



**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER İLE ISI
DEPOLAMA UYGULAMASININ KESİKLİ
REAKTÖRLERDE İNCELENMESİ**

Nur Efşan KAYA

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2026

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER İLE ISI DEPOLAMA UYGULAMASININ
KESİKLİ REAKTÖRLERDE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Nur Efşan KAYA

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

ERZURUM, 2026

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER İLE ISI DEPOLAMA
UYGULAMASININ KESİKLİ REAKTÖRLERDE İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ danışmanlığında Nur Efşan KAYA tarafından hazırlanan bu çalışma 6.01.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

Erzurum Teknik Üniversitesi

İmza

Üye: Doç. Dr. Emre MANDEV

Erzurum Teknik Üniversitesi

İmza

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Erdoğan GÜNER

Atatürk Üniversitesi

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. İlker KAZAZ
Enstitü Müdürü

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etik ilkelere uygun davrandığımı ve tezin hazırlanması sürecinde üretken yapay zekâ programlarından destek alınmadığımı beyan ederim.

6.01.2026

İmzası

Nur Efşan KAYA

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bilgi, deneyim ve yönlendirmeleriyle bana her zaman destek olan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin akademik katkıları, yapıcı değerlendirmeleri ve yönlendirmeleri çalışmanın gelişimine önemli ölçüde katkı sağlamıştır

Deneyisel çalışmaların gerçekleştirilmesi sırasında laboratuvarında bana yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Emre MANDEV'e ayrıca teşekkür ederim. Sağladığı teknik destek, iş birliği çalışmanın sağlıklı bir şekilde ilerlemesine değerli katkılar sunmuştur.

Tez çalışmama değerli katkıları ve destekleri için Doç.Dr.Faraz AVŞAR'a ve Dr.Öğr.Üyesi Hüseyin KÖKSAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca bana koşulsuz destek ve motivasyon sağlayan, her koşulda yanımda olan aileme en derin teşekkürlerimi sunarım.

Nur Efşan KAYA

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER İLE ISI DEPOLAMA UYGULAMASININ KESİKLİ REAKTÖRLERDE İNCELENMESİ

Nur Efşan KAYA

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

Kesikli reaktörler, basitlikleri, işletme ve bakım kolaylıkları nedeniyle kimya, ilaç ve gıda endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, özellikle kesintili koşullarda çalışan sistemlerde enerji yönetiminin verimli şekilde sağlanması önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Faz değıştiren malzemeler (FDM'ler), atık ısının depolanıp yeniden kullanılmasına imkân tanıyarak enerji verimliliğini artırma potansiyeli sunsa da ısı depolamanın reaktör içine entegre edilmesi reaktör hacmini ve tasarımını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu çalışma, kesikli proseslerde enerji tüketim maliyetini azaltmak amacıyla reaktör dışında konumlandırılan bir FDM ısı bataryasının tasarımını ve deneysel testini sunarak yenilikçi bir yaklaşım ortaya koymaktadır. Pik yük kaydırmaya odaklanan FDM ısı bataryası, düşük tarifeli dönemlerde termal enerji depolayarak işletme maliyetlerini azaltmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, FDM ısı bataryası ile enerji işletme maliyetlerinin önemli ölçüde düşürülebileceğini göstermektedir. Özellikle üç zamanlı bir tarife altında FDM bataryasının kullanılması, gece depolanan enerjinin verimli şekilde değerlendirilmesini sağlayarak 08:00'da üretime başlayan tesisler için parti başına enerji maliyetini yaklaşık %8 oranında, 1.72 TL (0.041 \$)'den 1.59 TL (0.037 \$)'ye düşürmektedir. Ayrıca bulgular, sistemin güneş enerjisi gibi uygulamalara entegre edilebileceğini ve pik yük kaydırmanın sağladığı avantajları ortaya koyarak kesikli proseslerde enerji yönetimi için sürdürülebilir ve maliyet etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kesikli reaktörler, Faz değıştiren malzemeler (FDM'ler), Isı depolama, Pik yük kaydırma

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

ANALYSIS OF HEAT STORAGE with PHASE CHANGE MATERIALS ON BATCH REACTORS

Nur Efşan KAYA

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ

Batch reactors are widely utilized in the chemical, pharmaceutical, and food industries due to their simplicity, ease of operation, and maintenance. However, efficient energy management remains a key challenge, especially for systems operating under intermittent conditions. While phase change materials (PCMs) offer potential for improving energy efficiency by storing and reusing waste heat, integrating heat storage within reactors can compromise their volume and design. This study introduces a novel approach by designing and experimentally testing a PCM heat battery positioned outside the reactor to reduce energy consumption cost in batch processes. By focusing on peak load shifting, the PCM heat battery stores thermal energy during off-peak periods, reducing operational costs. The results indicate that energy operating costs can be significantly reduced with a PCM heat battery. Specifically, utilizing the PCM battery under a three-time tariff allows for the efficient use of energy stored at night, reducing the energy cost per batch process by approximately 8%, from 1.72 TL (\$0.041) to 1.59 TL (\$0.037) for facilities starting operations at 08:00. Furthermore, the findings suggest potential applications in systems like solar energy and highlight the benefits of peak load shifting, offering a sustainable and cost-effective solution for energy management in batch processing.

Keywords: Batch reactors, Phase change materials, Heat storage, Peak load shifting

İÇİNDEKİLER

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Termal Enerji Depolama Sistemleri	1
1.1.1. Duyulur enerji depolama (DED).....	2
1.1.2. Gizli enerji depolama (GED).....	2
1.1.3. Termokimyasal enerji depolama (TKED)	2
1.2. Faz Değiştiren Malzemeler	3
1.2.1. Organik faz değişim malzemeleri	3
1.2.2. İnorganik faz değişim malzemeleri.....	4
1.2.3. Ötektik faz değişim malzemeleri	4
1.2.4. Kompozit faz değişim malzemeleri	4
1.3. Tepe Yük Kaydırma (Peak Load Shifting)	5
1.3.1. Endüstride FDM kullanılarak tepe yük kaydırma uygulamaları	5
1.4. Kesikli Reaktörler.....	6
2. KAYNAK ÖZETLERİ	9
2.1. Faz Değiştiren Maddeler ve Tepe yük kaydırma	9
2.2. Kesikli Reaktörler ve Faz Değiştiren Maddeler	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM	13
3.1. Materyal	13
3.2. Yöntem.....	16
3.3. FDM ile Su Isı Depolama Ortamlarının Karşılaştırılması	17
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	20
4.1. Isı Yükleme ve Serbest Soğuma Deneyleri	20
4.2. Durum-1 Deneyleri.....	22

4.3. Durum-2 Deneyleri.....	24
4.4. Enerji Tüketimi ve Maliyet Karşılaştırmaları	27
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	32
KAYNAKÇA.....	35



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Çekimli kesikli reaktörün temel özellikleri.....	14
Tablo 3.2. FDM (RT50) Özellikleri.....	15
Tablo 4.1. Durum-1 ve Durum-2’de ısıtıcının tükettiği elektrik enerjisi	27
Tablo 4.2. Tek zamanlı ve üç zamanlı tarifeler kapsamında ticari kullanım için birim elektrik fiyatları.....	28
Tablo 4.3. Durum-1 ve Durum-2 için ısıtıcıya ait elektrik maliyeti	29



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Deneysel kurulumun genel görünümü	13
Şekil 3.2. Durum-1 için Deneysel Düzenek (F:Debi Ölçer, T_1:Dönüş Suyu Sıcaklığı, T_2:Kesikli Sıcaklığı, T_3:Su Tankı Sıcaklığı)	13
Şekil 3.3. Durum- 2 için deneysel düzenek (F:Debi Ölçer, T_1:dönüş Suyu sıcaklığı, T_2:kesikli sıcaklığı, T_3:su tankı sıcaklığı, T_4:FDM üst sınır sıcaklığı, T_5:FDM alt sınır sıcaklığı)	16
Şekil 3.4. Sıcaklığa bağlı olarak fdm ve su arasındaki ısı depolama karşılaştırması	19
Şekil 4.1. Durum 2 için ısı yükleme ve soğuma periyotlarında sıcaklıklar	20
Şekil 4.2. Isıtma periyodunda ısıtıcının devreye girme aralıkları	21
Şekil 4.3. Durum-1 için ısı yükleme ve kesikli periyotlarında sıcaklık değişimi	22
Şekil 4.4. Durum-1 için ısıtıcı ve pompanın devreye girme aralıkları	24
Şekil 4.5. Durum-2 için ısı yükleme ve kesikli periyotlarında sıcaklık değişimi	25
Şekil 4.6. Durum-2 için ısıtıcı ve pompanın devreye girme aralıkları	26

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

°	Derece
DED	Duyulur enerji depolama
FDM	Faz değıştiren malzeme
GED	Gizli enerji depolama
HESN	Isı değıştirici depolama ağı
HVAC	Isıtma-havalandırma-soğutma
K	Kelvin
m	Kütle
c	Özgöl ısı
dT	Sıcaklık farkı
P	Basınç
PV	Fotovoltaik
TED	Termal enerji depolama
TKED	Termokimyasal enerji depolama

1. GİRİŞ

Dünya enerji tüketimi, ekonomik ilerleme, hızlı sanayileşme ve nüfus artışı nedeniyle sürekli artmaktadır. 2000 yılından 2040 yılına kadar toplam enerji talebinin %80'den fazla artması beklenmektedir. Sanayi sektörü, bu artışın %85'ini oluştururken, binalarda %101'lik bir artış gösterecek, ulaşım sektörü ise %81 oranında artacaktır (Hameed, ve diğerleri, 2022). Bu artış, özellikle binaların ısıtma/soğutma, soğutma ve modern ulaşım sistemlerinin kullanımının artması ile ilişkilidir. Bu durum, enerji talebindeki artışın büyük ölçüde fosil yakıtların tüketimini artırmasına neden olmaktadır. Fosil yakıt tüketiminin artması, sera gazı emisyonlarının ve dolayısıyla küresel ısınmanın artmasına sebep olmaktadır. Karbon dioksit (CO₂), sera gazları içinde en büyük paya sahiptir (Cunha & Eames, 2016). Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilir bir çözüm olarak teşvik edilmektedir.

Yenilenebilir enerjiye yapılan yatırım, özellikle güneş enerjisi sektöründe son on yılda önemli ölçüde artmıştır. 2015 yılında %1,1 olan güneş enerjisinin enerji üretimindeki payının 2040 yılına kadar %11,9'a çıkması öngörülmektedir (Cunha & Eames, 2016). Ancak, güneş enerjisinin düzensiz doğası, enerji arzında sürekliliği sağlama konusunda büyük bir zorluk oluşturmaktadır. Bu sorun, güneş ışınımının en yüksek olduğu zamanlarda bir miktar termal enerjinin depolanması ve düşük ışınım veya gece saatlerinde bu enerjinin kullanılması ile çözülebilir. Güneş enerjisi depolama sistemleri, su/alan ısıtma, soğutma, enerji üretimi, atık ısının kullanımı, endüstriyel ısıtma, kurutma ve pişirme gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Güneş enerjisi sistemleri, düşük sıcaklıklarda (120 °C'nin altında) çalışarak, evsel su ve alan ısıtma uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisi depolama teknolojilerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir ve kesintisiz enerji arzı için büyük önem taşımaktadır.

1.1. Termal Enerji Depolama Sistemleri

Enerji verimliliğini artırmaya yönelik yeni yaklaşımlar, günümüzde büyük önem kazanmıştır. Bu kapsamda, tüm dünya üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan termal enerji depolama (TED) teknolojileri, enerjinin daha verimli ve sürdürülebilir bir biçimde yönetilmesine yönelik önemli bir çözüm sunmaktadır. TED sistemleri, enerjiyi farklı

formlarda depolayarak ve ihtiyaç duyulduğunda geri kazandırarak enerji arzı ile talebi arasındaki dengesizlikleri azaltmaktadır. TED sistemleri genellikle üç ana kategoriye ayrılır: duyulur enerji depolama (DED), gizli enerji depolama (GED) ve termokimyasal enerji depolama (TKED).

1.1.1. Duyulur enerji depolama (DED)

DED sistemlerinde enerji, depolama malzemesinin sıcaklığını değiştirmek suretiyle depolanır. En yaygın kullanılan duyulur enerji depolama malzemeleri arasında su, taş ve yağ bulunur. Bu yöntem, düşük maliyeti ve geniş ölçekte ticari kullanıma uygunluğu nedeniyle iyi gelişmiş bir teknolojidir. Ancak, DED sistemlerinin enerji yoğunluğu düşüktür, bu da büyük hacimli depolama gereksinimlerine yol açar.

1.1.2. Gizli enerji depolama (GED)

GES sistemleri, faz değişim malzemeleri (FDM'ler) kullanarak enerjiyi depolar ve geri kazanır. Bu malzemeler, belirli bir sıcaklıkta katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçerek büyük miktarda enerji depolayabilir. Gizli enerji depolama sistemleri, DED sistemlerine kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve enerji izotermal yani sabit sıcaklıkta depolandığı için daha etkilidir. Ancak, GES sistemleri düşük ısı transfer oranları nedeniyle termal iletkenliği artırmak için geliştirilmeye ihtiyaç duyar.

Termal enerji depolama yöntemleri arasında gizli enerji depolama (GED) sistemleri, faz değişim malzemeleri (FDM'ler) kullanarak enerjiyi depolar ve geri kazanır. FDM'ler, belirli bir sıcaklıkta faz değiştirerek (katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya) büyük miktarda enerji depolayabilen malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde GED sistemleri, enerji depolamada yüksek verimlilik sağlar ve enerji depolama yoğunluğunu artırır. FDM'ler, düşük sıcaklık aralığında neredeyse izotermal koşullarda enerji depolayabildiği için ısıtma ve soğutma uygulamaları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

1.1.3. Termokimyasal enerji depolama (TKED)

TKED sistemleri, tersinir kimyasal reaksiyonlar yoluyla enerjiyi depolar. Bu teknoloji, diğer TED sistemlerine göre en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve uzun süreli enerji depolaması için önemli bir potansiyele sahiptir. Ancak, TKED teknolojisi henüz erken geliştirme aşamasındadır ve ticari kullanıma hazır hale gelmesi için daha fazla araştırma ve geliştirme gerekmektedir.

Bu üç ana TED sistemi, farklı avantaj ve dezavantajları ile birlikte çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Duyulur enerji depolama sistemleri, düşük maliyet ve geniş çapta kullanılabilirliği ile öne çıkarken, gizli enerji depolama sistemleri yüksek enerji yoğunluğu ve sabit sıcaklıkta enerji depolama avantajı sunar. Termokimyasal enerji depolama ise en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup, uzun vadeli enerji depolama potansiyeli taşır ancak ticari kullanıma geçmesi için daha fazla geliştirme gerekmektedir.

TED teknolojilerinin gelişimi, enerji yönetiminde verimliliği artırmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu desteklemek adına kritik öneme sahiptir. Enerji depolama kapasitesi, ısı transfer verimliliği ve maliyetlerin düşürülmesi gibi alanlarda yapılacak iyileştirmeler, bu teknolojilerin daha geniş çapta benimsenmesini sağlayacaktır.

1.2. Faz Değiştiren Malzemeler

Faz değiştiren maddeler, farklı kimyasal yapılara ve özelliklere sahip geniş bir malzeme grubunu kapsamaktadır. Bu maddeler, uygulama alanlarına ve faz geçiş özelliklerine göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Genel olarak, faz değiştiren maddeler dört ana kategori altında incelenmektedir (Yeşilyurt, Nadaroglu, & Çomaklı, 2019) .

Faz değişim malzemeleri dört ana kategoriye ayrılabilir: organik, inorganik, ötektik ve kompozit malzemeler (Kumar, Gupta, & Sharma, 2021; Jayathunga, Karunathilake, Narayana, & Witharana, 2024; Rashid, ve diğerleri, 2024).

1.2.1. Organik faz değişim malzemeleri

Organik FDM'ler genellikle düşük sıcaklık uygulamaları için kullanılır. Bu malzemeler, termal ve kimyasal olarak kararlıdır ve düşük süper soğuma eğilimi gösterirler. Ancak, düşük termal iletkenlikleri ve yanıcılık gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Organik FDM'ler şu alt kategorilere ayrılabilir:

Parafinler: Düşük maliyetli ve geniş uygulama alanlarına sahiptirler. Kimyasal olarak stabildirler ve geniş bir erime sıcaklığı aralığına sahiptirler.

Yağ Asitleri: Biyolojik olarak parçalanabilir ve düşük toksisiteye sahip malzemelerdir. Erime noktaları ve gizli ısıları parafinlere benzer.

Şeker Alkolleri: Termal ve kimyasal olarak kararlıdır, ancak süper soğuma eğilimi gösterebilirler.

1.2.2. İnorganik faz değişim malzemeleri

İnorganik FDM'ler genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılır ve organik FDM'lere göre daha yüksek termal iletkenliğe ve gizli ısı kapasitesine sahiptirler.

Ancak, faz ayrışması ve korozyon gibi sorunlarla karşılaşabilirler. İnorganik FDM'ler şu alt kategorilere ayrılabilir:

Tuzlar ve Tuz Hidratları: Düşük maliyetli ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler, ancak süper soğuma ve faz ayrışması sorunları yaşayabilirler.

Metaller ve Metal Alaşımları: Yüksek termal iletkenlikleri ve enerji yoğunlukları vardır, ancak yüksek maliyetli olabilirler.

1.2.3. Ötektik faz değişim malzemeleri

Ötektik FDM'ler, bileşenlerinin birlikte eridiği belirli bir oranla karışan iki veya daha fazla maddenin oluşturduğu karışımlardır. Bu malzemeler, geniş bir sıcaklık aralığında keskin erime noktalarına sahiptirler ve termal olarak kararlıdır. Ötektik karışımlar, çeşitli sıcaklık uygulamaları için özelleştirilebilirler.

1.2.4. Kompozit faz değişim malzemeleri

Kompozit FDM'ler, termal iletkenliği artırmak ve mekanik özellikleri iyileştirmek için bir ana malzeme (genellikle bir organik veya inorganik FDM) ile birleştirilen katkı malzemelerinden oluşur. Bu malzemeler, süper soğuma ve faz ayrışması gibi sorunları azaltabilir ve ısı transfer verimliliğini artırabilir. Kompozit FDM'lerde kullanılan katkı malzemeleri arasında metal köpükler, grafit, karbon nanotüpler ve diğer yüksek termal iletkenlikli malzemeler bulunur (Çelik, ve diğerleri, 2024).

FDM'ler, enerji depolama teknolojilerinde önemli bir rol oynamaktadır ve binaların ısıtma/soğutma sistemleri, güneş enerjisi uygulamaları, elektronik cihazların termal yönetimi, gıda muhafazası ve ulaşım gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin geliştirilmesi ve uygulanması, enerji verimliliğini artırarak ve karbon emisyonlarını azaltarak sürdürülebilir enerji yönetimine katkı sağlar.

1.3. Tepe Yük Kaydırma (Peak Load Shifting)

Tepe yük kaydırma, enerji talebinin en yüksek olduğu zamanlarda (tepe yük) enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen bir stratejidir. Bu yöntem, elektrik şebekesine binen baskıyı hafifletmek ve enerji üretim tesislerine olan ihtiyacı azaltmak amacıyla kullanılır. Faz Değişim Malzemeleri (FDM'ler), bu süreçte önemli bir rol oynar. FDM'ler, enerji talebinin düşük olduğu zamanlarda enerji depolayarak, talebin yüksek olduğu saatlerde bu enerjiyi serbest bırakır. Bu sayede, tepe yük saatlerinde enerji tüketimi azalır ve gün boyunca daha dengeli bir enerji kullanımı sağlanır.

Faz Değişim Malzemeleri, binaların ısıtma, soğutma ve havalandırma (HVAC) sistemlerinde tepe yük kaydırma stratejilerini uygulamak için kullanılabilir. FDM'ler, enerji depolayarak ve serbest bırakarak, HVAC sistemlerinin en yüksek ısıtma veya soğutma yüklerini karşılamak için daha büyük boyutlarda tasarlanması gerekliliğini azaltır. Böylece, enerji tüketimi gün boyunca dengeli bir şekilde dağıtılır ve elektrik şebekesindeki en yüksek tepe yükler azaltılır (Halford & Boehm, 2007; Zhou, Zhao, & Tian, 2012; Baetens, Jelle, & Gustavsen, 2010; Soares, Costa, Gaspar, & Santos, 2013).

1.3.1. Endüstride FDM kullanılarak tepe yük kaydırma uygulamaları

Bina Isıtma ve Soğutma Sistemleri: FDM'ler, bina içindeki sıcaklığı düzenlemek için kullanılabilir. Gündüz saatlerinde güneş ışığı ile ısınan FDM'ler, enerji talebinin düşük olduğu akşam saatlerinde bu ısıyı serbest bırakır. Böylece, binaların ısıtma ve soğutma sistemleri tepe yüklerden etkilenmeden daha verimli çalışabilir.

Gıda Muhafaza ve Soğutma: FDM'ler, soğutma sistemlerinde kullanılabilir. Gıda depolama alanlarında, enerji talebinin düşük olduğu zamanlarda FDM'ler enerji depolar ve tepe yük saatlerinde bu enerjiyi serbest bırakarak soğutma ihtiyacını karşılar. Bu, enerji maliyetlerini azaltır ve gıda ürünlerinin taze kalmasını sağlar.

Veri Merkezleri: Veri merkezlerinde, FDM'ler sıcaklık yönetimi için kullanılabilir. Sunucu odalarında sıcaklığın kontrol altında tutulması için FDM'ler kullanılarak, enerji tüketimi tepe yük saatlerinden kaydırılabilir. Bu, enerji tasarrufu sağlarken, veri merkezlerinin performansını artırır.

Endüstriyel Üretim Tesisleri: Üretim tesislerinde, FDM'ler üretim ekipmanlarının soğutulması için kullanılabilir. Özellikle yüksek enerji tüketimi gerektiren süreçlerde,

FDM'ler enerjiyi düşük talep saatlerinde depolar ve tepe yük saatlerinde bu enerjiyi serbest bırakır. Bu, enerji maliyetlerini azaltır ve üretim süreçlerini optimize eder.

Ayrıca literatürde de bu konuda yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin Halford ve Boehm'e (2007) göre, FDM'ler kullanılarak tepe yük kaydırma, enerji talebinin en yüksek olduğu saatlerde enerji tüketimini azaltabilir ve tepe yüklerin gün içine yayılmasını sağlayabilir. Sun ve arkadaşlarının (2013) incelemelerine göre, FDM'ler kullanılarak %10 ila %57 arasında tepe soğutma yükü azalmaları elde edilmiştir. Bu azalmalar, yalıtımlı hafif yapılarla karşılaştırıldığında daha belirgin olmuştur. Ancak, daha gelişmiş yük kaydırma kontrol stratejileri geliştirildiğinde, bu sistemlerin maliyet tasarrufu potansiyeli daha da artırılabilir.

Sonuç olarak, FDM'ler kullanılarak endüstride gerçekleştirilebilecek tepe yük kaydırma uygulamaları, enerji verimliliğini artırmak ve maliyetleri düşürmek için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu teknolojilerin daha geniş çapta benimsenmesi, enerji yönetiminde sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adım olacaktır.

1.4. Kesikli Reaktörler

Kesikli reaktörler, kimya mühendisliğinde en yaygın kullanılan reaktör tiplerinden biridir ve genellikle küçük hacimli, yüksek katma değerli ürünlerin (ilaç, biyoteknoloji, polimer vb.) üretiminde tercih edilir. Bu reaktörlerde, belirli miktarda hammaddenin reaktöre yüklenmesi, reaksiyonun belirli sıcaklık ve basınç koşullarında yürütülmesi ve reaksiyon tamamlandıktan sonra ürünün boşaltılması prensibi geçerlidir (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999). Kesikli çalışma modları, özellikle ürün kalitesi ve proses kontrolü açısından esneklik sağlarken, sürekli sistemlere kıyasla enerji kullanımında dalgalanmalara neden olabilir.

Kesikli reaktörlerin çalışma prensipleri ısı ve kütle transferine dayalıdır. Reaktör içerisine alınan akışkanlar, karıştırıcılar yardımıyla homojen hale getirilir ve reaksiyon süresince gerekli sıcaklık koşulları sağlanır. Bu sırada reaktörün ısıtılması veya soğutulması için ceketli ısı değiştiricilerden yararlanılır. Bu çevrimsel işletim yapısı nedeniyle kesikli reaktörlerde enerji talebi sürekli değişir; yani belirli dönemlerde yüksek ısıtma/soğutma ihtiyacı, diğer dönemlerde ise düşük yük söz konusudur (Towler & Sinnott, 2022). Bu dalgalı enerji profili, reaktörleri termal enerji depolama (TED) teknolojileri ile bütünleştirmek için oldukça uygun hale getirmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, kesikli reaktörlerin enerji depolama sistemleriyle entegrasyonu sayesinde enerji verimliliğinin artırılabilirliğini göstermiştir. Abdelouadoud ve arkadaşları (2019), kesikli proseslerde TED entegrasyonu için basit ve etkili grafiksel yöntemler geliştirmiş ve farklı işletim senaryolarında enerji tasarrufu sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde Er ve arkadaşları (2022), kesikli süreçlerde doğrudan ve dolaylı ısı geri kazanım ağlarının eşzamanlı retrofit edilmesiyle TED kullanımını optimize etmiş ve kayda değer maliyet düşüşleri raporlamıştır. Lin ve arkadaşları (2024) ise kesikli proseslerde ısı yönetimi ve zaman bazlı entegrasyonu ele alarak TED kullanımının operasyonel sürekliliği artırdığını vurgulamıştır. Bu bulgular, kesikli reaktörlerin dinamik enerji profillerinin, termal enerji depolama ile uyumlu bir şekilde yönetilebileceğini göstermektedir.

Kesikli reaktörlerin tepe yük kaydırma stratejilerine uygunluğu da önemli bir avantajdır. Reaktörlerde enerji talebi, reaksiyon evrelerine bağlı olarak tepe noktalarına ulaşmakta, bu durum da enerji maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. TED entegrasyonu sayesinde, fazla enerji düşük talep zamanlarında depolanabilir ve yüksek talep anlarında kullanılabilir. Halford ve Boehm (2007), FDM tabanlı sistemlerin tepe yük kaydırmada etkili olduğunu ve özellikle endüstriyel tesislerde enerji maliyetlerini düşürdüğünü belirtmiştir. Benzer şekilde Sun ve arkadaşları (2013), FDM kullanımının konut ve endüstri ölçeğinde enerji tüketimini %10–57 oranında azaltılabileceğini göstermiştir. Bu bağlamda kesikli reaktörler, enerji depolama teknolojileri ile birlikte kullanıldığında hem enerji yönetimi optimizasyonu hem de ekonomik tasarruf açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, kesikli reaktörler çevrimsel enerji profilleri nedeniyle termal enerji depolama uygulamalarına oldukça uygundur. Bu uygunluk, özellikle faz değişim malzemeleri (FDM) ile desteklenen gizli ısı depolama sistemlerinde tepe yük kaydırma stratejileriyle birleştiğinde, enerji verimliliğinin artırılmasına ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Literatürde yer alan güncel çalışmalar (Abdelouadoud, Lucas, Krummenacher, Olsen, & Wellig, 2019; Er, Alwi, Manan, & Klemeš, 2022; Lin & Wang, 2024; Agner, Ong, Stampfli, Krummenacher, & Wellig, 2022) bu entegrasyonun endüstriyel ölçekli uygulamalarda yüksek potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Bu bağlamda, enerji talebindeki artış, fosil yakıt bağımlılığı ve sera gazı emisyonları göz önünde bulundurulduğunda, termal enerji depolama teknolojilerinin

endüstriyel süreçlere entegrasyonu hem sürdürülebilirlik hem de maliyet optimizasyonu açısından kritik bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle kesikli üretim karakterine sahip kesikli reaktörler, çevrimsel enerji ihtiyaçları nedeniyle dalgalı ısı yük profilleri göstermekte ve bu durum enerji verimliliği bakımından önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Literatürde bu tür reaktörlerin enerji yönetimi için farklı yöntemler önerilmiş olmakla birlikte (Abdelouadoud ve ark., 2019; Er ve ark., 2022; Lin ve ark., 2024), FDM tabanlı termal enerji depolama ünitelerinin dış entegrasyon yoluyla kullanılması, sistemin hacim ve operasyonel esnekliğini koruyarak enerji tasarrufu potansiyelini artırmaktadır.

Bu tez çalışmasında ise, kesikli reaktörler için özel olarak tasarlanmış ve deneysel olarak doğrulanmış yeni bir termal enerji depolama konfigürasyonu ele alınmaktadır. Önerilen yapılandırmada, reaktör gövdesine entegre edilen geleneksel yaklaşımların aksine, FDM tabanlı ısı depolama ünitesi reaktör devresi dışında konumlandırılmaktadır. Böylece, gece gibi düşük enerji maliyetli zamanlarda depolanan ısı, günün yüksek enerji talebi olan dönemlerinde kullanılabilmesi mümkün hale gelmekte ve etkin bir tepe yük kaydırma stratejisi uygulanabilmektedir. Bu yaklaşım yalnızca prosesin enerji verimliliğini ve kararlılığını geliştirmekle kalmamakta, aynı zamanda sürdürülebilir enerji yönetimi hedefleri ile de uyum göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, önerilen konfigürasyonun enerji maliyetlerini %8'e varan oranlarda azaltabileceğini ve endüstriyel ölçekte uygulanabilir, ölçeklenebilir ve ekonomik olarak avantajlı bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle, çalışma kapsamında geliştirilen yöntem hem akademik hem de endüstriyel açıdan yenilikçi bir katkı sağlamaktadır. Tez çalışmasının kapsamı, kesikli reaktörlerin enerji profillerinin detaylı analizi, FDM tabanlı termal enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu ve bu entegrasyonun tepe yük kaydırma bağlamındaki performansının incelenmesi üzerine odaklanmaktadır. Böylelikle, enerji yönetimi stratejilerinde yeni bir yaklaşım olarak önerilen bu yöntem, endüstriyel kesikli proseslerin daha verimli, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde işletilmesine yönelik önemli bir adım niteliği taşımaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Faz Değiştiren Maddeler ve Tepe yük kaydırma

FDM ve tepe yük kaydırma uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar, son yıllarda literatürde önemli bir yer edinmiştir. Bu çalışmalar, FDM'lerin ısı depolama kapasitesi, faz geçiş davranışları ve farklı sistemlere entegrasyon yöntemleri üzerine yoğunlaşmaktadır. Ayrıca, tepe yük kaydırma stratejileri kapsamında FDM kullanımının enerji talebinin zamana bağlı dağılımını optimize ettiği, pik yüklerin azaltılmasına katkı sağladığı ve toplam enerji maliyetlerinde kayda değer düşüşler oluşturduğu çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur. Bu kapsamda, FDM teknolojilerinin hem verimlilik artışı hem de sürdürülebilir enerji yönetimi açısından önemli bir potansiyel sunduğu literatürde geniş biçimde tartışılmaktadır. Bu konuda birçok literatür çalışması yapılmıştır.

Zhou ve arkadaşlarının (2012) yaptığı çalışmada, bina uygulamalarında faz değişim malzemelerinin (FDM) kullanıldığı termal enerji depolama yöntemleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, FDM tabanlı sistemlerin ısıtma ve soğutma yüklerini dengeleme, enerji tüketimini azaltma ve konfor koşullarını iyileştirme potansiyeli vurgulanmıştır. Ayrıca farklı FDM türlerinin performans kriterleri ve entegrasyon zorlukları da detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

Baetens ve arkadaşlarının (2010) çalışmasında, bina sektöründe FDM uygulamalarına yönelik güncel gelişmeler derlenmiştir. Araştırmada, FDM'nin ısı depolama kapasitesi, uzun vadeli kararlılığı, entegrasyon yöntemleri ve mimari tasarımıyla uyumu ele alınmıştır. Ayrıca bina kabuklarında kullanılan FDM'lerin enerji verimliliğini artırmadaki rolü vurgulanmıştır.

Soares ve arkadaşlarının (2013) yaptığı derleme çalışması, pasif FDM tabanlı gizli ısı depolama sistemlerinin binalarda enerji verimliliği üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Çalışmada, farklı iklim koşullarında FDM uygulamalarının performansı değerlendirilmiş ve uygun malzeme seçiminin enerji tasarrufu üzerindeki kritik etkisi ortaya konulmuştur.

Fikiin ve arkadaşlarının (2003) çalışması, gıda soğutma ve dondurma uygulamalarında FDM tabanlı enerji depolama sistemlerini incelemiştir. Araştırmada,

FDM kullanımının ürün kalitesini koruma, enerji tüketimini azaltma ve soğutma zincirinde sürekliliği sağlama açısından önemli faydalar sunduğu belirtilmiştir.

Castell ve arkadaşlarının (2011) yaptıkları çalışmada, FDM'lerin faz değişim sıcaklıklarının uygun şekilde ayarlanmasının enerji tasarrufu potansiyelini nasıl maksimize ettiği incelenmiştir. Deneysel analizler, FDM tabanlı sistemlerin soğutma ve enerji verimliliği üzerindeki olumlu etkilerini doğrulamıştır.

Jouhara ve Khalid'in (2016) yaptığı incelemede, bina entegreli termal yönetim sistemlerinde FDM tabanlı enerji depolama uygulamaları değerlendirilmiştir. Araştırma, özellikle elektronik soğutma ve veri merkezlerinde enerji verimliliğini artırma ve aşırı ısınmayı önleme konularında FDM teknolojilerinin potansiyelini vurgulamaktadır.

Cosin ve arkadaşlarının (2018) çalışması, veri merkezlerinde FDM uygulamalarına odaklanan bir literatür taraması sunmuştur. Çalışmada, FDM tabanlı soğutma sistemlerinin enerji tüketimini azaltma, işletme maliyetlerini düşürme ve sistem güvenilirliğini artırma konularındaki avantajları ele alınmıştır.

Halford ve Boehm'in (2007) araştırmasında, FDM tabanlı sistemlerin tepe yük kaydırma stratejilerinde kullanımı modellenmiştir. Çalışma, FDM entegrasyonunun enerji talebinin en yoğun olduğu saatlerde yükü dengeleme ve enerji maliyetlerini azaltma açısından etkili olduğunu göstermiştir.

Sun ve arkadaşlarının (2013) yaptığı çalışmada, konut binalarında FDM uygulamalarının enerji ve ekonomik açıdan değerlendirmesi yapılmıştır. Analizler, FDM kullanımının enerji tüketimini ve maliyetleri önemli ölçüde düşürdüğünü ortaya koymuş, ekonomik geri dönüş süreleri de detaylandırılmıştır.

Agyenim ve arkadaşlarının (2010) derleme çalışması, gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan malzemeler, ısı transfer mekanizmaları ve faz değişim süreçlerinin matematiksel modellenmesi üzerine odaklanmıştır. Çalışmada, FDM tabanlı sistemlerin geliştirilmesinde karşılaşılan zorluklar ve çözüm önerileri sistematik bir şekilde sunulmuştur.

2.2. Kesikli Reaktörler ve Faz Değiştiren Maddeler

Kesikli reaktörler üzerine yapılan çalışmalar, bu sistemlerin sıcaklık kontrolü, enerji verimliliği ve reaksiyon performansı açısından geniş bir araştırma alanı

oluşturduğunu göstermektedir. Literatürde, özellikle ısı yönetim stratejileri ve proses optimizasyonu üzerinde yoğunlaşmıştır.

Abdelouadoud ve arkadaşlarının (2019) çalışmasında, kesikli proseslerde ısı depolama entegrasyonuna yönelik basit fakat etkili bir grafiksel yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, farklı zamanlarda değişen ısı taleplerinin görsel olarak analiz edilmesini ve uygun depolama kapasitesinin belirlenmesini sağlamaktadır. Çalışmada, özellikle kesikli proseslerde ısı yüklerinin düzensiz doğasından kaynaklanan entegrasyon zorlukları ele alınmış ve TED sistemleriyle bu zorlukların nasıl aşılabileceği gösterilmiştir. Sonuçlar, önerilen grafiksel yaklaşımın hem enerji tasarrufu sağlamada hem de proseslerin operasyonel esnekliğini artırmada başarılı olduğunu ortaya koymuştur.

Er ve arkadaşlarının (2022) yaptığı çalışmada, kesikli prosesler için hem doğrudan hem de dolaylı ısı değiştirici depolama ağlarının (HESN) eşzamanlı retrofit edilmesini sağlayan geliştirilmiş bir grafiksel araç sunulmuştur. Bu yaklaşım sayesinde mevcut sistemlere TED entegrasyonu daha kolay ve sistematik bir şekilde uygulanabilmektedir. Çalışma, farklı senaryolar üzerinden test edilerek enerji tüketiminde anlamlı azalmalar ve işletme maliyetlerinde iyileşmeler sağlandığını göstermiştir. Ayrıca, retrofit edilen sistemlerde enerji verimliliğinin artırılmasının yanında sürdürülebilirlik kriterleri de ön plana çıkarılmıştır.

Lin ve arkadaşlarının (2024) araştırması, kesikli proseslerde ısı yönetimi ve kullanımının optimizasyonuna odaklanmıştır. Çalışmada, zaman içerisinde değişen ısı yükleri dikkate alınarak, fazla enerjinin depolanması ve daha sonra uygun zamanlarda kullanılmasına yönelik hedefleme ve entegrasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Elde edilen bulgular, kesikli proseslerde TED kullanımının yalnızca enerji tüketimini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda proses güvenilirliğini artırarak işletme sürekliliğini de desteklediğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, kesikli reaktörlerin enerji yönetiminde TED entegrasyonunun stratejik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anastasovski ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında, tekrar edilebilir kesikli prosesler için ısı depolama ağlarının tasarımı ele alınmıştır. Çalışmada, belirli zaman dilimlerinde tekrarlayan ısı yüklerinin yönetimi için TED sistemlerinin nasıl optimize edilebileceği incelenmiş, farklı depolama stratejilerinin performansları karşılaştırılmıştır. Araştırma sonuçları, doğru boyutlandırılmış ve tasarlanmış depolama ağlarının enerji

verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini ve proseslerin enerji maliyetlerini düşürebileceğini göstermiştir. Bu kapsamda, endüstriyel ölçekli uygulamalar için tasarım kılavuzları da önerilmiştir.

Agner ve arkadaşlarının (2022) çalışması, kesikli endüstriyel proseslerde ısı pompası ve dolaylı termal enerji depolama entegrasyonunu hedefleyen grafiksel bir yöntem önermektedir. Geliştirilen yaklaşım, hem TED hem de ısı pompasının birlikte çalışarak enerji geri kazanımını maksimuma çıkarmasına odaklanmıştır. Çalışmada farklı proses koşulları altında uygulamalar değerlendirilmiş ve sonuçlar, bu kombinasyonun enerji verimliliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda karbon salınımını da azaltabileceğini ortaya koymuştur.

Royo ve arkadaşlarının (2021) çalışmasında, yüksek sıcaklıklı gizli ısı depolama (latent TES) sistemlerinin sanayiye entegrasyonuna yönelik karar destek mekanizmaları geliştirilmiştir. Çalışma, kesikli proses senaryolarını da içeren sektörler arası bir yaklaşımla yürütülmüştür. Özellikle malzeme seçimi, işletme sıcaklık aralıkları ve ekonomik uygulanabilirlik konuları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Araştırma, doğru TED teknolojisinin seçilmesinin enerji verimliliği ve işletme maliyetleri açısından kritik rol oynadığını vurgulamaktadır.

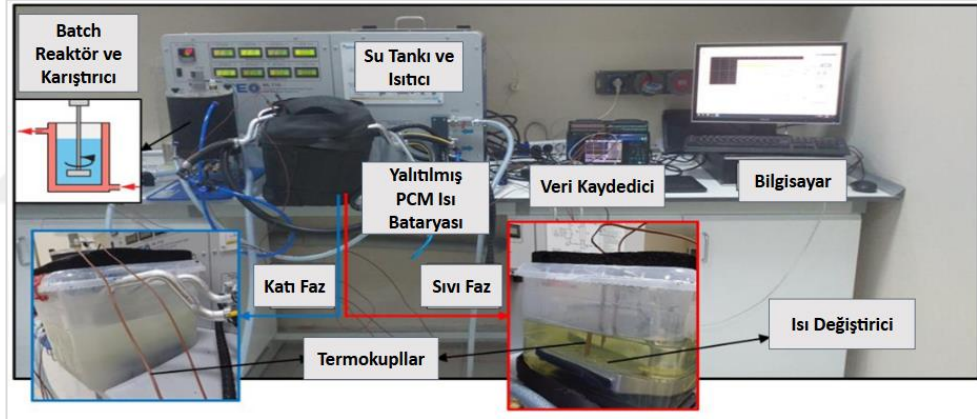
Abdelouadoud ve Wellig'in (2019) yaptığı çalışmada, kapasite sınırlı TED sistemlerinin kesikli proseslerde entegrasyonu ele alınmıştır. Çalışma, ısı geri kazanımının optimizasyonu için matematiksel ve grafiksel yöntemler geliştirmiş, sınırlı depolama kapasitesiyle bile önemli enerji tasarruflarının mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Bu bağlamda, kapasite yönetimi ve yük dağılımı stratejileri kesikli reaktörlerin enerji performansını iyileştirmede kritik faktörler olarak öne çıkmıştır.

Barnetche ve arkadaşlarının (2023) araştırması, endüstriyel proseslerde özellikle güneş enerjisi destekli ısıtma ve soğutma uygulamalarında gizli ısı depolama entegrasyonunu incelemiştir. Çalışmada, kesikli talep profilleriyle uyumlu olarak farklı depolama stratejileri test edilmiş ve optimum entegrasyon yöntemleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, TED sistemlerinin yenilenebilir enerji ile birlikte kullanıldığında endüstriyel kesikli süreçlerde hem enerji verimliliğini artırabileceğini hem de karbon emisyonlarını azaltabileceğini göstermiştir.

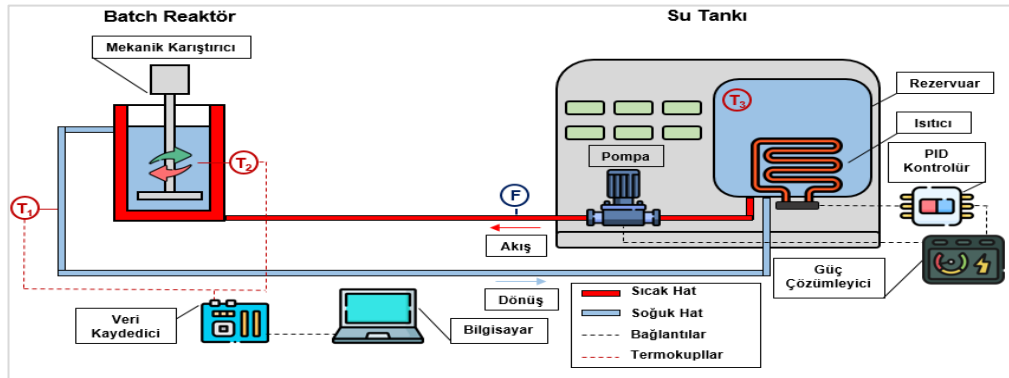
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Deneyisel çalışma için kurulan sistem, temel olarak bir su tankı, santrifüj pompa, ceketli ve karıştırıcılı bir kesikli reaktör, faz değişim malzemesi (FDM) içeren harici bir ısı bataryası, akış ölçüm ve sıcaklık algılama elemanları ile bunların verilerini toplayan bir veri kaydedici ve bilgisayar arayüzünden oluşmaktadır. Sistemin genel mimarisi Şekil 3.1’de, bağlantı şeması ise Şekil 3.2’de sunulmaktadır. Bu düzende su tankı, ısı kaynağı görevi görmüş ve PID kontrollü ısıtıcı yardımıyla sıcaklığı sabit tutulmuştur. Pompa ile dolaştırılan sıcak su, reaktör ceketinden geçirilerek ısı transferi sağlanmıştır. FDM bataryasının sisteme entegrasyonu ile birlikte akış güzergâhı değiştirilmiş ve suyun tanktan çıktıktan sonra önce FDM ünitesinden, ardından reaktörden geçerek tekrar tanka dönmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Deneyisel kurulumun genel görünümü



Şekil 3.2. Durum-1 için Deneyisel Düzenek (F:Debi Ölçer, T_1 :Dönüş Suyu Sıcaklığı, T_2 :Kesikli Sıcaklığı, T_3 :Su Tankı Sıcaklığı)

Çalışmada kullanılan su tankı 10 L hacme sahiptir ve 3 kW gücünde rezistanslı ısıtıcıyla donatılmıştır. PID kontrol sistemi sayesinde tank içindeki suyun sıcaklığı deneyler boyunca 68 ± 1 °C aralığında tutulmuştur. Tüm deneylerde hat debisi sabit 2.3 L/dk. olarak korunmuş, böylece reaktör ve FDM bataryası için karşılaştırılabilir koşullar elde edilmiştir. Akış, 10 L/dk maksimum kapasiteye ve 30 m basma yüksekliğine sahip santrifüj pompa ile sağlanmıştır.

Kesikli reaktör, paslanmaz çelikten imal edilmiş olup, ceketli yapısı sayesinde ısı transferi için uygundur. Reaktör hacmi yaklaşık 1.2 L olup, karıştırma sistemi üç kanatlı pervane ile 20–330 rpm aralığında çalıştırılabilmektedir. Ceket et kalınlığı 2.5 mm, iç çap 103 mm ve dış çap 127 mm olup, taban et kalınlığı 4 mm'dir. Reaktör kapağı PMMA malzemeden yapılmıştır. Bu özellikler, deneylerde kullanılan ısı yükleme ve deşarj koşullarına uygun, kompakt ve kontrollü bir ısı transfer ortamı sağlamıştır. Reaktör özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Ceketli kesikli reaktörün temel özellikleri

Kesikli Reaktör	Açıklamalar
Boyutlar	Uzunluk×Genişlik×Yükseklik:Yaklaşık 400 × 230×400mm Ağırlık:Yaklaşık,8 kg
Ceketli Isı Değiştirici	Yalıtımlı ceketli tank ve karıştırıcı Karıştırıcı tipi:Pervaneli,üç kanatlı Karıştırıcı hız aralığı:Yaklaşık 20...330 rpm Belirtilen tank hacmi:Yaklaşık. 1.2 L Ceketli tank:Paslanmaz çelik
Ceketli Isı Değiştirici, Geometri ve Malzemeleri	İç ceket duvar kalınlığı:2,5 mm İç ceket iç çapı:103 mm Dış ceket iç çapı:127 mm Tank tabanı duvar kalınlığı:4 mm Şeffaf kapak malzemesi:PMMA Boru kıvrımı ortalama logaritmik ısı transferi alanı: Yaklaşık. 0.05 m ²

FDM bataryası, sisteme ek bir enerji depolama kapasitesi kazandırmak üzere tasarlanmıştır. Isıya dayanıklı polimerden üretilen batarya haznesi 24×30×28 cm boyutlarında olup, yaklaşık 6.8 kg RT50 faz değişim malzemesi içermektedir. İçinde yer alan borulu-kanatlı ısı değiştirici, FDM ile dolaşan akışkan arasında yüksek verimli bir

ısı transferi sağlamaktadır. RT50'nin seçilme nedeni, 45–51 °C erime aralığı, yüksek gizli ısı kapasitesi ($160 \pm \%7.5$ kJ/kg), uygun özgül ısısı (2 kJ/kgK), düşük toksisite ve termal kararlılık gibi özellikleridir. Ayrıca 70 °C maksimum çalışma sıcaklığı ve %12.5 hacim genişmesi ile sistemin güvenli çalışmasına uyum sağlamaktadır. Kullanılan FDM'nin özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. FDM (RT50) Özellikleri

Özellik	Tipik Değerler	Birim
Erime Sıcaklığı	45-51	°C
Donma Sıcaklığı	51-46	°C
Isı Depolama Kapasitesi(Gizli Isı)	160±7.5%	kJ/kg^{-1}
Özgül Isı Kapasitesi	2	$kJ/kg^{-1}K^{-1}$
Katı Faz Yoğunluğu	0.88	kg/L^{-1}
Sıvı Faz Yoğunluğu	0.76	kg/L^{-1}
Termal İletkenlik(Her iki aşama)	0.2	$W/m^{-1}K^{-1}$
Hacimsel Genleşme	12.5	%
Yanma Noktası	>200	°C
Maksimum Çalışma Sıcaklığı	70	°C

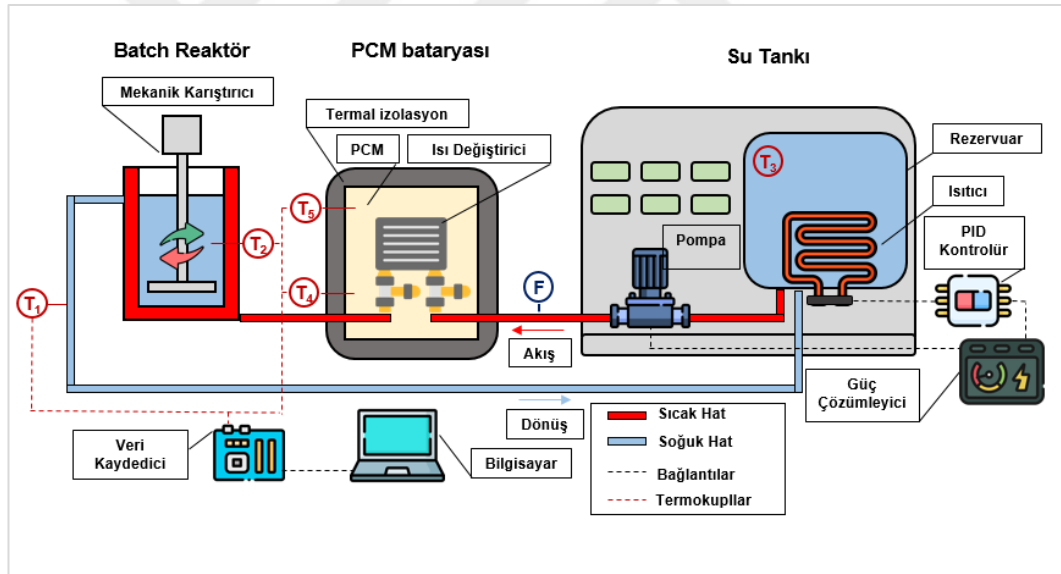
Ölçüm ve kontrol için sıcaklık sensörleri, debimetreler ve veri kaydedici kullanılmıştır. Tank, reaktör ve dönüş hattındaki sıcaklıklar Pt100 sensörler ile ölçülmüş, FDM içerisindeki sıcaklık değişimleri ise K-tipi termokupllar yardımıyla üst ve alt noktalardan takip edilmiştir. Pt100 sensörler ± 0.35 °C doğrulukta, K-tipi termokupllar ise ± 1 °C doğrulukta veri sağlamıştır. Akış hattı üzerindeki debimetre ile sürekli debi ölçümü yapılmıştır. Tüm sensörler veri kaydediciye bağlanmış ve bilgisayar aracılığıyla deney boyunca izlenmiştir. Ayrıca ısıtıcı çalışma süreleri, güç devresine bağlı 5.1 V tetikleme sinyali üzerinden kaydedilerek enerji tüketim analizlerinde kullanılmıştır.

Deneylerin başlangıç koşulları tüm senaryolar için aynı şekilde ayarlanmıştır. Başlangıçta tank, reaktör ve FDM ünitesi ortam sıcaklığı olan yaklaşık 16 ± 1 °C'de bulunmaktaydı. Her deney çevriminde reaktör içerisine 1.2 L su yüklenmiş ve karıştırıcı

devreye alınmıştır. Kimyasal reaksiyon gerçekleştirilmemiş, reaktör yalnızca ısı davranışın gözlemlenmesi için kullanılmıştır. DURUM-1 senaryosunda yalnızca reaktör izole edilirken, DURUM-2 senaryosunda FDM bataryası da 3 cm kalınlığında izolasyonla kaplanmış, tank ve bağlantı hatları izolesiz bırakılmıştır.

3.2. Yöntem

DeneySEL yöntem iki ana senaryo üzerine kurgulanmıştır. İlk senaryoda (DURUM-1), yalnızca su tankı ve kesikli reaktör devreye alınmış, sistemde FDM bataryası bulunmamaktadır. Bu durumda sıcak su, tanktan pompa ile reaktör ceketine gönderilmiş ve ardından tekrar tanka dönmüştür (Şekil 3.2). İkinci senaryoda (DURUM-2) ise FDM bataryası sisteme entegre edilmiş, akış yönü tanktan FDM bataryasına, oradan reaktör ceketine ve tekrar tanka olacak şekilde değiştirilmiştir (Şekil 3.3). Böylece FDM, yükleme sırasında fazla ısıyı depolayarak daha sonraki çevrimlerde reaktör için ek bir ısı kaynağı olarak işlev görmüştür.



Şekil 3.3. Durum- 2 için deneysel düzenek (F:Debi Ölçer, T₁:dönüş Suyu sıcaklığı, T₂:kesikli sıcaklığı, T₃:su tankı sıcaklığı, T₄:FDM üst sınır sıcaklığı, T₅:FDM alt sınır sıcaklığı)

Isı yükleme aşamasında tank sıcaklığı PID kontrollü rezistans yardımıyla 68 °C'ye ayarlanmış ve bu sıcaklık sabit tutulmuştur. DURUM-1'de yaklaşık 1.5 saatlik yükleme süresi ve ardından 30 dakikalık ek süre sonunda sistem kararlı hale getirilmiştir. FDM bataryasının sisteme eklendiği DURUM-2 senaryosunda ise FDM'nin düşük ısı

iletkenliği nedeniyle yükleme süresi yaklaşık 3 saate çıkarılmış, tam şarjın sağlanması için ek 60 dakika bekleme yapılmıştır. Bu süreçte FDM'nin üst ve alt noktalarına yerleştirilen termokupllar sayesinde faz geçiş davranışı gözlemlenmiştir.

Kesikli evrimleri yükleme sonrasında başlatılmıştır. Reaktör içerisine 1.2 L su doldurulmuş ve karıştırıcı devreye alınarak ısı transferi gerçekleştirilmiştir. Reaktör sıcaklığı yaklaşık 37.5 °C'ye ulaştığında sirkülasyon kesilmiş ve reaktör serbest soğumaya bırakılmıştır. DURUM-1'de arka arkaya  çevrim yürütülmüş, tank sıcaklığının sabit kalması nedeniyle ilk çevrimde daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmiş, sonraki çevrimlerde ise sıcaklık profilleri kademeli olarak düşmüştür. DURUM-2'de ise FDM'den sağlanan ek ısı ile dört çevrim tamamlanabilmiş, her çevrimde maksimum sıcaklıklar sırasıyla yaklaşık 49 °C, 45 °C ve 42 °C seviyelerine gerilemiştir.

Sensörlerin yerleşimi deneysel doğruluğu artıracak şekilde planlanmıştır. Tank, reaktör içi ve dönüş hattı sıcaklıkları Pt100 sensörlerle ölçülmüş, FDM'nin erime davranışını takip etmek için batarya içerisinde alt ve üst noktalara K-tipi termokupllar yerleştirilmiştir. Debimetre, tank çıkışından sonra reaktör ceketine giriş öncesine konumlandırılmıştır. Böylece hem akış hem de sıcaklık verileri sürekli olarak kaydedilmiş ve analiz edilmiştir.

Deneysel yöntem, sistemin enerji performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Isıtıcının devreye giriş ve çıkış süreleri kaydedilerek toplam enerji tüketimi hesaplanmıştır. FDM bataryasının varlığı ile elde edilen ısı geri kazanımı, kesikli çevrim sayısındaki artış ve tepe yük kaydırma potansiyeli doğrudan gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, FDM'nin özellikle kesikli reaktörlü sistemlerde enerji verimliliğini artırma ve enerji maliyetlerini düşürme açısından önemli bir katkı sunduğunu ortaya koymuştur.

3.3. FDM ile Su Isı Depolama Ortamlarının Karşılaştırılması

Isı depolama uygulamalarında en temel kıyaslama genellikle suyun ısı taşıma ve depolama kabiliyeti ile yapılmaktadır. Su, yüksek özgül ısı kapasitesi sayesinde geniş sıcaklık aralığında önemli miktarda duyulur enerji depolayabilmektedir. Bununla birlikte, suyun enerji depolama kapasitesi yalnızca sıcaklık değerışimi ile sınırlıdır ve herhangi bir faz geçişi gerçekleşmediğinden enerji yoğunluğu görece düşüktür. Bu nedenle, su temelli depolama sistemleri pratik ve düşük maliyetli olmalarına rağmen hacimsel olarak büyük

alan gerektirmekte ve uzun süreli enerji depolama senaryolarında kısıtlayıcı olabilmektedir.

Faz değişim malzemeleri (FDM'ler) ise farklı bir yaklaşım sunar. FDM'ler belirli bir sıcaklık aralığında faz değiştirme özelliğine sahiptir ve bu geçiş sırasında büyük miktarda gizli ısı depolarlar. Bu özellik, özellikle dar bir sıcaklık aralığında sabit sıcaklıkta enerji depolama avantajı sağlar. Dolayısıyla, FDM kullanımıyla aynı sıcaklık aralığında suya kıyasla çok daha yüksek enerji yoğunluğu elde edilmektedir. Örneğin bu çalışmada kullanılan RT50, yaklaşık 45–51 °C erime sıcaklığı aralığında 160 kJ/kg seviyesinde gizli ısı depolayabilmekte ve bu değer, suyun aynı aralıkta depolayabileceği duyulur ısıdan daha yüksektir.

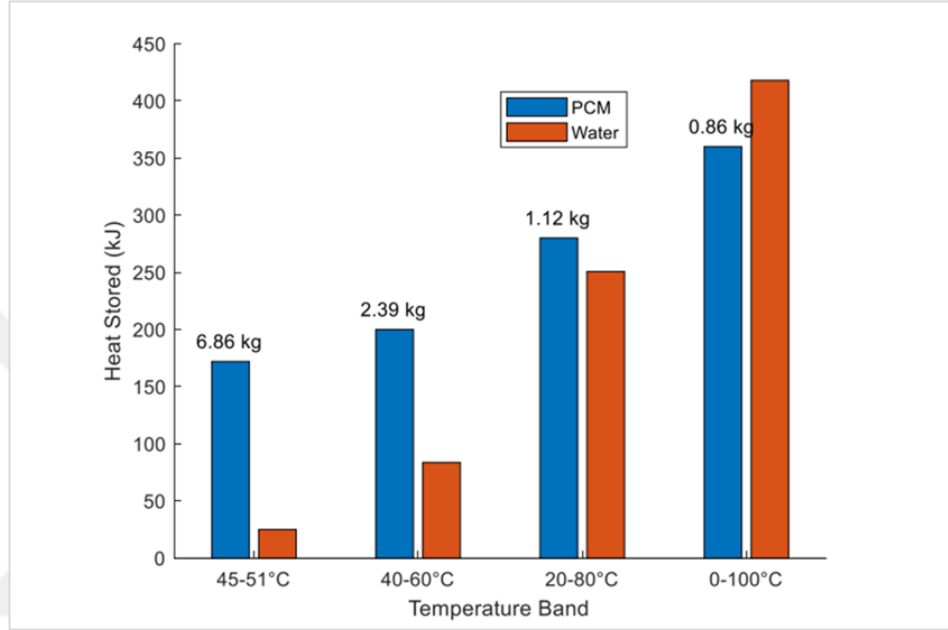
Şekil 3.4'te su ve RT50 için sıcaklık–enerji depolama ilişkisi karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, suyun depolama kapasitesi doğrusal bir artış sergilerken FDM için faz değişim sıcaklık aralığında keskin bir artış gözlemlenmektedir. Bu fark, FDM'nin depolama kapasitesinin özellikle 45–51 °C sıcaklık aralığında suya göre birkaç kat daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, enerji yoğunluğunun artırılması ve depolama ünitesi hacminin küçültülmesi açısından önemli bir avantajdır.

Ayrıca FDM'nin faz değişimi sırasında sıcaklığın sabit kalması, ısı transfer sürecinde daha kararlı bir termal ortam sağlar. Bu özellik, özellikle kesikli reaktörler gibi belirli sıcaklık aralıklarının korunmasının kritik olduğu sistemlerde önemli katkılar sunar. Su ile çalışan depolama sistemlerinde sıcaklık sürekli değiştiği için hedef sıcaklıkların sağlanması zaman alabilmekte ve enerji kullanımında dalgalanmalara neden olabilmektedir. FDM kullanıldığında ise depolama ünitesi, istenen sıcaklık aralığında daha uzun süre sabit bir termal besleme yapabilmektedir.

Bununla birlikte, FDM kullanımında bazı sınırlamalar da bulunmaktadır. FDM'lerin çoğu, suya kıyasla daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir ve bu nedenle şarj ve deşarj süreçleri daha uzun sürebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan RT50'nin ısı iletkenliği yaklaşık 0.2 W/mK olup, suyun 0.6 W/mK değerinden oldukça düşüktür. Bu sebeple FDM tabanlı depolama ünitelerinde genellikle ısı transfer yüzey alanının artırılması amacıyla kanatlı ısı değiştiriciler veya metal katkılar kullanılmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, su düşük maliyet, yüksek özgül ısı ve kolay erişilebilirlik avantajlarına sahipken, FDM daha yüksek enerji yoğunluğu ve sabit

sıcaklıkta depolama avantajı sunmaktadır. Deneysel sistem özelinde RT50 ile suyun kıyaslanması, FDM'nin kesikli reaktör çevrimlerinde daha uzun süreli enerji desteği sağladığını ve tepe yük kaydırma uygulamalarında daha etkin olduğunu göstermektedir. Bu nedenle FDM tabanlı çözümler, suyun eksikliklerini tamamlayarak enerji depolama teknolojilerinde giderek daha önemli bir alternatif haline gelmektedir.

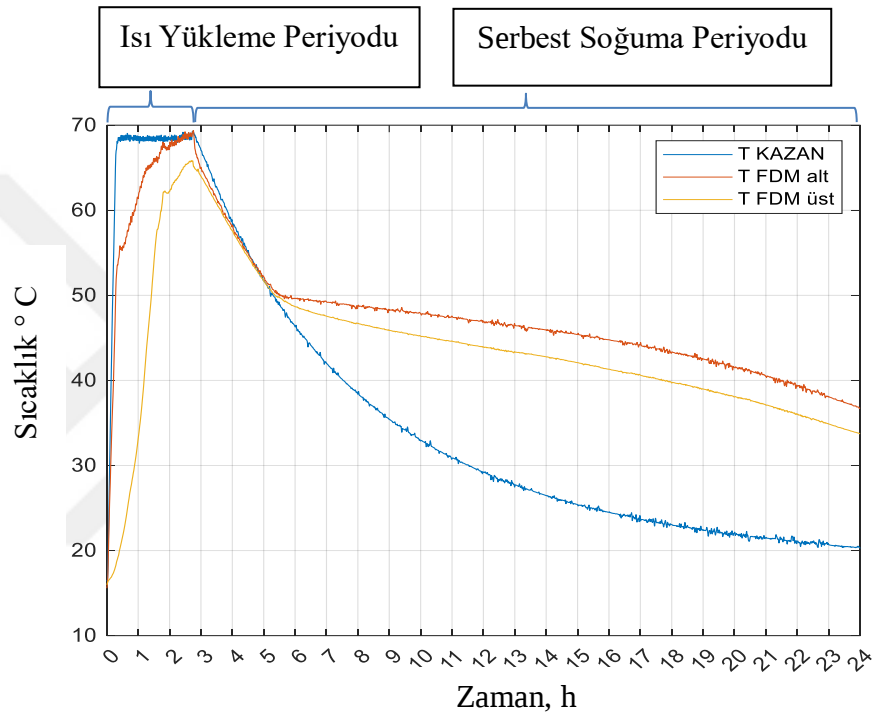


Şekil 3.4. Sıcaklığa bağlı olarak fdm ve su arasındaki ısı depolama karşılaştırması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Isı Yükleme ve Serbest Soğuma Deneyleri

Bu bölümde, sistemin ısı yükleme ve soğuma süreçlerindeki sıcaklık tepkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney süreci boyunca sisteme kontrollü ısı girişi uygulanmış ve ısı girişi kesildikten sonra sistemin serbest soğuma durumundaki sıcaklık davranışı incelenmiştir.

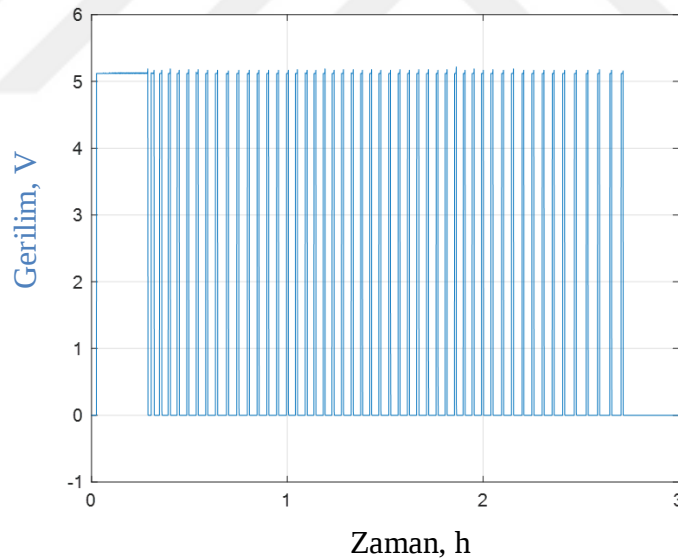


Şekil 4.1. Durum 2 için ısı yükleme ve soğuma periyotlarında sıcaklıklar

Şekil 4.1’de DURUM-2 şartlarında yapılan deneysel çalışmaya ait 24 saatlik bir süreç boyunca ısı yükleme ve soğuma periyotlarında kazan suyu ve FDM sıcaklıklarının değişimi verilmiştir. Pompa vasıtasıyla kazandan çıkan sıcak su önce FDM bataryasına ardından kesikli reaktöre ulaşmış ve tekrar kazana dönmüştür. Isıtma periyodunda kazan suyu sıcaklığı kısa sürede $68 \pm 1^\circ\text{C}$ bandına girmiş ve PID kontrolcü tarafından bu bant içerisinde tutulacak şekilde ısıtıcı ile ısı girişi sağlanmıştır. FDM bataryası içerisindeki ısı değiştiricisi sayesinde FDM’ye ısı girişi sağlanmış ve FDM önce ısı değiştiriciye yakın bölgelerden başlamak üzere ergimiştir. Yaklaşık 3 saat kadar süren ısı yükleme periyodu sonunda ısı değiştiricisine yakın bölgelerde ergime tamamlanmış ve FDM sıcaklığı 68°C seviyesine ulaşmıştır. Isı değiştiricisinden uzak bölgelerde ise daha geç bir sıcaklık artışı görülmüş ancak ısı yükleme periyodunun sonunda sıcaklık 65°C ’ye kadar yükselmiştir.

Bu durum FDM bataryasında faz değişiminin neredeyse tamamlandığını ve ısı yükleme işleminin bittiğini göstermektedir.

Isı yükleme periyodunun ardından sistemdeki pompa ve ısıtıcı kapatılmış ve sistem soğumaya bırakılmıştır. Yaklaşık 21 saat kadar süren soğuma periyodu boyunca kazan suyu sıcaklığı hızlı bir şekilde düşerken bu periyodun sonunda 20 °C seviyesine ulaşmıştır. Diğer taraftan FDM bataryasındaki sıcaklık ise faz değişiminin doğasında uygun bir şekilde azalma göstermiştir. Soğuma periyodunun başlangıcında su ile FDM sıcaklıkları aynı hızda azalırken 51 °C sıcaklık seviyesinden itibaren FDM sıcaklığındaki azalma hızı keskin bir şekilde düşmüştür. Bu esnada başlayan faz değiştirme olayı sayesinde FDM ortama ergime ısısını vermiş ve sıcaklığın suya nazaran yüksek seviyede kalmasını sağlamıştır. FDM'nin ısı değiştiricisine yakın olan bölgelerinde sıcaklık daha yüksek seviyede kalırken uzak bölgelerde ise yaklaşık 4 °C düşük seviyede seyretmiştir. Soğutma periyodunun sonunda ise FDM sıcaklığı alt tarafta 37 °C ve üst tarafta 33 °C seviyesinde kalmıştır. Süreç sonunda bile FDM sıcaklığı su sıcaklığından ortalama olarak 15 °C daha yüksek seviyede kalabilmiştir.



Şekil 4.2. Isıtma periyodunda ısıtıcının devreye girme aralıkları

Şekil 4.2'de ise ısı yükleme periyodu boyunca ısıtıcının devreye girdiği aralıkların süresini gösteren zaman-gerilim değişimi gösterilmektedir. PID kontrolcüsü ile devreye alınan veya kapatılan ısıtıcı elektrik devresine yerleştirilmiş olan bir gerilim dönüştürücüsü sayesinde ısıtıcı devresi açıldığında 5 V çıkış sinyali alınmaktadır. Bu sayede ısıtıcının devrede kalma süresi takip edilebilmektedir.

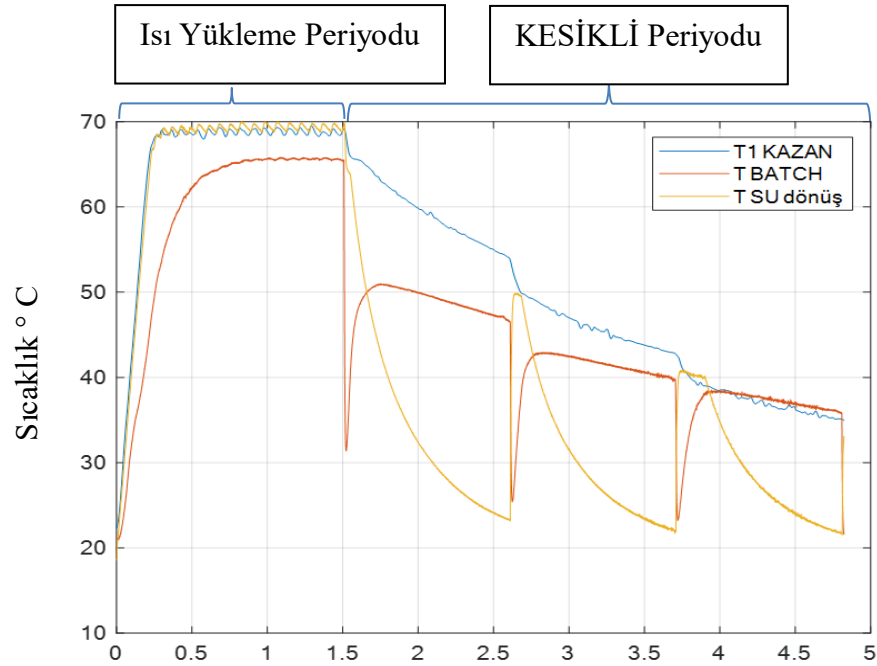
Şekil 4.2 incelendiğinde başlangıçta ısıtıcı sürekli devrede kalmıştır. Yaklaşık 20 dakika bu süreç devam etmiştir. Ardından kazan suyu sıcaklığı set değeri olan 68 °C seviyesine ulaştığında ısıtıcı kapatılmış ardından hem FDM hem de çevreye olan ısı kayıpları yüzünden kazan suyu sıcaklığı azalmaya başladığında ısıtıcı tekrar devreye alınmıştır. Bu süreç tamamen PID kontrolcüsü tarafından kontrol altında tutulmuştur.

Aşağıda verilen kod bloğu ile MATLAB’da 4.5 V’tan daha büyük olan veri sayısı tespit edilmiş ve ardından dakika türünden ısıtıcının devrede kaldığı süre hesaplanmıştır. Şekil 4. 2’de sunulan veriler dikkate alındığında ısıtıcının 44 dk boyunca devrede kaldığı görülmüştür.

- series=b(:,6);
- mask = series > 4.5;
- filtered_data = series(mask);
- count = sum(mask);
- sure=count/2/60

4.2. Durum-1 Deneyleri

DURUM-1 deneyleri boyunca sistem FDM desteği olmadan ve tamamen ilk halinde çalıştırılmıştır.



Şekil 4.3. Durum-1 için ısı yüklemesi ve kesikli periyotlarında sıcaklık değişimi

Şekil 4.3 incelendiğinde ısı yükleme periyodunun yaklaşık 1.5 saat olduğu ve bu sürenin sonunda sistemin kararlı hale geldiği anlaşılmaktadır. Sürecin sonunda kazan suyu sıcaklığı 68 °C olan set sıcaklığına ulaşmıştır. Isı yükleme periyodunun sonunda kesikli reaktör içerisine 1.2 L su ilave edilmiş ve karıştırıcı çalıştırılmıştır.

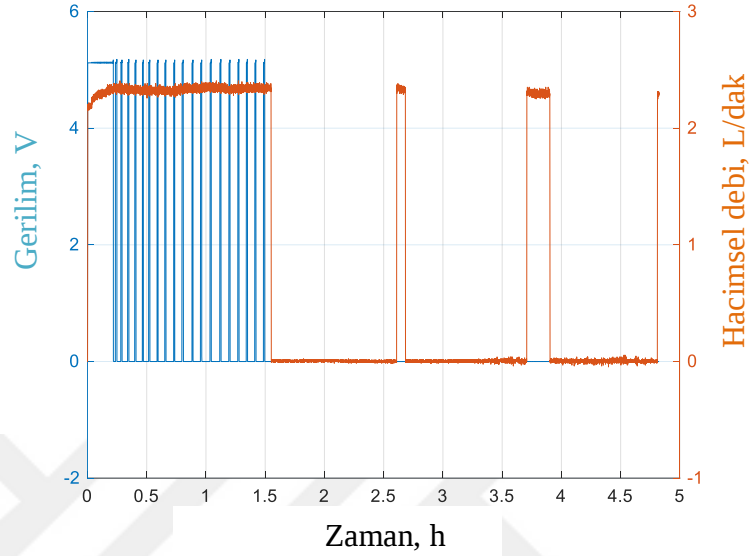
Bu noktadan önce kesikli reaktör içerisinde sadece hava bulunmakta ve hava sıcaklığı ölçümü (T KESİKLİ) yapılmakta iken kesikli periyodunda birer saatlik aralar ile reaktöre yükleme yapılmaktadır. Kesikli periyodu boyunca ısıtıcı tamamen devre dışı bırakılmış böylece DURUM-1 ve DURUM-2 şartları karşılaştırılarak FDM bataryasının kesikli reaksiyonlardaki ısı etkileşimleri üzerindeki etkileri ortaya konmaya çalışılmıştır. Kesikli periyodu boyunca kazandaki suyun (T KAZAN) ve reaktörden çıkan suyun (T SU dönüş) sıcaklığı ölçülmektedir.

Şekil 4.3 incelendiğinde 1.5 saatlik ısı yükleme periyodu biter bitmez yapılan 1.2 L su ilavesi, kesikli reaktör içerisindeki sıcaklığı aniden düşürmüştür. Kesikli reaktöre alınan su sıcaklığı yaklaşık 20 °C olmasına rağmen reaktör içerisinde sıcaklık hızlı bir şekilde artmıştır.

Reaktöre alınan 1.2 L hacmindeki su bir reaksiyon maddesini simüle etmektedir. Bu deney senaryosunda amaç reaktör içerisini 37.5 °C seviyesinde tutarak reaksiyonun gerçekleşmesini sağlamak şeklinde tasarlanmıştır. İlk su alımında reaktör sıcaklığı 37.5 °C seviyesine ulaşır ulaşmaz pompa durdurulmasına rağmen kazan suyu sıcaklığı yüksek seviyede olduğu için kesikli sıcaklığı 51 °C'ye çıkmıştır ancak soğumaya bırakılan reaktör sıcaklığı 1 saatin sonunda 47 °C seviyesine düşmüştür. Ardından kesikli boşaltılmış ve ikinci kesikli işlemine geçilmiştir. Yine 1.2 L su ilavesi yapılmış, kesikli içerisindeki su sıcaklığı aniden düşmüştür. Pompa bir süre çalıştırılmış ve kesikli sıcaklığı 37.5 °C'ye ulaştığında pompa kapatılmıştır. Sıcaklık ikinci kesikli işlemde de bir miktar artmış ve yaklaşık 43 °C'ye ulaştıktan sonra kesikli sıcaklığı düşmüştür. 1 saatlik beklemin ardından reaktör boşaltılmış ve yeniden 1.2 L su ile doldurulduğunda kesikli sıcaklığı 38 °C'ye ulaşmış ve pompa kapatıldıktan sonra kesikli sıcaklığı azalmaya başlamıştır.

Üçüncü kesikli işleminin ardından yapılan denemelerde kesikli sıcaklığı 37.5 °C seviyesine çıkamadığı için deney durdurulmuştur. Şekil 4.3'te ise aynı süre boyunca hem pompa hem de ısıtıcının devreye girdiği bölümleri gösteren veriler sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde ısı yükleme periyodunda ısıtıcı aralıklı olarak devreye girmiş ancak

yukarıda da belirtildiği üzere kesikli periyodunda tamamen devre dışı bırakılmıştır. Kazan suyunu sistemde sirküle eden pompa ise ısı yükleme periyodunda sürekli olarak 2.3 L/dak hacimsel debide çalışırken kesikli periyodundan her yüklemenin sadece başlangıç kısmında çalışmıştır.



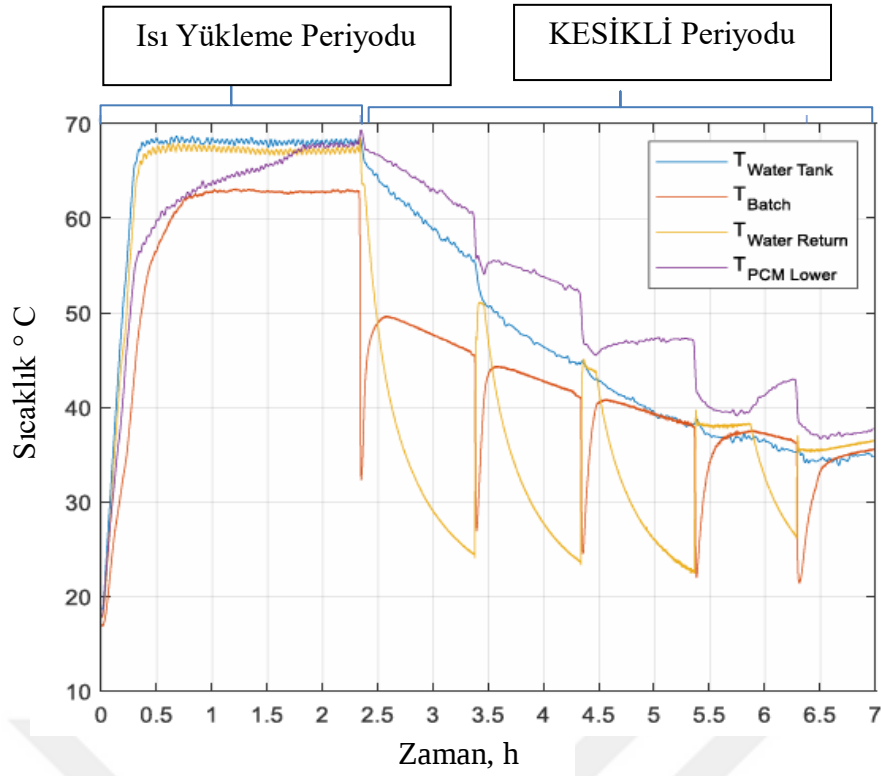
Şekil 4.4. Durum-1 için ısıtıcı ve pompanın devreye girme aralıkları

Şekil 4.4'te görülen ısıtıcının devreye girdiği süre toplam 23.1 dakikadır ve bu süre tamamen ısı yükleme periyodundadır. Bu sürenin sonunda birinci kesikli işlemi için kısa süreli pompa çalışmaya devam etmiş ardından kapatılmıştır. Daha sonrasında ikinci ve üçüncü kesikli içinde pompa kısa süreli çalıştırılarak kazan suyunun kesikli reaktörde dolaştırılması sağlanmıştır.

DURUM-1 deneyleri sonunda genel olarak 1 saatlik ısı yükleme periyodunda ısıtıcı 23.1 dak devrede kalırken toplamda üç adet kesikli prosesi tamamlanmıştır. Her proses 1 saat sürmüş ve son olarak sistem kesikli reaktörün 37.5 °C sıcaklık seviyesine çıkmasını sağlayamadığı için deney tamamlanmıştır.

4.3. Durum-2 Deneyleri

Bu deneylerde sisteme FDM bataryası ilave edilmiş ve ısı yüklemesi yapılmıştır. Isı girdisinin uygulanması ve kesilmesiyle akışkanın sistem içerisindeki dolaşımı belirli aralıklarla sürdürülmüştür. Bu kesikli çalışma sayesinde sistemin farklı periyotlar altındaki sıcaklık değişimleri ve termal tepkisi incelenmiştir.



Şekil 4.5. Durum-2 için ısı yüklemesi ve kesikli periyotlarında sıcaklık değişimi

DURUM-1 deneyleri tamamlandıktan sonra kazan ile kesikli reaktör arasına FDM bataryası yerleştirilmiş ve kazandan çıkan suyun önce FDM bataryasına ulaşması sağlanmıştır. Burada FDM'ye ısı yüklenmiş ardından kazan suyu reaktörde dolaştırılmış ve son olarak tekrar kazana geri sirküle edilmesi sağlanmıştır. Bu kurulum sayesinde oluşturulan DURUM-2 deneylerine başlanmıştır.

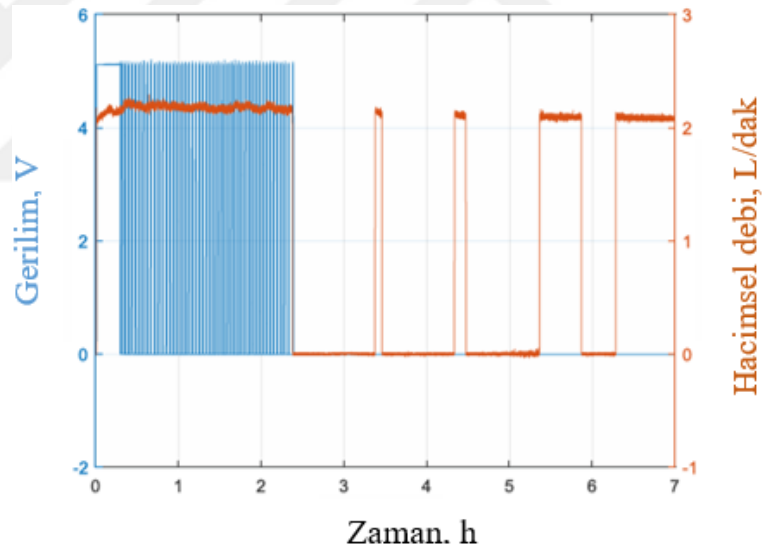
DURUM-2 deneylerinde sisteme ilave edilen FDM bataryası bir ısı yük olarak davrandığı için yalnızca kazan ve reaktörden oluşan sistemin değil aynı zamanda FDM bataryasının da ısı dengeye gelmesi süresi boyunca ısı yüklemesi periyodunun tamamlanması sağlanmıştır. Dolayısıyla ısı yüklemesi periyodu uzamış ve Şekil 4.5'ten de görüleceği üzere 3 saat sürmüştür. Bu süre zarfında kazan suyu (T_{KAZAN}) ve geri dönüş suyu sıcaklığı ($T_{SU dönüşü}$) sıcaklıkları hızlı bir şekilde kararlı hale gelmiş ancak FDM bataryasındaki FDM sıcaklığı daha geç kararlı hale ulaşmıştır.

Bu durumun nedeni FDM'nin ısı iletim katsayısının düşük olmasıdır. FDM bataryasındaki ısı değiştiricisine yakın bölgelerde FDM hızlı bir şekilde sıvı faza geçerken ısı değiştiriciden uzaklaştıkça FDM'nin sıvı faza geçme süresi uzamakta ve bu durum sistemin daha uzun süreli çalışmasına ve enerji giderlerinin artmasına neden olmaktadır.

Isı yüklemesi periyodunun ardından sistemdeki ısıtıcı kapatılmış ve DURUM-1'deki aynı şartlarda reaktöre 1.2 L su ilave edilmiştir. Reaktördeki sıcaklık ($T_{KESİKLİ}$)

aniden düşmüş ve çok kısa süre içerisinde 37.5 °C sıcaklık seviyesine ulaşmıştır. Bu esnada pompa da kapatılarak kesikli reaktör soğumaya bırakılmıştır. Reaktördeki sıcaklık yaklaşık 49 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra sıcaklık düşmüş ve 1 saatlik kesikli sürecinin ardından reaktördeki su boşaltılmıştır. İkinci kesikli işlemi için yine 1.2 L su ilavesi yapılmış ve Şekil 4.5'te görüldüğü üzere kısa süreli pompa çalıştırılmış ve reaktördeki sıcaklık artmaya başlamıştır. İkinci proseste reaktör içerisindeki sıcaklık 45 °C seviyesine ulaşarak azalmaya başlamış ve yine 1 saatin ardından reaktör boşaltılmıştır. Üçüncü kesikli işlemi başlatılmış ve reaktöre ilave edilen su kısa sürede 42 °C sıcaklığa ulaşarak bir saatlik beklemenin ardından dördüncü kesikli prosesi başlatılmıştır.

Bu noktada DURUM-1 çalışmalarında reaktör sıcaklığı 37.5 °C seviyesine ulaşamamış iken DURUM-2 çalışmalarında reaktör bu kritik seviyeyi aşmış ve dördüncü kesikli prosesi de tamamlanabilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde dördüncü yükleme çalışmasının da başarı ile tamamladığı FDM bataryasından alınan ısı enerjisi sayesinde kesikli reaktörde istenen sıcaklık seviyesine ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 4.6. Durum-2 için ısıtıcı ve pompanın devreye girme aralıkları

Yukarıda da değinildiği üzere ısı yükleme ve kesikli periyotlarında ısıtıcı ve pompanın devreye giriş çıkışları Şekil 4.6'da sunulmuştur. Bu şekilde de görülebileceği üzere 3 saatlik ısı yükleme periyodunda ısıtıcı belirli aralıklarla devreye girmiş ve periyodun sonunda tamamen kapatılmıştır. Bu sayede DURUM-1 deneyleri ile karşılaştırmalar yapılma imkânı yakalanmıştır. Isı yükleme periyodunun sonunda ise

toplam dört adet kesikli prosesinin başlangıçlarında pompa devreye alınmış, bu sayede FDM bataryasından alınan ısıнын kesikli reaktöre taşınması sağlanmıştır.

Isı yükleme periyodunda ısıtıcının devreye girdiği süre, hazırlanan MATLAB programında 46.2 dak olarak tespit edilmiştir. Bu durumda DURUM-1’de görülen 23.1 dk’dan çok daha uzun bir süre elektrik enerjisi harcandığı ve bu sayede elde edilen ısııl enerji ile FDM’ye ısıı yüklemesinin yapıldığı açıktır. DURUM-1 ile karşılaştırıldığında sistem tarafından harcanan enerjinin arttığı ancak tamamlanabilen kesikli proses sayısının da arttığı görülmektedir. Bu iki duruma ait enerji tüketim ve maliyet karşılaştırmaları ise bir sonraki başlıkta analiz edilecektir.

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan ısıı değiştiricisi oldukça büyük yüzey alanı ve çok sayıda kanatçığa sahiptir. Dolayısıyla ısıı transfer performansı, burada kullanılan batarya için uygundur. Şekil 4.5’te verilen deneysel çalışmaları kullanılan ısıı değiştiricisinin aynısından ikinci bir tanesinin de sisteme ilave edilmesi ile tekrarlanmış ve aynı ısıı yükleme ve kesikli proses çıktıları elde edilmiştir. Dolayısıyla burada kullanılan ısıı değiştiricisi ile oluşan FDM ergime işleminin kabul edilir düzeyde performans sağladığı açıktır. Ancak kullanılan FDM bataryasının performansını artırmak için alternatif tasarımlar üzerinde durulabilir.

4.4. Enerji Tüketimi ve Maliyet Karşılaştırmaları

Bu tez çalışmasında kurgulanan iki farklı senaryonun çıktılarını karşılaştırmak için öncelikle bu iki senaryoda harcanan enerjiler hesaplanmıştır. Isıı yükleme periyodu sistemin ana enerji tüketim kalemi olduğundan bu çalışmada ısıtıcının tükettiğı enerjiler üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Sistemde kullanılan ısıtıcı 3 kW gücündedir. Bu ısıtıcının iki senaryoda sebep olduğu tüketimler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Durum-1 ve Durum-2’de ısıtıcının tükettiğı elektrik enerjisi

	Çalışma Süresi	İşlem	Sonuç
DURUM-1	23.1 dak	$3(\text{kW}) \times 23.1/60 \text{ (h)}$	1.155 kWh
DURUM-2	46.2 dak	$3(\text{kW}) \times 46.2/60 \text{ (h)}$	2.310 kWh

Bu sonuçlar incelendiğinde DURUM-2’de sisteme ilave edilen FDM bataryasının ısı yükünün enerji tüketimini önemli seviyede artırdığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4.2’de, ticari kullanıcılar için hem tek zamanlı hem de üç zamanlı tarifeler kapsamında kWh başına maliyetler verilmiştir. Üç zamanlı tarife; gündüz, puant (akşam) ve gece dönemlerini içermektedir. Tablo 4.2’de görüldüğü üzere, vergi ve fonlar dâhil olmak üzere ticari kullanıcılar için tek zamanlı tarife elektrik birim maliyeti 4.48 TL kWh⁻¹ (0.106 \$ kWh⁻¹) iken, üç zamanlı tarife gece döneminde bu değer 2.75 TL kWh⁻¹ (0.065 \$ kWh⁻¹) seviyesine düşmektedir.

Tablo 4.2. Tek zamanlı ve üç zamanlı tarifeler kapsamında ticari kullanım için birim elektrik fiyatları

		Vergi ve Fonlar Dahil Fiyat(TL kw h^{-1})
Tek Zamanlı Tarife		4.48
Üç Zamanlı Tarife	Gündüz-Normal çalışma saatleri	4.52
	Puant (akşam)-Talebin en yüksek olduğu saatler	6.73
	Gece-Talebin en düşük olduğu saatler	2.75

Bu şartlarda Tablo 4.2 ile verilen enerji tüketimlerinin DURUM-1’in tek zamanlı ve DURUM-2’nin üç zamanlı tarife çalıştırılması sonucu ortaya çıkan maliyet karşılaştırması ise Tablo 4.3’te sunulmuştur.

Tablo 4.3. Durum-1 ve Durum-2 için ısıtıcıya ait elektrik maliyeti

	Enerji tüketimi (kWh)	Tek zamanlı tarife (TL/kWh)	Üç zamanlı tarife (TL/kWh)	Enerji maliyeti (TL)	Gerçekleşen Kesikli sayısı	Birim kesikli maliyeti (TL)
DURUM-1	1.155	4.48	-	5.17	3	1.72
DURUM-2	2.310	-	2.75	6.35	4	1.59

Tablo 4.3 değerlendirildiğinde ise bu tez çalışmasında kurgulanan iki farklı durumun sistemin enerji maliyetleri üzerinde önemli değişime neden olacağı anlaşılmaktadır. DURUM-2’de sisteme ilave edilen FDM bataryasının toplamda enerji tüketimini artırdığı ancak üç zamanlı tarife kullanılması sayesinde gece depolanan enerjinin sabah 08:00’da devreye alınan bir tesiste rahatlıkla kullanılabileceği ve bu sayede enerji maliyetinin birim kesikli prosesi için 1.72 TL seviyesinden 1.59 TL’ye düşürülebileceği görülmektedir. FDM bataryası sayesinde depolanan enerji Tablo 4.3’ten de görüleceği üzere uzun süre korunabilmektedir. Dolayısıyla bu tez çalışmasındaki boyutlara yakın bir sistemin yaklaşık 03:00’da devreye girmesi ve 06:00’a kadar ısı yüklemenin tamamlanması ve 08:00’da iş başı yapan tesiste ise artan kesikli sayısı ile sistemin çalıştırılmasının önemli ekonomik avantajlar sağlayacağı görülmüştür.

Enerji maliyetlerindeki %8’lik azalma, kesikli başına maliyetlerin DURUM-1 (1.72 TL – 0.041 \$) ile DURUM-2 (1.59 TL – 0.037 \$) arasında karşılaştırılmasıyla hesaplanmış olup, üç zamanlı tarife kapsamında enerji kullanımının gece saatlerine kaydırılmasının ekonomik avantajını ortaya koymaktadır. Analiz, Türkiye’de Haziran 2025 itibarıyla geçerli olan enerji tarifeleri ve vergileri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda DURUM-1, 4.48 TL kWh⁻¹ (0.11 \$ kWh⁻¹) değerindeki sabit tek zamanlı tarifeyi kullanırken, DURUM-2 ise 2.75 TL kWh⁻¹ (0.043 \$ kWh⁻¹) seviyesindeki gece tarifesinden yararlanmaktadır.

Isıtıcının enerji tüketimi, 3 kW’lık nominal gücü ve 23.1 dakika (DURUM-1) ile 46.2 dakika (DURUM-2) olan çalışma süreleri esas alınarak hesaplanmıştır. Metodoloji, her iki durumda da benzer kesikli işletim koşullarını varsaymakta ve ısıtma yüklerinin gece saatlerinde tamamlanmasının pik yük kaydırımı yoluyla maliyetleri nasıl optimize

ettiğine odaklanmaktadır. Bununla birlikte, kesikli sayısının artırılması veya daha büyük reaktörlerin kullanılması gibi ölçek büyütme senaryoları, gelecekte elde edilecek tasarrufları etkileyebileceğinden, verimliliğin korunması ve ısı kayıplarının en aza indirilmesi için FDM bataryasının hassas bir şekilde tasarlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Öte yandan, önerilen FDM ısı bataryası sisteminin sunduğu enerji maliyeti tasarruflarının ölçeklenebilir olması, sistemi geniş bir endüstriyel kesikli proses yelpazesinde uygulanabilir kılmakta ve önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada gösterildiği üzere, FDM entegrasyonu daha düşük maliyetli gece elektriğinin etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımakta; böylece tesislerin pik yük kaydırma stratejileri aracılığıyla enerji harcamalarını ve işletme maliyetlerini azaltmasına yardımcı olmaktadır. Bu özellik, özellikle üç zamanlı elektrik tarifi gibi değişken tarife yapıları altında büyük önem taşımaktadır. Kesikli operasyonlarında ısı yüklerinin etkin bir şekilde yönetilmesi sayesinde FDM sistemi, farklı proses türlerine özgü geometrik ve ısı gereksinimleri karşılayacak şekilde özelleştirilebilmektedir.

Sistemin sağladığı faydalar, ürün kalitesi ve proses güvenilirliği açısından kararlı sıcaklık kontrolü ile enerji verimliliğinin kritik olduğu endüstrilerde daha belirgin hâle gelmektedir. Bu bağlamda kimya, ilaç ve gıda proses endüstrileri başlıca uygulama alanları olarak öne çıkmaktadır. FDM ısı bataryasının sıcaklık profillerini dengeleme ve operasyonel esnekliği destekleme kabiliyeti, geçici ısı yükleri ve ısı verimsizlikleriyle sıklıkla karşılaşılan Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörleri (CSTR) ve Karıştırmalı Tank Reaktörleri (STR) gibi büyük ölçekli reaktörler için sistemi özellikle uygun hâle getirmektedir. Ayrıca sistemin modüler yapısı ve uyarlanabilirliği, farklı çalışma koşullarına ve sıcaklık aralıklarına (örneğin 20 °C–70 °C) sahip reaktörlerde kullanılmasına olanak tanıyarak, çeşitli proses ortamları için geçerliliğini artırmaktadır. Gelecek çalışmalar, FDM DED tekli ısı enerji depolama (TED) sistemlerinin bu endüstriyel alanlardaki pratik uygulamalarını daha ayrıntılı inceleyen gerçek saha örneklerini içerebilir.

Bu çalışma, FDM tabanlı TED kullanılarak etkin pik yük kaydırımı sayesinde kesikli proses enerji maliyetlerinde %8'e varan bir azalma sağlanabileceğini göstermektedir. Ancak uzun vadeli ekonomik uygulanabilirlik; sistemin ölçeklenebilirliği, tarife değişkenliği ve farklı işletme ölçeklerindeki ısı kayıplar gibi faktörlere bağlıdır. Büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda performansın korunabilmesi

için FDM sisteminin hassas biçimde boyutlandırılması ve işletme parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Elde edilen bulgular, FDM entegrasyonunun özellikle akıllı tarife stratejileri ve dikkatli ısıl yönetim ile birlikte kullanıldığında ekonomik açıdan uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ancak ilgili kimya tesisinde kullanılan reaktörün büyüklüğü ve üretilen ürünün nasıl bir kesikli prosesi ile elde edildiği önemli birer parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Tesis büyüdükçe ısıl yük ve proses süresi uzadıkça ısıl kayıplar artmaktadır. Bu durumda FDM bataryasının hassas bir tasarım sonucunda boyutlandırılması gerektiği ve sistem çalışma parametrelerinin doğru seviyede tutulması gerektiği açıktır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, faz değişim malzemesi (FDM) ısı bataryasının entegrasyonu yoluyla kesikli proseslerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmanın özgünlüğü, FDM tabanlı ısı enerji depolama (TED) sisteminin bir model kesikli reaktör sistemi içerisinde uygulanmasında yatmaktadır. Bu sistem, önemli ölçüde enerji tasarrufu ve operasyonel avantajlar sağlamıştır. Önerilen yapı, sıcaklık kararlılığını artırmakta, ekipman ömrünü uzatmakta ve pik yük kaydırması sayesinde enerji tüketimini optimize etmektedir. Ayrıca düşük maliyetli gece elektriğinin kullanılmasıyla proses başına enerji maliyeti 1,72 TL'den 1,59 TL'ye düşmüştür. Tasarım ölçeklenebilir olup farklı reaktör boyutlarına ve ısı taleplere uyarlanabilir niteliktedir; güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla da uyumludur. Elde edilen bulgular, sistemin farklı endüstriyel sektörlerde sürdürülebilir enerji yönetimi için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Harici bir FDM ısı bataryası, ceketli bir kesikli reaktör ile deneysel olarak entegre edilmiş ve sabit işletme koşulları altında değerlendirilmiştir. Birleşik sistem, reaktör sıcaklıklarını kararlı bir şekilde korurken, ısıtma gereksiniminin bir kısmının gündüz işletiminden düşük talep dönemlerine kaydırılmasına olanak sağlamıştır. Bu konfigürasyon, reaktör kabı veya proses dizisinde herhangi bir değişiklik gerektirmeden, kesikli zamanlaması ile elektrik arzının zamanlaması arasında ısı bir ayrışma sağlamıştır.

FDM destekli durumda gözlemlenen kısa vadeli sıcaklık dalgalanmalarının azalması, reaktör duvarındaki ısı çevrimlerin potansiyel olarak azalabileceğine işaret etmekte olup, bu etki ayrıntılı olarak nicelendirilmemiştir. FDM ünitesinin şarj edilmesi nedeniyle sisteme sağlanan toplam ısı enerji artmasına rağmen, düşük maliyetli gece elektriğinin kullanılması ve üç zamanlı tarife yapısı sayesinde kesikli başına özgül enerji maliyeti 1.72 TL (0.041 \$) seviyesinden 1.59 TL (0.037 \$) seviyesine düşmüş ve yaklaşık %8 oranında bir azalma sağlanmıştır.

Standart bileşenlerden inşa edilen, modüler ve harici olarak monte edilen FDM ünitesi, benzer sıcaklık aralıklarında çalışan diğer kesikli reaktörlerine de benzer ısı bataryalarının sonradan entegre edilebileceğini göstermektedir.

Çalışmada deneysel odak ve açıklık sağlamak amacıyla su debisi, ısı değiştirici geometrisi ve ısı yüklem döngüleri gibi bazı işletme parametreleri sabit tutulmuştur. Bu

kontrollü tasarım, FDM ısı bataryasının dıştan entegre edildiği bir sistemde temel performans ve ekonomik etkinin doğrudan değerlendirilmesine olanak tanımıştır. Ancak, sistemin daha kapsamlı anlaşılabilmesi için ileri araştırmalara ihtiyaç vardır. Gelecek çalışmalar, değişken akış hızlarının, farklı ısı değiştirici konfigürasyonlarının, pompa enerji tüketiminin ve gizli-duyulur ısı transferinin nicel analizlerinin etkilerini incelemelidir. Bu analizler, FDM tabanlı TED sistemlerinin optimizasyonunu geliştirerek endüstriyel uygulama potansiyelini artıracaktır.

Başlıca sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- FDM ısı bataryası, kesikli reaktör sistemine başarıyla entegre edilerek TED performansını artıran ve enerji talebini etkin şekilde yöneten uygulanabilir bir çözüm sunmuştur.
- FDM birimi, döngüsel ısı sistemlerde süreç tekrarlanabilirliği ve reaksiyon kalitesi açısından kritik öneme sahip olan sıcaklık kararlılığını önemli ölçüde iyileştirmiştir.
- Sistem, enerji temini ile proses zamanlaması arasındaki ısı bağı kopararak farklı endüstriyel planlara uyum sağlayabilen operasyonel esneklik göstermiştir.
- Sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak reaktör yapısındaki ısıl gerilimi düşürmüş, bu da ekipman ömrünü uzatma ve bakım maliyetlerini azaltma potansiyeli yaratmıştır.
- Pik yük kaydırması başarıyla gerçekleştirilmiş; düşük talep dönemlerinde ısı depolanarak yüksek talep saatlerinde kullanılmış ve böylece şebeke üzerindeki yük azaltılmıştır.
- Modüler ve dıştan monte edilen FDM birimi, çekirdek proses mimarisi değiştirilmeden farklı reaktör konfigürasyonlarına ölçeklenebilir biçimde entegre edilebilir.
- Toplam ısı girişi artsa da, ekonomik analiz FDM'in düşük maliyetli gece şarjı sayesinde proses başına maliyetin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.
- Tasarım, güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla entegrasyona olanak tanıyarak karbon yoğunluğunu düşüren ve enerji bağımsızlığını artıran hibrit FDM-yenilenebilir enerji sistemlerine kapı açmaktadır.

Gelecek araştırmalar, güneş enerjisi ile FDM tabanlı TED sistemlerinin entegrasyonuna odaklanmalıdır. Fotovoltaik (PV) panellerin dirençli ısıtıcıları beslemesi veya güneş kolektörlerinin FDM’i doğrudan şarj etmesi gibi stratejiler, enerji özerkliğini ve sürdürülebilirliği artırabilir. Farklı güneş–FDM konfigürasyonlarının değeriendirilmesi, özellikle yüksek güneş potansiyeline sahip ve talep dalgalanmalarının yoğun olduğu bölgelerde önem taşımaktadır. Ayrıca, biyobazlı veya tuz hidratlı FDM’lerin kullanımı gibi farklı malzeme türlerinin ısıl güvenilirlik, çevrim dayanımı ve ömür performansı açısından incelenmesi gereklidir. Her FDM’in faz değışim özelliklerinin ve ısıl iletkenliğinin kapsamlı olarak değeriendirilmesi, kesikli reaktör uygulamaları için en uygun malzemenin seçilmesini sağlayacaktır.

Sonuç olarak, önerilen FDM ısı bataryası yapılandırması, kesikli proseslerde enerji verimliliğini artırmak için etkili ve ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır. Sistem; maliyet tasarrufu, sıcaklık kararlılığı ve sürdürülebilirlik açısından belirgin avantajlar sağlamaktadır. Malzeme seçimi, entegrasyon stratejileri ve büyük ölçekli uygulamalara yönelik araştırmaların devam etmesiyle FDM tabanlı TED teknolojilerinin, ısıya dayalı endüstriyel sistemlerin enerji dönüşümünde kilit bir rol üstlenmesi mümkündür.

KAYNAKÇA

- Abdelouadoud, Y., & Wellig, B. (2019). Batch process integration: Management of capacity-limited thermal energy storage by optimization of heat recovery. *Chemical Engineering Transactions*, 76, s. 1027–1032.
- Abdelouadoud, Y., Lucas, E., Krummenacher, P., Olsen, D., & Wellig, B. (2019). Batch process heat storage integration: A simple and effective graphical approach. *Energy*, 185, s. 804-218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.180>
- Agner, R., Ong, B. H., Stampfli, A., Krummenacher, P., & Wellig, B. (2022). A Graphical Method for Combined Heat Pump and Indirect Heat Recovery Integration in Non-Continuous (Batch) Industrial Processes. *Energies*, 15(8), s. 2829. doi:<https://doi.org/10.3390/en15082829>
- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., & Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), s. 615-628. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>
- Anastasovski, A. (2021). Design of heat storage networks for repeatable batch processes. *Energy Storage*, 3(2). doi:DOI: 10.1002/est2.220
- Anonim. (2003). 15.08.2013 tarihinde <http://www.erasmus.edu.tr>. adresinden alındı
- Anonymous. (2003). <http://www.novo.dk>. 08 15, 2013 tarihinde alındı
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), s. 1361-1368. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.026>
- Barnette, M., González-Portillo, L. F., & Abbas, R. (2023). Optimum integration of latent heat storage in a solar thermal system for industrial processes: In series or in parallel? *Applied Thermal Engineering*, 232, s. 121030. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121090>
- BOZCUK, S. (1986). Bitki Fizyolojisi. Hatipoğlu yayınevi.
- Castell, A., Belusko, M., Bruno, F., & Cabeza, L. F. (2011). Maximisation of heat transfer in a coil in tank PCM cold storage system. *Applied Energy*, 88(11), s. 4120-4127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.036>
- Castillo, E., Marty, A., & Condoret, J.-S. (2006). Enzymatic Catalysis in Nonconventional Media Using High Polar Molecules as Substrates. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 799(1), s. 206-211. doi:DOI:10.1111/j.1749-6632.1996.tb33202.x
- Cosin, M., Cabeza, L., & Boer, D. (2018). PCM in data center applications: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, s. 1853-1868.
- Cunha, J. P., & Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, 177, s. 227-238. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
- Çelik, A., Ceviz, M. A., Kara, Y. A., Mandev, E., Muratçobanoğlu, B., Afshari, F., & Manay, E. (2024). Thermal performance investigation of microencapsulated phase change material enhanced with graphene nanoplatelets in double-glazing

- applications. *Energy and Buildings*, 323, s. 114859. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114859>
- E, E., A. G., Kunter, B., Keskin, N., & Mehmetoğlu, Ü. (2007). Effect of ultrasound as abiotic elicitor on the production of trans-resveratrol in *Vitis vinifera* L. ECCE-6, (s. 987-988).
- Er, H. A., Alwi, S. R., Manan, Z. A., & Klemeš, J. J. (2022). Simultaneous retrofit of direct and indirect Heat Exchanger Storage Network (HESN) via individual batch process stream mapping. *Energy*, 261(125052).
- Fikiin, K. A., & Stankov, B. (2003). Phase change energy storage in food refrigeration and freezing: A review. *International Journal of Refrigeration*, 26(7), s. 735-749.
- Fogler, H. S. (2016). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (5th Edition). Prentice Hall / Pearson Education.
- Halford, C., & Boehm, R. (2007). Modeling of phase change material peak load shifting. *Energy and Buildings*, 39(3), s. 298-305. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.005>
- Hameed, G., Ghafoor, M. A., Yousaf, M., Imran, M., Zaman, M., Elkamel, A., . . . Olabi, A. (2022). Low temperature phase change materials for thermal energy storage: Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50, s. 101808. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101808>
- Jayathunga, D. S., Karunathilake, H. P., Narayana, M., & Witharana, S. (2024). Phase change material (PCM) candidates for latent heat thermal energy storage (LHTES) in concentrated solar power (CSP) based thermal applications — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Elsevier), 189, s. 113904. doi:DOI: 10.1016/j.rser.2023.113904
- Jouhara, H., & Khalid, D. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal management systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, s. 724-742.
- Kumar, N., Gupta, S. K., & Sharma, V. K. (2021). Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances. *Materials Today: Proceedings*, 44, s. 368-375.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. John Wiley & Sons.
- Lin, C.-Y., & Wang, L.-J. (2024). Optimization of heat management and utilization in batch processes: Targeting and over-time heat integration. *Journal of Cleaner Production*, 465, s. 142707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142707>
- Rashid, F. L., Dulaimi, A., Hatem, W. A., Al-Obaidi, M. A., Ameen, A., Eleiwi, M. A., . . . Hu, J. W. (2024). Farhan Lafta Rashid¹, Anmar Dulaimi^{1,2,3,*}, Wadhah Amer Hatem⁴, Mudhar A. Al-Obaidi^{4,5}, Arman Ameen^{6,*}, Muhammad Asmail Eleiwi⁷, Sarah Abbas Jawad⁸, Luís Filipe Almeida Bernardo⁹ and Jong Wan Hu^{10,1}. *Buildings*, 14(6), s. 1582. doi:10.3390/buildings14061582
- Royo, P., Acevedo, L., Arnal, Á. J., Díaz-Ramírez, M., García-Armingol, T., Ferreira, V. J., . . . López-Sabirón, A. M. (2021). Decision Support System of Innovative High-Temperature Latent Heat Storage for Waste Heat Recovery in the Energy-Intensive Industry. *Energies*, 14(2), s. 365.

- Soares, N., Costa, J., Gaspar, A., & Santos, P. (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59, s. 82-103. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>
- Sun, Y., Wang, S., Xiao, F., & Gao, D. (2013). Peak load shifting control using different cold thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 71, s. 101-114. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.026>
- Towler, G., & Sinnott, R. (2022). *CHEMICAL ENGINEERING DESIGN: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. ELSEVIER.
- Yeşilyurt, M. K., Nadaroglu, H., & Çomaklı, Ö. (2019). Materials and Selection Thereof for Encapsulated Phase Change Materials for Heat Transfer Applications. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 3(2), s. 16-22. doi:[10.1016/j.rser.2006.05.005](https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.05.005).
- Zhou, D., Zhao, C., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, s. 593-605. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>