

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FDM/GRAFİT MATRİS KOMPOZİT İLE GİZLİ ISI DEPOLAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esen ÇEBOĞLU

EKİM 2023

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FDM/GRAFİT MATRİS KOMPOZİT İLE GİZLİ ISI DEPOLAMA

Esen ÇEBOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 09 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 10 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan AYDIN

ORCID :

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yusuf YAZICI

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“FDM/Grafit Matris Kompozit ile Gizli Isı Depolama” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Termal enerji depolama, enerjinin etkin ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasına katkı sağlar. Enerjinin kısa sürede etkin bir şekilde depolanabilmesi için depolanacak sistem geometrisi ve yöntemi depolama sürecinin önemli parametrelerindendir.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, yatay konumlu silindirik depodaki FDM/Grafit matris kompozit halkalarının ısı depolaması ve geri kazanımı süreçleri takip edilerek; grafit matrislerin yığın yoğunluğu, ısı transfer akışkanı giriş sıcaklığı ve hacimsel debisinin depolama süresi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Çalışmam süresince tecrübelerini, bilgi birikimini ve yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Orhan AYDIN ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yusuf YAZICI’ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bu çalışmanın yürütülmesinde, deney düzeneğinin kurulum aşamasında ve deney süreçlerinde bilgi birikimini ve yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Mehmet SAĞLAM’a teşekkür ederim.

Aynı zamanda, hayatımın her anında yanımda maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen annem Saniye, babam Ali Metin, ablalarım Selda ve Melike’ye ve bu süreçte desteğini hiç eksik etmeyen Makine Yüksek Mühendisi Selda GÖZÜBÜYÜK’e ve Mehmet DEMİRTAŞ’a teşekkür ederim. Bu çalışmayı, zor anlarımda daima bana destek olan, sabır gösteren sevgili kardeşim Barış ÇEBOĞLU’na adıyorum.

Esen ÇEBOĞLU

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “FDM/Grafit Matris Kompozit İle Gizli Isı Depolama” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Orhan AYDIN ve eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yusuf YAZICI sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/10/2023

Esen ÇEBOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Enerji Depolama Yöntemleri.....	1
1.2. Termal Enerji Depolama	3
1.2.1. Termokimyasal Isıl Enerji Depolama	5
1.2.2. Duyulur Termal Enerji Depolama.....	6
1.2.3. Gizli Termal Enerji Depolama.....	9
1.3. Gizli Isı Termal Enerji Depolama (GITED) Sistemlerinde Faz Değiştiren Malzemeler.....	12
1.3.1. Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması	14
1.4. FDM'lerin Kullanım Alanları	19
1.5. Literatür Araştırması	20
1.6. Tezin Amaç ve Kapsamı	27
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	28
2.1. Test/Depolama Bölgesi	31
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	40
3.1. Isı Depolama (Erime) Davranışının İncelenmesi	40
3.1.1. Parafin Gizli Isı Termal Enerji Depolama Ortamı- 0 g/l	40
3.1.2. FDM/Grafit Matris Termal Enerji Depolama Ortamı: 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l	47
3.2. Geri Kazanım (Katılaşma) Sürecinin İncelenmesi.....	64
3.2.1. Parafin Depolama Ortamı, 0 g/l	64
3.2.2. FDM/Grafit Matris Depolama Ortamı	69
4. SONUÇLAR.....	82

5. ÖNERİLER.....	84
6. KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

FDM/GRAFİT MATRİS KOMPOZİT İLE GİZLİ ISI DEPOLAMA

Esen ÇEBOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Orhan AYDIN
2023, 88 Sayfa

Gizli ısı termal enerji depolama (GITED) teknolojileri sürdürülebilir ve temiz çevre/enerji gereksinimleri için önemli bir potansiyel olarak görülmektedir. GITED sistemlerinde, erime/katılaşma davranışı depolama performansını etkiler. Tez kapsamında, halkasal bir geometriye sahip faz değiştiren malzeme (FDM)/grafit matris termal enerji depolama (TED) sisteminin erime ve katılaşma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Yığın yoğunluğu (0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l), akışkan giriş sıcaklığı (erime: 75°C, 80°C ve 85°C; katılaşma: 20°C, 25°C ve 30°C) ve akışkan debi değerleri (erime: 100 l/sa, 190 l/sa ve 280 l/sa; katılaşma: 190 l/sa), incelenen çalışma parametreleridir. Faz değiştiren malzeme olarak parafin ($T_e = 49-56^\circ\text{C}$) kullanılmıştır. Farklı düzenlemelere sahip GITED ünitelerinin termal performansı yerel sıcaklık eğrileri, erime/katılaşma davranışı, erime/katılaşma süreleri ve enerji depolama oranı üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgular, FDM/grafit matris kompozit düzenlemelerinin termal enerji depolama/geri kazanım için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Gizli ısı depolama, Faz değiştiren madde, FDM/grafit matris kompozit, Silindirik depo

Master Thesis

SUMMARY

LATENT HEAT STORAGE WITH PCM/GRAPHITE MATRIX COMPOSITE

Esen ÇEBOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Orhan AYDIN
2023, 88 Pages

Latent heat thermal energy storage (LHTES) technologies are considered to be a significant potential for sustainable and clean environmental and energy requirements. In LHTES systems, melting/solidification behavior affects storage performance. Within the scope of this thesis, melting and solidification behaviors of a thermal energy storage system (TES) consisting of a phase change material (PCM)-graphite matrix with an annular geometry are experimentally investigated. Bulk densities (0 g/l, 25 g/l, 50 g/l, and 75 g/l), inlet fluid temperatures (melting: 75°C, 80°C, and 85°C; solidification: 20°C, 25°C, and 30°C), and different volumetric flowrates (melting: 100 l/h, 190 l/h and 280 l/h; solidification: 190 l/h) are working parameters examined. Paraffin is used as PCM with a phase change temperature range of 49-56°C. The thermal performance of LHTES units with different configurations is comparatively presented in terms of local temperature profiles, melting/solidification behavior, melting/solidification durations, and energy storage efficiency. The results indicate that PCM/graphite matrix composite configurations have significant potential for thermal energy storage and retrieval.

Key Words: Latent heat storage, Phase change material, PCM/graphite matrix composite, Tube-in-shell

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Enerji türüne göre depolama yöntemlerinin sınıflandırılması	2
Şekil 2. Termal enerjinin üç farklı yöntemle depolanması	3
Şekil 3. Termal enerji depolama sürecine ait temel süreçler	4
Şekil 4. Termokimyasal depolama süreçleri	5
Şekil 5. Hacim ısıtmada kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi örneği	7
Şekil 6. Kaya dolgulu duyulur ısı depolama evi	8
Şekil 7. Duyulur ve gizli ısı depolama yöntemlerinin sıcaklık-ısı depolama değişim grafiği	10
Şekil 8. FDM'lerin sınıflandırılması	15
Şekil 9. FDM'lerin termal iletkenliklerinin geliştirilmesi için uygulanan teknikler	18
Şekil 10. FDM ile güneş enerjisi depolama sisteminin basit bir örneği	19
Şekil 11. Deney düzeneğinin şematik görünüşü (a), uygulama görünüşü (b)	29
Şekil 12. Test bölgesi: parafin depolama ünitesi, (a) şematik resim, (b) uygulama resmi; FDM/grafit matris düzenlemesi, (c) şematik resim (d) uygulama resmi	32
Şekil 13. Referans deneylerde ticari parafinin halkasal depodaki katı faz doluluk oranı	34
Şekil 14. FDM/grafit matris blok üretim aşamaları; genişletilmiş grafit üretimi (1), grafit matris üretimi (2), FDM/grafit matris üretimi (3)	35
Şekil 15. Doğal pulsu grafit: genişletilebilir (a), genişletilmiş (b)	36
Şekil 16. Termoeleman yerleşimi: (a-b) parafin GITED, (c) parafin/grafit matris GITED	38
Şekil 17. Parafinin (0 g/l) ölçüm istasyonlarındaki yerel noktaların sıcaklık değişimleri, erime	42
Şekil 18. Parafinin (0 g/l) farklı ölçüm istasyonlarına ait yerel nokta sıcaklıklarının karşılaştırılması, erime	44
Şekil 19. Parafin ile gizli ısı depolama düzenlemesine ait küçük ölçekli test düzeneği (a), erime ara yüzey gelişimi (b)	46
Şekil 20. Parafin/grafit matrisin gizli ısı depolama düzenlemesine ait küçük ölçekli test düzeneği (a), yüzey sıcaklık alanı (b)	48
Şekil 21. FDM/Grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 25 g/l	50

Şekil 22.	FDM/Grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 50 g/l.....	51
Şekil 23.	FDM/Grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 75 g/l.....	52
Şekil 24.	FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 25 g/l.....	53
Şekil 25.	FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 50 g/l.....	55
Şekil 26.	FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 75 g/l.....	56
Şekil 27.	Farklı depolama ortamlarına ait toplam depolama erime süresine etkisi; (a) $Q=100$ l/sa, (b) $Q=190$ l/sa, (c) $Q=280$ l/sa.....	58
Şekil 28.	Farklı depolama ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının değişimi, akışkan giriş sıcaklığı etkisi: (a) $T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$, (b) $T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$, (c) $T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$	60
Şekil 29.	Farklı depolama ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının değişimi, debi etkisi: (a) $Q=100$ l/sa, (b) $Q=190$ l/sa, (c) $Q=280$ l/sa	61
Şekil 30.	Farklı depolama ortamları için depolanan gizli ısı miktarı.....	62
Şekil 31.	Farklı depolama ortamlarına ait enerji depolama oranı değişimi, debi etkisi: (a) $Q=100$ l/sa, (b) $Q=190$ l/sa, (c) $Q=280$ l/sa.....	63
Şekil 32.	Parafinin (0 g/l) ölçüm istasyonlarındaki yerel noktaların sıcaklık değişimi, katılaşma	65
Şekil 33.	Parafinin (0 g/l) farklı ölçüm istasyonlarına ait yerel nokta sıcaklıklarının karşılaştırılması, katılaşma	67
Şekil 34.	Farklı ölçüm istasyonlarına ait üçüncü yerel nokta sıcaklıklarının kutupsal grafik gösterimi	69
Şekil 35.	FDM/grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 25 g/l.....	70
Şekil 36.	FDM/grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 50 g/l.....	72
Şekil 37.	FDM/grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 75 g/l.....	73
Şekil 38.	FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 25 g/l.....	74
Şekil 39.	FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 50 g/l.....	76
Şekil 40.	FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 75 g/l.....	77
Şekil 41.	Farklı depolama ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının değişimi, akışkan giriş sıcaklığı etkisi: (a) $T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$, (b) $T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$, $T_{ag}=30^{\circ}\text{C}$	79
Şekil 42.	Akışkan giriş sıcaklıklarının farklı ortamlara ait geri kazanım süresine etkisi, $Q=190$ l/sa.....	80
Şekil 43.	Farklı depolama ortamları için geri kazanılan gizli ısı miktarı.....	81
Şekil 44.	Farklı depolama ortamlarına ait enerji geri kazanım oranı değişimi.....	81

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Duyulur termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan bazı malzemeler.....	7
Tablo 2. Farklı TED yöntemlerinin çeşitli performans faktörlerine göre kıyaslanması	11
Tablo 3. FDM’lerden beklenen özellikler.....	13
Tablo 4. Gizli ısı depolamada kullanılan organik ve inorganik maddelerin karşılaştırılması.....	15
Tablo 5. Bazı organik FDM'lere ait erime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri.....	16
Tablo 6. Bazı inorganik FDM'lere ait erime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri.....	16
Tablo 7. Bazı parafinlerin erime ve gizli ısı değerleri	17
Tablo 8. Yapılan bazı çalışmalar	24
Tablo 9. Kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri	31
Tablo 10. Bileşenlerin geometrik özellikleri	33
Tablo 11. Parafinin ve grafit matrislerin termofiziksel özellikleri.....	37

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c_p	: Özgöl ısı
ED	: Enerji depolama
FDM	: Faz değıştiren madde
GG	: Genişletilmiş grafit
GITED	: Gizli ısı termal enerji depolama
H_e	: Erime gizli ısısı
ITA	: Isı transfer akışkanı
k	: Isıl iletkenlik
L_k	: Katılma gizli ısısı
Q	: Hacimsel debi
t	: Zaman adımı
T	: Sıcaklık
T_{ag}	: Akışkan giriş sıcaklığı
$T_{aç}$	: Akışkan çıkış sıcaklığı
TED	: Termal enerji depolama
T_e	: Erime sıcaklığı
T_i	: İlk sıcaklık
T_k	: Katılma sıcaklık aralığı
ρ	: Yoğunluk
θ	: Radyal açı

1. GENEL BİLGİLER

Toplumların ekonomik, sosyal ve teknolojik kalkınmasında enerji önemli bir role sahiptir. Enerjiye olan talep, dünyadaki artan nüfus, toplumların konfor seviyesindeki artış ve büyüyen endüstriyelleşme ile paralel olarak artmaktadır. Dünya genelinde iklim değişikliği, savaş gibi sebeplerle etkili olan enerji krizlerinin enerji güvenliğinde meydana getirdiği riskler, ülkeleri enerji bağımsızlığı için kendi öz kaynaklarını etkin bir şekilde değerlendirmeye yönlendirmektedir. Bu doğrultuda, sürdürülebilir çevre ve temiz enerji gereksinimleri doğrultusunda yenilenebilir/temiz enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ülkeler için önemlidir.

Yenilenebilir/temiz enerji kaynaklarından (güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi vb.) enerji üretimi, güneş sistemindeki hareketlere bağlı olarak ortaya çıkan gece-gündüz oluşumu, mevsimsel değişimler, gel-git gibi doğa olayları sebebiyle, kesintilidir. Yenilenebilir/temiz enerji kaynakları ile üretilen enerjinin sürekli ve aynı güç seviyelerinde olmaması üretilen enerjinin toplam enerji talebine karşılık veremediği durumların (arz-talep dengesizliğinin) ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Yenilenebilir/temiz kaynaklarından sağlanan enerjinin sürdürülebilirliği ile arz-talep dengesinin sağlanması için enerji depolama önemlidir. Bu durum, yenilenebilir/temiz enerji kaynaklarının değerlendirilebilir olduğu periyotta verimli bir şekilde depolanması ve ihtiyaç halinde kullanımına yönelik araştırma ilgisini arttırmaktadır (Kozak & Kozak, 2012).

1.1. Enerji Depolama Yöntemleri

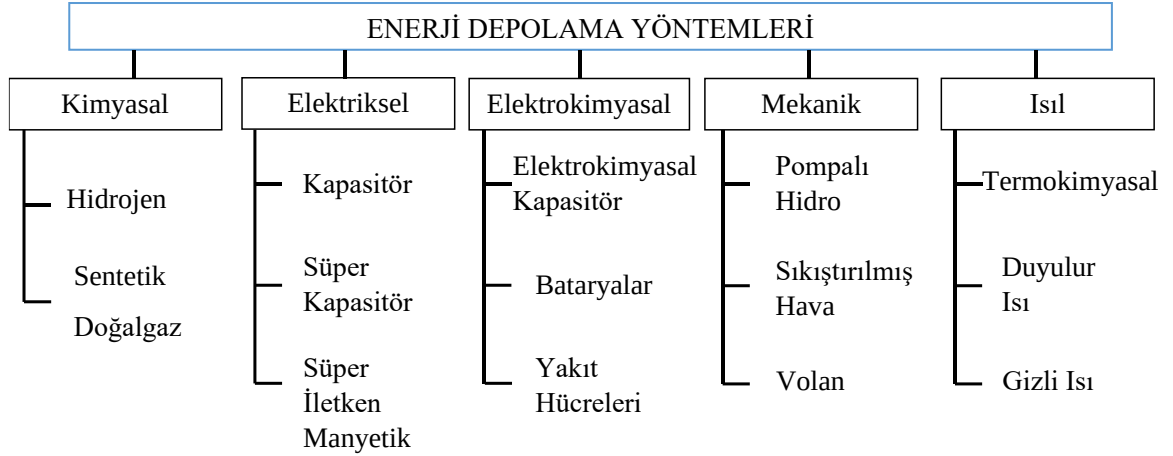
Enerji depolama, enerji kaynağının var olduğu bir periyotta depolanmasını ve talep/ihtiyaç durumunda ise depolanan enerjinin geri kullanımına imkân sağlayan bir süreci tanımlamaktadır. Enerji depolama ile enerji arz-talep arasındaki dengenin sağlanmasına önemli katkılar sunulmaktadır. Yenilenebilir/temiz enerji kaynaklarının kullanımında enerji sürekliliğinin sağlanarak hem enerji verimliliğinin iyileştirilmesi hem de yenilenebilir/temiz enerji kaynaklarının sahip olduğu potansiyelden en iyi şekilde faydalanılmasına imkân sağlanabilmesi için enerjinin depolanması oldukça önemlidir.

Enerji depolama sistemleriyle doğada var olan güneş, rüzgâr ve jeotermal gibi yenilebilir enerji kaynaklarından binalarda ısıtma-soğutma, elektrik ihtiyacı gibi temel gereksinimler çevre dostu yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Enerji depolama sistemlerinin yararları genel olarak şu şekilde özetlenebilir (Dinçer & Rosen, 2002):

- Enerji tüketim ve maliyetini düşürür.
- Karbondioksit (CO₂) gibi çevre kirliliği oluşturan emisyon değerlerini azaltır.
- Binalarda iç hava kalitesini iyileştirir.
- Sistemlerin ilk bakım maliyetlerini düşürür.
- Ekipman boyutları küçültülerek malzeme ve kaplanan hacimden fayda sağlar.
- İlgili ekipmanlardan verimli ve etkin bir şekilde yararlanmayı sağlar.
- Fosil yakıt tüketiminin azaltılmasına katkı sağlar.
- Kaynakla talep arasındaki dengenin kurulmasını sağlar.

Enerji depolama ile kesintili olan yenilenebilir/temiz enerji kaynaklarının depolanması ve atık enerjinin geri kazanılması ya da depolanmasını sağlanarak ülkelerin kendi öz kaynaklarının daha verimli kullanılmasına, enerji tasarrufuna, enerji bağımsızlığına ve dolayısıyla ülke ekonomisine önemli katkılar sunacağı ifade edilmelidir.

Enerji depolama yöntemleri depolanan enerjinin türüne göre Şekil 1’de sunulmuştur.

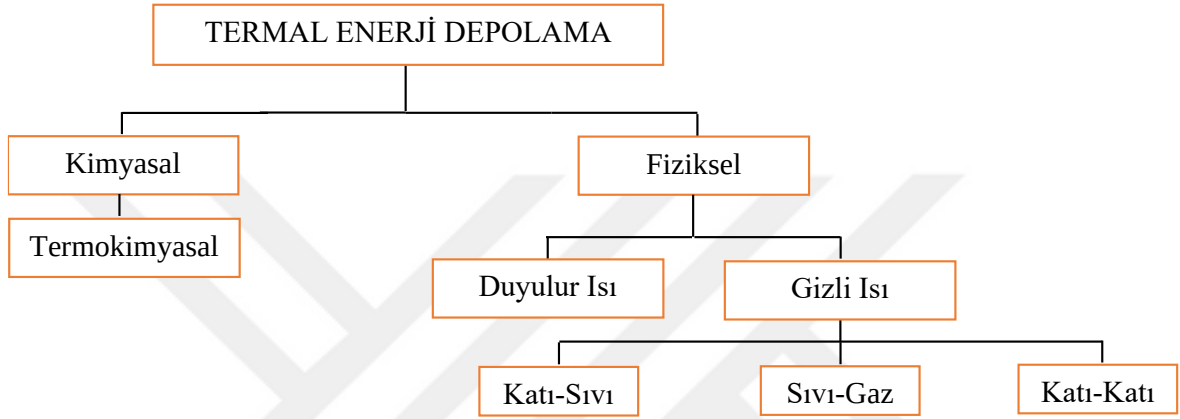


Şekil 1. Enerji türüne göre depolama yöntemlerinin sınıflandırılması (Erdoğan, 2006)

Tezin geneliyle doğrudan ilişkili olmasından dolayı devam eden bölümde yalnızca termal (ısı) enerji depolama yöntemleri ile ilgili kapsamlı bir bilgi sunulmuştur.

1.2. Termal Enerji Depolama

Termal enerji, maddelerde sıcaklık farkının oluşmasından dolayı ısı geçişi yoluyla enerji aktarımının sağlanması ile ortaya çıkan enerji türüdür. Termal enerji, bir maddenin sıcaklığını arttırarak veya azaltarak (duyulur ısı depolama) , maddenin faz durumunu değiştirerek (gizli ısı depolama) ya da kimyasal reaksiyonlar sonucu depolanan/açığa çıkan ısıyı temel alan termokimyasal yollarla depolanabilir (Şekil 2) (Dinçer & Rosen, 2002).

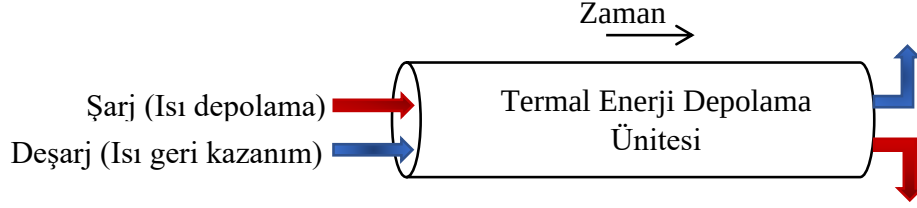


Şekil 2. Termal enerjinin üç farklı yöntemle depolanması (Sharma vd., 2009)

Termal enerji depolama (TED) ile enerjinin ihtiyaca yönelik uygun şekilde değişimi gerçekleştirilirken, enerji verimli bir şekilde depolanabilir. Termal enerji depolama yöntemi ekonomik ve kaynak erişimi kolaylığı avantajları ile güneş kaynaklı ısı enerji depolama ve atık ısı geri kazanımı uygulamaları için önemli bir potansiyel olarak tercih edilmektedir (Katekar & Deshmukh, 2020). Termal enerji depolama sistemlerinin sağladığı faydalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- TED sistemleri sayesinde enerji ihtiyacında kesintilerin önüne geçilerek enerjide devamlılık sağlanır.
- Atık ısı oluşturan sistemler veya enerji üretiminin talepten fazla olduğu durumlarda enerjiyi ısı olarak depolayıp ihtiyaç durumunda kullanıma sunarak verimliliğin artmasına katkı sağlar.
- Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmayı sağlar.
- Enerjinin ucuz olduğu zamanlarda depolanmasını sağlayıp talep edilen zamanda kullanımını sağlar.

TED süreci üç temel evreden oluşur; şarj (erime), depolama,deşarj (geri kazanım/donma) (Magendran vd., 2019). Fiziksel TED sürecine ait aşamalar Şekil 3'te şematik olarak sunulmuştur.



Şekil 3. Termal enerji depolama sürecine ait temel süreçler

Şekil 3'te şematik olarak sunulan TED aşamaları özetle; aşama-1 belirli zaman aralığında mevcut olan güneş, atık ısı vb. kaynaklı termal enerjinin TED ünitesine bir ısı değiştirici ile depolama ortamına transferini kapsarken, aşama-2 enerjinin duyulur/gizli olarak depolama ünitesinde depolanması sürecini ve aşama-3 ise TED ünitesi bünyesinde depolanan termal enerjinin ısı değiştirici üzerinden tekrar geri kazanımı sürecini kapsamaktadır. İlgili şekilden hareketle depolama ve geri kazanım sıralaması kullanılacak çevrime göre (ısıtma veya soğutma amaçlı kullanım durumunda) değişiklik gösterebilir.

Termal enerji depolama kullanım süresiyle ilişkilendirildiğinde iki grupta incelenebilir: kısa vadeli depolama (gece ve gündüz) ve uzun vadeli depolama (sezonluk, yaz ve kış). Uzun vadeli depolamayla amaçlanan, yaz aylarında sıcaklığı depolayıp kış aylarında kullanmak ya da bu durumun tam tersi yönünde düşünüldüğünde kış mevsiminin soğukunu yaz ayları için depolayıp kullanmaktır. Enerjinin uzun vadeli depolanmasında oluşabilecek termal kayıplar depolamanın verimliliği için çok önemlidir. Uzun vadeli depolama sistemleri, günlük depolama (kısa vadeli) sistemlerine göre ısı kayıpları azaltmak için çok daha büyük hacimli ve daha emniyetli yapılmaktadır. Kısa vadeli depolama sistemleriyle birkaç günlük enerji ihtiyacının depolanması sağlanır. Kısa süreli günlük enerji depolama sistemleri genellikle güneş enerjisinin depolanması sağlamak üzerine olan sistemlerdir (Akgün, 2006).

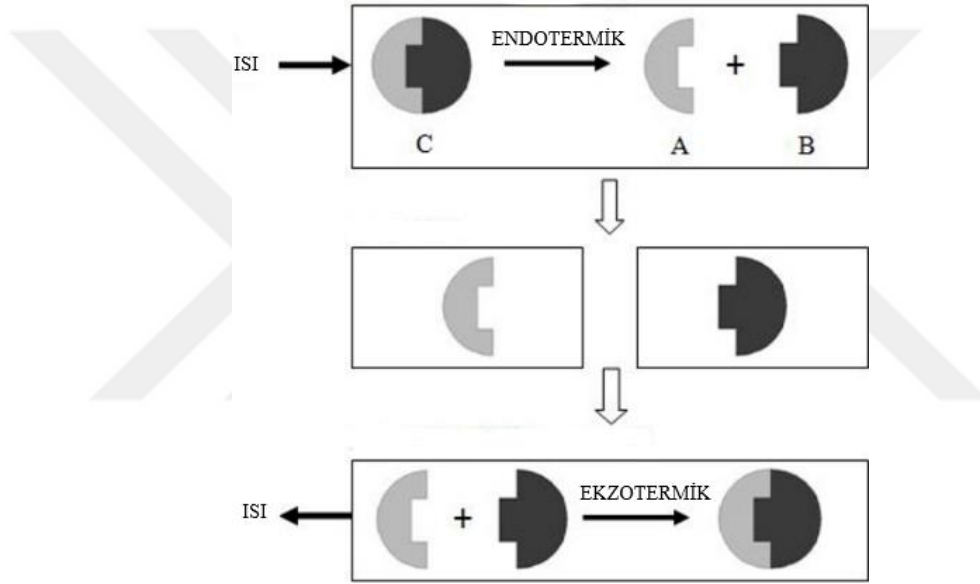
Termal enerji depolama sistemleri kullanım süreleri üzerinden karşılaştırıldığında ortaya çıkan avantaj ve dezavantaj özetle aşağıda belirtilmiştir (Dinçer & Rosen, 2002):

- Kısa vadeli depolama için gereken ünite hacmi, uzun vadeli depolamalar için gerekli ünite hacmi kadar kritik değildir.

- Kısa vadeli depolama sistemlerinin yapıları daha küçük olduğu için kolay bir şekilde imal edilebilir.
- Günlük ve diğer kısa vadeli depolama sistemlerinin uygulama alanları daha geniştir.

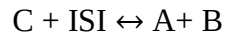
1.2.1. Termokimyasal Isıl Enerji Depolama

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip kimyasal reaksiyonlar içeren termokimyasal depolama metoduyla, ısı enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek uzun süre depolama sağlanabilir.



Şekil 4. Termokimyasal depolama süreçleri

Termokimyasal depolama metodu esas olarak, bileşiğin endotermik tepkimeler geçirmesi sonucunda bileşenlerine ayrılması ve bu bileşenlerin ekzotermik (ısı veren) tepkime yoluyla yeniden bileşik oluşturması esnasında açığa çıkardığı ısı enerjisine dayanmaktadır. Bu şu ifade ile açıklayabiliriz:



Depodaki C kimyasal bileşiği endotermik (ısıyı absorbe eden) tepkime sonucunda Şekil 4'te gösterildiği gibi A ve B olarak iki farklı bileşene ayrılabilir. Isıya ihtiyaç olduğu durumda A ve B bileşikleri bir araya gelerek $A+B \rightarrow \text{ISI} + C$ tepkimesini gerçekleştirmekte ve talep edilen ısıyı açığa çıkarmaktadır.

Sistemin ısı depolama kapasitesi oldukça yüksektir. Bunun sebebi, depolama süreci içerisinde kimyasal bağların tersinir halde ayrışması ve birleşmesi esnasında yüksek ısı değerine sahip kimyasal tepkimeler gerçekleştirdiği için depolama kapasitesi genellikle yüksektir. Termokimyasal termal enerji depolama sistemlerini diğer depolama sistemleriyle kıyasladığımızda birçok farklı avantajı vardır. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir (Abedin & Rosen, 2011):

- Termokimyasal malzemeler faz değişim malzemeleri ve duyulur ısı depolama materyallerine göre enerji yoğunluğu daha yüksek malzemelerdir. Bu sebeple, depolama alanının sınırlı olduğu durumlarda termokimyasal malzemeler tercih edilerek daha verimli depolama sağlanabilmektedir.
- Isı kayıplarının düşük olduğu sistemden dolayı mevsimsel depolama gibi uzun vadeli sürelerde enerji depolaması için uygundur.
- Kimyasal bileşiğin iki ayrı bileşene ayrışması sonucunda bileşenler ayrı olarak depolanabildiği için ısı kaybı çok düşük veya hiç olmaz ve bundan dolayı yalıtıma ihtiyaç yoktur.

1.2.2. Duyulur Termal Enerji Depolama

Duyulur termal enerji depolama, ısı depolayan malzemenin sıcaklığında değişim meydana gelmesi sonucunda açığa çıkan enerjiden yararlanılarak ısı enerjisi depolanması olarak açıklanır. Malzemenin birim kütleinde depolanan ısı miktarı şu şekilde ifade edilmektedir;

$$Q = mc_p \Delta T = \rho c_p V (T_2 - T_1) \quad (1)$$

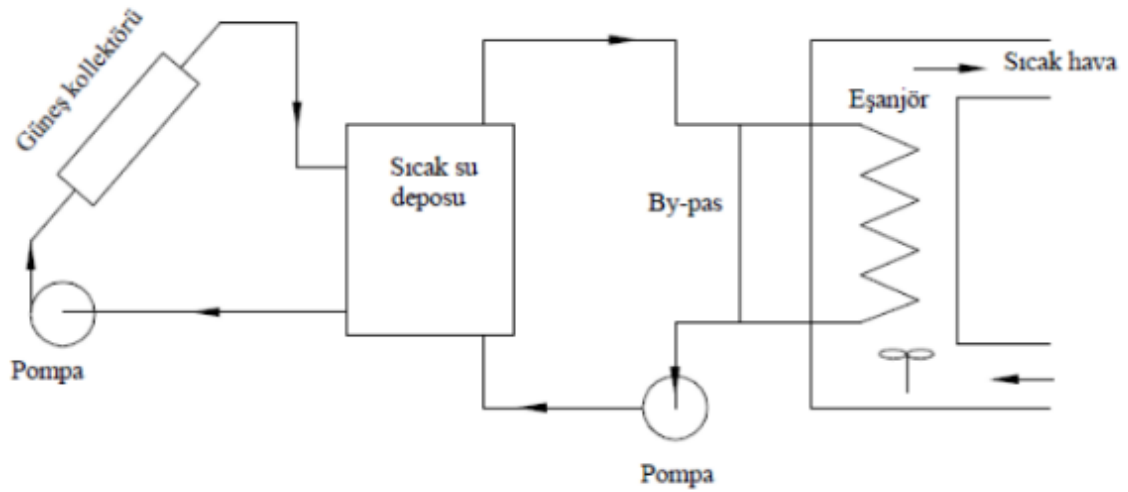
Burada, ρ (kg/m^3) malzemenin yoğunluğu, c_p (kJ/kgK) malzemenin sabit basınçtaki özgül ısısı, V (m^3) malzeme hacmi, ΔT sıcaklık değişimini ifade etmektedir. Depolanan ısı miktarının eşitliği depolama sisteminde kullanılan malzemenin özgül ısısına (c_p) büyük ölçüde bağlı olduğu görülmektedir.

Duyulur termal enerji depolama, ısı depolama alanına bağlı olarak sıvı, katı veya her ikisinin birlikte bulunduğu ikili ortamlarda yapılabilir. Duyulur termal enerji depolama sistemleri için çoğunlukla kullanılan ortamlar Tablo 1’de verilmiştir.

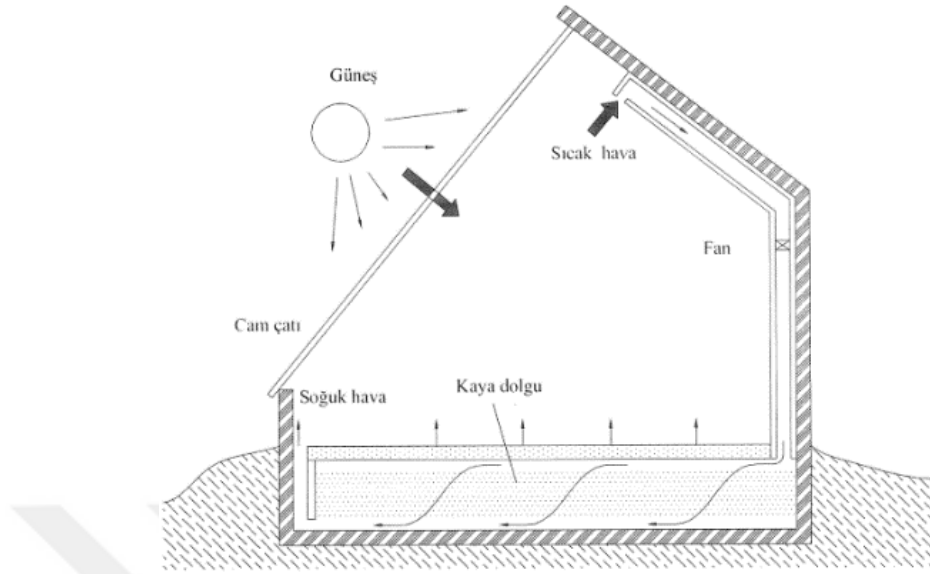
Tablo 1. Duyulur termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan bazı malzemeler (Sharma vd., 2009)

Ortam	Türü	Sıcaklık aralığı (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kgK)
Taş	Katı	20	2560	879
Tuğla	Katı	20	1600	840
Beton	Katı	20	1900-2300	880
Su	Sıvı	0-100	1000	4190
Motor yağı	Yağ	<160	888	1880
Etanol	Organik sıvı	<78	790	2400
Propanol	Organik sıvı	<97	800	2500
Bütanol	Organik sıvı	<118	809	2400
İzobütanol	Organik sıvı	<100	808	3000
İzopentanol	Organik sıvı	<148	831	2200
Oktan	Organik sıvı	<126	704	2400

Hacim ısıtma-soğutma işlemlerinde depolama ortamı olarak farklı özgül ısı (c_p) değerlerine sahip su ve kaya kullanılan sistemlere ait örnekler, sırasıyla, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 5. Hacim ısıtmada kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi örneği (Kılıkış & Kakaç, 1989)



Şekil 6. Kaya dolgulu duyulur ısı depolama evi (Hariri & Ward, 1988)

Duyulur ısı depolama sistemlerinde depolama ortamı olarak genellikle malzemeyi çevreleyen ve ısı enerji kayıplarını önleyen tank kullanılır. Depolama sisteminde ısı depolama ve geri kazanım işlemleri tersinirdir. Yani sistemin ekonomik ömrü boyunca ısı depolama ve boşaltma özellikleri değişmeden devam eder. Depolama sistemlerinin cazip avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar (Yılmaz, 2008):

- Gizli ısı depolama yöntemi ile kıyaslandıklarında depolama kapasiteleri daha düşüktür.
- Depolama esnasında depolama sıcaklığı devamlı arttığı için ısı kaybı yüksektir.
- Depolama sistemi yalıtılmalıdır; bu da sistem maliyetini arttırmaktadır.
- Depolama ve geri kazanım esnasında oluşan değişimler sıcaklık gradyanını artırır.

Duyulur termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan maddelerin ısı kapasitesinin (özellik ısı) büyük olmasının yanında, yanma ve alevlenme özelliklerinin olmaması, maddenin 10-15 yıl gibi uzun süre termofiziksel özelliklerini koruması ve bunlara ek olarak maddelerin zehirli ve korozyif olmaması istenir. Aynı zamanda depolama malzemelerinin gerekli termofiziksel özelliklere sahip olmasının dışında ucuz ve kolay ulaşılabilir olması gerekir. Depolama için tüm bu koşullar göz önüne alındığında depolama malzemesi olarak daha çok su ve çakıl taşı tercih edilmektedir. Su ve çakıl taşının kullanıldığı depolama

sistemleri karşılaştırıldığında birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları şöyle özetlenebilir (Ceylan vd., 2017):

- Her iki malzeme ucuz ve temin edilmesi kolay olmasının yanında yanıcı ve zehirleyici değildir.
- Su kullanılan sistemlerde donmaya ve korozyona karşı ek önlemlerin alınması gerekmektedir.
- Suyun ısı kapasitesi çakıl taşına göre daha yüksektir. Fakat yüksek sıcaklıklarda enerji depolamak için su tercih edilen sistemlerde buhar basıncına uygun bir tasarım yapılması gerekmektedir. Bu nedenle yüksek sıcaklık sistemlerinde suyun kullanılması durumunda depolama maliyetleri artmaktadır.
- Çakıl taşlarının ısı kapasiteleri düşük olduğundan dolayı su ile aynı oranda ısı enerjisi depolanmak için daha büyük sistem hacimlerine ihtiyaç duyulur. Dolayısıyla sistemin ağırlığı da artmış olur.

Duyulur ısı depolama sistemlerinde depolama ortamı olarak yaygın kullanıma sahip katı ve sıvı malzemelerin dışında gaz ortamlar da kullanılabilir. Ancak, sabit hacimde tutulan gazın ısıtılmasına bağlı olarak ortaya çıkan sıcaklık ve basınç artışları sebebiyle kullanımları kısıtlıdır.

1.2.3. Gizli Termal Enerji Depolama

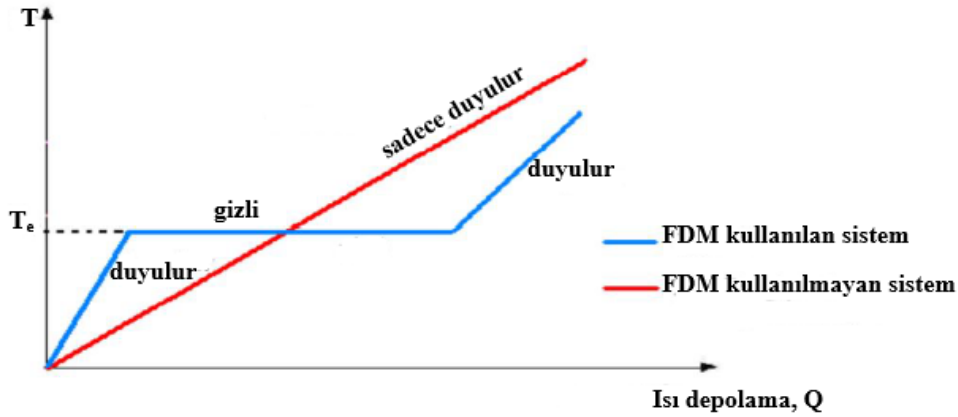
Gizli ısı, maddenin sabit sıcaklıkta bir fazdan başka bir faza geçtiği durumda çevreden aldığı veya verdiği ısı olarak ifade edilmektedir. Yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip gizli ısı depolama sistemlerinde ısının depolanması veya geri kazanımının sağlanması için kullanılan malzemeler faz değiştiren malzeme (FDM) olarak adlandırılır. Maddenin faz değişimine uğraması için gerekli olan enerji; erime noktasında erime ısı, kaynama noktasında ise buharlaşma ısı olarak ifade edilir. Gizli ısı depolaması, faz değiştiren malzemenin katı-katı, katı-sıvı, sıvı-buhar ve katı-buhar veya bu durumların tersine gerçekleşmesi esnasında ısıyı absorbe etmesi ya da ısı salınımı yapmasına bağlıdır. Değişim esnasında faz değiştiren malzemelerinin depoladığı enerji miktarı FDM'lerin gizli ısı depolama kapasitesi olarak adlandırılır. Gizli enerji depolama süreci boyunca depolama kapasitesi aşağıdaki denklemler ile ifade edilir;

$$Q = \int_{T_i}^{T_e} m * c_p * dT + m * H_e + \int_{T_e}^{T_s} m * c_s * dT \quad (2)$$

$$Q = m * c_p(T_e - T_i) + m * H_e + m * c_s(T_s - T_e) \quad (3)$$

Burada; Q depolanan ısı miktarı (kJ), T_e erime sıcaklığı (K), T_i ilk sıcaklık (K), m ısı depolama ortamının kütlesi (kg), c_p katı fazda sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kgK), T_s son sıcaklık ($^{\circ}C$), c_s sıvı fazda sabit basınçtaki özgül ısı (kJ/kgK) ve H_e (kJ/kg) erime gizli ısı olarak tanımlanır.

Belirli boyutlardaki bir sistemde oluşan gizli ısı değişimi genellikle duyulur ısı değişiminden çok daha fazladır. Isı depolama metotları arasında, gizli ısı depolama yöntemi Şekil 7'deki sıcaklık-ısı depolama grafiğinde gösterildiği gibi faz değiştirme sıcaklığındaki sabit bir sıcaklıkta ısıyı depolayabilme ve yüksek enerji depolama kapasitene sahip olmalarından dolayı tercih edilen sistemlerdir (Mazman, 2006).



Şekil 7. Duyulur ve gizli ısı depolama yöntemlerinin sıcaklık-ısı depolama değişim grafiği (Sarı vd., 2005)

Gizli ısı depolama sistemleri, küçük hacimli depo ihtiyacı ya da kısa süreli depolama yapılan uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen sistemler haline gelmiştir. Gizli ısı depolamanın diğer termal enerji depolama metotlarına göre birkaç üstün özelliği aşağıda verilmiştir (Akgün, 2006; Yılmaz, 2008):

- Duyulur ısı depolamaya kıyasla ısı depo hacmi daha küçük ve enerji depolama kapasitesi daha yüksektir.
- FDM kullanılan depolama birimlerinde sabit sıcaklıkta ısı geçişinin olduğu verimliliği yüksek sistemlerdir.

FDM kullanımı sağladığı avantajların yanında dezavantajlar da getirmektedir.

- FDM'lerin uzun süre kullanımı sonucunda maddenin yapısında kararsızlıklar meydana gelmektedir.
- FDM'lerin düşük ısı iletkenliğe sahiptir.
- Isı depolaması sırasında malzeme yoğunluğu değişir.

Termal enerji depolamada ilgili yöntemler performans parametresi ve diğer faktörler üzerinden kıyaslanması aşağıda Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 2. Farklı TED yöntemlerinin çeşitli performans faktörlerine göre kıyaslanması (Abedin & Rosen, 2011)

Performans parametreleri	Termal Enerji Depolama Türü		
	Termokimyasal TED	Duyulur TED	Gizli TED
Sıcaklık aralığı	20-200°C	$\leq 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (su ile depolama) $\leq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (toprakta depolama) $\leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (betonda depolama)	20-40°C (parafinler) 30-80°C (tuz hidratlar)
Depolama yoğunluğu	$0,5-310^6\text{ kJ/m}^3$	$0,2 \times 10^6\text{ kJ/m}^3$	$0,3-0,5 \times 10^6\text{ kJ/m}^3$
Ömür	Reaktan bozunması ve yan reaksiyonlara bağlı	Uzun	Genellikle depolama elemanı ömrüyle sınırlı

Tablo 2'nin devamı

Performans parametreleri	Termal Enerji Depolama Türü		
	Termokimyasal TED	Duyulur TED	Gizli TED
Üstünlükler	Yüksek enerji depolama yoğunluğu	Düşük maliyetli	Kısa mesafe taşıma imkânı
	Düşük ısı kaybı	Güvenilir	Yüksek enerji yoğunluğu
Dezavantajlar	Uzun depolama süresi ve uzun mesafe taşıyabilme imkânı	Ulaşılabilir malzemelerle basit uygulama yöntemi	(duyulur TED sistemiyle karşılaştırılınca)
	Teknik olarak karmaşık ve maliyetli sistemler	Büyük hacim gereksinimi	Küçük hacimli depolama üniteleri
		Yalıtım seviyesine bağlı olarak önemli ısı kayıpları	Düşük ısı iletkenliğe sahip malzemeler
			Malzemelerin aşındırıcı özellikte olması
			Önemli miktarda ısı kaybı (uygun yalıtım yapılmaz ise)

1.3. Gizli Isı Termal Enerji Depolama (GITED) Sistemlerinde Faz Değiştiren Malzemeler

Gizli ısı depolama, maddenin faz değişimiyle ilişkili olduğu bir durumdur. FDM'ler, belirli sıcaklık aralığında belirli miktarda ısıyı alarak faz dönüşümünü gerçekleştirebilen malzemelerdir. Faz değişimi esnasında maddeye verilen veya maddeden alınan ısı enerjisi gizli ısı veya faz değişim ısısı olarak adlandırılır. Gizli ısı depolama faz değiştiren malzemeler sayesinde yüksek yoğunlukta ve yüksek miktarlarda ısı depolamaya imkân

sağlarken, bu süreci düşük sıcaklık değişimi ve küçük hacimli depolama ünitelerini kullanarak meydana getirir (Günerhan, 2004). FDM'lerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanılabilmesi kimyasal, termodinamik, kinetik ve ekonomik yönden bazı temel özelliklere sahip olmasını gerektirir. FDM'lerde olması beklenen temel özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. FDM'lerden beklenen özellikler (Zhou vd., 2012)

Termokimyasal Özellikler	Isıl iletkenliklerinin yüksek olması
	Birim hacimde yüksek füzyon gizli ısı
	Uygulamada istenilen aralıkta ergime sıcaklığına sahip olmaları
	Yüksek yoğunluk ve özgül ısı değerinde olmaları
	Depolamada sorunu meydana gelmemesi için faz değişimi esnasında düşük hacimsel değişim ve düşük buhar basıncına sahip olmaları
	Korozif olmamaları
Kimyasal Özellikler	Kimyasal kararlılığa sahip malzemeler olmaları
	Alevlenebilir, toksik ve patlayıcı malzemeler olmamaları
	Tersinir erime/katılaşma çevrimi
	Çok sayıda faz değişimi sonrasında bozulmaya uğramamaları
	Geniş ölçekte kullanılabilirlik
Ekonomik Özellikler	Kolay temin edilme ve uygun fiyatlı olmaları
	Hızlı soğumayı önleyebilmek için yüksek çekirdeklenme hızına sahip olmaları
Kinetik Özellikler	Depodan yeterli ısı talebini karşılayabilmek için yüksek kristalleşme hızına sahip olmaları

FDM'ler faz değişim şekillerine göre katı-katı, katı-sıvı, katı-buhar, sıvı-buhar dört gruba ayrılır. İlgili gruplarından katı-sıvı faz değişimi, istenilen aralıkta faz değişimine sahip çok sayıda FDM çeşidinin olması, malzemelerin ucuz ve kolay ulaşılabilir olmasının sunduğu avantajlardan dolayı depolama ünitelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Abhat, 1983; Ceylan vd., 2017). Yüksek faz değişim sıcaklığı ve düşük gizli ısı özelliklerine sahip katı-katı faz değiştiren malzemeler, faz değişim evresinde katı bir maddenin faz

durumunu bozmadan kristalleşerek farklı bir katı faza geçişi sırasında meydana gelen enerjinin ısı şeklinde depolanmasıdır. Katı-katı FDM'lerin sızdırma probleminin olmaması ve hacimsel değişimlerinin düşük olması nemli avantajlarıdır, ancak ısı iletkenliklerinin görece düşük olması ($0.2-0.3 \text{ W/mK}$) kullanımlarını kısıtlamaktadır (Wang vd., 2000).

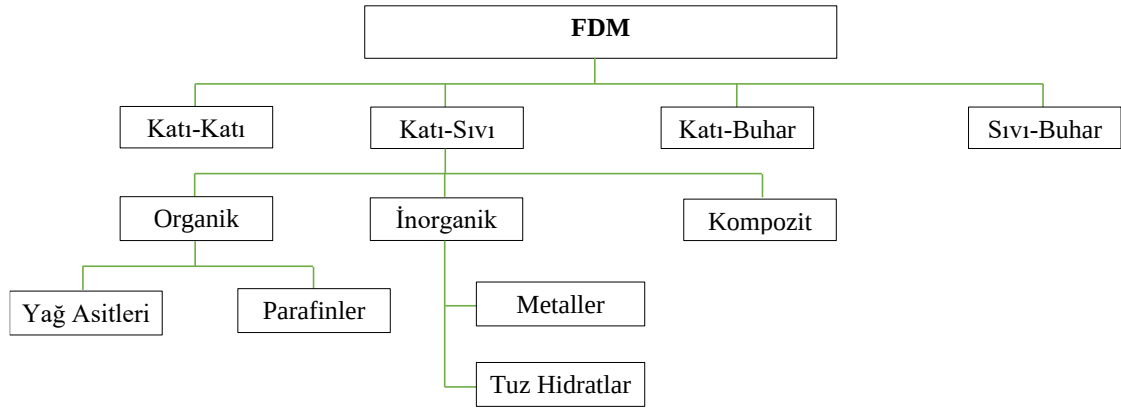
Katı-sıvı faz değişimi, katı halde bulunan faz değiştiren malzemesinin bünyesinde ısı depolayarak sıvı hale geçmesi olarak ifade edilmektedir. Katı-buhar faz değişimi boyunca açığa çıkan gizli ısı miktarı katı-katı ve sıvı-katı faz değişimi türlerine göre daha yüksek olmasına rağmen ilgili faz değişim türünün sistem gereksinimlerinden dolayı ısının depolanması açısından dezavantajlar meydana getirir.

Bu dezavantajlar katı-buhar ve sıvı-buhar faz değişimi türlerinin ortak sorunları olarak da gösterilebilir. Her iki faz değişim sürecinde buhar fazının depolanması ve muhafaza edilmesi için basınçlı kaplara duyulan ihtiyaç karşılaşılan büyük sorunlardan biridir. Öte yandan ilgili faz değişimlerinde büyük hacim değişikliklerinin olmasından dolayı bu değişimlerin gerçekleştiği depolama ünitelerinin karmaşıklaşmasına, uygulanabilirliğinin kısıtlanmasına ve maliyetinin artmasına sebebiyet verir (Lane, 1980).

Termal enerji depolama uygulamalarında sahip olduğu avantajlar (faz değişim aralığının çeşitliliği, düşük hacimsel değişim, ekonomiklik vb.) ile katı-sıvı faz değiştiren malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında da katı-sıvı faz dönüşümüne sahip FDM kullanılacaktır. Literatürde genellikle, gizli ısı termal enerji depolama (GITED) ile katı-sıvı faz geçişine sahip FDM'lerin kullanıldığı gizli ısı depolama sistemleri ifade edilmektedir. Bu çalışmada da faz değişimi ile katı-sıvı faz değişiminin ifade edildiği belirtilmelidir.

1.3.1. Faz Değiştiren Maddelerin Sınıflandırılması

Faz değiştiren maddeler (katı-sıvı), organik ve inorganik malzemeler olmak üzere iki grubu ayrılmaktadır. FDM'lerin sınıflandırılması Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. FDM'lerin sınıflandırılması (Hafiz Muhammad, 2023)

Organik FDM'ler düşük yoğunlukta ve ısının depolanması sırasında hacim değişimi yüksek olmasından dolayı büyük depolama ünitelerine ihtiyaç duyulan FDM türüdür.

Bu dezavantajların yanında aşırı soğumadan donabilme, kendiliğinden kristalleşme, uygun şekilde erime ve düşük buhar basıncına sahip olmaları gibi üstünlükleri de bulunmaktadır (Lane, 1983).

İnorganik FDM'ler, organik FDM'lere göre Tablo 4'te gösterildiği gibi gizli ısı depolama kapasiteleri ve yüksek ısıl iletkenliklerinden dolayı ısı depolama çalışmalarında sıklıkla tercih edilmektedirler. Ayrıca ucuz ve yanıcı olmamaları avantajları arasında gösterilirken, aşırı soğuma göstermeleri ve korozyon olmaları dezavantajları arasında yer almaktadır (Konuklu, 2008).

Tablo 4. Gizli ısı depolamada kullanılan organik ve inorganik maddelerin karşılaştırılması (Sharma & Sagara, 2005)

	Avantajlar	Dezavantajlar
Organik FDM'ler	Aşırı soğutma az ya da yok	Düşük ısı
	Korozyon yok	Düşük erime entalpisi
	Kimyasal ve termal açıdan dengede	Kolayca yanma
İnorganik FDM'ler	Yüksek erime entalpisi	Faz ayrışması, bozulması
		Korozyona uğrama
		Termal dengesizlik

Depolama ünitelerinde kullanılan organik FDM'ler korozyon maddeleri olmayıp, aşırı soğuma ve faz ayrılması gibi durumlarla pek karşılaşılmayan uzun ömürlü maddelerdir. Sahip olduğu üstünlüklerin yanında inorganik FDM'ler ile kıyaslandıklarında düşük ısı iletkenliğe ve düşük faz değiştirme entalpisine sahip yanıcı maddelerdir. Bazı organik ve inorganik FDM örnekleri sırasıyla Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Bazı organik FDM'lere ait erime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri (Sharma vd., 2009)

Malzeme	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
N-Tetradekan	5,5	226
Formikasit	7,8	247
N-Pentadekan	10,0	205
Asetikasit	16,7	273
N-Hegzadekan	16,7	237
Kaprilon	40,0	260
Fenol	41	120
Balmumu	61,8	177
Nitro naftalin	56,7	103
Palmitik asit	61,8	164

Tablo 6. Bazı inorganik FDM'lere ait erime sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasiteleri (Sharma vd., 2009)

Malzeme	Ergime noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
H ₂ O	0,0	333
POCl ₃	1,0	85
H ₂ SO ₄	10,4	100
MOF ₆	17,0	50
P ₄ O ₆	23,7	64
TiBr ₄	38,2	23
SbCl ₃	73,4	25
NaNO ₃	307	199
MgCl ₂	800	492

Bu FDM'ler arasından en yaygın olarak kullanılan organik FDM'ler parafinlerdir. Parafinler çok sayıda alkandan oluşan, ham petrolden elde edilen doymuş hidrokarbon karışımlarıdır (Yılmaz, 2008). Geniş sıcaklık aralığına sahip parafinler ucuz, bol, yüksek ısı depolama kapasiteleri ve kimyasal olarak kararlılıklarından dolayı termal enerji depolama uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir. Parafinler, kimyasal ve fiziksel özellikleri yönünden çeşitli uygulamalar için uygun malzemelerdir. İlgili uygulamalarda kullanılan bazı parafin çeşitlerinin erime noktası, ısı iletkenlik ve gizli ısı kapasiteleri gibi önemli özelliklerine Tablo 7'de yer verilmiştir.

Tablo 7. Bazı parafinlerin erime ve gizli ısı değerleri (Sharma & Sagara, 2005)

Parafin adı	Karbon atomu sayısı	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Gizli ısı (kJ/kg)
n-Dodecane	12	-12	750	0,21 ^K	-
n-Tridecane	13	-6	756	-	-
n-Tetradecane	14	4,5-5,6	771	-	231
n-Pentadecane	15	10	768	0,17	207
n-Hexadecane	16	18,2	774	0,21 ^K	238
Parafin wax	-	32	785 ^K 749 ^S	0,541 ^K 0,224 ^S	251
n-Hegzakosan	26	56	770	0,21 ^K	257
n-Heptakosan	27	59	773	-	236

K: katı, S: sıvı

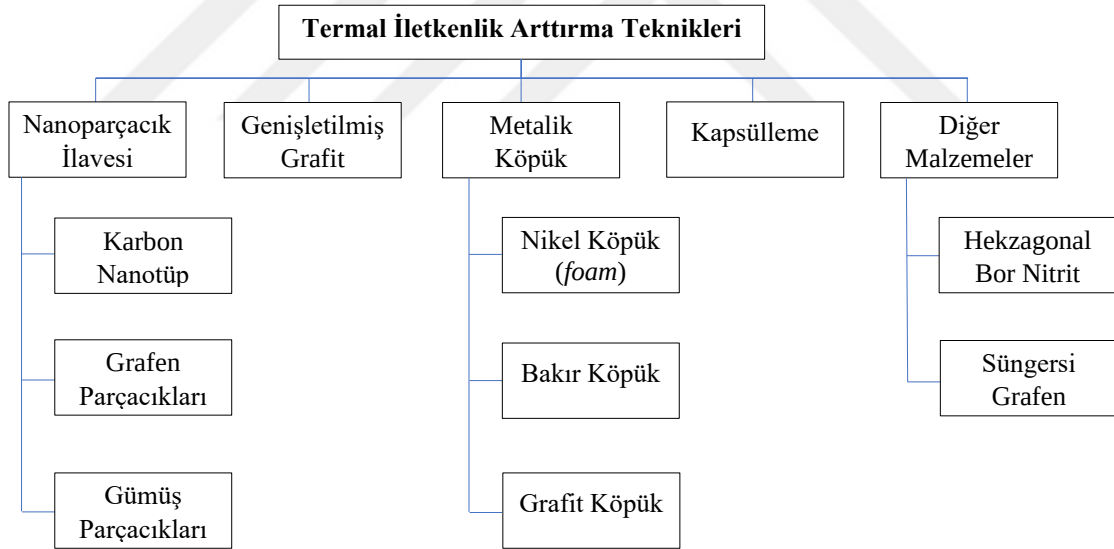
Termal enerji depolama uygulamaları için önemli bir potansiyel olan parafinlerin sahip olduğu avantajlar aşağıda verilmiştir (Karaipekli, 2006):

- Erime esnasında küçük hacim değişimi gösteren, düşük yoğunluklu maddelerdir.
- Aşırı soğuma göstermedikleri için kendi kendine çekirdekleşme gerçekleştirirler.
- Geniş aralıkta erime sıcaklığına sahiptirler ve erime gizli ısıları yüksek maddelerdir.
- Faz ayrışması göstermezler, kimyasal olarak kararlıdır.
- Kolay temin edilebilen, maliyetleri düşük maddelerdir.

Birçok olumlu özelliğe sahip parafinlerin uygulama sırasında karşılaşılan bazı olumsuz, geliştirilmesi gereken özellikleri de mevcuttur. Bu dezavantajlar aşağıda sunulmuştur:

- Yanıcıdırlar.
- Isıl iletkenlikleri düşüktür.
- Faz dönüşümü bir sıcaklık aralığında gerçekleşir.

Parafinin termal enerji depolama uygulamalarındaki kullanımını kısıtlayan en önemli problem düşük ısı iletkenlik değeridir. Bu durum, güneş, atık ısı vb. kaynaklı termal enerjinin gizli ısı termal enerji depolama ortamı (parafin) içerisine transferini/yayılımını önemli ölçüde kısıtlayarak depolama ve geri kazanım sürelerini uzatmaktadır. Parafinin düşük ısı iletkenlik probleminin minimize edilmesine yönelik olarak iyileştirme yöntemleri araştırmacılar tarafından ortaya konulmaktadır (Li vd., 2021; Azarifar vd., 2017; Cheng vd., 2021; Wu vd., 2010; Yağcı, 2017; Yazıcı, 2013). Yaygın olarak kullanılan ısı transfer iyileştirme yöntemleri Şekil 9’da sunulmuştur.



Şekil 9. FDM'lerin termal iletkenliklerinin geliştirilmesi için uygulanan teknikler (Qureshi vd., 2018)

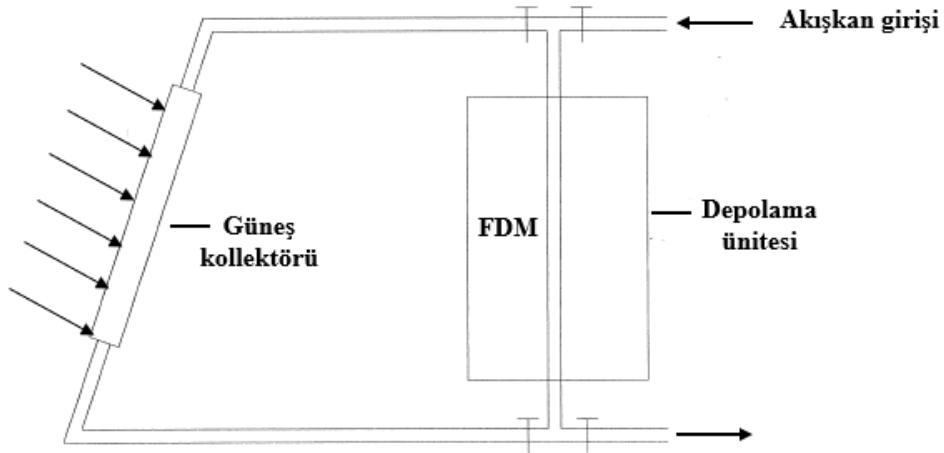
Faz değişim maddelerinin termal iletkenliklerinin iyileştirilmesinde grafit tabanlı yöntemler (grafit/grafen nanoparçacık, karbon nanotüp, grafit köpük vb.) araştırma ilgisinin yoğunlaştığı araştırma konularından biridir. Grafit sahip olduğu yüksek ısı iletkenlik, kararlı kimyasal yapıları, düşük yoğunlukları ile gizli ısı termal enerji depolama sistemleri için önemli avantajlar sağlamaktadır. Grafit tabanlı iyileştirme yöntemleri içerisinde grafit

köpük/matris sağladığı yüksek gözeneklilik, yüksek yüzey alanı/hacim oranları, düşük yoğunluk ve yüksek ısıl iletkenliğe sahip termal köprüler ile önemli bir potansiyel olarak görülmektedir (Guo vd., 2015). Ayrıca, grafit köpük/matris sağladığı yüksek gözenek oranı değerleri ile FDM'nin grafit matris/köpük içerisine depolanacak/hapsedilecek olması FDM'nin sızıntı problemini de ortadan kaldırmaktadır (Wang vd., 2020). FDM'nin yüzey kuvvetleri ve kılcallık etkisi ile grafit matris bünyesinde hapsedilmesi sağlanmaktadır.

1.4. FDM'lerin Kullanım Alanları

FDM uygulama alanlarına verilecek bazı örnekler şöyledir (Konuklu, 2008):

- Kan ve organ taşınmasında
- Elektronik cihazlarda aşırı ısınmayı önlemek
- Gıdaların depolanması ve taşınmasında,
- Sporcu kıyafetleri, bebek tulumları gibi tekstil ürünlerinde,
- Binaların ısıtma ve soğutma yüklerinin azaltılması için yapı malzemelerinde
- Sıcak su elde etmek için güneş enerji sistemlerinde (Şekil 10).



Şekil 10. FDM ile güneş enerjisi depolama sisteminin basit bir örneği (Sharma & Sagara, 2005)

1.5. Literatür Araştırması

Esen & Ayhan (1996), silindirik tank içerisine yerleştirilmiş belirli çap ve sayıdaki silindirik depolarda enerjinin zamana bağlı değişimini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma parametreleri olarak ITA sıcaklığı, akışkan debisi, FDM türü ve silindir depoların yarı çapları üzerinden erime davranışını analiz etmişlerdir.

Mills vd. (2006), 50-350 g/l yığın yoğunluğu arasında değişen grafit matrislerle hazırlanmış FDM/grafit kompozitlerin, farklı yoğunluklardaki grafit bloklarının hazırlık aşamasında sıkıştırılma yönüne göre faz değişim malzemesi emme oranı, termal iletkenlik ve gizli ısı depolama performansı üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda FDM'nin ısı iletkenliğinin artan yığın yoğunluğu ve sıkıştırma yönüne dik doğrultuda arttığını göstermiştir.

Akgün vd. (2007), düşey silindirik depolama ünitesinde faz değişim malzemesi parafinin ısı depolama performansı üzerinde farklı açısıl değerlerdeki (0° ve 5°) depo dış yüzeyi ve ITA'nın giriş sıcaklığının önemli derecede etkili olduğunu fakat akışkan debisinin ise etkili olmadığını göstermiştir.

Aydın vd. (2007), düşey silindirik depo ile eş merkezli yerleştirilmiş ısı transfer borusu arasındaki parafinin depolama/geri kazanım performansını dış kabuk açısı, ITA giriş sıcaklığı ve kütleli debi parametreleri üzerinden incelendiği deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. ITA'nın kütleli debisinin erime süresi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu bunun aksine ITA giriş sıcaklığının ve dış kabuk geometrisinin ısı transferini iyileştirdiğini, erime süresini olumlu etkilediği sonuçlarına ulaşmışlardır.

Zhang vd. (2012), farklı güç ve süre uygulamasıyla hazırlanmış genişletilmiş grafitte FDM absorbe edilerek kompozitin termal enerji depolama performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Farklı güç etkisinin FDM'yi absorbe etme özelliğinde değişikliklere sebep olduğu, kompozit yapının saf hale kıyasla şarj süresini önemli ölçüde azalttığı sonuçlarına ulaşmışlardır.

Avcı & Yazıcı (2013), yatay olarak konumlandırılmış silindirik depoda faz değişim malzemesi olarak kullanılan parafinin erime (şarj) ve katılaşma (deşarj) süreci zamana bağlı olarak deneysel yöntemle incelemişlerdir. Deponun üst bölgesi alt bölgesine oranla üst kısımda etkili olan doğal taşınım etkisiyle erime sürecini daha hızlı bir şekilde tamamladığı buğularına ulaşmışlardır.

Taşkıran (2013), yaptığı deneysel çalışmada FDM olarak ısı iletkenlik özelliği zayıf ministik asit ve tiyosinamin ötektik karışımına termal iletkenliği iyileştirmek amacıyla nanoparçacık (bakıroksit) ilavesi yapmıştır. Yapılan iyileştirme sonucunda ısı iletkenliğin 0,1 W/mK'den 0,11 W/mK değerine yükseldiği sonucuna ulaşmıştır. Akışkanın farklı giriş sıcaklıkları için erime/katılaşma sürelerinin bütün çalışmalar sonucunda iyileştiğini göstermiştir.

Kim vd. (2014), gizli ısı termal enerji depolama sisteminde FDM'nin saf ve grafitli iki halinin kullanıldığı şarj(erime) /deşarj (katılaşma) süreçlerini analitik yöntemle analiz etmişlerdir. Çoklu ITA borusu kullanılan silindirik depolama biriminde, kompozit halin kullanılmasıyla depolama elemanı için gerekli boru sayısında ciddi azalmaların olduğu ve sistem maliyetini önemli ölçüde düşürdüğünü yarı analitik model sonuçlarıyla göstermişlerdir. Isı transfer akışkanının hacimsel debisinin parametre olduğu sistemde grafitli yapının termal direncinin saf duruma göre daha düşük olmasından dolayı ITA'nın hacimsel debinin ısı transferi üzerinde etkisinin olduğunu göstermişlerdir.

Yazıcı vd. (2014), eş merkezli ($e=0^\circ$) ve eksantrik yerleştirilmiş ($e=10,20$ ve 30mm) halka içinde tüp depolama ünitesinde, farklı ITA giriş sıcaklıklarında, parafinin erime davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Eş merkezli depo ile eksantrik depoların erime performansları süreler üzerinden karşılaştırıldığında, eksantrik yapının erime süresini önemli ölçüde (%67) azalttığını göstermişlerdir.

Guo vd. (2015), grafit köpük katkısının vakum fırınında sıvı fazdaki parafin içerisinde daldırılıp emdirilmesiyle silindirik kompozit yapılar elde etmişlerdir. Oluşturulan silindirik kompozitlerin, içerisinde eş merkezli ısı transferi borusu bulunan silindirik depolama ünitesinde modellenerek ITA giriş hızı ve sıcaklığına göre sayısal analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Grafit köpük kullanımının ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiğini, giriş sıcaklığının artırılmasının erime süresini kısalttığını fakat akışkan hızının erime süreci üzerinde etkisinin düşük kaldığı sonuçlarına varmışlardır.

Ling vd. (2015), hazırladıkları FDM/grafit kompozit yapılarının farklı parametrelerle; içerdiği grafit kütle oranı, kompozit yoğunluğu, sıcaklığa bağlı termal yayılım oranı üzerinden kompozitlerin termal iletkenliğini etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Kompozitin kütle yoğunluğu ve genişletilmiş grafit kütle oranının artması yapının termal iletkenliğini 60 kat kadar arttırdığını ortaya koymuşlardır. Sundukları termal modelle, genişletilmiş grafit kullanılan kompozitlerin termal iletkenliklerini tahmin etme üzerine geliştirdikleri matematiksel modelle literatürdeki deney verilerini doğrulamışlardır.

Mallow vd. (2016), farklı yığın yoğunluklu grafit matris kompozitlerin yığın yoğunluğu arttıkça ısı iletkenliğinin arttığı fakat gizli ısı ve erime sıcaklığının azaldığını belirlemişlerdir. Parametre olarak alınan grafit yığın yoğunluğu arttıkça kompozitin erime ve gizli ısı değerleri azalırken, ısı iletkenlik değerinin arttığını göstermişlerdir. Sıkıştırma yönünün dik ve paralel olduğu durumlara termal iletkenlikler karşılaştırıldığında dik doğrultudaki termal iletkenliğin daha yüksek değerde olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca kompozitlerin belirli ısı akısı altında erime süreçleri karşılaştırıldığında grafit yoğunluğu arttıkça erime sürelerinin kısaldığını göstermişlerdir.

Azarifar vd. (2017), FDM olarak Rubitherm RT65 parafininin kullanıldığı sayısal çalışmada, parafinin saf durumu ile ısı iletkenliği iyileştirilmiş parafin-grafit ve parafin-kanatçık hallerinin deşarj durumunda ısı performanslarını inceleyerek karşılaştırmalar yapmışlardır. İlgili üç halin deşarj ısı performansı aralarında kıyaslandığında parafin-kanatçık yapısının diğer iki duruma göre performansının daha iyi düzeyde olduğunu belirlemişlerdir.

Biçer & Sarı (2017), yaptıkları çalışmada önce silikafume ve polietilen glikol FDM'lerinden oluşturdukları karışımın termal ve ısı enerji depolama özelliklerini inceledikten sonra ilgili karışıma ısı iletkenliği iyileştirmek amacıyla farklı kütle oranlarında karbon nanotüp ekleyerek oluşturdukları silindirik numunelerin ısı enerji depolama, erime/katılama süreci üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre kompozit karışım içerisindeki nanotüpün kütlece oranı arttıkça ısı iletkenlik artarken erime ve katılama sürelerinin kısalmasına önemli düzeyde etki ettiğini göstermişlerdir.

Yağcı (2017), düşey halkasal silindirik depoda FDM'nin şarj/deşarj süreçlerini farklı kanatçık profilleri ve farklı akışkan giriş sıcaklıklarının etkisi üzerinden deneysel olarak incelemiş, kanatçık ilavesiz duruma kıyasla test edilen tüm kanatçık profilleri için ergime ve katılama süreleri kısaldığı sonucuna ulaşmıştır.

Yuan vd. (2019), termal enerji depolama sistemlerinde kullanılması amacıyla faz değişim malzemesi olarak eritritol ve farklı ağırlık oranlarında (%5, 8, 10, 12 ve 15) genişletilmiş grafit (GG) kullanarak kompozit bir malzeme oluşturmuşlar, bu malzemenin termal özelliklerini ve aşırı soğuma davranışlarını erime/katılama süreçleri üzerinden deneysel olarak araştırmışlardır. Kompozit yapıdaki GG miktarının artırılması termal iletkenliği arttırırken, aşırı soğuma derecesini, erime süresini ve kompozit malzemenin gizli ısı miktarını azalttığını ortaya koymuşlardır

Temel & Erdiş (2020), farklı erime sıcaklıklarına (42°C, 62°C, 82°C) sahip parafin esaslı faz değiştiren maddeler ile kütlege farklı oranlarda (%1, %3, %5) grafen nanoparçacıktan meydana getirdikleri silindirik numunelerin erime/katılaşma sürecindeki termal davranışlarını ve termofiziksel özelliklerini deneysel bir çalışma ile incelemişlerdir. Grafen nanoparçacık katkısının tüm çalışmalar arasında süre performansı açısından en yüksek %63,3 iyileştirdiğini belirlemişlerdir.

Wang vd. (2020), beş farklı kütle oranında (%2, 5, 10, 15 ve 20) genişletilmiş grafit (GG) ile hazırlanan Parafin/Genişletilmiş grafit kompozitlerin erime/katılaşma çevrimlerinin 100 döngüye ulaştığı duruma kadarki gizli ısı, faz geçiş sıcaklığı, termal iletkenlik, kimyasal kararlılık gibi termal ve fiziksel özellikler üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Kompozit yapılarında GG oranı arttıkça termal özellikler ve sızıntı sorunları iyileştirilebilir fakat termal döngünün artmasıyla ilgili yüksek GG oranlı kompozitlerde olumsuz etkileri olduğu yapılan çalışmalar ile elde edilmiştir.

Lu vd. (2021), gizli ısı depolama ünitelerinin temel malzemesi FDM ile farklı parçacık boyutuna sahip genişletilmiş grafit kullanarak kompozit bir malzeme elde etmişlerdir. Kompozitin termofiziksel özellikleri ile şarj ve deşarj karakteristiklerini incelemişlerdir.

Kazemian vd. (2021), metal oksit nanoparçacık ilaveli FDM kompozitin, termofiziksel özelliklerini belirlenmesi, nanoparçacık ilavesinin deşarj süreci üzerindeki etkilerinin belirlenmesi ve ITA giriş sıcaklığının ısı performans üzerindeki etkilerini araştırdıkları nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Yazıcı vd. (2021), yatay silindirik depoda FDM/Grafit matris bloklar kullanarak gizli ısı depolama ünitelerinin karakteristiğini toplam erime süresi ve ısı transferi performansı üzerinden deneysel olarak incelemişlerdir.

Wołoszyn vd. (2021), parafinin erime süresini azaltmak için spiral kanatlara sahip helisel ve konik tüp depolama üniteleri tasarlamıř ve sayısal olarak incelemiřlerdir.

Tablo 8. Yapılan bazı çalışmalar

Yazar(lar)	Depo geometrisi	Araştırma parametreleri	Araştırma konusu
Yuan vd. (2019)	Dikdörtgen prizma depo	- Genişletilmiş grafit kullanımı	Eritritol/genişletilmiş grafit silindirik kompozitlerin termal özelliklerinin ve erime/katılaşma süreçlerinin deneysel olarak incelenmesi
Wang vd. (2020)	60 mm çaplı disk numuneleri	- Genişletilmiş grafit kullanımı	Parafinin termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesinin termal çevrim ve ısı depolama biriminin verimliliği üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması
Mills vd. (2006)	Dikdörtgen blok numuneleri	- Presleme yönü - Farklı yığın yoğunluğu	Kompozit yapıları oluşturulurken sıkıştırma yönüne göre ısı iletkenlik davranışlarının araştırılması
Mallow vd. (2016)	Silindirik numuneler	- Grafit yığın yoğunluğu	Farklı grafit yığın yoğunluğundaki kompozitlerin erime performansının deneysel olarak araştırılması
Ling vd. (2015)	Dikdörtgen bloklar	- Farklı kütle oranlarında genişletilmiş grafit eklenmesi	FDM/genişletilmiş grafit kompozitte bulunan grafit yığın yoğunluğunun ısı kapasitesi ve termal iletkenlik üzerindeki etkisinin incelenmesi
Kim vd. (2014)	Düşey silindirik kanatçıklı depolama ünitesi	- Isı transfer yüzeyinin artırılması	Düşey konumlandırılmış gizli ısı depolama biriminde saf ve grafit ile geliştirilmiş FDM'nin erime/katılaşma davranışının incelenmesi
Akgün vd. (2007)	Düşey silindirik depo	- Depo dış kabuk açısı - Isı transfer akışkanının (ITA) giriş sıcaklığı ve kütledebisi	Silindirik düşey depoda birçok farklı parametre ile parafinin erime/katılaşma süreçlerinin deneysel olarak incelenmesi
Aydın vd. (2007)	Düşey silindirik depo	- Depo dış kabuk geometrisi - ITA'nın giriş sıcaklığı ve kütledebisi	Düşey silindirik depolama biriminde dış kabuk geometrisi ve ITA parametrelerinin ısı performans üzerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi

Tablo 8.'in devamı

Yazar(lar)	Depo geometrisi	Araştırma parametreleri	Araştırma konusu
Esen & Ayhan (1996)	Düşey silindirik tank	- ITA sıcaklığı ve debisi - FDM türü - Depo yarıçapı	Silindirik enerji depolama tankında farklı FDM türlerinin ısı depolama süreçlerinin nümerik metotla incelenmesi
Avcı & Yazıcı (2013)	Yatay silindirik depo	- Isı transfer akışkanı giriş sıcaklığı	Yatay silindirik depolama biriminde parafinin gizli ısı termal enerji depolama performansının deneysel olarak incelenmesi
Yazıcı vd. (2014)	Yatay silindirik depo	- Eksantrik konumlama - ITA farklı giriş sıcaklıkları	Yatay silindirik depodaki parafinin dış kabuğun farklı konfigürasyonları için erime davranışının deneysel olarak incelenmesi
Taşkıran (2013)	Düşey silindirik depo	- Nanoparçacık ilavesi - ITA farklı giriş sıcaklıkları ve kütleli debileri	Termal özellikleri iyileştirilen FDM'nin erime/katılaşma performansının düşey silindirik depoda incelenmesi
Azarifar vd. (2017)	Yatay silindirik depo	- Grafit ve kanatçık eklenmesi	Isıl özellikleri iyileştirilmiş FDM'nin katılaşma (deşaj) sürecindeki performansının silindirik depo içerisinde modellenerek sayısal yöntem ile incelenmesi
Biçer & Sarı (2017)	Silindirik/pulsu numuneler	- Farklı oranlarda karbon nanotüp ilavesi	İki farklı faz değişim maddesinden oluşan karışıma farklı kütle oranlarında karbon nanotüp eklenmesiyle enerji depolama ve ısı geri kazanım performansının deneysel olarak incelenmesi
Temel & Erdiş (2020)	Düşey silindirik numuneler	- Farklı erime sıcaklıklarındaki FDM'ler - Kütlece farklı oranlarda grafen nanoparçacık eklenmesi	Farklı konfigürasyonlarda hazırlanan FDM/Grafen nanoparçacık silindirik yapılarının termal özellikleri ve erime/katılaşma kapasitelerinin incelenmesi
Guo vd. (2015)	Düşey silindirik depo	- ITA'nın giriş sıcaklıkları	Parafin/Grafit köpük matris kompozitin ITA'nın çalışma koşullarına göre erime sürecinin incelenmesi

Tablo 8'in devamı

Yazar(lar)	Depo geometrisi	Araştırma parametreleri	Araştırma konusu
Li vd. (2021)	Yatay silindirik depo	Gözenekli yapı olarak; - Alüminyum nitrit ilavesi - Genişletilmiş grafit ilavesi	FDM olarak kullanılan polietilen glikolün, farklı konfigürasyonlardaki iki farklı matris yapısına (alüminyum nitrit ve genişletilmiş grafit emdirilmesiyle yeni kompozit yapılar elde etmişlerdir. Bu kompozitlerin DSC analizlerini yaparak termal durumlarını ve silindirik depoda erime/katılaşma davranışlarını incelemişlerdir.
Susantez vd. (2018)	Silindirik depo	- Kanatçık etkisi	Eş merkezli silindirik depoya doldurulan çalışma aralığı 41-44°C olan FDM'nin ısı enerji depolama performansına depo boyunca düzgün dağılma kanatçıkların sayısı ve kalınlığı üzerinden incelendiği sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmalar sonucunda yüksek sayıda kanatçık kullanımının sistem performansını en yüksek düzeyde etkilediği bulgusuna ulaşmışlardır.
Lu vd. (2021)	Düsey silindirik depo	- ITA giriş sıcaklığı - ITA debisi	FDM olarak parafin kullanarak ITA'nın farklı giriş sıcaklığı ve değişen debisi parametreleri ile depolama ünitesinin şarj ve deşarj karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir.
Lafdi vd. (2008)	Halkasal numuneler	- Gözeneklilik oranları - Fourier sayısı	Grafit köpük/FDM yapısının gözeneklilik ve Fourier değerine göre sistemlerin termal performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Saf duruma kıyasla %95 gözenekliliğe sahip yapının 5 kat daha iyi performans sergilediği bulgusuna ulaşmışlardır.
Zhong vd. (2010)	Dikdörtgen prizma numuneler	- Yığın yoğunluğu	FDM/sıkıştırılmış doğal grafit yapısından oluşan TED sistemlerinin termal performans parametrelerini (ısı iletkenlik, gizli ısı) araştırmışlardır. Termal iletkenliğin grafit, gizli ısının FDM kütle oranıyla doğrusal ilişkisi olduğunu saptamışlardır.

1.6. Tezin Amaç ve Kapsamı

Gizli ısı termal enerji depolama (GITED), güneş ısı enerjisi depolama ve atık ısı geri kazanımı gibi uygulamalar ile enerji tasarrufu, sürdürülebilir enerji, yeşil çevre, düşük karbon ayak izi kavramlarına ve ayrıca ülkelerin enerji ekonomilerine önemli katkılar sunma potansiyeline sahiptir. GITED teknolojileri sahip olduğu potansiyel ile araştırma ilgisinin yoğunlaştığı konulardan biri haline gelmiştir.

GITED sistemlerinde enerji depolama performansı üzerindeki belirleyici unsurlar depolama (şarj/erime) ve geri kazanım (deşarj/katılma) süreleridir. Literatür incelendiğinde, güneş ısı enerjisi depolama ve atık ısı geri kazanımı gibi uygulamalara yönelik olarak faz değiştiren madde ilaveli sistemlerin termal performansının iyileştirilmesi için grafit köpük/matris yaklaşımını kapsayan çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir.

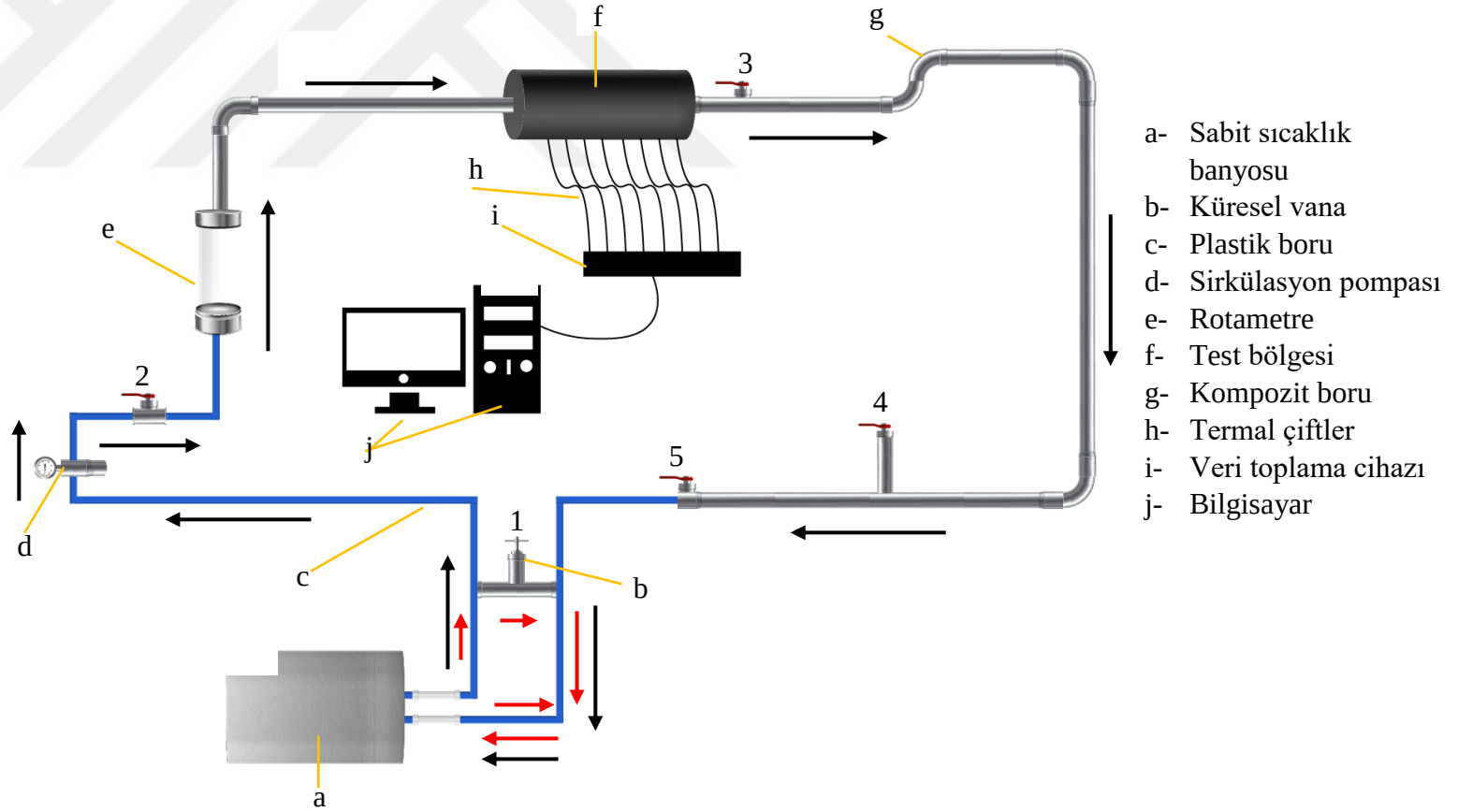
Grafit köpük/matris sahip olduğu yüksek gözenek oranları, yüksek yüzey/hacim oranları, yüksek termal iletkenliğe sahip termal köprüler ile önemli avantajlar sağlarken, parafinin yapı içerisinde kapsüllenmesini de sağlayarak sızma problemini ortadan kaldırmaktadır.

Tez kapsamında, halka aralıklı bir geometriye sahip bir enerji depolama ünitesinde FDM ilaveli grafit köpük/matrisin termal erime ve katılma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında matris yoğunluğu ile akışkan giriş sıcaklığı ve debisinin şarj vedeşarj performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Performans, yerel sıcaklık profilleri, erime görüntüleri, enerji depolama oranı, şarj vedeşarj süreleri üzerinden karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

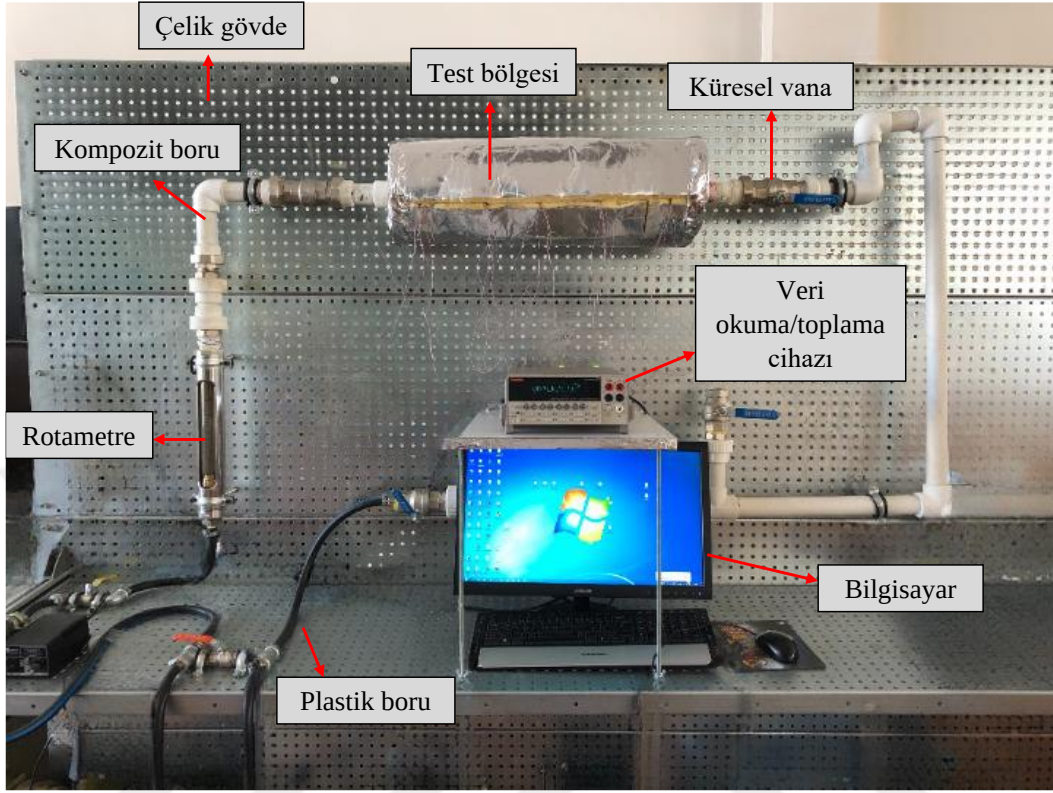
Yatay olarak konumlandırılmış halka aralık silindirik depo geometrisine sahip FDM/grafit matris termal enerji depolama ünitesinin erime ve katılaşma performansı kapsamlı deneysel bir çalışma ile ortaya konulmuştur.

Yatay olarak konumlandırılmış halkasal FDM ilaveli grafit matris termal enerji depolama ünitesinin depolama performansının araştırılmasına yönelik olarak hazırlanan deney düzeneğinin şematik ve uygulama görünüşleri Şekil 11a-b’de verilmiştir. Deney düzeneği yedi ana unsurdan meydana gelmektedir: taşıyıcı gövde, boru sistemi, şartlandırma banyosu, sirkülasyon pompası, rotametre, test bölgesi ve veri toplama sistemi. Borulama sistemi yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımına sahip 40 mm’lik PP-R kompozit boru ($k_{kb} = 1,10 \text{ W/mK}$), küresel vanalar ve bağlantı elemanları kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 11. Deney düzeneğinin şematik görünüşü (a), uygulama görünüşü (b)

Şekil 11'in devamı



(b)

Deney düzeneğinin çalışma prensibi şu şekildedir: Test bölgesindeki ölçüm noktalarının şarj/erime/depolama süreci için başlangıç anında ($t=0$) $T_{ortam}=25^{\circ}\text{C}$ sıcaklığına ulaşması sağlanmaktadır. Erime sürecinin tamamlanması ile gerçekleştirilen deşarj/katılaşma/geri kazanım sürecinde ise ortamın denge sıcaklığına ulaşması ($T_{denge}=75^{\circ}\text{C}$) ile katılaşma süreci başlatılmaktadır. Şartlandırma banyosu (Labo CX-100, $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) kullanılarak ısı transfer akışkanı (ITA) belirlenen giriş sıcaklık değerlerine (şarj: $T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$, 80°C ve 85°C ; deşarj: $T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$, 25°C ve 30°C) ulaştırılır. ITA olarak saf su kullanılmıştır. Akışkanın tanımlanan giriş sıcaklığına şartlandırılması ikincil boru akış bölgesi (şartlandırma bölgesi) içerisinde gerçekleştirilir. ITA'nın şartlandırma hattında izlediği yol Şekil 11a'da kırmızı ok ile gösterilmiştir. Test bölgesi ve ısı transfer akışkan giriş sıcaklık değerlerinin başlangıç koşullarına ulaşması ile ısı transfer akışkanının test bölgesine ana borulama sistemi üzerinden yönlendirilmesi sağlanır. ITA'nın ana hat üzerinde izlediği yol Şekil 11a'da siyah ok ile gösterilmiştir. Isı transfer akışkanın sirkülasyonu sirkülasyon pompası ile sağlanır. Akışkanın hacimsel debi ölçümü/ayarı ($Q=100\text{ l/sa}$, 190 l/sa , 280 l/sa)

standart tip bir rotametre ($\pm 0,05$ l/dk) ile gerçekleştirilir. Test bölgesine yönlendirilen ısı transfer akışkanın borulama sistemi ile tekrar şartlandırma banyosuna gelmesi sağlanır. Test bölgesi yerel sıcaklık ölçümleri, termoeleman çiftleri (Omega,T-tipi, $\pm 0,5^\circ\text{C}$) kullanılarak 60 saniye aralıklarla sıcaklık veri toplama cihazı (Keithly 270, $\pm 0,001^\circ\text{C}$) üzerinden kayıt altına alınır. Depolama (erime/şarj) ve geri kazanım(katılaşma/deşarj) süreçlerinde en son erimeye veya katılaşmaya dahil olan kritik yerel noktanın limit sıcaklık değerlerine ($T_e=49-56^\circ\text{C}$) ulaşması ile deney sonlandırılır.

Deneyler süresince termoeleman çiftleriyle okunan sıcaklık değerleri Keithly 7708 model 40 kanallı veri toplama kartıyla toplanmış ve ilgili sıcaklık verileri Keithly 2700 integra serisi veri toplama cihazı üzerinden bilgisayardaki veri alanına aktarılmıştır. Veri toplama cihazı “cold junction” özelliğine sahip olduğu için herhangi bir referans sıcaklık kontrolü gerektirmeden ölçümleri gerçekleştirebilmektedir. Yerel noktalarda sıcaklık ölçümleri alınırken kanallar arası geçiş süresi 0,02 saniye, ölçümler arası zaman adımı 60 saniye olarak tanımlanmıştır. Deneyler boyunca kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri Tablo 9’da gösterildiği gibidir.

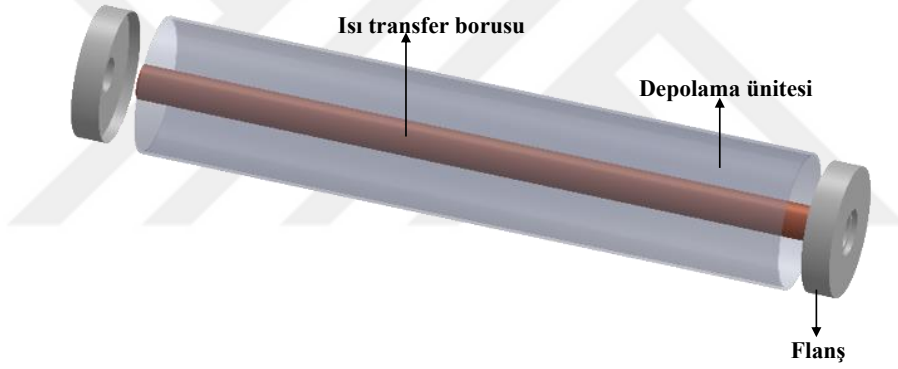
Tablo 9. Kullanılan ölçüm cihazlarının özellikleri

Ölçüm cihazı	Cihaz kodu	Ölçüm aralığı	Hassasiyeti
Sabit sıcaklık banyosu	Labo CX-100	$-20 \div +100^\circ\text{C}$	$\pm 0,1^\circ\text{C}$
Rotametre	Y-G10-25/paslanmaz çelik	$40 \div 400$ l/sa	$\pm 0,05$ l/dk
Veri toplama cihazı/kartı	Keithley 2700/integra serisi	$-200 \div 1820^\circ\text{C}$	$0,001^\circ\text{C}$

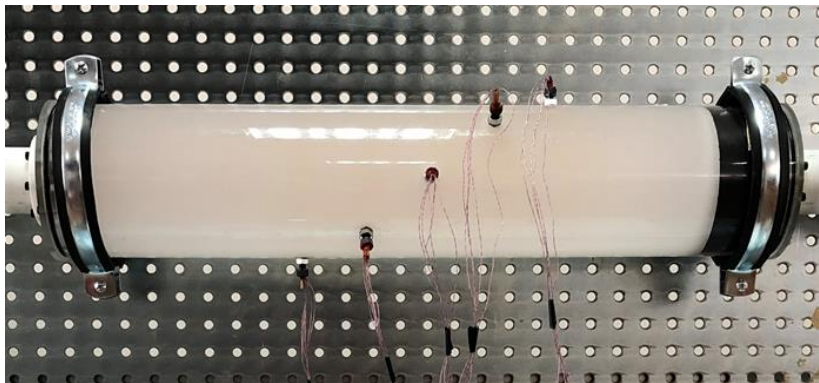
2.1. Test/Depolama Bölgesi

Halka aralık geometriye sahip test bölgesi, ısı transfer borusu, termal enerji depolama ortamı (parafin veya parafin/grafit matris), dış gövde ve flanşlar olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır.

Test bölgesine ait şematik resim ve uygulama fotoğrafı Şekil 12a-d’de verilmiştir. Gizli ısı termal enerji depolama ortamı olarak kullanılacak olan saf FDM (parafin) ve FDM/grafit matris malzemeler halka aralık içerisinde yer almaktadır. Test/ölçüm bölgesinin uzunluğu 500 mm’dir. Isı transfer borusu (dış çap: 28,5 mm, kalınlık: 1 mm, uzunluk: 600 mm) yüksek ısı iletkenliğe ($k_{bakır\ boru} = 394\ W/mK$) sahip bakır malzemeden imal edilmiştir. Gövde (dış çap: 119,80 mm; kalınlık: 3 mm; uzunluk: 574 mm) ve flanşlar ısı iletkenliği düşük ısı iletkenliğe sahip şeffaf pleksiglas ($k_{pleksiglas} = 0,19\ W/mK$) malzemeden üretilmiştir. Isı transfer borusu ve dış gövdeye ait boyutlar Tablo 10’da verilmiştir. Test bölgesi üzerinden oluşacak ısı kayıplarının azaltılması için test bölgesi (dış gövde) 90 mm cam yünü yalıtım malzemesi ($k_{cam\ yünü} = 0,031 - 0,044\ W/mK$) ile kaplanmıştır.



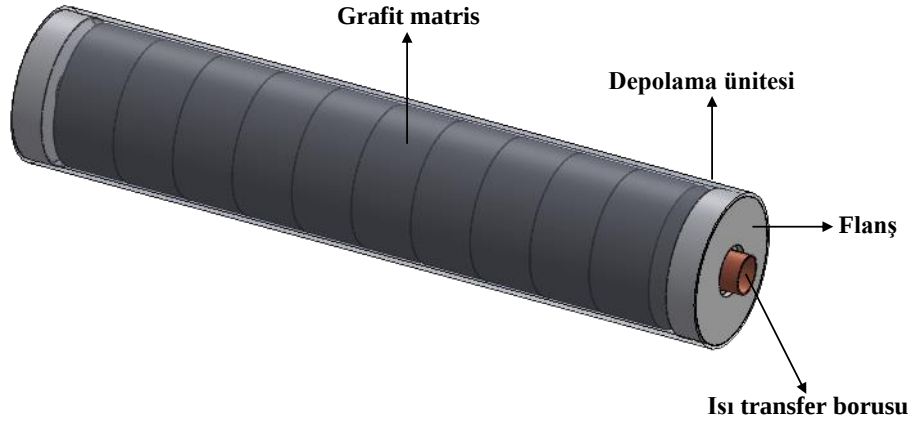
(a)



(b)

Şekil 12. Test bölgesi: parafin depolama ünitesi, (a) şematik resim, (b) uygulama resmi; FDM/grafit matris düzenlemesi, (c) şematik resim (d) uygulama resmi

Şekil 12'nin devamı



(c)

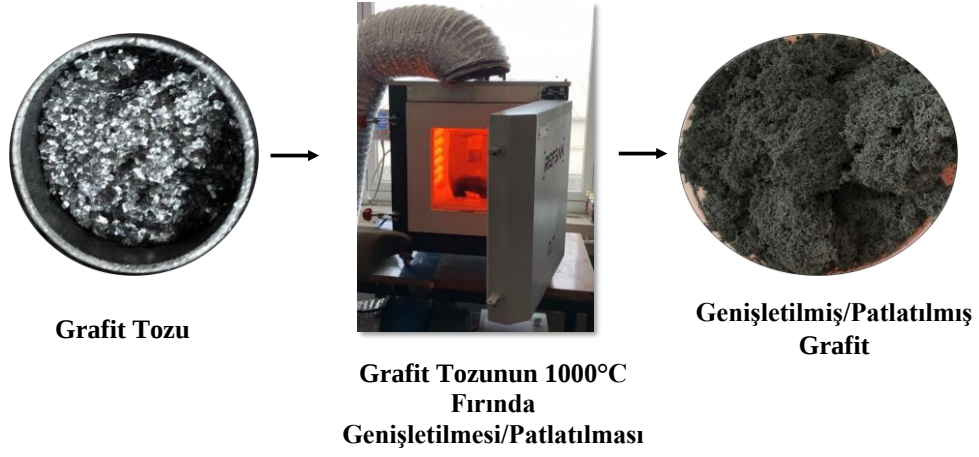


(d)

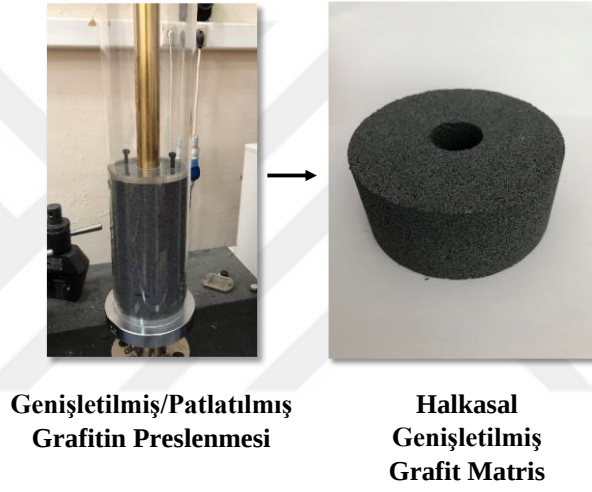
Tablo 10. Bileşenlerin geometrik özellikleri

	Dış çap, D_d (mm)	İç çap, D_i (mm)	Uzunluğu, L (mm)
Gövde	119,80	113,80	574
Isı transfer borusu	28,5	26,5	600

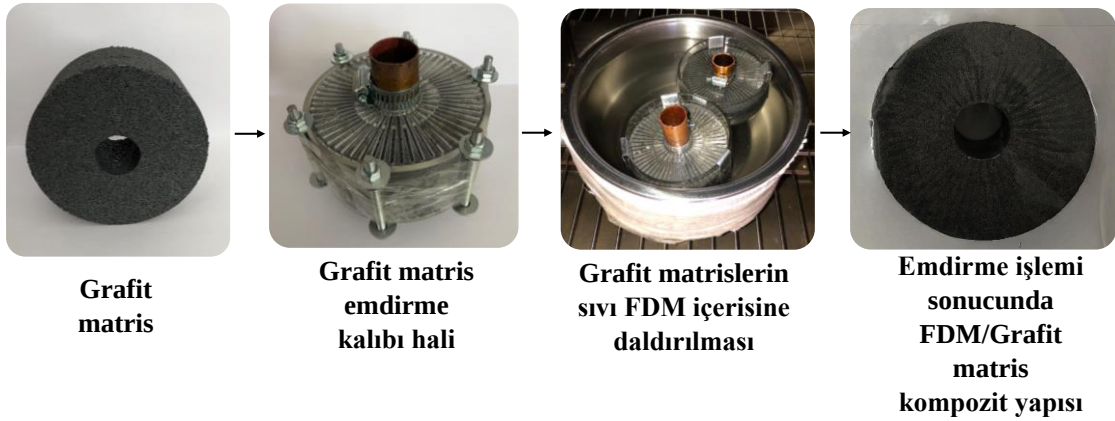
Isı depolayıcı ortam olarak saf FDM ve farklı yığın yoğunluklarına sahip FDM/grafit matris kullanılmıştır. Faz değiştiren malzeme olarak sağladığı avantajlar (toksik ve korozyif olmaması, tersinir çevrime sahip, kolay temin edilebilir vb.) göz önüne alınarak temin edilen erime aralığı 49-56°C olan ticari parafin (Mercan Kimya) kullanılmıştır. Parafine ait termofiziksel özellikleri Tablo 11’de verilmiştir. Sadece parafinin kullanıldığı ısı depolama



(1)



(2)



(3)

Şekil 14. FDM/grafite matris blok üretim aşamaları; genişletilmiş grafit üretimi (1), grafit matris üretimi (2), FDM/grafite matris üretimi (3)

Genişletilmiş grafit doğal genişletilebilir grafitin kül fırını (REFSAN RD27) içerisinde yüksek ısıya (900-1000°C) belirli bir süre (60 saniye) maruz kalarak geniştilmesi ile elde edilmektedir. Oluşan geniştilmiş grafit yüksek gözenekliliğe (>85) sahip akordiyon şeklinde (veya solucanımsı) bir morfolojik bir yapıya sahiptir (şekil 15). Grafit matris blok üretimi ise geniştilmiş grafit tozlarının tek eksenli bir kalıp içerisinde niversal çekme-basma test cihazı (MTS Criterion) kullanılarak soğuk olarak sıkıştırılması sonucunda 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l matrisler sırasıyla %2, %1,5 ve %0,95 hata ile elde edilmiştir. Tez kapsamında üç farklı yığın yoğunluğu için grafit blok üretimi yapılmıştır. FDM/grafit matris üretimi ise hazırlanan grafit matris blokların FDM havuzuna daldırılarak FDM'nin matris içerisine yüzey kuvvetleri ve kılcallık etkisi emdirilmesi ile sağlanmıştır. FDM havuzu, sıvı haldeki parafinin, endüstriyel fırın içerisinde 70°C'ye şartlandırılması ile oluşturulmuştur. Emdirme süreci grafit matris doyuma ulaşıncaya kadar sürdürülmüştür. 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunlukları için emdirilen parafin miktarı ve toplam kütle miktarları, sırasıyla, 353 gram, 328 gram, 301 gram olarak ortalama %4 hata oranıyla elde edilmiştir. Parafin/grafit matrislerin hazırlık aşamasında hata oranlarından kaynaklanan parafin termal enerji depolama nitesi ve parafin/grafit matris düzenlemeleri için toplam parafin miktarında düşük yoğunluklu sistemden yüksek yoğunluğa gittikçe sırasıyla %3, %8 ve %16 parafin miktarlarında farklılık bulunmaktadır. Emdirilen parafin miktarı üzerinden 25, 50 ve 75 g/l yığın yoğunluklarına sahip grafit matrislerin gözenek oranı değerleri, sırasıyla, %95, %91, ve %88 olarak hesaplanmıştır. FDM/grafit matris depolama ortamına ait termofiziksel zellikler Tablo 11'de sunulmuştur.



şekil 15. Doğal pulsu grafit: genişletilebilir (a), geniştilmiş (b)

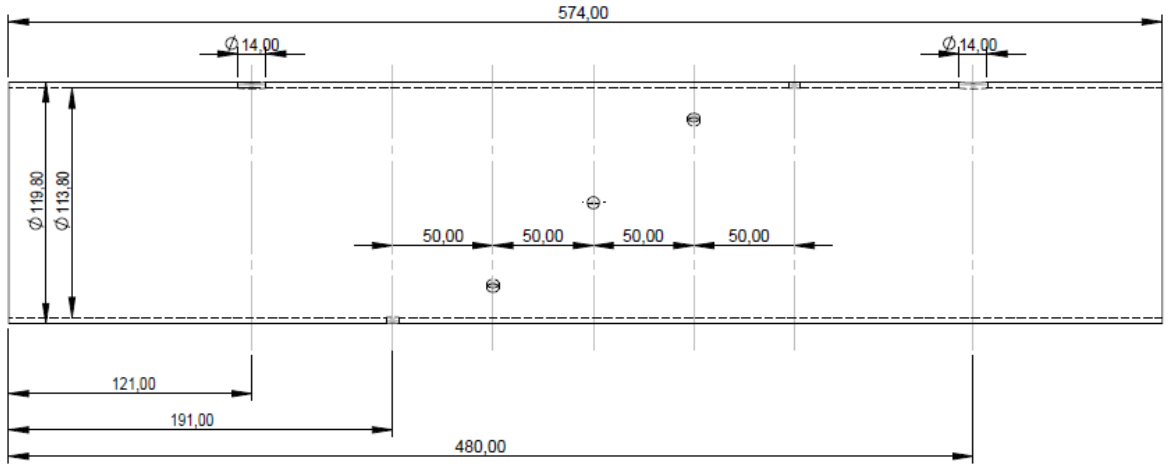
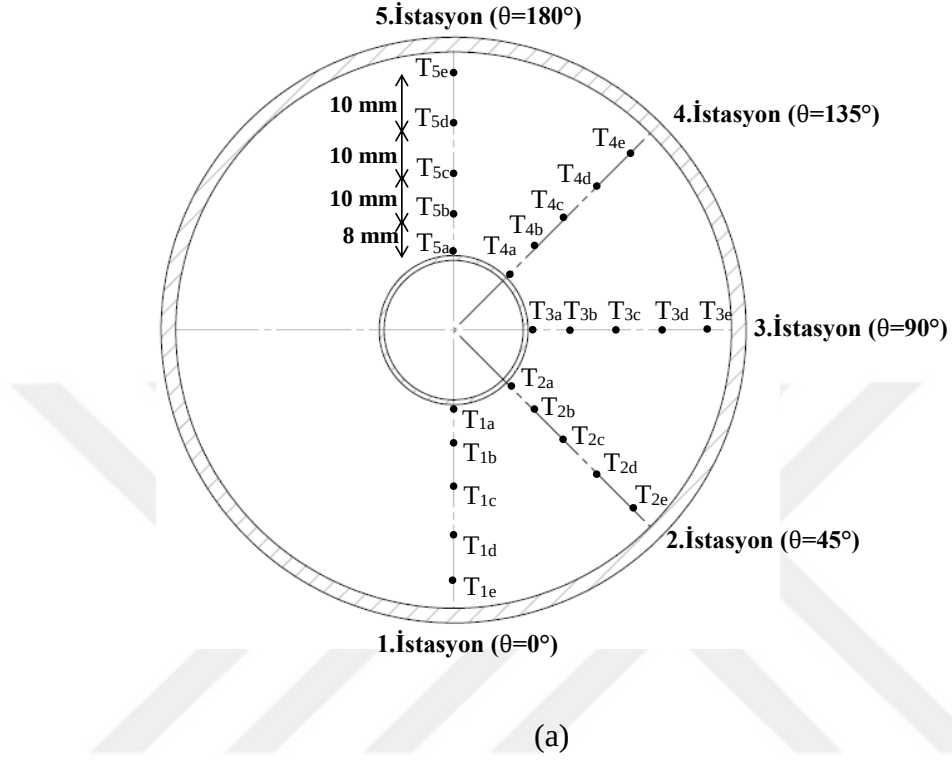
Tablo 11. Parafinin ve grafit matrislerin termofiziksel özellikleri

Özellikler	Parafin (0 g/l)	25 g/l	50 g/l	75 g/l
Yoğunluk (ρ)	854 kg/m ³	-	-	-
Özgül ısı (c_p)	1540 J/kgK	-	-	-
Erime aralığı (T_e)	49-56 °C	48-56 °C	48-56 °C	48-56 °C
Katılaşma aralığı (T_k)	55-50 °C	55-50 °C	55-50 °C	55-50 °C
Erime gizli ısı (L_e)	165 J/g	159 J/g	151 J/g	147 J/g
Katılaşma gizli ısı (L_k)	165 J/g	158 J/g	150 J/g	145 J/g
Isıl iletkenlik (k)	k_0 :0,21 W/mK	k_{25} :2,85 W/mK	k_{50} :3,96 W/mK	k_{75} :5,77 W/mK

FDM/grafit matris depolama ünitesi üretilen on adet FDM/grafit matris bloğun bir dış gövde içerisine yerleştirilmesi ile elde edilmiştir (Şekil 12c). FDM/grafit matris blokların yerleşiminde bloklar arasındaki temas direncinin azaltılması için birleşim/temas yüzeylerine termal macun sürülmüştür (Şekil 12d).

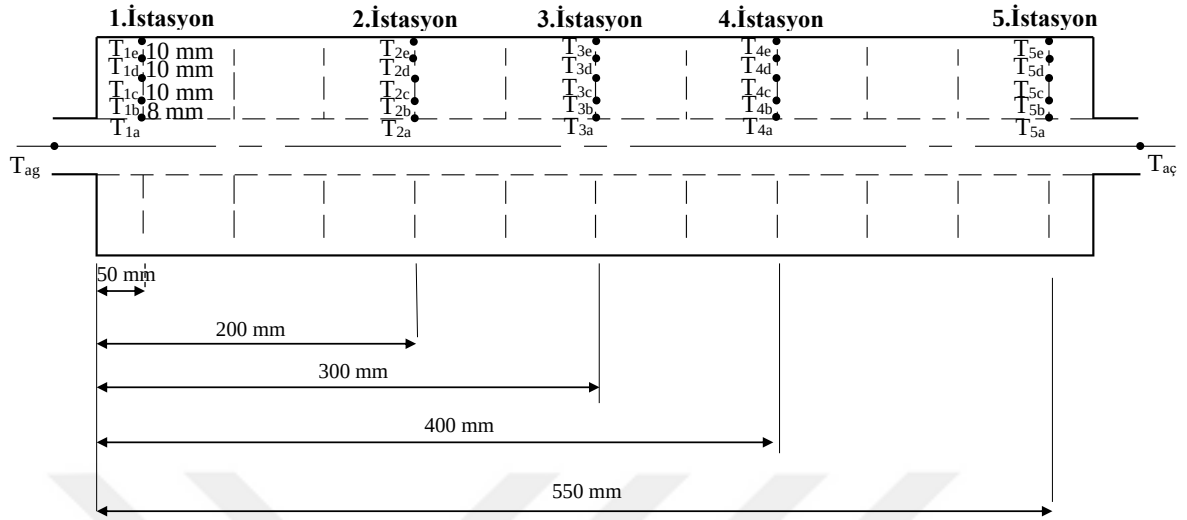
Parafin ve parafin/grafit matris enerji depolama ünitelerinin termal performansı yerel sıcaklık ölçümleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tüm depolama düzenlemeleri için depolama ortamından farklı eksenel konumlara sahip 5 farklı istasyonda 5 ayrı noktadan radyal doğrultuda sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Parafin ve parafin/matris düzenlemelerine ait termoeleman yerleşimleri Şekil 16'da verilmiştir. Sıcaklık ölçümleri T-tipi termoeleman çiftleri (Omega marka-0,01 inç tel çapı) ile gerçekleştirilmiştir. Parafin depolama ünitesi düzenlemesi için ölçüm istasyonları, doğal taşınım etkisi sebebiyle, 45°'lik açı ile konumlandırılmıştır. FDM/grafit matris düzenlemesi için de etkin ısı transfer mekanizmasının iletim olması sebebiyle açısız yerleşim yapılmamıştır. Akışkan giriş T_{ag} ve çıkış T_{ac} sıcaklıklarının kontrolü/ölçümü için de enerji depolama ünitesi giriş ve çıkışına birer adet termoeleman çifti yerleştirilmiştir. Akışkan çıkış sıcaklıklarının görece düşük ve

termoeleman belirsizlik seviyelerine yakın olması sebebiyle akışkan çıkış ($T_{a\check{c}}$) ve giriş sıcaklık (T_{ag}) farklarında anlamlı/karşılaştırabilir sonuçlar elde edilemediği belirtilmelidir.



Şekil 16. Termoeleman yerleşimi: (a-b) parafin GITED, (c) parafin/grafit matris GITED

Şekil 16'nın devamı



(c)

Şekil 16'da T_{xy} şeklinde gösterilen sıcaklık ölçüm noktalarındaki alt indisler rakam ve harflerden meydana gelmektedir. "x" alt indisi 1'den 5'e kadar rakamları içerir ve termoelemanın hangi istasyonda olduğunu gösterir. "y" indisi a,b,c,d,e harflerini içerir ve termal çiftin bakır boruya olan uzaklığını göstermektedir. "a" harfi bakır yüzeyi üzerindeki termoelemanı temsil ederken, alfabetik sıralama ile ilerledikçe termoelemanların istasyon üzerinde bakır yüzeye olan uzaklığı artar. Örnek olarak, T_{2e} termoelemanı; 2.istasyonda bakır boru yüzeyine 38 mm uzaklıkta, dış cidara en yakın noktadaki termoelemanı simgelerken, T_{1a} noktası; 1.istasyon bakır boru üzerindeki termoelemanı simgelemektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında, yatay olarak konumlandırılmış halkasal FDM/grafit matris GITED ünitesinin depolama (erime) ve geri kazanım (katılaşma) performansı kapsamlı deneysel bir çalışma ile incelenmiştir. Farklı grafit matris yığın yoğunluğu (25 g/l, 50 g/l, 75 g/l), akışkan giriş sıcaklığı (şarj için; 75°C, 80°C, 85°C,deşarj için; 20°C, 25°C, 30°C) ve akışkan debisi (şarj:100 l/sa, 190 l/sa, 280 l/sa;deşarj:190 l/sa) değerlerinin depolama ünitesinin erime ve katılaşma davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 0 g/l yığın yoğunluğu sadece parafin kullanımının olduğu durumu, bir başka ifade ile referans durumu ifade etmektedir. Farklı düzenlemelere sahip GITED ünitelerinin termal performansı yerel sıcaklık eğrileri, erime/katılaşma davranışı, erime/katılaşma süreleri ve enerji depolama oranı üzerinden karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

3.1. Isı Depolama (Erime) Davranışının İncelenmesi

3.1.1. Parafin Gizli Isı Termal Enerji Depolama Ortamı- 0 g/l

Tez kapsamında üç farklı akışkan giriş sıcaklığı ($T_{ag}=75, 80, 85^{\circ}\text{C}$) ve üç farklı akışkan debisi (100, 190, 280 l/sa) için deneyler gerçekleştirilmiştir. Ancak, tezin sadeliği için bu bölümde tek bir akışkan giriş sıcaklığı $T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$ ve 190 l/sa debi değerleri için yerel sıcaklık değişimleri sunulmuştur. Farklı çalışma koşullarına ait veriler karşılaştırma grafiklerinde verilmiştir.

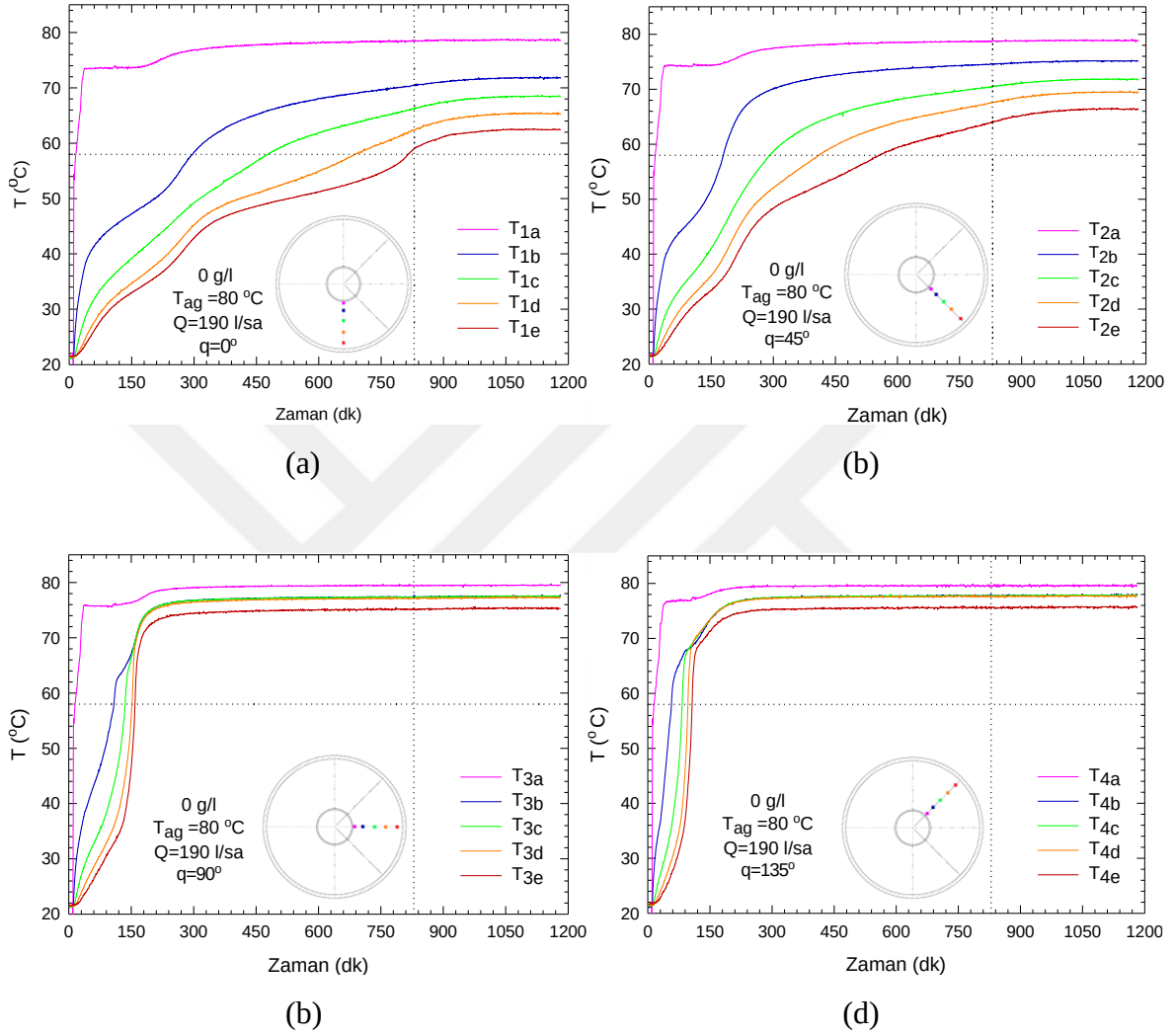
Sadece FDM kullanımının olduğu referans durumu belirten 0 g/l yığın yoğunluğuna ait 5 farklı istasyondaki yerel sıcaklık değişimleri Şekil 17a-e’de verilmiştir. Farklı açısallarda yer alan ölçüm istasyonları içerisindeki yerel sıcaklık eğrileri Şekil 18a-e’de sunulmuştur.

Yerel noktalara ait sıcaklık profilleri, genel karakter olarak, faz dönüşüm aralığına kadar yerel sıcaklık artışlarının yüksek olduğunu, erime bölgesine ulaşılması ($T_e=49-56^{\circ}\text{C}$) ile sıcaklık artış hızının azaldığını ve erime bölgesinin aşılması ile tekrar yerel nokta sıcaklık artış hızlarının arttığını göstermektedir. Bu davranış, özellikle, erime sürecinin yavaş ilerlediği 1. ve 2. ölçüm istasyonundaki noktalar için (T_{1d-e}, T_{2d-e}) daha belirgin olduğu belirtilmelidir. Sıcaklık artış hızlarının görece olarak daha yüksek olduğu bölgelerde katı-

sıvı faz dönüşümünün daha hızlı tamamlanması yukarıda ifade edilen durumun görünürlüğünü kısıtlamaktadır. Her bir istasyon için yerel nokta sıcaklık değerlerinin bakır borudan uzaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Bu durum, ısı transferinin bakır boru yüzeyinden dış cidara doğru gerçekleşmesinin ve ısı dirençlerin bir sonucudur. Beş farklı ölçüm istasyonu birbiri ile karşılaştırıldığında artan açısal konum ile yerel sıcaklık değişimlerinin daha hızlı olduğu ve dolayısıyla yerel sıcaklıkların daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, depolama ortamı içerisinde, sıvı FDM bölgesinde oluşan doğal taşınım etkisi ile, homojen bir sıcaklık dağılımının olmadığını ortaya koymaktadır. Sıvı bölgedeki doğal taşınımın erime davranışı üzerindeki etkisi katı/sıvı ara yüz gelişiminin olduğu bölümde incelenmiştir. Örnek olarak, $t=90$. dakika için 1. (T_{1a-e}), 2. (T_{2a-e}), 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonlarındaki sıcaklık değerleri, sırasıyla, 74°C, 44°C, 35°C, 31 °C, 29°C (1.istasyon); 74°C, 45°C, 35°C, 31°C, 29°C (2.istasyon); 76°C, 51°C, 38°C, 33°C, 31°C (3.istasyon); 77°C, 68°C, 67°C, 46°C, 37°C (4.istasyon) ve 77°C, 70°C, 70°C, 60°C, 54°C (5.istasyon) olarak ölçülmüştür. Depolama sürecinin ilerlemesi ile ($t>180$ dakika) 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonlarındaki yerel sıcaklık değerlerinin birbirine yakın değerler alarak sabit bir değere ($T=77^\circ\text{C}$) yakınsadığı bir görülmektedir. Bu periyotta ($t>180$.dakika), ilgili ölçüm istasyonları (3, 4 ve 5) için katı-sıvı faz değişiminin tamamlandığı görülmektedir. Ancak, 1. (T_{1a-e}) ve 2. (T_{2a-e}) ölçüm istasyonları için hem kendi içerisindeki yerel sıcaklık farklılıklarının hem de 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonları ile olan sıcaklık farklılıklarının yüksek olduğu görülmektedir. Bir başka ifade ile 1. ve 2. ölçüm istasyonu bölgelerinde termal tabakalaşma olduğu belirtilmelidir. Bu durum, depolama ortamını alt bölgelerinde (1. ve 2. ölçüm istasyonlarında) etkin ısı transfer mekanizmasının iletim olması ile ilişkilidir. Örnek olarak, $t=210$. dakika için 1. (T_{1a-e}), 2. (T_{2a-e}), 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonlarındaki sıcaklık değerleri, sırasıyla, 75°C, 50°C, 43°C, 38°C, 36°C (1.istasyon); 76°C, 64°C, 49°C, 44°C, 40°C (2.istasyon); 78°C, 76°C, 76°C, 75°C, 73°C (3.istasyon); 79°C, 77°C, 77°C, 77°C, 77°C (4.istasyon) ve 79°C, 77°C, 77°C, 76°C, 67°C (5.istasyon) olarak ölçülmüştür. Depo üst bölgelerinde doğal taşınım etkisi ile homojen bir sıcaklıklı dağılımının oluştuğu ifade edilmelidir. Yerel sıcaklık değişimleri üzerinden katı-sıvı faz dönüşümünü en geç tamamlayan ($t= 829$ dk) noktanın 1.ölçüm istasyonu içerisindeki en alt nokta (T_{1e}) olduğu görülmektedir.

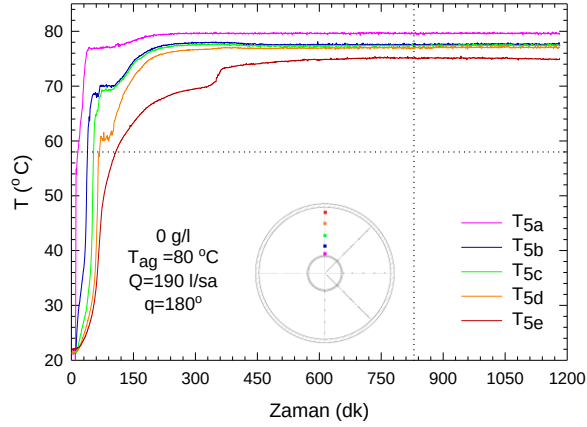
5 nolu ölçüm istasyonu içerisindeki en dış nokta olan T_{5e} 'nin hacimsel doluluk oranına bağlı olarak başlangıç anında FDM ile temas halinde olmadığı, ilerleyen süreçte FDM'nin

hacimsel genişlemesine bağlı olarak FDM ile temas ettiği hatırlanmalıdır/belirtilmelidir (Şekil 13). Bu durum, T_{5e} noktasındaki yerel sıcaklık değişimlerinin diğer noktalar ile kıyaslanabilirliğini engellemektedir.



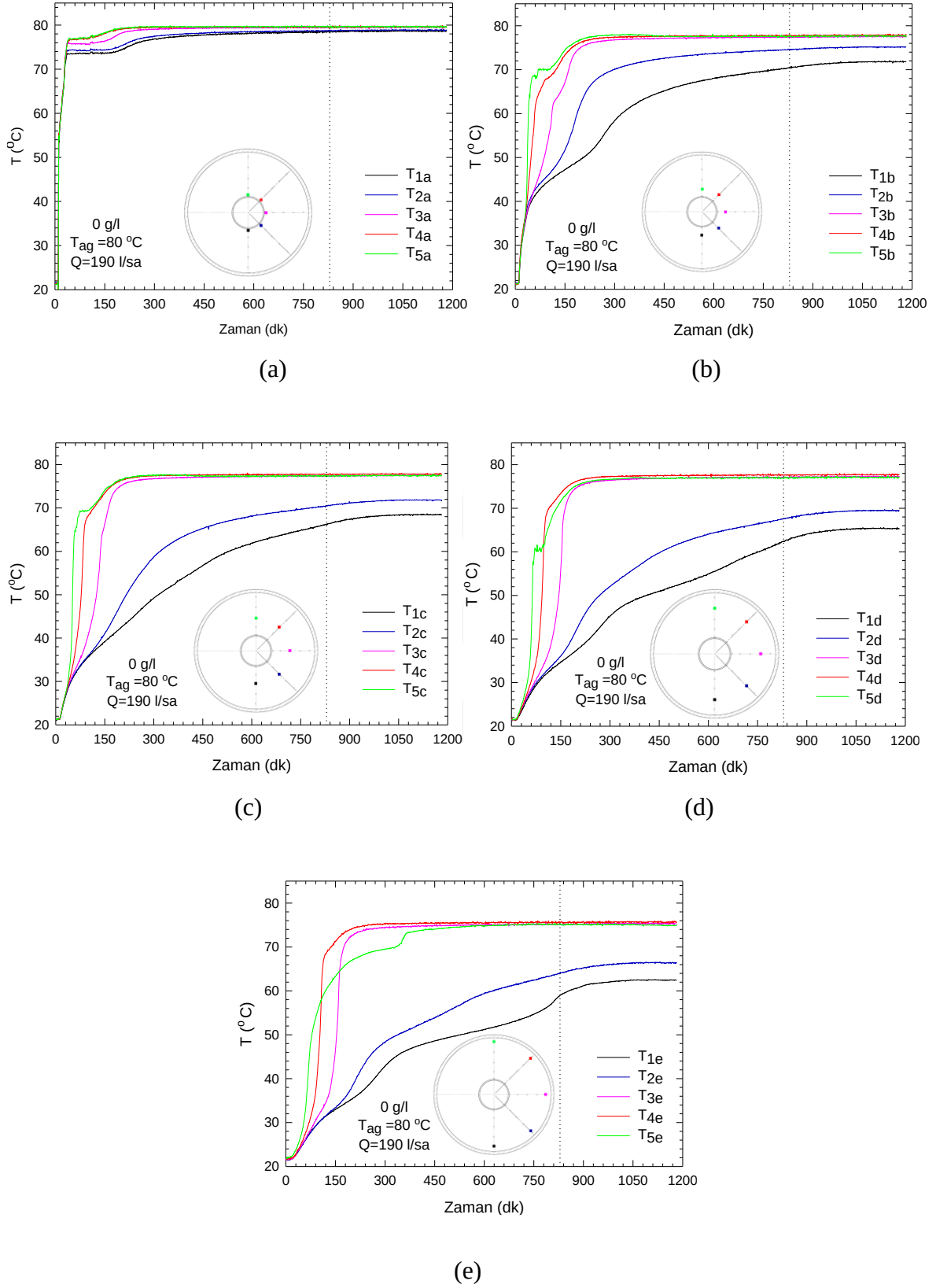
Şekil 17. Parafinin (0 g/l) ölçüm istasyonlarındaki yerel noktaların sıcaklık değişimleri, erime

Şekil 17'nin devamı



(e)

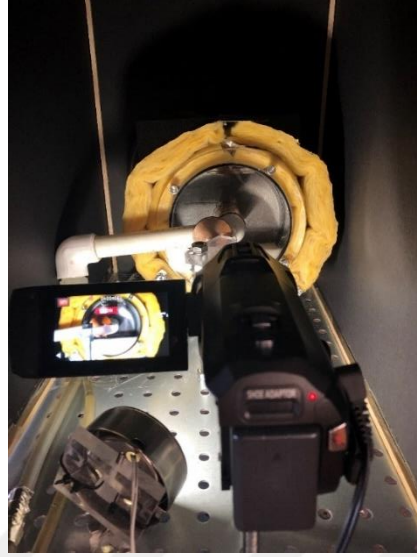
Depolama ortamındaki çevresel sıcaklık farklılıkları için farklı açısall konumlara sahip ölçüm istasyonlarında bakır borudan uzaklığı aynı olan yerel noktaların karşılaştırılması Şekil 18'de verilmiştir. Şekil 18a bakır yüzey ile temas halinde olan ve erime sürecini ilk tamamlayan yerel nokta sıcaklıklarını göstermektedir. Burada yerel nokta sıcaklıklarının, genel olarak, birbirine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Yerel sıcaklık farklarının daha hissedilir olduğu periyotta ($30 < t < 450$ dk) ise doğal taşınım etkilerinin sınırlı etkisinden söz edilebilir. Şekil 18b-e için artan açısall konuma bağlı olarak ortaya çıkan doğal taşınım etkileri ile yerel sıcaklıkların daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Örnek olarak, $t=150$. dakika için, T_{1c} , T_{2c} , T_{3c} , T_{4c} ve T_{5c} sıcaklık değerleri, sırasıyla, 39°C , 41°C , 66°C , 73°C , 74°C olarak ölçülmüştür. T_{1c} , T_{2c} , T_{3c} , T_{4c} ve T_{5c} yerel noktalarının katı-sıvı faz dönüşümünün tamamlanması sürecindeki sıcaklık artış hızları, sırasıyla, $0,08\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$, $0,13\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$, $0,27\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$, $0,45\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$, $0,69\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$ olarak hesaplanmıştır. Bakır borudan olan radyal mesafenin artması ile en alt (T_{1a} , T_{1b} , T_{1c} , T_{1d}) ve en üst noktalar (T_{5a} , T_{5b} , T_{5c} , T_{5d}) arasındaki sıcaklık farkının da arttığı görülmektedir. 1. ve 5. ölçüm istasyonlarında farklı radyal mesafeler için elde edilen sıcaklık farkları ($t=150$ dk), sırasıyla, $T_{5a}-T_{1a} = 4^{\circ}\text{C}$, $T_{5b}-T_{1b} = 27^{\circ}\text{C}$, $T_{5c}-T_{1c} = 35^{\circ}\text{C}$ ve $T_{5d}-T_{1d} = 38^{\circ}\text{C}$ olarak elde edilmiştir.



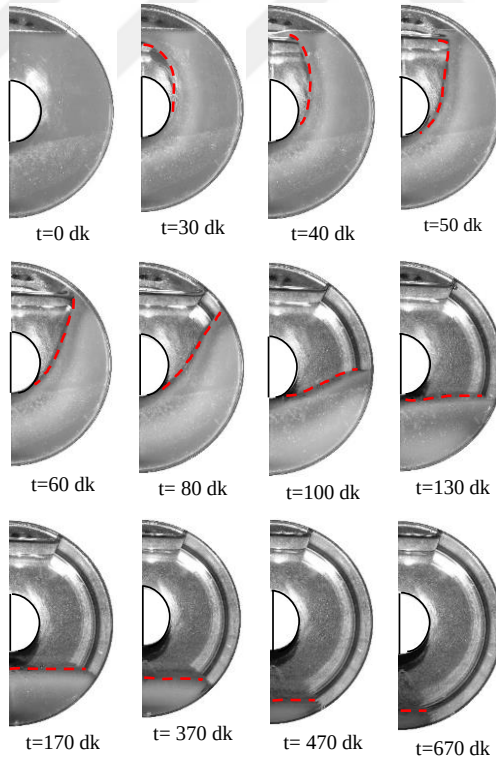
Şekil 18. Parafinin (0 g/l) farklı ölçüm istasyonlarına ait yerel nokta sıcaklıklarının karşılaştırılması, erime

FDM/parafin ilaveli GITED düzenlemesi için etkin ısı transfer mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesine yönelik olarak elde edilen zaman bağımlı katı/sıvı ara yüzey görüntüleri Şekil 19’da sunulmuştur. Erime görüntüleri aynı halkasal geometrik özelliklere sahip, ancak iki boyutlu olarak düşünülebilecek küçük ölçekli bir test sistemi üzerinden elde edilmiştir (Şekil 19-a). Katı/sıvı ara yüzey gelişimi akışkan giriş sıcaklığı (T_{ag}) ve akışkan debisi değerlerinin (Q), sırasıyla, 85°C ve 280 l/sa olduğu çalışma koşulları için incelenmiştir. Erime karakteristiğinin farklı akışkan giriş sıcaklığı ve akışkan debisi koşulları için de benzer olacağı belirtilmelidir. Erime sürecinin başlangıcında bakır boru çevresinde uniform ince bir sıvı faz bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Bu durum, ilgili periyottaki etkin ısı transfer mekanizmasının iletim olması ile açıklanmaktadır. İlerleyen periyotta ($t > 70$ dk), sıvı faz bölgesinin üst yarı bölgede genişlediği görülürken alt yarı bölgede ise katı-sıvı faz dönüşüm hızının oldukça sınırlı olduğu ve depo içerisinde uniform olmayan bir erime davranışının gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, depo üst yarı bölgesindeki ısı transfer hızının ve dolayısıyla katı-sıvı faz dönüşüm hızının daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Sıcaklık eğrilerinin sunulduğu grafiklerde (Şekil 17) artan açısal konum ile (3, 4 ve 5 numaralı ölçüm istasyonları) yerel sıcaklıkların daha yüksek değerler alması ilgili bölgelerdeki faz dönüşüm hızını ortaya koyan erime ara yüzey görüntüleri ile desteklenmektedir. Yukarı yönlü hızla genişleyen sıvı FDM bölgesi doğal taşınım hareketinin bir sonucudur. Yüksek ısı enerjisiye sahip düşük yoğunluklu sıvı FDM, yoğunluk farkına bağlı olarak, yukarı yönlü bir hareket gerçekleştirirken sahip olduğu enerjiyi komşuluğundaki parafin bölgelerine transfer ederek soğumaktadır. Düşük ısı enerjisiye sahip, bir başka ifade ile soğuyan sıvı FDM, artan yoğunluğa bağlı olarak, hareketine aşağı yönlü olarak devam etmektedir. Sıvı FDM’nin sahip olduğu enerjiye bağlı olarak ortaya çıkan yoğunluk farklarının sağladığı kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile sıvı FDM bölgelerinde bir sirkülasyon hareketi, bir başka ifade ile doğal taşınım hücreleri oluşmaktadır. Sıvı FDM bölgesinin genişlemesi doğal taşınım hücrelerinin genişlemesini ve etkisinin artmasını sağlamaktadır. Taşınım hücreleri, üst bölgede katı-sıvı faz dönüşüm sürecinin daha hızlı gerçekleşmesine katkı sağlamaktadır. Depo alt yarı bölgesinde (1. ve 2. ölçüm istasyonları) ise katı/sıvı ara yüzey ilerleyişinin yavaş ve kademeli olması ilgili bölgedeki ısı transferinin iletim ile sürdürüldüğünü ortaya koymaktadır. Bu durum, yerel sıcaklık eğrilerinde (Şekil 18 a ve b) sıcak yüzeyden uzaklaştıkça termal tabakalaşma olarak görülmektedir. Depo alt yarı bölgesinde artan sıvı bölge kalınlığı dar taşınım hücrelerinin oluşmasına katkı sağlıyor

olsa da taşınım etkilerinin oldukça sınırlı olduğu belirtilmelidir. Alt yarı bölgedeki erime ara yüzey hızının düşük olması toplam erime sürelerini uzatmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 19. Parafin ile gizli ısı depolama düzenlemesine ait küçük ölçekli test düzeneği (a), erime ara yüzey gelişimi (b)

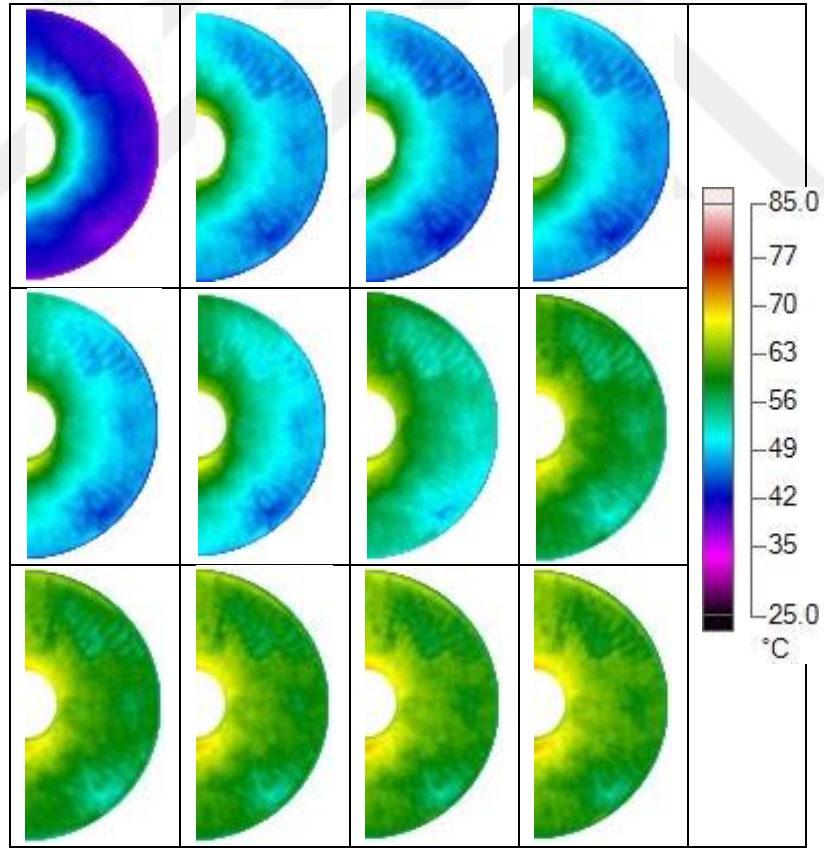
3.1.2. FDM/Grafit Matris Termal Enerji Depolama Ortamı: 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l

FDM/grafit matris depolama ortamı için üç farklı yığın yoğunluğu ($\rho_{yığın}=25$ g/l, 50 g/l, 75 g/l), üç farklı akışkan giriş sıcaklığı ($T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$, 80°C , 85°C) ve üç farklı akışkan debisi (100 l/sa, 190 l/sa, 280 l/sa) değerlerinin etkisi incelenmiştir. Tezin sadeliği için bu bölümde tek bir akışkan giriş sıcaklığı $T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$ ve debi $Q=190$ l/sa değerleri için yerel sıcaklık değişimleri sunulmuştur. Farklı çalışma koşullarına ait veriler karşılaştırma grafiklerinde verilmiştir.

Grafit matris sahip olduğu, yüksek gözenek oranları, yüksek ısı transfer yüzey/hacim oranı ve iç yapısındaki yüksek ısıl iletkenliğe sahip ısıl köprü avantajları ile parafinin düşük ısıl iletkenliği ve sızıntı problemlerinin azaltılmasında önemli bir potansiyeldir. Grafit matris sağladığı yapısal özellikler ile ısının parafin içerisinde yayılmasını ve depolama sürecini iyileştirmektedir. Yüksek gözenek oranlarına sahip grafit matris yapısı içerisindeki gözenek boyutlarının mikron mertebelerinde olması ilgili ortam içerisindeki etkin ısı transfer mekanizmasının iletim olduğunu ortaya koymaktadır (Mills vd., 2006) Düşük gözenek boyutlarında ($<10\text{mm}$) doğal taşınım ısı transferinin gerçekleşmediği/ihmal edilecek seviyede olduğu belirtilmektedir (Kang vd., 2019). Bu doğrultuda, FDM/grafit matris düzenlemeleri için etkin ısı transfer mekanizmasını iletim olduğu önemle vurgulanmalıdır/hatırlanmalıdır. FDM/grafit matris düzenlemesi için etkin ısı transfer mekanizmasının iletim ile gerçekleştiği küçük ölçekli deney düzeneği (Şekil 20-a) üzerinden termal kamera ile alınan yüzey sıcaklık dağılımı fotoğrafları ile de ortaya konulmuştur (Şekil 20-b). FDM/grafit matrisin halkasal yüzeyinden elde edilen sıcaklık değerleri çevresel olarak homojen bir sıcaklık dağılımının olduğunu, bir başka ifade doğal taşınım etkilerinin bastırıldığını göstermektedir.



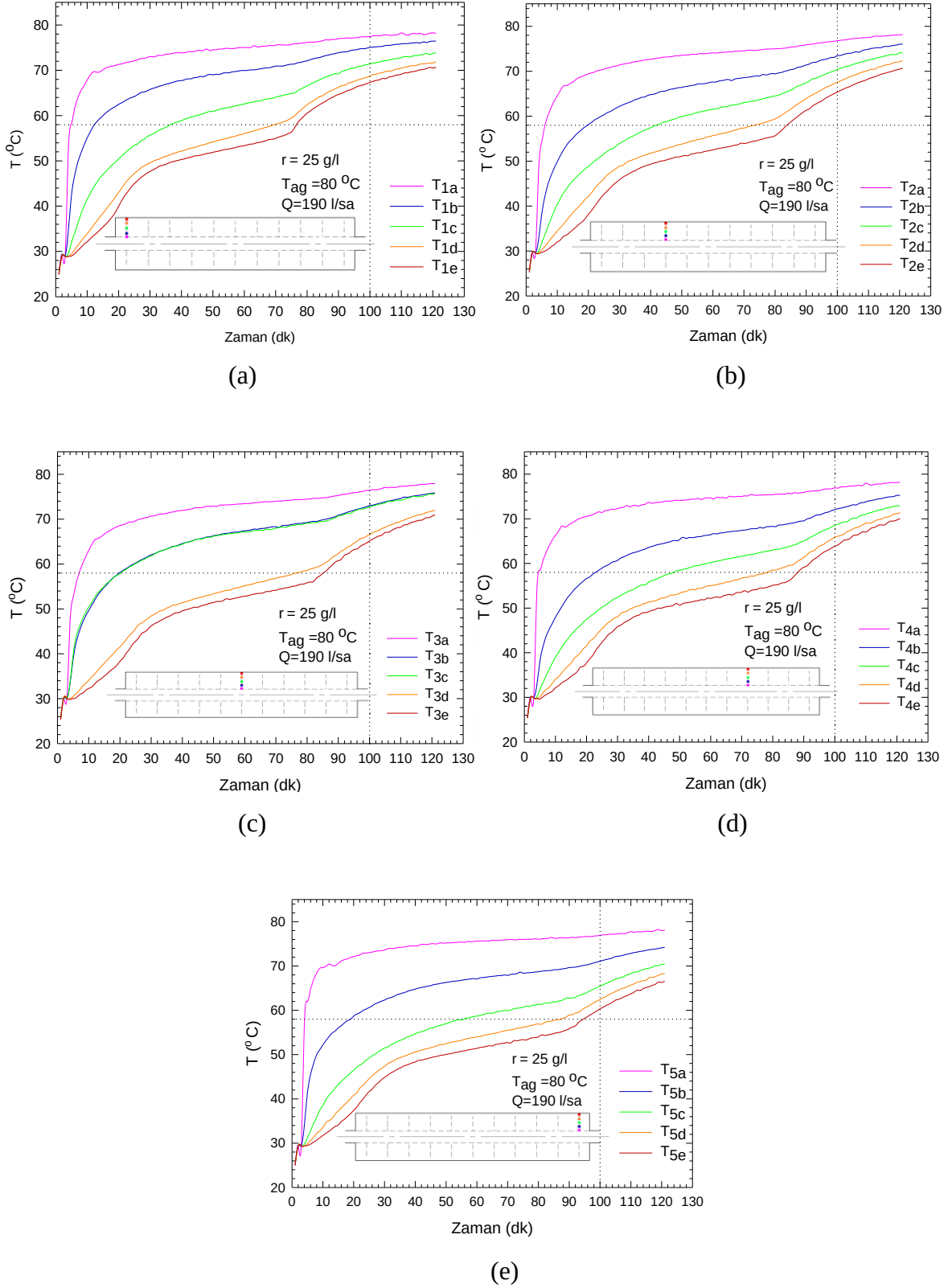
(a)



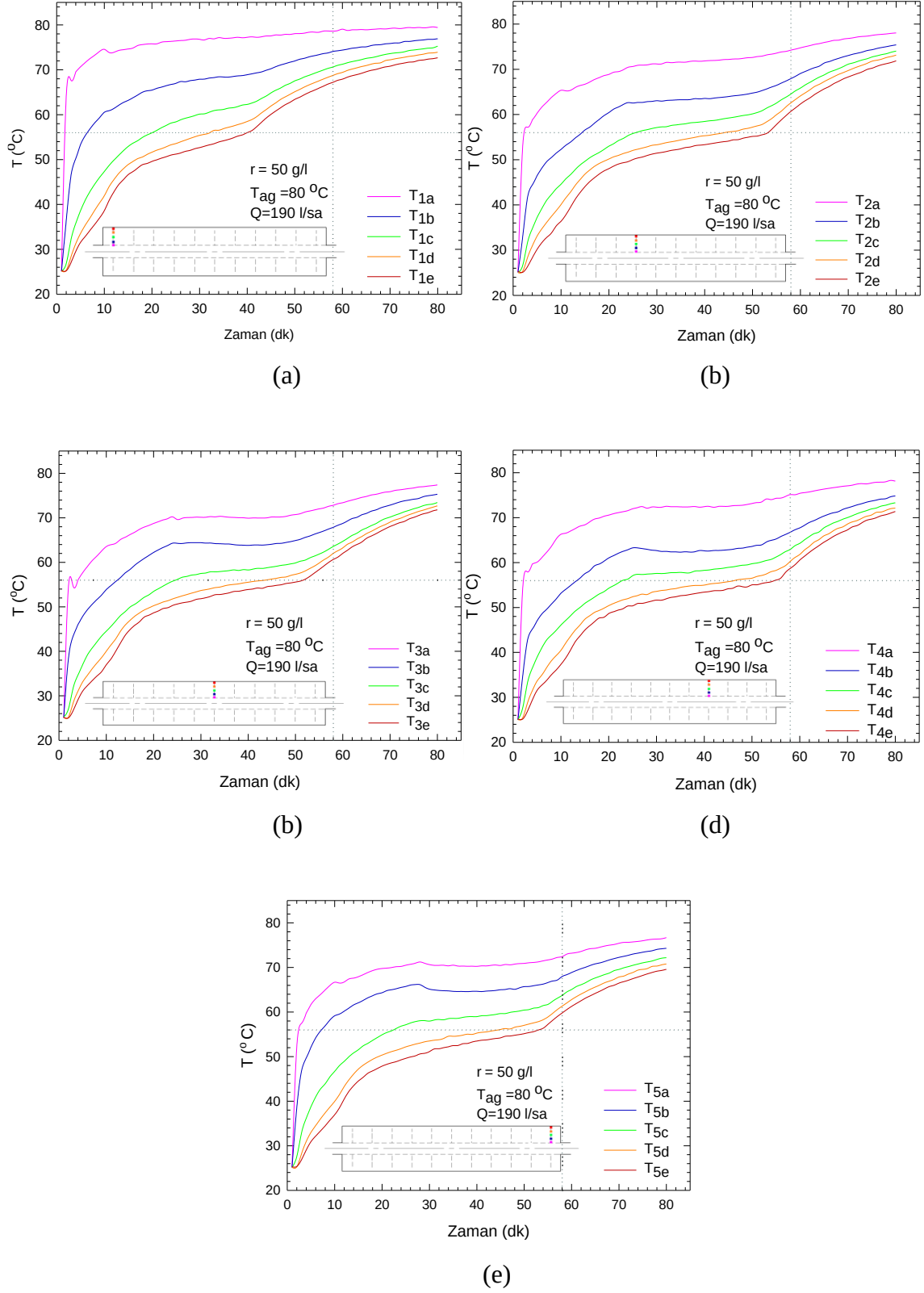
(b)

Şekil 20. Parafin/grafit matrisin gizli ısı depolama düzenlemesine ait küçük ölçekli test düzeneği (a), yüzey sıcaklık alanı (b)

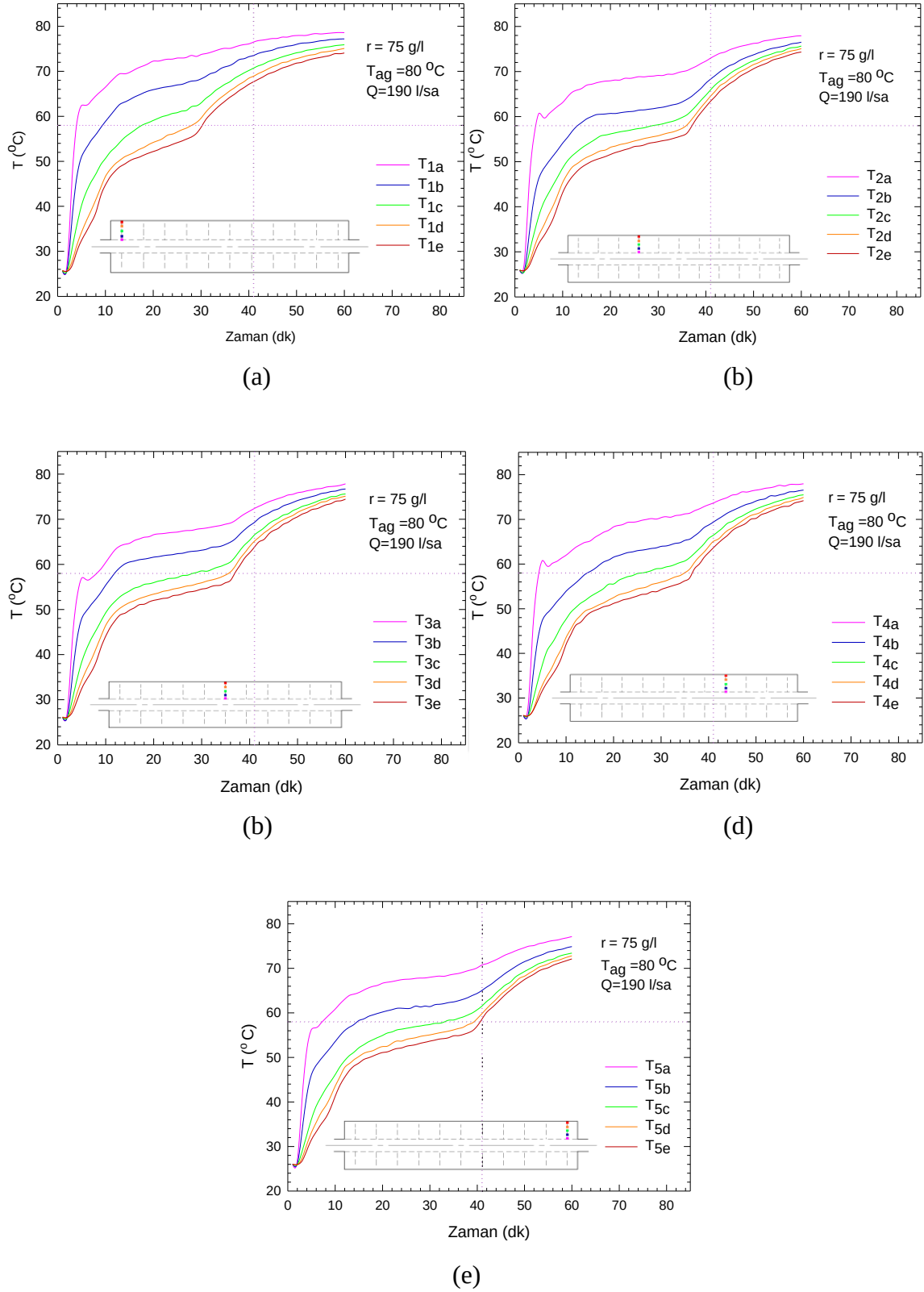
Farklı yığın yoğunluklarına sahip FDM/grafit matris düzenlemelerine ait yerel sıcaklık değişimleri Şekil 21-23'de verilmiştir. Farklı ölçüm istasyonlarına ait yerel nokta sıcaklık profilleri 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l değerleri için, sırasıyla, Şekil 21a-e, 22a-e ve 23a-e'de sunulmuştur. Sıcaklık eğrilerinin, genel karakter olarak, faz dönüşüm aralığına kadar yerel sıcaklık artışlarının yüksek olduğu, erime bölgesine ulaşılması ile sıcaklık artış hızının azaldığı ve erime bölgesinin aşılması ile tekrar yerel nokta sıcaklık artış hızlarının arttığı görülmektedir. Farklı yığın yoğunluklarına sahip FDM/grafit matris düzenlemelerinde her bir ölçüm istasyonu için yerel nokta sıcaklıklarının iç cidardan dış cidara doğru (bakır boru yüzeyinden uzaklaştıkça), ısı transfer yönüne bağlı olarak, azaldığı görülmektedir. Bu durum depolama ortamı içerisinde termal tabakalaşma olduğunu ortaya koymaktadır. Depolama ortamında yerel sıcaklık farklarının görece olarak daha yüksek olduğu ($t < 60$ dk), ancak faz dönüşümünün tüm noktalar için tamamlanması ($t > 60$ dk) ile yerel nokta sıcaklıkların birbirine daha yakın değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, ısı transfer borusu ve depolama ortamı arasındaki sıcaklık farklarının azalmasına bağlı olarak ısı transferinin kötüleşmesi ve depolama ortamındaki yüksek ısıl iletkenlik/yayıcılık ile ilişkili olduğu ifade edilebilir. Örnek olarak (50 g/l yığın yoğunluğu, Şekil 23), $t = 30$ dk için 1. (T_{1a-e}), 2. (T_{2a-e}), 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonlarındaki sıcaklık değerleri, sırasıyla, 77°C, 68°C, 60°C, 55°C, 53°C (1.istasyon); 71°C, 63°C, 57°C, 53°C, 51°C (2.istasyon); 70°C, 64°C, 58°C, 54°C, 52°C (3.istasyon) ; 72°C, 63°C, 58°C, 54°C, 52°C (4.istasyon) ve 71°C, 65°C, 58°C, 54°C, 51°C (5.istasyon) olarak ölçülürken ve $t = 60$ dk için ise 1. (T_{1a-e}), 2. (T_{2a-e}), 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonlarındaki sıcaklık değerleri, sırasıyla, 79°C, 74°C, 71°C, 69°C, 68°C (1.istasyon); 75°C, 69°C, 66°C, 64°C, 62°C (2.istasyon); 73°C, 69°C, 65°C, 63°C, 62°C (3.istasyon) ; 75°C, 68°C, 64°C, 62°C, 61°C (4.istasyon) ve 73°C, 69°C, 65°C, 63°C, 61°C (5.istasyon) olarak ölçülmüştür.



Şekil 21. FDM/Grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 25 g/l

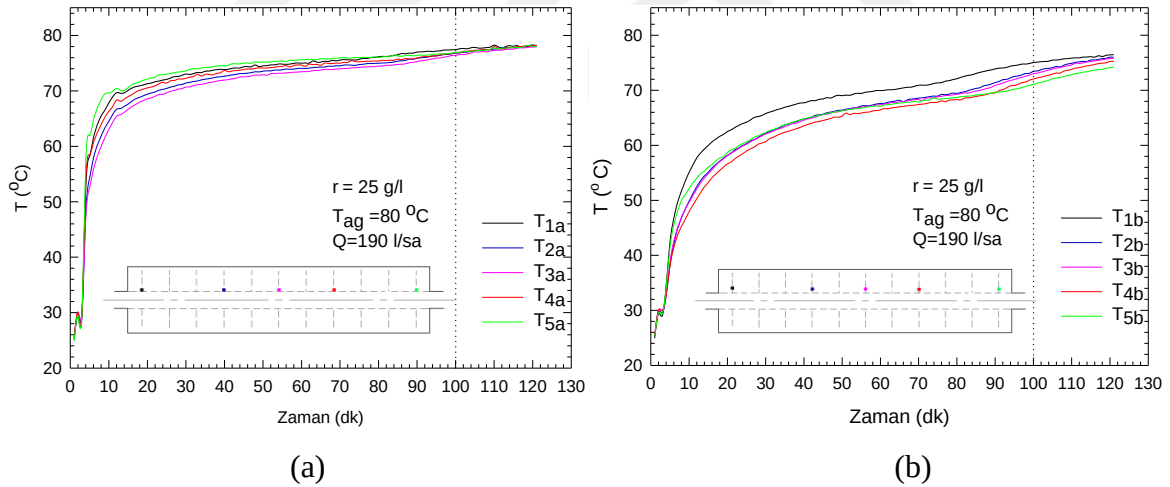


Şekil 22. FDM/Grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 50 g/l



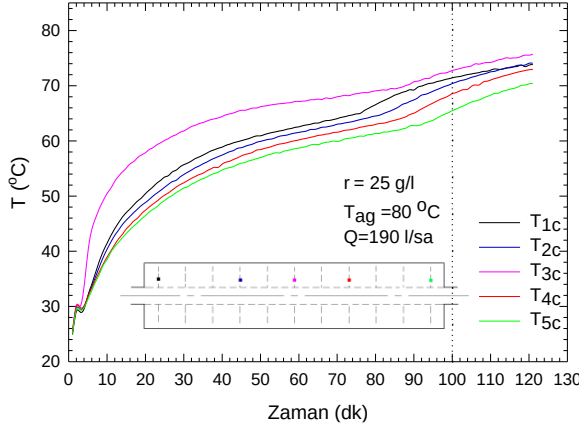
Şekil 23. FDM/Grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 75 g/l

Eksenel yöndeki sıcaklık değişimleri Şekil 24-26'de sunulmuştur. Farklı eksenel konumlara sahip ölçüm istasyonları için ise yerel nokta sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın değerler aldığı ifade edilmelidir. Örnek olarak (50 g/l yığın yoğunluğu, Şekil 25), $t=30$.dk için T_{1-5a} ($T_{1a}, T_{2a}, T_{3a}, T_{4a}, T_{5a}$), T_{1-5b} , T_{1-5c} , T_{1-5d} ve T_{1-5e} sıcaklık değerleri, sırasıyla, 77°C, 71°C, 70°C, 72°C, 71°C (T_{1-5a}); 68°C, 63°C, 64°C, 63°C, 65°C (T_{1-5b}); 60°C, 57°C, 58°C, 58°C, 58°C (T_{1-5c}); 55°C, 53°C, 54°C, 54°C, 54°C (T_{1-5d}) ve 53°C, 51°C, 52°C, 52°C, 51°C (T_{1-5e}) olarak ölçülürken ve $t=60$. dk için ise T_{1-5a} ($T_{1a}, T_{2a}, T_{3a}, T_{4a}, T_{5a}$), T_{1-5b} , T_{1-5c} , T_{1-5d} ve T_{1-5e} sıcaklık değerleri, sırasıyla, 79°C, 75°C, 73°C, 75°C, 73°C (T_{1-5a}); 74°C, 69°C, 69°C, 68°C, 69°C (T_{1-5b}); 71°C, 66°C, 65°C, 64°C, 65°C (T_{1-5c}); 69°C, 64°C, 63°C, 62°C, 63°C (T_{1-5d}) ve 68°C, 62°C, 62°C, 61°C, 61°C (T_{1-5e}) olarak ölçülmüştür. Burada, ısı transfer borusu girişine en yakın olan ölçüm istasyonundaki yerel nokta sıcaklıklarının ($T_{1a}, T_{1b}, T_{1c}, T_{1d}, T_{1e}$) yaklaşık %3-8,5 olarak daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, boru eksenı boyunca depolama ortamına olan ısı transferi ile ısı transfer akışkanı bölgesinde oluşan ısı sınır tabakanın bir sonucudur.

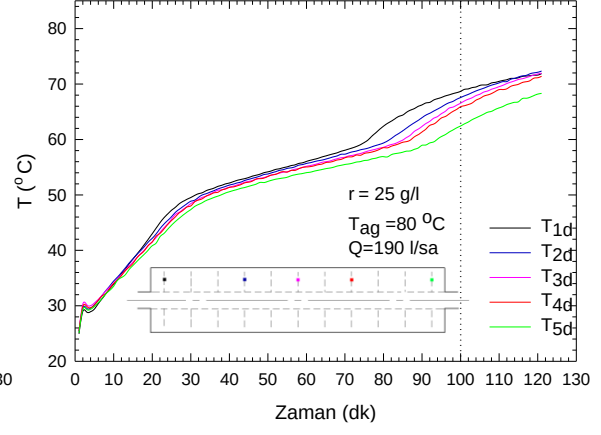


Şekil 24. FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 25 g/l

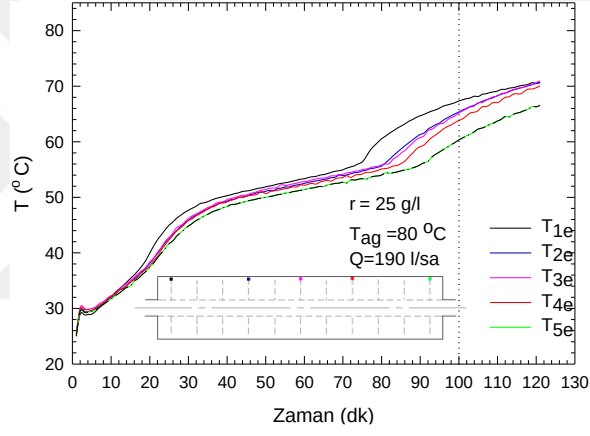
Şekil 24'ün devamı



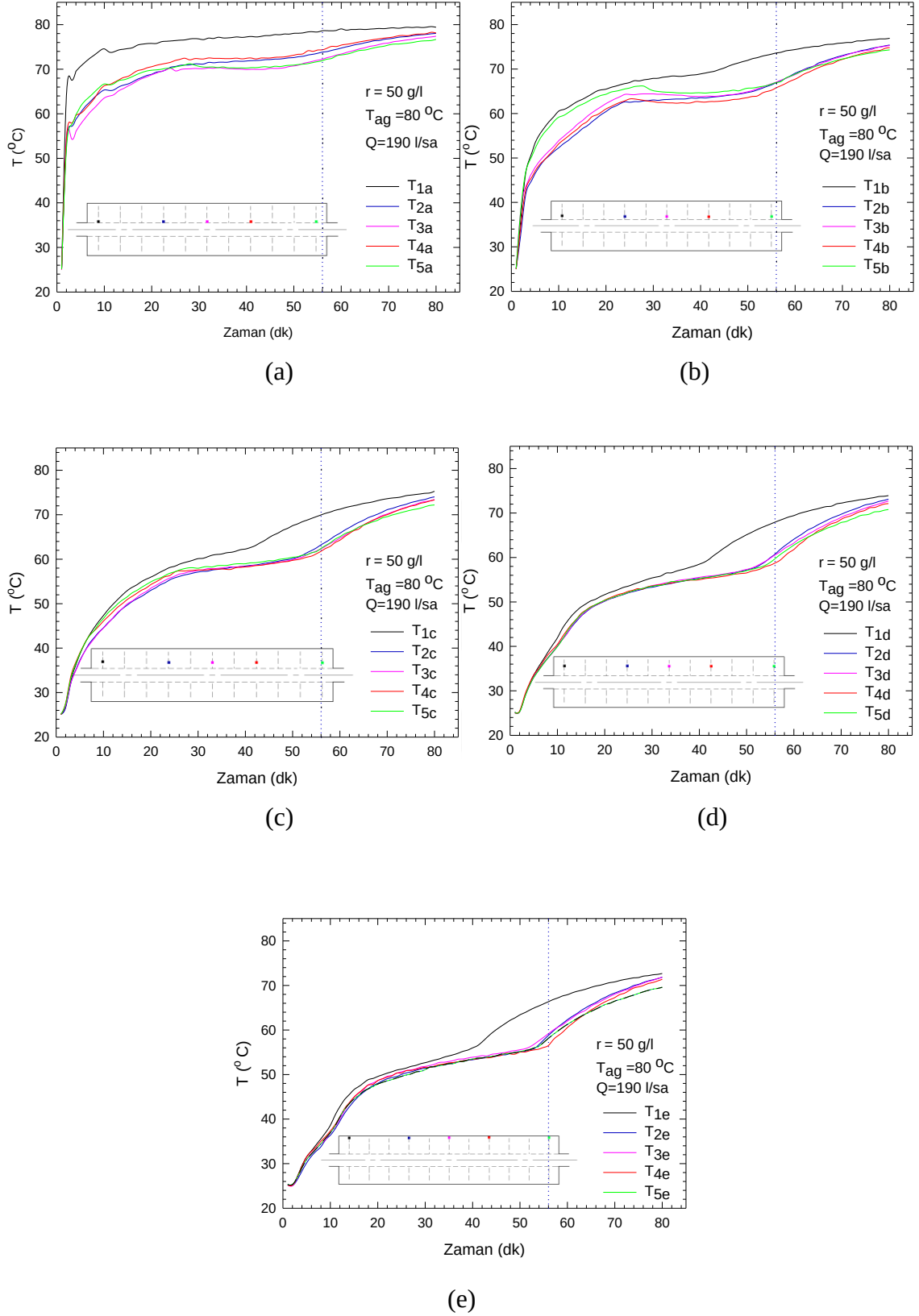
(c)



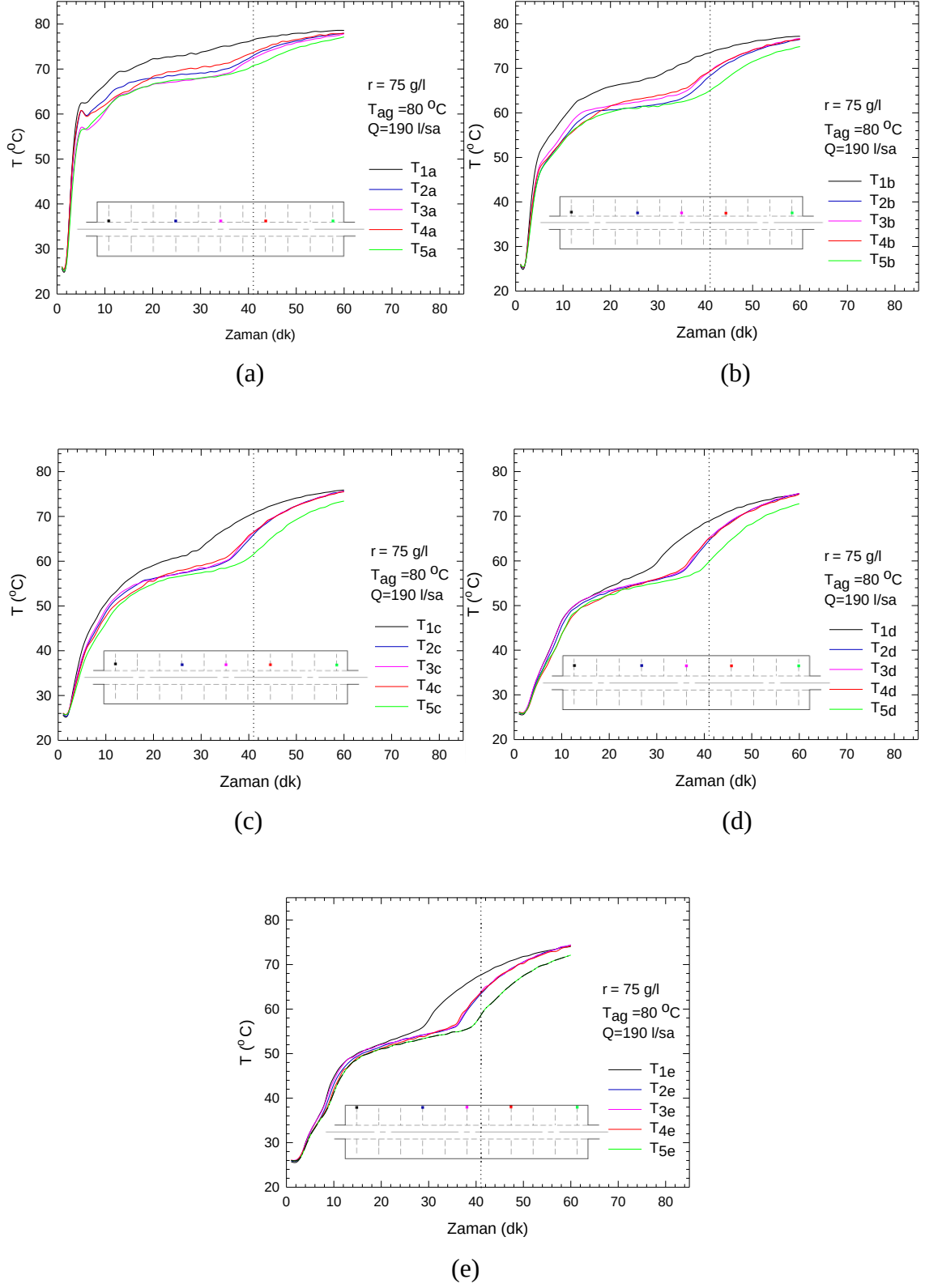
(d)



(e)



Şekil 25. FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 50 g/l

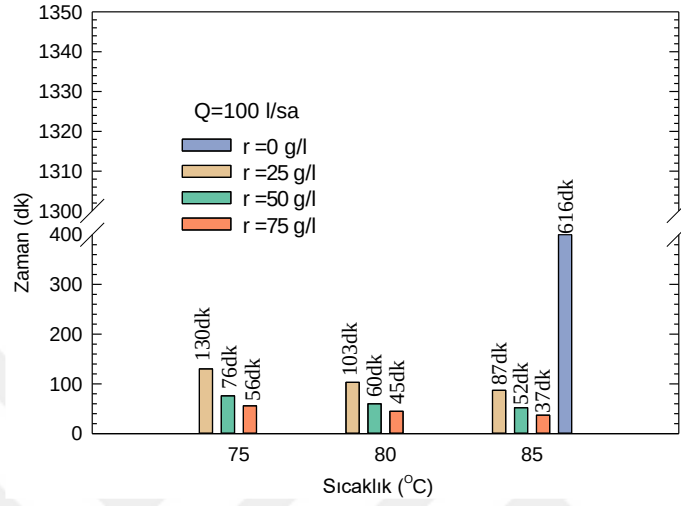


Şekil 26. FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 75 g/l

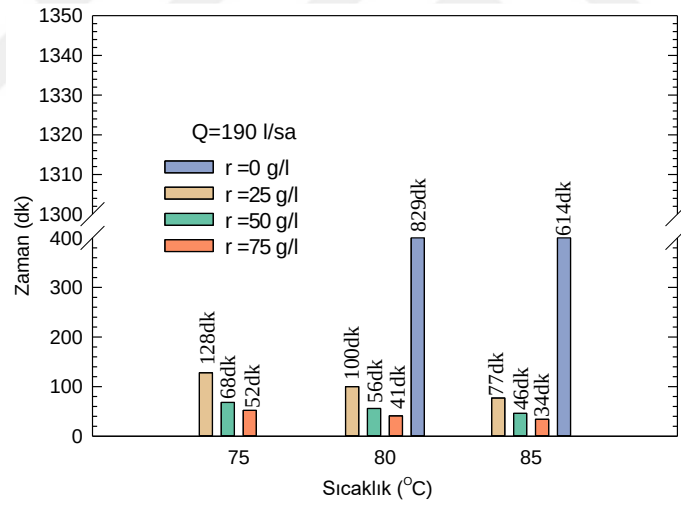
Artan yığın yoğunluğu değerleri ile yerel sıcaklık değerlerinin arttığı görülmektedir (Şekil 22-26). Bu davranış, artan yığın yoğunluğu ile depolama ortamının ortalama ısı iletkenlik değerinin artması ile ilişkilidir (Tablo 11). Artan yığın yoğunluğu, FDM/grafit matris depolama ortamındaki genişletilmiş grafit miktarını, bir başka ifade ile grafit matris yapısındaki yüksek ısı iletkenliğe sahip termal köprülerin sayıca artmasını sağlamaktadır. Artan ısı köprüleri ise ısının hızlı bir şekilde depolama ortamı içerisinde dağıtılmasına önemli katkılar sunmaktadır. Örnek olarak, $t=45$.dk için, 25, g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerlerine ait 3. ölçüm istasyonundaki (T_{3a-e}) yerel sıcaklıklar, sırasıyla, 72°C, 56°C, 56°C, 52°C, 50°C (25 g/l); 70°C, 64°C, 59°C, 56°C, 55°C (50 g/l); 74°C, 72°C, 70°C, 69°C, 68°C (75 g/l) olarak elde edilmiştir. En son katı-sıvı faz dönüşümünü tamamlayan yerel nokta, tüm yığın yoğunlukları değerleri için, 4.ölçüm istasyonundaki 5. yerel nokta (T_{4e}) olarak belirlenmiştir. 25, g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluklarına sahip FDM/grafit matris depolama ortamlarındaki yerel sıcaklık değerlerinin (T_{3c} , $t=60$.dakika) parafin durumuna kıyasla %82, %97 ve %130 oranlarında daha yüksek değerler almıştır. Bu durum yukarıda ifade edildiği üzere depolama ortamının ortalama ısı iletkenlik değerinin ve ısı yayılım oranının iyileştirilmesi ile ilişkilidir.

Farklı depolama ortamlarının (0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l) farklı çalışma koşullarına yönelik gerçekleştirilen tüm deneysel veriler toplam erime süreleri üzerinden Şekil 27 a-c’de üç farklı debi değeri için sunulmuştur. Toplam erime sürelerinin artan yığın yoğunluğu ve artan akışkan giriş sıcaklık değerleri için azaldığı görülmektedir. Artan yığın yoğunluğu depolama ortamının sahip olduğu ortalama ısı iletkenlik ve dolayısıyla ısı yayılım değerlerini iyileştirmektedir. Bu durum daha önce de ifade edildiği üzere artan yığın yoğunluğu ile yapı içerisindeki termal köprülerin sayısının artması ile ilişkilidir. Akışkan giriş sıcaklığındaki artış ise ısı transfer yüzeyi ve depolama ortamı arasındaki sıcaklık farkını arttırarak ısı transferini iyileştirmektedir. 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri ($T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$ ve $Q=190$ l/sa, Şekil 27-b) için toplam erime süreleri 0 g/l (sadece parafin kullanımı) durumuna kıyasla, sırasıyla, %88, %93 ve %95 oranlarında azalmıştır. Artan yığın yoğunlukları ile depolama performansında önemli iyileşmeler sağlandığı önemle vurgulanmalıdır. Artan akışkan giriş sıcaklığı değerleri ($T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$ ’den $T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$ ’ye $Q=280$ l/sa) ise toplam erime süreleri üzerinde 0 g/l (Saf FDM), 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l için, sırasıyla, %54, %19, %27 ve %49 oranlarında azalma sağlamıştır. Farklı debi değerleri için de benzer değişimler elde edilmiş, ancak artan debi değerleri ile de erime sürelerinde iyileşmeler görüldüğü belirtilmelidir. Akışkan debisinin 100 l/sa değerinden 280 l/sa değerine artması

($T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$ için) 0 g/l (Saf FDM), 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri için erime sürelerini, sırasıyla, %35, %11, %10 ve %5 oranlarında kısalttığı görülmektedir. Artan yığın yoğunlukları ile debi etkisinin azaldığı belirtilmelidir.



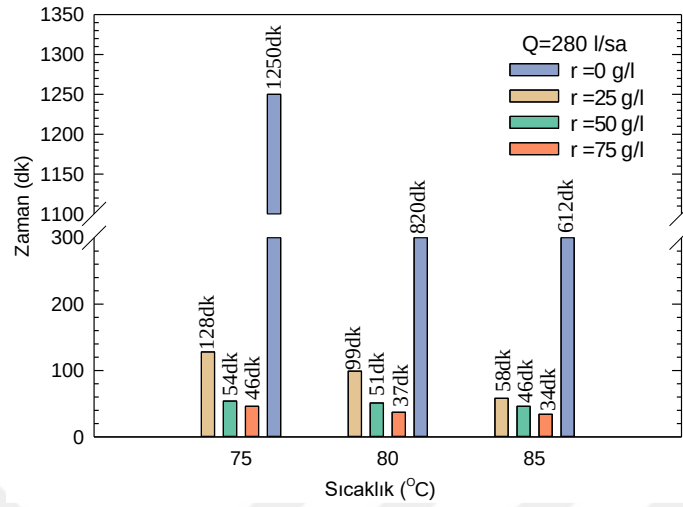
(a)



(b)

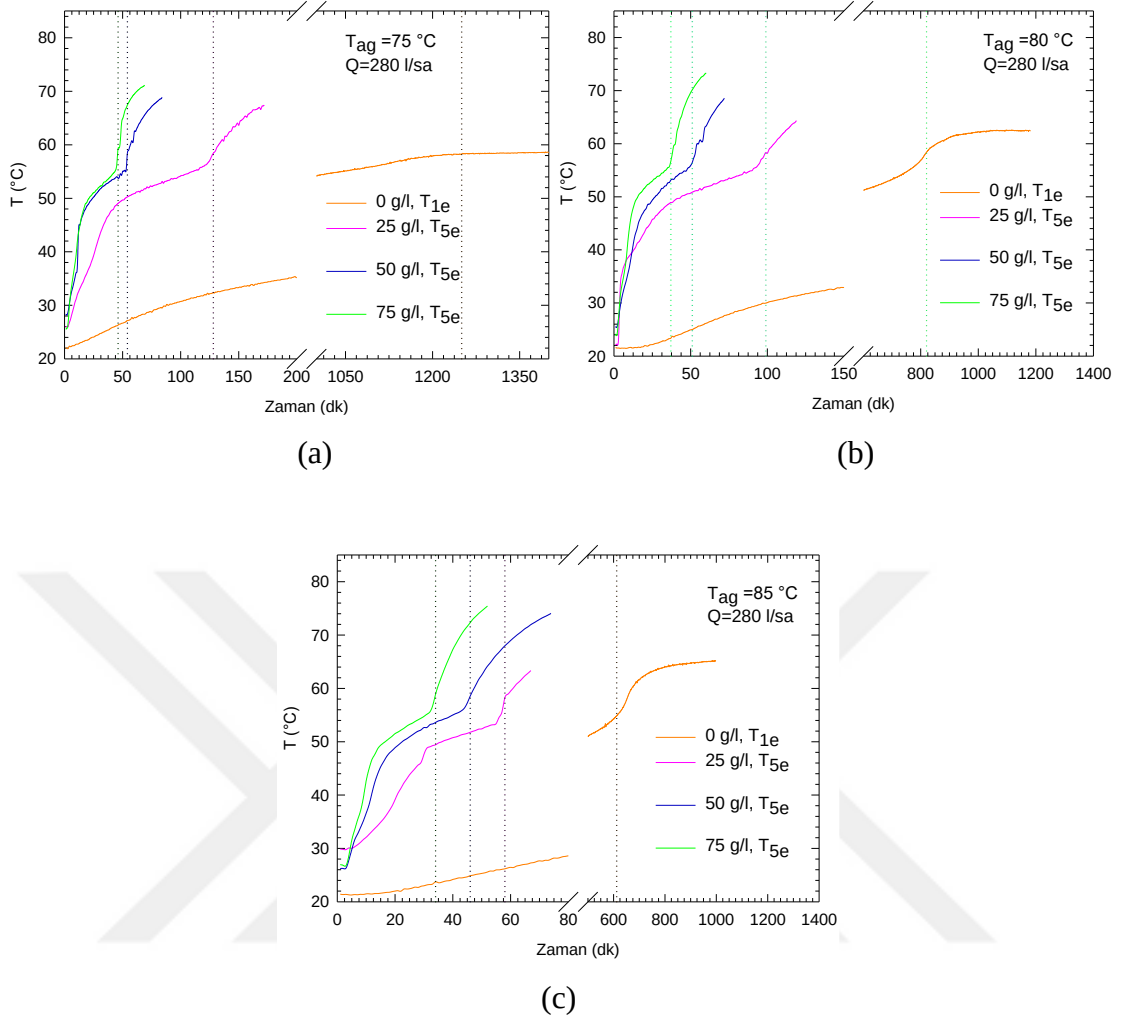
Şekil 27. Farklı depolama ortamlarına ait toplam depolama erime süresine etkisi; (a) $Q=100$ l/sa, (b) $Q=190$ l/sa, (c) $Q=280$ l/sa

Şekil 27'in devamı



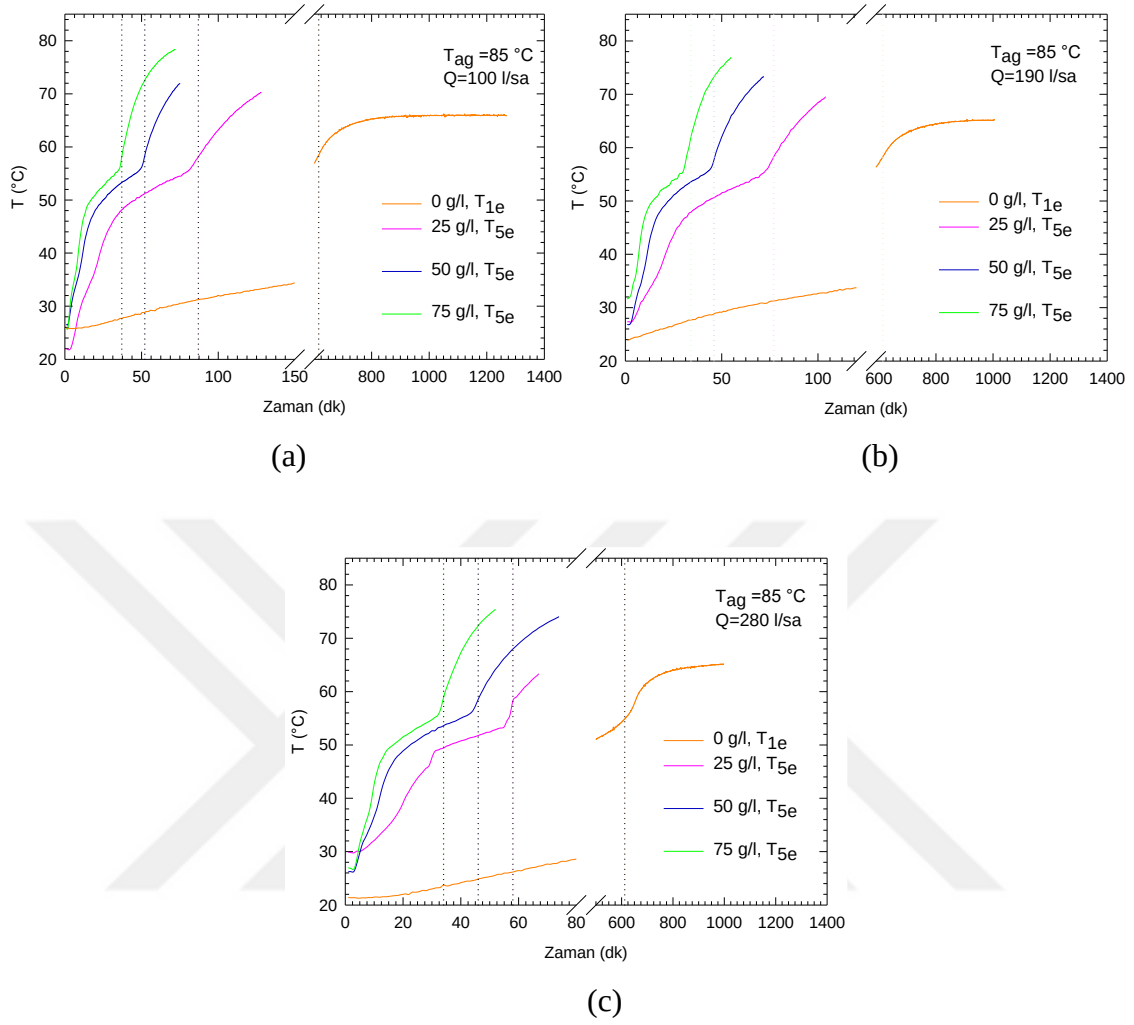
(c)

Parafin (0 g/l) ve FDM/grafit matris depolama (25, 50 ve 75 g/l) ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklık eğrilerinin değişimi farklı akışkan giriş sıcaklıkları için Şekil 28'de verilmiştir. Farklı akışkan giriş sıcaklıkları için, genel karakter olarak, artan yığın yoğunluk değerleri ile kritik yerel noktaların yüksek sıcaklık artış oranları ile daha yüksek sıcaklık değerleri aldığı görülmektedir. Örnek olarak ($T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$, Şekil 29-b), $t=60$. dk anına ait 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri için sıcaklıklar, sırasıyla, 26°C , 51°C , 61°C ve 72°C değerlerine ulaşmaktadır. 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri ($T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$, Şekil 28b) için katı-sıvı faz dönüşüm sıcaklığına ($T_e=49-56^{\circ}\text{C}$) ulaşmaları süresince gerçekleşen sıcaklık artış oranları, sırasıyla, $0,04^{\circ}\text{C/dk}$, $0,33^{\circ}\text{C/dk}$, $0,59^{\circ}\text{C/dk}$ ve $0,80^{\circ}\text{C/dk}$ olarak hesaplanmıştır. Artan akışkan giriş sıcaklık değerleri için de yerel nokta sıcaklık artış hızlarının arttığı görülmektedir. Örnek olarak, $T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$ ($Q=280$ l/sa) için 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l düzenlemelerinin erime sıcaklığına ulaşmaları süresince olan sıcaklık artış oranları $T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$ 'e ($Q=280$ l/sa) kıyasla, sırasıyla, %67, %108, %25 ve %34 iyileşmiştir.



Şekil 28. Farklı depolama ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının değişimi, akışkan giriş sıcaklığı etkisi: (a) $T_{ag}=75^{\circ}\text{C}$, (b) $T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$, (c) $T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$

Parafin (0 g/l) ve FDM/grafit matris depolama (25, 50 ve 75 g/l) ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklık eğrilerinin farklı akışkan debileri üzerinden karşılaştırılması Şekil 29'da verilmiştir. Farklı akışkan debi değerleri için elde edilen sıcaklık profillerinin davranışı farklı akışkan giriş sıcakları eğrilerine benzer şekildedir. Artan debi değerlerinin sıcaklık profilleri üzerindeki etkisinin sınırlı olduğu, ancak artan debi ile yerel sıcaklıkların artma eğiliminde olduğu ifade edilmelidir. 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l düzenlemelerinin artan debi değerleri için erime sıcaklığına ulaşmaları süresince olan sıcaklık artış oranları, sırasıyla, $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ($T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$ için) 0,043 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (0 g/l, 190 l/sa) ve 0,044 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (0 g/l, 280 l/sa); 0,33 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (25 g/l, 100 l/sa), 0,33 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (25 g/l, 190 l/sa) ve 0,35 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (25 g/l, 280 l/sa); 0,53 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (50 g/l, 100 l/sa), 0,59 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (50 g/l, 190 l/sa) ve 0,65 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (50 g/l, 280 l/sa) ; 0,71 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (75 g/l, 100 l/sa), 0,79 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (75 g/l, 190 l/sa) ve 0,92 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ (75 g/l, 280 l/sa) olarak elde edilmiştir.



Şekil 29. Farklı depolama ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının değişimi, debi etkisi: (a) $Q=100$ l/sa, (b) $Q=190$ l/sa, (c) $Q=280$ l/sa

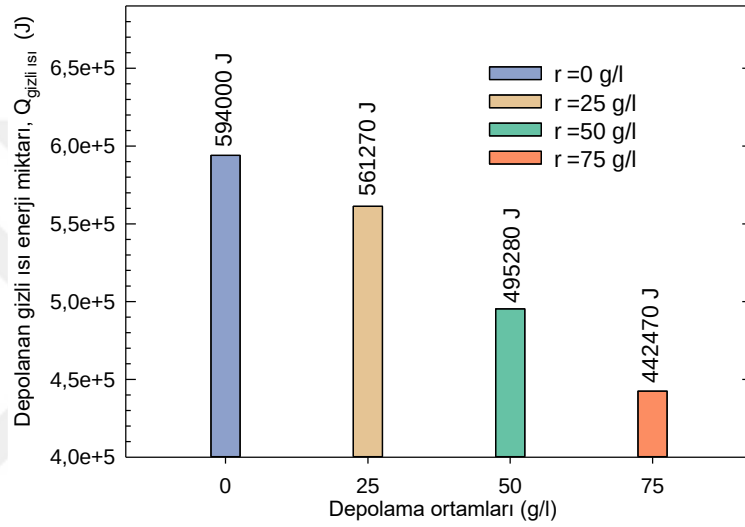
Termal enerji depolama sistemlerinin performans değerlendirmesinde depolama oranı önemli bir kriterdir. Depolama oranı (E) açık formda aşağıda verilmiştir:

$$E = \frac{Q_{gizli\ ısı}}{m * t} \quad (4)$$

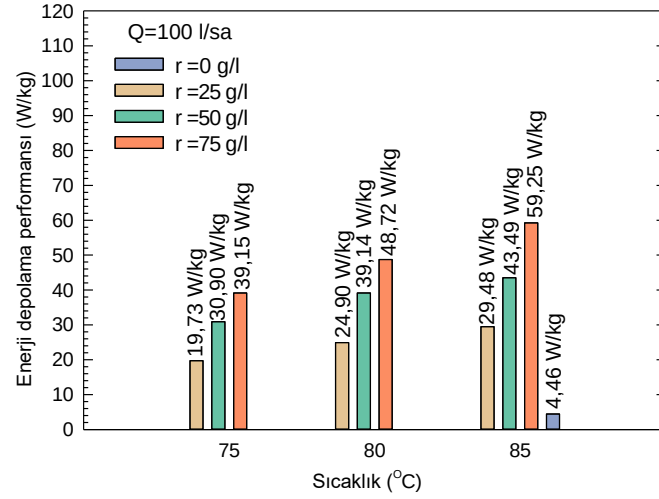
bağıntısı ile ifade edilmektedir. Burada, $Q_{gizli\ ısı}$, m ve t, sırasıyla, depolanan gizli ısı enerji miktarı (J), toplam kütle (kg) ve erime süresini (s) ifade etmektedir.

Farklı depolama ortamlarına ait depolanan gizli ısı miktarı ve enerji depolama oranı değerleri, sırasıyla Şekil 30 ve 31a-c’de sunulmuştur. Depolanan gizli ısı miktarının artan

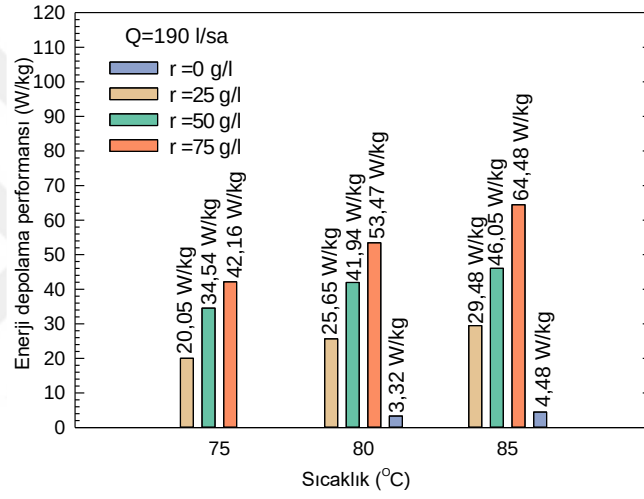
yığın yoğunlukları azaldığı görülmektedir. Bu durum, artan yığın yoğunlukları ile grafit matrise emdirilen parafin miktarının azalması ile ilişkilidir. 75 g/l için depolanan gizli ısı miktarı saf parafin durumuna kıyasla yaklaşık %26 daha azdır. Ancak, birim zaman ve birim kütle için gerçekleştirilen depolama oranına ait veriler incelendiğinde ($T_{ag}=85^{\circ}\text{C}$ ve $Q=190$ l/sa için 0 g/l ve 75 g/l) artan yığın yoğunlukları ile enerji depolama oranının önemli ölçüde iyileştirildiği (yaklaşık 14,4 kat) belirtilmelidir. Bu davranış, grafit matris uygulamasının önemli bir potansiyel olduğunu ortaya koymaktadır.



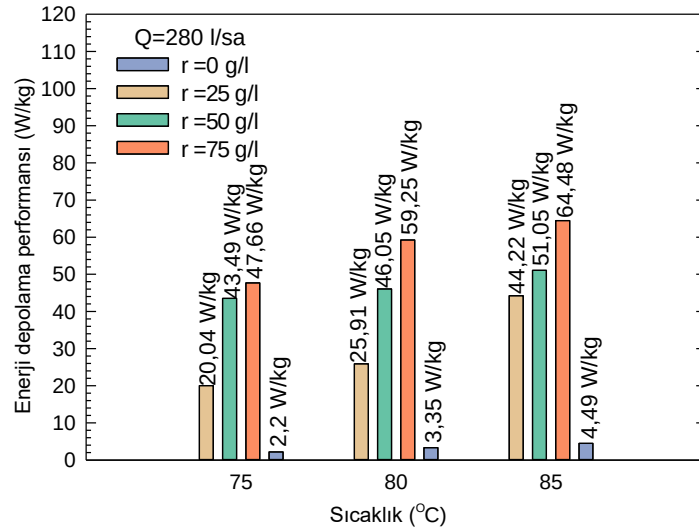
Şekil 30. Farklı depolama ortamları için depolanan gizli ısı miktarı



(a)



(b)



(c)

Şekil 31. Farklı depolama ortamlarına ait enerji depolama oranı değişimi, debi etkisi: (a) $Q=100$ l/sa, (b) $Q=190$ l/sa, (c) $Q=280$ l/sa

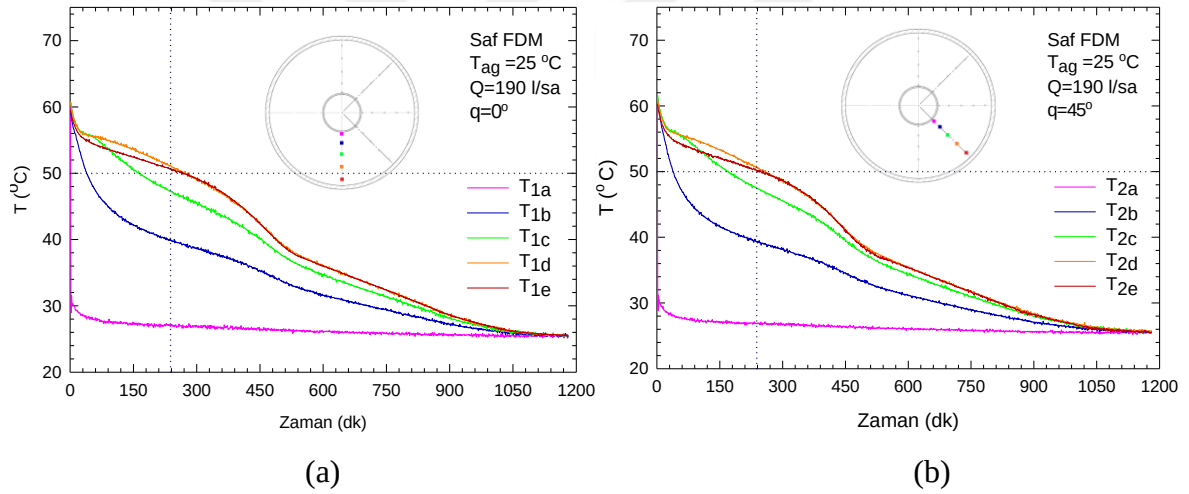
3.2. Geri Kazanım (Katılaşma) Sürecinin İncelenmesi

Tez kapsamında, geri kazanım deneyleri için, üç farklı akışkan giriş sıcaklığı ($T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$, 25°C , 30°C) deneyler gerçekleştirilmiştir. Ancak, bu bölümde hem parafin hem de parafin/grafit matris düzenlemeleri için tek bir akışkan giriş sıcaklığı $T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$ değerleri için yerel sıcaklık eğrileri verilmiştir. Farklı çalışma koşullarına ait sonuçlar karşılaştırma grafiklerinde sunulmuştur. Geri kazanım deneyleri kapsamında, depolama sürecine debi etkisinin sınırlı olması göz önünde bulundurularak, debi etkisi incelenmemiştir.

3.2.1. Parafin Depolama Ortamı, 0 g/l

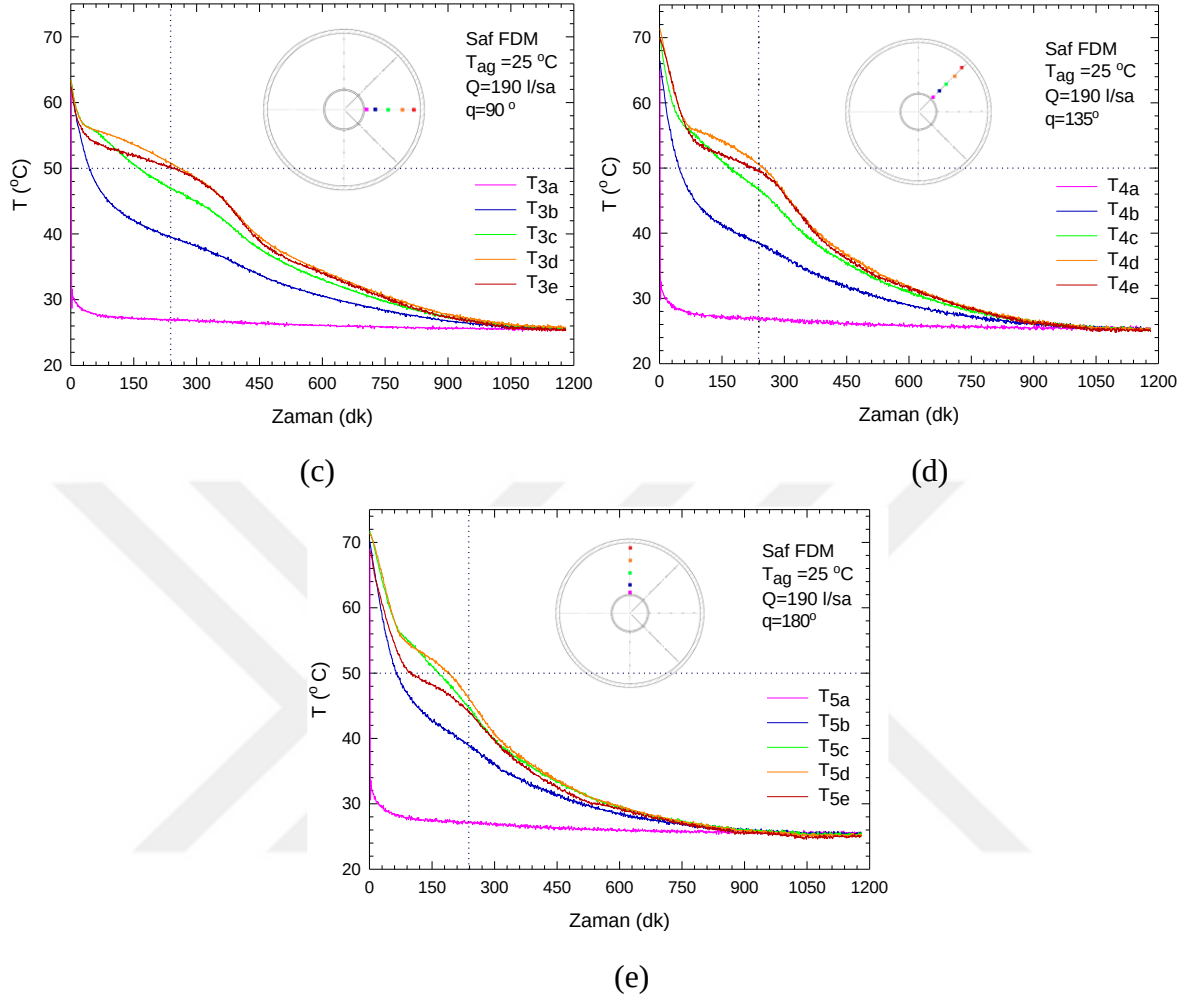
Sadece FDM kullanımının olduğu referans durumu belirten 0 g/l yığın yoğunluğuna ait yerel sıcaklık eğrileri Şekil 32a-e’de verilmiştir. Farklı açısallara sahip ölçüm istasyonları içerisindeki yerel sıcaklık eğrileri Şekil 33a-e’de sunulmuştur. Geri kazanım sürecinde her bir ölçüm istasyonu için soğuk yüzeye yakın daha yakın yerel nokta sıcaklıklarının daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Geri kazanım sürecinin başlangıcında, yüksek sıcaklık gradyanına bağlı olarak, sıcaklık azalış oranlarının yüksek olduğu görülmektedir. Katı-sıvı faz dönüşüm bölgesine ulaşarak gizli ısı geri kazanımı ile yerel sıcaklık azalış oranlarının azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, bakır boru yüzeyinden daha uzakta olan yerel noktalar için daha belirgin olarak gözükmemektedir. Soğuk cidara yakın noktalar için sıcaklık azalışı hızlı olduğu için faz değişim bölgesinin etkisi görülememektedir. Geri kazanım sürecinin ilerlemesi ile ısı transfer hızlarının, akışkan giriş sıcaklığı ve depolama ortamındaki sıcaklık farkının azalmasına bağlı olarak, kötüleştiği ve sıcaklık eğrilerinde ikincil kırılım bölgeleri oluşarak eğim değişimleri (sıcaklık azalım oranlarında kötüleşme) görülmektedir. Geri kazanım sürecin ilerlemesi ile ($t>150$ dk) yerel sıcaklıkların azalarak birbirine yakın değerler aldığı ve sabit bir değere yakınsadığı görülmektedir. Farklı açısallardaki ölçüm istasyonları için artan açısallara bağlı olarak yerel nokta sıcaklıklarının, geri kazanım sürecin ilk periyodunda (katılaşma öncesi, $T<50$), daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, geri kazanım sürecinin ilk periyodunda homojen bir katılaşma davranışının olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, geri kazanım sürecinde enerjisini kaybeden sıvı FDM’nin aşağı yönlü hareketi ile ortaya çıkan doğal taşınım hareketinin bir sonucudur. Geri kazanım sürecinin başlangıcındaki doğal taşınım etkisi çevresel sıcaklık farklılıkları üzerinden Şekil 33a-e’de daha net olarak

sunulmuştur. Örnek olarak ($T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$ $Q=190$ l/sa), $t=30$.dk için 1., 2., 3. 4. ve 5.ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık ölçümleri, sırasıyla, 29°C , 52°C , 56°C , 55°C ve 55°C (T_{1a-e}), 28°C , 52°C , 56°C , 56°C ve 55°C (T_{2a-e}); 28°C , 53°C , 57°C , 57°C ve 56°C (T_{3a-e}); 29°C , 54°C , 60°C , 63°C ve 63°C (T_{4a-e}); 29°C , 59°C , 63°C , 64°C ve 61°C (T_{5a-e}) olarak kayıt edilmiştir. İlerleyen periyotta ise yukarıda ifade edildiği üzere yerel sıcaklık değerlerinin birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. Örnek olarak, $t=300$.dk için 1., 2., 3. 4. ve 5.ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değerleri, sırasıyla, 27°C , 39°C , 46°C , 49°C ve 49°C (T_{1a-e}); 27°C , 38°C , 46°C , 49°C ve 49°C (T_{2a-e}); 27°C , 38°C , 45°C , 45°C ve 46°C (T_{3a-e}); 27°C , 36°C , 43°C , 46°C ve 46°C (T_{4a-e}); 27°C , 36°C , 40°C , 41°C ve 40°C (T_{5a-e}) olarak ölçülmüştür. Yerel sıcaklık değişimleri üzerinden sıvı-katı faz dönüşümünü en geç tamamlayan ($t=159$ dk) noktanın 4.ölçüm istasyonu içerisindeki en üst nokta (T_{4e}) olduğu görülmektedir.



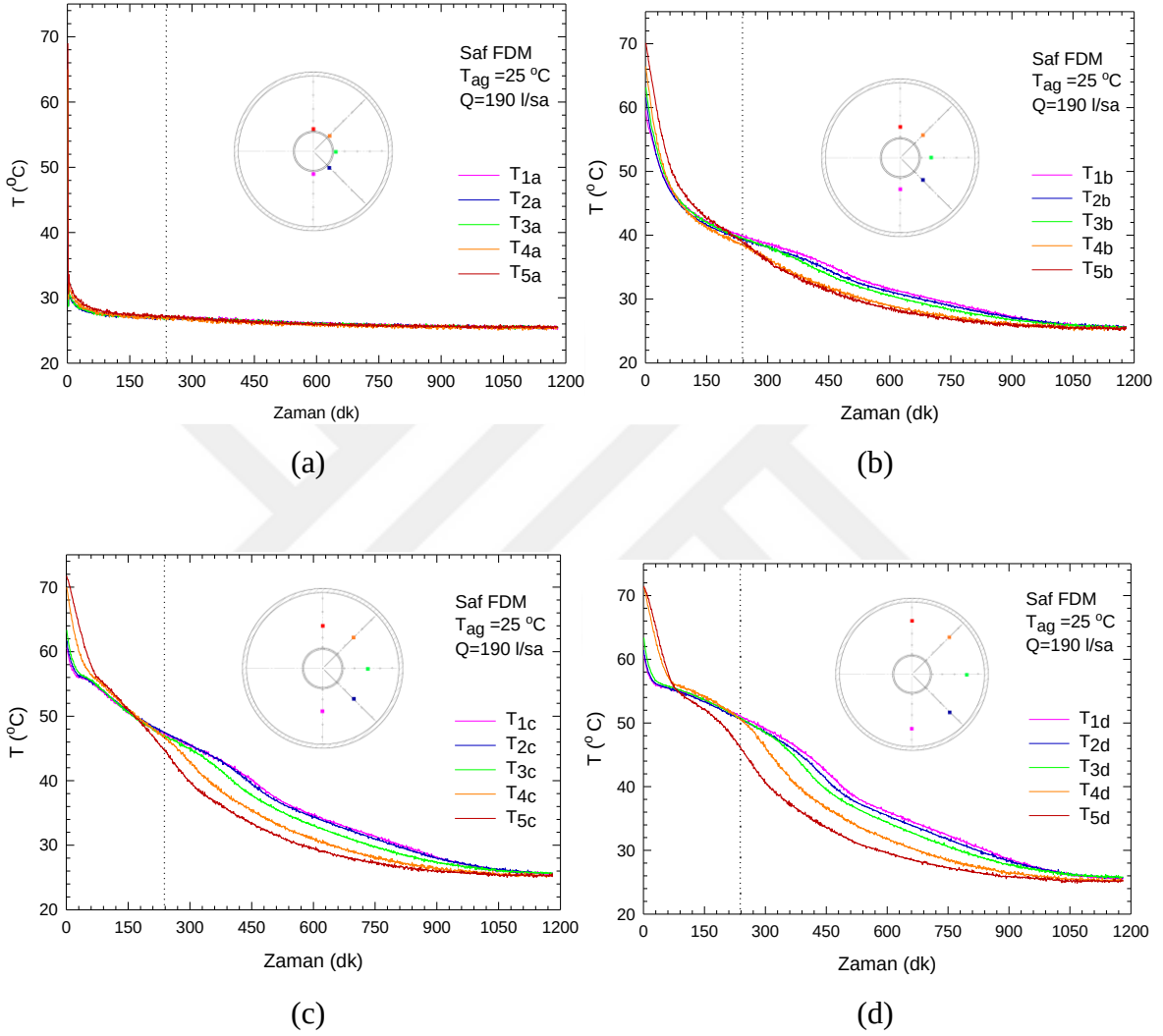
Şekil 32. Parafinin (0 g/l) ölçüm istasyonlarındaki yerel noktaların sıcaklık değişimi, katılaşma

Şekil 32'nin devamı



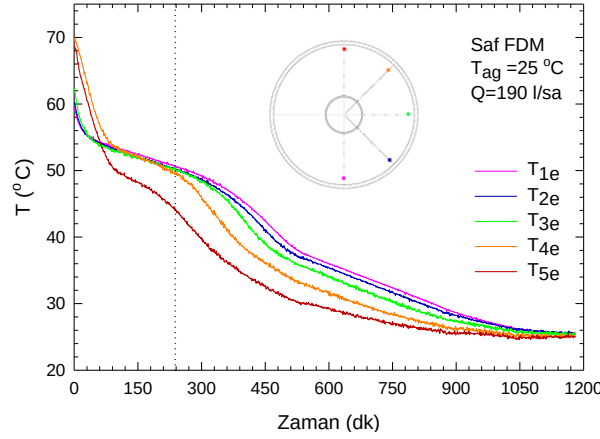
Depolama ortamı içerisinde farklı açısall konumlardaki ölçüm istasyonlarına ait bakır boru yüzeyinden olan uzaklığı aynı olan yerel noktaların sıcaklık eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 33’de sunulmuştur. Bakır boru yüzeyine yakın noktalardaki (T_{1a-e} , T_{2a-e}) yerel sıcaklık farklılıklarının geri kazanım periyodu süresince oldukça sınırlı olduğu görülürken, bakır boru yüzeyinden olan uzaklık arttıkça sıcaklık farklarının arttığı görülmektedir. Yukarıda ifade edildiği üzere, katılaşma sürecinin tamamlanmasına kadar olan periyotta ($t < 150 \text{ dk}$) artan açısall konum ile yerel nokta sıcaklıklarının daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Katılaşma bölgesinin altındaki sıcaklıklara düşülmesi ile ($T < 50$) üst bölgelerdeki yerel sıcaklık değerlerinin daha düşük değerler aldığı ve ilerleyen periyotta birbirine oldukça yakın değerler aldığı gözlenmektedir. Bu davranış, sıvı-katı faz bölgesinin bakır boru yüzeyinde kalınlaşarak yukarı yönlü gelişmesi (enerjisini kaybeden sıvı FDM’nin aşağı yönlü hareketi ile katı FDM yüzeyine yapışması etkisi ile) ve depolama ortamı

içerisindeki etkin ısı transfer mekanizmasının iletme dönmesi etkileri ile ilişkilendirilebilir. Katılaşma bölgesinin yukarı yönlü gelişmesi ve katı faz FDM'nin sıvı faza kıyasla ısı iletkenliğinin daha yüksek olması üst bölgedeki yerel sıcaklıkların daha düşük değerler almasını ($t > 150$.dk) açıklar niteliktedir.



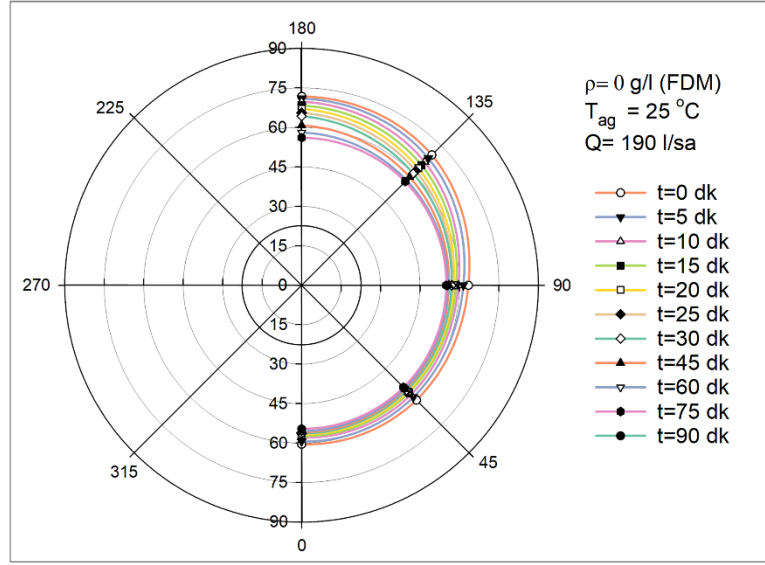
Şekil 33. Parafinin (0 g/l) farklı ölçüm istasyonlarına ait yerel nokta sıcaklıklarının karşılaştırılması, katılaşma

Şekil 33'ün devamı



(e)

Farklı ölçüm istasyonları için bakır boru yüzeyinden aynı uzaklığa sahip üçüncü yerel noktalara (T_{1c} , T_{2c} , T_{3c} , T_{4c} , T_{5c}) ait sıcaklıkların zaman bağımlı değişimi kutupsal kontur/grafik ile Şekil 34'de verilmektedir. Deşarj sürecinin ilk periyodunda ($t=0-60\text{dk}$) depo içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımının ortaya oluşmadığı görülmektedir. Bu durum, yukarıda ifade edildiği üzere sıcak sıvı FDM'nin aşağı yönlü olan hareketi ile ortaya çıkan doğal taşınım etkisinin bir sonucudur. Örnek olarak, $t=30 \text{ dk}$ anında, 1. ölçüm istasyonu üzerindeki T_{1c} 'ye ait yerel sıcaklık değeri 56°C iken 5. ölçüm istasyonu üzerindeki T_{5c} 'ye ait yerel sıcaklık değeri 63°C olarak ölçülmüştür. Geri kazanım sürecinin ilerlemesi ile ($t>90$) sıcaklıkların birbirine yakın değerler aldığı, bir başka ifade ile üniform bir sıcaklık dağılımının oluştuğu görülmektedir. Bu davranış ilgili yerel noktaların ilgili periyotta sıvı-katı faz dönüşümlerinin tamamlanması ile ilişkilidir.

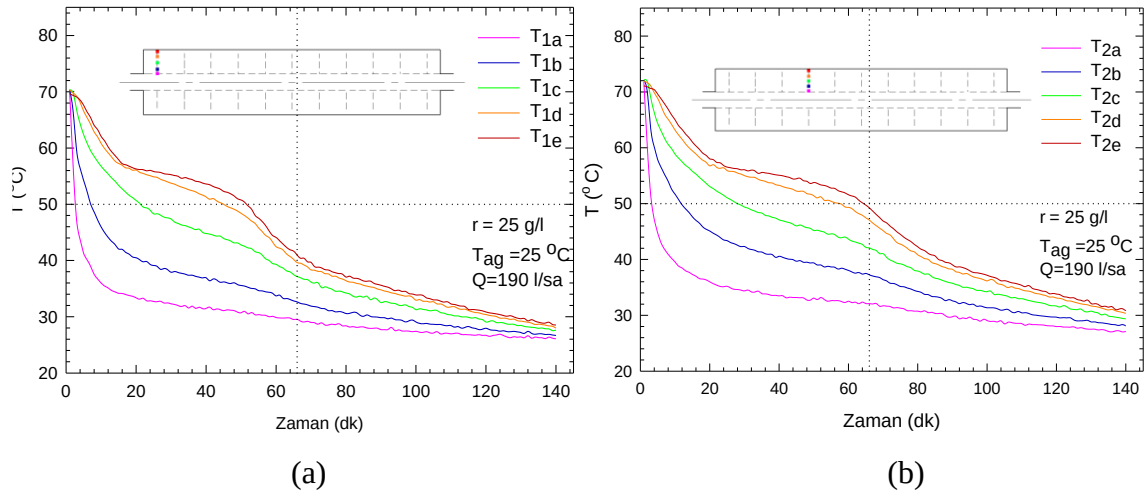


Şekil 34. Farklı ölçüm istasyonlarına ait üçüncü yerel nokta sıcaklıklarının kutupsal grafik gösterimi

3.2.2. FDM/Grafit Matris Depolama Ortamı

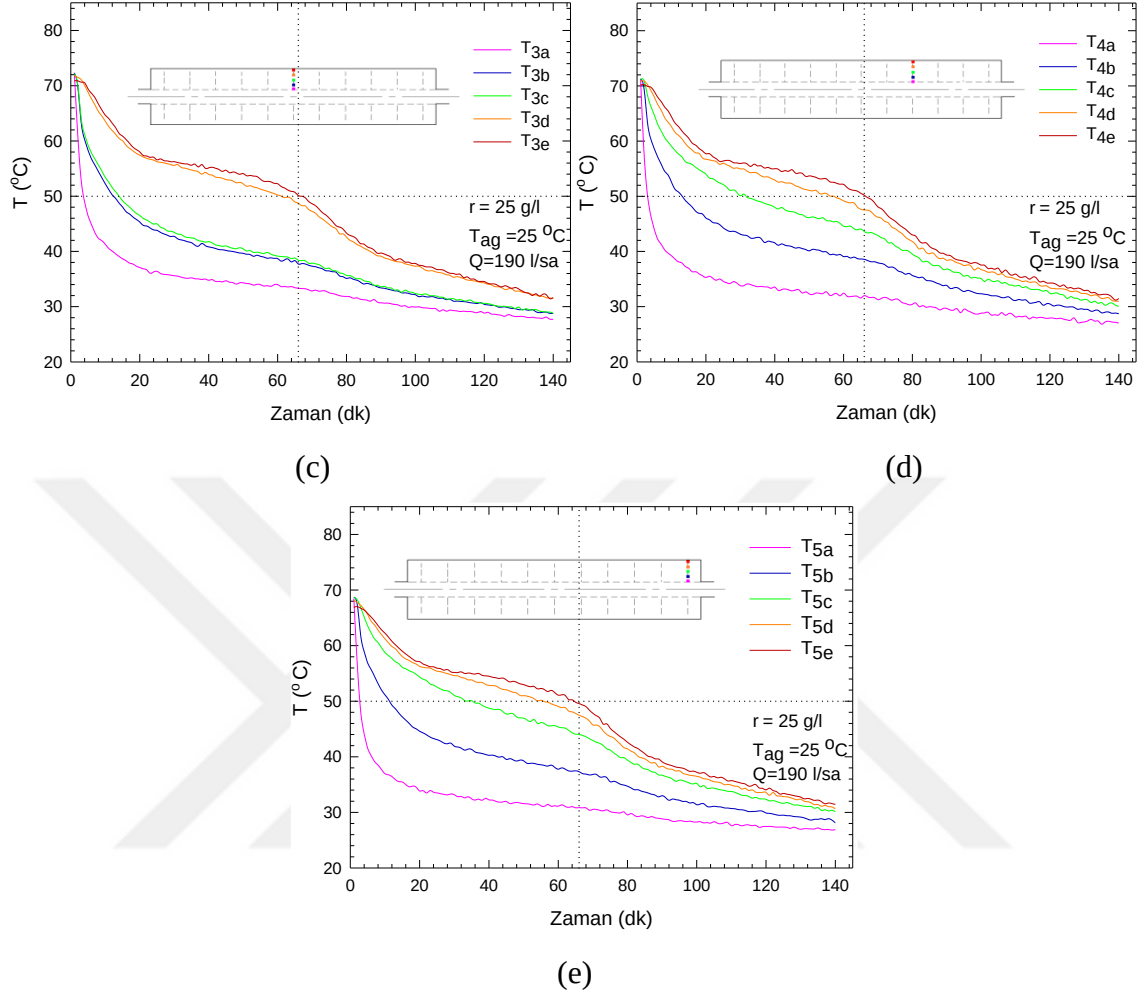
Geri kazanım süreci için farklı yığın yoğunluklarına sahip FDM/grafit matris düzenlemelerine ait yerel sıcaklık değişimleri Şekil 35-40'de verilmiştir. 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri için farklı ölçüm istasyonlarına ait yerel nokta sıcaklık değişimleri, sırasıyla, Şekil 35a-e, 36a-e ve 37a-e'de sunulmuştur. Sıcaklık eğrilerinde, genel karakter olarak, sıvı-katı faz dönüşüm bölgesine kadar yerel sıcaklık azalışlarının hızlı olduğu, katılaşma sıcaklıklarına ulaşılması ile sıcaklık azalış oranlarının azaldığı ve katılaşma bölgesinin aşılması ile tekrar yerel nokta sıcaklık azalış oranlarının arttığı görülmektedir. Ancak, ilerleyen periyotta ısı transfer miktarının, depolama ortamı ile akışkan giriş sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının azalmasına bağlı olarak, daha çok kötüleşmesi sıcaklık eğrilerinde tekrar bir kırılıma (eğim değişimine) sebep olduğu görülmektedir (örnek olarak; Şekil 36b, $t > 70$ dk). FDM/grafit matris düzenlemelerinde her bir ölçüm istasyonu için yerel nokta sıcaklıklarının bakır boru yüzeyinden uzaklaştıkça arttığı görülmektedir. Bu durum, erime sürecince olduğu gibi katılaşma davranışında da depolama ortamı içerisinde termal tabakalaşma olduğunu ortaya koymaktadır. Katılaşma sürecinin ilerlemesi ($t > 40$ dk) ile termal tabakalaşmanın azaldığı ve yerel nokta sıcaklıkların birbirine daha yakın değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, ısı transfer borusu ve depolama ortamı arasındaki sıcaklık farklarının azalmasına bağlı olarak ısı transferinin kötüleşmesi ve depolama ortamındaki yüksek ısıl iletkenlik/yayıcılık ile ilişkili olduğu ifade

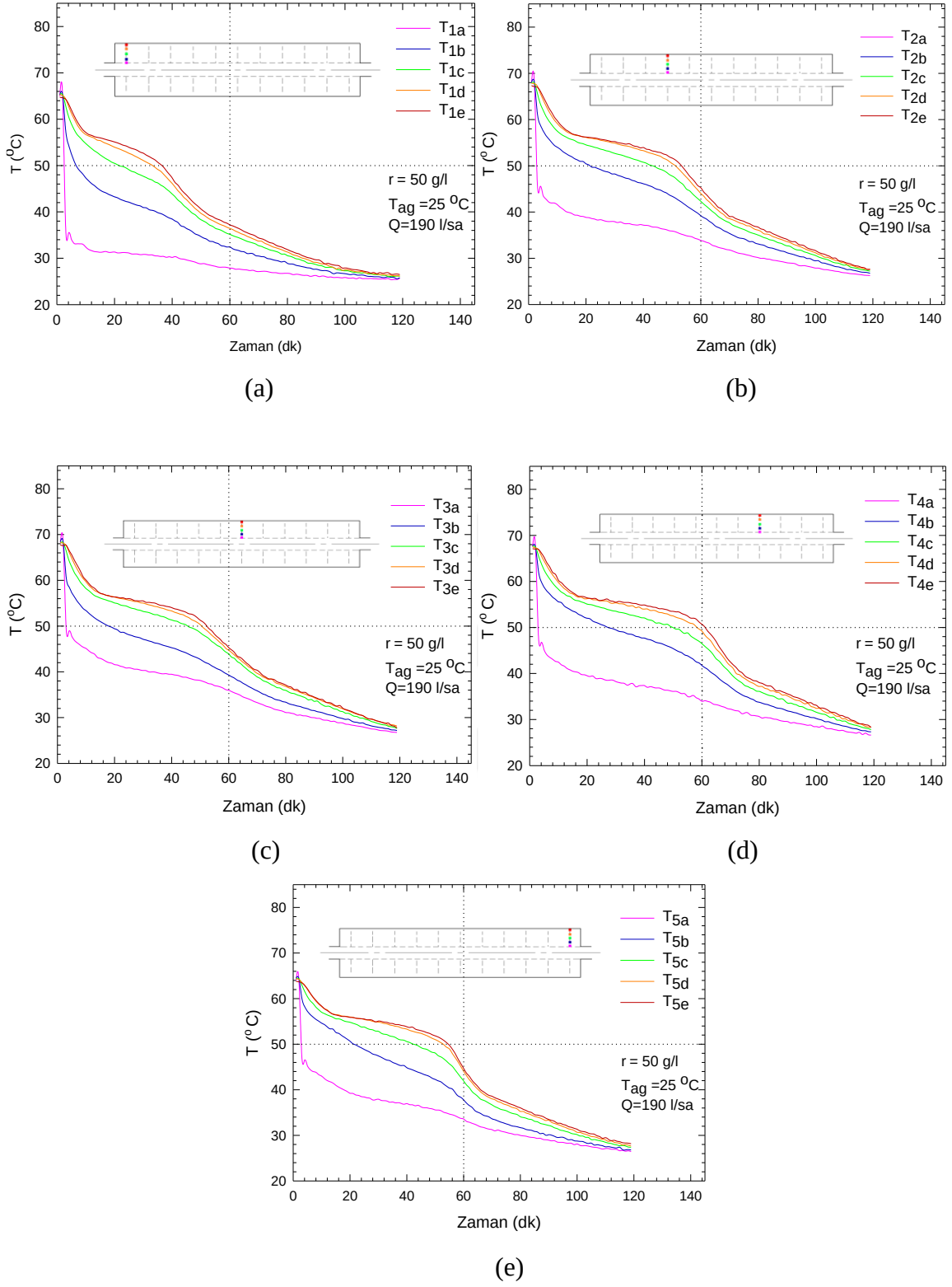
edilebilir. Örnek olarak (50 g/l yığın yoğunluğu, Şekil 36), $t=20$.dk için 1. (T_{1a-e}), 2. (T_{2a-e}), 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonlarındaki sıcaklık değerleri, sırasıyla, 31°C, 43°C, 50°C, 54°C, 55°C (1.istasyon); 39°C, 50°C, 55°C, 56°C, 56°C (2.istasyon); 42°C, 49°C, 55°C, 56°C, 56°C (3.istasyon) ; 40°C, 52°C, 55°C, 56°C, 56°C (4.istasyon) ve 40°C, 51°C, 55°C, 56°C, 56°C (5.istasyon) olarak ölçülürken ve $t=44$. dk için ise 1. (T_{1a-e}), 2. (T_{2a-e}), 3. (T_{3a-e}), 4. (T_{4a-e}) ve 5. (T_{5a-e}) ölçüm istasyonlarındaki sıcaklık değerleri, sırasıyla, 30°C, 37°C, 41°C, 43°C, 44°C (1.istasyon); 37°C, 45°C, 50°C, 52°C, 53°C (2.istasyon); 39°C, 44°C, 50°C, 52°C, 53°C (3.istasyon) ; 37°C, 47°C, 51°C, 54°C, 54°C (4.istasyon) ve 37°C, 44°C, 50°C, 53°C, 53°C (5.istasyon) olarak ölçülmüştür. En son sıvı-katı faz dönüşümünü tamamlayan yerel nokta, tüm yığın yoğunlukları değerleri için, 5.ölçüm istasyonundaki 5. yerel nokta (T_{5e}) olarak belirlenmiştir. 50 g/l ($Q=190$ l/sa) düzenlemesine ait katılaşma sürecine dahil olan ilk yerel nokta ile en son katılaşmanın gerçekleştiği yerel noktalar arasındaki yerel sıcaklık farkı $t=10$ ve $t=T_{kritik}$ zaman adımları için, sırasıyla, 25,84°C ve 18,37°C olarak hesaplanmıştır. 50 g/l için elde edilen sıcaklık farklılıkları parafin durumu (0 g/l-referans durum) ile karşılaştırıldığında, sırasıyla, %32 ve %18 daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, FDM/grafit matris düzenlemeleri için depo içerisinde daha üniform bir katılaşma davranışının olduğunu ortaya koymaktadır.



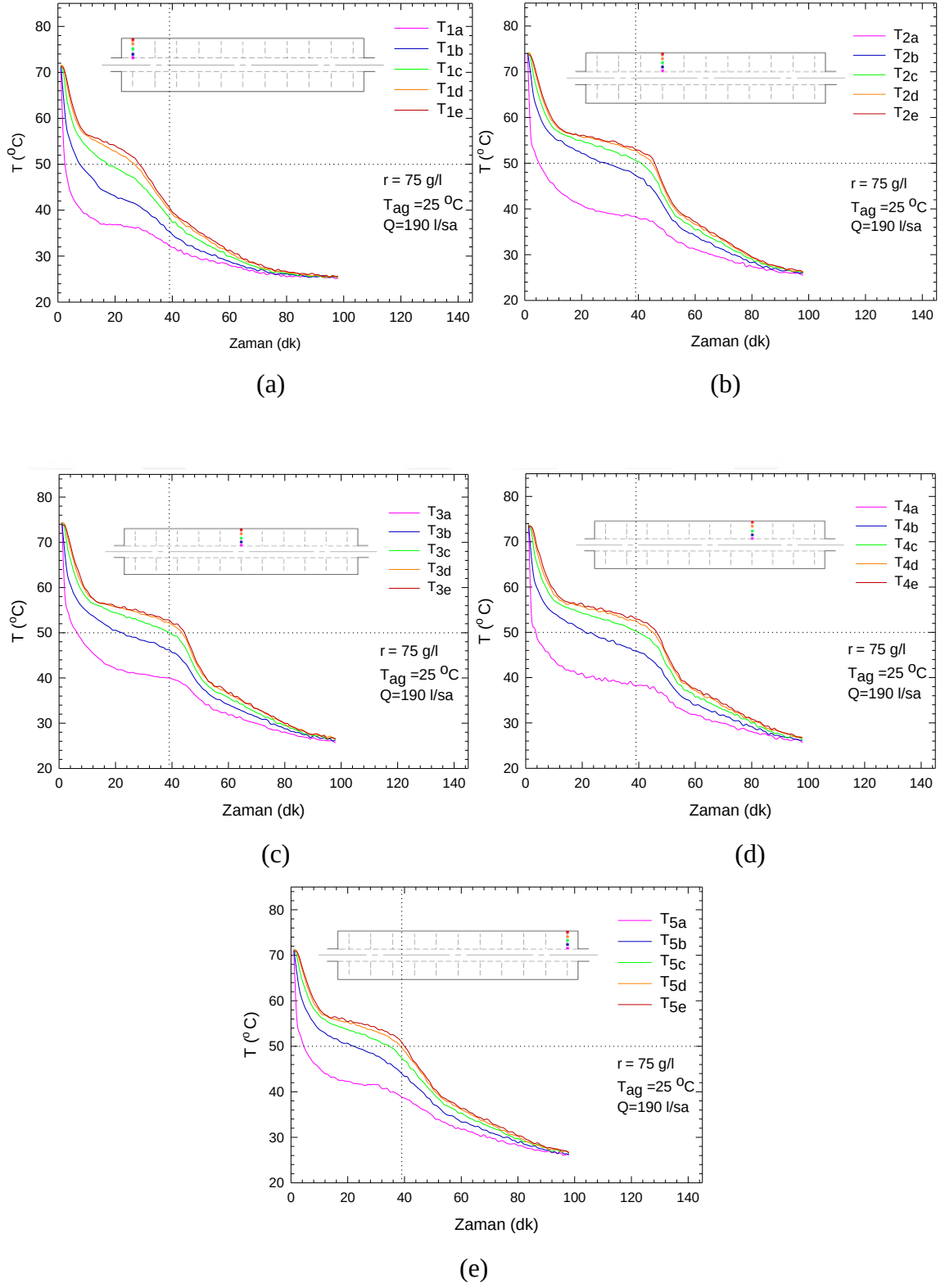
Şekil 35. FDM/grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 25 g/l

Şekil 35'in devamı



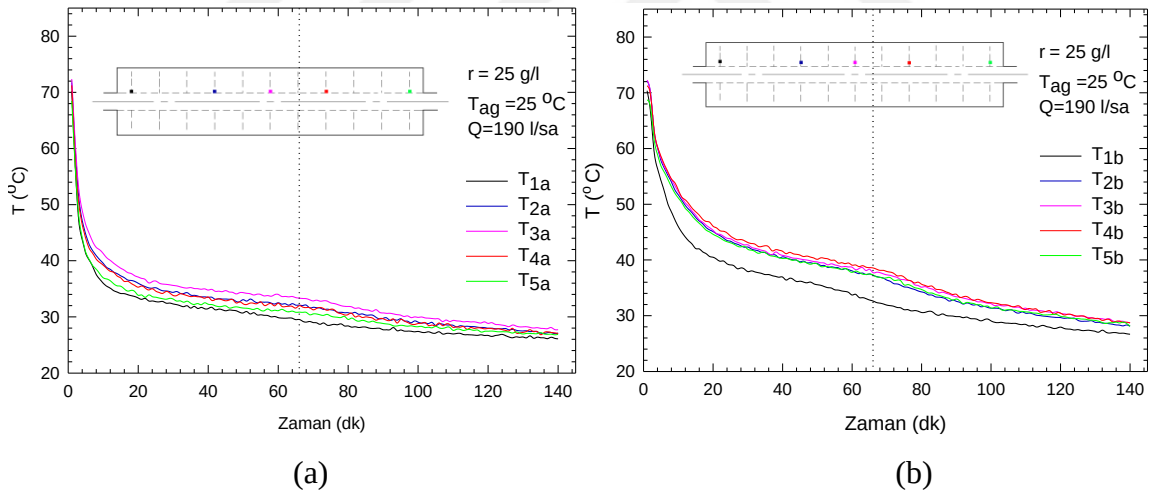


Şekil 36. FDM/grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 50 g/l



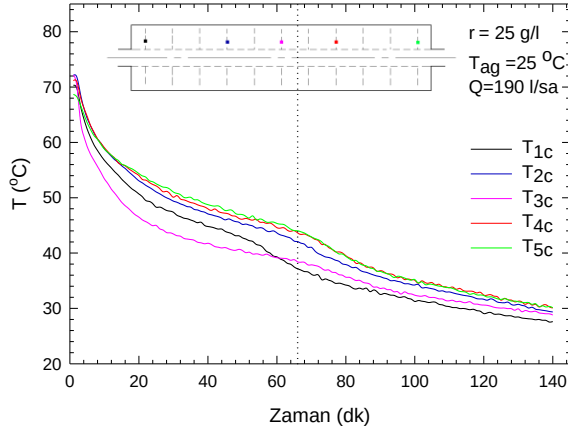
Şekil 37. FDM/grafit matris düzenlemesi için farklı ölçüm istasyonlarına ait sıcaklık değişimi, 75 g/l

Eksenel yöndeki sıcaklık değişimleri Şekil 38-40a-e’de sunulmuştur. Farklı eksenel konumlara sahip ölçüm istasyonları için ise yerel nokta sıcaklık farklılıklarının sınırlı olduğu belirtilmelidir. Örnek olarak (50 g/l yığın yoğunluğu, Şekil 39), $t=30$.dk için $T_{1-5a}(T_{1a}, T_{2a}, T_{3a}, T_{4a}, T_{5a}), T_{1-5b}, T_{1-5c}, T_{1-5d}$ ve T_{1-5e} sıcaklık değerleri, sırasıyla, 31°C, 38°C, 40°C, 38°C, 38°C (T_{1-5a}); 41°C, 48°C, 47°C, 49°C, 47°C (T_{1-5b}); 48°C, 53°C, 53°C, 54°C, 53°C (T_{1-5c}); 51°C, 55°C, 55°C, 55°C, 55°C (T_{1-5d}) ve 53°C, 55°C, 49°C, 47°C, 55°C (T_{1-5e}) olarak ölçülürken ve $t=60$. dk için ise, $T_{1-5a}(T_{1a}, T_{2a}, T_{3a}, T_{4a}, T_{5a}), T_{1-5b}, T_{1-5c}, T_{1-5d}$ ve T_{1-5e} sıcaklık değerleri, sırasıyla, 28°C, 34°C, 36°C, 34°C, 34°C (T_{1-5a}); 32°C, 39°C, 39°C, 42°C, 38°C (T_{1-5b}); 35°C, 42°C, 44°C, 46°C, 42°C (T_{1-5c}); 36°C, 44°C, 45°C, 49°C, 44°C (T_{1-5d}) ve 37°C, 45°C, 45°C, 51°C, 45°C (T_{1-5e}) olarak ölçülmüştür. Burada, ısı transfer borusu girişine en yakın olan ölçüm istasyonundaki yerel nokta sıcaklıklarının ($T_{1a}, T_{1b}, T_{1c}, T_{1d}, T_{1e}$) farklı eksenel konumlardaki eş yerel noktalara kıyasla yaklaşık %19-21 olarak daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Bu durum, boru eksenı boyunca depolama ortamından akışkana olan ısı transferi ile ilişkilidir.

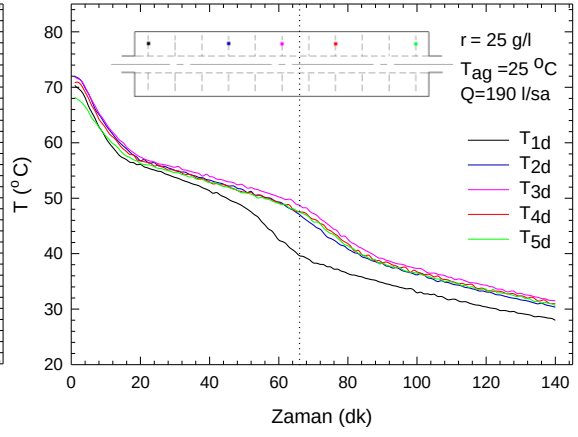


Şekil 38. FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 25 g/l

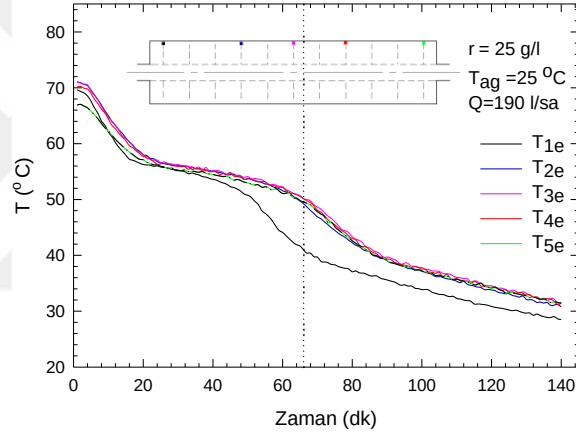
Şekil 38'in devamı



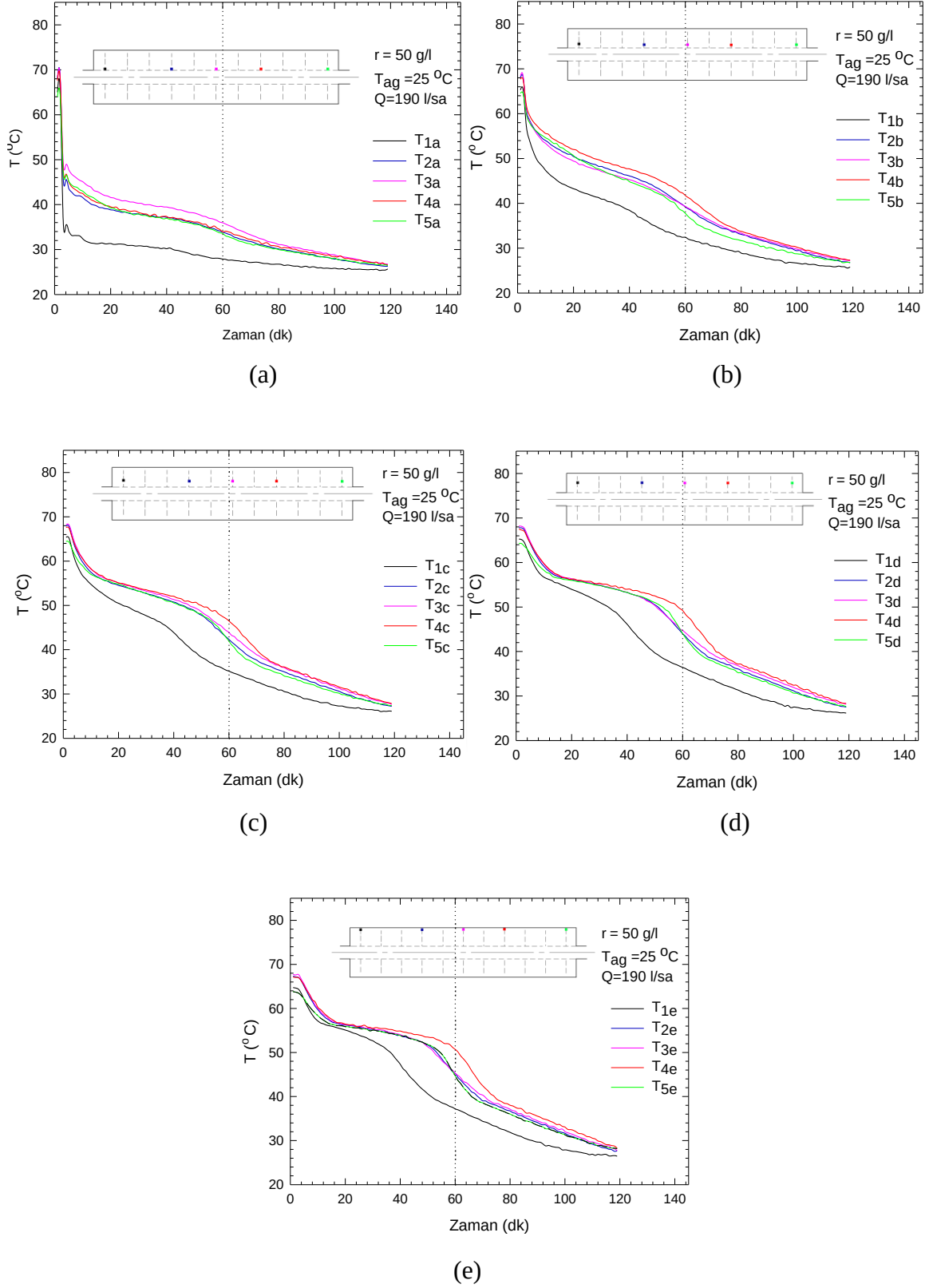
(c)



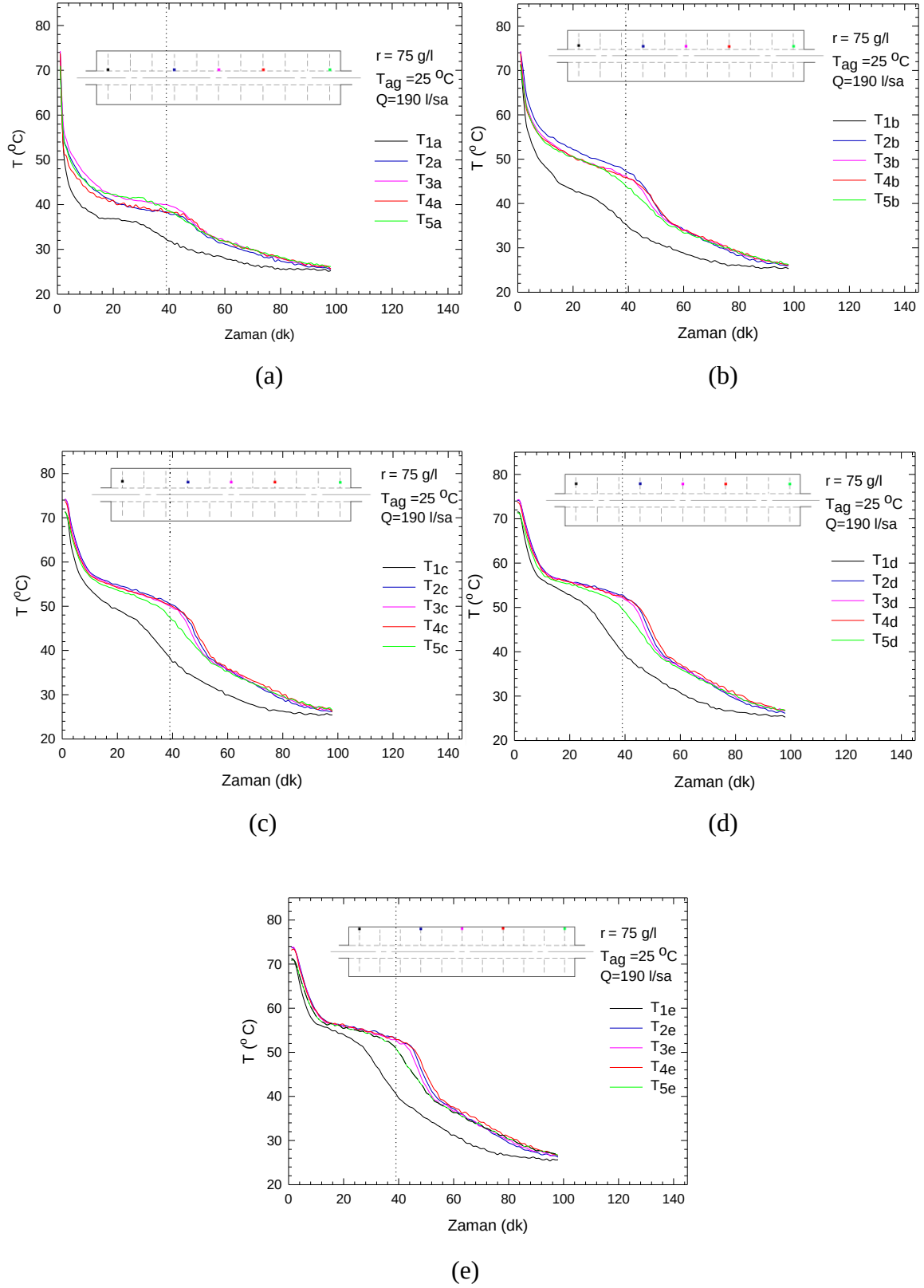
(d)



(e)



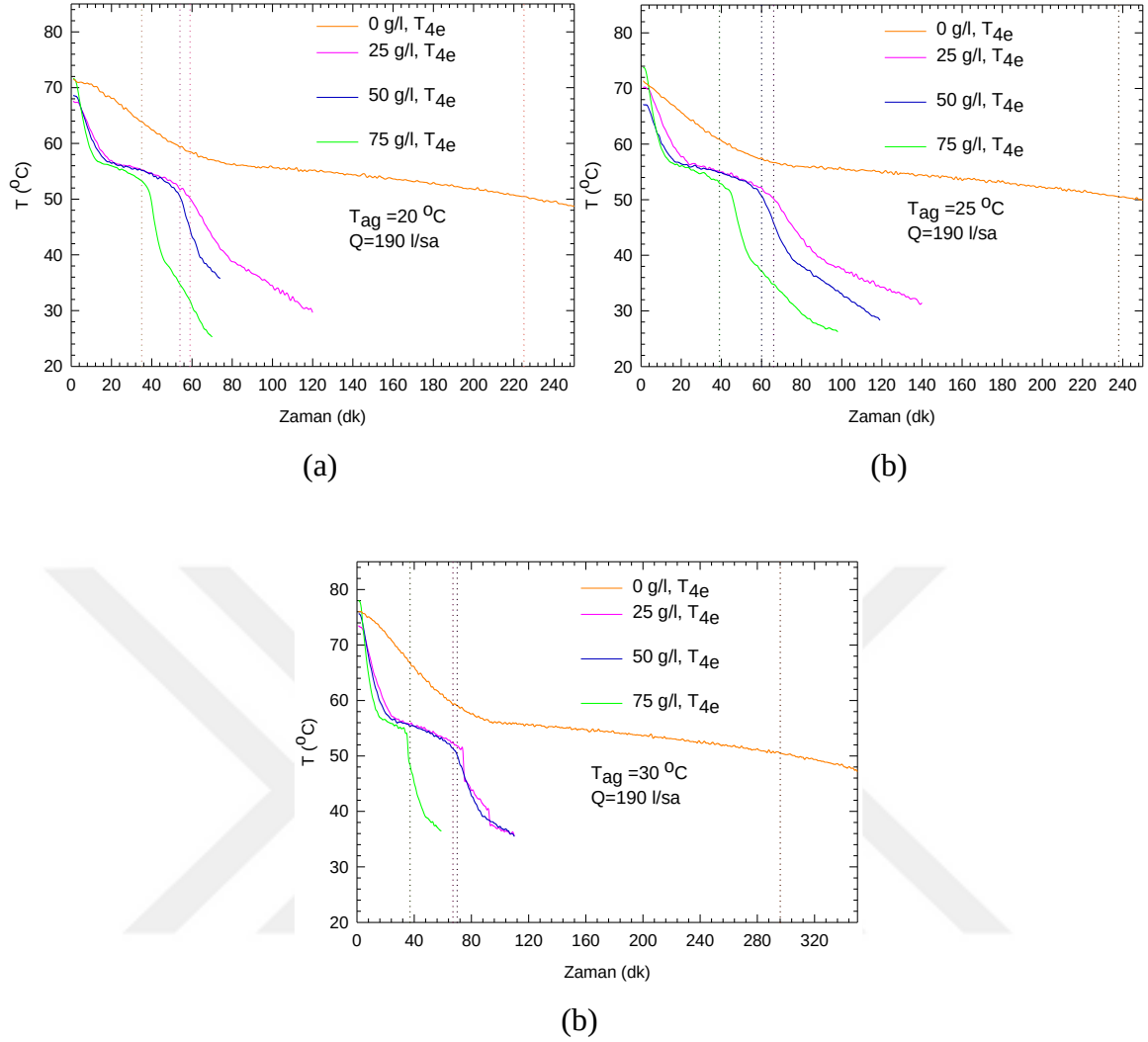
Şekil 39. FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 50 g/l



Şekil 40. FDM/Grafit matris düzenlemesine ait eksenel sıcaklık değişimi, 75 g/l

Artan yığın yoğunluğu değerleri ile yerel sıcaklık değerlerinin azaldığı görülmektedir. (Şekil 38-39a-e). Bu davranış, artan yığın yoğunluğu ile depolama ortamının ortalama ısı iletkenlik değerinin artması ile ilişkilidir (Tablo 11). Artan yığın yoğunluğu, FDM/grafit matris depolama ortamındaki genişletilmiş grafit miktarını, bir başka ifade ile grafit matris yapısındaki yüksek ısı iletkenliğe sahip termal köprülerin sayıca artmasını sağlamaktadır. Örnek olarak, $t=30$.dk için, 25, g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerlerine ait 4. Ölçüm istasyonundaki (T_{4b-e}) yerel sıcaklıklar, sırasıyla, 54°C, 59°C, 63°C, 64°C (25 g/l); 56°C, 58°C, 60°C, 60°C (50 g/l); 54°C, 57°C, 58°C, 59°C (75 g/l) olarak elde edilmiştir. 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluklarına sahip FDM/grafit matris depolama ortamlarındaki yerel sıcaklık değerlerinin (örnek olarak, T_{3d} , $t=40$.dk) parafin durumuna kıyasla %4, %5 ve %9 oranlarında daha düşük değerler almıştır. Bu durum yukarıda ifade edildiği üzere depolama ortamının ortalama ısı iletkenlik değerinin ve ısı yayılım oranının iyileştirilmesi ile ilişkilidir.

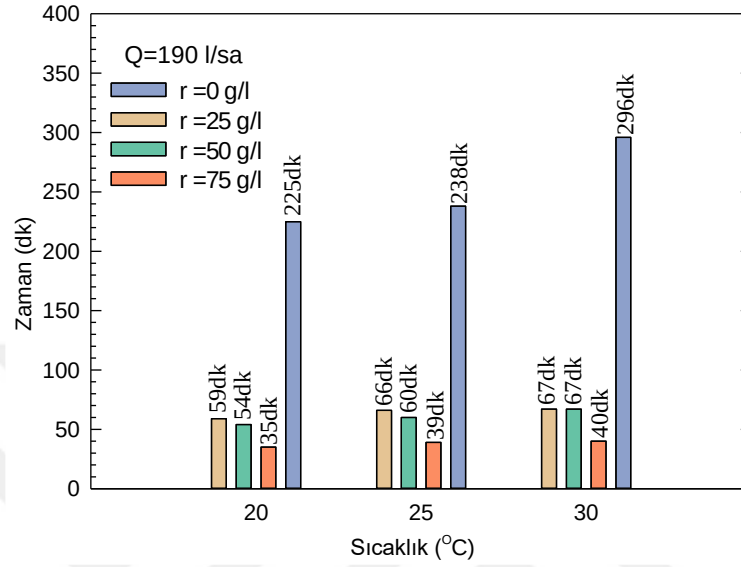
Parafin (0 g/l) ve FDM/grafit matris depolama (25, 50 ve 75 g/l) ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklık eğrilerinin değişimi farklı akışkan giriş sıcaklıkları için Şekil 41a-c’de verilmiştir. Farklı akışkan giriş sıcaklıkları için, genel karakter olarak, artan yığın yoğunluk değerleri ile kritik yerel noktaların daha düşük değerler aldığı görülmektedir. Bu davranış, daha önce de ifade edildiği üzere, artan yığın yoğunluğu ile artan ısı yayılımının ve dolayısıyla ısı transferinin iyileşmesi ile ilişkilidir. Örnek olarak ($T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$, Şekil 41b), $t=10$. dk, 20.dk ve 44.dk anlarına ait 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri için sıcaklıklar, sırasıyla, 68°C, 64°C, 60°C ve 59°C ($t=10$. dk); 66°C, 58°C, 56°C ve 56°C ($t=20$. dk); 60°C, 55°C, 54°C ve 51°C ($t=44$. dk) değerlerine ulaşmaktadır. 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri ($T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$, Şekil 41b) için sıvı-katı faz dönüşüm sıcaklığının alt limitine ($T_k=55-50$) ulaşmaları süresince gerçekleşen sıcaklık azalış oranları, sırasıyla, 0,06°C/dk, 0,27°C/dk, 0,30°C/dk ve 0,59°C/dk olarak hesaplanmıştır. Geri kazanım sürecinde azalan akışkan giriş sıcaklık değerleri için yerel nokta sıcaklık azalış hızlarının arttığı görülmektedir. Örnek olarak, $T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$, $Q=190$ l/sa için 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l düzenlemelerinin katılma alt limit sıcaklığına ulaşmaları süresince olan sıcaklık azalış oranları $T_{ag}=30^{\circ}\text{C}$, $Q=190$ l/sa’ya kıyasla, sırasıyla, %22, %14, %10 ve %12 iyileşmiştir. Düşük yığın yoğunluğu değerleri için akışkan giriş sıcaklığı etkisinin daha hissedilir olduğu belirtilmelidir.



Şekil 41. Farklı depolama ortamlarına ait kritik yerel nokta sıcaklıklarının değişimi, akışkan giriş sıcaklığı etkisi: (a) $T_{ag}=20^\circ\text{C}$, (b) $T_{ag}=25^\circ\text{C}$, $T_{ag}=30^\circ\text{C}$

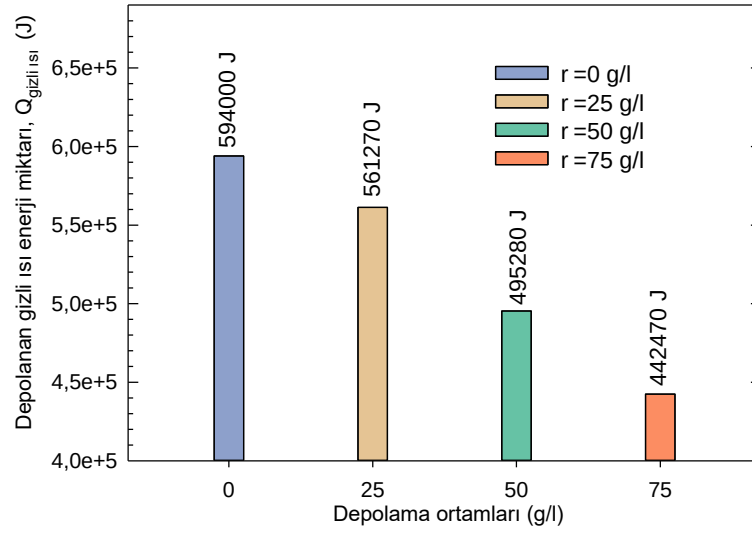
Farklı depolama ortamlarının (0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l) farklı çalışma koşullarındaki toplam erime süreleri Şekil 42’de sunulmuştur. Toplam erime sürelerinin artan yığın yoğunluğu ve azalan akışkan giriş sıcaklık değerleri için azaldığı görülmektedir. Artan yığın yoğunluğu depolama ortamının sahip olduğu ortalama ısıl iletkenlik ve dolayısıyla ısı yayılım değerlerini iyileştirmektedir. Bu durum daha önce de ifade edildiği üzere artan yığın yoğunluğu ile yapı içerisindeki termal köprülerin sayısının artması ile ilişkilidir. Akışkan giriş sıcaklığındaki azalış ise ısı transfer yüzeyi ve depolama ortamı arasındaki sıcaklık farkını arttırarak ısı transferini iyileştirmektedir. 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l yığın yoğunluğu değerleri ($T_{ag}=25^\circ\text{C}$) için toplam katılaşma süreleri 0 g/l (sadece parafin kullanımı) durumuna kıyasla, sırasıyla, %72, %75 ve %84 oranlarında azalmıştır. Azalan

akışkan giriş sıcaklığı değerleri ile ($T_{ag}=30^{\circ}\text{C}$ 'dan $T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$ 'e) toplam katılma süreleri üzerinde 0 g/l, 25 g/l, 50 g/l ve 75 g/l için, sırasıyla, %24, %12, %19 ve %5 oranlarında azalma sağlanmıştır.

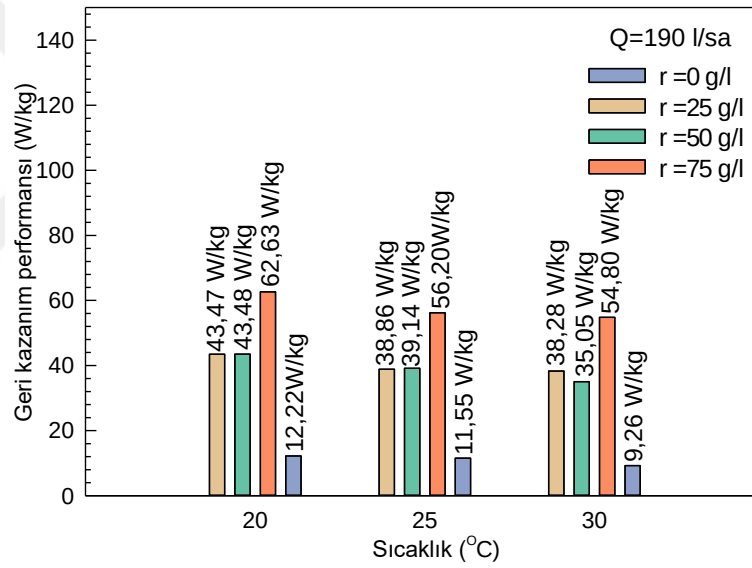


Şekil 42. Akışkan giriş sıcaklıklarının farklı ortamlara ait geri kazanım süresine etkisi, $Q=190$ l/sa

Farklı depolama ortamlarına ait depolanan geri kazanım performansı değerleri, sırasıyla Şekil 43 ve Şekil 44'de sunulmuştur. Geri kazanılan gizli ısı miktarının artan yığın yoğunlukları azaldığı görülmektedir. Bu durum, erime davranışının ifade edildiği üzere artan yığın yoğunlukları ile grafit matrise emdirilen parafin miktarının azalması ile ilişkilidir. 75 g/l için depolanan gizli ısı miktarı saf parafin durumuna kıyasla yaklaşık %26 daha azdır. Ancak, birim zaman ve birim kütle için gerçekleştirilen geri kazanım oranına ait veriler incelendiğinde ($T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$ için 0 g/l ve 75 g/l) artan yığın yoğunlukları ile enerji geri kazanım oranının önemli ölçüde 4,9 kat iyileştirildiği görülmektedir. Bu davranış, grafit matris uygulamasının önemli bir potansiyel olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 43. Farklı depolama ortamları için geri kazanılan gizli ısı miktarı



Şekil 44. Farklı depolama ortamlarına ait enerji geri kazanım oranı değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada güneş enerjisi ve atık ısı geri kazanımı gibi termal enerji depolama sistemlerinde kullanılmak üzere halkasal Parafin/Grafit Matris GITED ünitelerinin depolama ve geri kazanım performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Tez kapsamında yığın yoğunluğu, akışkan giriş sıcaklığı ve akışkan debisi çalışma parametreleri olarak incelenmiştir. Deneysel verilerden elde edilen çıktılar aşağıda özet olarak sunulmuştur:

1. Parafin (0 g/l) ve FDM/grafit matris düzenlemeleri için etkin ısı transfer mekanizmalarının, sırasıyla, taşınım ve iletim ısı transfer mekanizmalarının olduğu görülmüştür.
2. Parafin düzenlemesi homojen olmayan bir erime/katılaşma davranışı sağlarken, FDM/grafit matris düzenlemeleri homojen bir erime/katılaşma davranışı sunmaktadır.
3. Sadece FDM kullanımı ile ortaya çıkan düşük ısı iletkenlik ve sızıntı sorunları önemli ölçüde azaltılmıştır.
4. Depolama (erime/şarj) sürecinde, farklı FDM/grafit matris düzenlemeleri için artan yığın yoğunluğu ile matris kompozitlerin yığın yoğunluğu arttıkça erime süreleri kısalmıştır. 75 g/l ($T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$, $Q=190$ l/sa) için erime süresi 0 g/l (parafin durumu/referans durum) %95 oranında kısalmıştır.
5. Depolama (erime) sürecinde artan yığın yoğunluğu değerleri ile toplam erime süresi üzerindeki etkinin sınırlandığı görülmüştür. 25, 50 ve 75 g/l ($T_{ag}=80$, $Q=190$ l/sa) için toplam erime süreleri 0 g/l'ye kıyasla, sırasıyla, %88, %92, %95 oranında kısalmıştır.
6. Depolama (erime) sürecinde, farklı FDM/grafit matris düzenlemeleri için akışkan giriş sıcaklığı arttıkça toplam erime süreleri kısalmıştır. 75 g/l yığın yoğunluğu ($Q=190$ l/sa) için akışkan giriş sıcaklığının 75°C 'dan 85°C 'a artırılması ile toplam erime süresi %35 azalmıştır.
7. Depolama sürecinde, farklı FDM/grafit matris düzenlemeleri akışkanın hacimsel debisi arttıkça erime sürelerinin kısaldığı gözlenmiştir. 75 g/l yığın yoğunluğu ($T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$) için akışkan debi değerinin 100 l/sa'dan 280 l/sa'ya artması toplam erime süresi %18 azalmıştır. Debi etkisinin erime süresi üzerindeki etkisi akışkan giriş sıcaklığındaki değişime kıyasla daha sınırlı olduğu belirtilmelidir.

8. Depolama sürecinde, farklı FDM/grafit matris düzenlemeleri için artan yığın yoğunluğu değerleri ile depolama oranının arttığı görülmüştür. 75 g/l ($T_{ag}=80^{\circ}\text{C}$, $Q=190$ l/sa) için depolama oranı değerlerinin 0 g/l (parafin durumu), 25 ve 50 g/l düzenlemelerine kıyasla 16, 2 ve 1,3 kat arttığı görülmüştür.
9. Geri kazanım (katılaşma) sürecinde, farklı FDM/grafit matris düzenlemeleri için artan yığın yoğunluğu ile geri kazanım süreleri kısalmıştır. 75 g/l ($T_{ag}=25^{\circ}\text{C}$, $Q=190$ l/sa) için katılaşma süresi referans duruma kıyasla (0 g/l) %84 oranında kısalmıştır.
10. Geri kazanım (katılaşma/deşarj) sürecinde, farklı FDM/grafit matris düzenlemeleri için akışkan giriş sıcaklığı azaldıkça toplam katılaşma süreleri kısalmıştır. $T_{ag}=20^{\circ}\text{C}$ (25 g/l ve $Q=190$ l/sa) için katılaşma süresi $T_{ag}=30^{\circ}\text{C}$ 'ye kıyasla %12 kısalmıştır.

5. ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında, FDM ile ısı depolama konusunda pasif yöntemlerle iyileştirmeler yapılarak, ısı iletkenlik özelliklerinin ve ısı depolama/geri kazanım sürelerinin iyileştirilmesine yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilecek yeni çalışmalara katkı sağlaması/yön vermesi açısından aşağıda bazı öneriler sunulmuştur:

- Daha yüksek yığın yoğunluğu değerlerinin etkisi deneysel/sayısal olarak araştırılabilir.
- Artan yığın yoğunluğu ile azalan FDM miktarının sınırlandırılmasına yönelik farklı tasarımlar araştırılabilir.
- Farklı genleşme oranına sahip grafit tozları kullanarak ısı depolama/geri kazanım süreçleri takip edilebilir.
- Farklı erime/katılaşma sıcaklık aralığına sahip faz değiştiren maddeler kullanılabilir.
- Farklı çap oranları (d/D) depolama/geri kazanım davranışları incelenebilir.
- Isı transfer borusu içerisinde ısı iletkenlik sınır tabaka oluşumunu önleyecek $T_{yığın}$ sıcaklığını sağlayan sistemler eklenebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abedin, A. H., & Rosen, M. A. (2011). A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems. *The Open Renewable Energy Journal*, 4(1), 42–46.
- Abhat, A. (1983). Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. *Solar Energy*, 30(4), 313–332.
- Akgün, M. (2006). *Parafin Gizli Isı Depolama Geometrisi Optimizasyonu Üzerine DeneySEL Bir Çalışma*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Akgün, M., Aydın, O., & Kaygusuz, K. (2007). Experimental Study on Melting/Solidification Characteristics of a Paraffin as PCM. *Energy Conversion and Management*, 48(2), 669–678.
- Avcı, M., & Yazıcı, M. Y. (2013). Experimental Study of Thermal Energy Storage Characteristics of a Paraffin in a Horizontal Tube-In-Shell Storage Unit. *Energy Conversion and Management*, 73, 271–277.
- Aydın, O., Akgün, M., & Kaygusuz, K. (2007). An Experimental Optimization Study on a Tube-In-Shell Latent Heat Storage. *International Journal of Energy Research*, 31(4), 274–287.
- Azarifar, M., Sömek, S. K., & Dönmezer, N. (2017). Faz Değişirme ile Isı Depolamada Kullanılan Parafin-Grafit, Parafin- Kanatçık ve Saf Parafinli Yapıların Performans Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 155–163.
- Biçer, A., & Sarı, A. (2017). Silicafume/Polyethylene Glycol (PEG) Composite as a Novel Form-Stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 17(2), 683–690.
- Ceylan, I., Zuhur, S., & Gürel, A. E. (2017). Isı Depolama Yöntemleri ve Uygulamaları. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 1–32.
- Cheng, P., Chen, X., Gao, H., Zhang, X., Tang, Z., Li, A., & Wang, G. (2021). Different Dimensional Nanoadditives for Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials: Fundamentals and Applications. *Nano Energy*, 85, 2211–2855.
- Dinçer, İ., & Rosen, M. A. (2002). Thermal Energy Storage: Systems and Applications. *John Wiley&Sons*.
- Erdoğan, Ö. (2023, Mart 25). *Enerji Depolama*. BAU Yenilenebilir Enerji Mini MBA Programı, <https://www.guyad.org/Eklenti/241,guyad-enerji-depolama-101pdf>
- Esen, M., & Ayhan, T. (1996). Development of a Model Compatible with Solar Assisted Cylindrical Energy Storage Tank and Variation of Stored Energy With Time for Different Phase Change Materials. *Energy Conversion and Management*, 37(12), 1775–1785.

- Günerhan, H. (2004). Duyulur Isı Depolama ve Bazalt Taşı. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 530(45), 12–17.
- Guo, C. X., Ma, X. L., & Yang, L. (2015). PCM/ Graphite Foam Composite for Thermal Energy Storage Device. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 87(1).
- Hafiz Muhammad, A. (2023). Phase Change Materials for Heat Transfer (1st ed.). *Matthew Deans*.
- Hariri, A. S., & Ward, I. C. (1988). A Review of Thermal Storage Systems Used in Building Applications. *Building and Environment*, 23(1), 1–10.
- Kang, S., Choi, J. Y., & Choi, S. (2019). Mechanism of Heat Transfer Through Porous Media of Inorganic Intumescent Coating in Cone Calorimeter Testing. *Polymers*, 11(2), 221.
- Karaipekli, A. (2006). *Faz Değişimli Enerji Depolama Maddelerinde Isıl İletkenliğin Zenginleştirilmesi*. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tokat.
- Katekar, V. P., & Deshmukh, S. S. (2020). A Review of the Use of Phase Change Materials on Performance of Solar Stills. *Journal of Energy Storage*, 30, 101398.
- Kazemian, A., Khatibi, M., Reza Maadi, S., & Ma, T. (2021). Performance Optimization of a Nanofluid-Based Photovoltaic Thermal System Integrated with Nano-Enhanced Phase Change Material. *Applied Energy*, 295, 116859.
- Kim, T., France, D. M., Yu, W., Zhao, W., & Singh, D. (2014). Heat Transfer Analysis of a Latent Heat Thermal Energy Storage System Using Graphite Foam for Concentrated Solar Power. *Solar Energy*, 103, 438–447.
- Kılıkş, B., & Kakaç, S. (1989). Energy Storage Systems. *Kluwer Academic Publishers*.
- Konuklu, Y. (2008). *Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- Kozak, M., & Kozak, Ş. (2012). Enerji Depolama Yöntemleri. *SDU Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 17–29.
- Lafdi, K., Mesalhy, O., & Elgafy, A. (2008). Graphite Foams Infiltrated with Phase Change Materials as Alternative Materials for Space and Terrestrial Thermal Energy Storage Applications. *Carbon*, 46(1), 159–168.
- Lane, G. A. (1980). Low Temperature Heat Storage with Phase Change Materials. *International Journal of Ambient Energy*, 1(3), 155–168.
- Lane, G. A. (1983). Solar Heat Storage: Latent Heat Materials. In *Journal of Solar Energy Engineering*. CRC Press.
- Li, X., Li, H., Kong, X., & Yang, H. (2021). Characterization And Experimental

- Investigation of Composite Phase Change Materials Based on Aluminum Nitride/Expanded Graphite. *Journal of Energy Storage*, 35(February), 102326.
- Ling, Z., Chen, J., Xu, T., Fang, X., Gao, X., & Zhang, Z. (2015). Thermal Conductivity of an Organic Phase Change Material/Expanded Graphite Composite across the Phase Change Temperature Range and a Novel Thermal Conductivity Model. *Energy Conversion and Management*, 102, 202–208.
- Lu, B., Zhang, Y., Sun, D., & Jing, X. (2021). Experimental Investigation on Thermal Properties of Paraffin/Expanded Graphite Composite Material for Low Temperature Thermal Energy Storage. *Renewable Energy*, 178, 669–678.
- Lu, B., Zhang, Y., Sun, D., Yuan, Z., & Yang, S. (2021). Experimental Investigation on Thermal Behavior of Paraffin in a Vertical Shell and Spiral Fin Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit. *Applied Thermal Engineering*, 187, 116575.
- Magendran, S. S., Khan, F. S. A., Mubarak, N. M., Vaka, M., Walvekar, R., Khalid, M., Abdullah, E. C., Nizamuddin, S., & Karri, R. R. (2019). Synthesis of Organic Phase Change Materials (PCM) for Energy Storage Applications: A Review. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 20, 100399.
- Mallow, A., Abdelaziz, O., & Graham, S. (2016). Thermal Charging Study of Compressed Expanded Natural Graphite/Phase Change Material Composites. *Carbon*, 109, 495–504.
- Mazman, M. (2006). Gizli Isı Depolaması ve Uygulamaları. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi, Adana.
- Mills, A., Farid, M., Selman, J. R., & Al-Hallaj, S. (2006). Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials Using a Graphite Matrix. *Applied Thermal Engineering*, 26(14–15), 1652–1661.
- Qureshi, Z. A., Ali, H. M., & Khushnood, S. (2018). Recent Advances on Thermal Conductivity Enhancement of Phase Change Materials for Energy Storage System: A Review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 838–856.
- Sarı, A., Tarhan, S., & Kaygusuz, K. (2005). Enerjiyi Düşük Sıcaklıkta Gizli Isı Olarak Depolayan Kimyasal Maddeler. *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Enerji Yönetimi Sempozyumu*, 371, 357–366.
- 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.
- Sharma, S. D., & Sagara, K. (2005). Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review. *International Journal of Green Energy*, 2(1), 1–56.
- Susantez, Ç., Kahveci, K., & Akyol, E. (2018). Faz D eğıştiren Malzeme İçeren Silindirik Bir Isıl Enerji Deposunda Kanatçık Sayısı , Kalınlığı ve Üniform Olmayan Kanatçık Dağılımının Isıl Enerji Depolama Karakteristiğı Üzerindeki Etkileri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 30(2), 225–237.

- Taşkıran, A. (2013). Nano Boyutlu Parçacık Katkılı Yeni Nesil Faz Değiştiren Maddelerin Deneysel Olarak İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Temel, Ü. N., & Erdiş, E. (2020). Farklı Erime Sıcaklıklarına Sahip Grafen Nanoparçacık Katkılı Faz Değiştiren Madde Kompozitlerinin Isıl Cevaplarının Araştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 504–517.
- Wang, Q., Zhou, D., Chen, Y., Eames, P., & Wu, Z. (2020). Characterization and Effects of Thermal Cycling on the Properties of Paraffin/Expanded Graphite Composites. *Renewable Energy*, 147, 1131–1138.
- Wang, X., Lu, E., Lin, W., & Wang, C. (2000). Micromechanism of Heat Storage in a Binary System of Two Kinds of Polyalcohols as a Solid-Solid Phase Change Material. *Energy Conversion and Management*, 41(2), 135–144.
- Wołoszyn, J., Szopa, K., & Czerwiński, G. (2021). Enhanced Heat Transfer in a PCM Shell-And-Tube Thermal Energy Storage System. *Applied Thermal Engineering*, 196, 117332.
- Wu, S., Zhu, D., Zhang, X., & Huang, J. (2010). Preparation and Melting/Freezing Characteristics of Cu/Paraffin Nanofluid as Phase-Change Material (PCM). *Energy and Fuels*, 24(3), 1894–1898.
- Yağcı, O. K. (2017). *Düşey Silindirik Bir Halka Aralık İçerisinde Enerji Depolama: Kanatçık Etkisi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Yazıcı, M. Y., Sağlam, M., Aydın, O., & Avcı, M. (2021). Thermal Energy Storage Performance of PCM/Graphite Matrix Composite in a Tube-in-Shell Geometry. *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 100915.
- Yazıcı, M. Y. (2013). *Kaçık Eksenli Yatay Silindirik Bir Halka İçerisinde Parafınle Gizli Depolama*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Yılmaz, S. (2008). *Soğutma Uygulamaları için Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama*. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Yuan, M., Ren, Y., Xu, C., Ye, F., & Du, X. (2019). Characterization and Stability Study of a Form-Stable Erythritol/Expanded Graphite Composite Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Renewable Energy*, 136, 211–222.
- Zhong, Y., Li, S., Wei, X., Liu, Z., Guo, Q., Shi, J., & Liu, L. (2010). Heat Transfer Enhancement of Paraffin Wax Using Compressed Expanded Natural Graphite for Thermal Energy Storage. *Carbon*, 48(1), 300–304.
- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (Pcms) in Building Applications. *Applied Energy*, 92, 593–605.

ÖZGEÇMİŞ

Esen ÇEBOĞLU, İlköğrenimini 11 Mart İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2014 yılında Rize Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2014-2015 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2019 yılında bölüm birinciliği unvanı alarak mezun oldu. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2023 yılı başlangıcından itibaren TÜBİTAK SAGE kurumunda Isıl Yönetim Sistemleri Birimi'nde Araştırmacı olarak çalışmaktadır. Orta derecede İngilizce bilmektedir. Bekardır.