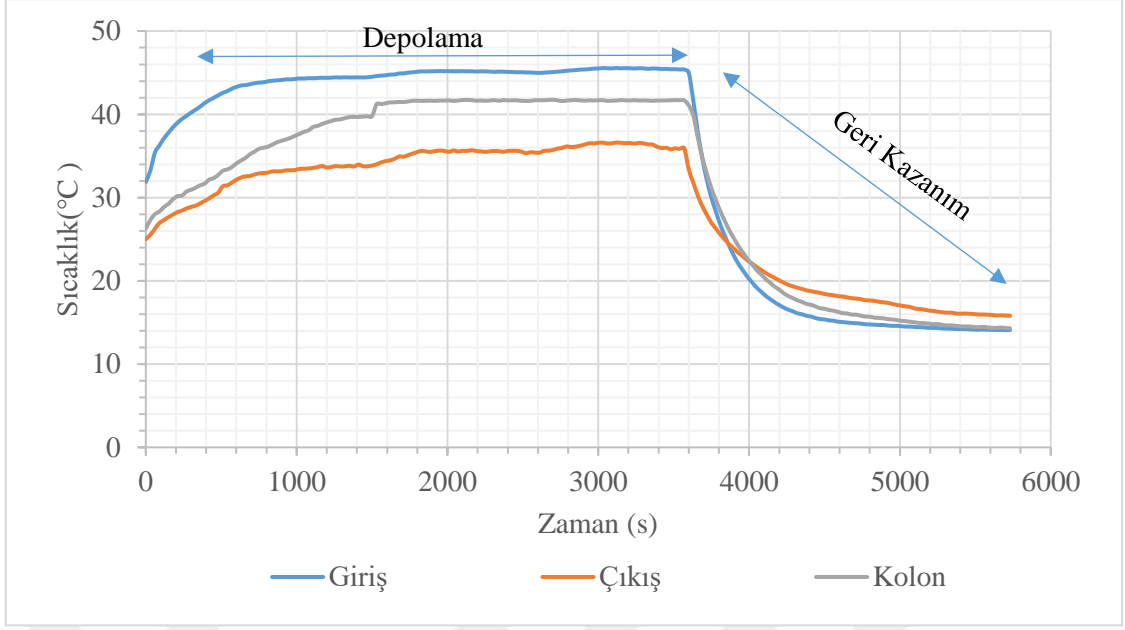
(a)



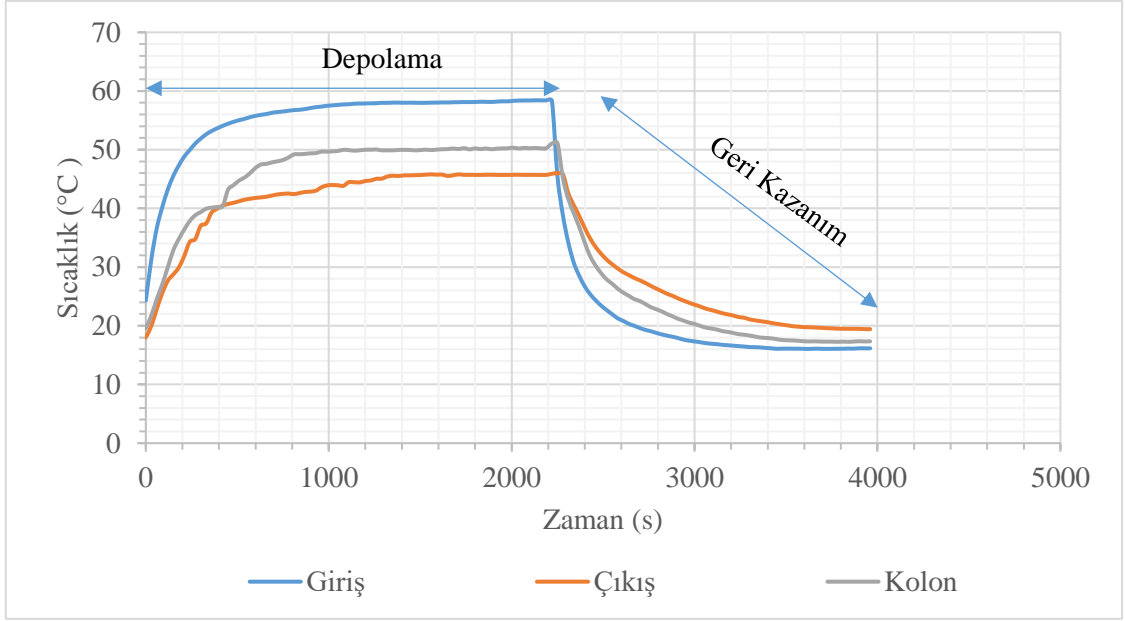
(b)

Şekil 4.21. CaCO₃@parafin42-44 için kolon boyunca sıcaklık dağılımı (a) 55°C giriş sıcaklığında (b) 65°C giriş sıcaklığında

Isı depolama deneylerinin arkasından 15°C'deki hava giriş sıcaklığında ısı geri kazanım testleri yapılmıştır. Şekil 4.22. (a) ve (b), 55°C ve 65°C depolama sıcaklıkları için tüm ısı depolama ve geri kazanım döngüsünde kolon boyunca sıcaklık dağılımını göstermektedir. 55°C ve 65°C giriş depolama sıcaklıkları için depolama deneyleri sonunda maksimum kolon sıcaklığı 41,1°C ve 51,2°C'ye ulaşmıştır. Geri kazanıma 35 dakika devam edilmiş ve çıkış hava sıcaklığı, 55°C depolama sıcaklığı için 15,8°C'ye ve 65°C için 19,4°C'ye ulaşmıştır.



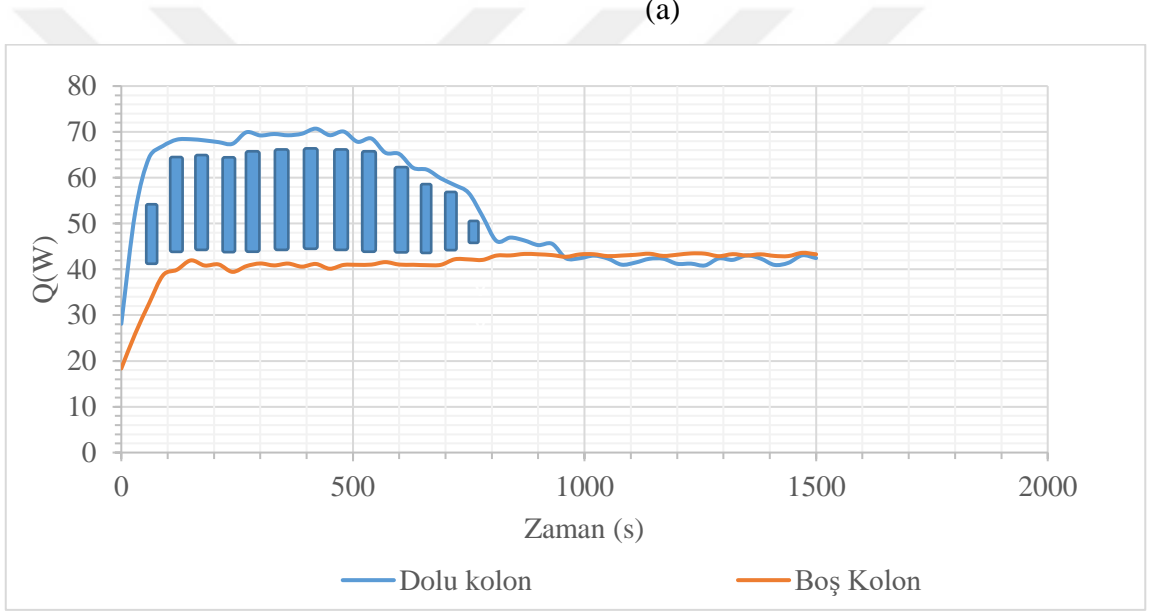
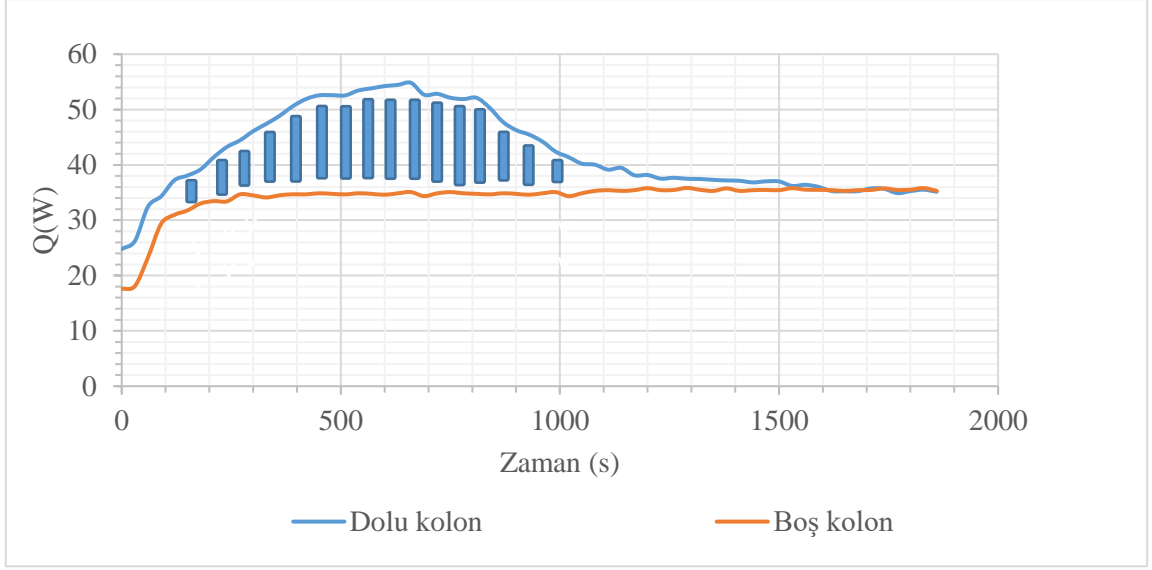
(a)



(b)

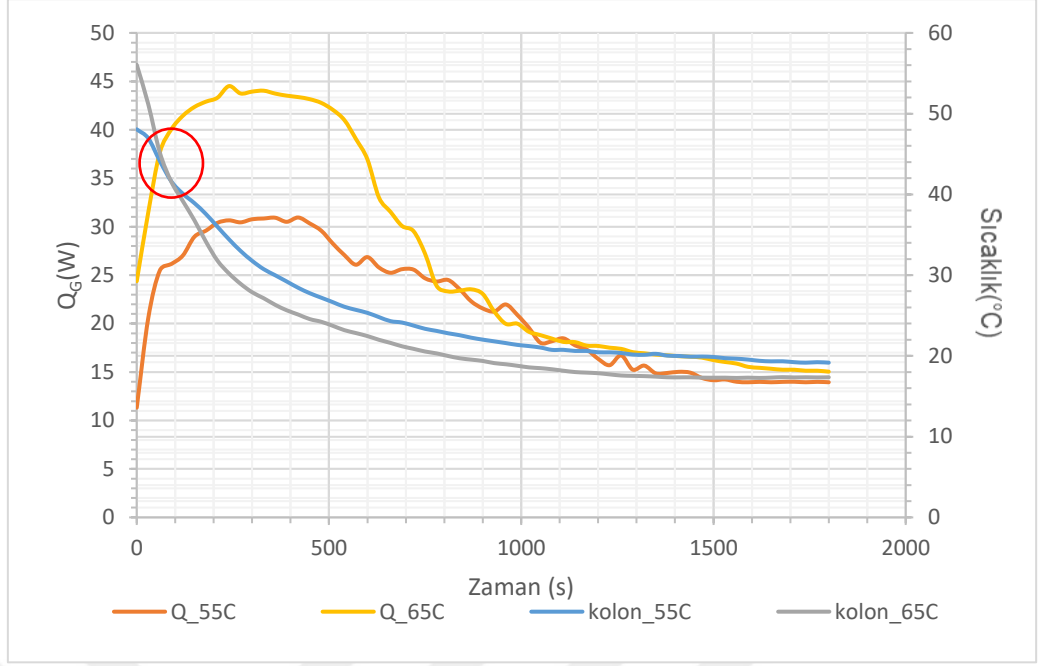
Şekil 4.22. CaCO_3 @parafin42-44 için (a) 55°C (b) 65°C depolama giriş sıcaklıklarında ısı depolama ve geri kazanım döngüsü için sıcaklık dağılımı

Akışkan yatakta depolanan ve geri kazanılan ısı $Q(\text{kW})$, denklem 4.1. kullanılarak hesaplanmıştır. Hem boş kolon hem de akışkanlaştırılmış mikrokapsüllü FDM'li kolon için hesaplanan Q sırasıyla 55°C ve 65°C ısı depolama deneyleri için Şekil 4.23. (a) – (b)'da gösterilmiştir. Şekil 4.23. a-b'daki işaretli alan, MATLAB trapezoid numerik integrasyon yöntemiyle 55°C depolama sıcaklığında 14,9 kJ ve 65°C'de 19,6 kJ olarak hesaplanmıştır.



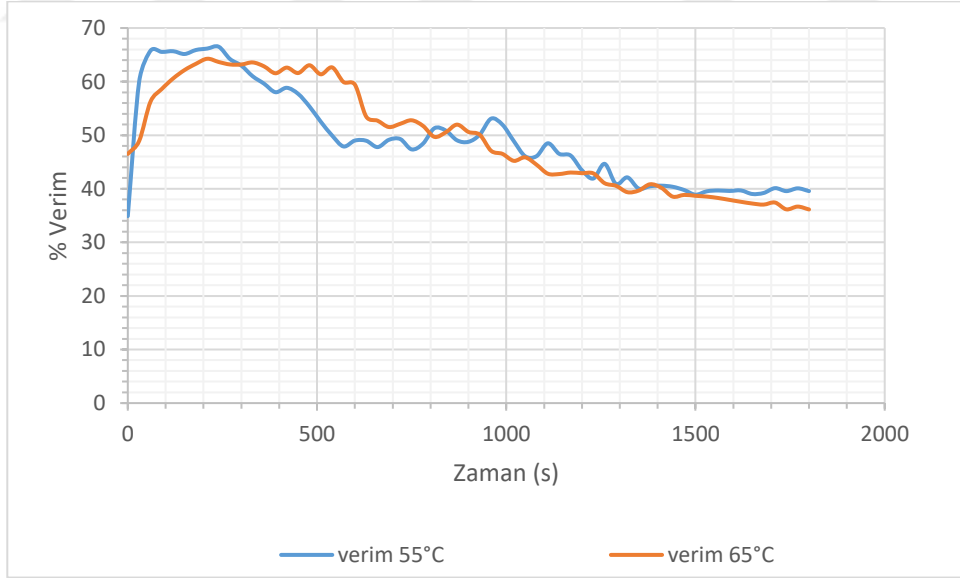
Şekil 4.23. CaCO_3 @parafin42-44 için (a) 55°C (b) 65°C derece giriş sıcaklıklarında depolanan enerji

Şekil 4.24' de zamanla geri kazanılan enerji (Q_G) gösterilmektedir. Q_G , denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Geri kazanım deneylerinde hava akışkan yatağa girmeden önce 15°C'de sabit tutulmuştur. Yaklaşık olarak 4 dakikada geri kazanım eğrilerinde hızlı bir artış gözlemlenmektedir. Kırmızı daire içine alınan bölge CaCO_3 @parafin42-44' ün faz değişim noktasını göstermektedir.



Şekil 4.24. CaCO₃@parafin42-44 için zamanla geri kazanılan enerji

Şekil 4.20 'de CaCO₃@parafin42-44 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimini göstermektedir. Verim hesabı yapılırken denklem (3.2) kullanılmıştır. CaCO₃@parafin42-44 için 55°C ve 65°C 'lerde bulunan verimler sırasıyla %66,5 ve %64,2 'dir.



Şekil 4.25. CaCO₃@parafin42-44 için; 55°C ve 65°C depolama sıcaklıklarında verimliliğin zamanla değişimi

Üç mikrokapsüllemiş FDM'nin TED performanslarının karşılaştırılması

Akışkan yatak TED deneylerinde üç mikrokapsüllemiş FDM için elde edilen depolanan enerji miktarları Çizelge 4.1'de karşılaştırılmıştır. FDM miktarının artırılmasıyla beklendiği gibi depolanan enerjinin arttığı Çizelge 4.1'deki Mikronal sonuçlarında görülmektedir. Sonuçlara

bakıldığında tüm mikrokapsüller için depolamanın da geri kazanmanın da bir saatin altında, 30 – 40 dak arasında gerçekleştiği görülmektedir.

150 g Mikronal sonuçlarıyla diğer iki mikrokapsül sonuçları karşılaştırıldığında 55°C’de en yüksek depolanan enerjinin, mikrokapsül miktarı en düşük olmasına rağmen MgCO₃@parafin42-44 ile gerçekleştiği, 65°C’de ise Mikronal ile en yüksek depolama sağlandığı görülmektedir. En düşük depolama ise her iki sıcaklıkta da CaCO₃@parafin42-44 için elde edilmiştir.

Üç mikrokapsülde de çekirdek malzemesi FDM olarak kullanılan parafin, kabuk malzemesi olarak da Mikronal’de petrol türevi bir polimer, diğerlerinde ise MgCO₃ ve CaCO₃ kullanılmıştır. MgCO₃ ile CaCO₃’ün doğada bolca bulunması, ulaşılabilirliğinin kolay olması enerji depolama uygulamaları için bu malzemeleri daha sürdürülebilir ve önemli bir alternatif yapmaktadır. Bu durum dikkate alındığında, MgCO₃@parafin42-44 ve CaCO₃@parafin42-44 mikrokapsülleri akışkan yatakta TED uygulamaları için hem sürdürülebilir hem de yerli kaynaklarla üretilebilir olmaları nedeniyle Mikronal’e göre daha uygun olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmanın bir diğer önemi ise ilk defa MgCO₃ kabuk malzemeli bir mikrokapsülün sentezlenmiş olması ve akışkan yatakta enerji depolama uygulamasında denenmiş olmasıdır. Sonuçlar akışkan yatak uygulamalarında çok kısa sürede enerji depolama geri kazanma işlemi için MgCO₃@parafin42-44 mikrokapsülünün uygun olduğunu göstermektedir.

1800. dakikadaki verim hesapları karşılaştırıldığında mikronalin 55°C’deki verimlerinin daha yüksek olduğu bulunmuştur. Isı kayıplarının verimliliği olumsuz yönde etkilediği 65°C’deki sıcaklıklardaki sonuçlarda görmekteyiz. MgCO₃@parafin42-44’ün 65°C’deki verimi 55°C’deki verime kıyasla daha yüksek bulunmuştur. CaCO₃@parafin42-44’te ise 55°C ve 65°C sıcaklık deneylerinde birbirine yakın verim değerleri bulunmuştur.

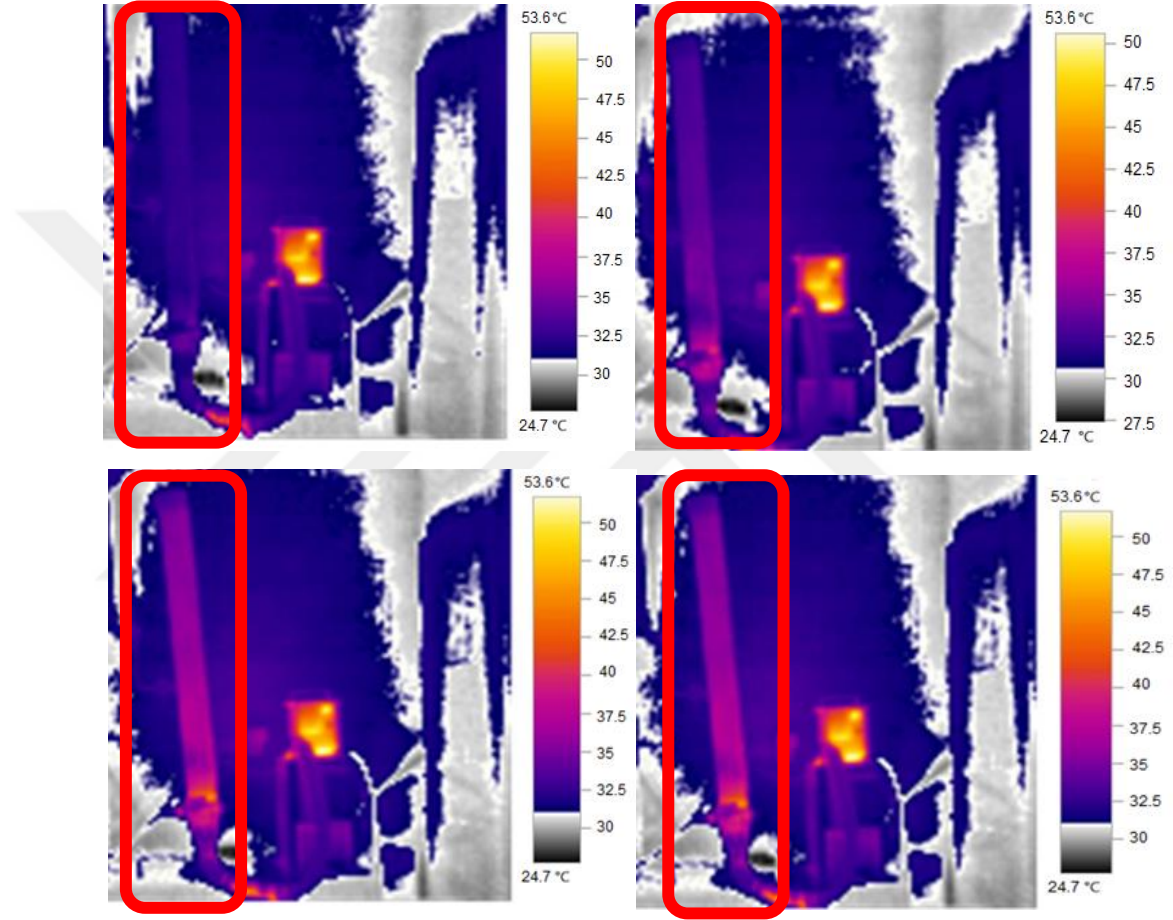
Çok kısa sürelerde ve %81’e ulaşan verimlerle enerji depolamanın gerçekleşmesi, bulunduğumuz coğrafya itibari ile bol miktarda ve yoğunlukta güneşli gün sayısına sahip olmamız, mikrokapsüllemiş FDM akışkan yatakta kullanıldığı TED sisteminin bina güneş enerjisi ısıtma uygulamaları için umut verici bir alternatif olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1. Üç mikrokapsüllemiş FDM’nin akışkan yatakta TED performanslarının karşılaştırılması

FDM	Miktar (g)	Süre (dak)		Qdepolanan (kJ)		Verim %	
		Depolama	Geri Kazanma	55°C	65°C	55°C	65°C
Mikronal	150	30	28	20,3	40,9	68,1	47,6
	225	40	32	68,1	44,6	81	36
	300	30	29	83,2	51,9	72	51
MgCO ₃ @parafin	97	40	35	25,5	32,7	64	72,4
CaCO ₃ @parafin	137	40	35	14,9	19,6	66,5	64,2

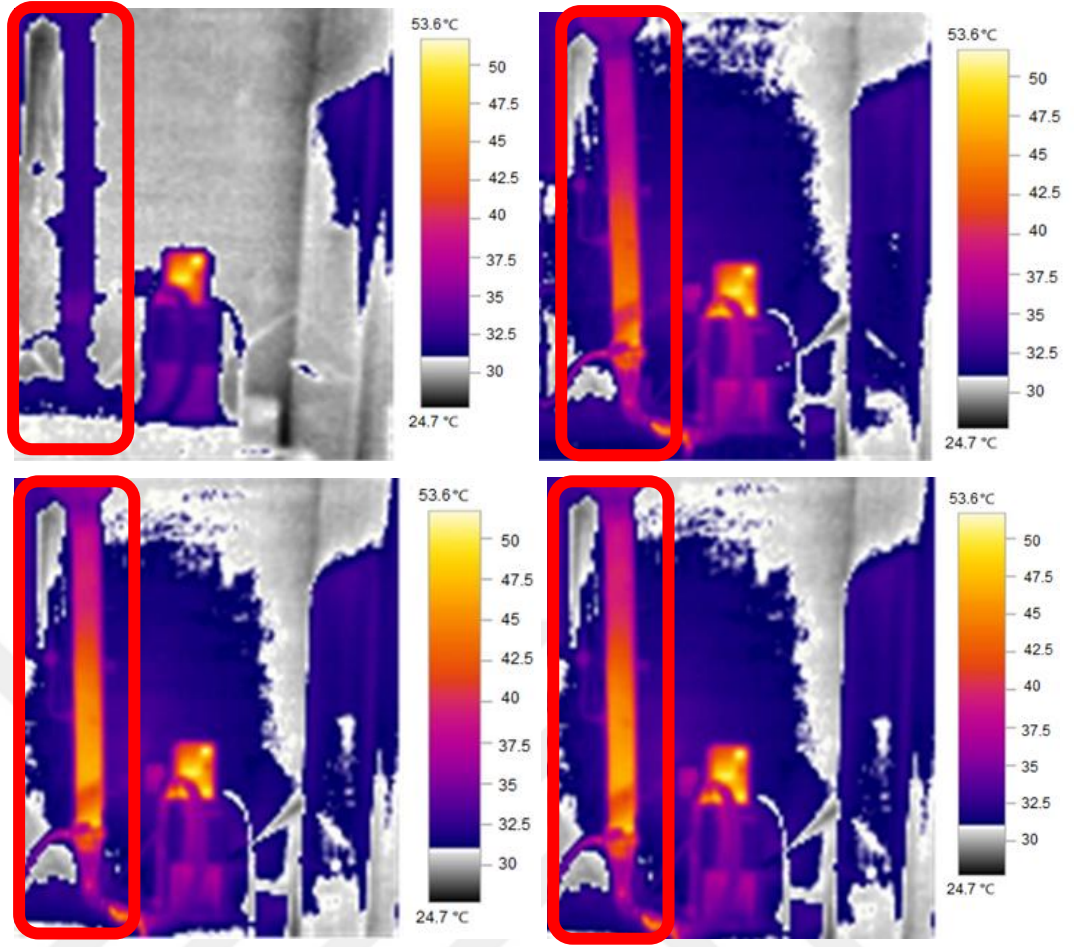
4.1.2. Termal Kamera Analizi

Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin akışkan yatak reaktör deneyleri termal kamera görüntüleri ile de izlenmiştir. Hava giriş sıcaklığı 55°C olan deney boyunca 10'ar dakika arayla görüntüler alınmıştır. Önce kolonun boş olarak çalıştırıldığı görüntüler (Şekil 4.26) alınmıştır. Su banyosundan ısınarak gelen hava kolonun alt bölümünden içeriye girerek kolon boyunca homojen sıcaklık dağılımını sağlamıştır. Şekil 4.26'da kırmızı kutu içerisine alınan kolon termal kamera görüntüleri zamana karşı sıcaklık değişimini göstermektedir.

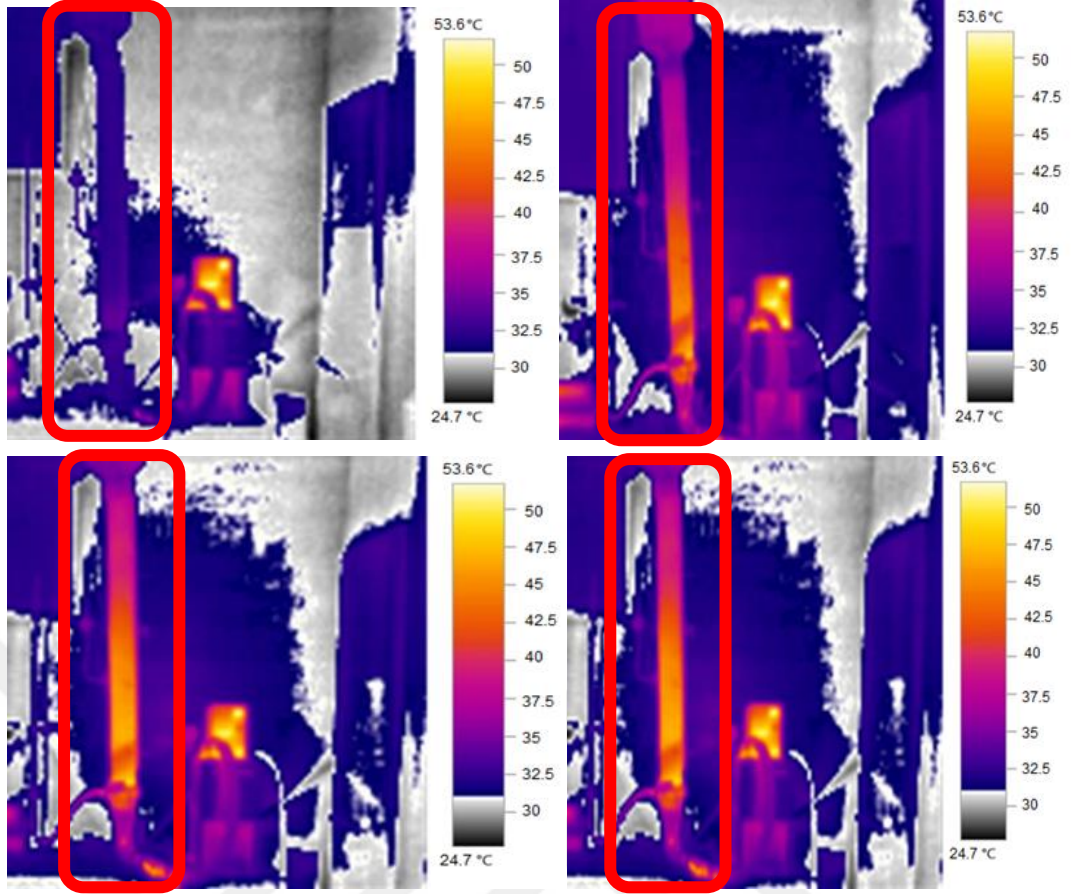


Şekil 4.26. Boş kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika)

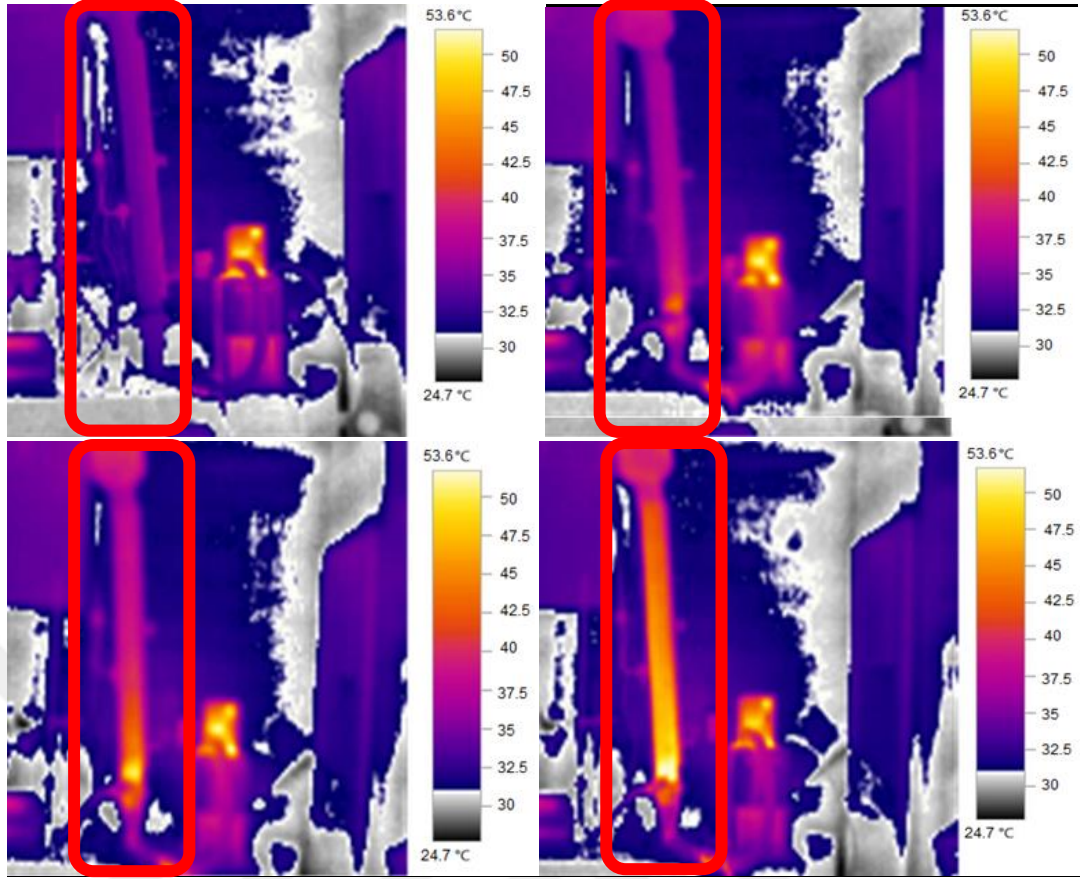
Daha sonra kolon içerisine mikrokapsüllenmiş FDM'ler sırayla yerleştirilerek deneyler sırasında 10'ar dakika aralıklarla termal kamera görüntüleri kaydedilmiştir. Şekil 4.27 - 4.29'da de kırmızı kutu içerisine alınan kolonun zaman içerisindeki sıcaklık değişimlerinin termal kamera görüntüleri gösterilmiştir. 10. dakikada kolonda daha homojen bir sıcaklık dağılımı varken 40. dakikaya gelindiğinde mikrokapsüllenmiş FDM' nin bulunduğu kısımlar renk farkından da anlaşılacağı üzere boş kısımlara göre ısıyı depolandığı için daha sıcaktır. Termal kamera görüntüleri üç mikrokapsülün de deney sonunda ısı depolamayı gerçekleştirdiğini ve homejen bir sıcaklık dağılımı sağlandığını göstermektedir.



Şekil 4.27. Mikronal ile dolu kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika)



Şekil 4.28. MgCO₃@parafin42-44 ile dolu kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika)



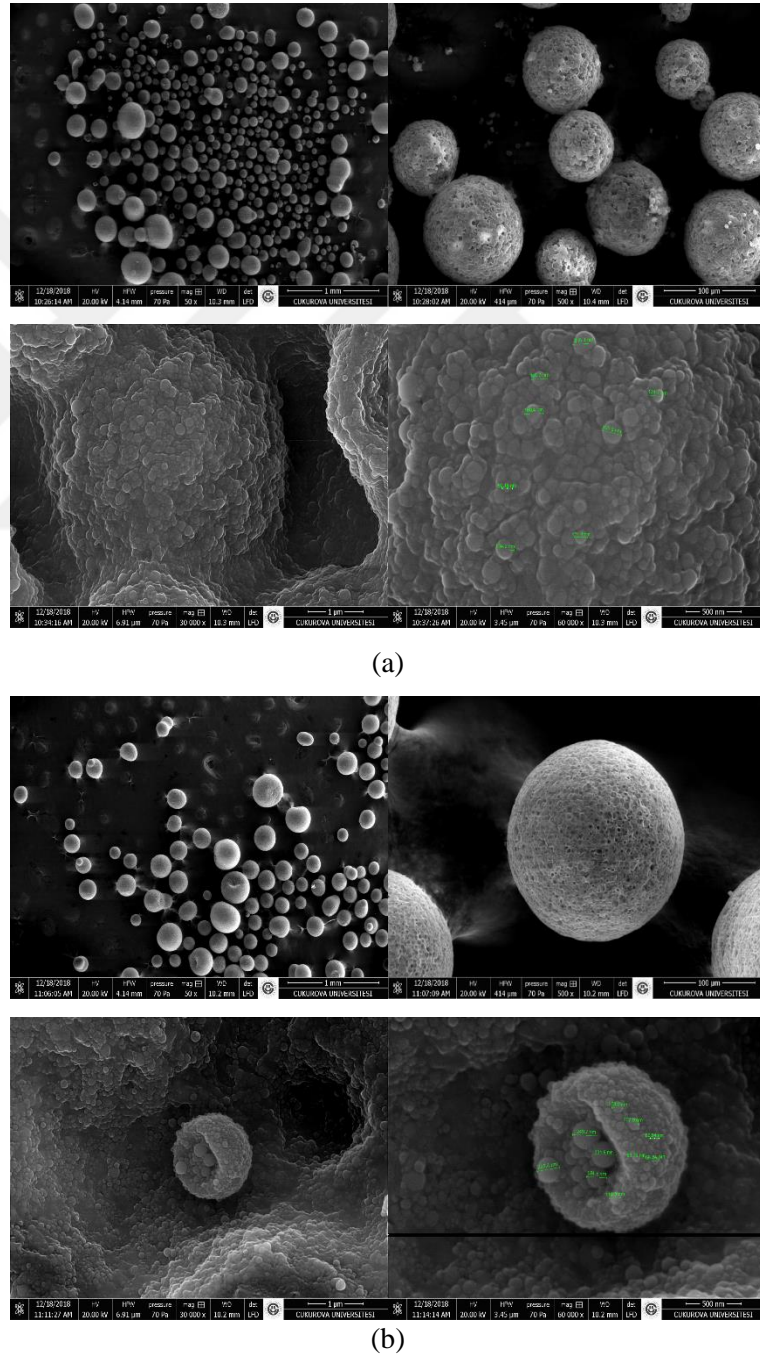
Şekil 4.29. CaCO₃@parafin42-44 ile dolu kolon sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüleri (10.,20.,30. ve 40.dakika)

4.2. Mikrokapsüllerin Karakterizasyonu

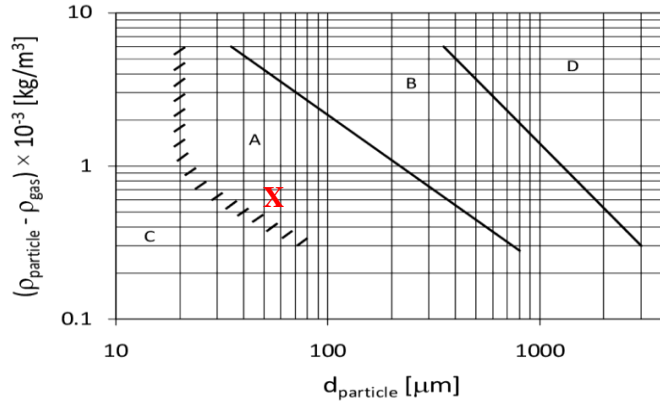
4.2.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Mikronal mikrokapsüllerinin tanecik boyutlarını ve yapılarını görmek için SEM analizi yapılmıştır. Şekil 4.30 (a) 'de 50X, 500X, 30000X ve 60000X oranlarında büyütme alınarak SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri Mikronal'ın küçük mikrokapsüllerin topaklanmasıyla oluşan aglomeratlar şeklinde iki kez kapsüllendiğini göstermektedir. Aglomeratların çapı 50 ila 100 µm arasında değişir ve daha küçük mikrokapsüllerin çapı ise 90 ila 200 nm arasındadır. Tanecik boyutu mikrokapsüllerin akışkanlaşma davranışını değerlendirmek için önemlidir. Mikrokapsüllerin SEM görüntüleri akışkan yatak deneylerinden sonra tekrar alınarak aglomeratların daha küçük taneciklere yol açacak şekilde bozulup bozulmadığını belirlemek için alınmıştır. Şekil 4.30 (b) 'de gösterilen dört büyütme oranındaki SEM görüntüleri, aynı topaklanma özelliklerinin korunduğunu ortaya çıkarmıştır. Aglomeratların çapı yaklaşık 100 µm ve aglomeratlar içinde hapsedilen daha küçük mikrokapsüllerin çaplarının 80-200 nm aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, mikrokapsüllenmiş FDM'nin aglomere formda akışkanlaştığını ve akışkan fazda ortalama tanecik boyutunun 100 µm olarak kabul edilebileceğini göstermiştir. Geldart diyagramında (Şekil 4.31.) tanecikler akışkanlaşma davranışlarına göre A'dan D'ye dört tipte sınıflandırılır. Diyagramın sol alt tarafında yaklaşık 50 µm'nin altında boyutlara sahip C tipi tanecikler kohezif davranış gösterirler ve

akışkanlaştırılması zordur. Sağ üst taraftaki daha büyük boyutlu D-tipi parçacıkların sıvılaşma davranışı belirsizdir ve parçacıkların boyutuna ve akışkan yatağın konfigürasyonuna bağlı olarak değişir. A ve B tipi parçacıkların akışkanlaştırılması daha kolaydır. Bu çalışmada kullanılan Mikronal mikrokapsüllerin Şekil 4.31'deki Geldart şemasındaki konumu, A tipi parçacık bölgesine karşılık gelen kırmızı çarpı ile gösterilmiştir. Akışkanlaştırma işlemi sırasında makul bir pompalama maliyeti için A, B ve C partiküllerinin minimum akışkanlaşma hızı her zaman 1 m/s'nin altında olması beklenir (Almendros-Ibáñez et al. 2019). Bu çalışmada kullanılan minimum akışkanlaştırma hızı olan 0,49 m/s ile bu kritere uymaktadır.



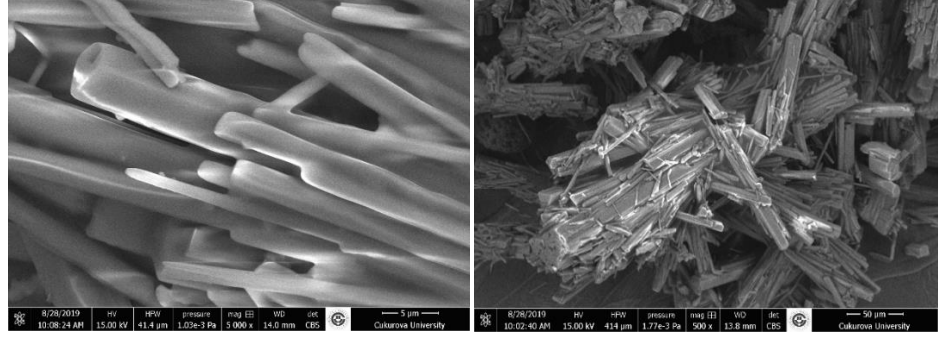
Şekil 4.30. Mikronalin SEM görüntüsü (a) Akışkanlaştırmadan önce (b) Akışkanlaştırmadan sonra



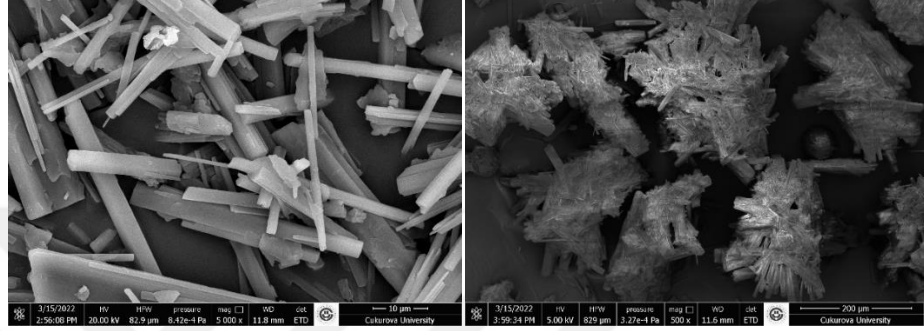
Şekil 4.31. Akışkan yataklarda parçacık sınıflandırması için Geldart diyagramı (Geldart, 1973)

Sentezlenen $\text{MgCO}_3@$ parafin42-44 ve $\text{CaCO}_3@$ parafin42-44 mikrokapsüllerin tanecik boyutunu belirlemek için SEM görüntüleri alınmıştır. $\text{MgCO}_3@$ parafin42-44 SEM sonuçları, taneciklerin kompakt yüzeyde olduğu ve yaklaşık $100 \mu\text{m}$ çaplarında çubuksu şekillerle homojen olarak dağıldığını göstermektedir (Şekil 4.32.). Akışkan yatak deney sonrasında da aynı yapının korunduğu görülmektedir. $\text{CaCO}_3@$ parafin42-44'ün SEM sonuçları, taneciklerin kompakt yüzey ve yaklaşık $5 \mu\text{m}$ çapında küresel şekillerle homojen olarak dağıldığını göstermektedir (Şekil 4.33.) Bu yapı akışkan yatak deney sonrasında da korunmuştur. Yu ve ark. (2014) CaCO_3 mikrokapsüllerinin SEM analizlerinde elde edilen yüzey morfolojisinin pürüzlü yapısı burada da görülmüştür.

$\text{MgCO}_3@$ parafin42-44 ve $\text{CaCO}_3@$ parafin42-44 mikrokapsülleri Geldart grafiğindeki konumu C tipi partikül bölgesine karşılık gelmektedir. Tanecikler arasında güçlü etkileşimlerin olmaması durumunda, akışkanlaştırma kalitesinin genellikle azalan tanecik boyutuyla birlikte iyileşeceğini vurgulayan Zhou ve ark. daha küçük parçacık boyutuna sahip C Grubu parçacıkların mükemmel bir akışkanlaştırma kalitesi göstermesinin beklendiğini belirtmiştir. Ayrıca, C Grubu taneciklerin nispeten geniş yüzey alanı, akışkan yatak reaktöründe gaz-katı temas verimliliğini daha da artırabilecek geniş gaz-katı arayüz temas alanı sağlayabilir (Zhou ve Zhu, 2021). Bu çalışmada akışkanlaştırma düzeneğinde kullanılan $\text{MgCO}_3@$ parafin42-44 ve $\text{CaCO}_3@$ parafin42-44 mikrokapsüllerinin tanecik boyutları kullanılan $0,49 \text{ m/s}$ 'lik minimum akışkanlaşma hızıyla uyumludur.

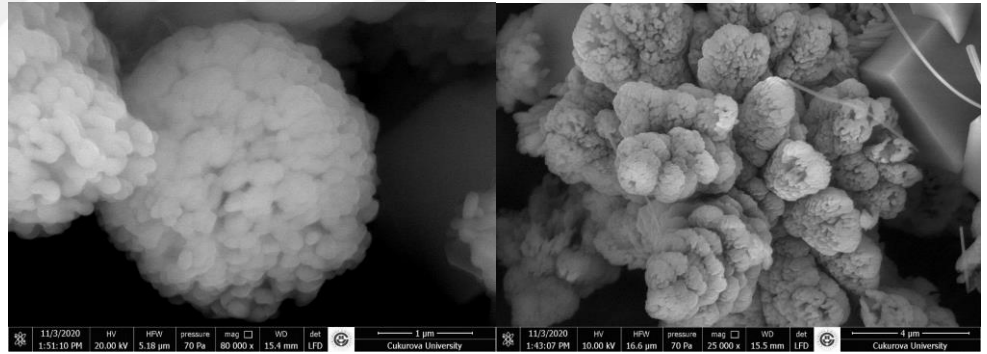


(a)

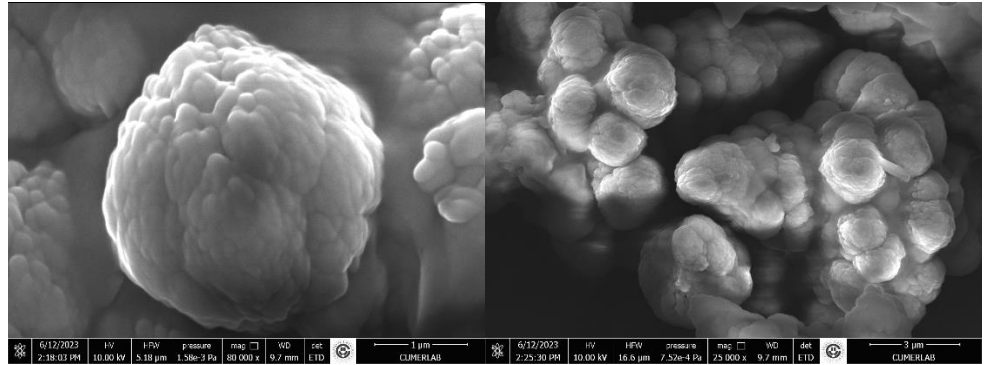


(b)

Şekil 4.32. Mikrokapsüllenmiş MgCO₃@parafin42-44 FDM'nin SEM görüntüsü (a) Akışkanlaştırmadan önce (b) Akışkanlaştırmadan sonra



(a)



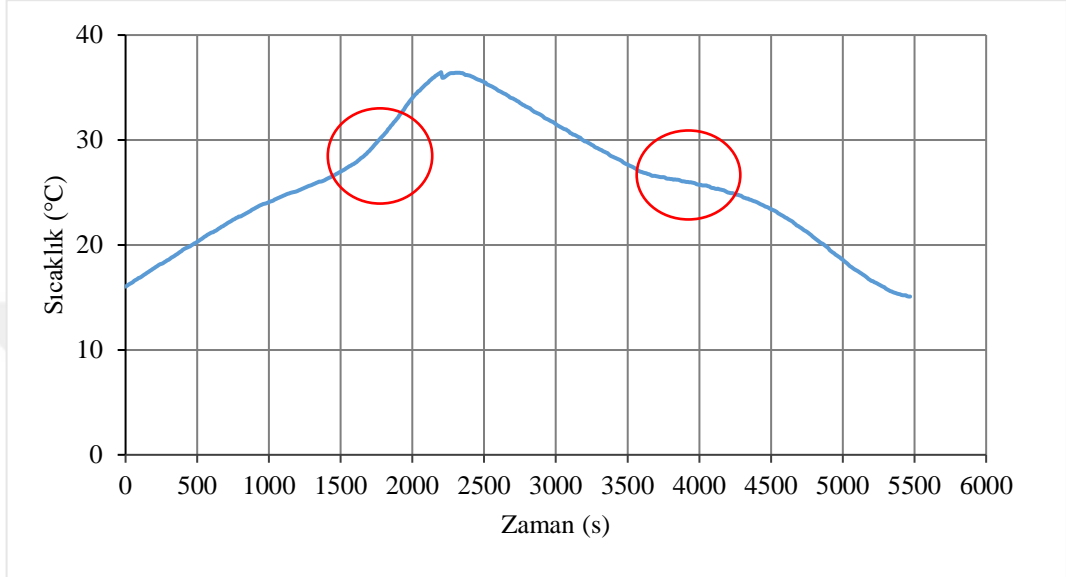
(b)

Şekil 4.33. Mikrokapsüllenmiş CaCO₃@parafin42-44 FDM'nin SEM görüntüsü (a) Akışkanlaştırmadan önce (b) Akışkanlaştırmadan sonra

4.2.2. Isınma Soğuma Deneyleri

Mikronal Isınma Soğuma Eğrisi

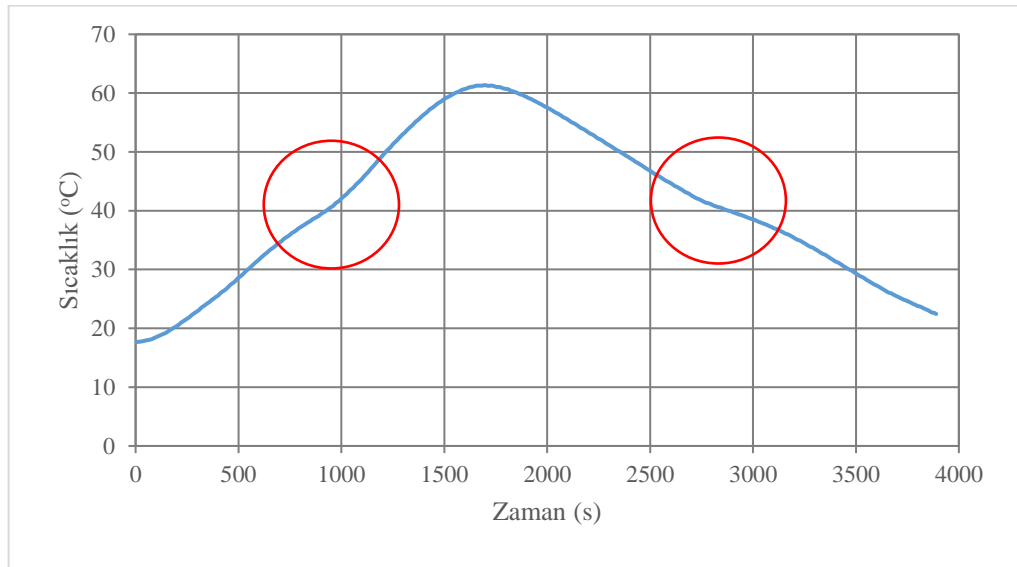
Mikronal'ın faz değişim davranışı, Şekil 4.34.'te verilen ısınma ve soğuma eğrisi kullanılarak tespit edilmiştir. Şekil 4.34.'te daire içine alınmış bölgeler, herhangi bir aşırı soğuma olmaksızın 26,3°C ve 26,5°C'de erime ve donmanın simetrik olarak meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.34. Mikronal'ın ısınma ve soğuma eğrisi.

MgCO₃@parafin4244 Isınma Soğuma Eğrisi

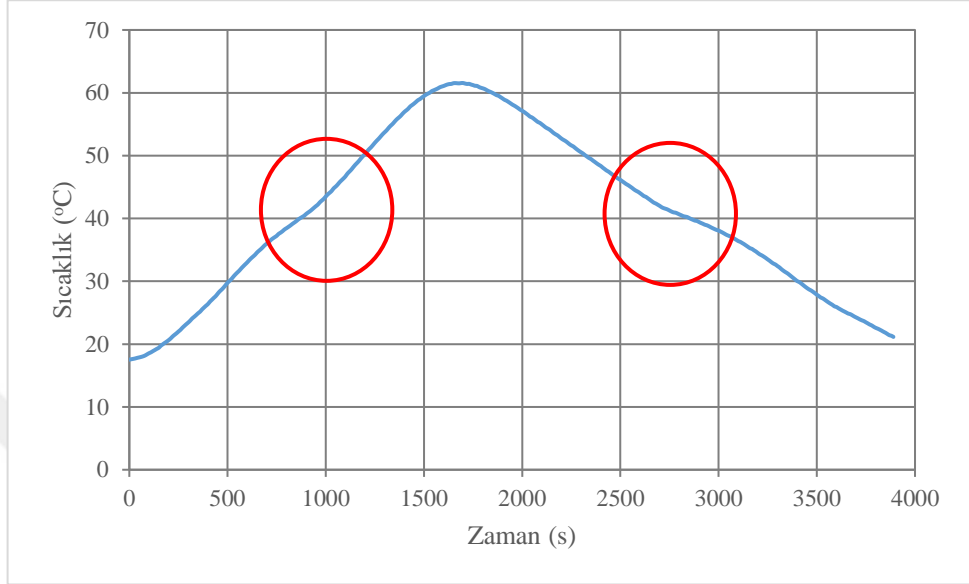
MgCO₃@parafin4244 'nin faz değişim davranışı, Şekil 4.35'da verilen ısınma ve soğuma eğrisi kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.35'deki daire içine alınmış bölgeler, erime ve donmanın 38,5°C -41,5°C'de herhangi bir aşırı soğuma olmadan meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 4.35. MgCO₃@parafin4244 'ün ısınma ve soğuma eğrisi.

CaCO₃@parafin4244 Isınma Soğuma Eğrisi

CaCO₃@parafin4244 'nin faz değişim davranışı, Şekil 4.36'de verilen ısınma ve soğuma eğrisi kullanılarak tespit edilebilir. Şekil 4.36'deki daire içine alınmış bölgeler, erime ve donmanın 39,8°C – 41,2°C'de herhangi bir aşırı soğuma olmadan meydana geldiğini göstermektedir.

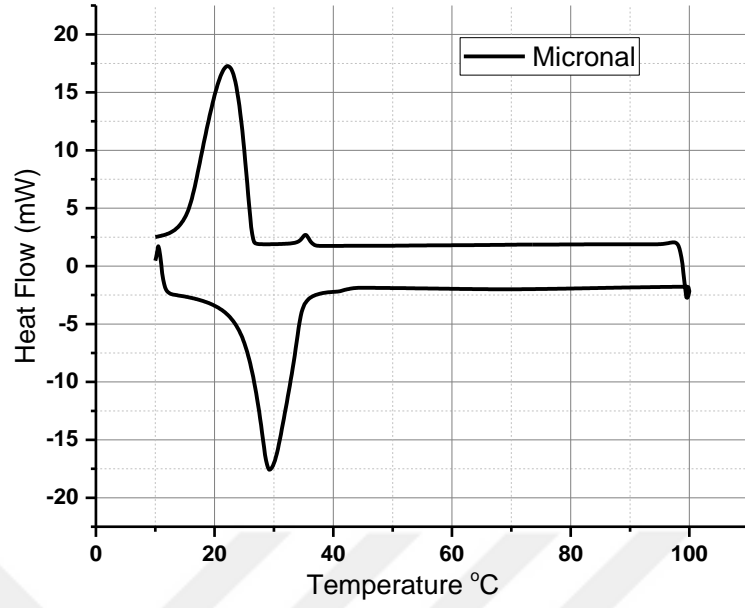


Şekil 4.36 CaCO₃@parafin4244 'ün ısınma ve soğuma eğrisi.

4.2.3. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi (DSC)

Mikronal DSC Analizi

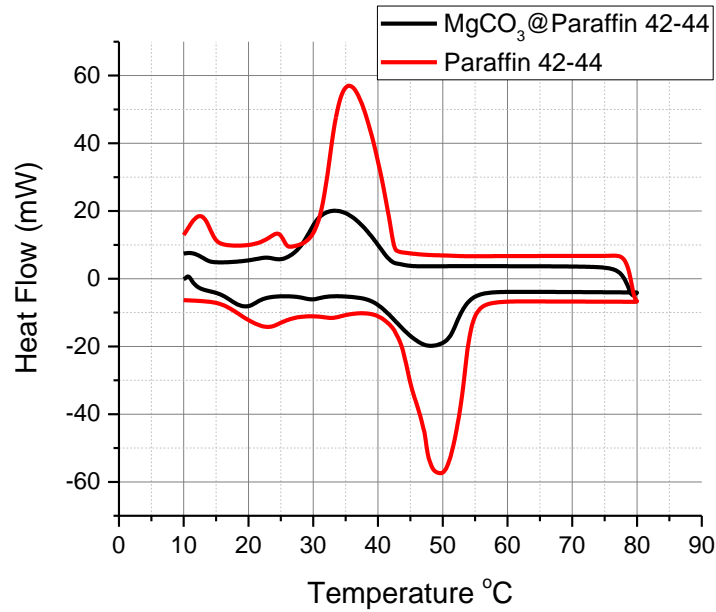
Mikronal için DSC analizinden elde edilen sonuç Şekil 4.37'de gösterilmiştir. DSC eğrilerinin başlangıç sıcaklığından erime (Te) ve donma noktaları (Td) 26,5°C ve 24,6°C olarak belirlenmiştir. Eğrilerin altındaki alanlar sırasıyla erime ve donma sırasında entalpi değişikliği gösteren 108 J/g ve 103 J/g' dır. Önceki çalışmalarda da Mikronal için benzer sonuçlar elde edilmiştir (Siddiqui ve ark. 2017).



Şekil 4.37. Mikrokapsülenmiş FDM'nin DSC analizi

MgCO₃@parafin42-44 DSC Analizi

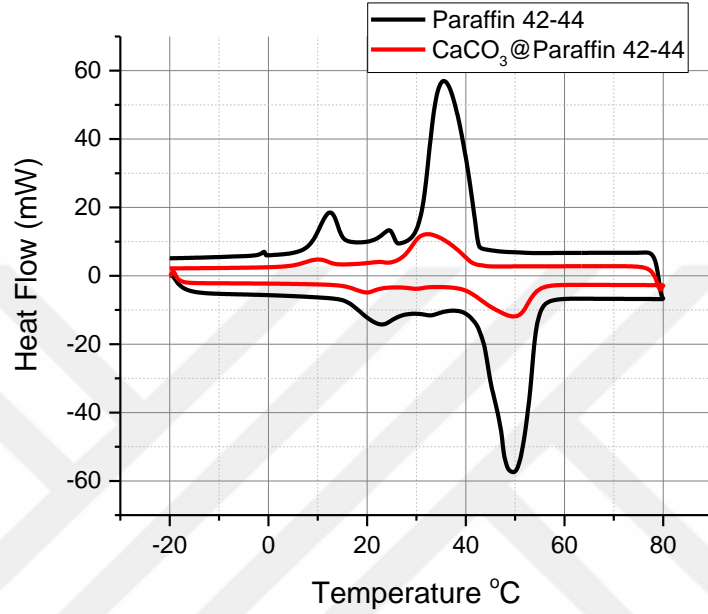
MgCO₃@parafin42-44 için DSC analizinin sonucu Şekil 4.38'da gösterilmiştir. DSC eğrilerinin başlangıç sıcaklığından erime (Te) ve donma noktaları (Td) 42,4°C-38,7°C olarak belirlenmiştir. Eğrinin altındaki alan erime ve donma sırasında entalpi değişikliğini gösteren 73,6 J/g ve 74,6 J/g'dır.



Şekil 4.38. Mikrokapsülenmiş MgCO₃@parafin42-44 FDM'nin DSC analizi

CaCO₃@parafin42-44 DSC Analizi

CaCO₃@parafin42-44 için DSC analizinin sonucu Şekil 4.39.'da gösterilmiştir. DSC eğrilerinin başlangıç sıcaklığından erime (Te) ve donma noktaları (Td) 39,2°C – 41,8°C olarak belirlenmiştir. Eğrinin altındaki alan erime ve donma sırasında entalpi değişikliğini gösteren 52,6 J/g ve 51,5 J/g'dır. Önceki çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir (Yu ve ark., 2014).



Şekil 4.39. Mikrokapsüllenmiş CaCO₃@parafin42-44 FDM'nin DSC analizi

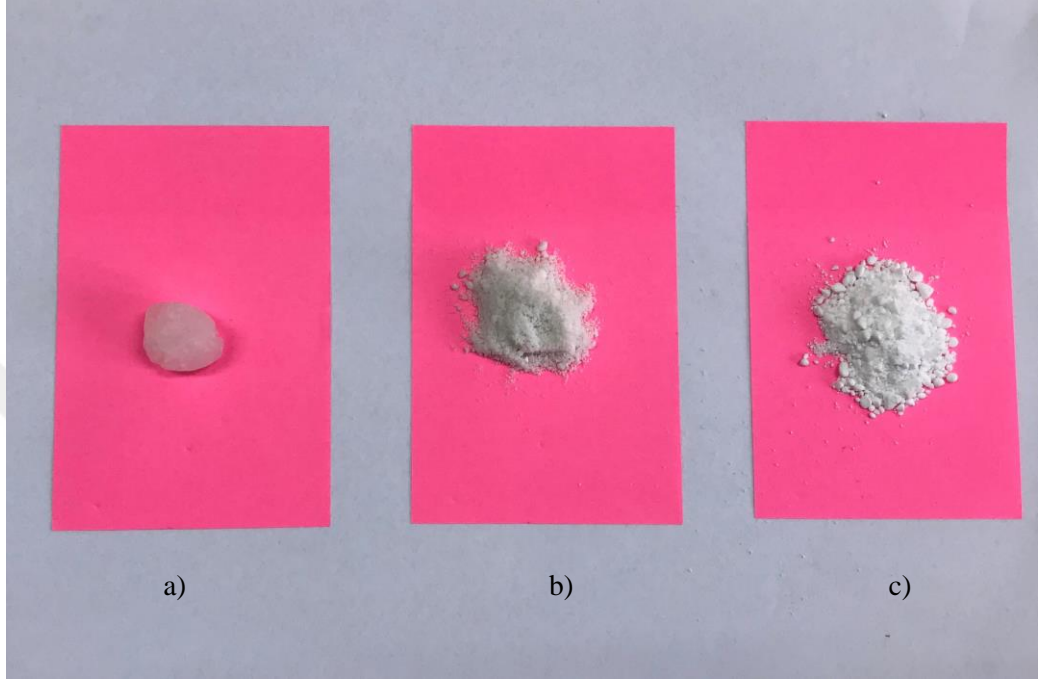
Çizelge 4.2. Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin DSC analiz sonuçları

Materyal	Erime		Donma	
	T _e (°C)	ΔH _e (J/g)	T _d (°C)	ΔH _d (J/g)
Mikronal	26,5	108,0	24,6	103,0
Parafin 42-44	48,1	156,9	36,9	154,4
MgCO ₃ @parafin 42-44	38,7	74,6	42,4	73,6
CaCO ₃ @parafin 42-44	39,2	52,6	41,8	51,5

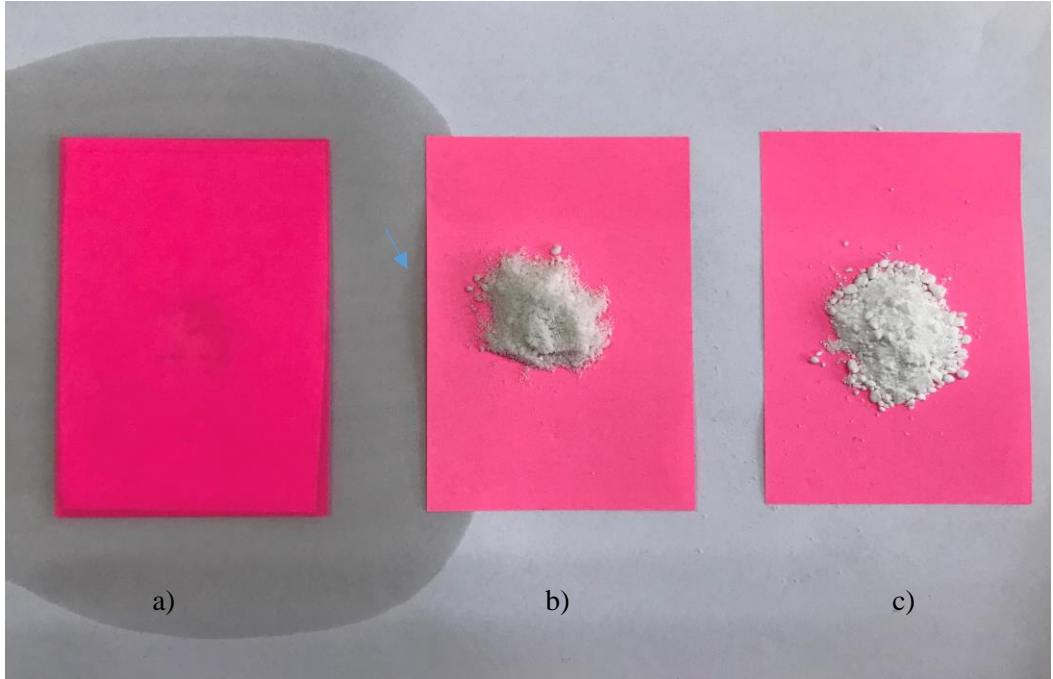
4.2.4. Sızdırmazlık Testi

Saf haldeki parafin42-44 ve sentezlenen mikrokapsüllerin sızdırmazlık test öncesi/sonrası sonuçları şekil 4.40. ve şekil 4.41.'de verilmiştir. Teste başlamadan önce mikrokapsüllerin görüntüsü alınmıştır. Etüv mikrokapsüllerin erime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ayarlanır ve 1 saat boyunca mikrokapsüller etüv içerisinde bekletilir. Daha sonra çıkartılarak görüntüler tekrar alınır. Süzgeç kağıdı üzerindeki görüntülerden malzemelerin sızdırma yapıp yapmadığına bakılır. Şekil 4.41.'de mikrokapsüllenmemiş saf parafinin eriyerek kağıt üzerine yayıldığı görülmüştür. MgCO₃@parafin42-44 mikrokapsülünün noktasal olarak şekil 4.41'de, kağıt üzerinde okla

gösterilen kısımda lekeler bıraktığı görülmüştür. Bu lekelerin mikrokapsül sentezi sonrasında, yıkama işleminin iyi yapılmadığı için olduğu düşünülmektedir. CaCO_3 @parafin42-44 mikrokapsülü ise test sonunda şeklini koruyarak herhangi bir sızıntı olmadan iyi bir şekilde kapsüllendiği görülmüştür.



Şekil 4.40. Sızdırmazlık testi öncesi a) Parafin42-44, b) MgCO_3 @parafin42-44, c) CaCO_3 @parafin42-44 mikrokapsüllerinin görüntüsü



Şekil 4.41. Sızdırmazlık testi sonrası a) Parafin42-44, b) MgCO_3 @parafin42-44, c) CaCO_3 @parafin42-44 mikrokapsüllerinin görüntüsü

4.2.5. Termal İletkenlik Analizi

Termal iletkenlik, akışkan yatakta ısı transferi için önemli bir özelliktir. Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin termal iletkenlikleri Hot Disk Thermal Constants Analyzer ile ölçülmüştür. Toz halde bulunan mikrokapsüller pelet formuna getirilerek ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler üç tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiş olup ortalama değerler alınmıştır. Mikronalin termal iletkenliği 0,13 W/mK olarak bulunmuştur.

MgCO₃ ile kapsüllenen parafinin termal iletkenliğinin 2,2 kat arttığı 0,46 W/mK değerine ulaştığını görülmektedir. Akışkan fazındaki parçacıkların daha yüksek ısı iletkenliği homojen sıcaklık dağılımına katkı sağlar. CaCO₃@parafin42-44 mikrokapsülünde parafinin termal iletkenliğinin CaCO₃ ile kapsüllenecek 2,5 kat arttığı ve 0,52 W/mK değerine ulaştığı ölçülmüştür.

Çizelge 4.3. Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin termal iletkenlik sonuçları

Materyal	Termal İletkenlik (W/mK)	Standart Sapma
Mikronal	0,13	0,1
Parafin 42-44	0,21	0,1
MgCO ₃	5,00	0,4
CaCO ₃	2,61	0,3
MgCO ₃ @parafin 42-44	0,46	0,2
CaCO ₃ @parafin 42-44	0,52	0,1

4.3. Enerji Tasarrufu ve Çevresel Kazanımların Analizi

Akışkan yatakta TED sisteminin binaların güneş enerjisiyle ısıtılması uyarlamasının beklenen ekonomik ve çevresel kazanımlarının belirlenmesinde ılıman ve karasal iklim için 50m²'lik bir konut için hesaplamalar yapılmıştır. İlıman iklim için yıllık ısıtma yükü 30 kWh/m² alınmıştır (Belmonte vd., 2016). Referans konut ısıtma sisteminde yakıt olarak kömür ve doğal gaz kullanıldığında harcanan enerji ve atılan CO₂ salınımları hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Referans sistemde ısı değeri 4731 kcal/kg (5,5022 kWh/kg) olan yerli linyit kömürü kullanıldığı kabul edilmiştir. Kömürün fiyatı 8 TL/kg 'dır (Soma Kırskdere, Manisa - ELİ). Isınma için kullanılan yanma işleminin verimi kömür için %65 olarak alınmıştır. Referans sistemde kullanılan diğer yakıt olarak doğalgazın konut aboneleri için bedeli 6,220120 TL/m³ dür (Temmuz 2023, İZGAZ). Doğalgazın %93 yanma verimiyle kullanıldığı dikkate alınarak, ısı değeri 8250 kcal/m³ (9.5948 kWh/m³) olarak alınmıştır. Kömür ve doğal gaz için CO₂ salınım faktörleri sırasıyla 4,23 ve 2,35 ton CO₂/ton eşdeğer petrol (1 ton eşdeğer petrol (tep) = 4186,8 kWh) olarak alındığında 50m²'lik ısıtma yükü 30 kWh/m²-yıl olan konutun ısıtılması için yıllık harcanan enerji bedeli ve CO₂ salınımları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. 50 m²'lik ısıtma yükü 30 kWh/m²-yıl olan konutun referans sistemle ısıtılması için yıllık harcanan enerji bedeli ve CO₂ salınımları

Yakıt	Isıtma enerji (kWh/yıl)	Gereken Yakıt	Yakıt Bedeli (TL/yıl)	Salınan CO ₂ (kg/yıl)
Kömür	1500	419 kg/yıl	3352	2329
Doğal gaz	1500	168 m ³ /yıl	1045	905

Akışkan yatakta TED sistemiyle 300 g Mikronal için Çizelge 4.1'de verilen depolanan enerji ve verimler kullanılarak 50 m²'lik ısıtma yükü 30 kWh/m²-yıl olan konutun ısıtılması için bir yılda kazanılan enerji, tasarrufun bedeli ve CO₂ salınımindaki azaltımlar hesaplanarak Çizelge 4.4'de verilmiştir. Aynı sistemin büyük ölçekli olarak kullanılması durumunda elde edilebilecek tasarruf hesaplaması birim FDM kütlesi başına elde edilecek enerjinin sabit olduğu kabul edilerek 1 ve 10 kg Mikronal için de hesaplanarak Çizelge 4.5'te verilmiştir. 300 g Mikronal miktarının 10 kg çıkartılmasıyla %66'ya varan enerji tasarrufu ile ısıtma için güneş enerjisinden yararlanarak konut başına yılda yaklaşık 1000 kWh daha az fosil yakıt tüketilebilmektedir. Türkiye genelinde bulunan yaklaşık 38,4 milyon konutun %10'unda bu sistemin kullanılması durumunda yılda 3,8 GWh varan enerji tasarrufu karşılığı fosil yakıt tasarrufu ve CO₂ azaltılması sağlanabilecektir.

Çizelge 4.5. Akışkan yatakta TED sistemiyle 50 m²'lik konutun ısıtılması için Mikronal ile elde edilebilecek enerji tasarrufu çevresel kazanım hesaplamaları

FDM	Miktar (kg)	Q _{depolanan} (kJ/gün)	Verim %	Q _{kazanılan} (kWh/yıl)	Enerji Tasarruf (%)	Tasarruf (TL/yıl)		CO ₂ (kg/yıl)	
						Kömür	DGaz	Kömür	DGaz
Mikronal	0,300	83,2	72	30,0	2	43,6	19,4	30,3	1,68
Mikronal	1	277,3	72	99,8	6,6	145,2	64,7	100,9	5,60
Mikronal	10	2773,3	72	998,4	66,6	1451,6	647,2	1008,7	56,0

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, termal enerji depolama için ticari bir mikrokapsüllenmiş FDM (Mikronal) ve sentezlenen ($MgCO_3@parafin42-44$ ve $CaCO_3@parafin42-44$) iki farklı mikrokapsüllenmiş FDM'nin hava kaynaklı akışkan yatakta TED performansları incelenmiştir. Bu çalışmanın ana sonuçları şunlardır:

- Kendiliğinden montajlama yöntemiyle $MgCO_3@parafin42-44$ ve $CaCO_3@parafin42-44$ mikrokapsülleri başarılı bir şekilde sentezlenerek termal iletkenlikleri yaklaşık olarak 2,5 kat artırılmıştır.
- Termal iletkenlik avantajına ek olarak, inorganik kabuk malzemesinin kullanılması, çevreye zararlı fosil yakıt bazlı polimer malzemelerin tüketilmesini önler, daha az maliyetlidir ve kapsülleme reaksiyonu süresini kısaltır.
- $MgCO_3@parafin42-44$, literatürde $MgCO_3$ kabuk malzemesi olarak kullanılan ilk mikrokapsül olmuştur.
- Geldart şemasına göre A tipi parçacıklı mikronal, C tipi parçacıklı $MgCO_3@parafin42-44$ ve $CaCO_3@parafin42-44$ mikrokapsülleri akışkan yatakta termal enerji depolaması için uygundur.
- Akışkan yatak kullanılarak FDM'lerde ısının çok kısa sürede depolanması ve geri kazanılması mümkün olmuştur.
- Kullanılan mikrokapsüllerin şekillerini koruduğu ve akışkanlaştırma sırasında kırılmanın olmadığı SEM analizlerinde yorumlanmıştır.
- Depolanan ve geri kazanılan enerji grafiklerinin altında kalan alanlar MATLAB'ın Trapezoid yöntemiyle hesaplanarak bulunmuştur.
- Mikrokapsüllenmiş FDM'lerle aynı faz değişim sıcaklığında ısı geri kazanımı yapılabilir.
- Sonuçlar, mikrokapsüllenmiş FDM'lere sahip akışkan yatağın, verimli ve hızlı ısı depolama/geri kazanım sağlayan binalarda güneş enerjisiyle ısıtmada kullanılabileceğini göstermektedir.
- Enerji tasarrufu ve çevresel kazanımlar açısından bakıldığında 300 g Mikronal miktarının 10 kg' a çıkartılmasıyla %66'ya varan enerji tasarrufu ile ısıtma için güneş enerjisinden yararlanarak konut başına yılda yaklaşık 1000 kWh daha az fosil yakıt tüketilebileceği görülmüştür. Türkiye genelinde bulunan yaklaşık 38,4 milyon konutun %10'unda bu sistemin kullanılması durumunda yılda 3,8 GWh varan enerji tasarrufu karşılığı fosil yakıt tasarrufu ve CO_2 azaltımı sağlanabilecektir.



KAYNAKLAR

- Alazwari, M. A., Algarni, M., & Safaei, M. R. (2022). Effects of various types of nanomaterials on PCM melting process in a thermal energy storage system for solar cooling application using CFD and MCMC methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 195, 123204.
- Almendros-Ibáñez, J. A., Fernández-Torrijos, M., Díaz-Heras, M., Belmonte, J. F., & Sobrino, C. (2019). A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds. *Solar Energy*, 192, 193-237.
- Beemkumar, N., Karthikeyan, A., Reddy, K. S. K., Rajesh, K., & Anderson, A. (2017, May). Thermal analysis of fluidized bed and fixed bed latent heat thermal storage system. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 197, No. 1, p. 012033). IOP Publishing.
- Belmonte, J. F., Izquierdo-Barrientos, M. A., Molina, A. E., & Almendros-Ibáñez, J. A. (2016). Air-based solar systems for building heating with PCM fluidized bed energy storage. *Energy and Buildings*, 130, 150-165.
- Bizhaem, H. K., & Tabrizi, H. B. (2017). Investigating effect of pulsed flow on hydrodynamics of gas-solid fluidized bed using two-fluid model simulation and experiment. *Powder technology*, 311, 328-340.
- Borreguero, A. M., Valverde, J. L., Rodríguez, J. F., Barber, A. H., Cubillo, J. J., & Carmona, M. (2011). Synthesis and characterization of microcapsules containing Rubitherm® RT27 obtained by spray drying. *Chemical Engineering Journal*, 166(1), 384-390.
- Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar energy*, 30(4), 313-332.
- Cabeza, L.F., (2012). *Energy Storage*, GREA Innovació Concurrent, Universitat de Lleida, Lleida, Spain.
- Chen, Z., & Fang, G. (2011). Preparation and heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurry: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4624-4632.
- Chen, X., Zhang, Z., Qi, C., Ling, X., & Peng, H. (2018). State of the art on the high-temperature thermochemical energy storage systems. *Energy conversion and management*, 177, 792-815.
- Chinnasamy, V., Heo, J., Lee, H., Jeon, Y., & Cho, H. (2023). Fabrication and thermophysical characterization of microencapsulated stearyl alcohol as thermal energy storage material. *Alexandria Engineering Journal*, 71, 645-658.
- Dixit, P., Parvate, S., Reddy, V. J., Singh, J., Maiti, T. K., Dasari, A., & Chattopadhyay, S. (2022). Effect of surfactants on encapsulation of hexadecane phase change material in calcium carbonate shell for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 55, 105491.

- Doladoa, P., Lazaro, A., Delgado, M., Peñalosa, C., Mazo, J., Marin, J. M., & Zalba, B. (2012). Thermal energy storage by PCM-air heat exchangers: temperature maintenance in a room. *Energy Procedia*, 30, 225-234.
- Dolado, P., Lazaro, A., Delgado, M., Peñalosa, C., Mazo, J., Marin, J. M., & Zalba, B. (2015). An approach to the integrated design of PCM-air heat exchangers based on numerical simulation: a solar cooling case study. *Resources*, 4(4), 796-818.
- Erzin, F., & Konuklu, Y. (2021). Facile synthesis of resorcinol-melamine-formaldehyde microcapsules containing hexadecane for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 44, 103285.
- Fernández, A., Martínez, M., Segarra, M., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2010). Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage. *Solar energy materials and solar cells*, 94(10), 1723-1729.
- Hathal, M. M., Al-Jadir, T., Al-Sheikh, F., Edan, M. S., Haider, M. J., Rsool, R. A., ... & Badawy, T. (2023). Thermal performance characterization of a thermal energy storage tank with various phase change materials. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100322.
- He, B., Martin, V., & Setterwall, F. (2004). Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials. *Energy*, 29(11), 1785-1804.
- Huang, X., Li, F., Li, Y., Gao, X., Yang, X., & Sundén, B. (2023). Investigation and optimization on melting performance of a triplex-tube heat storage tank by rotational mechanism. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 205, 123892.
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2021). *Thermal energy storage: systems and applications*. John Wiley & Sons.
- Izquierdo-Barrientos, M. A., Sobrino, C., & Almendros-Ibáñez, J. A. (2013). Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM. *Chemical Engineering Journal*, 230, 573-583.
- Izquierdo-Barrientos, M. A., Sobrino, C., & Almendros-Ibáñez, J. A. (2015). Energy storage with PCM in fluidized beds: Modeling and experiments. *Chemical Engineering Journal*, 264, 497-505.
- Izquierdo-Barrientos, M. A., Sobrino, C., Almendros-Ibáñez, J. A., Barreneche, C., Ellis, N., & Cabeza, L. F. (2016). Characterization of granular phase change materials for thermal energy storage applications in fluidized beds. *Applied Energy*, 181, 310-321.
- Ji, W., Cheng, X., Chen, S., Wang, X., & Li, Y. (2021). Self-assembly fabrication of GO/TiO₂@paraffin microcapsules for enhancement of thermal energy storage. *Powder Technology*, 385, 546-556.
- Jiang, K., Liu, H., & Li, K. (2023). Amine-based thermal energy storage system towards industrial application. *Energy Conversion and Management*, 283, 116954.

- Keshavarz, M., Assari, M. R., & Tabrizi, H. B. (2022). Numerical and experimental studies of microcapsules phase change material in a pulsating fluidized bed as an energy storage medium. *Journal of Building Engineering*, 58, 104956.
- König, R. (2023). The use of scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray analysis (EDXA) as a measurement tool for EMPs tasks, guidelines. *Environmental Research*, 230, 114790.
- Li, F., Huang, X., Li, Y., Lu, L., Meng, X., Yang, X., & Sundén, B. (2023). Application and analysis of flip mechanism in the melting process of a triplex-tube latent heat energy storage unit. *Energy Reports*, 9, 3989-4004.
- Lu, W., Yu, A., Dong, H., He, Z., Liang, Y., Liu, W., ... & Song, S. (2023). High-performance palmityl palmitate phase change microcapsules for thermal energy storage and thermal regulation. *Energy*, 274, 127336.
- Methaapanon, R., Kornbongkotmas, S., Ataboonwongse, C., & Sootittantawat, A. (2020). Microencapsulation of n-octadecane and methyl palmitate phase change materials in silica by spray drying process. *Powder Technology*, 361, 910-916.
- Naresh, R., Parameshwaran, R., & Ram, V. V. (2022). Microcapsules of n-dodecanoic acid/melamine-formaldehyde with enhanced thermal energy storage capability for solar applications. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 7(3), 100462.
- Nazir, H., Batool, M., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., ... & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491-523.
- Nomura, T., & Akiyama, T. (2017). High-temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat. *International Journal of Energy Research*, 41(2), 240-251.
- Olabi, A. G., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & Al-Alami, A. H. (2021). Critical review of energy storage systems. *Energy*, 214, 118987.
- Saleem, M. S., Abas, N., Kalair, A. R., Rauf, S., Haider, A., Tahir, M. S., & Sagir, M. (2020). Design and optimization of hybrid solar-hydrogen generation system using TRNSYS. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(32), 15814-15830.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Shi, J., Wu, X., Sun, R., Ban, B., Li, J., & Chen, J. (2019). Synthesis and performance evaluation of paraffin microcapsules with calcium carbonate shell modulated by different anionic surfactants for thermal energy storage. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 571, 36-43.

- Sun, X., Liu, L., Mo, Y., Li, J., & Li, C. (2020). Enhanced thermal energy storage of a paraffin-based phase change material (PCM) using nano carbons. *Applied Thermal Engineering*, 181, 115992.
- Stritih, U., Charvat, P., Klimes, L., Osterman, E., Ostry, M., & Butala, V. (2018). PCM thermal energy storage in solar heating of ventilation air—Experimental and numerical investigations. *Sustainable cities and society*, 37, 104-115.
- Wang, T., Wang, S., Luo, R., Zhu, C., Akiyama, T., & Zhang, Z. (2016). Microencapsulation of phase change materials with binary cores and calcium carbonate shell for thermal energy storage. *Applied Energy*, 171, 113-119.
- Wang, S., Lei, K., Wang, Z., Wang, H., & Zou, D. (2022). Metal-based phase change material (PCM) microcapsules/nanocapsules: Fabrication, thermophysical characterization and application. *Chemical Engineering Journal*, 438, 135559.
- Xu, B., & Ghossein, R. A. (2018). The contribution of molecular pathology to the classification of thyroid tumors. *Diagnostic Histopathology*, 24(3), 87-94.
- Yang, Y., Pang, Y., Liu, Y., & Guo, H. (2018). Preparation and thermal properties of polyethylene glycol/expanded graphite as novel form-stable phase change material for indoor energy saving. *Materials Letters*, 216, 220-223.
- Yu, S., Wang, X., & Wu, D. (2014). 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*, 114, 632-643.
- Yuan, S., Yan, R., Ren, B., Du, Z., Cheng, X., Du, X., & Wang, H. (2021). Robust, double-layered phase-changing microcapsules with superior solar-thermal conversion capability and extremely high energy storage density for efficient solar energy storage. *Renewable Energy*, 180, 725-733.
- Zhou, Y., & Zhu, J. (2021). A review on fluidization of Geldart Group C powders through nanoparticle modulation. *Powder Technology*, 381, 698-720.

ÖZGEÇMİŞ

Gizem BİÇER GÖKTEPE, İlkokul, ortaokulu ve liseyi Adana' da okudu. Lisans eğitimini 2012 yılında Fırat Üniversitesi Kimya Mühendisliği Fakültesin de tamamladı. 2017 yılında Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimini bitirdi. Doktora eğitimini 2023 yılında Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünde bitirdi.

