



**T. C.
SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÖZENEKLİ FONKSİYONEL KOMPOZİT MALZEMELERİN
YAPI BİLEŞENLERİNDEKİ TERMAL ENERJİ DEPOLAMA
UYGULAMALARININ İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Bedrettin COŞKUN
(20179216002)**

**Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ümit Nazlı TEMEL**

**SİVAS
TEMMUZ 2024**

Bedrettin COŞKUN'un hazırladığı ve “**GÖZENEKLİ FONKSİYONEL KOMPOZİT MALZEMELERİN YAPI BİLEŞENLERİNDEKİ TERMAL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARININ İNCELENMESİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	Doç. Dr. Ümit Nazlı TEMEL Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Ertan BUYRUK Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Levent Cenk KUMRUOĞLU İskenderun Teknik Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Ferhat KILINÇ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan YILDIZ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi	

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

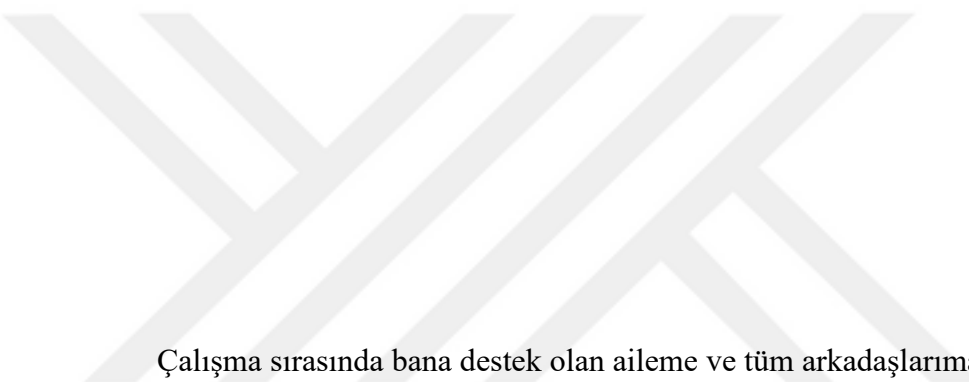
Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Bedrettin COŞKUN, 2024



Çalışma sırasında bana destek olan aileme ve tüm arkadaşlarıma...

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

28.06.2024

Bedrettin COŞKUN

TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Ümit NAZLI TEMEL' e çok teşekkür ederim.

Değerli hocalarım Prof. Dr. Ertan BUYRUK, Prof. Dr. Levent Cenk KUMRUOĞLU, Doç. Dr. Ferhat KILINÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan YILDIZ' a çok teşekkür ederim.



ÖZET

GÖZENEKLİ FONKSİYONEL KOMPOZİT MALZEMELERİN YAPI BİLEŞENLERİNDEKİ TERMAL ENERJİ DEPOLAMA UYGULAMALARININ İNCELENMESİ

Bedrettin COŞKUN

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ümit NAZLI TEMEL

2024, 120+xvii sayfa

Bu tez kapsamında, biyokömür gözeneklerine mikrokapsülleme yoluyla faz değiştiren malzeme hapsedilmiş kompozit malzemelerin bina bileşenlerinde kullanımının konfor koşulları açısından performans iyileştirmeleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle doğadan elde edilen fındık kabuğu, kozalak, kavak talaşı gibi farklı organik malzemeler piroliz yöntemiyle biyokömür haline getirilerek gözeneklilik açısından etkinlikleri iyileştirilmiştir. En uygun biyokömür malzemesinin tayin edilmesi için gözeneklerine faz değiştiren malzeme (FDM) emdirilmiş kompozitlerin gizli ısıları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda kavak talaşının en uygun temel malzeme olduğu belirlenmiştir. Daha sonraki aşamada piroliz sürecini etkileyen maksimum sıcaklık, ısıtma hızı ve bekletme süreleri gibi parametrelerin kavak talaşı biyokömürünün daha da iyileştirilmesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen FDM/kavak talaşı biyokömürlerinin gizli ısılarının karşılaştırılmasından 300°C maksimum sıcaklığının, 10°C/dakika ısıtma hızının ve 1 saat bekleme süresinin en uygun piroliz koşulları olduğu belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada bu koşullarda üretilen kavak talaşı/FDM kompoziti %40 kütle oranında çimento harcı ile karıştırılmıştır. Elde edilen özel harç kullanılarak basitleştirilmiş bina modelleri oluşturulmuştur. Karşılaştırma açısından bina modelleri sadece çimento, biyokömür/çimento ve (FDM/Biyokömür)/Çimento kullanılarak üç farklı biçimde hazırlanmıştır. Oluşturulan bina modelleri kullanılarak ısıtma (şarj) ve soğutma (deşarj) performans testleri 33°C, 43°C ve 53°C dış ortam sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Şarj performansı açısından 33 °C dış ortam koşulunda FDM'nin

bina duvar bileşeni içerisinde tam olarak erimediği için termal enerji depolama kabiliyetini ortaya koyamadığı görülmüştür. Bununla birlikte çimentoya kıyasla (FDM/kavak talaşı biyokömürü)/(çimento) kompozit duvarının; 43 °C dış ortam koşulunda iç ortam sıcaklığını 1.1 °C ve 53 °C dış ortam koşullarında iç ortam sıcaklığını 1.8 °C düşürdüğü belirlenmiştir. Benzer biçimde (FDM/kavak talaşı biyokömürü)/(çimento) kompozit duvarının sadece çimento kullanılan duvar modeline kıyasla 43°C ve 53°C dış ortam koşullarında deşarj performanslarını sırasıyla %3.8 ve %17.24 iyileştirebildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: FDM, Enerji Depolama Birimi, Gizli Isı, Biyokömür, Bina



ABSTRACT

EXAMINATION OF THERMAL ENERGY STORAGE APPLICATIONS IN STRUCTURAL COMPONENTS OF POROUS FUNCTIONAL COMPOSITE MATERIALS

Bedrettin COŞKUN

PhD Thesis

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Ümit NAZLI TEMEL

2024, 120+xvii pages

Within the scope of this thesis, the effects of the use of composite materials with phase change material entrapped in biochar pores by microencapsulation on performance improvements in terms of comfort conditions have been investigated. For this purpose, firstly, different organic materials such as hazelnut shells, cones, poplar sawdust gathered from nature were transformed into biochar by pyrolysis method and their efficiency in terms of porosity was improved. To determine the most suitable biochar material, the latent heats of composites impregnated with phase change material (PCM) were compared. As a result of this comparison, it was determined that poplar sawdust was the most suitable base material. In the next stage, the effects of parameters such as maximum temperature, heating rate and holding duration affecting the pyrolysis process on the further improvement of poplar sawdust biochar were examined. From the comparison of latent heats of the obtained PCM/poplar sawdust biochars, it was found that 300 °C maximum temperature, 10 °C/minute heating rate and 1 hour holding duration were the most suitable pyrolysis conditions. In the next stage, the poplar sawdust/PCM composite produced under these conditions was mixed with cement mortar at a mass ratio of 40%. Simplified building models were produced using the special mortar obtained. For comparison, building models were prepared in three different categories using only cement, biochar/cement and (FDM/Biochar)/Cement. Heating (charging) and cooling (discharging) performance tests were carried out at 33 °C, 43 °C and 53 °C outdoor temperatures using the different building models. In terms of charging performance, it was observed that FDM could not demonstrate its thermal energy storage capability as it did not completely melt in the building wall component under 33 °C outdoor ambient

conditions. In addition, compared to cement, (PCM/poplar sawdust biochar)/(cement) composite wall; It was determined that it reduced the indoor temperature by 1.1 °C in 43 °C outdoor conditions and by 1.8 °C in 53 °C outdoor conditions. Similarly, it was observed that the (PCM/poplar sawdust biochar)/(cement) composite wall could improve the discharge performances by 3.8 % and 17.24 %, respectively, at 43 °C and 53 °C outdoor conditions, compared to the cement-only wall model.

Key Words: PCM, Energy Storage Unit, Latent Heat , Biochar, Building.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER DİZİNİ	xvii
KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOD.....	24
2.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler	24
2.2 Deneysel Uygulama	24
2.2.1 Vakum Emdirme	26
2.2.2 Biyokömür üretimi	29
2.3 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Ölçümleri	33
2.4 Termal iletkenlik ölçümleri.....	36
2.5 Sem analizleri.....	40
2.6 Bina Modelinde Yapı Bileşeni Olarak RT-28/Biyokömür Kompozitinin Kullanılması	41
2.7 Performans ölçümleri için gerekli deneysel düzeneğin oluşturulması.....	45
2.8 Termal kamera ölçümleri	47
2.9 Belirsizlik Analizi	48
3. TERMAL KARAKTERİZASYON SONUÇLARI.....	49
3.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Ölçüm Sonuçları	49
3.1.1 RT-28/organik malzeme kompozitlerinin DTK ölçüm sonuçları	49
3.1.2 RT-28/biyokömür malzeme kompozitlerinin DTK ölçüm sonuçları.....	52
3.1.3 Kavak Talaşı Biyokömürünün Farklı Piroлиз Koşullarında İyileştirilmesine Yönelik DTK Ölçüm Sonuçları	56
3.1.3.1 Farklı Sıcaklık Koşullarında Elde Edilen RT-28/Biyokömür Kompozitlerinin DTK Ölçüm Sonuçları.....	56
3.1.3.2 Farklı Isıtma Hızı Altında Elde Edilen RT-28/Biyokömür Kompozitlerinin DTK Ölçüm Sonuçları.....	59
3.1.3.3 Farklı Bekletme Süresi Koşullarında Elde Edilen RT-28/Biyokömür Kompozitlerinin DTK Ölçüm Sonuçları.....	62
3.2. Sızdırmazlık Test Sonuçları	65
3.3. Sem Analizleri.....	67
3.4 Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçları	78
4. TERMAL PERFORMANS TEST SONUÇLARI.....	80
4.1. 33°C Ortam Sıcaklığı için Performans Ölçümleri.....	80
4.1.1 Isıtma (şarj) performans ölçümleri.....	80
4.2. 43°C Ortam Sıcaklığı için Performans Ölçümleri.....	88
4.2.1 Isıtma (şarj) performans ölçümleri.....	88
4.3. 53 °C Ortam Sıcaklığı için Performans Ölçümleri.....	96
4.3.1 Isıtma (Şarj) Performans Ölçümleri	96
4.3.2 Soğutma (deşarj) performans ölçümleri.....	100
4.4 Termal Kamera Ölçümleri	103
5. SONUÇLAR	112
KAYNAKLAR	117

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Öğütme ve eleme işlemi gerçekleştirilerek 600 µm boyutuna getirilmiş farklı organik malzemeler	25
Şekil 2.2 Fındık iç kabuğu ve fındık dış kabuğunun yoğunluk farkından kaynaklı ayrıştırılma işlemi.....	26
Şekil 2.3 Vakum emdirme deney düzeneği	26
Şekil 2.4 RT-28 emdirilmiş organik malzemeler (a), RT-28 in gözenekli organik malzemeye emdirilmesi ve yüzeye yapışmış organik malzemeden arındırılması (b), RT-28 emdirilmiş ve sızdırmazlık testi gerçekleştirilmiş organik malzemeler (c)...	28
Şekil 2.5 Piroliz için kullanılan tüp fırın ve elde edilen biyokömür.....	30
Şekil 2.6 RT-28/ kavak talaşı biyokömür kompozitindeki faz değiştiren malzemeyi biyokömür yüzeyinden arındırma işlemi	31
Şekil 2.7 Faz değiştiren malzemeyi kompozit yüzeyinden arındırma işleminde kullanılan filtre kâğıtlarının dönüşümü.....	31
Şekil 2.8 Kavak biyokömürü - RT-28/ kavak talaşı biyokömür kompoziti.....	32
Şekil 2.9 RT-28/biyokömür kompoziti son hali	32
Şekil 2.10 DTK-60 cihazının şematik yapısı	34
Şekil 2.11 Tipik bir DTK eğrisi	35
Şekil 2.12 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK)	35
Şekil 2.13 Numune hazırlanması de DTK cihazına yerleştirilmesi.....	36
Şekil 2.14 Hotdisk TPS 3500 Termal iletkenlik ölçüm cihazı.....	37
Şekil 2.15 Termal iletkenlik ölçümü için hazırlanacak kompozitin numune kalıbı ..	37
Şekil 2.16 Termal iletkenlik ölçüm numuneleri	38
Şekil 2.17. Numunelerin Hotdisk TPS 3500 cihazında ölçüme hazırlanması	39
Şekil 2.18. Termal iletkenlik ölçüm aşamaları	40
Şekil 2.19 SEM analizi aşamaları	41
Şekil 2.20 XPS ısı yalıtım köpüğünün CNC ile kesme işlemi.....	42
Şekil 2.21 Bina modeli.....	42
Şekil 2.22 Çimento - RT-28/ biyokömür kompoziti ve su karıştırılarak oluşturulan harç	43
Şekil 2.23 Kompozit duvar hazırlama aşamaları	44

Şekil 2.24 Duvar bileşenleri numuneleri	44
Şekil 2.25 Deneyisel düzenek	45
Şekil 2.26 Isıtıcı tabla ve kontrol ünitesi	46
Şekil 2.27 Bina modelinde ısı çift yerleşkeleri	46
Şekil 2.28 Deneyisel ölçümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan termal kamera	47
Şekil 3.1 RT-28 için endoterm eğrisi	49
Şekil 3.2 Çeşitli organik malzemelerin endoterm eğrileri	51
Şekil 3.3 Çeşitli biyokömür malzemelerin endoterm eğrileri	53
Şekil 3.4 Farklı sıcaklıklarda RT-28/Kavak biyokömür malzemesinin endoterm eğrileri	57
Şekil 3.5 Farklı ısıtma hızlarında üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilerek elde edilen kompozitlerin endoterm eğrileri	60
Şekil 3.6. Farklı bekleme süreleri ile üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilmesi ile oluşturulan kompozitlerin endoterm eğrileri	63
Şekil 3.7 Sızdırmazlık test sonuçları	66
Şekil 3.8 300 °C maksimum sıcaklık, 10 °C ısıtma hızı ve 1 saat bekleme süresi ile üretilmiş biyokömürlere RT-28/ emdirilerek elde edilen biyokömür kompozitleri... ..	66
Şekil 3.9 Çeşitli organik malzemelerin SEM görüntüleri	69
Şekil 3.10 Kavak talaşı ve RT-28 emdirilmiş kavak talaşı	70
Şekil 3.11 Farklı organik malzemelerin biyokömür haline getirilmiş hallerinin SEM görüntüleri	71
Şekil 3.12 Kavak talaşı biyokömürü (13) ve RT-28 emdirilmiş kavak talaşı biyokömürü (14) (700 °C- 10°C/dk- 1 saat bekleme süresi)	73
Şekil 3.13 Kavak biyokömürünün farklı sıcaklıklardaki piroliz görüntüleri	74
Şekil 3.14 Kavak Biyokömürü ve RT-28 emdirilmiş kavak biyokömürü (300 °C- 10°C/dk- 1 saat bekleme süresi)	75
Şekil 3.15 Farklı ısıtma hızlarında piroliz edilmiş kavak biyokömürleri	76
Şekil 3.16 Farklı bekleme sürelerinde piroliz edilmiş kavak biyokömürleri	77
Şekil 3.17 Kavak Biyokömürü ve RT-28 emdirilmiş kavak biyokömürü (300 °C - 10°C/dk - 3 saat bekleme süresi)	78
Şekil 3.18 Üretilen kompozitlerin termal iletkenlik değerleri	79
Şekil 4.1 Dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (33°C)	80
Şekil 4.2 Duvar modellerinin arayüz fotoğrafları; (a)-çimento, (b)-biyokömür/çimento, (c)-(RT-28/biyokömür)/çimento	81

Şekil 4.3 24°C’de ölçülen ısı iletkenlik ve özgül ısı değerleri.....	82
Şekil 4.4 İç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (33°C).....	83
Şekil 4.5 İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi (33°C)	84
Şekil 4.6 Dış duvar soğuma eğrileri (33°C)	86
Şekil 4.7 İç duvar soğuma eğrileri (33°C)	87
Şekil 4.8 İç ortam soğuma eğrileri (33°C)	88
Şekil 4.9 Dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (43°C)	89
Şekil 4.10 İç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (43°C).....	90
Şekil 4.11 İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi (43°C)	92
Şekil 4.12 Dış duvar soğuma eğrileri (43°C)	93
Şekil 4.13 İç duvar soğuma eğrileri (43°C)	94
Şekil 4.14 İç ortam soğuma eğrileri (43 °C)	95
Şekil 4.15 Dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (53 °C)	97
Şekil 4.16 İç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (53°C).....	98
Şekil 4.17 İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi (53°C)	99
Şekil 4.18 Dış duvar soğuma eğrileri (53°C)	100
Şekil 4.19 İç duvar soğuma eğrileri (53°C)	101
Şekil 4.20. İç ortam soğuma eğrileri (53°C)	103
Şekil 4.21 53 °C dış ortam koşulunda çimento duvar modelinin eş sıcaklık konturları ve histogramları.....	105
Şekil 4.22 53 °C dış ortam koşulunda biyokömür/çimento duvar modelinin eş sıcaklık konturları ve histogramları.....	107
Şekil 4.23 53 °C dış ortam koşulunda (RT-28/biyokömür)/(çimento) çimento duvar modelinin eş sıcaklık konturları ve histogramları.....	109

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Duvar modeli kompozitlerinin ağırlıkça karışım oranları	43
Çizelge 2.2 Belirsizlik oranı	48
Çizelge 3.1 RT-28 DTK özellikleri	50
Çizelge 3.2 Çeşitli organik malzemelerin DTK sonuçları	52
Çizelge 3.3 Çeşitli biyokömür malzemelerin DTK sonuçları.....	54
Çizelge 3.4 Biyokömür haline getirilen organik malzemelerin yüzdelik gizli ısı iyileştirmeleri.....	55
Çizelge 3.5 Farklı sıcaklık koşullarında piroliz edilen biyokömürlere RT-28 emdirilmesiyle üretilen biyokömür kompozitlerinin DTK sonuçları.....	58
Çizelge 3.6 Maksimum sıcaklığa bağlı olarak kompozit gizli ısılarında elde edilen iyileştirmeler	59
Çizelge 3.7 Farklı ısıtma hızları uygulanarak üretilen biyokömürlere RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompozitlerinin DTK sonuçları.....	61
Çizelge 3.8 Farklı ısıtma hızlarında üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilerek elde edilen kompozitlerin yüzdelik gizli ısı iyileştirmeleri.....	62
Çizelge 3.9 Farklı bekleme süreleri ile elde edilen biyokömürlere RT-28 emdirilmesiyle üretilen kompozitlerin DTK sonuçları	64
Çizelge 3.10 Farklı bekleme süresi koşullarında üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilerek elde edilen kompozitlerin yüzdelik gizli ısı iyileştirmeleri.....	64
Çizelge 3.11 SEM analizleri yapılmış malzemelerin tanımlanması	67
Çizelge 3.12 Üretilen kompozitlerin termal iletkenlik sonuçları.....	79
Çizelge 4.1 Ortalama Yüzey Sıcaklıkları.....	110
Çizelge 4.2 Duvar modellerinde homojenlik değerlerine göre standart sapma yüzdeleri	110

SİMGELER DİZİNİ

T_b : Isıtıcı blok sıcaklığı, °C

T_r : Referans numune sıcaklığı, °C

T_s : Malzeme numune sıcaklığı, °C

T_{eb} : Erime başlangıç sıcaklığı, °C

T_{es} : Erime sonlanma sıcaklığı, °C

T_{ep} : Erime pik sıcaklığı, °C

H_e : Erime gizli ısı değeri, J/g



KISALTMALAR DİZİNİ

- FDM** : Faz Değiştiren Malzeme
RT-28 : Parafin esaslı faz değiştiren malzeme
LHSBC : Gizli ısı depolamaya yarayan biyokompozit
DTK : Diferansiyel taramalı kalorimetre
TGA : Termogravimetrik analiz
FTIR : Fourier dönüşümü ile kızılötesi spektroskopisi
SEM : Taramalı elektron mikroskobu
BET : Brunauer–Emmett–Teller
XRD : X-ışını difraksiyonu
TGA : termogravimetrik analiz
TES : Termal enerji depolama
XPS : X-Işıını fotoelektron spektroskopisi
DFT : Yoğunluk fonksiyonel teorisi
EDS : Enerji dağılımı spektroskopisi
MIP : civa enjeksiyon porozimetre
CNC : Bilgisayar Sayısal Kontrol
XPS : Ekstrüde polisitren köpük

1. GİRİŞ

Enerji verimliliği ve enerji tasarrufu çevre üzerindeki olumsuz etkiler ve dışa bağımlılık gibi nedenlerden dolayı günümüzün en önemli konuları arasındadır (Konuklu ve Paksoy, 2011). Enerji tüketimi, ekonomik gelişmeler doğrultusunda dünyadaki sosyal ve ekonomik hayatın devamlılığına bağlı olarak her geçen gün artmaktadır. Artan enerji tüketimine bağlı olarak iklim değişikliği ve hava kirliliği konularında giderek endişe duyulmaya başlanmıştır. Kömür, doğalgaz, petrol gibi hidrokarbon enerji kaynakları kullanılarak atmosferde meydana getirilen hava kirliliğini önlemek ya da bu kirliliğin etkilerini azaltmak amacıyla uluslararası işbirlikleri oluşturulmuştur (Demir,2006). Bu doğrultuda enerji tüketiminin azaltılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek sera gazı emisyonlarının atmosfer üzerindeki olumsuz etkilerinin en aza indirgenmesi hususunda yapılan çalışmalar giderek daha da önem arz etmektedir (Konuklu ve Paksoy, 2011; Demir,2006). Fosil yakıtların sınırlı potansiyeli, küresel ısınma ve çevresel sorunlar nedeniyle birçok araştırmacı, fosil yakıtlardan kaynaklanan sorunlara çözüm arayışına devam etmekle birlikte öncelikle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi önermişlerdir (Sharma ve Dewangan, 2022).

Yenilenebilir enerji kaynakları, çoğunlukla çevre dostu özellikleri ve sürdürülebilir enerji sağlama potansiyelleri nedeniyle olumlu bir perspektiften değerlendirilebilirler. Ancak, her enerji kaynağının avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli dezavantajları atmosfer koşullarına bağımlılığı ve kesikli karakterde olmasıdır. Örneğin rüzgâr her zaman esmez, güneş her zaman yüzünü göstermez. Bu durum, enerji üretiminin dalgalanmasına ve değişken olmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte bu tip enerji kaynaklarının arz ve talebi arasında da bir zaman farkı bulunmaktadır. Örneğin gündüz güneşten dönüştürülen enerjiye ihtiyaç daha çok gece saatlerinde olmaktadır. Buna ilave olarak ülkelerin dışa bağımlılığını önlemek için enerji arzlarını çeşitlendirmelerinin bir gereği olarak da yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeleri bir zorunluluktur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından etkin faydalanma ise enerjiyi depolamayı gerektirmektedir.

Çeşitli enerji depolama teknikleri arasında termal enerji depolama; enerji yoğunluğu, enerji kapasitesi, çevrim sayısı, verimlik, ekonomiklik ve kolay uygulanabilirlik gibi avantajlarından dolayı çok fazla tercih edilmektedir. Termal enerji depolama; duyulur ısı, gizli ısı ve termo-kimyasal enerji depolama olarak üç kategoriye ayrılmaktadır. Duyulur ısı tekniği, bir katı veya sıvı depolama ortamının sıcaklığının değiştirilmesi suretiyle düşük veya yüksek sıcaklıktaki ısı enerjinin ilgili ortam içerisinde depolanması esasına dayanmaktadır. Enerji depolama maliyeti (₺/kWh) düşük olmasına rağmen kapasitesinin (kWh/ton) düşük olması yaygın kullanımının önündeki en önemli etkindir. Termo-kimyasal enerji depolama tekniği ise tersinir endotermik veya ekzotermik reaksiyonlar yardımıyla yüksek miktardaki ısı enerjinin uzun süreli bekleme gerektiren ısı enerji depolama uygulamalarında kullanılmasıdır. Yüksek enerji depolama yoğunluğuna (Wh/L) sahip olma avantajına rağmen yüksek maliyeti dolayısıyla yaygınlaşmamıştır. Bir diğer termal enerji depolama yöntemi olan gizli ısı tekniğinde ise katı-sıvı, sıvı-gaz gibi faz değişim süreçlerinde açığa çıkan faz değişim enerjisinden yararlanılarak enerji depolanmaktadır. Enerji yoğunluğu (Wh/L), depolama kapasitesi (kWh/ton), maliyet (₺ /kWh) gibi avantajlarından dolayı en yaygın kullanıma sahip yöntem gizli ısı termal enerji depolama yöntemidir.

Bu açıdan bakıldığında gizli ısı termal enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğasıyla mücadele etmek, enerji talebini dengelemek ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla kullanılabilecek önemli teknik olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem bir yenilenebilir enerji gibi bir dış kaynaktan alınan enerjinin faz değişim işlemi sırasında kullanılmak suretiyle depolanması (şarj), ihtiyaç halinde ise tersine işlem ile geri salınarak (deşarj) kullanılması esasına dayanmaktadır. Gizli ısı enerji depolama yöntemi, güneş enerjisi, endüstriyel süreçler veya elektrik üretimi gibi çeşitli uygulamalarda enerji depolama ihtiyacını karşılamak için kullanılabilmektedir. Son yıllarda yüksek gizli enerji depolama kabiliyetine sahip faz değiştiren malzemeler (FDM), termal enerji depolama uygulamalarında en çok tercih edilen malzemeler olarak yaygınlaşmaya başlamıştır (Chen vd., 2019).

FDM'ler faz değişim proseslerine göre katıdan katıya, katıdan-sıvıya ve sıvıdan-gaza olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadırlar. Katıdan-katıya faz değiştiren malzemelerde alınan enerji malzemenin kristal yapısında değişime neden olmak suretiyle depolanmaktadır. Bununla birlikte katıdan-sıvıya ve sıvıdan-gaza FDM'lere kıyasla görece olarak düşük gizli enerjiye sahip olmaları yaygın kullanımları önündeki

en önemli dezavantajdır. Sıvı FDM'lerde gaz fazına geçmek için büyük miktarda enerjiye gereksinim duymaktadırlar. Ancak gaz fazına geçiş ile birlikte ortaya çıkan hacim artışı, özellikle yer kısıtlamasının olduğu sistemlerde önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Sıkıştırılmış sistemlerde ise oluşan yüksek buhar basıncı önemli bir dezavantaj teşkil etmektedir. Yukarıda bahsedilen dezavantajlar sıvıdan-gaza FDM'lerin çok fazla tercih edilmeme sebeplerini oluşturmaktadırlar. Katıdan-sıvıya FDM'ler ise enerji depolama işlemi sırasında çok fazla hacim değişimi göstermemesine bağlı olarak en çok tercih edilen malzemelerdir.

Katıdan-sıvıya faz değişim malzemeleri, organik, inorganik ve ötektik olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılmaktadır. FDM'lerin inorganik türleri, sıklıkla metaller, tuzlar veya metal alaşımları gibi inorganik bileşiklerden oluşmaktadırlar. İnorganik FDM'lerin yüksek erime ısısı ve yüksek ısı iletkenlik değerine sahip olmaları önemli avantajlarından. Buna karşın birçok malzemeye karşı korozyon özelliği göstermeleri kullanımlarının önündeki en önemli engeldir. Ötektik FDM'ler ise iki veya daha fazla FDM'nin karışımından oluşan ve bileşen FDM'lerden daha düşük sıcaklıkta erime sıcaklığına sahip bir karışımlardır. Ancak ötektik FDM'lerin maliyetleri ve kolay elde edilememeleri önemli dezavantajlarıdır. Özellikle karışımın kararlılığını sağlama ve bileşenlerin ayrışmasını önleme zorlukları ek maliyet gerektirmektedir. Organik FDM'ler; korozyon olmaması, termal ve kimyasal kararlılıkları, kristallenme sorunu olmaması, zehirleyici etki içermemesi, kolay elde edilebilirlik ve ekonomik olması gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Uygulamalarda en çok tercih edilen organik FDM'ler parafinler ve yağ asitleri gibi karbon temelli bileşiklerdir. Bu malzemeler genellikle düşük erime noktaları ve belirgin faz değişim özellikleri sergilemektedir.

Organik FDM'ler, yüksek erime entalpisine sahip olan ve belirli bir sıcaklık aralığında katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçiş yapabilen ısı enerjisi depolama malzemeleri olarak tanımlanmaktadır (Sarier ve Onder, 2012). Organik FDM'ler; enerji uygulamalarında, faz değişim süreciyle bünyesine enerji depolanması ve daha sonra kullanılmak üzere bu enerjinin tersi işlemle serbest bırakılması prensibine dayalı olarak kullanılmaktadırlar. Bu prensibe bağlı olarak organik FDM'ler direkt termal enerji depolamasının yanı sıra ısıtma/soğutma, termal koruma, enerji sistemlerinin verimliliklerini artırma gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilmektedirler. Örneğin katıdan-sıvı faz değişim malzemeleri, ev tipi buzdolaplarında enerji tasarrufu

sağlamak amacıyla kullanıldığı gibi, binaların pasif ısıtılması ve soğutulmasında, iklimlendirme sistemlerinde, güneş enerjisi sistemlerinde ve atık ısı geri kazanım sistemlerinde de kullanılmaktadır (Cheng vd., 2011; Wang vd., 2011; Yao vd., 2018; Cheng vd., 2016; Kabeel vd., 2016; Mahfuz vd., 2014; Johansson ve Söderström, 2014; Kaizawa vd., 2008). Ayrıca, elektronik cihazların batarya paketlerinde ve tıp alanında organ nakli sırasında organın biyolojik aktivitelerini sürdürebilmesi için termal koruma sağlamak amacıyla da kullanılmaktadır (Muratore vd., 2012; Mondieig vd., 2003; Ohkawara vd., 2012).

Uygulamalarda katıdan-sıvıya FDM'lerin sıvı kaybını önlemek için dış çevresinden izole edilmesi gerekmektedir. Bu işlem kapsülleme olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda kapsülün yüzeyi, hem bir ısı transfer yüzeyi hem de mekanik dayanım sağlayan yapı elamanı olarak görev üstlenmektedir. FDM'lerin kapsül içerisine alınması, makrokapsülleme ve mikrokapsülleme şeklinde iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Makrokapsülleme FDM'lerin küp, panel, kese gibi birkaç mm'den birkaç litreye kadar değişen boyutlardaki bir kap içerisinde depolanmasıdır. Mikrokapsülleme ise FDM'lerin 1 μ m'den 1mm'ye kadar değişen boyutlardaki hacimler içerisine hapsedilmesi olarak bilinmektedir.

Katıdan-sıvıya organik FDM'lerin bir diğer uygulama alanı ise bina bileşenlerinde kullanılmasıdır. FDM kullanımı esasına dayalı olarak binalarda pasif ısıtma ve soğutma suretiyle enerji tasarrufu sağlanarak ülke ekonomisine katkıda bulunulabilir (Wang vd., 2018; Yao vd., 2018). Bu bağlamda kışın yapı bileşenlerinden olan ısı kaybının FDM bünyesinde tutulması ve iç ortam sıcaklığının düşmesi durumunda tekrar iç ortama döndürülmesiyle ısıtma yükü, yazın ise dışarıdan olan ısı kazancının FDM bünyesinde tutulması ve dış ortam sıcaklığının düşmesiyle tekrar dış ortama döndürülmesiyle soğutma yükü azaltılabilir. Bununla birlikte gerek sıcak iklim koşullarında gerekse de soğuk iklim koşullarında iç ortam sıcaklıklarının konfor şartlarında daha uzun süre dengede tutulması da sağlanabilir.

Sıva bileşeninde FDM kullanımı; çimento, alçı, ponza taşı gibi mikro gözenekli yapı bileşenlerinin gözenekleri içerisine FDM emdirilmesi suretiyle gerçekleştirilebilmektedir. Esasen bu işlem yukarıda bahsedilen mikrokapsülleme işleminin özüdür ve maddenin içerisine kapsülleme için kullanılan özel bir tekniktir.

FDM kompozitlerini oluşturmak için farklı tipte gözenekli katı destekleyici malzemeler de kullanılabilir. Bunlar; küçük gözenekli karbonlar, indirgenmiş grafen oksit kaplanmış poliüretan süngerler, metal süngerler ve gözenekli mineraller olarak sıralanabilir. Ancak pratik uygulamalar, bahsi geçen destekleyici malzemelerin sentezlenme zorlukları, çevresel etkiler ve ekonomik olmama gibi nedenlerle sınırlanmaktadır. Bahsi geçen zorlukların üstesinden gelmek ve yüksek kararlılıkta FDM kompozitleri hazırlamak için biyokömür, uygun bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Biyokömür, yüksek sıcaklıkta biyokütlenin termokimyasal ayrışması yoluyla oluşan katı ve karbonca zengin bir üründür. Düşük ağırlık, yüksek gözenekli ve homojen bir yapıya sahip olması nedeniyle binalarda kullanım potansiyeline sahiptir (Das vd., 2020). Dünyanın büyük tarımsal kültür atığı üretiminden elde edilen bol miktarda hammaddenin kullanımıyla üretilen biyokömürler; fullerener, grafen ve karbon nanotüpler gibi diğer karbon bazlı malzemelere kıyasla her zaman düşük maliyetler gerektirmektedir (Fabiani vd., 2023). Biyokömür, Amazon havzasında siyah toprak olarak keşfedilmesinden bu yana, sahip olduğu bileşenler ve özelliklerinden dolayı tarım, arıtma ve gelişmiş enerji malzemelerinin üretimi gibi birçok uygulama alanı bulmuştur (Atinafu vd., 2021a; Lv vd., 2022; Jeon vd., 2019; Atinafu vd., 2021b; Atinafu vd., 2023). Bu nedenle biyokömürün sürdürülebilir enerji üretiminde ve çevre yönetiminin geliştirilmesinde son derece önemli bir bileşen olabileceğine inanılmaktadır (Chen vd., 2018). Biyokömürün yapısı, özellikleri ve türlerinin çeşitliliği, piroliz parametrelerinin (örneğin, ısıtma sıcaklığı, ısıtma hızı, bekletme süresi) ve aktivasyon koşullarının değiştirilmesi ile sağlanabilmektedir (Fabiani vd., 2023a).

Sonuç olarak enerji verimli binaların tasarımında kullanılacak bina bileşenlerinin oluşturulmasında biyokömür gözeneklerine FDM hapsedilmesiyle elde edilen FDM kompozitlerinin kullanılması, son yılların sıcak konularından birisidir. Bina sıva bileşenlerinde biyokömür/FDM kompoziti kullanımına yönelik literatürde gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Das vd. (2020) gerçekleştirmiş oldukları çalışmalarında, su sümbülü bitkisinden elde ettikleri biyokömür/FDM kompozitini, ısıl iletkenlik ve şekilsel kararlılık açısından değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri kompozitin karakteristik özelliklerini deneysel ve analitik yöntemlerle ayrıntılı bir biçimde incelemişlerdir. FDM/biyokömür kompozitinin ısı depolama kapasitesinin FDM'nin ısı depolama kapasitesinden daha

yüksek olduğu ve termal iletkenliğinin FDM'nin termal iletkenliğinden 13.82 kat daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca malzemenin termal iletkenliğini, alüminyum tozu ekleyerek daha da artırmışlardır. Uygulama sonunda FDM ve biyokömür arasında herhangi bir kimyasal etkileşim olmadığı sonucuna varmışlardır. Çalışma sonucunda üretilen biyokompozitin enerji depolama uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Sürdürülebilir enerji sistemleri ve güneş enerjisi depolama teknolojileri alanında ileriye yönelik çalışmaların yapılabileceği savunulmuştur.

Fabiani vd. (2023a) yaptıkları çalışmada vakum emdirme tekniğini kullanarak farklı faz değiştiren malzemeleri, biyokömür ve lignin içinde stabilize ederek bina uygulamalarında kullanılmak üzere alçı panellere başarılı bir şekilde entegre etmişlerdir. Çalışmada, şekil-kararlı malzemelerin termal enerji depolama kapasitelerini artırarak termal konforlarının iyileştirilmesini ve enerji verimliliklerinin artırılmasını amaçlamışlardır. FDM emdirilen bileşiklerin termal performanslarını ve uzun vadeli kararlılıklarını değerlendirmek için çok ölçekli bir karakterizasyon prosedürü uygulamışlar ve sonuçları analiz etmişlerdir. SEM analizleri sonucunda biyokömürün mezo - gözenekli yapısının FDM'lerin vakum emdirme işlemi için daha uygun olduğunu belirlemişlerdir. FDM emdirilmiş biyokömür kompozitlerinin ısı iletkenliğinin, matris içinde büyük parçacıklar halinde toplanarak büyük hava boşlukları oluşması sebebiyle düşük kaldığını öngörmüşlerdir. Elde edilen kompozitleri daha sonra bina panelleri üretmek için alçı ile karıştırmışlar ve termal izleme yoluyla daha fazla test etmişlerdir. Termal döngü testleri uygulanması sonucunda genel olarak tüm bileşiklerin döngü sırasında FDM kaybetme eğiliminde olduğunu gözlemlemişlerdir. Gelecekteki araştırmaların FDM emilimini ve uzun vadeli kullanımı iyileştirmek için biyokömür üretim tekniğinin optimize edilmesi üzerine olması gerektiğini öngörmüşlerdir. Sonuç olarak termal enerji depolama kapasitesinin artırılarak termal konforun iyileştirilebileceğini göstermişler ve bu tür malzemelerin bina endüstrisinde sadece enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Atinafu vd. (2021a) gerçekleştirdikleri çalışmada FDM'yi kapsüllemek üzere destekleyici malzeme olarak kullanılan biyokömür, aktif karbon, genişletilmiş grafit ve çok duvarlı karbon nanotüp gibi farklı karbon malzemelerini araştırmışlardır. Bu

malzemelerin FDM yükleme oranları ve gizli ısı depolama kapasiteleri açısından performanslarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca FDM'nin bu destek malzemelerinin termal özelliklerine olan etkilerini incelemişlerdir. FDM'nin ısı iletkenliğini artırmak amacıyla karbon tabanlı destek malzemelerinin kullanılabileceğini ve bu sayede FDM'nin ısı performansının daha da geliştirilebileceğini bildirmişlerdir. Kompozitleri, FDM'nin destekleyici malzemeye vakum emdirme tekniğiyle oluşturmuşlar ve üretilen kompozitlerin gizli ısı depolama kapasitelerini karşılaştırmışlardır. Farklı karbon destek malzemelerin, FDM'nin yükleme kapasitesi ve enerji depolama kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kompozit FDM'nin termal performansını belirlemede yüzey işlevselliğinin, moleküler etkileşimlerin ve gözenek yapılarının kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamışlar ve kompozit FDM'nin geliştirilmesi ve tasarlanmasına yönelik önemli bir katkı sağlamışlardır. Kompozit FDM'lerin termal performansını belirlemede yüzey işlevselliğinin, moleküler etkileşimlerin ve gözenek yapılarının kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Lv vd. (2022) yapmış oldukları çalışmada farklı organik FDM'ler kullanılarak (parafin, stearik asit ve polietilen glikol) biyokömür ile kapsüllenmesi sonucu elde edilen kompozit malzemelerin erime sıcaklığı, kapsülleme kapasitesi, ısı iletkenlik artışları gibi termal özelliklerini incelemişlerdir. FDM'leri vakum emdirme yöntemi ile biyokömürlerin gözeneklerine hapsetmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre kompozitlerin termal iletkenliklerinin arttığı ve termal kararlılıklarının iyileştirildiğini gözlemlemişlerdir. Biyokömürün FDM'lerin erime ve katılaşma sıcaklıkları üzerinde farklı etkilere sahip olduğunu belirlemişlerdir. Örneğin, biyokömürün parafinin faz geçiş sıcaklıkları üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını buna karşılık stearik asitin erime ve katılaşma sıcaklıklarını hafifçe düşürdüğünü ve polietilen glikolün ise erime sıcaklığını artırdığını bildirmişlerdir. Bu durumun nedeni olarak biyokömürün yüzey fonksiyonel grupları ile farklı FDM molekülleri arasındaki etkileşimler olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca gözenek doldurma, hidrojen bağı, hidrofobik etkileşim ve diğer potansiyel mekanizmaların organik FDM'lerin termal özellikleri üzerinde etkileri olduğunu belirlemişlerdir. Genel olarak elde edilen biyokömür bazlı kompozit FDM'lerin termal enerji depolama, bina enerji tasarrufu, güneş enerjisi kullanımı ve pil termal yönetimi sistemleri gibi potansiyel uygulamalarda kullanılabileceğini savunmuşlardır.

Jeon vd. (2019a) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada hindistancevizi yağı ve biyokömürün vakum emdirme yöntemi ile bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve gizli ısı depolamaya yarayan biyokompozitin (LHSBC) karakteristik özelliklerini detaylı bir şekilde ele almışlardır. Çalışmada, dört farklı biyokömür örneğinin kimyasal kararlılık, gizli ısı depolama performansı, termal iletkenlik ve termal kararlılık gibi özelliklerini analiz etmişlerdir. LHSBC'lerin termal iletkenliklerini 0.098 W/mK ile 0.030 W/mK arasında ölçülmüşlerdir. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) analizi sonuçlarına göre, CPS550 örneğinin 74.6 J/g değeri ile en yüksek, diğer örneklerin ise (CP200, CP500, CPSS550) 61.9 J/g ile 62.8 J/g arasında gizli ısı depolama kapasitelerine sahip olduklarını ölçmüşlerdir. Termogravimetrik analiz (TGA) sonuçları, tüm LHSBC'lerin termal kararlılığının arttığını göstermiştir. Ayrıca Fourier dönüşümü ile kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizi ile biyokömürler ile hindistancevizi yağı arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığını ortaya koymuşlardır. Üretilen biokompozitlerin (LHSBC) ısı depolama ve yalıtım alanında kullanılabileceği ve çevre dostu bir malzeme olarak çevresel sürdürülebilirliği artırarak enerji tasarrufu sağlama potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Atinafu vd. (2021b) yaptıkları çalışmada FDM' lerin enerji depolama ve dönüşüm süreçlerinde kullanımının önemini vurgulamışlardır. Ancak, FDM' lerin sıvı sızıntısı ve yetersiz ısı transferi gibi sorunları nedeniyle büyük ölçekli uygulamalarının kısıtlandığını belirtmişler ve FDM' leri kapsüllemek için karbon bazlı malzemelerin kullanımını önermişlerdir. Bu nedenle, çalışmada biyokömür ve karbon nanotüpleri kullanarak enerji depolama için kompozit FDM' ler geliştirmişlerdir. Biyokömür, düşük maliyetli ve çevre dostu bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Karbon nanotüpler ise yüksek yüzey alanı ve termal iletkenlik özellikleri nedeniyle FDM' leri kapsüllemek için uygun bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Araştırmacılar; biyokömür, karbon nanotüpler ve biokömür-karbon nanotüp hibrit malzemelerinin özelliklerini incelenmişlerdir. Karbon nanotüplerin biyokömürle entegre edilmesi sonucunda, kompozit FDM' lerin gizli ısı depolama kapasitesinin olumlu bir şekilde etkilendiğini belirtmişler ve karbon nanotüplere sahip olmayan karışımlara göre daha verimli bir performans sergilediği sonucuna varmışlardır. Biyokömür-karbon nanotüp hibrit malzemelerin, biyokömürün gözenek alanını genişlettiğini ve FDM yükleme kapasitesini artırdığını ifade etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre bu çalışmada, ticari olarak temin edilebilen destekleyici malzemeler kullanarak vakum emdirme

yöntemiyle yapısal ve termal olarak kararlı kompozit FDM'ler geliştirmeyi başarmışlardır.

Atinafu vd. (2023) gerçekleştirdikleri çalışmada gıda atıklarından elde edilen biyokarbonu KOH aktivasyonu ile FDM'lerle birleştirip enerji depolama kapasitesini artırarak döngüsel ekonomiyi teşvik etmek amacıyla nasıl kullanılabileceğini incelemişlerdir. FDM'lerin termal özelliklerini, DTK ve TGA analizleri ile belirlemişler ve bu analizler sonucunda yüksek yükleme oranları ve yüksek entalpi değerleri elde ettiklerini ifade etmişlerdir. FDM'leri vakum emdirme yöntemi kullanarak biyokömürlerle bütünleştirmişlerdir. Biyokömürlerin karakterizasyonunu, XRD, TGA, DTK, SEM ve BET analizleri ile yapmışlardır. Ayrıca biyokömürlerin yüzey alanının, mikro/meso gözenek dağılımının ve termal kararlılığının, KOH aktivasyon sıcaklığına bağlı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, KOH aktivasyonu ile hazırlanan biyokömürlerin, FDM'lerin yüksek yükleme oranlarına ve entalpi değerlerine sahip olmasını sağladığını belirtmişlerdir. Biyokömür ve FDM'lerin kullanımı ile binaların enerji tüketimini azaltma ve iç mekan termal konforunu artırma amacıyla etkili bir sürdürülebilir enerji depolama çözümü olarak öne çıkabileceği savunmuşlardır.

Chen vd. (2018) yapmış oldukları çalışmada tarımsal atıklardan elde edilen badem kabuğu biyokömürünün (ASB) kullanım potansiyelini ve polietilen glikol (PEG) ile birleştirilerek şekil kararlı bir kompozit faz değişim malzemesi (PEG/ASB) oluşturulmasını ele almışlardır. Basit piroliz yöntemiyle elde edilen ASB'nin PEG matrisi olarak kullanılması ile yeni bir şekil kararlı kompozit faz değişim malzemesi geliştirmişlerdir. Yaptıkları taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülemeleri ve BET analizleri ile ASB'nin yüksek yüzey alanına ve gözenek hacmine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. SEM görüntüleri, ASB'nin PEG'yi vakum emdirme yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde adsorbe ettiğini göstermiştir. Elde edilen bulgular ile PEG/ASB'nin termal enerji depolama için uygun bir malzeme olduğunu belirlemişler ve PEG içeriğinin artmasıyla gizli ısı depolama kapasitesinin arttığını göstermişlerdir. PEG içeriği %52,6 olan CPCM3'ün ortalama gizli ısı depolama kapasitesini 141,2 J/g olarak ölçmüşlerdir. Ayrıca, PEG/ASB'nin termal iletkenliğinin saf PEG'ye kıyasla yaklaşık 1,6 kat daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada üretilen PEG/ASB şekil kararlı faz değişim malzemesinin yüksek gizli ısı depolama kapasitesi, iyi termal kararlılık ve yüksek termal iletkenlik özelliklerine sahip olduğu

sonucuna varmışlar ve güvenilir bir enerji depolama malzemesi olarak kullanılabileceğini savunmuşlardır.

Fabiani vd. (2023b) yaptıkları çalışmada FDM' lerin biyokömür ve lignin içinde sabitlenmesi ve bunların alçı levhalara entegre edilmesi sürecini ve sonuçlarını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada farklı oranlarda G, GBC, GLG, GLG-RT21, GLG-RT27 ve GLG-RT31 FDM' lerini vakum emdirme tekniği kullanarak biyokömür ve lignin ile birleştirilmesi sonucunda elde edilen kompozitlerin termal iletkenlik, termal difüzyon, hacimsel ısı kapasitesi ve termal kararlılık gibi termal özelliklerini incelemişlerdir. Bu özelliklerin, malzemelerin termal performanslarını etkilediğini ve alçı levha gibi yapı malzemelerinde kullanıldığında termal iletkenlik değerlerinin arttığını ve daha hızlı faz değişimi sağlandığını savunmuşlardır. Ayrıca çalışmada, biyokömür ve lignin içinde sabitlenmiş FDM' lerin termal kararlılıklarını, termal döngüler ve sızıntı testleriyle değerlendirmişlerdir. Biyokömür ve lignin matrislerinin farklı oranları için FDM kaybını incelemişlerdir. Örneğin, BC-RT31, BC-RT27, ve BC-RT21 bileşenleri için sırasıyla 10-100 döngüde %40,00, %46,03, %46,91 oranında FDM kaybı belirlemişlerdir. Ayrıca, LG-RT31, LG-RT27 ve LG-RT21 bileşenleri için 10-100 döngüde sırasıyla %22,22, %47,50, %75,47 oranında FDM kaybı tespit etmişlerdir. Son olarak bu kompozitlerin gerçek bina uygulamalarında kullanılan alçı panellere entegrasyonu sonucunda enerji verimliliği ve termal konfor açısından önemli bir artış sağlayarak biyokütlelere sabitlenmiş FDM' lerin binalarda enerji verimliliğini artırmak için kullanılabilecek etkili bir çözüm olduğunu savunmuşlardır.

Atinafu vd. (2022a) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada biyokütle kaynaklı atıkların KOH ile aktive edilerek biyokömür/biyokarbon üretimi için kullanılmasını ve organik FDM olan dodekanın kapsülasyonu için kullanılan biyokömürün termal enerji depolama alanında umut vadeden uygulamalar için form kararlı kompozit faz değiştiren malzemelerin geliştirilmesindeki potansiyelini araştırmışlardır. Araştırmada, biyokömürün yüksek özgül yüzey alanına ve gözenek boyutu dağılımına sahip olduğunu savunmuşlar ve biyokömür-dodekan kompozit malzemesinin yüksek sızdırmazlık direnci, gelişmiş termal kararlılık, artmış termal iletkenlik ve gelişmiş FDM yükleme kapasitesi sergilediğini belirtmişlerdir. Yapılan deneylerle dodekanın biyokömür içindeki kapsülasyonunun tekrarlayan ısıtma-soğutma döngüleri sırasında yüksek gizli ısı tutma oranı ve artan termal iletkenlik sağladığını ortaya koymuşlardır. Biyokarbonun KOH ile kimyasal aktivasyonunun düşük özgül yüzey alanı ve düşük

porozite nedeniyle FDM'lerin kapsüllenmesi için bir zorluk oluşturduğunu, bunun yanında mikro ve mezoporöz özelliklerinin hazırlanan kompozit FDM'lerin sızıntı direnci yeteneği ve termal iletkenlik performansı dâhil olmak üzere termal özelliklerinin iyileştirebileceğini savunmuşlardır. Araştırma sonuçlarına göre, biyokarbon bazlı kompozit FDM'lerin şekil ve termal kararlılığının, geliştirilmiş kapsülleme kapasitesinin ve mükemmel kimyasal uyumluluğunun yanı sıra, yüksek gizli ısı depolama (102,2 J/g) ve mükemmel termal özelliklerinin (0,416 W/mK) olduğunu belirtmişlerdir. Biyokarbon bazlı kompozit FDM'lerin yüksek kapsülleme kapasitesine sahip olduğu ve dodekanın %67,98'ini kapsüllediği sonucuna varmışlardır. Tekrarlanan ısıtma-soğutma döngüleri sonrasında kompozitin, yüksek gizli ısı tutma (87,7%), benzer başlangıç ve bitiş değişim sıcaklıkları gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu nedenle, biyokarbon bazlı kompozit FDM'lerin sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji geliştirme için önemli bir rol oynayabileceğini ve enerji tasarruflu binalar, atık ısı geri kazanım sistemleri gibi termal yönetim sistemleri için umut verici bir aday olduğunu savunmuşlardır.

Liang vd. (2023) yaptıkları çalışmada biyokömür bazlı kompozit faz değiştiren malzemelerin (FDM) sentezi, özellikleri ve uygulamaları konusunda kapsamlı bir inceleme sunmuşlardır. Bu malzemelerin termal iletkenliğini artırmak, güvenliğini sağlamak ve enerji dönüşüm verimliliğini artırmak için çalışmalar yapmışlardır. Biyokömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri olan termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve adsorpsiyon kapasitesi gibi önemli özellikleri üzerinde durmuşlar ve termal iletkenliğini artırmak için, grafen, karbon nanotüpler ve metal oksitler gibi malzemelerle modifikasyon yapmışlardır. Biokömür bazlı kompozit FDM'lerin sentezi için en yaygın kullanılan yöntemin vakum emdirme yöntemi olduğunu savunmuşlar ve bu yöntemle elde edilen FDM'lerin adsorpsiyon kapasitesinin %73.4'e kadar çıkabildiği belirtmişlerdir. Ayrıca farklı biyokömür kaynakları ve parafin-stearik asit gibi farklı FDM malzemelerinin kullanımı üzerine odaklanmışlardır. Kompozit FDM'lerin uygulandığı binalarda, iç sıcaklık dalgalanmasının %1.5 ile %2.5 arasında azaldığını ve enerji tasarrufunun %10 ile %30 arasında arttığını savunmuşlardır. Ayrıca biyokömür esaslı kompozit FDM'lerin laboratuvar aşamasında kaldığını ve geliştirilmesi gereken bazı zorluklarının olduğu belirtmişlerdir. Kompozit FDM'lerin güneş enerjisi kullanımı, enerji tasarruflu binalar, tarımsal teknoloji ve soğuk zincir sıcaklık kontrolü gibi çeşitli uygulama alanlarındaki potansiyel kullanımlarını

tartışarak enerji depolama ve bina enerji verimliliği alanlarında önemli bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Hekimoğlu vd. (2021) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, karbonize limon kabuğundan (CLP) elde edilen gözenekli biyokömürü vakum emdirme yöntemi kullanılarak heptadekan (HD) ile birleştirilmesiyle sızdırmaz bir kompozit faz değiştiren malzeme geliştirmişlerdir. CLP'nin yüksek yüzey alanını ve porozitesini, HD'nin yüksek gizli ısı (LHS) kapasitesi (216-217 J/g) ve uygun çalışma sıcaklığı (21-22 °C) ile birleştirerek yüksek termal enerji depolama kapasitesi ve geliştirilmiş termal iletkenlik sağlamışlardır. Araştırmacılar bu çalışmada CLP/HD kompozit FDM' nin hazırlanmasını, karakterizasyonunu ve performans özelliklerini ayrıntılı olarak incelenmişlerdir. Kompozit malzemenin kimyasal uyumluluğunu, kristal yapılarını ve LHS özelliklerini FTIR, XRD ve DTK analizleri ile belirlenmişlerdir. Ayrıca, malzemenin termal bozunma stabilitesi TGA analizi ile incelenmişlerdir. Bunun yanı sıra CLP/HD kompozit FDM'nin termal iletkenliğini HD'nin termal iletkenliği ile karşılaştırılarak ölçmüşlerdir. Sonuçlar, kompozit malzemenin termal iletkenliğinin HD'ye göre yaklaşık %77 daha yüksek olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca, CLP/HD kompozit FDM'nin döngüsel LHS güvenilirliği ve termal iletkenliği gibi performans özelliklerini de incelemişlerdir. Kompozit FDM'nin LHS kapasitesini 166 J/g olarak ölçmüşlerdir. CLP'nin termal iletkenliğini HD ile doldurularak ve karbon nanotüp (CNT) ekleyerek artırmışlardır. CNT ilavesi ile termal iletkenliği 1,5 W/mK'dan 2,5 W/mK' e yükseltmişlerdir. Bunun yanı sıra kompozit malzemenin termal iletkenliğinin artırılmasının, HD'nin erime ve katılaşma sürelerini önemli ölçüde azalttığını belirtmişlerdir. Geliştirilen sızdırmaz kompozit FDM' nin 1000 döngü boyunca tekrarlanan erime/donma işlemlerinde iyi bir termal kararlılığa sahip olduğu göstermişlerdir. Ayrıca, termal bozunma kararlılığını da termogravimetrik analiz (TGA) ile incelenmişler ve yüksek bir termal bozunma sıcaklığına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, geliştirilen sızdırmaz kompozit FDM'nin, termal enerji depolama (TES) özellikleri nedeniyle enerji tasarrufu sağlayan yapı malzemelerinin üretiminde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Son olarak bu yenilikçi FDM' nin, sadece güneş enerjisiyle pasif termal enerji depolama sistemlerine değil, aynı zamanda ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri, sıcak su depolama sistemleri ve endüstriyel prosesler gibi çeşitli uygulama alanlarında da kullanılabilmek potansiyeline sahip olduğunu belirtilmişlerdir.

Lv vd. (2024) gerçekleştirdikleri çalışmada farklı kimyasal reaktiflerin ($ZnCl_2$, H_3PO_4 , KOH , ve K_2CO_3) biyokömür özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve bu aktive edilmiş biyokömürlerin parafin, stearik asit ve polietilen glikol gibi organik faz değişim malzemelerine katılmasıyla şekil kararlı örnekler elde etmişlerdir. Aktivasyon işlemi sonrasında biyokömürlerin yüzey alanı, gözenek hacmi ve ortalama gözenek çapı gibi yapısal özelliklerini karakterize etmişlerdir. Daha sonra, biyokömürleri OFDM'lerle yüklenmişler ve termal özelliklerini (erime/sabitlenme sıcaklığı, erime/sabitlenme entalpisi, ısı depolama kapasitesi ve termal iletkenlik) ölçmüşlerdir. Sonuçlar, farklı kimyasal reaktiflerin biyokömürün gözenekliliği, yüzey alanı ve termal özellikleri üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermiştir. Özellikle, KOH ile aktive edilmiş biyokömürün en yüksek yüzey alanına sahip olduğunu ve termal iletkenliği artırdığını ifade etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, organik faz değişim malzemeleri için potansiyel bir destek malzemesi olarak kimyasal yöntemlerle aktive edilmiş biyokömürün rolünü vurgulamışlar ve şekil kararlı faz değişim malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir kilometre taşı olabileceğine işaret etmişlerdir.

Atinafu vd. (2022b) yapmış oldukları çalışmada biyokömürün chitosan ile birleştirilmesiyle mezopor oranını artırarak etkileşimli sinerjistik bir yapı sağlandığını ve bu yapı sayesinde hazırlanan kompozit FDM' nin tekrarlanabilir kullanım, sızıntı direnci, yüksek gizli ısı tutma ve artırılmış termal iletkenlik gibi üstün özellikler sergilediğini belirtmişlerdir. Deneyler sonucunda, hazırlanan kompozit FDM' nin dodekanı kapsüllenmesi için uygun bir malzeme olduğunu ortaya koymuşlardır. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DTK) ile yapılan ölçümler sonucunda, kompozit FDM' nin yüksek gizli ısı tutma kapasitesine sahip olduğunu ve tekrarlanabilir termal döngülerden sonra gizli ısı tutma kapasitesinin %95,9 olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, termal iletkenlik değerinin 0.373 W/(m.K) olduğunu ve kompozitin sızıntısız bir yapıya sahip olduğu tespit etmişlerdir. TGA analizini, biyokömür ve kompozit FDM' nin termal kararlılıklarını değerlendirmek, XPS analizini ise biyokömür örneklerinin elementel bileşimini belirlemek için kullanılmışlardır. Kompozit malzemenin termal iletkenliğini; termal iletkenlik, termal difüzyon katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı kapasitesini temsil eden κ , α , ρ ve C_p değerlerini kullanarak hesaplamışlardır. Bunlara ek olarak grafen oksit kullanımının, termal iletkenliği artırmak için başarılı olduğunu belirterek ve $0,373 \text{ W/(m.K)}$ termal iletkenlik değeri

elde etmişlerdir. Sonuç olarak, yapılan çalışmada biyokömür ve chitosan kullanılarak hazırlanan kompozit FDM' nin üstün termal özelliklere sahip olduğunu ve gelecekte enerji depolama uygulamalarında önemli bir rol oynayabileceğini savunmuşlardır.

Atinafu vd. (2020a) yaptıkları çalışmada, biyokömürlerin organik faz değişim malzemeleri (1-dodekanol ve n-dodekan) ile kapsülleme kapasitesini ve enerji depolama performansı üzerindeki etkilerini incelenmişlerdir. Çalışmada üç farklı biyokömür (MS, OS ve SS) kullanmışlardır. Biyokömürlerin mikroyapısını taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) ile incelenmişler, özgül yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımını ise Brunauer–Emmett–Teller (BET) yöntemi ve yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) kullanarak hesaplamışlardır. Özellikle, biyokömürlerin yüksek mikro ve mezo gözenek oranlarının, FDM'lerin kapsülasyonunu ve termal kararlılığını artırdığını belirtmişlerdir. Kompozitleri, 1-dodekanol veya n-dodekan ile biyokömürlerin karıştırılması ve ardından faz değişim malzemesinin kapsülleme kapasitesinin belirlenmesiyle hazırlamışlardır. Termal kararlılığı termogravimetrik analiz (TGA) ile belirlenmişler ve 1-dodekanol içeren kompozitlerin daha düşük bozunma hızına sahip olduğu tespit etmişlerdir. Ayrıca enerji depolama kapasitesini diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) ile ölçerek 1-dodekanol içeren kompozitlerin daha yüksek ısıtma entalpisi değerlerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Biyokömürlerin organik faz değişim malzemelerini kapsüllemedeki etkinliğinin, biyokömürlerin özellikleri (örneğin, özgül yüzey alanı, toplam gözenek hacmi ve gözenek boyutu dağılımı) ile yakından ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır. Bu nedenle, biyokömürlerin özelliklerinin organik faz değişim malzemelerinin kapsülleme verimliliğini artırmak için optimize edilmesi gerektiğini savunmuşlardır. Yapılan çalışma ile sürdürülebilir enerji depolama sistemleri ve yeşil teknolojik yenilikler için değerli bir katkı sunmuşlardır. Ayrıca, biyokömürün organik faz değişim malzemeleri için bir destek malzemesi olarak kullanımının, sürdürülebilir mühendislik ve termal enerji depolama alanlarında potansiyel uygulamalar sunduğu sonucuna varmışlardır.

Xiong vd. (2022) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, termal enerji depolama (TES) için kullanılan parafin balmumu tabanlı bir kompozit faz değiştiren malzemenin (FDM) termal iletkenliğinin artırılması için sarımsak sapı biyokömür mikropartikülleri ile doldurulmasını incelemişlerdir. 700 °C'de hazırlanan biyokömür mikropartiküllerinin, üç boyutlu gözenekli ve iki boyutlu pul benzeri yapılar

oluşturarak parafin balmumu içinde ek ısı transfer yollarının oluşmasına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Biyokömür mikropartiküllerini sarımsak sapından elde ederek taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımı spektroskopisi (EDS) ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) gibi yöntemlerle karakterize etmişlerdir. Farklı oranlarda biyokömür mikropartikülleri ile parafin karışımları hazırlayarak termal iletkenlik, erime ve katılaşma hızları, termogravimetrik analiz ve diferansiyel taramalı kalorimetre yöntemleriyle incelenmişlerdir. Sonuçlar, biyokömür mikropartiküllerinin parafin ile homojen bir şekilde dağıldığını ve termal iletkenliği artırdığını göstermiştir. %5 biyokömür mikropartiküllerinin eklenmesi ile katı ve sıvı fazlarda parafinin termal iletkenliğini sırasıyla %27,3 ve %7,2 artırdığını savunmuşlardır. T-history testi ile erime ve katılaşma hızlarının sırasıyla 90 sn. ve 115 sn' de iyileştiğini göstermişlerdir. Parafinin faz değiştirme sıcaklıklarının hafifçe değiştiğini ve gizli ısı kapasitesinin sadece %6,1 azaldığını belirtmişlerdir. En yüksek termal iletkenlik değerini, %5 biyokömür miktarı içeren numunede ölçerek bu değer in saf parafinden %66 daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, biyokömür miktarının artmasıyla erime ve katılaşma hızlarının da arttığını belirtmişlerdir. Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi sonucunda biyokömür miktarının artmasıyla birlikte erime entalpisinin arttığını gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmada, düşük maliyetli ve çevre dostu bir dolgu malzemesi olan biyokömür mikropartiküllerinin FDM'lerin termal iletkenliğini artırmak için kullanılabileceğini savunmuşlardır ve bu sayede TES sistemlerinin daha verimli hale getirilerek yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkili bir şekilde kullanılmasına yardımcı olabileceğini belirtmişlerdir.

Kim vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada, farklı biyokömür yükleme miktarları kullanarak yapay taşların termal özellikleri incelemişlerdir. Ayrıca, faz değiştiren malzemelerin (FDM) yapay taşlara entegrasyonunu da araştırmışlardır. Biokömürün ve faz değiştiren malzemelerinin kullanımıyla iç mekân kaplamaları olarak uygulanan yapay taş kaplamalarının termal iletkenliğini ve dayanıklılığını artırmayı hedeflemişlerdir. Biyokömür yükleme miktarının artması ile yapay taşların termal performansının arttığını ancak mukavemet özelliklerinin ise azaldığını gözlemlemişlerdir. %4 biyokömür yükleme miktarının yapay taşların termal performansını artırmak için uygun bir seviye olduğunu savunmuşlardır. Buna ek olarak %6 biyokömür yükleme miktarının yapay taşların mukavemet özelliklerini

azalttığı sonucuna varmışlardır. RH biyokömürünün, ST ve MS biyokömürlerine göre daha düşük termal iletkenliğe sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Vakum emdirme yöntemi ile FDM' lerin yapay taşlara entegrasyonunun, termal performansı daha da artırdığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada FDM' lerin termal konforu artırarak ve ısı depolama kapasitesi sağlayarak yapay taş kaplamalarının termal performansını iyileştirebileceğini savunmuşlardır. Bu çalışma ile çevre dostu malzemelerin inovatif bir şekilde yapı malzemelerinde kullanımının önemini vurgulamışlardır.

Jeon vd. (2019b) gerçekleştirdikleri çalışmada, yapı malzemelerinin enerji verimliliğini artırmak amacıyla faz değiştiren malzeme ve biyokömür kompozitlerinin entegrasyonunu incelemişlerdir. Çalışmada kullandıkları pirinç kabuğu biyokömürünün pirolizini, kül fırınında 450 °C'de 2 saat süreyle 7 °C/dakika ısıtma hızında gerçekleştirmişlerdir. Taşıyıcı gaz olarak nitrojen (N₂) kullanmışlar ve nitrojenin akış hızını 100 mL/dak olarak ayarlamışlardır. Gizli ısı depolayan biyokompozitleri (LHSBC) hindistancevizi yağı (CO), palmiye yağı (PO), palmiye mumu (PW) ve soya mumu (SW) olmak üzere dört tip biyo bazlı FDM kullanarak hazırlamışlardır. Bu biyokompozitleri faz değiştiren malzemenin biyokömür içine vakumla enjekte edilmesiyle hazırlamışlardır. DSC analizi ile LHSBC'lerin (RCO,RPO,RPW,RSW) gizli ısılarını sırasıyla 70,08 J/g, 25,24 J/g, 92,13 J/g, 83,91 J/g olarak hesaplamışlardır. Deney sonuçları ile biyokompozitlerin 0.1727 W/mK termal iletkenlik değeri ile alçı levha ile benzer performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Sayısal analiz sonuçları ile biyokompozitlerin referans bina modellerinin maksimum enerji tüketimini yılda 531,31 kWh azalttığını göstermişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ile gizli ısı depolama biyokompozitlerinin (LHSBC) yüksek termal performans ve kimyasal uyumluluğa sahip olduğunu doğrulamışlar ve umut vadeden bir yapı malzemesi olduğunu savunmuşlardır.

Atinafu vd. (2020b) yaptıkları çalışmada biyokömürün n-alkanların termal enerji depolama kapasitesi için bir destek elemanı olarak kullanılmasını incelemişlerdir. Çalışmada kullanıldıkları biyokömürü, PEFC sertifikalı ladin besleme kaynağından 600 °C pirolizle üretmişlerdir. Biyokömürü temiz ve verimli bir katı destekleyici ortam olarak kullanmalarının yanı sıra n-alkanları da (dodekan, tetradekan ve oktadekan) enerji depolama malzemeleri olarak kullanmışlardır. Araştırmacılar, vakum emdirme yöntemiyle biyokömür ağına farklı n-alkanların infiltrasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Biyokömür/n-alkan kompozitlerinin termal ve fizikokimyasal özelliklerini

değerlendirmek için çeşitli karakterizasyon teknikleri kullanmışlardır. Sonuçların, biyokömür/n-alkan kompozitlerinin yüksek kimyasal uyumluluğa ve termal stabiliteye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Oktadekan tabanlı biokömür kompozitinin 91,5 kJ/kg yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğunu ve bu değer dodekan ve tetradekan tabanlı kompozitlere kıyasla yaklaşık %25,9 daha yüksek olduğunu savunmuşlardır.

Yue vd. (2023) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada bambu tozu, bambu kömürü ve aktive edilmiş bambu karbon gibi bambu kökenli destek malzemelerini parafin ile birleştirerek kompozit FDM'ler üretmişlerdir. Bu kompozitlerin kimyasal bileşimini, mikro yapılarını ve termal özelliklerini çeşitli analiz yöntemleri kullanarak incelemişlerdir. Bu analiz yöntemleri arasında Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi (FT-IR), diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK), taramalı elektron mikroskobu (SEM), N₂ adsorpsiyon/desorpsiyon analizi, termal iletkenlik ölçümleri ve termal döngü testleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmada, bambudan türetilmiş malzemelerin (BP, BC, AC) mikro, mezo ve makroporlardan oluşan bir hiyerarşik yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu malzemelerin yüksek porozitesinin FDM için yeterli depolama alanı sağladığını ve bu sayede BP-parafin kompozitinin faz değişim entalpisinin 99,81 J/g'a kadar çıktığını savunmuşlardır. Ayrıca, termal iletkenliğin arttığını ve termal yönetim davranışının da iyileştiğini belirtmişlerdir. DSC analizi ile parafin ve parafin-bambu destekli kompozitlerin faz değişim davranışlarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre destek malzemelerinin FDM' nin faz değişim davranışını etkilemediğini, ancak erime başlangıç sıcaklıklarının bir miktar arttığını ve donma başlangıç sıcaklıklarının azaldığını gözlemlemişlerdir.

Zhao vd. (2021) yapmış oldukları çalışmada termal enerji depolama için kullanılmak üzere Cyperaceae familyasına ait olan su kestanelerinden (WC) elde edilen hiyerarşik gözenekli karbonların (HPC) üretimini ve performanslarını detaylı bir şekilde ele almışlardır. HPC'leri, alüminyum hipofosfit (AP) adlı bir aktivatör kullanarak üretilmişler ve farklı kalsinasyon sıcaklıklarında (700°C, 800°C, 900°C) gözenek yapılarını incelemişlerdir. 800°C'de kalsine edilen HPC-3 örneğinin 129,16 m²/g'lık yüksek bir yüzey alanına sahip olduğu belirlemişlerdir. AP'nin kullanımının, HPC'lerin gözenekli yapısını ve termal iletkenliğini artırarak FDM' lerin yüksek depolama kapasitesi ve istikrarlı şekil kararlılığı ile birleştirilmesine olanak tanıdığını

savunmuşlardır. Octadecane85@HPC-3-800 örneği ele alındığında, yüksek geçiş entalpisi (216,2 J/g) ve 100 döngülük ısı çevrim testinden sonra bile termal kararlılığını koruyan bir FDM olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Atinafu vd. (2021c) gerçekleştirdikleri çalışmada farklı biyokömür malzemelerinin farklı piroliz sıcaklıklarının kompozit faz değiştiren malzemelerin termal özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca, biyokömür malzemelerinin morfolojisini, yüzey özelliklerini ve kimyasal uyumluluğunu da araştırmışlardır. Buğday sapı ve yumuşak ağaçlardan elde edilen biyokömür malzemelerini farklı piroliz sıcaklıklarında (550 °C ve 700 °C) üretilmişlerdir. Elde edilen biyokömleri enerji depolama uygulamaları için kullanılan eikozan adlı bir faz değiştiren malzeme ile birleştirerek kompozit malzemeler oluşturmuşlardır. Yapılan deneylerle, biyokömür malzemelerinin poroz yapıları, yüzey özellikleri ve kimyasal uyumluluğunun, kompozit faz değiştirme malzemelerinin termal stabilitesi, ısı geçirgenliği ve kimyasal uyumluluğu üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu savunmuşlardır. Biyokömrün piroliz sıcaklığının, yüzey yapısını önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Özellikle, 550 °C'de piroliz edilen buğday samanı biyokömrünün 40,6 °C'ye kadar olan faz değişim sıcaklık aralığında 75,0 J/g'lık yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık, 550 °C'de üretilen çam ağacı biyokömrünün 36,4-40,6 °C aralığında 52,0 J/g'lık daha düşük bir gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Mandal vd. (2023a) yaptıkları çalışmada biyokömrün termal enerji depolama uygulamalarında şekil kararlı malzeme olarak kullanılmasının potansiyelini araştırmışlardır. Bu bağlamda, biyokömrün gözenekli yapısının ve yüzey alanının, parafin gibi faz değiştiren malzemeler ile karıştırılarak oluşturulan kompozit malzemelerin termal davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada Lanchang, Pahang, Malezya'dan toplanan bambu (Bambusa vulgaris) sapından sentezlenen biyokömrü (BA) ve Güney Kore, Daegu'daki K-Agro'dan temin edilen başka bir yumuşak ağaç olan eko-biyokömrü (EB) kullanılmışlardır. Her iki biyokömrü de sınırlı oksijen ortamında 500 °C'de piroliz yoluyla doğrudan ham maddeden sentezlemişler ve piroliz öncesinde hiçbir kimyasal işlem yapmamışlardır. Çalışmada FDM olarak Daejung Chemicals, Güney Kore'den temin edilen parafini (erime noktası 56–58 °C) kullanmışlar ve vakum emdirme yöntemi ile biyokömlere emdirmişlerdir. Biyokömür/FDM kompozitlerinin karakterizasyonunu içeren

deneysel çalışmaları detaylı bir şekilde sunmuşlardır. Bu karakterizasyonlar arasında attenuated total reflectance-Fourier-transform infrared (ATR-FTIR) spektroskopisi, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile morfolojik incelemeler, Brunauer, Emmett, Teller (BET) adsorpsiyon izotermeleri ile gözenek yapılarının ve yüzey alanlarının belirlenmesi, diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) ile faz geçiş davranışının incelenmesi ve termal döngü testlerinin yapılması bulunmaktadır. Çalışmada ayrıca biyokömür/FDM kompozitlerinin termal kararlılığının, erime entalpisinin, gözenek yapısının ve yüzey özelliklerinin FDM' lerin termal performansı üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemişlerdir.

Wang vd. (2022) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada papatya sapı ve parafin (FDM) kullanarak bir biyokütle tabanlı bileşik faz değiştiren malzeme üretmişler ve bu kompozit malzemenin bina sıcaklık düzenlemesi için kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Hammadde olarak taze papatya saptarı seçmişler ve yüzeylerindeki yabancı maddeleri deiyonize su ile uzaklaştırmışlardır. Daha sonra bu papatya saptarını 48 saat boyunca susuz etanolde bekletmişlerdir. Doğal yapılarını korumak için -70 °C'de 24 saat vakumla dondurarak kurutmuşlardır. İşlem görmüş papatya saptarını, nitrojen atmosferi altında 5 °C/dakika ısıtma hızıyla bir tüp fırında 1 saat boyunca 300 °C'ye ısıtmışlardır. Ardından 5 °C/dakika ısıtma hızıyla 1 saat boyunca 600 °C'ye ısıtmışlardır. Böylece papatya saptarını, anhidröz etanol kullanarak kimyasal olarak modifiye etmişler ve biyokarbona dönüştürmüşlerdir. Bu modifiye edilmiş biyokarbona, parafinin vakum ile emprenye edilmesi ile bileşik kompozit FDM'ler elde etmişlerdir. Elde ettikleri kompozit malzemelerin fizikokimyasal özelliklerini taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraktometresi (XRD), diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK), Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometresi (FTIR) ve termogravimetrik analiz (TGA) gibi yöntemlerle detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DTK) testlerinde saf FDM ve kompozit FDM' nin faz değişim entalpilerini sırasıyla 271 J/g ve 213,6 J/g olarak ölçmüşlerdir. Son olarak sızdırmaz kompozit FDM elde etmek için kompozit m-DS/PW FDM'leri, filtre kâğıdının periyodik olarak değiştirilmesiyle birlikte 12 saat boyunca 60 °C'de bir kurutma fırınındaki bir filtre kâğıdı üzerine yerleştirmişlerdir. Yapılan deneylerde bileşik FDM' lerin, simule edilmiş model bina duvarlarına entegre edilmesiyle i ortamın sıcaklık dalgalanmasını ve sıcaklık farkını azaltarak iç mekan ortamının sıcaklığını düzenlemeye yardımcı olduğunu savunmuşlardır.

Kumar vd. (2024) yapmış oldukları çalışmada, deniz bademinden (*Terminalia catappa*) türetilen aktif karbon/köpük kompozitinin polietilen glikol 400 (PEG 400) ile birleştirilerek form kararlı faz değiştiren malzeme (FDM) olarak kullanılabilme potansiyelini araştırmışlardır. Aktif karbon/köpük kompozitini, deniz bademi kabuğundan elde edilen aktif karbon (SAS-AC) ve polimer matrisi olarak polimetil metakrilat (PMMA) kullanarak üretmişlerdir. SAS-AC'yi KOH kimyasal aktivasyonu ile elde etmişler ve yüksek bir yüzey alanına ve gözenek hacmine sahip olduğunu savunmuşlardır. Bu kompozitin PEG 400 ile birleştirilmesini, vakum emdirme yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Malzeme karakterizasyonunu, FT-IR ve Raman spektroskopisi, BET yüzey alanı analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve termogravimetrik analiz (TGA) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. FT-IR ve Raman spektroskopisi sonuçlarında, PEG 400 ve SAS-AC arasında iyi bir kimyasal uyum olduğunu belirtmişlerdir. BET yüzey alanı analizi sonuçlarında, SAS-AC'nin yüksek bir yüzey alanına ve gözenek hacmine sahip olduğunu savunmuşlardır. TGA sonuçları ile kompozitin yüksek termal kararlılığa sahip olduğunu ifade etmişlerdir. SEM görüntüleri ile kompozitin 3 boyutlu bir yapıya sahip olduğunu ve PEG 400'ün SAS-AC gözeneklerine iyi bir şekilde emdirildiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada deniz bademinden türetilen aktif karbon/köpük kompozitinin, soğuk enerji depolama uygulamaları için umut vadeden bir form kararlı FDM olarak dikkate alınabileceğini ve bu alandaki araştırmalara önemli katkılar sağlayabileceğini savunmuşlardır.

Sawadogo vd. (2022) gerçekleştirdikleri çalışmada, kenevir saplarının kaprik asit (CA) ile birleştirerek şekil kararlı bir kompozit malzeme elde etmişlerdir. Kenevir saplarını, CA ile vakumlu fırında işleme tabi tutmuşlardır. CA'yı kenevir saplarının gözeneklerine kapiller çekim ve yüzey gerilimi kuvvetleri ile emdirmişlerdir. Bu işlem sonucunda, şekil kararlı bir kompozit malzeme elde etmişlerdir. Çalışmada, kenevir sapları/CA kompozit malzemesinin morfolojisini, mikroyapısını ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Morfoloji ve termal özellikler, diferansiyel taramalı kalorimetri (DTK) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. DSC ölçümleri ile kenevir sapları/CA kompozitinin erime ve katılaşma sıcaklıklarını sırasıyla 28,9 °C ve 23 °C olarak ölçmüşler ve bu süreçlerdeki entalpilerin sırasıyla 78.7 J/g ve 76.4 J/g olduğunu ortaya koymuşlardır. TGA/DTG sonuçları ile şekil kararlı kompozitin, 170 °C altında iyi termal kararlılık gösterdiğini

ve bu nedenle bina uygulamaları için uygun olduğunu savunmuşlardır. Daha sonra, bu malzemenin kullanımıyla üretilen FDM kenevir betonunun termal performansını, geleneksel yapı malzemeleriyle karşılaştırmışlardır. FDM kenevir betonunun, geleneksel yapı malzemelerine göre daha iyi bir termal performans sergilediğini ve yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olduğu göstermişlerdir. Ayrıca, referans kenevir betonu ile kenevir betonu/CA kompozit malzemesi arasındaki sıcaklık farkının, yaklaşık 4.6 °C olduğunu belirtmişlerdir. Kenevir betonunun ısı iletkenliğini, 0,08-0,1 W/mK aralığında ölçmüşlerdir.

He vd. (2023) yaptıkları çalışmada, su bitkisi biyokütlesinin karbonizasyonu sonucu elde edilen biyokömür taşıyıcıyı, faz değiştiren malzemelerin adsorpsiyonu ve termal iletkenliğinin artırılması amacıyla geliştirmişlerdir. Altı farklı modifiye edilmiş karbonize su bitkisi (dondurarak kuruyan karbonize su sümbülü FC, vakumla kuruyan karbonize su sümbülü VC) FC700, FC800, FC900, VC700, VC800 ve VC900 hazırlamışlardır. Su sümbülünün termogravimetrik analizine göre sırasıyla 700, 800 ve 900 °C'de 150 ml/dak'lık bir nitrojen akış hızında piroliz işlemini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, karbonize su bitkisinin yapısal ve performans özelliklerini, X-ışını difraktometresi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu, termogravimetrik analiz ve diferansiyel taramalı kalorimetre gibi çeşitli karakterizasyon teknikleri ile incelemişlerdir. Faz değiştiren malzemelerin termal performansını, diferansiyel taramalı kalorimetre ve termal iletkenlik ölçümleri ile belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre karbonize su bitkisi biyokömür taşıyıcısının, faz değiştiren malzemelerin termal performansını artırdığını ve termal iletkenliği geliştirdiğini savunmuşlardır. Özellikle, LMPS/FC900 faz değiştiren malzemenin termal iletkenliğinin %56.93 arttığını, ısı depolama ve salınım deneylerinden sonra istikrarlı bir faz değişim zirvesine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang vd. (2024) gerçekleştirmiş oldukları çalışmada termal enerji depolama ve sera uygulamaları için şekil kararlı kompozit faz değiştiren malzemelerin (FDM) geliştirilmesini ve karakterizasyonunu ele almışlardır. Bu çalışmada, hafif ve gözenekli balsa ağacının yüksek sıcaklıkta karbonlaştırılmasıyla ilgili olarak sıvı sızıntısının çözülmesini, termal iletkenliğin artırılmasını, FDM'nin fototermal dönüşümünün ve termal enerji depolamasının iyileştirilmesini amaçlamışlardır. Çeşitli karbon içeriğine ve hiyerarşik yapılara sahip CW' yi elde etmek için karbonizasyon

işlem sıcaklıklarını sırasıyla 300 °C, 500 °C, 700 °C ve 900 °C olarak ayarlamışlar ve ardından 1 saatlik ısıtma süresi uygulamışlardır. OP44E ve SEBS' yi, FDM ve kalınlaştırıcı olarak kullanmışlar ve ardından karbonlaştırılmış balsa ağacına (CW) vakum emdirme yöntemiyle entegre etmişlerdir. Çalışmada, CW'nin karbon içeriğinin karbonlaştırma sıcaklığıyla arttığını ve ayrıca CW ile SEBS' nin şekillendirme etkilerinin, kompozit FDM'lerin %92.7 ağırlıkça adsorpsiyon oranına ve 190 J/g'nin üzerinde entalpiye sahip olmasını sağladığını belirtmişlerdir. Kompozit FDM' lerin karakterizasyonunu elektron taramalı mikroskop (SEM), civa enjeksiyon porozimetre (MIP), Fourier dönüşümü kızılötesi spektrometre (FT-IR), X-ışını difraksiyonu (XRD), lazer konfokal Raman spektrometresi ve UV-Vis-NIR spektrometresi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Balsa ağacı esaslı kompozit FDM' lerin sera deneyleri sonucunda, diğer durumlara kıyasla daha yüksek FDM sıcaklığına (70 dakikada 71,5 °C) ve daha uzun süreli iç mekan sıcaklığı korumasına (boş sera ve diğer FDM'lerle kıyasla 15.3 dakika daha uzun) sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu bulgular ile şekil kararlı kompozit FDM' lerin mükemmel termal kararlılık ve fototermal dönüşüm özelliklerine sahip olduklarını ve sera içi sıcaklığın istikrarlı bir şekilde korunmasında önemli bir potansiyeli barındırdıklarını vurgulamışlardır.

Mandal vd. (2023b) yapmış oldukları çalışmada, atık hurma çekirdeklerinin biyokömür olarak kullanılmasının termal enerji depolama sistemlerindeki potansiyelini incelemişlerdir. Hurma çekirdeklerinden elde edilen biyokömürü (600 °C'de 1 saat süreyle piroliz), termal enerji depolama sistemlerinde şekillendirilmiş faz değiştiren malzemeler (FDM) ile birleştirilerek termal enerji depolama ve salınım kapasitesini artırmak için kullanmışlardır. FDM kompozitlerini, kaprik asidin (CA) sentezlenmiş biyokömüre (DSB) vakumla emdirilmesiyle oluşturmuşlardır. CA' yı, DSB'ye 2:1 ve 3:1 oranlarında dâhil etmişler ve sentezlenen DSCA kompozitlerinin performansı ile birlikte termal kararlılığını da değerlendirmişlerdir. Saf CA için gizli ısı depolama kapasitesini 164.7 J/g, 3:1 DSCA için 72.4 J/g, 2:1 DSCA için ise 62.4 J/g olarak ölçmüşlerdir. Kompozit FDM'nin ısı depolama ve salınım özelliklerini, 1000 döngü boyunca tekrarlanan DSC analizleri ile incelemişlerdir. Sonuçlardan elde edilen bulgular ışığında kompozit FDM' lerin ısı depolama ve salınım özelliklerinin tekrarlanabilir olduğunu savunmuşlardır.

Atinafu vd. (2024) gerçekleştirdikleri çalışmada 500 °C piroliz sıcaklığında hayvan gübresinden elde edilen biyokömürün, oktadekan ile vakum emdirme yöntemi

kullanılarak birleştirilmesi sonucunda şekil kararlı bir faz değıştiren kompozit bileşigi oluşturmak için kullanılabileceğini göstermişlerdir. Hem kompozit bileşenlerinin hem de oktadekan-biyokömür kompozitinin yapısal, morfolojik, termal ve şekil kararlılıklarının yanı sıra kimyasal uyumluluklarını da araştırmışlardır. Ayrıca, vakum emdirme yönteminin, faz değışim kompozitinin yapısal ve morfolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu yöntemin, malzemenin gözenek yapısı ve yüzey özellikleri üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu detaylı bir şekilde ele almışlardır. Araştırmada elde edilen biyokömürün $135.2 \text{ m}^2/\text{g}$ yüzey alanı ve $0.352 \text{ cm}^3/\text{g}$ gözenek hacmi ile mesoparöz bir yapıda olduğunu ve bu özellikler sayesinde biyokömürün yüksek bir kapiler kuvvet potansiyeline sahip olması sebebiyle faz geçiş sürecinde bileşik malzemelerden oktadekanın sızmasını önleyeceğini savunmuşlardır. Ayrıca, oktadekan-biyokömür bileşiginin yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğunu ve 1000 ısıtma-soğutma döngüsünden sonra bile yüksek gizli ısı depolama kapasitesini koruduğunu belirtmişlerdir. Oktadekan-biyokömür bileşiginin faz değışim entalpisini 88.7 J/g olarak ölçmüşlerdir.

Literatür çalışmaları göz önüne alındığında, yapılan çalışmalarda genellikle malzeme karakterizasyonu üzerine yoğunlaşmış olduğu anlaşılmaktadır. Buna karşılık biyokömürün bina bileşeninde uygulanmasına yönelik araştırmaların yeterince yapılmadığı görülmektedir. Bu amaçla tez kapsamında öncelikle biyokömür sentezlenmesi işlemi gerçekleştirilecektir. Bu açıdan bakıldığında biyokömür sentezleme koşulları değıştirilerek bünyesinde en fazla miktarda faz değıştiren malzeme tutabilecek biyokömür sentezine odaklanmak tezin birincil amacı olarak belirlenmiştir. Bu amacı gerçekleştirmek için biyokömür bünyesine vakum emdirme işlemi ile FDM mikrokapsüllenmesine ilave olarak sızdırmazlık testleri, taramalı elektron mikroskop analizleri, diferansiyel taramalı kalorimetre ölçümleri, ısıl iletkenlik ölçümleri gibi karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tezin ikincil amacı ise en uygun görülen biyokömür/FDM kompozitinin bina duvar bileşenlerinde uygulanmasının konfor şartları üzerindeki iyileştirme etkilerinin araştırılması olarak belirlenmiştir. Bu amaçla oluşturulan bina modelinde duvar bileşenine katkılanan biyokömür/FDM kompozitinin performans ölçümleri karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Son olarak gerçekleştirilen termografi ölçümleri ile performans karşılaştırmaları görsel olarak ifade edilmiştir.

2. MATERİYAL VE METOD

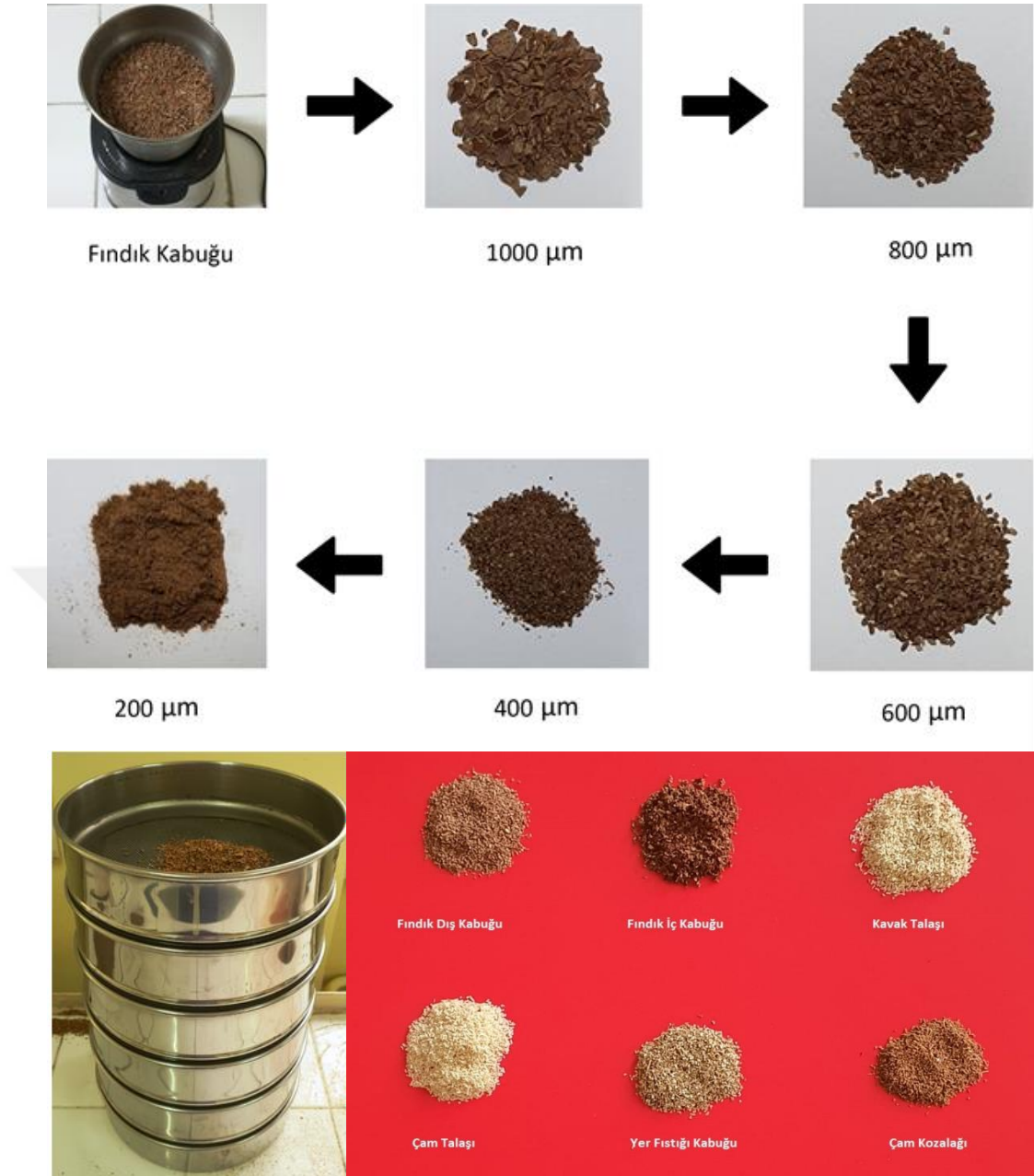
2.1 Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Araştırmada, katı-sıvı organik FDM kullanımı tercih edilmiştir. Bunun temel nedenleri arasında aşındırıcı etki içermemesi, zehirli olmaması, ekonomik olması ve aynı zamanda faz değişimi sırasında düşük hacim değişimleri göstermesi gibi etmenler yer almaktadır. Çalışmada kullanılan parafin esaslı RT-28HC FDM' si Rubitherm® Technologies GmbH şirketinden ticari olarak temin edilmiş olup herhangi bir ön işleme tabi tutulmadan kullanılmıştır.

Biyokömür sentezi için ham madde olarak doğada atık halde ve bol miktarda bulunan fındık dış kabuğu, fındık iç kabuğu, kavak talaşı, çam talaşı, yer fıstığı kabuğu ve çam kozalağı tercih edilmiştir. Bu malzemeler biyokömür sentezine geçilmeden önce öğütülerek toz haline getirilmişlerdir.

2.2 Deneysel Uygulama

Deneysel uygulamanın başlangıç noktası olarak öncelikle farklı tipteki organik malzemelerin temini gerçekleştirilmiştir. Çeşitli ortamlardan temin edilen fındıkkabuğu, kavak talaşı, çam talaşı, çam kozalağı ve yer fıstığı kabuğu olmak üzere 5 farklı organik malzeme seçilmiş ve bu malzemeler öncelikli olarak öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem, Şekil 2.1'de gösterilen öğütme cihazı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Öğütülmüş malzemeler kademeli elekler ile elenerek 1 mm boyutundan 600 µm boyutuna getirilmiştir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Öğütme ve eleme işlemi gerçekleştirilerek 600 µm boyutuna getirilmiş farklı organik malzemeler

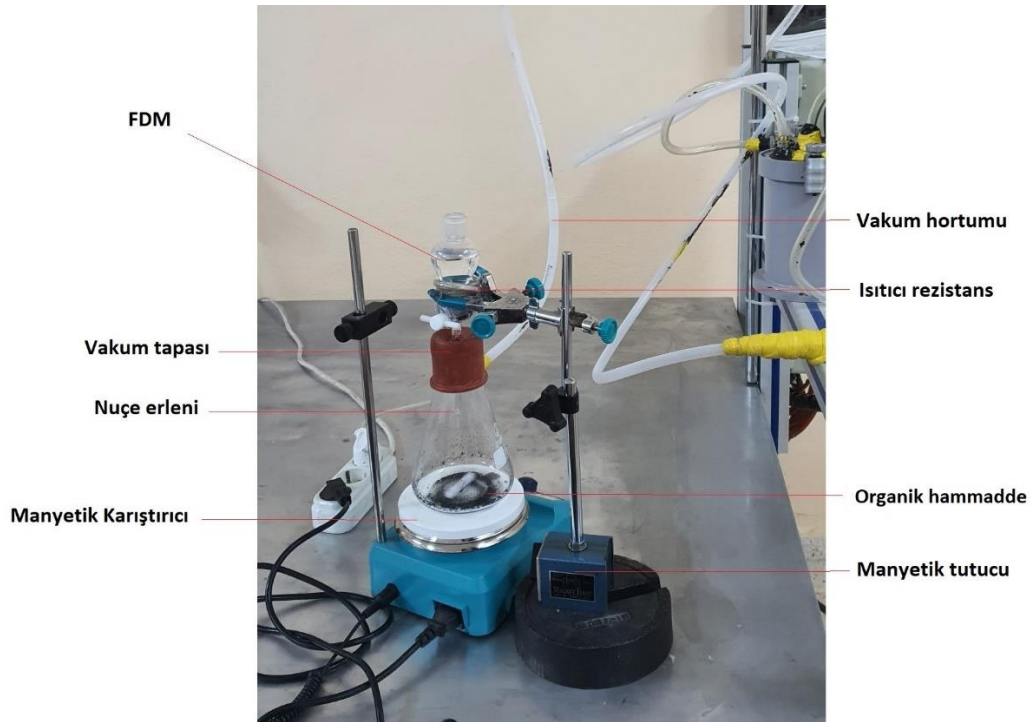
Fındıkkabuğu, yoğunluk farkından faydalanılarak fındık iç kabuğu ve fındık dış kabuğu olarak ayrılmış ve farklı iki organik malzeme olarak ele alınmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Fındık iç kabuğu ve fındık dış kabuğunun yoğunluk farkından kaynaklı ayrıştırılma işlemi

2.2.1 Vakum Emdirme

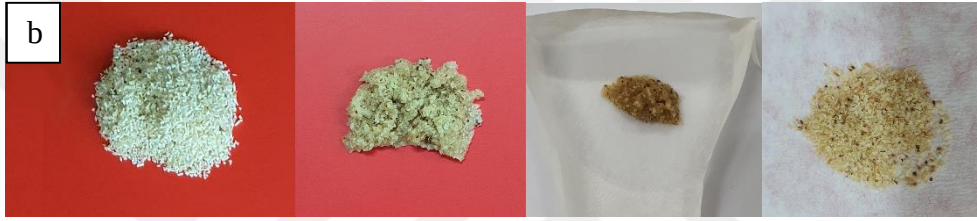
RT-28'in farklı tipteki organik malzemelerin gözeneklerine hapsedilmesi (başka bir ifadeyle mikrokapsülasyonu) işlemi vakum emdirme adı verilen yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem Şekil 2.3'te gösterilen düzenek aracılığıyla uygulanmıştır.



Şekil 2.3 Vakum emdirme deney düzeneği

Yöntem uygulanmadan önce öğütülerek 600 µm boyutuna indirilen organik malzemeler, 105 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat süreyle kurutma işlemine maruz bırakılmıştır. Böylelikle malzeme içerisinde bulunan olası nem uzaklaştırılarak daha etkin bir hapsedme işleminin önü açılmıştır. Vakum emdirme işlemine bir ısıtıcı plaka üzerinde RT-28'in eriyik hale getirilmesiyle başlanmıştır. Sıvı hale getirilen RT-28, Şekil 2.3'te üst kısımda bulunan ayırma hunisine aktarılmıştır. Sıvı RT-28'in katılaşmasını engellemek için ayırma hunisi etrafına sarılan esnek bir rezistans aracılığıyla kontrollü ısıtma gerçekleştirilmiştir. Nuçe erleni içerisine belirli bir miktarda gözenekli organik malzeme konulmuştur. Ayırma hunisi ile nuçe erleni, Şekil 2.3'te gösterilen bir vakum tapası ile birbirine bağlanmıştır. Nuçe erleni ile vakum pompası, hortum ile birbirine bağlanmıştır. Hortum giriş ve çıkışı vakum bandı ile sarılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Daha sonra vakum pompası 0.7 bar altında çalıştırılarak erlen içerisindeki malzemelerin gözeneklerindeki hava boşaltılmıştır. Gözenekler içerisindeki havayı boşaltmayı garanti edecek sürede beklendikten sonra ayırma hunisinin vanası açılarak sıvı RT-28'in yavaş yavaş erlen içerisindeki gözenekli malzeme üzerine damlatılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Erlen içerisindeki RT-28'in katılaşmaması için alt tarafta bulunan manyetik karıştırıcının ısıtıcı tablası sıcak ayarda tutulmuştur. Ayrıca erlen içerisine konulan manyetik balık ile organik malzeme/RT-28 karışımının, 1000 devir/dakika hızında homojen bir biçimde karışması sağlanmıştır. Böylelikle sıvı RT-28'in malzemenin mikro gözenekleri içerisine hapsedilmesi yoluyla mikrokapsülleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yukarıda bahsedilen mikrokapsülleme işlemleri; fındık dış kabuğu, fındık iç kabuğu, kavak talaşı, çam talaşı, yer fıstığı kabuğu ve çam kozalağı olmak üzere farklı organik malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1).

Nuçe erleni den çıkarılan RT-28/organik malzeme kompozitleri süzdürülmek suretiyle sıvı RT-28 fazlalığından kurtarılmıştır. Elde edilen RT-28/organik malzeme kompozitleri bir filtre kâğıdı üzerine konularak etüv içerisinde 30 °C sıcaklıkta 12 saat süreyle bekletilerek organik malzeme yüzeyine yapışmış olan RT-28'den arındırılmıştır. Son yapılan işlem ile filtre kâğıdında sızıntı kalmayana kadar devam edilmiş olup böylelikle hem sızdırmazlık testi gerçekleştirilmiş hem de organik malzeme yüzeyinde RT-28 kalmadığından emin olunmuştur (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 RT-28 emdirilmiş organik malzemeler (a), RT-28 in gözenekli organik malzemeye emdirilmesi ve yüzeye yapışmış organik malzemedan arındırılması (b), RT-28 emdirilmiş ve sızdırmazlık testi gerçekleştirilmiş organik malzemeler (c).

2.2.2 Biyokömür üretimi

Biyokömür, biyokütle bazlı hammaddelerin oksijenin sınırlı olduğu bir ortamda piroliz sürecinden geçirilmesiyle elde edilen karbon bazlı bir malzemedir. Piroliz süreci, organik materyallerin yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz bir ortamda termal olarak parçalanması işlemidir. Bu işlem esnasında, biyokütle karbona dönüşürken sıvı ve gaz fazında yan ürünler açığa çıkmaktadır. Geride kalan karbon temelli malzeme ise biyokömür olarak adlandırılmaktadır.

Biyokömür, çeşitli biyokütle kaynaklarından üretilmektedir. Odun yongaları, tarımsal atıklar, pirinç kabukları, mısır koçanları gibi organik malzemeler sıkça kullanılan biyokömür hammaddeleridir. Isıtma hızı, piroliz sıcaklığı, piroliz süresi ve atmosfer koşulları gibi faktörler, biyokömürün karakteristik özelliklerini belirlemektedir. Biyokömürün temel özellikleri, enerji depolama için uygunluğunu belirlemektedir. Gözenekli yapısı ve yüksek yüzey alanı, gazların ve sıvıların emilimini ve adsorpsiyonunu kolaylaştırmaktadır. Bu özellikler sayesinde biyokömür, enerji depolama uygulamalarında kullanılmak için ideal bir malzeme olarak göze çarpmaktadır. Ayrıca, kararlı kimyasal yapısı sayesinde biyokömürün uzun süreli kullanım için ideal bir aday olduğu öngörülmektedir.

Enerji depolama konusunda biyokömür; ekonomik açıdan avantajlı olması, çevre dostu olması ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olması gibi özelliklerle ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, biyokömürün uzun ömürlü olması ve düşük aşınma oranına sahip olması da enerji depolama sistemlerinde kullanımını desteklemektedir.

Çalışma kapsamında daha önce fındikkabuğu, kavak talaşı, çam talaşı, çam kozalağı ve yer fıstığı kabuğu gibi organik malzemeler için gerçekleştirilen mikrokapsülleme işlemi bu malzemelerden elde edilen biyokömürler için de tekrarlanmıştır. Bu sayede farklı organik malzemeler biyokömür haline getirilerek gözenekliliklerinin arttırılması, dolayısıyla mikrokapsülleme kapasitesinin arttırılması hedeflenmiştir. Bununla birlikte farklı malzemelerden elde edilen biyokömürlerin enerji depolama kapasitelerinin ilgili baz malzemeler ile karşılaştırması da yapılmıştır.

Bu amaçla çeşitli ortamlardan temin edilen fındikkabuğu, kavak talaşı, çam talaşı, çam kozalağı ve yer fıstığı kabuğu gibi organik malzemeler daha önce bahsedilen öğütme işlemine tabi tutularak 600µm boyutuna indirgenmiştir.

Boyutlandırma işlemi gerçekleştirilen parçacıklar piroliz işlemiyle biyokömür haline getirilmiştir. Piroliz işlemi Şekil 2.5'te gösterilen yüksek sıcaklığa çıkabilen tüp fırın kullanılarak 50 ml/dk akış hızında azot gazı atmosferi altında aşağıdaki adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir.

- i) Öncelikle organik malzemeler bir kroze içerisine konularak yüksek sıcaklığa çıkabilen tüp fırına yerleştirilmiştir.
- ii) Bir sonraki adımda organik malzemeler azot atmosferinde 10 °C/dakika ısıtma hızında 700 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır.
- iii) Daha sonra 700 °C sabit sıcaklıkta 1 saat bekletme işlemi gerçekleştirilmiştir.
- iv) Son olarak organik malzemeler fırın içerisinde oda sıcaklığına ulaşılıncaya kadar soğutulmaya bırakılmıştır.

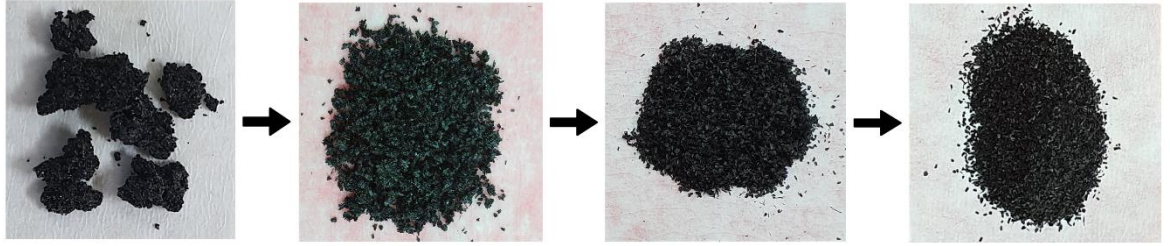


Şekil 2.5 Piroliz için kullanılan tüp fırın ve elde edilen biyokömür

Elde edilen farklı biyokömürler, yüksek gözenekli yapıları nedeniyle RT-28'in mikrokapsül haline getirileceği ana malzeme olarak kullanılmıştır. Bu amaçla öncelikle biyokömür bünyesindeki olası nemin uzaklaştırılması için, malzemeler 105 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat süreyle kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Bir sonraki aşamada RT-28/biyokömür kompozitleri, biyokömürlerin bahsi geçen gözeneklerine

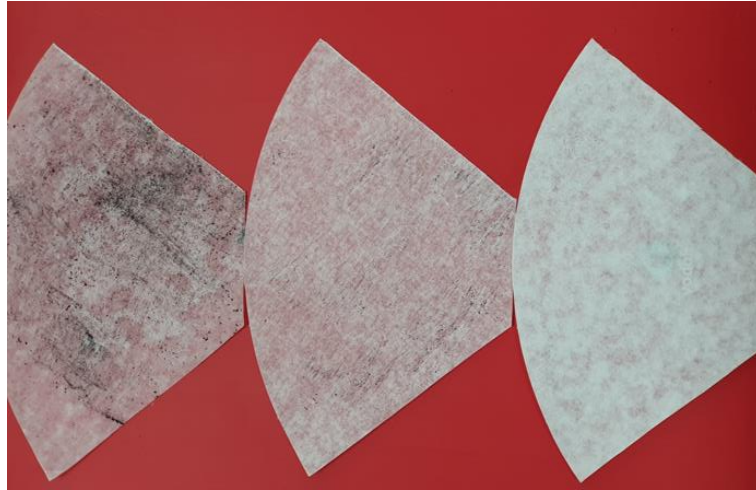
mikrokapsüllemesiyle elde edilmiştir. Mikrokapsülleme işlemi için detayı yukarıda anlatılan vakum emdirme tekniği uygulanmıştır.

Üretilen RT-28/biyokömür kompoziti, yüzeyine yapışmış olan faz değıştiren malzemeden arındırılması için 35 °C sıcaklıkta 24 saat süre ile etüvde bekletilmiştir. Belirli aralıklarla kompozitin üzerine konulduğu filtre kâğıtları değıştirilerek sıvı RT-28 sızıntısı kaybolana kadar işleme devam edilmiştir (Şekil 2.6).

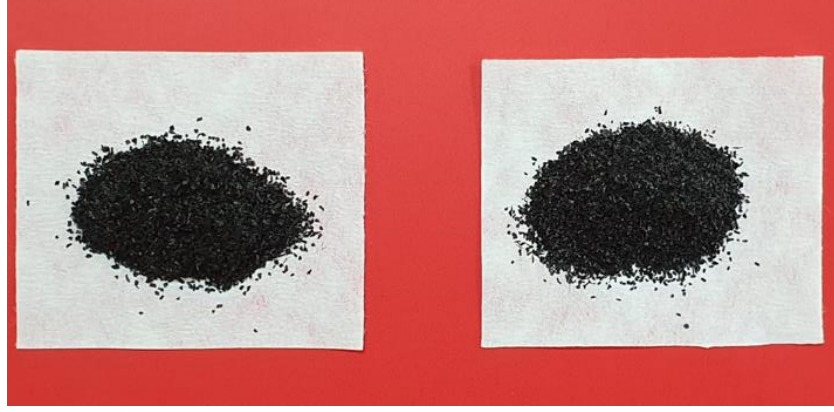


Şekil 2.6 RT-28/ kavak talaşı biyokömür kompozitindeki faz değıştiren malzemeyi biyokömür yüzeyinden arındırma işlemi

Faz değıştiren malzemeyi kompozit yüzeyinden arındırma işleminde kullanılan filtre kâğıtlarının dönüşümü Şekil 2.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Faz değıştiren malzemeyi kompozit yüzeyinden arındırma işleminde kullanılan filtre kâğıtlarının dönüşümü



Şekil 2.8 Kavak biyokömürü - RT-28/ kavak talaşı biyokömür kompoziti

Biyokömür ve RT-28/ biyokömür kompozitinin görsel karşılaştırması Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Görüleceği üzere gözeneklere RT-28 emdirilmesi sonucunda elde edilen kompozit ile biyokömür ayırt edilemeyecek derecede birbirine benzemektedir. Şekil 2.9’da sentezlenen biyokömür/RT-28 kompozitlerinden birisi gösterilmiştir.



Şekil 2.9 RT-28/biyokömür kompoziti son hali

Altı farklı organik malzemeden elde edilen biyokömürlere, yukarıda detaylandırılan işlemler uygulanarak aşağıdaki RT-28/biyokömür kompozitleri elde edilmiştir.

- i) RT-28/ Fındık iç kabuk biyokömürü
- ii) RT-28/ Fındık dışkabuk biyokömürü
- iii) RT-28/ Çam kozalak biyokömürü

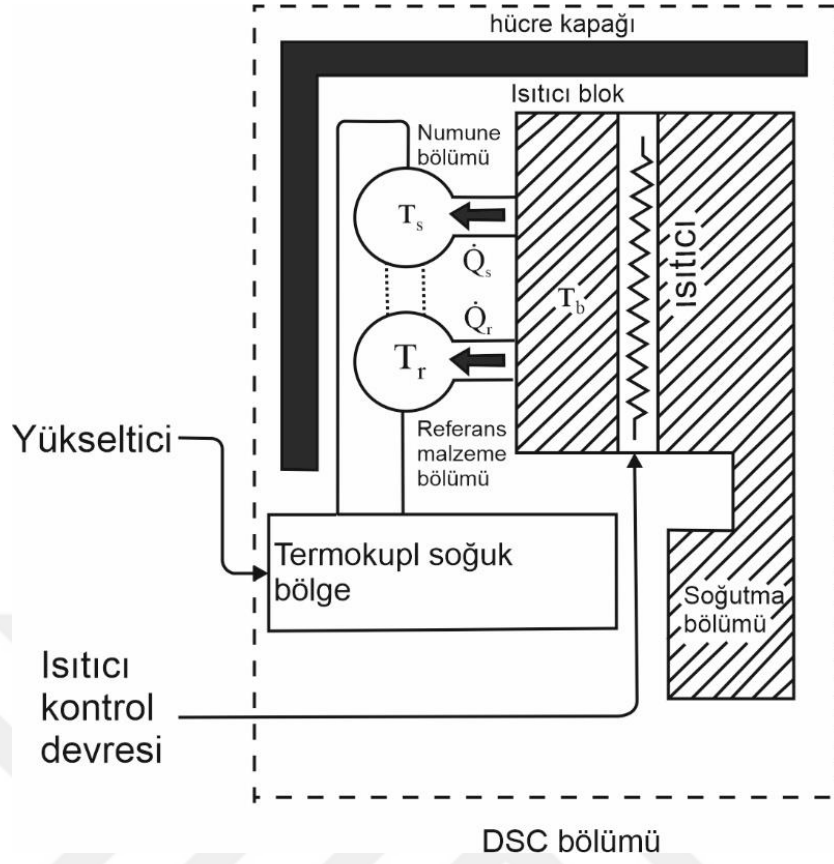
- iv) RT-28/ Yer Fıstığı kabuk biyokömürü
- v) RT-28/ Çam talaş biyokömürü
- vi) RT-28/ Kavak talaş biyokömürü

Tez kapsamında bundan sonraki aşamada elde edilen RT-28/biyokömür kompozitlerinin; diferansiyel taramalı kalorimetre, ısı iletkenlik ve taramalı elektron mikroskobu gibi karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiştir.

2.3 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Ölçümleri

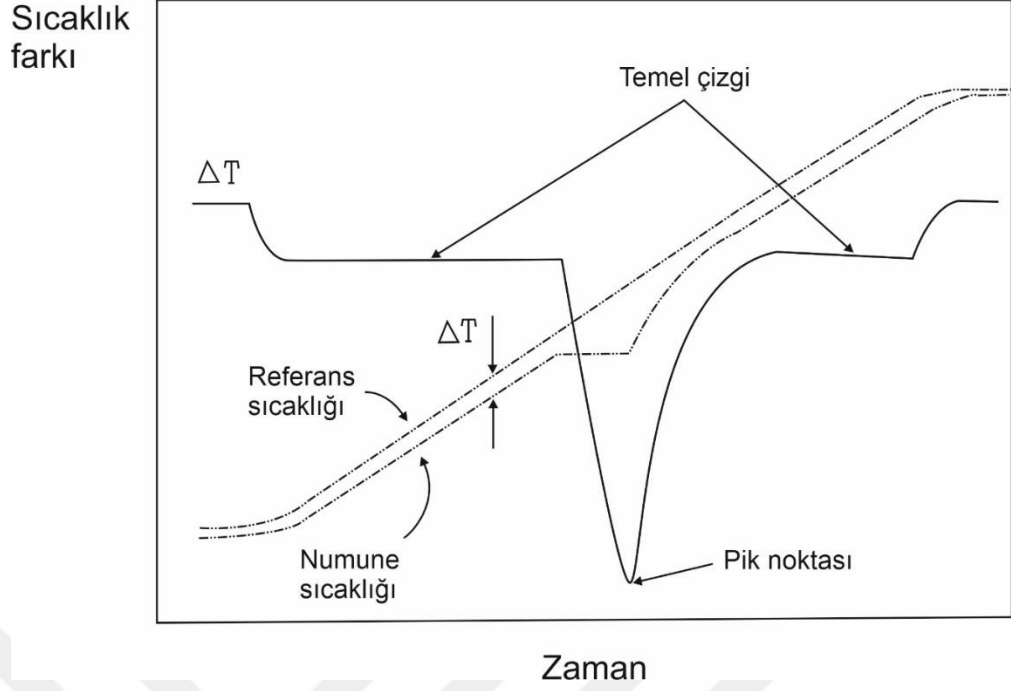
Parafin esaslı organik RT-28 ve elde edilen RT-28/biyokömür kompozitlerinin diferansiyel taramalı kalorimetrik özelliklerinin ölçülmesi için DSC-60 (Shimadzu, Japan) diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) kullanılmıştır. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK), katı veya sıvı haldeki numunelerin; erime sıcaklığı, katılaşma sıcaklığı ve gizli ısılarını belirlemek için kullanılan bir termal analiz yöntemidir.

Şekil 2.10'da Shimadzu DTK 60 cihazının şematik yapısı verilmiştir. DTK cihazı, numune hücresi ve referans numune hücresi olmak üzere iki farklı hücre içermektedir. Numune hücresine, incelenmek istenen malzemenin bulunduğu alüminyum numune kabı, referans hücresine ise içi boş bir alüminyum numune kabı yerleştirilmektedir. Cihazın ısıtıcı bölmesine kontrollü bir şekilde güç verilmesi ile ısıtıcı blok sıcaklığının (T_b) değişiminin sağlanmasıyla elde edilen ölçülmek istenilen numune ve referans numune sıcaklıkları arasındaki fark değerleri, termoelektrik bir dedektör tarafından algılanmaktadır. Isıtıcı bloktan, referans numune hücresine ve ölçülmek istenilen numune hücresine sırası ile Q_r ve Q_s ısılarının gönderilmesiyle referans numune sıcaklığı (T_r) ve malzeme numune sıcaklığı (T_s) programda girilen değerlere göre kontrollü bir biçimde artmakta veya azalmaktadır. Malzeme numunesi ve referans numune arasındaki sıcaklık farkları ($\Delta T = T_s - T_r$), numunenin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişikliklerin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Numune ve referans numune aynı koşullarda ısıtılmakta ve faz değişiminin başlamasıyla referans malzeme sıcaklığı artmaya devam ederken numune sıcaklığı sabit bir şekilde kalmaktadır. Bu durum göz önüne alındığında ısıtıcı bloktan numuneye doğru daha fazla bir ısı akışı olması gerekmektedir.



Şekil 2.10 DTK-60 cihazının şematik yapısı

Standart bir diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) eğrisi Şekil 2.11' de görüldüğü gibi, zamana bağlı olarak ΔT (sıcaklık farkı) verilerinin çizdirilmesiyle elde edilmektedir. Bu eğri, başlangıçta denge konumunda bulunan temel çizgiden, erime başladıktan sonra oluşan pik eğrisinden ve erime tamamlandıktan sonra pik eğrisini takip eden temel çizginin birleşiminden meydana gelmektedir. Pik eğrisi ile temel çizgi altında kalan alan depolanan enerjiyi yani erime için gerekli olan gizli ısıyı vermektedir. Numune bölümünde endotermik bir reaksiyon meydana geldiğinden, meydana gelen DTK eğrisi endoterm eğri olarak adlandırılmaktadır. Numune bölümünde ekzotermik bir tepkime meydana geldiğinde ise meydana gelen DTK eğrisine ise ekzoterm eğri adı verilmektedir.



Şekil 2.11 Tipik bir DTK eğrisi

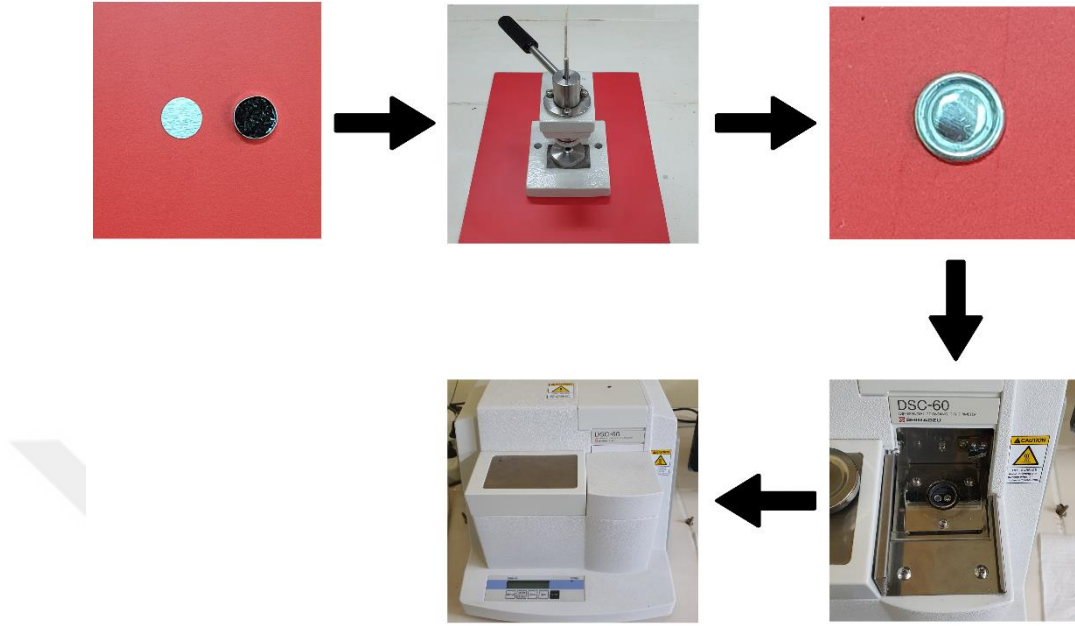
DTK ölçümleri, Şekil 2.12’de gösterilen DSC-60 Shimadzu (Japan) cihazı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 2.12 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK)

Ölçüm numunesi hazırlamak için RT28’den alınan parçacıklar bir hassas terazide yaklaşık olarak 5 mg civarında tartılarak DTK cihazının katı numune ölçüm kabına Şekil 2.13’teki gibi yerleştirilmiştir. Numune kabının kapağı özel bir pres aracılığıyla sıkıştırılarak kapatılmış ve DTK cihazının numunesi hazır hale getirilmiştir.

Hazırlanan numuneler bir referans numune ile birlikte DSC-60 cihazının ölçüm haznesine yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.13 Numune hazırlanması ve DTK cihazına yerleştirilmesi

RT-28'in beklenen faz değiştirme sıcaklığına uygun olarak ölçüm aralığı 14 °C ile 35 °C arasında belirlenmiştir. Bu ölçüm aralığında numunelerin ısıtma hızı 0.5 °C/dk olarak ayarlanmıştır. Ölçümler sonucunda RT28'in erime başlangıç sıcaklığı (T_{eb}), erime sonlanma sıcaklığı (T_{es}), erime pik (T_{ep}) ve erime gizli ısı değeri (H_e) belirlenmiştir.

2.4 Termal iletkenlik ölçümleri

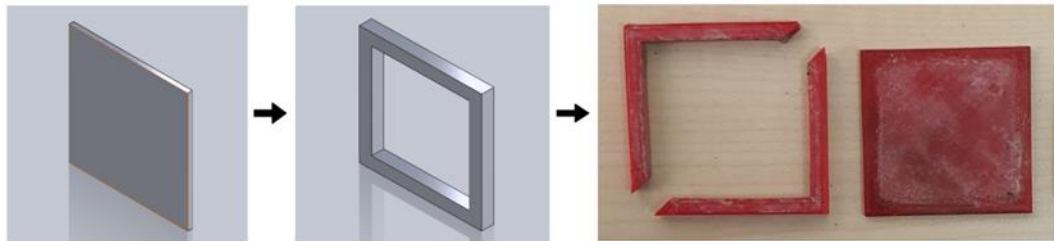
RT-28, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür/çimento kompozitlerinin ısı iletkenlik katsayıları Hotdisk TPS 3500 (Hotdisk Instruments, Sweden) cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 2.14). Hotdisk TPS 3500; 0,005 ile 1800 W/m/K aralığındaki ısı iletkenlik değerleri ölçülebilmektedir.



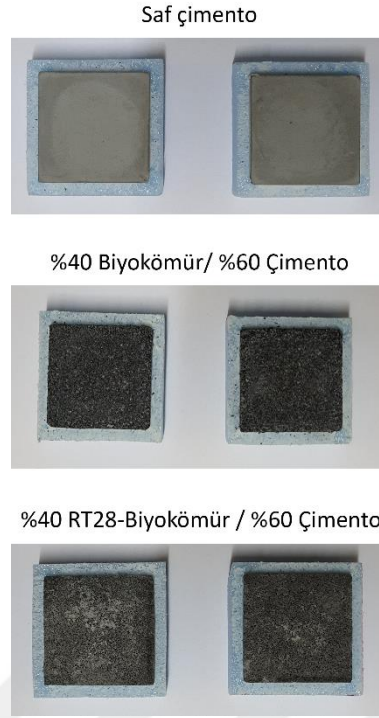
Şekil 2.14 Hotdisk TPS 3500 Termal iletkenlik ölçüm cihazı

Hotdisk TPS 3500, geçici yüzeysel ısı kaynağı prensibine göre çalışmakta olup ısı akışını disk şeklindeki bir yüzey boyunca gerçekleştirmektedir. Ölçüm numunesine uygun olarak seçilen disk şeklindeki sensörler hem ısıtıcı hemde sıcaklık ölçümü görevi görmektedir. Sensör tarafından disk yüzeyi boyunca verilen geçici ısı akışının meydana getirdiği sıcaklık değişiminin belirlenen bir zaman dilimi boyunca analizi sonucunda ısı iletkenlik katsayıları belirlenmektedir.

Hotdisk TPS 3500 cihazı ile ısı iletkenlik ölçümü yapılabilmesi için öncelikle cihaza uygun numunelerin üretilmesi gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle 3B yazıcı aracılığıyla Şekil 2.15’de gösterilen 40mm x 40mm x 5mm boyutuna sahip bir kalıp oluşturulmuştur.

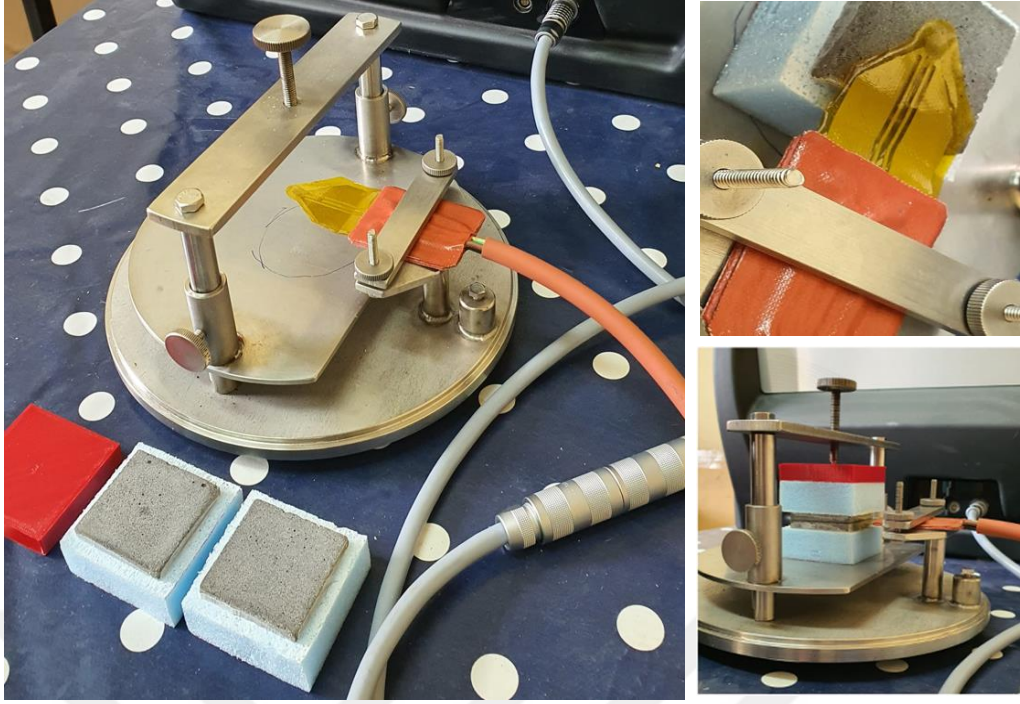


Şekil 2.15 Termal iletkenlik ölçümü için hazırlanacak kompozitin numune kalıbı



Şekil 2.16 Termal iletkenlik ölçüm numuneleri

Daha sonra üretilen bu kalıplar kullanılarak saf çimento, %40 biyokömür/%60çimento, %40 RT-28/biyokömür / %60 çimento kompozitleri için karşılıklı iki adet numune üretilmiştir (Şekil 2.16). Tez kapsamında ölçüm yapılacak numunelere uygun olarak seçilen kapton bantlı sensör, düz yüzeye sahip iki özdeş numune arasına yerleştirilmiştir. (Şekil 2.17).

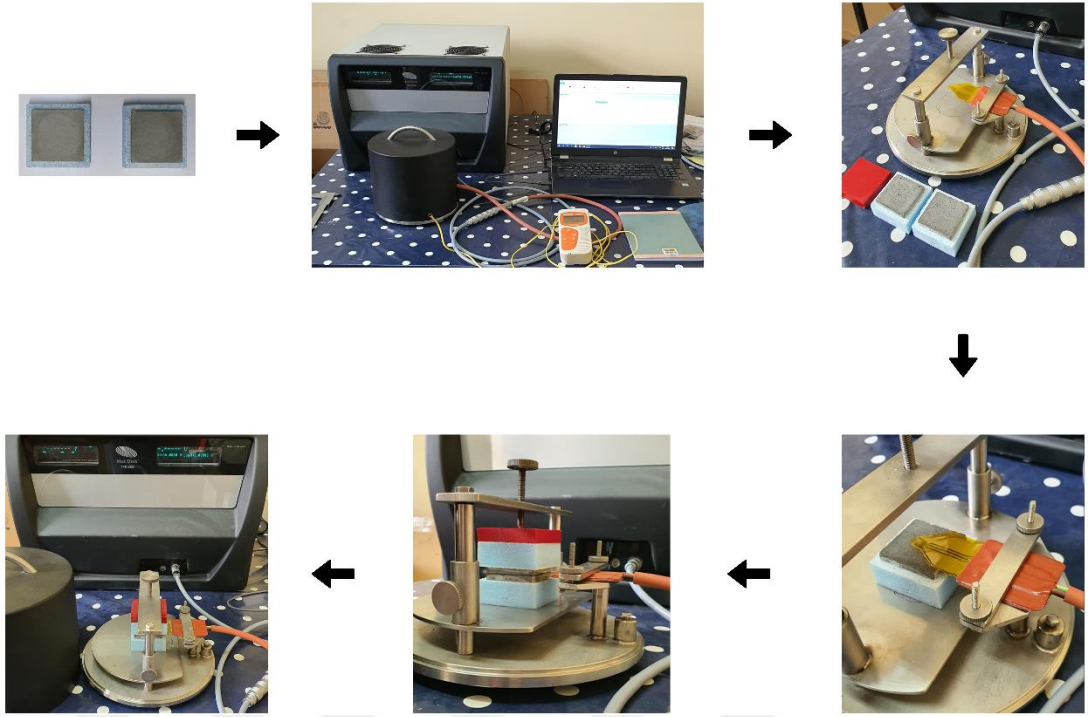


Şekil 2.17. Numunelerin Hotdisk TPS 3500 cihazında ölçüme hazırlanması

Hotdisk TPS 3500 cihazında termal iletkenlik ölçümü yapılırken aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir.

- i) Numune çapı, sensör çapının 2 katından az olmamalıdır.
- ii) Numune kalınlığı, kullanılacak olan sensör yarıçapından az olmamalıdır.
- iii) Prop derinliği, sensör yarıçapı ile sensör çapı aralığında olmalıdır.

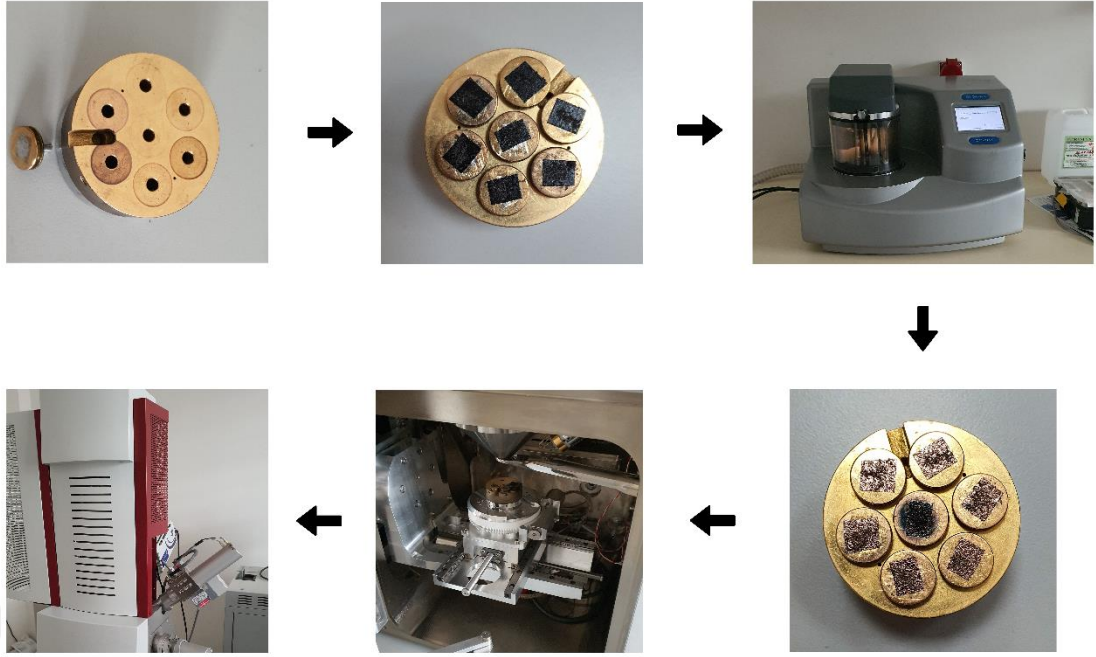
Yukarıda bahsedilen ölçüm numunelerinin ısı iletkenlik değeri 24 °C ortam sıcaklığında ölçülmüştür. Gerçekleştirilen ölçümlerin aşamaları Şekil 2.18’de açık bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Termal iletkenlik ölçüm aşamaları

2.5 Sem analizleri

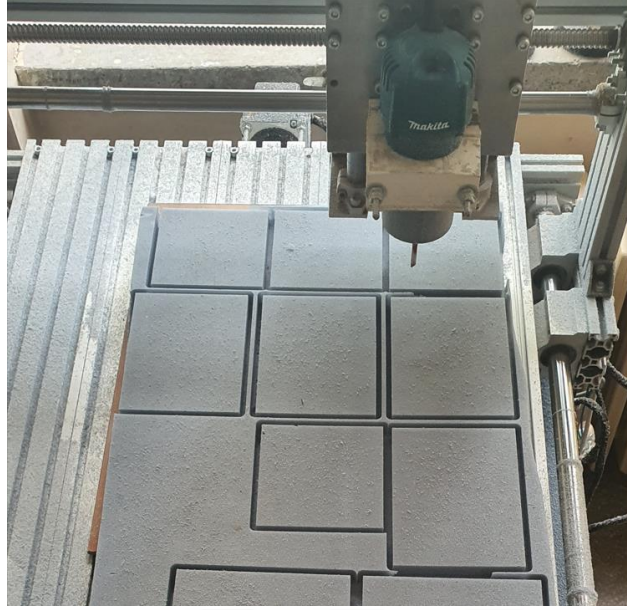
Farklı türde organik ham malzemeler ve bu malzemelerden sentezlenen biyokömür malzemelerin yüzey morfolojileri taramalı elektron (SEM) mikroskobu (TESCAN MIRA3 XMU, Czechia) kullanılarak elde edilmiştir. Buna ilave olarak RT-28/biyokömür numuneleri için de SEM analizleri de gerçekleştirilerek faz değiştiren malzemelerin gözeneklerin içerisine hapsedilme durumu da gözlemlenmiştir. 5nm kalınlığında altın kaplama yapılan numunelerin 10 kV güç altında SEM görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 2.19’da SEM ölçümleri sırasında gerçekleştirilen işlemler gösterilmektedir.



Şekil 2.19 SEM analizi aşamaları

2.6 Bina Modelinde Yapı Bileşeni Olarak RT-28/Biyokömür Kompozitinin Kullanılması

Tez kapsamında elde edilen RT-28/biyokömür kompozitinin bina modelinde yapı bileşeni olarak kullanılabilmesi için 20mm kalınlığındaki XPS ısı yalıtım malzemesinden içten içe 100mmx100mmx100mm boyutlarında küp biçiminde bir model oluşturulmuştur. Bu amaçla öncelikle ısı yalıtım malzemesi Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde imal edilen 3 eksen CNC tezgahı kullanılarak istenilen boyutlarda Şekil 2.20’de gösterildiği gibi plakalara ayrılmıştır.



Şekil 2.20 XPS ısı yalıtım köpüğünün CNC ile kesme işlemi

Kesme işleminin ardından elde edilen plakalar birleştirilerek Şekil 2.21’de gösterilen bina modeli oluşturulmuştur. Plaka birleşim bölgeleri aralık kalmayacak biçimde mastik ile doldurulmuştur. Şekilde gösterilen bina modelinin bir duvarı açık bırakılmış olup karşı tarafındaki duvar ise sökülüp takılabilir olarak ayarlanmıştır.



Şekil 2.21 Bina modeli

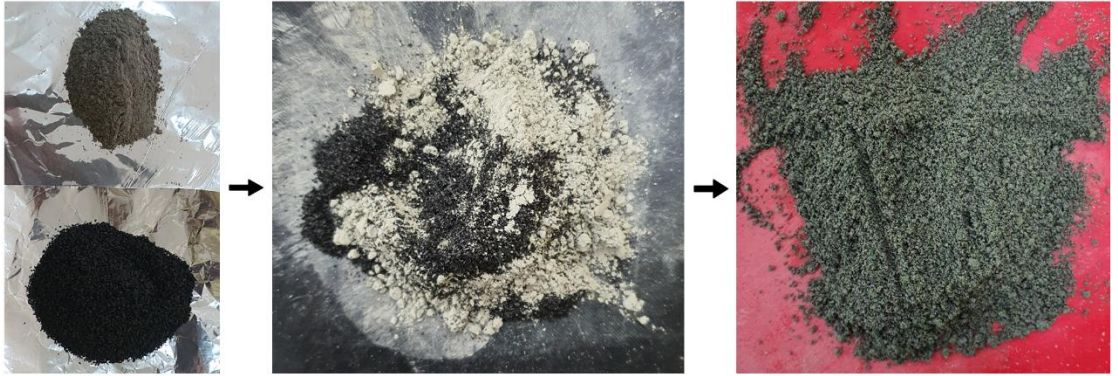
Bina modelinin açık bırakılan duvarı ise RT-28/biyokömür kompoziti katkılanmış çimento ile birleştirilmiş yalıtım plakasıyla kapatılmıştır. Başka bir ifadeyle, üretilen

RT-28/biyokömür kompozitinin, bina modeli duvarında kullanımı çimento harcı ile karıştırılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Çimento içerisine karıştırılabilecek RT-28/biyokömür kompozit miktarı üst sınırı, mukavemetli bir kompozit yapı elde edilebilecek şekilde deneme yoluyla kütlece %40 olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında ayrıca karşılaştırma amaçlı olarak kütlece %40 biyokömür/ çimento ve %100 çimento duvar modelleri de test edilmiştir. Çizelge 2.1’de kompozit duvar için kullanılan bileşen miktarları kütlece verilmiştir.

Çizelge 2.1 Duvar modeli kompozitlerinin ağırlıkça karışım oranları

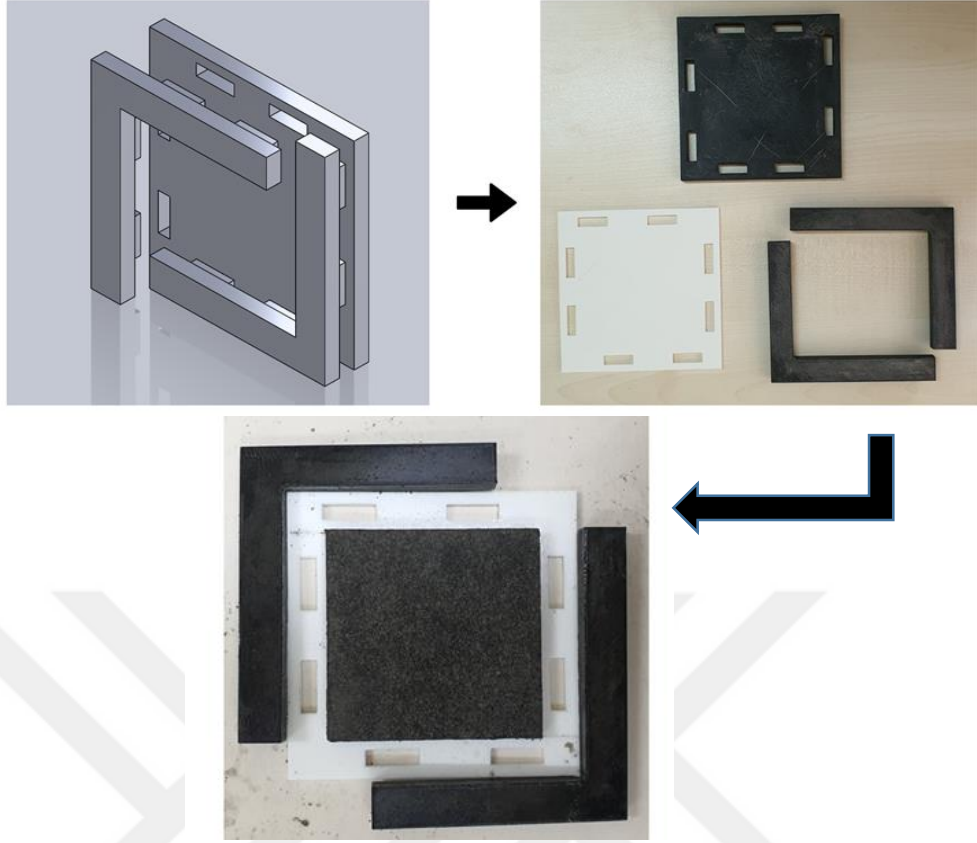
	Çimento (gr)	Biyokömür (gr)	RT-28/ biyokömür (gr)	Toplam (gr)
%100 çimento	100	-	-	100
%60 çimento / %40 biyokömür	18	12	-	30
%60 çimento / %40 RT-28/ biyokömür	36	-	24	60

Belirtilen miktarlardaki bileşenler yeterli miktardaki su ile karıştırılarak çimento harçları oluşturulmuştur (Şekil 2.22).



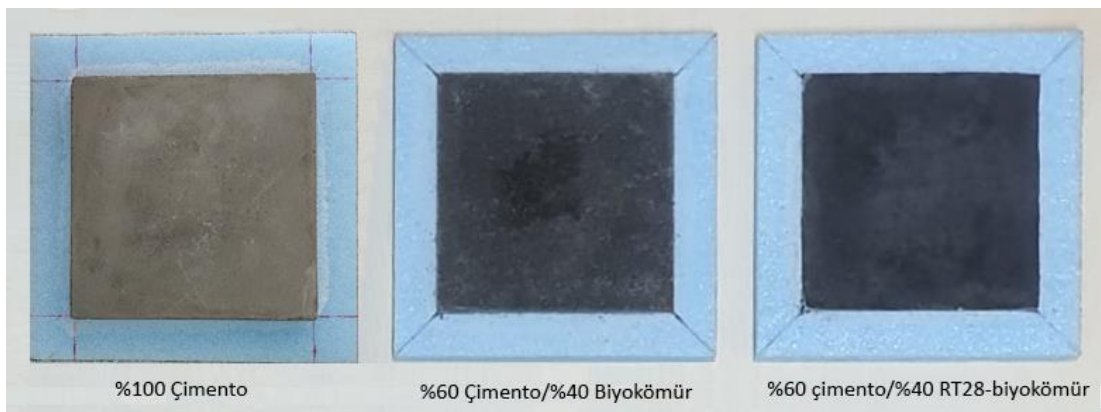
Şekil 2.22 Çimento - RT-28/ biyokömür kompoziti ve su karıştırılarak oluşturulan harç

Elde edilen harçlar, 3B yazıcı aracılığıyla üretilen ve Şekil 2.23’te gösterilen 100mm x 100mm x 10mm boyutuna sahip bir kalıp içerisine dökülerek kompozit duvarlar oluşturulmuştur.



Şekil 2.23 Kompozit duvar hazırlama aşamaları

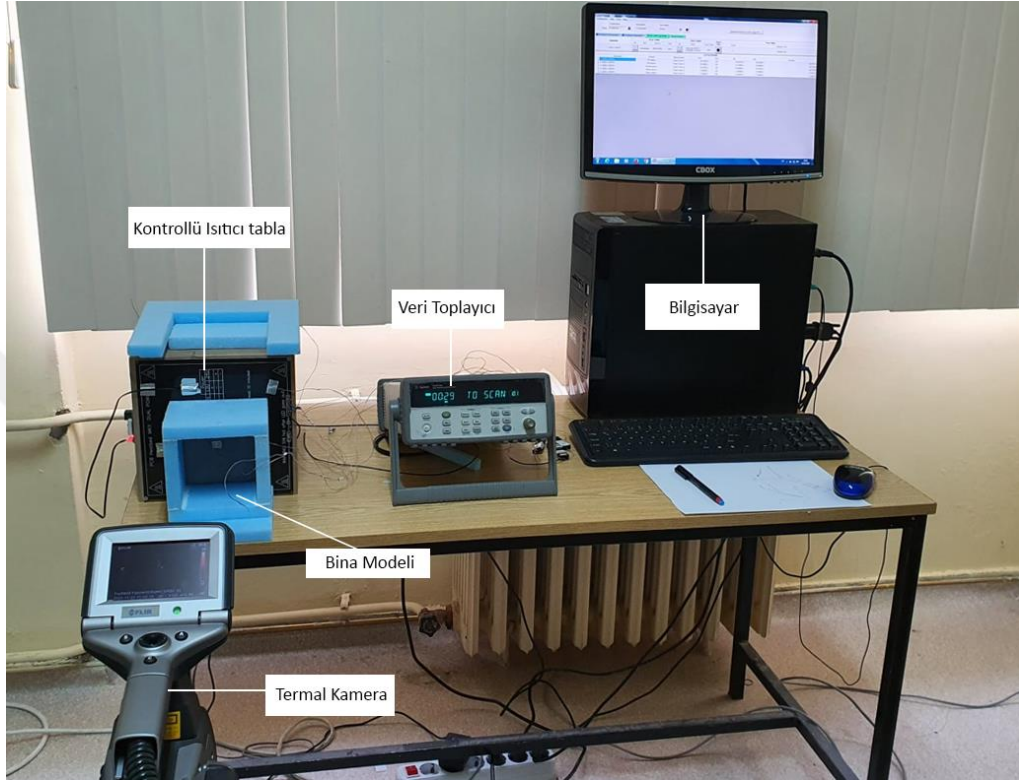
Elde edilen kompozit duvarlar Şekil 2.24’de gösterildiği gibi ısı yalıtım plakaları ile birleştirilmiştir. Böylelikle oluşturulan duvar bileşeni Şekil 2.21’deki bina modelinin açık bırakılan kısmına monte edilerek bina modeli tamamlanmıştır.



Şekil 2.24 Duvar bileşenleri numuneleri

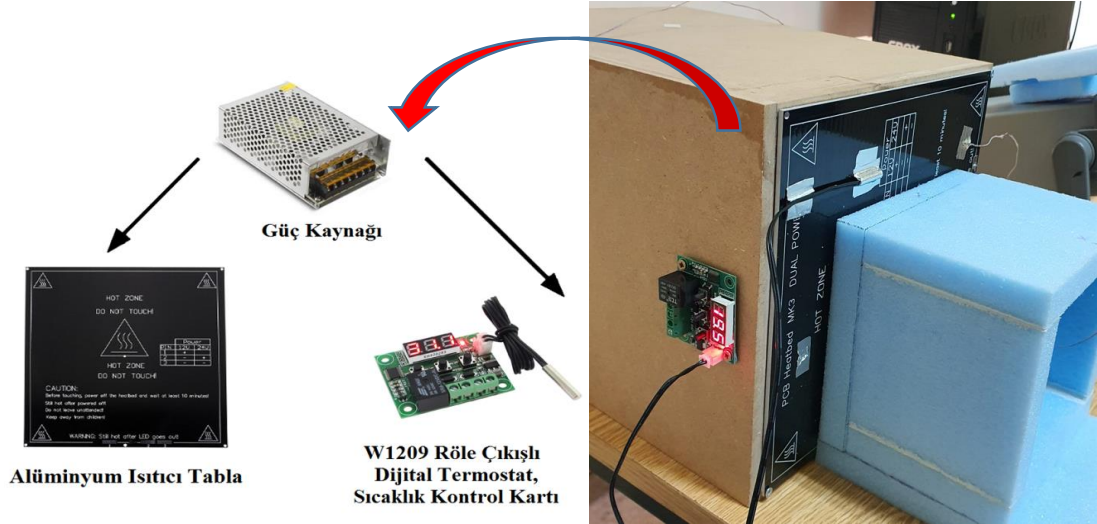
2.7 Performans ölçümleri için gerekli deneysel düzeneğin oluşturulması

Performans ölçümler Şekil 2.25'te gösterilen deneysel düzenek aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek; bina modeli, kontrollü ısıtıcı tabla, veri toplayıcı, termal kamera ve bilgisayardan oluşmaktadır.



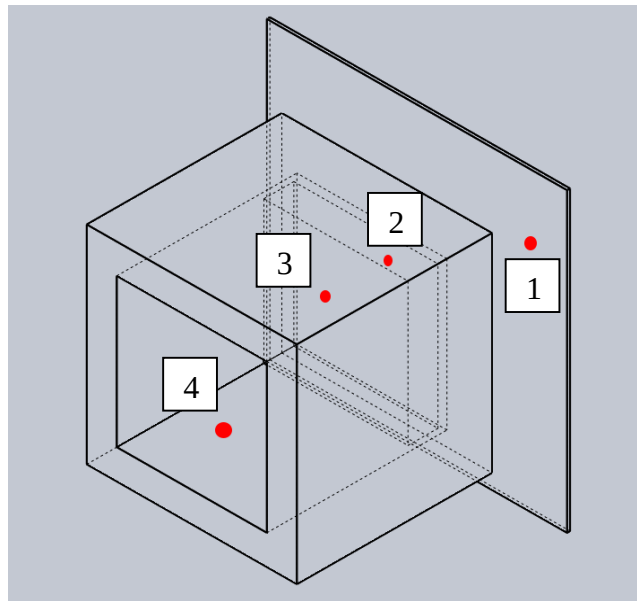
Şekil 2.25 Deneysel düzenek

Bina modelinde RT-28/biyokömür (veya biyokömür, saf çimento) kompozitinin katkılıandığı duvarın dış kısmına sıcak iklim koşullarını simüle etmek için kontrollü ısıtıcı tabla entegre edilmiştir. Şekil 2.26'da gösterilen 24V güç kaynağına sahip kontrollü ısıtıcı, alüminyum tablayı istenilen sıcaklıkta tutma işlemini W1209 dijital termostatu aracılığıyla sağlamaktadır. Performans testleri, kontrollü ısıtıcı tablayı kullanarak dış duvar sıcaklığının sabit tutulması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bu sabit sıcaklıklar, farklı sıcak iklim koşullarını simüle etmek adına 33°C, 43°C ve 53°C olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.26 Isıtıcı tabla ve kontrol ünitesi

Termal performans ölçümleri sıcaklık verilerinin zamana göre değişimlerini belirlemek suretiyle elde edilmiştir. Zamana göre sıcaklık değişimleri bina modelinin çeşitli bölgelerine yerleştirilen ± 0.5 °C hassasiyetine sahip J tipi ısıl çiftler aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Isıl çiftler ısıtıcı tabla yüzeyine (1), kompozit duvarın dış yüzeyine (2), kompozit duvarın iç yüzeyine (3) ve bina modelinin iç ortam merkezine (4) olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.27). Isıl çiftler aracılığı ile alınan sıcaklık verileri bir veri toplayıcı (Agilent 34970A, USA) aracılığıyla 30 saniye aralıklarla toplanarak bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 2.27 Bina modelinde ısıl çift yerleşkeleri

2.8 Termal kamera ölçümleri

Termal görüntüler Şekil 2.28’de gösterilen 0,08 °C hassasiyete sahip bir termal kamera (ThermaCam S65, FLIR Systems, İsveç) kullanılarak çekilmiştir.



Şekil 2.28 Deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan termal kamera

Bir nesneden yayılan kızılötesi radyasyonun, nesnenin sıcaklığının bir fonksiyonu olduğu bilinen bir olgudur. Termal kameralar nesne yüzeyinden yayılan kızılötesi radyasyon verilerini matris dizilimli sensörler ile algılayarak elektrik sinyallerine dönüştürmektedirler. Elde edilen sinyallerin işlenmesi sonucunda yüzeye ait sıcaklık haritası oluşturulmaktadır. Renk paletlerinin değişimi, emisivite ayarları veya sıcaklık aralığı değişimi, istenildiği gibi ayarlanabilir.

Farklı ısıtma ortamlarında bina modelindeki kompozit duvarın iç yüzey sıcaklık haritasını elde etmek termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera görüş doğrultusu, kompozit duvar normal yönünde konumlandırılmıştır. Termal kamera ile kompozit iç duvar arasında kalan dış duvar, sökülüp takılabilir olarak tasarlanmıştır. Bu sayede ölçümler sırasında anlık olarak dış duvar çıkarılarak termografik ölçümleri yapılmıştır. Termografik ölçümler 30 dakika aralıklarla yapılmıştır.

2.9 Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi, deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlardaki olası hataların değerlendirilmesiyle bir hata aralığı belirlemeyi amaçlamaktadır. Başka bir deyişle, sonuçların hassasiyeti ve güvenilirliği sorgulanmaktadır. Bu nedenle, gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda ölçülen verilerin ve hesaplanan sonuçların doğruluğunu göstermek için belirsizlik analizi yapmak büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmaya ait belirsizlik değerlerini elde etmek için Denklem 2.1'den yararlanılmıştır (Holman, 2012).

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad [2.1]$$

Burada R, bağımsız değişkenlerin ($x_{1,2,n}$) bir fonksiyonudur ve deneysel çalışmadan meydana gelir. $w_{R,1,2,n}$ bağımsız değişkenlerdeki belirsizlikler olarak alınabilir. Çalışmada kullanılan ısı çift ölçüm hassasiyeti $\pm 0.5\%$ 'tir. Isıl çiftler aracılığı ile alınan sıcaklık verilerini toplayan veri toplayıcının ölçüm hassasiyeti ise $\pm 0.1\%$ 'dir. Belirsizlik analizi sonucunda sıcaklık parametresine ait belirsizlik oranı Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Belirsizlik oranı

Parametre	Belirsizlik Oranı (%)
Sıcaklık (°C)	0,5

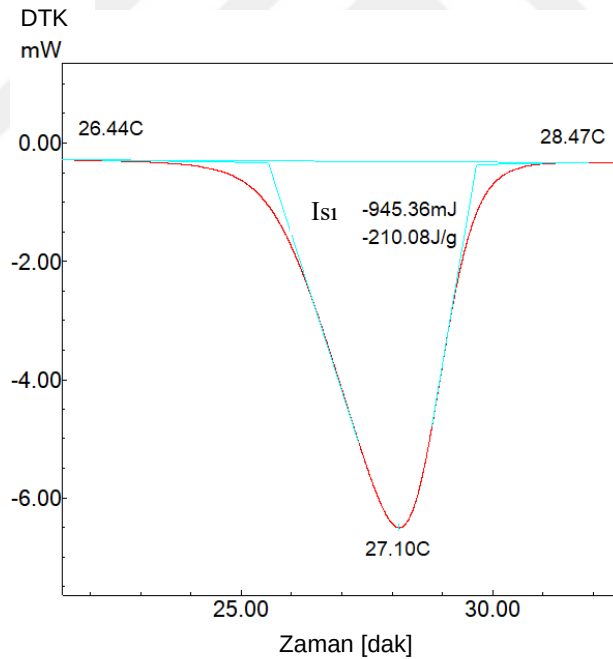
3. TERMAL KARAKTERİZASYON SONUÇLARI

Tez kapsamında doğadan kolaylıkla temin edilebilen organik malzemelerin gözeneklerine FDM hapsedilerek enerji depolama kabiliyetine sahip kompozit malzeme oluşturulması hedeflenmiştir. Elde edilen kompozitlerin çimento harcına karıştırılarak bina duvarında kullanılmasının konfor koşulları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle farklı tipte doğal gözenekli malzemeler arasından en uygun olanının belirlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu seçimi yapabilmek için gözeneklerine RT-28 hapsedilmiş farklı organik malzemelerin diferansiyel taramalı kalorimetre ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DTK) Ölçüm Sonuçları

3.1.1 RT-28/organik malzeme kompozitlerinin DTK ölçüm sonuçları

Öncelikle RT-28 organik faz değiştiren malzemenin diferansiyel taramalı kalorimetre (DTK) özellikleri belirlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 RT-28 için endoterm eğrisi

Ölçüm sonucunda elde edilen endoterm eğrisinin DSC-60 cihaza ait özel bir yazılım ile analiz edilmesi sonucunda erime başlangıç sıcaklığı (T_{eb}), erime pik sıcaklığı (T_{ep}), erime sonlanma sıcaklığı (T_{es}) ve erime gizli ısı (H_e) DTK özellikleri ölçülmüştür. Endoterm eğrisinin temel çizgiden ayrıldığı nokta erime başlangıç sıcaklığını (T_{eb}),

temel çizgiyle tekrar birleşme noktası erime sonlanma sıcaklığını (T_{es}), erime pikinin maksimum genlik noktası erime pik sıcaklığını (T_{ep}) ve erime piki ile temel çizgi arasında kalan alan ise erime gizli ısısını (H_e) vermektedir.

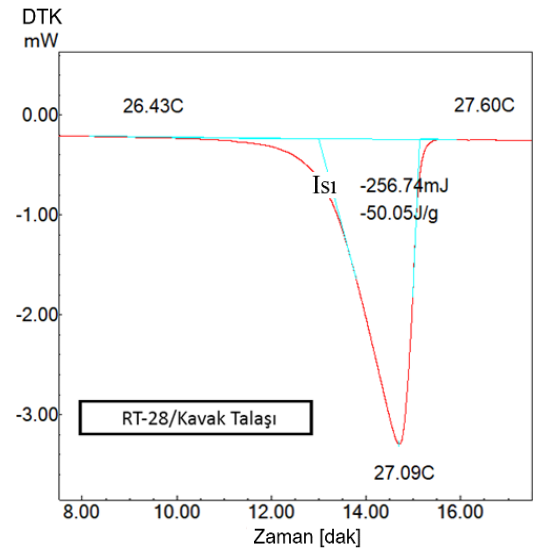
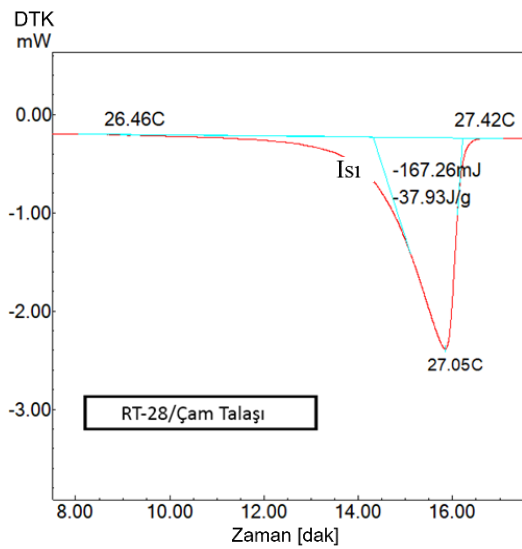
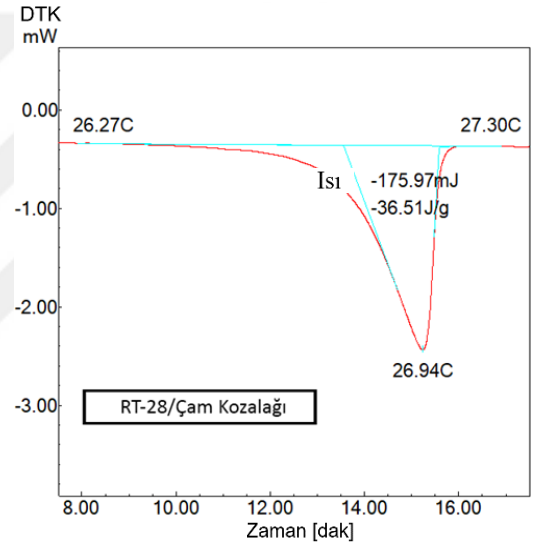
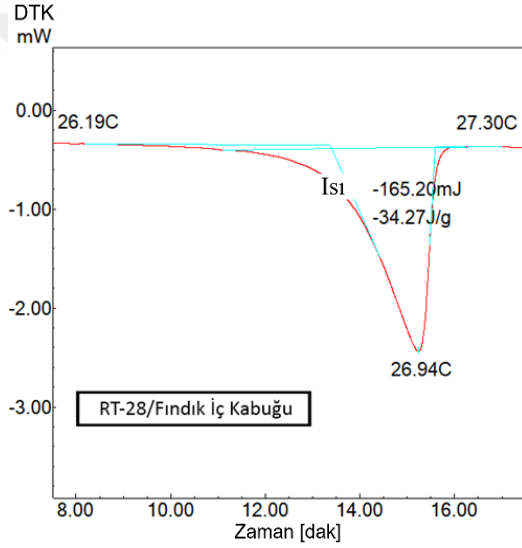
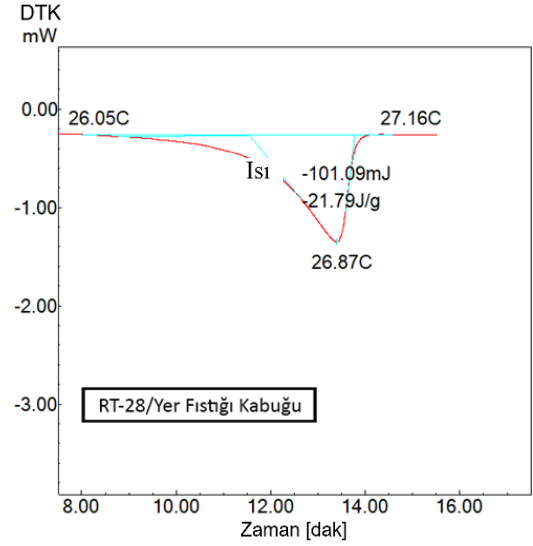
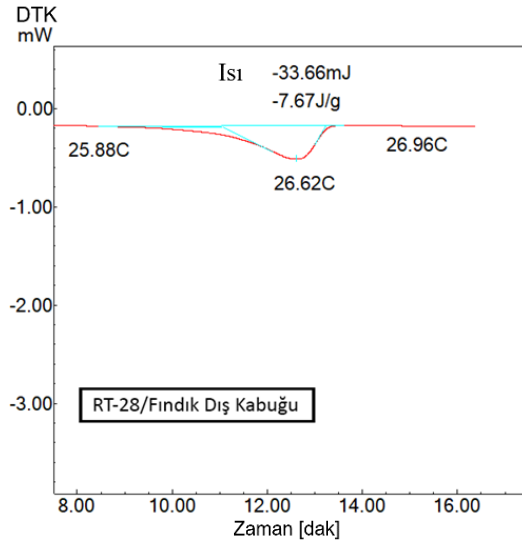
RT-28 için elde edilen endoterm eğrisinin analiz edilmesi sonucunda erime başlangıç sıcaklığı $T_{eb}=26,44$ °C, erime pik sıcaklığı $T_{ep}=27.1$ °C, erime sonlanma sıcaklığı ise $T_{es}=28.47$ °C olarak ölçülmüştür. Buna ilave olarak erime gizli ısısı ise $H_e=210,08$ J/g olarak belirlenmiştir. Ölçülen değerler Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 RT-28 DTK özellikleri

Malzeme	T_{eb} (°C)	T_{ep} (°C)	T_{es} (°C)	H_e (J/g)
RT-28	26.44	27.10	28.47	210.08

Altı farklı organik malzeme gözeneklerine RT-28 hapsedilmesiyle elde edilen RT-28/Organik malzeme kompozitlerine ait endoterm eğrileri Şekil 3.2’de verilmiştir. Genel olarak T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıklarının çok fazla bir değişime uğramadığı belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle erime sıcaklıklarının malzemeden bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

RT-28/Fındık dış kabuğu kompoziti için T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 25.88°C, 26.62°C ve 26.96°C olarak ölçülmüştür. Aynı kompozit için H_e ise 7.67J/g olarak belirlenmiştir. Buna karşılık fındık iç RT-28/Fındık iç kabuğu kompoziti için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.19 °C, 26.94 °C, 27.30 °C ve 34.27 J/g olarak ölçülmüştür. Fındık iç kabuğunun yüksek yüzey alanına sahip olmasına paralel olarak daha yüksek gözenekliliğe sahip olması bu farklılığın başlıca nedeni olabilir. RT-28/Yer fıstığı kabuğu kompoziti için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.05 °C, 26.87 °C, 27.16 °C ve 21.79 J/g olarak ölçülmüştür. RT-28/Çam kozalağı kompoziti için T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 26.27°C, 26.94°C ve 27.30°C olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte RT-28/Çam kozalağı kompoziti için H_e 36.51J/g olarak belirlenmiştir. Çam talaşı kullanılarak elde edilen kompozit için ise T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.46 °C, 27.05°C, 27.42 °C ve 37.93 J/g olarak ölçülmüştür. Son olarak RT-28/kavak talaşı kompoziti için gerçekleştirilen DTK ölçümleri sonucunda T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıklarının sırasıyla 26.43°C, 27.09°C ve 27.60°C olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte RT-28/kavak talaşı kompoziti için elde edilen H_e değeri 50.05 J/g olarak ölçülmüştür. Elde edilen tüm ölçüm sonuçları Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.



Şekil 3.2 Çeşitli organik malzemelerin endoterm eğrileri

Çizelge 3.2 Çeşitli organik malzemelerin DTK sonuçları

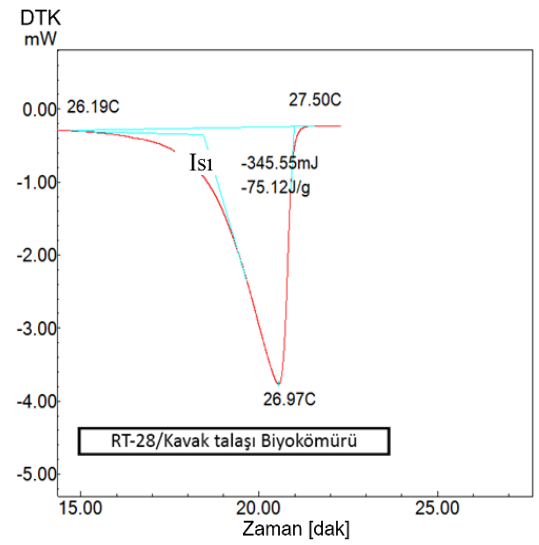
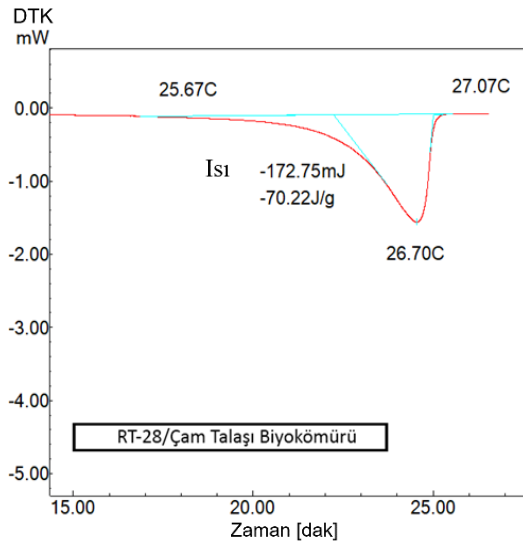
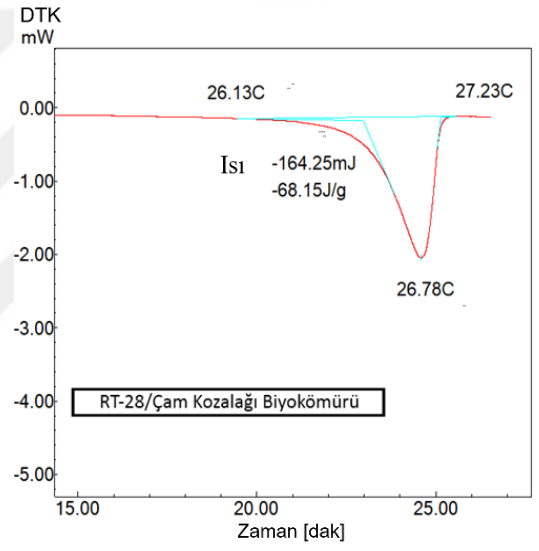
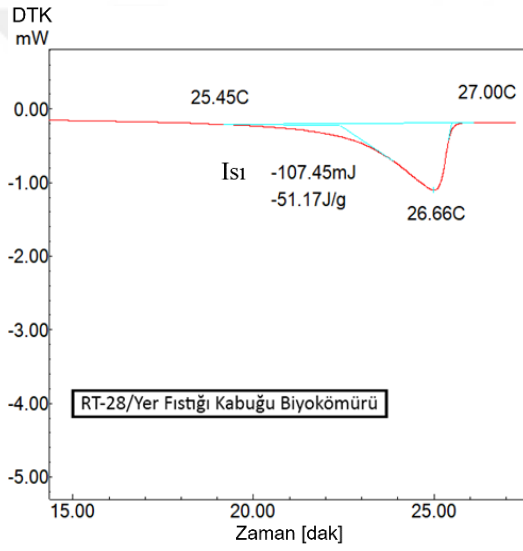
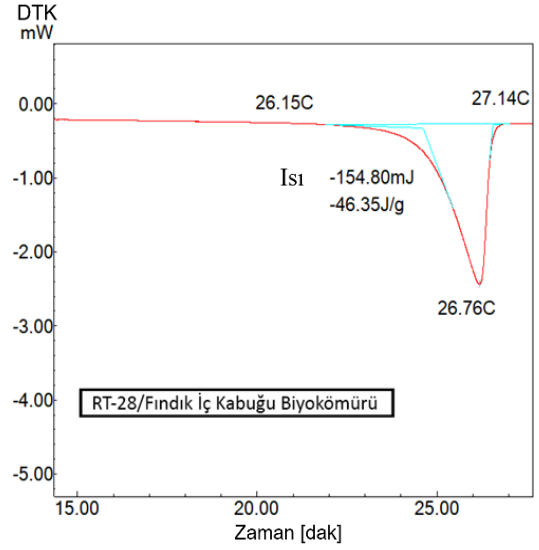
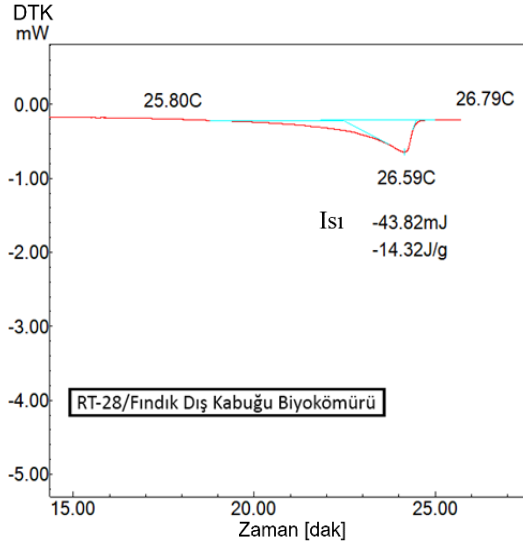
Malzeme	T _{eb} (°C)	T _{ep} (°C)	T _{es} (°C)	H _e (J/g)
RT-28/Fındık Dış Kabuğu	25.88	26.62	26.96	7.67
RT-28/Yer Fıstığı Kabuğu	26.05	26.87	27.16	21.79
RT-28/Fındık İç Kabuğu	26.19	26.94	27.30	34.27
RT-28/Çam Kozalağı	26.27	26.94	27.30	36.51
RT-28/Çam Talaşı	26.46	27.05	27.42	37.93
RT-28/Kavak Talaşı	26.43	27.09	27.60	50.05

Görüleceği üzere farklı tipteki gözenekli organik malzemelerin erime sıcaklıkları malzeme türüne göre değişmemesine rağmen, erime gizli ısıları önemli farklılıklar göstermektedir. Bu durum malzeme gözenekliliğinin farklılığıyla ilişkilendirilebilir. Başka bir ifadeyle gözeneklilik oranı fazla malzemeye daha fazla RT-28 hapsedilebilmesi nedeniyle daha yüksek gizli ısıya ulaşılabilir. Sonuç olarak RT-28/kavak talaşı kompozitinin en yüksek gizli ısıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumda kavak talaşının diğer malzemelere göre bünyesine RT-28 emdirilme açısından daha uygun gözenekli yapıya sahip olduğu sonucuna varılabilir.

3.1.2 RT-28/biyokömür malzeme kompozitlerinin DTK ölçüm sonuçları

Organik malzemelerin piroliz işlemi sonucunda biyokömür haline getirilmesi durumunda gözeneklilik yapılarının daha iyileştiği bilinmektedir. Bu bilgiden yola çıkılarak mevcut organik malzemelerin biyokömür haline getirilmesi durumunda enerji depolama kabiliyeti daha yüksek kompozit malzemeler elde edilebileceği açıktır. Her ne kadar bir önceki aşamada kavak talaşının en iyi aday olduğu belirlenmiş olsada organik malzemelerin piroliz sürecinden nasıl etkileneceği bilinmediğinden tüm organik malzemelerin biyokömür haline getirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Altı farklı organik malzemenin herbiri için piroliz işlemi gerçekleştirilerek farklı biyokömürler elde edilmiştir. Piroliz işlemi oda sıcaklığından 700°C maksimum sıcaklığa 10 °C/dk ısıtma hızında çıkılarak ve maksimum sıcaklıkta 60 dakika beklenerek gerçekleştirilmiştir. Altı farklı tipteki organik malzemedan elde edilen biyokömür gözeneklerine vakum emdirme işlemi uygulanarak RT-28 hapsedilmiştir. Elde edilen enerji depolama kabiliyetine sahip RT-28/biyokömür kompozitlerine ait endoterm eğrileri Şekil 3.3'te verilmiştir



Şekil 3.3 Çeşitli biyokömür malzemelerin endoterm eğrileri

RT-28/Fındık dış kabuğu biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 25.80°C, 26.59°C ve 26.79°C olarak ölçülmüştür. Aynı kompozit için H_e ise 14.32 J/g olarak belirlenmiştir. Görüldüğü üzere fındık dış kabuğuna kıyasla biyokömür haline getirilmiş fındık dış kabuğunun gizli ısısı %86.7 artmaktadır. Fındık iç kabuğundan sentezlenen biyokömür gözeneklerine RT-28 emdirilerek elde edilen kompozit için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.15 °C, 26.76 °C, 27.14 °C ve 46.35 J/g olarak ölçülmüştür. Biyokömür kullanılması durumunda enerji depolama kabiliyetinin %112.7 arttığı belirlenmiştir. RT-28/Yer fıstığı kabuğu biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 25.45 °C, 26.66 °C, 27.00 °C ve 51.17 J/g olarak ölçülmüştür. Yer fıstığı kabuğuna kıyasla biyokömür haline getirilmiş yer fıstığı kabuğunun gizli ısısının %134.8 arttığı görülmektedir. Benzer biçimde RT-28/Çam kozalağı biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 26.13°C, 26.78°C ve 27.23°C olarak erime gizli ısısı ise 68.15 J/g olarak ölçülmüştür. Ham çam kozalağı ile karşılaştırıldığında RT-28/çam kozalağı biyokömürünün gizli ısısında %86.7 oranında artış gözlemlenmiştir. Çam talaşı biyokömürü kullanılarak elde edilen kompozit için ise T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 25.67 °C, 26.70 °C, 27.07 °C ve 70.22 J/g olarak ölçülmüştür. RT-28/Çam kozalağı biyokömür kompozitinin gizli ısısının RT-28/Çam kozalağı kompozitine kıyasla %85.1 arttığı tespit edilmiştir. Son olarak RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompoziti için gerçekleştirilen DTK ölçümleri sonucunda T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıklarının sırasıyla 26.19 °C, 26.97 °C ve 27.50 °C olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte RT-28/kavak talaşı kompoziti için elde edilen H_e değeri 75.12 J/g olarak ölçülmüştür. Kavak talaşının biyokömür haline getirilmesi ile elde edilen RT-28/biyokömür kompozitinin enerji depolama kapasitesi %50.1 arttığı görülmüştür. Elde edilen tüm ölçüm sonuçları Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3 Çeşitli biyokömür malzemelerin DTK sonuçları

Malzeme	T_{eb} (°C)	T_{ep} (°C)	T_{es} (°C)	H_e (J/g)
RT-28/Fındık Dış Kabuğu Biyokömürü	25.80	26.59	27.00	14.32
RT-28/Fındık İç Kabuğu Biyokömürü	26.15	26.76	27.14	46.35
RT-28/Yer Fıstığı Kabuğu Biyokömürü	25.45	26.66	27.00	51.17
RT-28/Çam Kozalağı Biyokömürü	26.13	26.78	27.23	68.15
RT-28/Çam Talaşı Biyokömürü	25.67	26.70	27.07	70.22
RT-28/Kavak Talaşı Biyokömürü	26.19	26.97	27.50	75.12

Çizelge 3.3 incelenecek olursa, genel olarak T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıklarının kullanılan biyokömür türünden etkilenmediği görülmektedir. Çizelge 3.4 ise çalışmada kullanılan organik malzemeler ve biyokömür hallerinin RT-28 depolama kabiliyetleri ve elde edilen iyileştirmeler gizli ısılar açısından karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.4 Biyokömür haline getirilen organik malzemelerin yüzdelik gizli ısı iyileştirmeleri

Malzeme	$H_e(J/g)$ Ham	$H_e(J/g)$ Biyokömür	İyileştirme Yüzdesi (%)
RT-28/Fındık Dış Kabuğu	7.67	14.32	86.7
RT-28/Fındık İç Kabuğu	34.27	46.35	112.7
RT-28/Yer Fıstığı Kabuğu	21.79	51.17	134.8
RT-28/Çam Kozalağı	36.51	68.15	86.7
RT-28/Çam Talaşı	37.93	70.22	85.1
RT-28/Kavak Talaşı	50.05	75.12	50.1

Ham organik malzemelerin biyokömür haline getirilmeleri sonucunda vakum emdirme işlemi ile daha fazla gizli ısı depolayabileceği belirlenmiştir. Başka bir deyişle organik malzemelerin biyokömür haline getirilmesi durumunda bünyelerine daha fazla FDM alabilmektedirler. Bununla birlikte biyokömür haline getirilmiş malzemelere RT-28 emdirilmesi durumunda ham malzemeye kıyasla gizli ısılarda farklı oranlarda iyileştirmeler elde edilmiştir. Bu durum doğrudan gözenekliliğin artmasıyla ilgili olduğu gibi, aynı zamanda malzeme yüzey gerilimi, FDM'nin malzeme yüzeyi ile oluşturduğu temas açısı gibi parametrelere de bağlıdır.

Her ne kadar kavak talaşının biyokömür haline getirilmesi durumunda gizli ısı iyileştirmesi daha az artmış olsa da (başlangıçta ham kavak talaşının daha gözenekli olması nedeniyle) en yüksek gizli ısı değeri 75.12J/g ile RT-28/kavak talaşı biyokömürü için elde edilmiştir. Buna ilave olarak bol miktarda bulunması, kolay temin edilebilmesi ve ekonomik olması gibi nedenlerden dolayı çalışmaya biyokömür ana malzemesi olarak kavak talaşı ile devam edilmesi kararlaştırılmıştır.

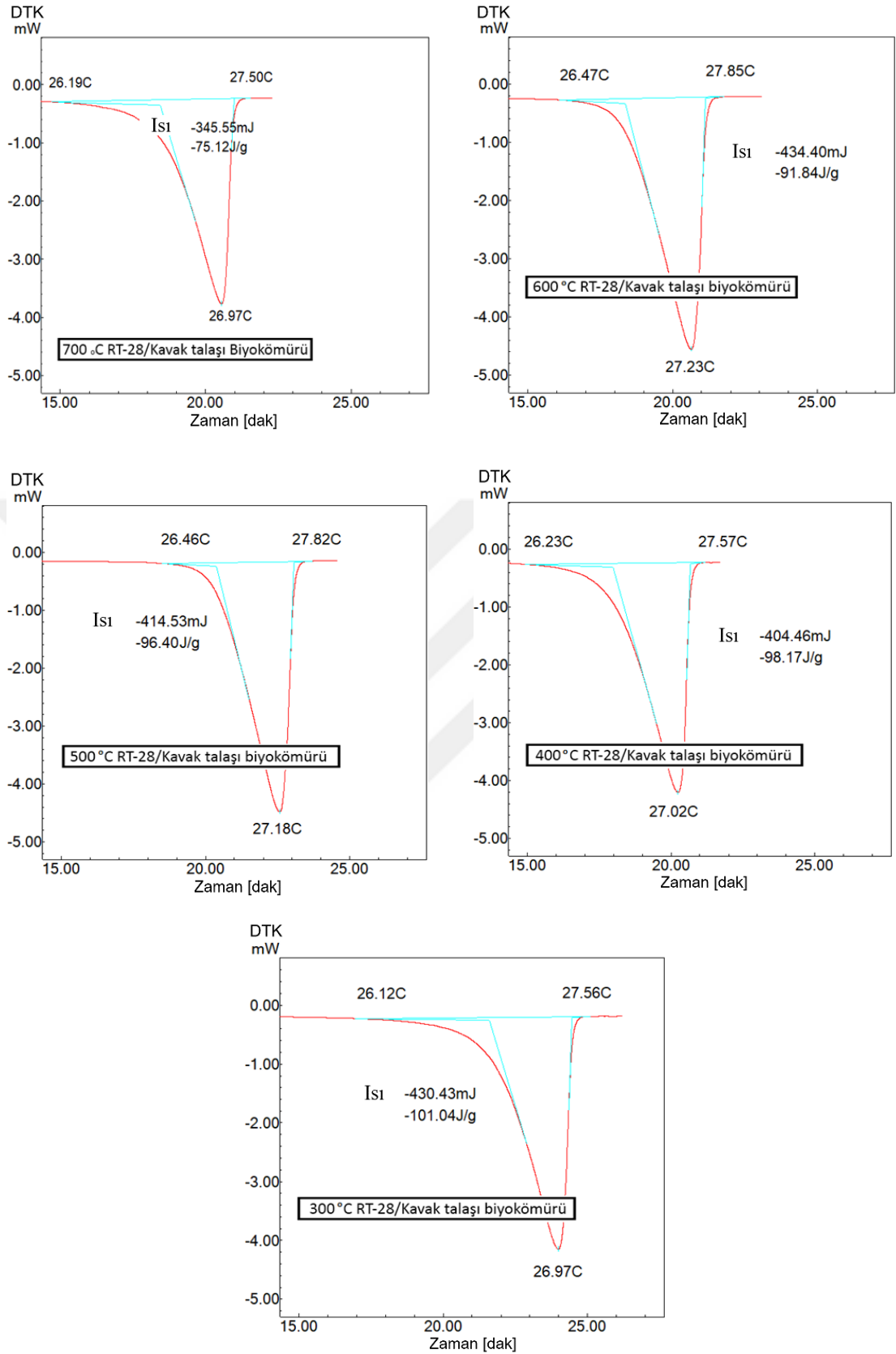
3.1.3 Kavak Talaşı Biyokömürünün Farklı Piroliz Koşullarında İyileştirilmesine Yönelik DTK Ölçüm Sonuçları

Bir önceki aşamada kavak talaşı malzemesinin biyokömüre dönüştürülmesi işleminde piroliz koşulları olarak 10°C/dk ısıtma hızı, 700°C maksimum sıcaklık ve 60 dakika maksimum sıcaklıkta bekleme süresi kullanılmıştır. Bununla birlikte daha yüksek gizli ısıya sahip RT-28/Kavak talaşı biyokömürü elde edebilmek için piroliz koşullarının değiştirilmesinin gözeneklilik yapısı üzerindeki etkilerinin araştırılması gerekmektedir. Bu amaçla kavak talaşı için maksimum sıcaklık, ısıtma hızı ve bekletme süreleri değiştirilerek farklı piroliz koşullarında biyokömürler sentezlenmiştir. Elde edilen biyokömürler vakum emdirme işlemi ile RT-28 emdirilerek RT-28/kavak talaşı biyokömür kompozitlerine dönüştürülmüştür. RT-28/Kavak talaşı biyokömürlerinin DTK ölçümleri ile karakterizasyonu elde edilmiştir.

3.1.3.1 Farklı Sıcaklık Koşullarında Elde Edilen RT-28/Biyokömür Kompozitlerinin DTK Ölçüm Sonuçları

Isıtma hızı (10°C/dak) ve bekletme süresi (60 dakika) sabit tutulmak kaydıyla maksimum piroliz sıcaklığı 700°C, 600°C, 500°C, 400°C ve 300°C olacak biçimde değiştirilerek biyokömür sentezleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen biyokömürlere vakum emdirme işlemi ile elde edilen RT-28/biyokömür kompozitlerinin DTK ölçümleri Şekil 3. 4'te verilmiştir.

Maksimum piroliz sıcaklığının 700 °C olarak belirlenmesi durumunda RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 26.19 °C, 26.97 °C ve 27.50°C olarak ölçülmüştür. Aynı koşullar altında erime gizli ısı ise 75.12 J/g olarak belirlenmiştir. Maksimum sıcaklığın 600°C'ye düşürülmesi durumunda RT-28 emdirilen kavak talaşı biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.47 °C, 27.23 °C, 27.85 °C ve 91.84 J/g olarak ölçülmüştür. Görüleceği üzere 600 °C piroliz sıcaklığı ile elde edilen biyokömüre RT-28 emdirilerek elde edilen biyokompozitin, 700 °C piroliz sıcaklığında üretilen biyokömüre emdirilmiş RT-28 ile elde edilen kompozite kıyasla gizli ısı enerji depolama kabiliyetinin yaklaşık olarak %22.3 oranında arttığı belirlenmiştir. Piroliz işleminin maksimum sıcaklığının 500°C'ye ayarlanması halinde sentezlenmiş olan kavak biyokömürü için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.46 °C, 27.18 °C, 27.82 °C ve 96.40 J/g olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.4 Farklı sıcaklıklarda RT-28/Kavak biyokömür malzemesinin endoterm eğrileri

500 °C sıcaklıkta üretilen biyokömüre RT-28 emdirilmesi ile elde edilen biyokömürün; 700 °C piroliz sıcaklığında üretilerek RT-28 emdirilmesiyle elde edilen kompozite göre % 28,3, 600 °C piroliz sıcaklığında üretilen kompozite göre de %4 oranında daha fazla gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Benzer biçimde maksimum piroliz sıcaklığı 400 °C olan RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 26.23°C, 27.02°C ve 27.57 °C olarak ve erime gizli ısı ise 98.17 J/g olarak ölçülmüştür. Son olarak 300 °C sıcaklıkta üretilen RT-28/kavak talaşı kompoziti için gerçekleştirilen DTK ölçümleri sonucunda T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıklarının sırasıyla 26.12 °C, 26.967 °C ve 27.56 °C olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte 300 °C RT-28/kavak talaşı kompoziti için elde edilen H_e değeri 101.04 J/g olarak ölçülmüştür. 300 °C'nin altında biyokömür sentezi gerçekleştirilemediği için bu sıcaklığın altına inilmemiştir. Elde edilen tüm ölçüm sonuçları Çizelge 3.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.5 Farklı sıcaklık koşullarında piroliz edilen biyokömlere RT-28 emdirilmesiyle üretilen biyokömür kompozitlerinin DTK sonuçları

Malzeme	T_{eb} (°C)	T_{ep} (°C)	T_{es} (°C)	H_e (J/g)
700 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	26.19	26.97	27.50	75.12
600 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	26.47	27.23	27.85	91.84
500 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	26.46	27.18	27.82	96.40
400 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	26.23	27.02	27.57	98.17
300 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	26.12	26.97	27.56	101.04

Ham organik malzemelerde olduğu gibi farklı biyokömürler için de erime sıcaklıklarının piroliz maksimum sıcaklığından bağımsız olduğu görülmektedir. Buna neden olarak biyokömür ile RT-28 arasında herhangi bir etkileşim olmaması ve RT-28'in biyokömür gözenekleri içerisinde ayrık bir malzeme olarak hapsedilmesi gösterilebilir. Buna karşılık elde edilen RT-28/biyokömür kompozitlerinin gizli ısı değerlerinin maksimum sıcaklık ile ters orantılı olarak değiştiği belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle piroliz maksimum sıcaklığının düşürülmesinin gizli ısı değerlerinin iyileştirilmesine neden olduğu söylenebilir. Piroliz maksimum sıcaklığına bağlı olarak kompozit gizli ısılarında elde edilen iyileştirmeler, 700 °C sıcaklığındaki gizli ısı değeri ile karşılaştırılarak Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Maksimum sıcaklığa bağlı olarak kompozit gizli ısılarında elde edilen iyileştirmeler

Maksimum Sıcaklık (°C)	H _e (J/g) Biyokömür	İyileştirme Yüzdesi (%)
700	75.12	-
600	91.84	22.3
500	96.40	28.3
400	98.17	30.7
300	101.04	34.5

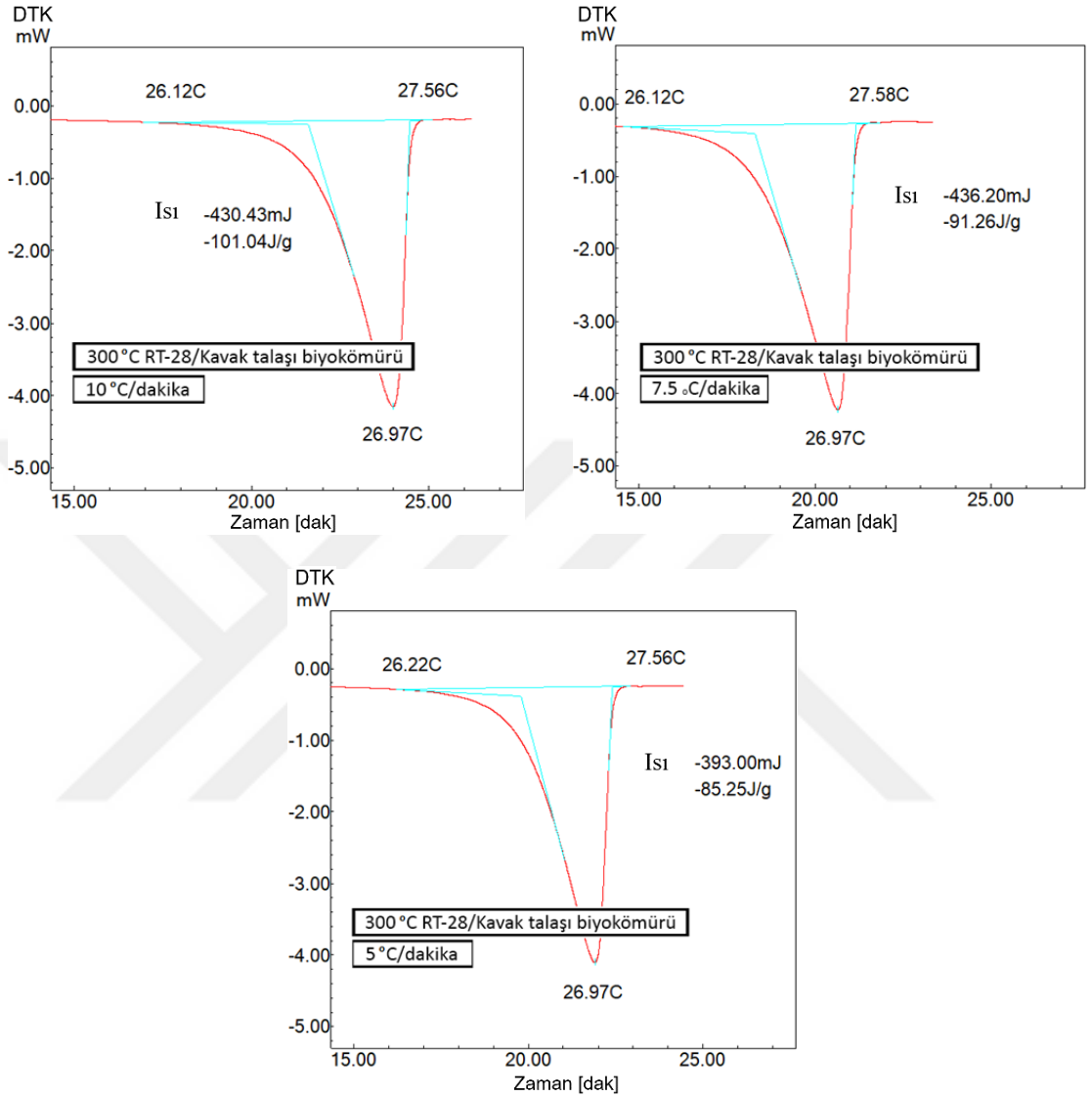
Piroliz maksimum sıcaklığının düşmesi sonucunda biyokömür yüzey alanı azalmaktadır. Bu durum biyokömür üzerindeki mikro gözenek yüzdesinin azalması buna karşılık mezo gözenek yüzdesinin artmasıyla ilişkilidir (Muzyka vd., 2023). Vakum emdirme işlemi sırasında yüzey gerilimi, temas açısı gibi parametrelere bağlı olarak mikro gözeneklere FDM emdirme işlemi daha zor gerçekleşmektedir. Mezo gözenekli yapıya dönülmesi durumunda ise tam tersi olarak vakum emdirme işlem performansının arttığı söylenebilir. Sonuç olarak piroliz maksimum sıcaklığının düşmesine bağlı olarak biyokömür üzerindeki mezo gözeneklere daha fazla RT-28 emdirilmesi sonucunda gizli ısı değerlerinde %20-%35 aralığında iyileştirmeler elde edilmiştir.

3.1.3.2 Farklı Isıtma Hızı Altında Elde Edilen RT-28/Biyokömür Kompozitlerinin DTK Ölçüm Sonuçları

Bir önceki aşamada kavak talaşı malzemesinin biyokömüre dönüştürülmesi işleminde piroliz koşulları olarak 10°C/dk ısıtma hızı ve 60 dakika maksimum sıcaklıkta bekleme süresi sabit tutulmak kaydıyla en yüksek gizli ısı depolama kapasitesinin 300 °C sıcaklıkta olduğu görülmüştür.

Piroliz işlemi sırasındaki ısıtma hızının biyokömür oluşumuna etkilerini belirlemek için maksimum sıcaklık ve bekletme süresi gibi parametreler sabit tutularak biyokömür sentezlenmiştir. Maksimum piroliz sıcaklığı 300 °C ve bekleme süresi 60 dakika olmak kaydıyla diğer bir piroliz parametresi olan ısıtma hızı 10 °C/dk, 7.5 °C/dk ve 5 °C/ dk olmak üzere farklı ısıtma hızlarında kavak talaşından biyokömür sentezi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan mevcut fırında maksimum 10°C/dak ısıtma hızı kullanılabildiğinden daha yüksek ısıtma hızlarına çıkılamamıştır. Üretilen biyokömürlerin gözeneklerine vakum emdirme yöntemi ile RT-28

hapsedilerek yeni kompozitler elde edilmiştir. Elde edilen RT-28/biyokömür kompozitlerine ait endoterm eğrileri Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Farklı ısıtma hızlarında üretilen biyokömlere RT-28 emdirilerek elde edilen kompozitlerin endoterm eğrileri

Maksimum piroliz sıcaklığı 300 °C, ısıtma hızı 10 °C/dk, bekleme süresi 60 dakika koşullarında üretilen biyokömüre RT-28 hapsedilmesiyle elde edilmiş kompozitlere ait T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 26.12 °C, 26.97 °C ve 27.56 °C olarak ölçülmüştür. Bahsi geçen kompozit için H_e ise 101.04 J/g olarak belirlenmiştir. Maksimum sıcaklık ve bekleme süresini aynı tutarak ısıtma hızının 7.5/dk'ya düşürülmesi durumunda elde edilen RT-28/biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.12 °C, 26.97 °C, 27.58 °C ve 91.26 J/g olarak ölçülmüştür.

Aynı koşullar altında ısıtma hızının daha da düşürülerek 5°C/dk olması durumunda elde edilen kompozitler için gerçekleştirilen DTK ölçümleri sonucunda T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.22 °C, 26.97 °C, 27.56 °C ve 85.25 J/g olarak ölçülmüştür. Elde edilen tüm ölçüm sonuçları Çizelge 3.7’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.7 Farklı ısıtma hızları uygulanarak üretilen biyokömürlerden elde edilen RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompozitlerinin DTK sonuçları

Isıtma Hızı (°C/dk)	T_{eb} (°C)	T_{ep} (°C)	T_{es} (°C)	H_e (J/g)
10	26.12	26.97	27.56	10.104
7.5	26.12	26.97	27.58	91.26
5	26.22	26.97	27.56	85.25

Daha önceki bulgulara benzer olarak piroliz sürecinde farklı ısıtma hızları kullanılmasının erime sıcaklıkları üzerinde önemli bir etki oluşturmadığı görülmektedir. Buna neden olarak biyokömür ile RT-28 arasında herhangi bir kimyasal etkileşim olmaması ve RT-28’in biyokömür gözenekleri içerisinde kendine has özelliklerini göstermeye devam etmesi gösterilebilir. Buna karşılık kompozit gizli ısı değerlerinin ısıtma hızına bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Öyle ki ısıtma hızı düştükçe erime gizli ısı da düşmektedir. Başka bir ifadeyle ısıtma hızı ile erime gizli ısının değişiminin doğru orantılı olduğu söylenebilir.

7.5 °C/dk ısıtma hızında üretilen biyokömüre RT-28 emdirilmesi ile elde edilen kompozitin gizli ısının, 10 °C/dk ısıtma hızında üretilerek RT-28 emdirilen kompozite göre % 10.8 oranında düştüğü belirlenmiştir. Benzer biçimde 10 °C/dk ısıtma hızında üretilen kompozitin ise 5 °C/dk ısıtma hızında üretilen biyokömüre emdirilen RT-28 ile oluşturulan kompozite göre de %18.5 oranında daha fazla gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Piroliz ısıtma hızına bağlı olarak kompozit gizli ısılarında elde edilen değişimler, 10°C/dk ısıtma hızı ile karşılaştırılarak Çizelge 3.8’da verilmiştir.

Çizelge 3.8 Farklı ısıtma hızlarında üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilerek elde edilen kompozitlerin yüzdelik gizli ısı iyileştirmeleri

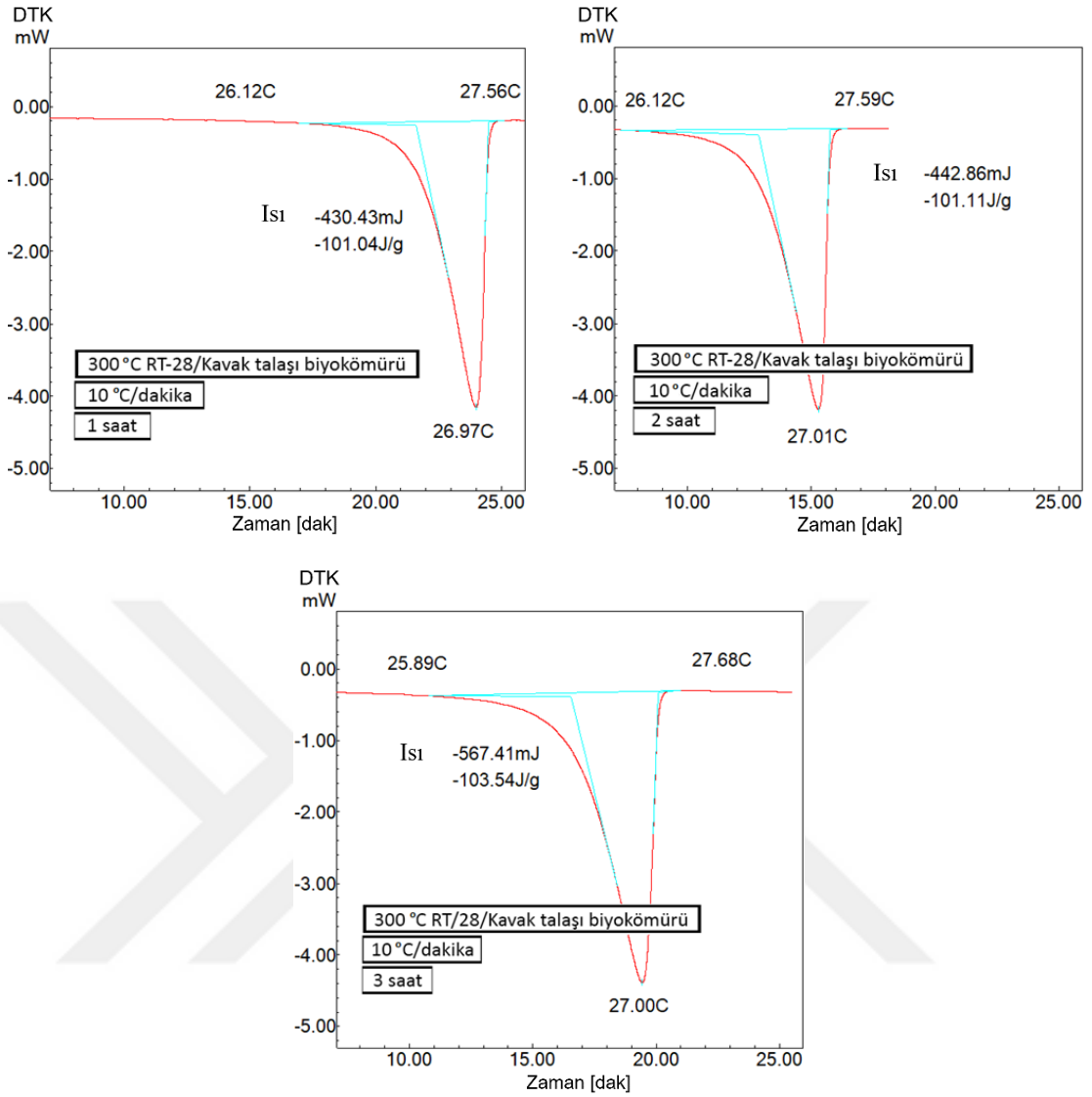
Isıtma Hızı (°C/dk)	He(J/g) Biyokömür	İyileştirme Yüzdesi (%)
10	101.04	-
7.5	91.26	-10.7
5	85.25	-18.5

Bu durum, ısıtma hızının azalmasıyla, biyokömür gözeneklere hapsedilen RT-28 miktarının azalmasıyla anlamına gelmektedir. Bu ise ısıtma hızının azalmasıyla FDM hapsedmeye uygun biyokömür gözenekliliğinin bozulmasına bağlıdır.

Muzyka vd. (2023) yapmış oldukları çalışmada ısıtma hızının artmasının biyokömür yüzeyindeki mikro gözeneklerin mezo gözeneklere dönüşmesi üzerinde etkili olduğunu bildirmişlerdir. Daha önce de bahsedildiği gibi mikro gözeneklere nazaran mezo gözeneklere vakum emdirme yoluyla daha etkin bir biçimde FDM hapsedilebilmektedir.

3.1.3.3 Farklı Bekletme Süresi Koşullarında Elde Edilen RT-28/Biyokömür Kompozitlerinin DTK Ölçüm Sonuçları

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar sonucunda en yüksek gizli ısı değeri elde edilen kompozit için kullanılan biyokömürün maksimum piroliz sıcaklığı 300 °C, ısıtma hızı ise 10 °C/dk olarak belirlenmiştir. Bir diğer piroliz parametresi olan bekletme süresinin biyokömür oluşumuna etkilerini belirlemek için maksimum sıcaklık ve ısıtma hızı gibi parametreleri yukarıdaki gibi sabit tutularak biyokömür sentezi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla maksimum piroliz sıcaklığı 300 °C, ısıtma hızı 10 °C/dk tutulmak kaydıyla; bekletme süresi sırasıyla 60,120 ve 180 dakika olmak üzere üç farklı koşulda biyokömür sentezlenmiştir. Elde edilen biyokömürlere vakum emdirme işlemi ile RT-28/biyokömür kompozitleri üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin karakterizasyonları DTK ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. DTK ölçümleri sonucunda üç farklı kompozit için elde edilen endoterm eğrileri Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Farklı bekleme süreleri ile üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilmesi ile oluşturulan kompozitlerin endoterm eğrileri

Maksimum piroliz sıcaklığı 300 °C, ısıtma hızı 10 °C/dk, bekletme süresi 1 saat koşullarında üretilen biyokömüre RT-28 hapsedilmesiyle elde edilmiş kompozitlere ait T_{eb} , T_{ep} ve T_{es} sıcaklıkları sırasıyla 26.12°C, 26.97 °C ve 27.56 °C olarak ölçülmüştür. Bahsi geçen kompozit için erime gizli ısı H_e ise 101.04 J/g olarak belirlenmiştir. Aynı maksimum piroliz sıcaklığı ve ısıtma hızı altında bekletme süresinin 2 saat uygulanması durumunda üretilen RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompoziti için T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 26.12 °C, 27.01 °C, 27.59 °C ve 101.11 J/g olarak ölçülmüştür.

Son olarak 300 °C maksimum piroliz sıcaklığı ve 10 °C/dakika ısıtma hızında, 3 saat bekleme süresi uygulanarak RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompoziti üretilmiştir. Bu

kompozit için gerçekleştirilen DTK ölçümleri sonucunda ise T_{eb} , T_{ep} , T_{es} ve H_e değerleri sırasıyla 25.89 °C, 27.00 °C, 27.68 °C ve 103.54 J/g olarak ölçülmüştür. Elde edilen tüm ölçüm sonuçları Çizelge 3.9’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.9 Farklı bekleme süreleri ile elde edilen biyokömürlere RT-28 emdirilmesiyle üretilen kompozitlerin DTK sonuçları

Malzeme	T_{eb} (°C)	T_{ep} (°C)	T_{es} (°C)	H_e (J/g)
1 saat 10 °C 300 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	26.12	26.97	27.56	101.04
2 saat 10 °C 300 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	26.12	27.01	27.59	101.11
3 saat 10 °C 300 °C RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	25.89	27.00	27.68	103.54

Çizelge 3.9’den görüleceği üzere piroliz bekletme süresinin RT-28/biyokömür kompozitinin erime sıcaklıkları üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Daha öncede bahsedildiği gibi piroliz ısıtma hızının değiştirilmesinin de RT-28, biyokömür arasında herhangi bir kimyasal etkileşim oluşturmadığı söylenebilir. Piroliz ısıtma hızına bağlı olarak RT-28/biyokömür kompozitlerinin gizli ısı değerlerinde elde edilen yüzdelik iyileştirmeler Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.10 Farklı bekleme süresi koşullarında üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilerek elde edilen kompozitlerin yüzdelik gizli ısı iyileştirmeleri

Bekletme süresi (saat)	H_e (J/g) Biyokömür	İyileştirme Yüzdesi (%)
1	101.04	-
2	101.11	0.7
3	103.54	3

Bir saat bekletme süresinin 2 saat ve 3 saat olarak uygulanması durumunda elde edilen kompozitlerin gizli ısı değerlerindeki iyileştirmeler sırasıyla %0.7 ve %3 olarak belirlenmiştir. Gizli ısı depolama kapasitelerinin kompozitlerle ilişkisi incelendiğinde, ısıtma hızının artmasıyla birlikte kompozitlerin gizli ısı depolama kabiliyetlerinin de arttığı belirlenmiştir. Sonuç olarak RT-28 hapsedilmesi açısından piroliz bekletme süresinin uzatılmasının biyokömür gözenekliliğini iyileştirme konusunda az bir etkisi olduğu söylenebilir. Bu açıdan bakıldığında üç saat bekletme süresi ile üretilen kompozitin 1 saat bekletme süresi ile üretilen kompozite oranla gizli ısı depolama

kapasitesindeki iyileşmenin ekonomik olmadığı değerlendirilmiştir. Fayda-maliyet prensibi ilkesinden yola çıkılarak piroliz işleminde kullanılan azot gazı ve elektrik tüketimi göz önüne alındığında, biyokömür üretiminde kullanılacak bekletme süresi parametresinin 1 saat seçilmesinin uygun olacağına karar verilmiştir.

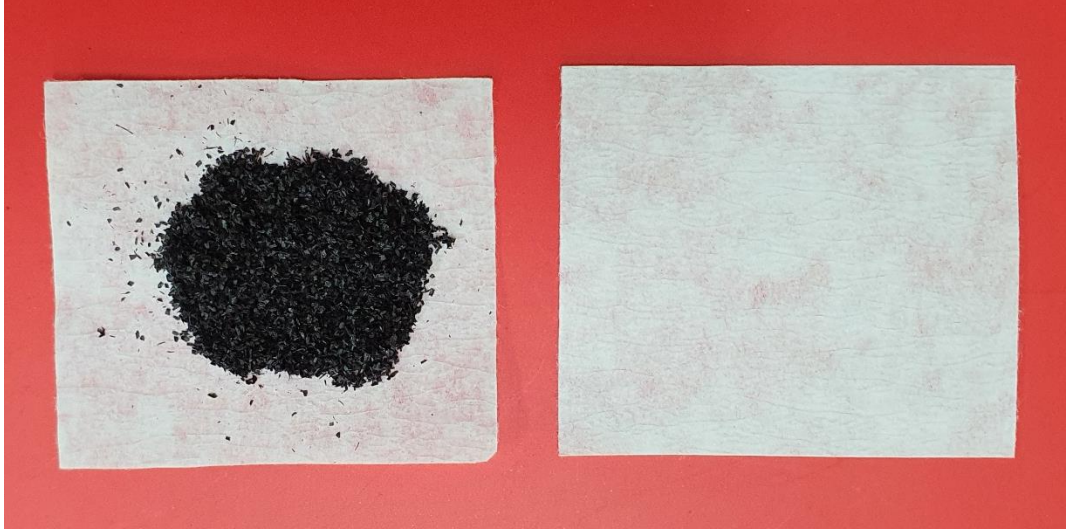
Gerçekleştirilen DTK analizleri sonucunda RT-28/biyokömür kompozitine etkin bir enerji depolama kabiliyeti kazandırabilmek için aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- ✓ Organik malzeme olarak kavak talaşı kullanılması,
- ✓ Maksimum piroliz sıcaklığının 300 °C olması,
- ✓ Isıtma hızının 10 °C/dk olması,
- ✓ Bekletme süresinin 1 saat olması.

3.2. Sızdırmazlık Test Sonuçları

Elde edilen RT-28/biyokömür kompozitlerinin bina duvar bileşeninde kullanılabilmesi için şekil kararlılığına sahip olması gerekmektedir. Başka bir ifadeyle gözenekler içerisine emdirilen RT-28, faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığının üzerindeki herhangi bir koşula maruz kalması durumunda gözenek içerisindeki kalıcılığını korumalıdır. Bu amaçla sızdırmazlık testleri gerçekleştirilmiştir.

Sızdırmazlık testleri filtre kâğıdı üzerine konulan RT-28/kavak talaşı biyokömür kompozitinin bir etüv içerisinde 40 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonrasında filtre kâğıdının gözle incelenmesi sonucunda herhangi bir RT-28 izine rastlanılmamıştır (Şekil 3.7). Bu gözlem RT-28'in gözeneklerden dışarıya sızmadığını göstermekte olup elde edilen RT-28/kavak talaşı biyokömür kompozitlerinin bina duvar bileşenlerinde kullanılabilecek şekil kararlılığını taşıdığını göstermektedir.



Şekil 3.7 Sızdırmazlık test sonuçları

Yukarıdaki bilgiler dâhilinde bina duvar bileşeninde performans testlerini gerçekleştirmek üzere yeterli miktarda biyokömür seri üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). Yeterli miktarda üretilen kavak talaşı biyokömürlerine vakum emdirme yöntemi ile RT-28 emdirilerek bina duvar bileşeninde kullanıma hazır RT-28/kavak talaşı biyokömür kompozitleri üretilmiştir.



Şekil 3.8 300 °C maksimum sıcaklık, 10 °C ısıtma hızı ve 1 saat bekleme süresi ile üretilmiş biyokömürlere RT-28/ emdirilerek elde edilen biyokömür kompozitleri

3.3. Sem Analizleri

Organik malzemelerin gözeneklerine FDM hapsedilerek enerji depolama kabiliyetine sahip kompozit malzeme üretilmesi, tez kapsamında gerçekleştirilmiş birincil hedeftir. Bu hedef doğrultusunda öncelikle farklı tipte doğal gözenekli malzemelere ve bu malzemelerin biyokömür formlarına RT-28 hapsedilerek diferansiyel taramalı kalorimetre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca SEM analizi yapılarak biyokömürün mikro yapısını inceleyerek yüzey morfolojisi ve gözenek yapısı hakkında detaylı bilgi sağlanmıştır. Bu bilgiler doğrultusunda elde edilen detaylı bilgiler, en uygun malzeme seçimi için kritik kararların alınmasına olanak tanımıştır. Çizelge 3.11’de SEM görüntüleri çekilen organik ve kompozit malzemelerin numaraları ve biyokömür üretim parametrelerini özetleyen bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.11 SEM analizleri yapılmış malzemelerin tanımlanması

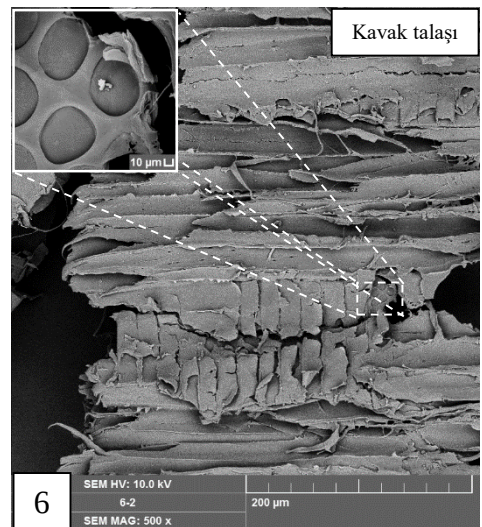
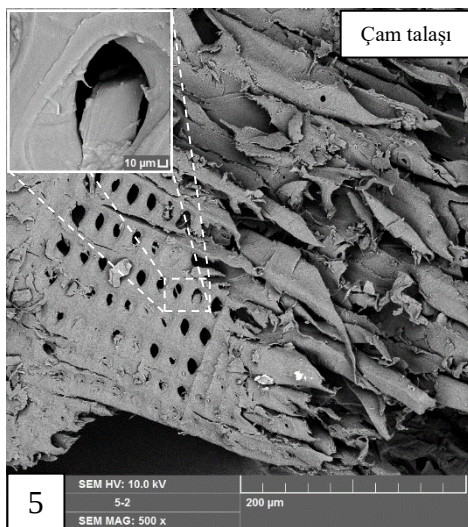
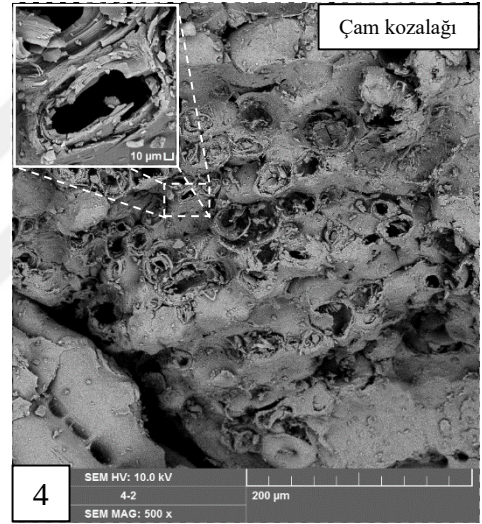
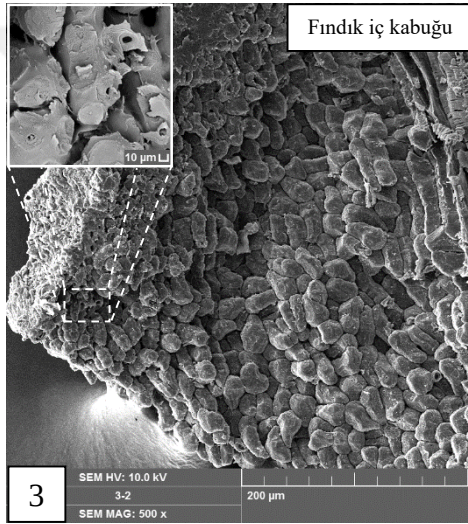
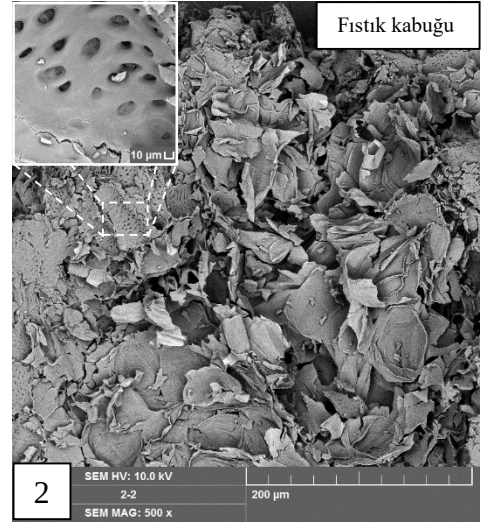
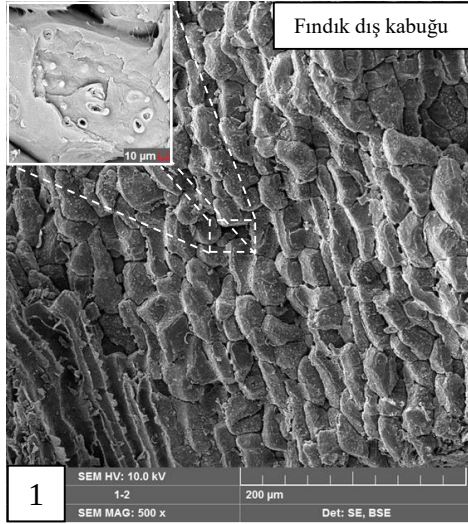
No	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Bekleme süresi (Saat)
1	Fındık Dış Kabuğu	-	-	-
2	Yer Fıstığı Kabuğu	-	-	-
3	Fındık İç Kabuğu	-	-	-
4	Çam Kozalağı	-	-	-
5	Çam Talaşı	-	-	-
6	Kavak Talaşı	-	-	-
7	RT-28/Kavak Talaşı	-	-	-
8	Fındık Dış Kabuğu Biyokömürü	700	10	1
9	Fındık İç Kabuğu Biyokömürü	700	10	1
10	Yer Fıstığı Kabuğu Biyokömürü	700	10	1
11	Çam Kozalağı Biyokömürü	700	10	1
12	Çam Talaşı Biyokömürü	700	10	1
13	Kavak Talaşı Biyokömürü	700	10	1
14	RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	700	10	1
15	Kavak talaşı biyokömürü	600	10	1
16	Kavak talaşı biyokömürü	500	10	1

Çizelge 3.11 SEM analizleri yapılmış malzemelerin tanımlanması

No	Malzeme	Sıcaklık (°C)	Isıtma Hızı (°C/dk)	Bekleme süresi (Saat)
17	Kavak talaşı biyokömürü	400	10	1
18	Kavak talaşı biyokömürü	300	10	1
19	RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	300	10	1
20	Kavak talaşı biyokömürü	300	7.5	1
21	Kavak talaşı biyokömürü	300	5	1
22	Kavak talaşı biyokömürü	300	10	2
23	Kavak talaşı biyokömürü	300	10	3
24	RT-28/Kavak talaşı biyokömürü	300	10	3

Şekil 3.9.'da çeşitli organik malzemelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Vakum emdirme yöntemi ile bu organik malzemelerin gözeneklerine RT-28 hapsedilerek oluşturulan kompozitlerin DTK ölçümlerine göre, gizli ısı depolama kapasitesi açısından sıralandığında en düşükten en yükseğe doğru sırası ile fındık dış kabuğu, yer fıstığı kabuğu, fındık iç kabuğu, çam kozalağı, çam talaşı ve kavak talaşı yer almaktadır. DTK verilerine göre en düşük gizli ısıya sahip fındık dış kabuğunun, Şekil 3.8'de gösterildiği üzere neredeyse yok denecek kadar az gözenekliliğe sahip olduğu SEM görüntüleriyle de doğrulanmıştır. Fındık dış kabuğunun yüzey yapısı incelendiğinde de yüzeyinde çok fazla girinti çıkıntı bulunmadığı açıkça görülmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda RT-28 in fındık dış kabuğunun gözeneklerine nüfus edemediği ve DTK ölçümlerinde belirlenen en düşük gizli ısı depolama kapasitesine sahip organik malzeme olduğu netleştirilmiştir.

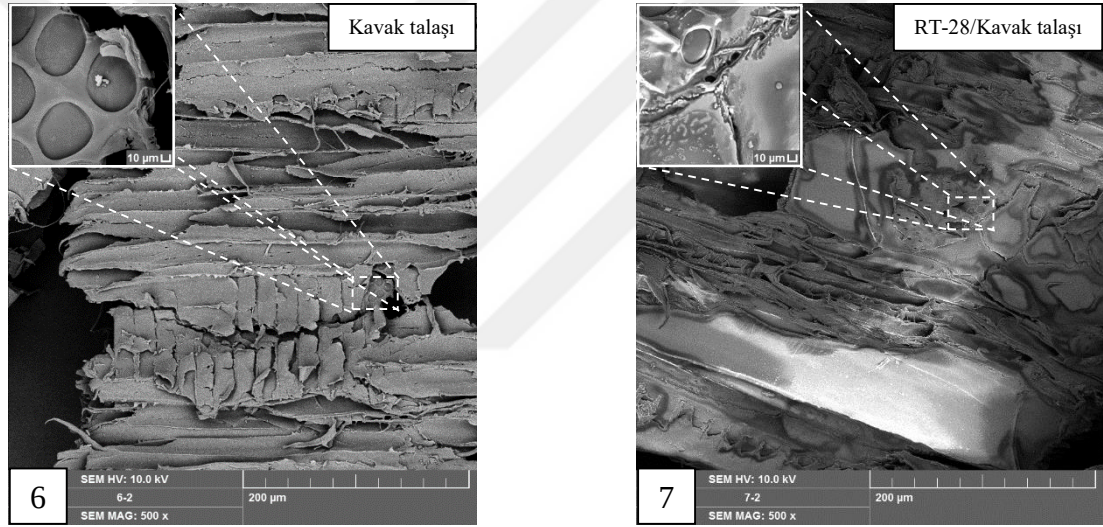
Fıstık kabuğu, fındık iç kabuğu ve çam kozalağı için SEM görüntüleri incelendiğinde, bu organik malzemelerin yüzeylerinde çok fazla gözenek tespit edilememiştir. Başka bir ifadeyle bu malzemelere ait SEM görüntülerinden DTK verilerini destekleyici bilgiler elde edilememiştir. Çam talaşı organik malzemesinin SEM görüntülerinde ortalama 50 µm boyutlarında gözeneklere rastlanılmıştır. Çam talaşının yüzey yapısına bakıldığında pürüzlü ve saçaklı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.9 Çeşitli organik malzemelerin SEM görüntüleri

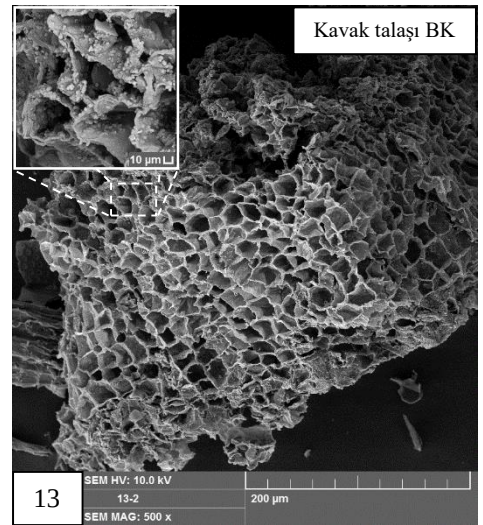
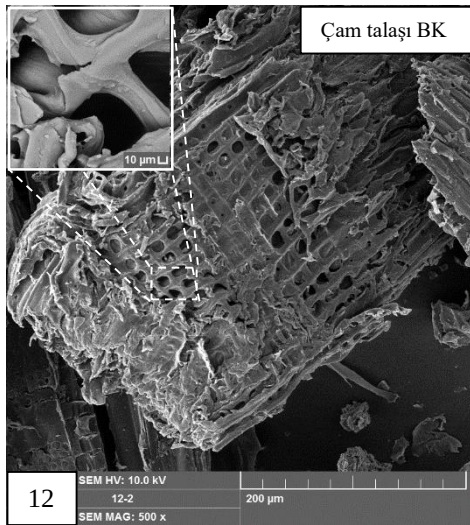
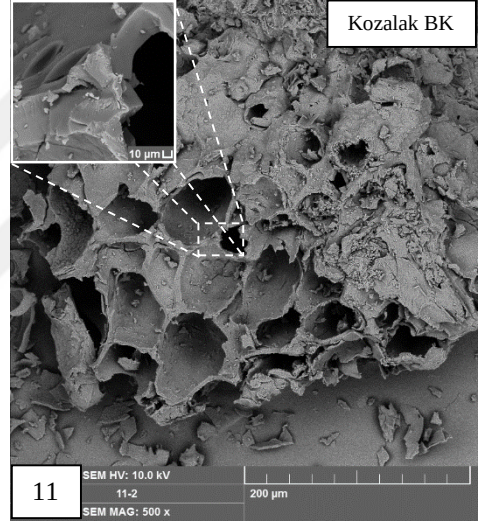
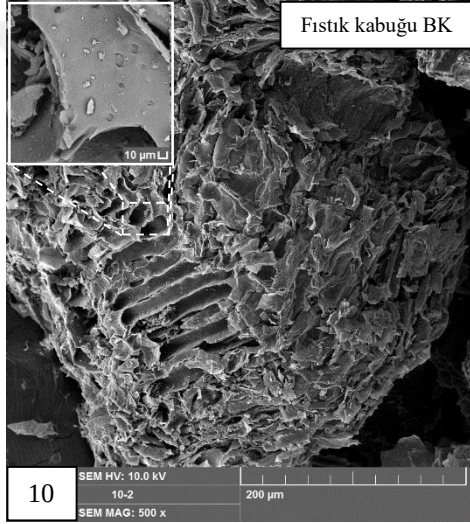
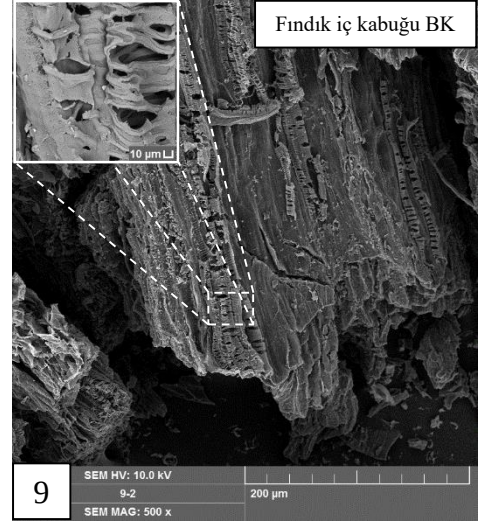
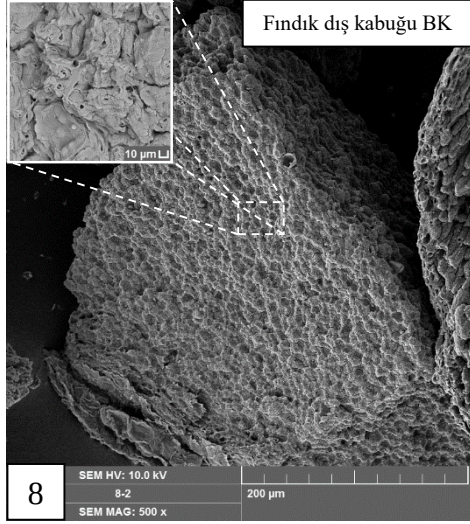
Gözeneklere RT-28 emdirildikten sonra en yüksek DTK değerini kavak talaşı vermiştir. Kavak talaşının Şekil 3.8.'deki SEM görüntüsü incelendiğinde, malzeme yapısında yatay ve dikey kanallar olduğu görülmektedir. Yatay kanallar, SEM görüntüsü çekilirken farklı düzlemde görüntü alındığı için tam olarak seçilememektedir. Buna rağmen yatay kanalların, gözeneklerin kesit alınmış hali olarak kabul edilebileceği ve RT-28'in bu gözeneklere hapsolabileceği söylenebilir.

Şekil 3.10'da kavak talaşı organik malzemesine RT-28 emdirilmesiyle elde edilen kompozit malzemenin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere RT-28 FDM'si, kavak talaşının gözeneklerine başarılı bir şekilde hapsedilmiştir. Yatay kanalların ve gözeneklerin RT-28 ile dolduğu açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.10 Kavak talaşı ve RT-28 emdirilmiş kavak talaşı

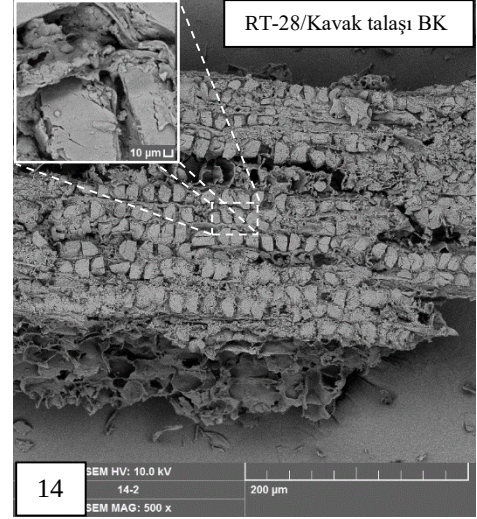
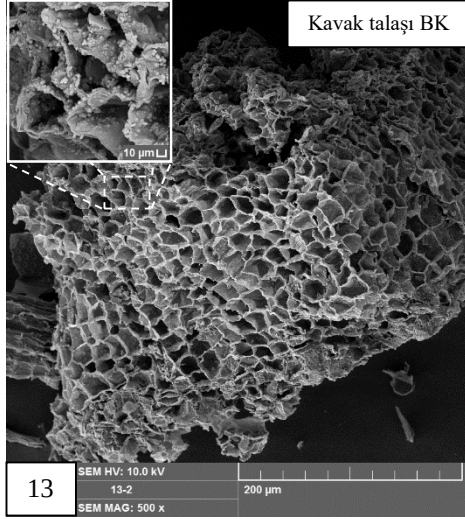
Organik malzemelerin piroliz işleminden geçirilerek biyokömür haline getirilmesiyle birlikte, gözeneklilik yapılarının iyileştiği bilinmektedir. Bir önceki aşamada kavak talaşının en uygun aday olduğu tahmin edilse de, organik malzemelerin piroliz sürecinden nasıl etkileneceği belirsiz olduğundan, tüm organik malzemelerin biyokömür haline getirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. 700 °C sıcaklık, 10 °C/dk ısıtma hızı ve 1 saat bekleme süresi parametreleri ile altı farklı organik malzeme piroliz işlemine tabi tutulmuştur. Farklı organik malzemelerin biyokömür haline getirilmiş hallerinin SEM görüntüleri Şekil 3.11' de verilmiştir.



Şekil 3.11 Farklı organik malzemelerin biyokömür haline getirilmiş hallerinin SEM görüntüleri

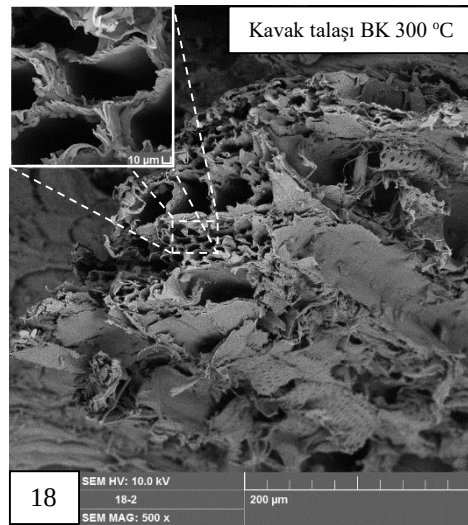
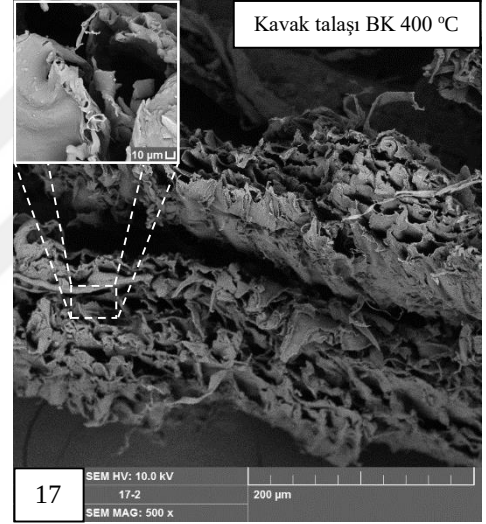
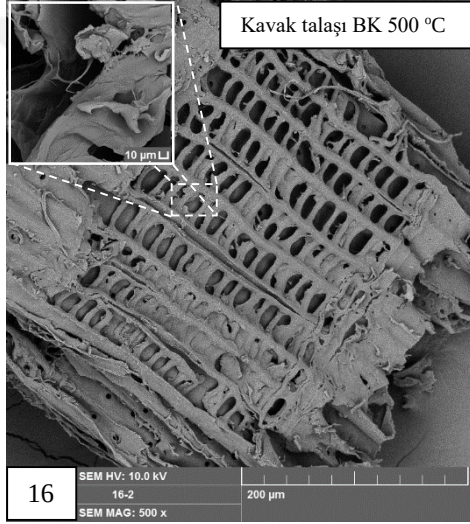
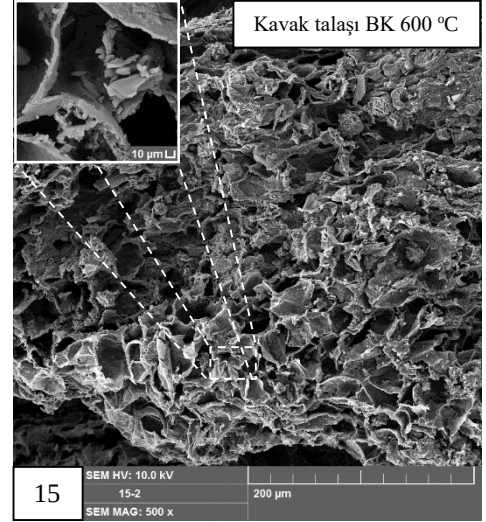
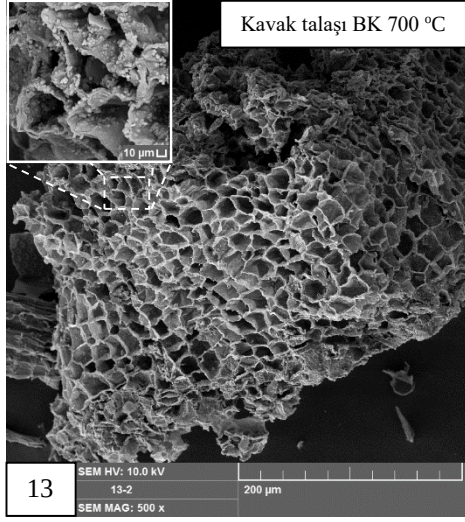
Şekil 3.11’de 6 farklı organik malzemenin biyokömür formlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Vakum emdirme yöntemi ile bu biyokömürlerin gözeneklerine RT-28 hapsedilerek oluşturulan kompozitlerin DTK ölçümlerine göre, gizli ısı depolama kapasitesi açısından sıralandığında en düşüğe doğru sırası ile fındık dış kabuğu, fındık iç kabuğu, yer fıstığı kabuğu, çam kozalağı, çam talaşı ve kavak talaşı yer almaktadır. 6 farklı biyokömür kompoziti içerisinde RT-28/fındık dış kabuğu biyokömür kompozitinin en düşük gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğu, DTK ölçümlerine göre daha önce belirlenmişti. Şekil 3.10’da fındık dış kabuğu biyokömürünün SEM görüntüleri incelendiğinde biyokömür yüzeyindeki gözenekliliğin yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Ayrıca fındık dış kabuğu biyokömürünün yüzey yapısı olarak düz bir yapıya sahip olduğu da görülmektedir. Fındık dış kabuğu biyokömürünün DTK değeri ile SEM görüntüsü birlikte incelendiğinde en düşük gizli ısı depolama kapasitesine sahip biyokömür kompoziti olduğu açıkça görülmektedir. Fındık iç kabuğu ve fıstık kabuğu biyokömürlerine RT-28 emdirilerek elde edilen kompozitlerin DTK değerleri birbirine yakındır. Bu iki biyokömürün SEM görüntülerine bakıldığında fındık iç kabuğu biyokömürünün makro boyuttaki SEM görüntüsü fıstık kabuğuyla çok farklı gibi görünüyorsa da, fındık iç kabuğunun sol alt köşesinde bulunan gözeneklilik yapısının fıstık kabuğu ile benzer şekilde olduğu görülmektedir. SEM görüntüsünde fındık iç kabuğunun farklı bir düzlemdeki görüntüsü, gözenek farklılığını vurgulamak amacıyla eklenmiştir. Çünkü düzlem farklılığı, gözenek yapısında değişikliğe işaret edebilir. Kozalak, çam talaşı ve kavak talaşı biyokömürlerine RT-28 emdirilmesiyle elde edilmiş kompozitlerin DTK değerleri de birbirine yakındır. Bu biyokömürlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, gözenek boyutları ve yüzey yapıları arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Ancak kavak biyokömürünün diğerlerine kıyasla daha fazla gözenek sayısına sahip olduğu açıkça görülmektedir. DTK sonuçları ve SEM görüntüleri göz önüne alındığında, gözeneklerine RT-28 emdirilerek gizli ısıyı en iyi hapseden biyokömürün kavak biyokömürü olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 3.12’de kavak talaşı biyokömürüne RT-28 emdirilmesiyle elde edilen kompozit malzemenin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere RT-28 FDM’si, kavak talaşı biyokömürünün gözeneklerine başarılı bir şekilde hapsedilmiştir.



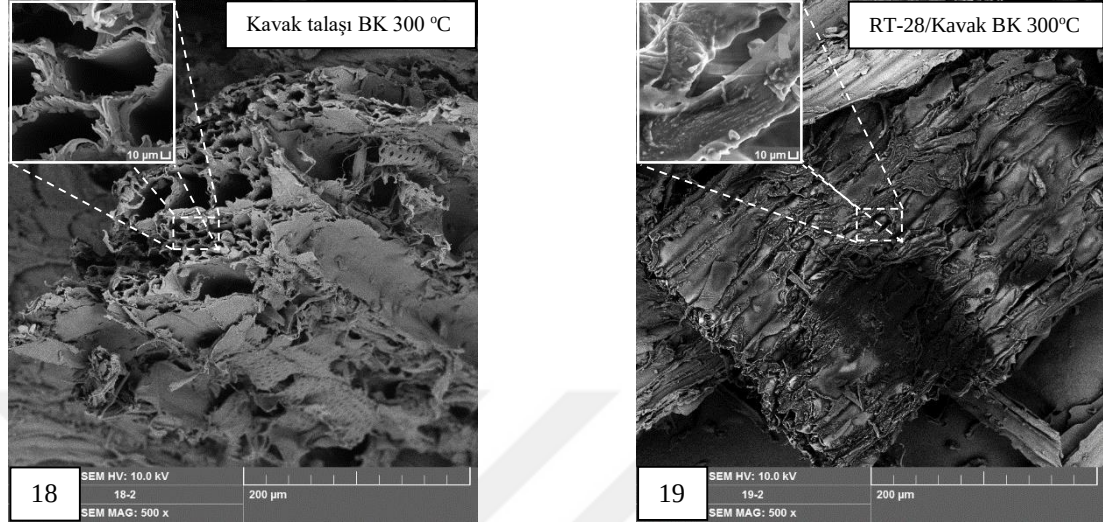
Şekil 3.12 Kavak talaşı biyokömürü (13) ve RT-28 emdirilmiş kavak talaşı biyokömürü (14) (700 °C- 10°C/dk- 1 saat bekleme süresi)

Çalışmaya biyokömür ana malzemesi olarak kavak talaşı ile devam edilmesi kararlaştırılmıştır. Bir önceki aşamada kavak talaşı malzemesinin biyokömüre dönüştürülmesi işlemi için, piroliz koşulları olarak ısıtma hızı 10 °C/dakika, maksimum sıcaklık 700 °C ve maksimum sıcaklıkta 1 saat bekleme süresi kullanılmıştır. Daha yüksek gizli ısıya sahip RT-28/Kavak talaşı biyokömür kompozitleri elde etmek için piroliz koşullarının değiştirilmesinin gözeneklilik ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri daha önce DTK sonuçlarıyla belirlenmişti. Maksimum sıcaklık parametresi sırasıyla 700 °C, 600 °C, 500 °C, 400 °C ve 300 °C olarak değiştirilerek üretilen biyokömürlerin SEM görüntüleri Şekil 3.13'te verilmiştir. DTK sonuçları, biyokömürlerin gizli ısı depolama kapasitesini en düşükten en yükseğe doğru sırası ile 700 °C, 600 °C, 500 °C, 400 °C ve 300 °C olarak göstermektedir. Farklı sıcaklıklarda piroliz edilmiş bu biyokömürlerin SEM görüntüleri incelendiğinde gözeneklilik ve yüzey yapıları hakkında net yorumlar yapılamamaktadır. Ancak 10 µm lik görüntüler incelendiğinde 300 °C sıcaklıkta üretilen biyokömürün gözenek çeperlerinin daha temiz ve pürüzsüz yapıda olduğu dikkat çekmektedir. 700 °C sıcaklıkta üretilmiş biyokömürün 10 µm lik görüntüsü incelendiğinde ise gözenek çeperlerindeki pürüzlü yapı dikkat çekmektedir. Bu pürüzlülük parametresinin RT-28 in biyokömür gözeneklerine nüfuz etmesinde etkili olduğu düşünülmektedir.



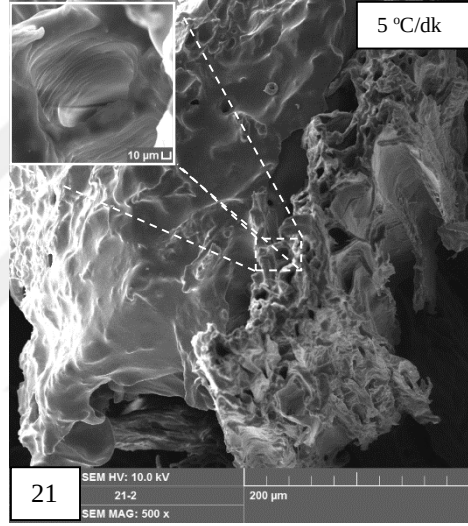
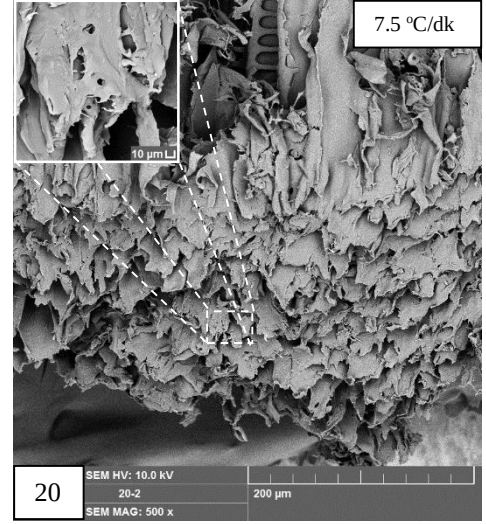
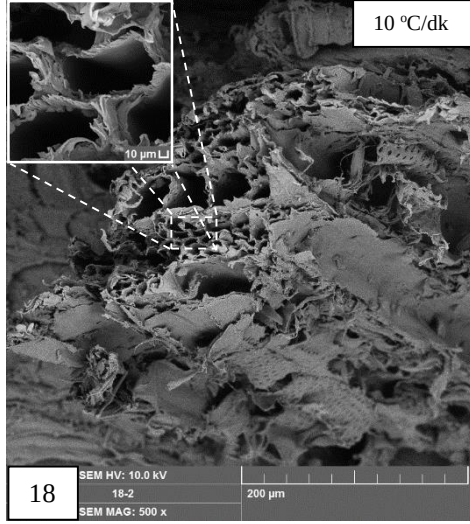
Şekil 3.13 Kavak biyokömürünün farklı sıcaklıklardaki piroliz görüntüleri

DTK sonuçlarına göre gözeneklerine RT-28 emdirilerek gizli ısıyı en iyi hapseden biyokömürün 300 °C piroliz sıcaklığında üretilen biyokömür olması doğrultusunda SEM görüntüleri çekilerek Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Kavak Biyokömürü ve RT-28 emdirilmiş kavak biyokömürü (300 °C-10°C/dk- 1 saat bekleme süresi)

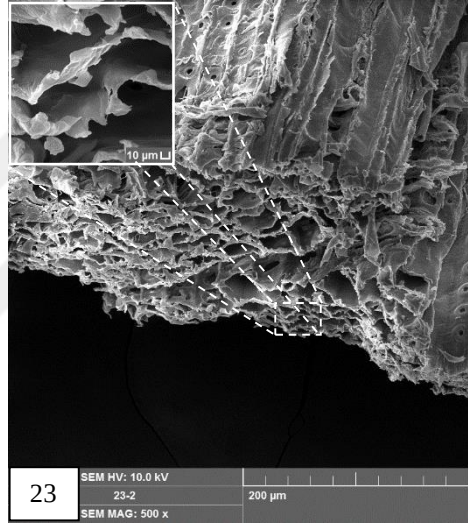
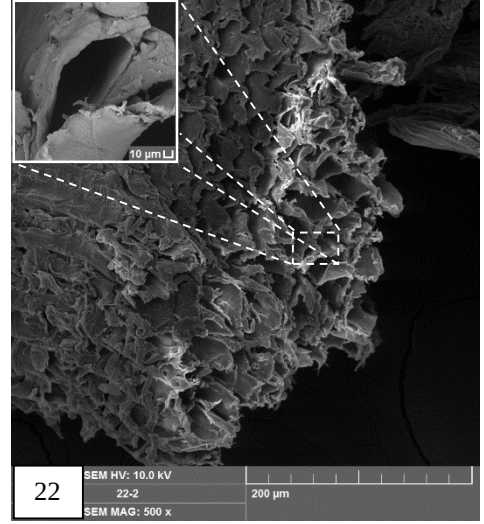
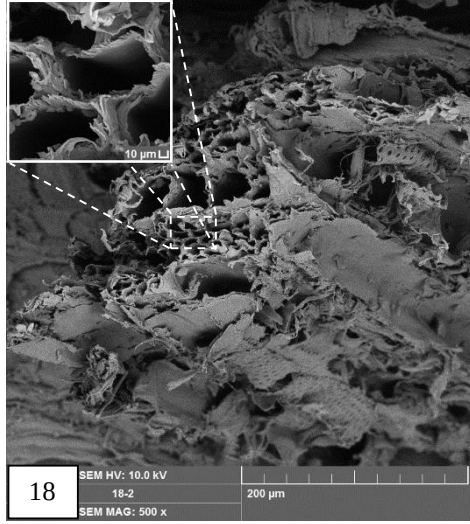
Piroliz işleminde, biyokömürlerin gözenekleri ve yüzey yapısı üzerindeki etkilerini incelemek için bu defa ısıtma hızı parametresi değiştirilmiştir. Önceden belirlenen 10 °C/dakika ısıtma hızıyla üretilen biyokömürlere ilave olarak, 7.5 °C/dakika ve 5 °C/dakika ısıtma hızlarıyla yeni biyokömürler üretilmiştir. Üretilen biyokömürlerin SEM görüntüleri Şekil 3.14’te verilmiştir. RT-28 in vakum emdirme yöntemi ile gözeneklere hapsedilmesi sonucunda meydana gelen kompozitlerin DTK sonuçları incelendiğinde, gizli ısı depolama kapasitesi en düşükten yükseğe doğru sırasıyla 5 °C/dakika, 7.5 °C/dakika ve 10 °C/dakika olarak belirlenmiştir. Farklı ısıtma hızlarında piroliz edilmiş bu biyokömürlerin Şekil 3.15’teki SEM görüntüleri incelendiğinde, gözeneklilik ve yüzey yapılarındaki farklılıklar açıkça görülmektedir. Isıtma hızı düştükçe biyokömürün yapısında bulunan gözeneklerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca yüzey yapısının da düzleştiği, tam olarak gözeneklerin açığa çıkmadığı görülmektedir. Yüzeydeki pürüzlülüğün azalarak girinti ve çıkıntıların azaldığı gözlemlenmiştir. Gözenek cidarlarının da ısıtma hızı düştükçe kalınlaştığı görülmektedir. Görüntülerden yola çıkılarak, ısıtma hızının artmasıyla RT-28’in biyokömür gözeneklerine daha etkili bir şekilde nüfuz edebileceği söylenebilir.



Şekil 3.15 Farklı ısıtma hızlarında piroliz edilmiş kavak biyokömürleri

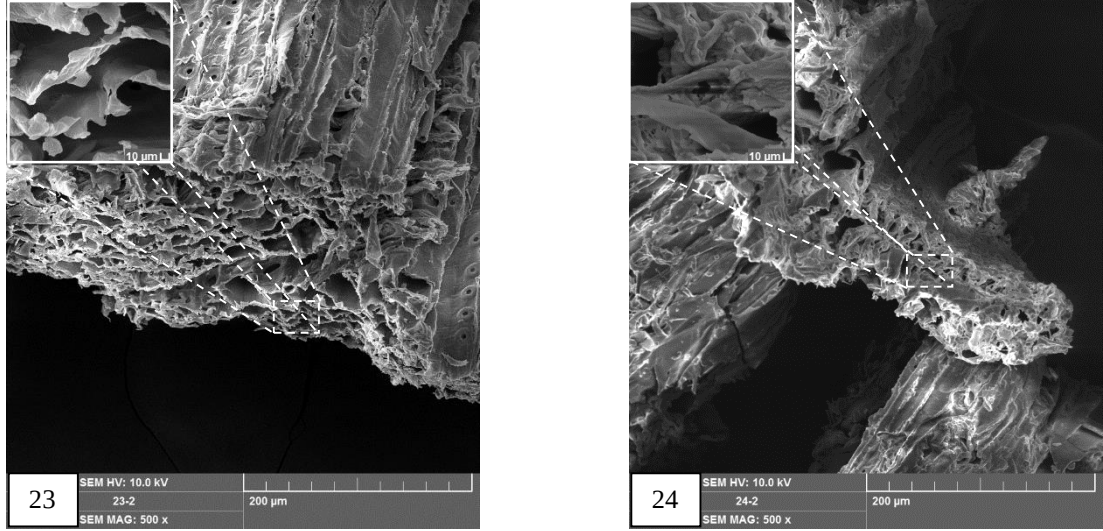
DTK değerleri ile SEM görüntüleri birlikte incelendiğinde en yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip biyokömürün en yüksek ısıtma hızı (10 °C/dk) kullanılarak elde edilen biyokömür olduğu açıkça görülmektedir.

Son olarak, piroliz işlemi için gereken bekleme parametresi değiştirilerek yeni biyokömürler üretilmiştir. Daha önce 1 saat bekleme süresi ile üretilen biyokömür örneklerine ek olarak 2 saat ve 3 saat olarak belirlenen sürelerde biyokömür üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.16’da üretilen biyokömürlerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.16 Farklı bekleme sürelerinde piroliz edilmiş kavak biyokömürleri

Farklı bekleme sürelerine göre üretilen biyokömürlere RT-28 emdirilerek DTK ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm değerleri yaklaşık olarak birbirine yakın çıkmıştır. Şekil 3.16'daki SEM görüntüleri incelendiğinde, biyokömürlerin gözeneklilik ve yüzey yapılarındaki farklılıklar hakkında net yorumlar yapılamamaktadır. DTK sonuçlarına göre gözeneklerine RT-28 emdirilerek gizli ısıyı en iyi hapseden biyokömürün 3 saat bekleme süresi ile üretilen biyokömür olması doğrultusunda SEM görüntüleri çekilerek Şekil 3.17'de gösterilmiştir.

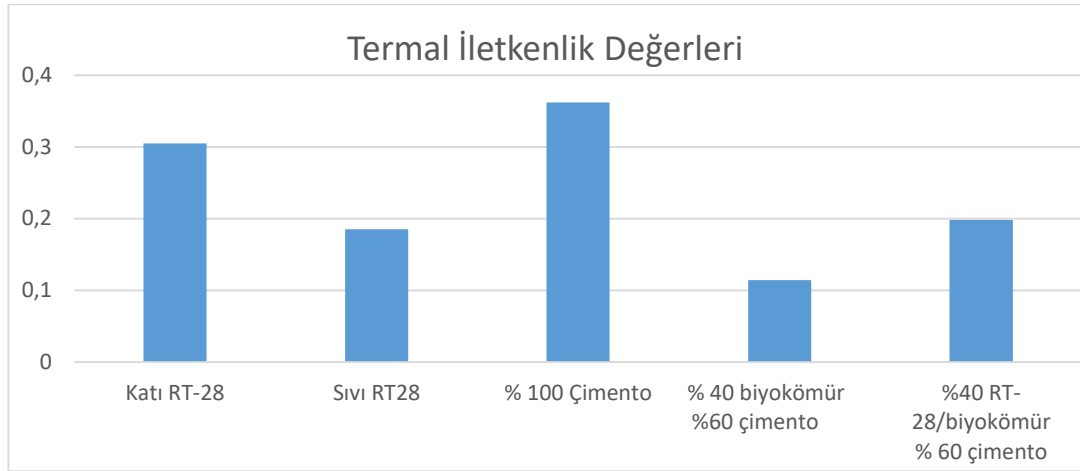


Şekil 3.17 Kavak Biyokömürü ve RT-28 emdirilmiş kavak biyokömürü (300 °C - 10°C/dk - 3 saat bekleme süresi)

3.4 Isıl İletkenlik Ölçüm Sonuçları

RT-28'in katı ve sıvı haldeki ısı iletkenlikleri sırasıyla 0.305 W/mK ve 0.185 W/mK olarak ölçülmüştür. Görüleceği üzere katı halden sıvı hale geçiş ile moleküler yapının daha düzensiz hale gelmesiyle ısı iletkenlikte %41 civarında bir azalma meydana gelmektedir. Gözeneklerine FDM hapsedilerek gizli ısı depolama yeteneği kazandırılan RT-28/biyokömür kompozitleri kütlece 40:100 oranında (%40 RT-28/biyokömür - %60 çimento) karıştırılarak duvar bileşeni oluşturulmuştur. Öncelikle elde edilen karışımdan ısı iletkenlik ölçümleri için numuneler üretilmiştir. Karşılaştırma amaçlı olarak kütlece 40:100 oranında (%40 biyokömür - %60 çimento) ve %100 çimento için de ısı iletkenlik ölçüm numuneleri oluşturulmuştur. Hotdisk TPS 3500 cihazı ile bahsedilen numunelerin ısı iletkenlik ölçümleri 24 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numuneler ile gerçekleştirilen ölçümlerin sonuçları Şekil 3.18'de verilmiştir.

Çizelge 3.12'da görüleceği üzere saf çimentonun ısı iletkenlik değeri 0.362 W/mK olarak ölçülmüştür. Kütlece 40:60 oranında biyokömür/çimento karışımının ısı iletkenlik değeri 0.114 W/mK olarak belirlenmiştir. Buna göre çimentoya kütlece %40 oranında biyokömür katılması durumunda ısı iletkenliğinin %68.5 azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 3.18 Üretilen kompozitlerin termal iletkenlik değerleri

Ölçüm sonuçlarının niceliksel değerleri Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12 Üretilen kompozitlerin termal iletkenlik sonuçları

Malzeme	k (W/mK)
Katı RT-28	0.305
Sıvı RT-28	0.185
(Çimento)	0.362
(Biyokömür)/(Çimento) (40:60)	0.114
(RT-28/Biyokömür) /(Çimento) (40:60)	0.198

Elde edilen biyokömürlerin gözenekli bir yapıda olması ve gözeneklerin içerisinde hava ile dolu olması biyokömür/çimento kompozitinin daha düşük ısı iletkenliğe sahip olmasının başlıca nedenidir. Keza hava esasen görece olarak düşük ısı iletkenliğe sahip bir malzemedir.

Gözeneklerine RT-28 hapsedilmiş biyokömürün 40:60 oranında çimento ile karıştırılması sonucunda elde edilen kompozitin ısı iletkenlik değeri ise 0.198 W/mK olarak ölçülmüştür. Bu durumda ilgili kompozit malzemenin ısı iletkenlik değerinin biyokömür/çimento kompozitinin ısı iletkenlik değerine kıyasla %73.7 oranında arttığı görülmektedir. Buna neden olarak vakum emdirme işlemiyle biyokömür gözeneklerine hava yerine RT-28 emdirilmesi gösterilebilir. Zira RT-28’in ısı iletkenliğinin havaya göre yaklaşık 10 kat daha fazla olması bu artışın nedeni olarak gösterilebilir.

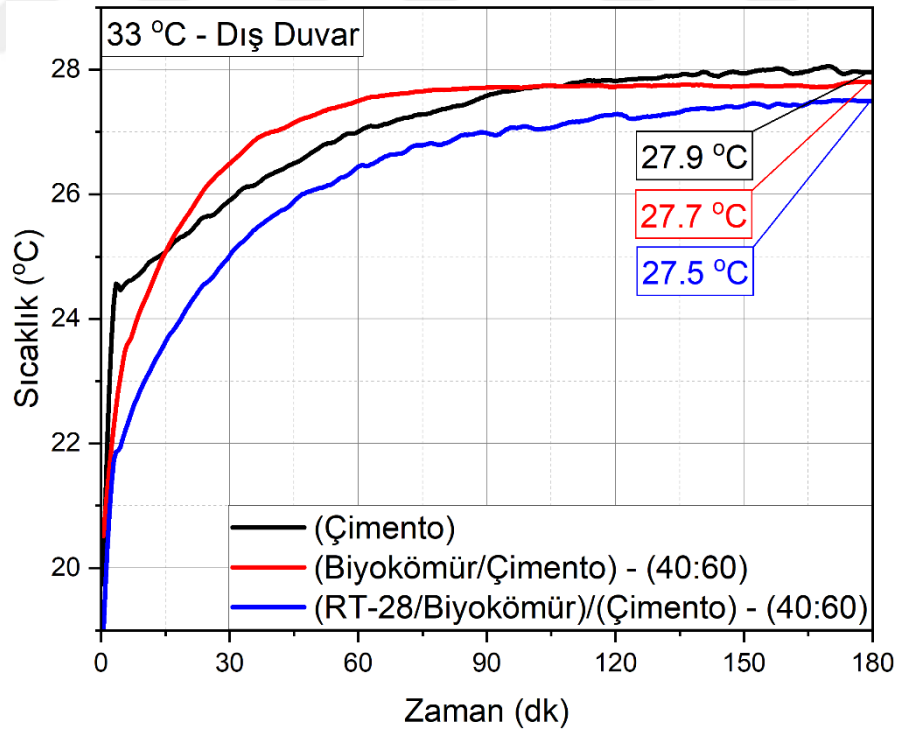
4. TERMAL PERFORMANS TEST SONUÇLARI

Termal performans testleri oluşturulan bina modeli üzerinden termal cevap ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Bina modelinde karşılaştırma açısından çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/Biyokömür)/(Çimento) kompozitlerinin kullanılması; duvar, iç duvar ve iç ortamından ölçülen sıcaklıkların zamana göre değişimlerini belirlemek suretiyle elde edilmiştir. Üç farklı duvar modeli için karşılaştırmalar 33°C, 43°C ve 53°C olmak üzere üç farklı ortam sıcaklığı için gerçekleştirilmiştir. Performans değerlendirmeleri dış duvar, iç duvar ve iç ortam göz önüne alınarak yapılmıştır.

4.1. 33°C Ortam Sıcaklığı için Performans Ölçümleri

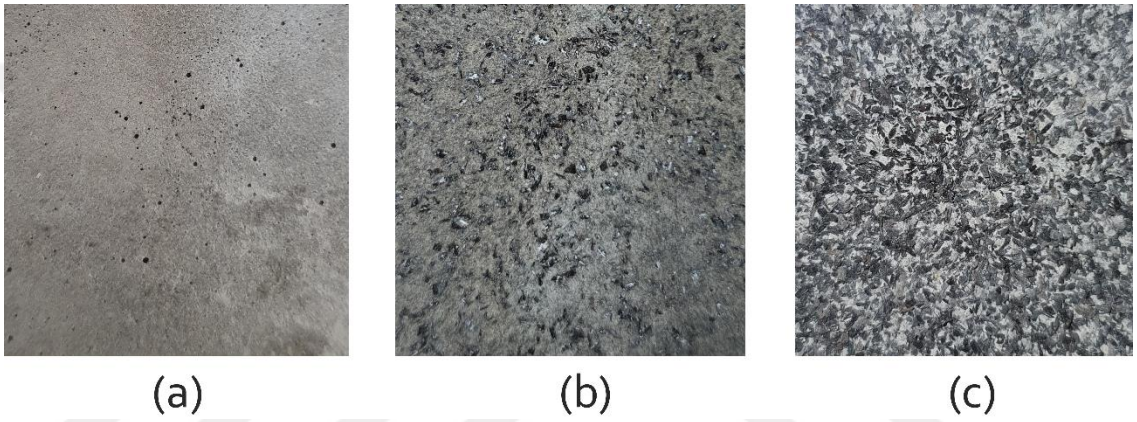
4.1.1 Isıtma (şarj) performans ölçümleri

Isıtma performansı açısından beklenen en iyi performans kriteri iç ortam sıcaklığının düşük kalması veya başka bir ifadeyle yavaş ısınmadır. 33°C dış ortam sıcaklığı için dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



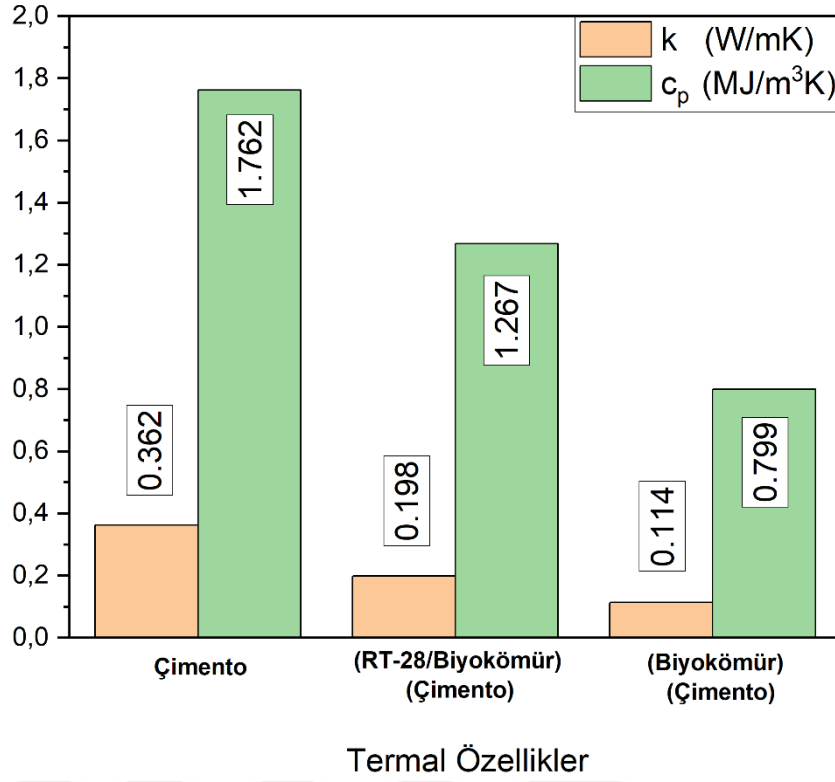
Şekil 4.1 Dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (33°C)

Duvar bileşenlerinin aniden 33°C sabit ısı kaynağına maruz bırakılması nedeniyle üç farklı duvar bileşeni için de başlangıçta sıcaklık artışı çok hızlı biçimde gerçekleşmektedir. Bununla birlikte 22°C'den itibaren ayrılmalar olduğu da görülmektedir. Çimento yüzeyinin düz olması köpük-çimento arayüzünde daha düşük bir termal dirence neden olmaktadır. Bu nedenle başlangıçta sadece çimento kullanılan duvarda daha hızlı bir sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Buna karşılık biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/çimento kompozitinin köpükle yaptığı arayüzey gözenekli karakterdedir (Şekil 4.2). Bahsi geçen gözenekli yapı nedeniyle daha yüksek termal direnç oluşmaktadır.



Şekil 4.2 Duvar modellerinin arayüz fotoğrafları; (a)-çimento, (b)-biyokömür/çimento, (c)-(RT-28/biyokömür)/çimento

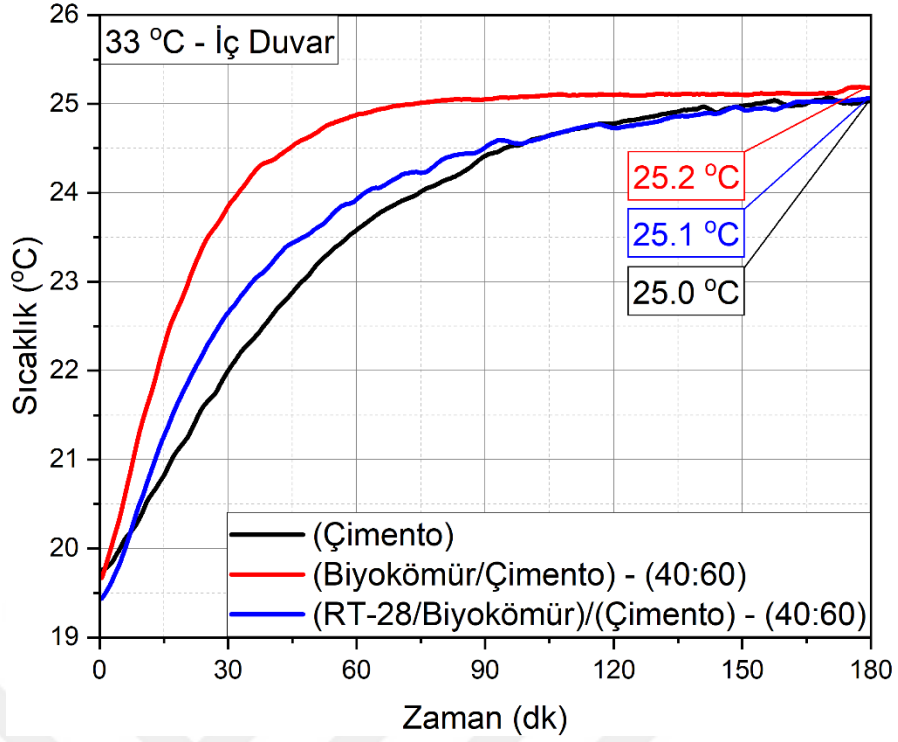
Bununla birlikte genel olarak üç duvar bileşeni için de sıcaklık değişiminin, ısı iletkenlik ve özgül ısının bir fonksiyonu olduğu söylenebilir. Her bir duvar modeli için oda koşullarında 24°C'de ölçülen ısı iletkenlik ve özgül ısı değerleri Şekil 4.2' de ayrıca verilmiştir. Buna göre saf çimentonun ısı iletkenliği 0.362 W/mK özgül ısısı ise 1.762 MJ/m³K'tür. Biyokömür/çimento kompozit duvarının ısı iletkenliği 0.114W/mK, özgül ısısı ise 0.799 MJ/m³K'tür. (RT-28/biyokömür)/çimento kompoziti için elde edilen değerler ise 0.198W/mK ve 1.267 MJ/m³K olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.3 24°C’de ölçülen ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerleri

Zaman ilerledikçe biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerindeki sıcaklık artışının saf çimentoya göre hızlandığı görülmektedir. Buna neden olarak bu iki bileşenin ısıl iletkenliklerinin saf çimentoya göre düşük olması gösterilebilir. Başka bir ifadeyle saf çimentoda yüksek ısıl iletkenlik nedeniyle ısı; duvar derinliğine daha iyi iletilebildiğinden arayüz sıcaklığı daha yavaş artmaya devam etmektedir. Buna karşılık biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin daha düşük ısıl iletkenliğe sahip olması nedeniyle duvar içerisine daha yavaş ısı girişi nedeniyle duvar dış yüzeyindeki ısı birikimi sıcaklığın daha hızlı artmasını sağlamaktadır. 180. dakika itibarıyla çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin dış duvar sıcaklıkları sırasıyla 27.9 °C, 27.7 °C ve 27.5 °C olduğu belirlenmiştir.

Dış duvar sıcaklığı açısından yapılabilecek bir diğer gözlem ise RT-28/biyokömür)/(çimento) için RT-28’in kompozit duvar boyunca tam erimemiş olması, sadece dış duvar yakınlarında faz değişimine uğramış olmasıdır. Bununla birlikte 28/biyokömür)/(çimento) kompozit duvarı içerisindeki RT-28’in 60. dakikadan itibaren dıştan içe doğru erimeye başladığı söylenebilir.



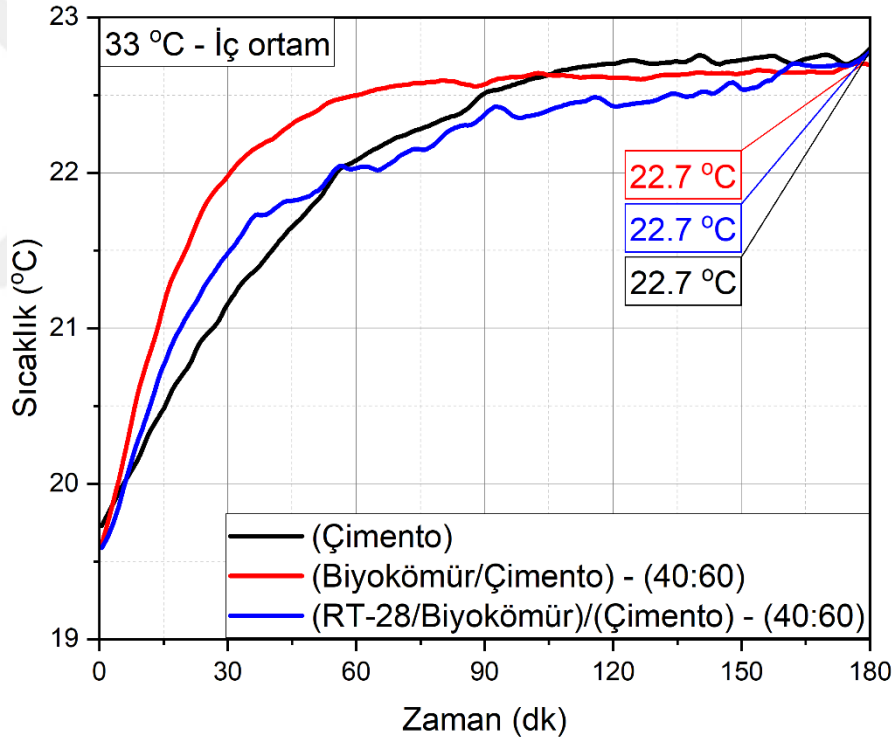
Şekil 4.4 İç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (33°C)

33 °C dış ortam sıcaklığı için iç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. İç duvar açısından en hızlı sıcaklık artışı ısı iletkenliğinin düşük olmasına rağmen biyokömür/çimento kompozit duvarında gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak biyokömür/çimento kompozitinin oldukça düşük bir özgül ısıya sahip olması gösterilebilir. Düşük özgül ısı ilgili kompozit duvarda sıcaklığın duyulur olarak daha kısa sürede depolanmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte dış ortam sıcaklığının 33°C tutulması durumunda biyokömür iç duvar sıcaklığının 25 °C civarında termal denge konumuna ulaştığı belirlenmiştir.

İç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi açısından RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozit duvarı içinde aynı mekanizmanın geçerli olduğu söylenebilir. RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozit duvarının özgül ısının biyokömür/çimentoya göre yüksek olması sıcaklık artışının biyokömür/çimento kompozit duvarına göre daha yavaş seyretmesine neden olmaktadır. Benzer biçimde RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin özgül ısının saf çimentoya göre daha düşük olması ise çimentoya göre sıcaklık artışının daha hızlı olmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozit duvarı içerisindeki RT-28'in 60. dakikadan erimeye başlamasıyla sıcaklık artışının yavaşlayarak çimento duvar sıcaklığı ile

çakıştığı görülmektedir. 180. dakika itibariyle çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin iç duvar sıcaklıkları sırasıyla 25 °C, 25.2 °C ve 25.1 °C olduğu belirlenmiştir.

33°C dış ortam sıcaklığı için iç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimlerinin iç duvar sıcaklıkları ile benzer davranışlar gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozit duvarları için sıcaklık artışı uzun bir süre kısıtlanmış olsa da 180 dakikaya yaklaştıkça sıcaklık değerlerinin birbirine yaklaştığı görülmüştür. 180. dakika itibariyle çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin iç ortam sıcaklıkları sırasıyla 22.7 °C, 22.7 °C ve 22.7 °C olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.5 İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi (33°C)

33°C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan şarj performans ölçümleri sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır.

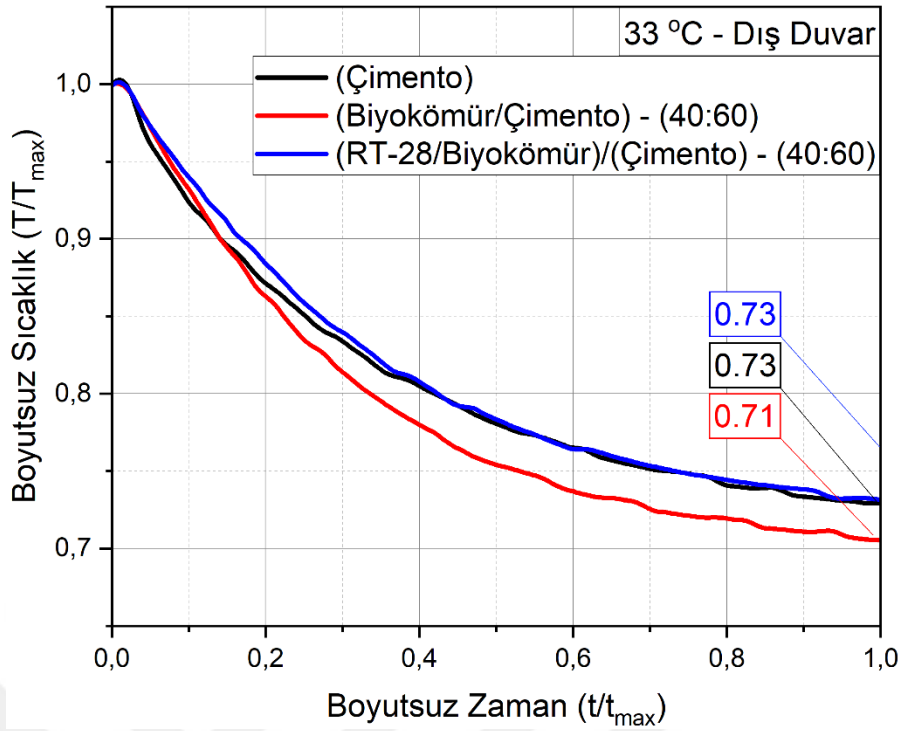
- ✓ Biyokömür kullanılması durumunda elde edilen kompozitin ısı iletkenliği düşmesi avantaj oluşturmaktadır.

- ✓ Biyokömür kullanılması durumunda elde edilen kompozitin özgül ısısı düşmesi dezavantaj yaratmaktadır.
- ✓ 33°C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in çoğunlukla erimemesi nedeniyle duvar bileşenine enerji depolama yeteneği kazandırılmadığı söylenebilir.

4.1.1. Soğutma (Deşarj) Performans Ölçümleri

Soğuma performansı açısından beklenen en iyi performans kriteri iç ortam sıcaklığının yüksek kalması veya başka bir ifadeyle yavaş soğumasıdır. Soğutma performans ölçümleri ısıtma kaynağının devre dışı bırakılmasından itibaren üç farklı duvar bileşeninin sıcaklığının zamana göre değişimleri belirlenerek elde edilmiştir. Deşarj başlangıç noktasını aynı tutmak amacıyla her bir duvar bileşeni için sıcaklıklar ilgili bileşenin maksimum sıcaklığına bölünerek boyutsuz olarak verilmiştir.

Şekil 4.6; çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için dış duvar deşarj davranışlarını göstermektedir. Biyokömür/çimento ve çimento duvar modelleri için soğuma işlemi duyulur ısının deşarj edilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bu açıdan bakıldığında, dış duvar açısından en hızlı deşarj, düşük özgül ısısından dolayı biyokömür/çimento duvarında gerçekleşmiştir. Çimento duvar için ise soğumanın biyokömür/çimento modeline göre daha yavaş olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise çimentonun özgül ısısının, biyokömür/çimento kompozitine kıyasla daha büyük olmasıdır. 33 °C sıcaklığındaki dış ortam koşullarında içerisinde RT-28 bulunan (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde ise dış duvara yakın kısımda RT-28 kısmen faz değiştirmiştir. Bu durumun etkisiyle başlangıçta soğuma diğerlerine göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Bununla birlikte (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin çimentoya göre daha düşük özgül ısıya sahip olması bu avantajını yitirmesine neden olmaktadır. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0.73, 0.71 ve 0.73 olarak ölçülmüştür.

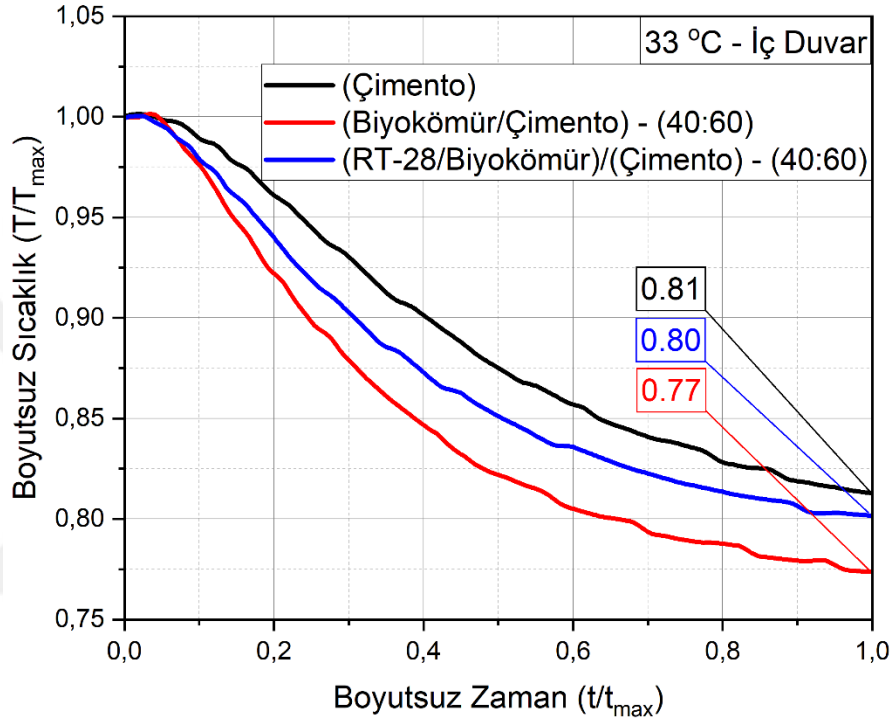


Şekil 4.6 Dış duvar soğuma eğrileri (33°C)

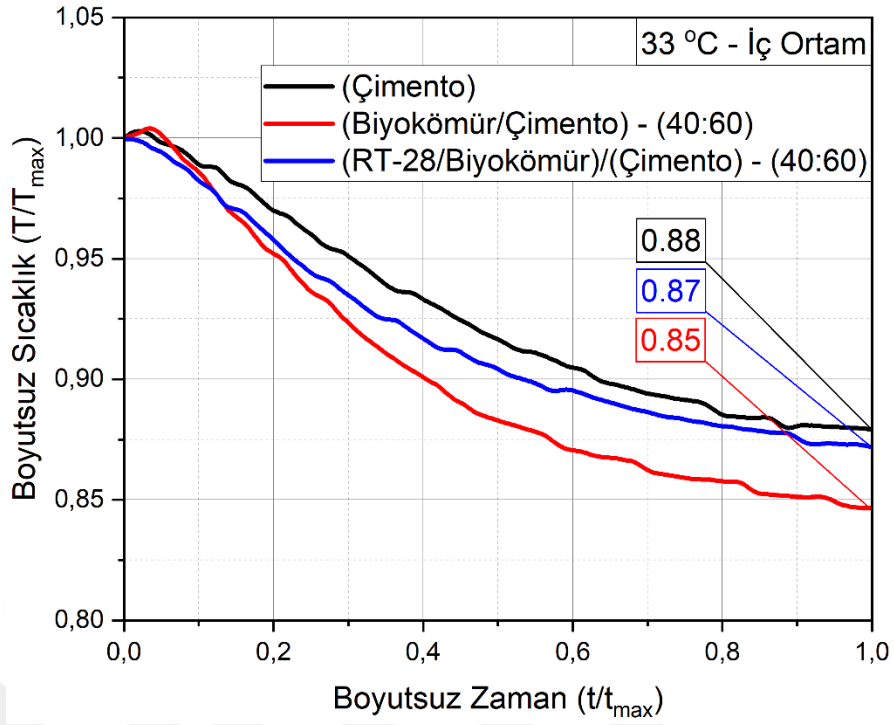
Şekil 4.7; çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için iç duvar soğuma eğrilerini göstermektedir. İç duvar açısından soğuma performanslarının karşılaştırılmasından hızlıdan yavaşa doğru soğuma sırasının biyokömür/çimento, (RT-28/biyokömür)/(çimento) ve çimento biçiminde olduğu görülmektedir. Özgül ısılarının büyüklük sıralamasının da çimento>(RT-28/biyokömür)/(çimento)> biyokömür/çimento olduğu gözönüne alındığında soğuma performansının özgül ısılarla ters orantılı biçimde gerçekleştiği görülmektedir. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0,81, 0,77 ve 0,80 olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.8; üç farklı duvar modeli için iç ortama ait soğuma eğrilerini göstermektedir. İç duvara benzer olarak soğuma performans sıralaması kötüden iyiye biyokömür/çimento, (RT-28/biyokömür)/(çimento) ve çimento olarak belirlenmiştir. Buna neden olarak ta çimentonun en yüksek özgül ısıya sahip olması nedeniyle daha geç biçimde bünyesindeki duyulur ısı enerjisi bırakmasıdır. Buna karşılık biyokömür/çimento ise en küçük özgül ısıya sahip olduğundan bünyesinde bulunan duyulur ısıyı en hızlı bırakmaktadır. (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvarı ise özgül ısı

değeri olarak arada olduğundan ikisinin arasında soğuma performansı göstermektedir. Bununla birlikte RT-28/biyokömür)/(çimento) duvarının dış tarafında kısmen eriyen RT-28'in soğuma performansı açısından gerek iç duvar gerekse de iç ortama herhangi bir fayda sağlamadığı tespit edilmiştir. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0.88, 0.85 ve 0.87 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.7 İç duvar soğuma eğrileri (33°C)



Şekil 4.8 İç ortam soğuma eğrileri (33°C)

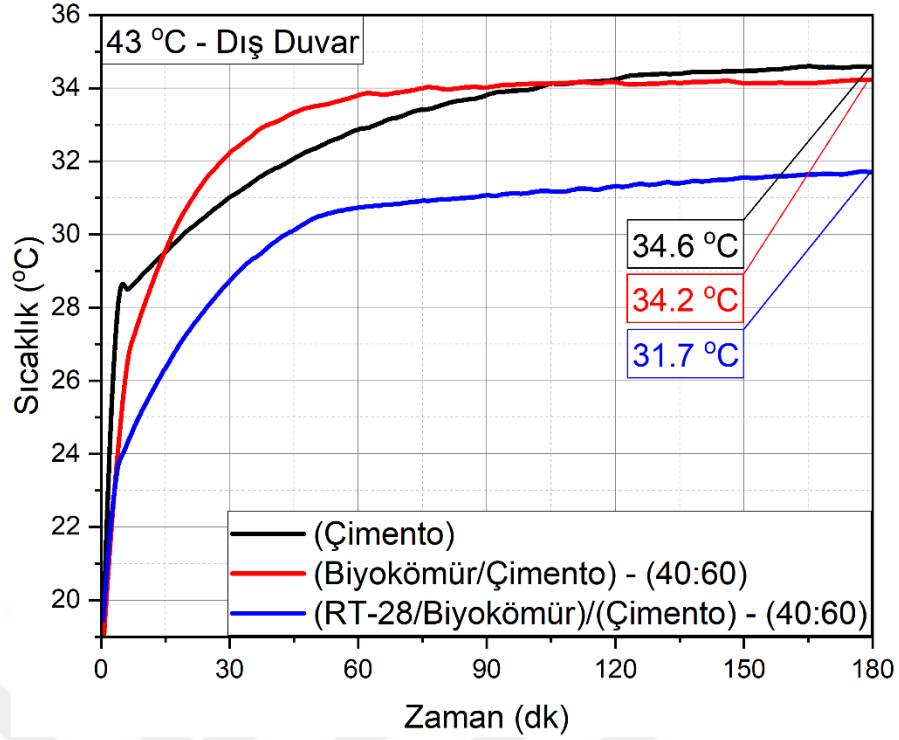
33°C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan deşarj performans ölçümleri sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır.

- ✓ Çimento içerisine biyokömür katkılanması durumunda ısıl iletkenliğin ve özgül ısının düşürülmesinin soğuma performansı üzerindeki kümülatif etkisi olumsuz olarak gerçekleşmiştir.
- ✓ Gözeneklerine RT-28 emdirilmiş biyokömür/çimento kompozitinin ısıl iletkenliğinin ve özgül ısısının çimentoya kıyasla düşük olmasının soğuma performansı üzerindeki kümülatif etkisi de negatiftir.
- ✓ 33°C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in çoğunlukla erimemiş olması, etkin olarak kullanılamamasına neden olmaktadır.

4.2. 43°C Ortam Sıcaklığı için Performans Ölçümleri

4.2.1 Isıtma (şarj) performans ölçümleri

43°C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir.

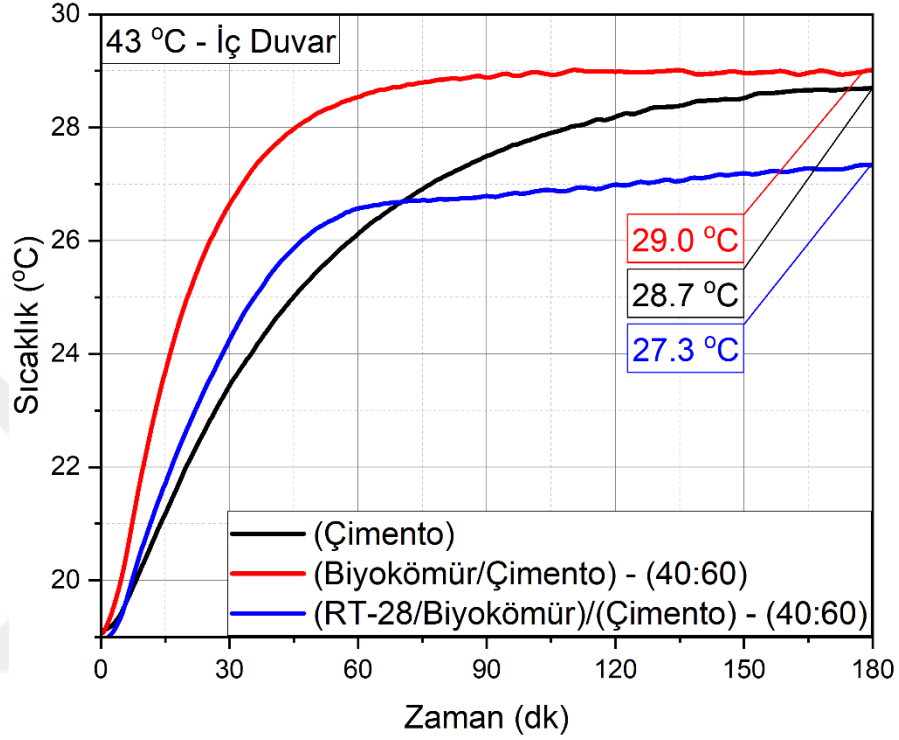


Şekil 4.9 Dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (43 °C)

Üç farklı duvar modeli için dış duvar sıcaklıklarının zamana göre değişimleri yukarıda 33°C dış ortam koşulu için anlatılan mekanizmaya benzer olarak gerçekleşmektedir. Ortam sıcaklığının daha fazla olması ile orantılı olarak sıcaklık eğrileri daha büyük artışlar sergilemektedirler. Örneğin çimento ve biyokömür/çimento duvar modellerinde dış sıcaklıklar 34 °C civarını aşmaktadırlar. 33 °C dış ortam koşulu ile karşılaştırılacak şekilde sıcaklık artış eğrileri incelendiğinde çimento ve biyokömür/çimento duvar modellerinde sıcaklık artış eğrilerinin yine birbirine yakın olduğu görülmektedir. Buna karşılık (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin dış duvar sıcaklık eğrisinin diğer eğrilerden belirgin bir şekilde ayrıldığı görülmektedir. Başka bir ifadeyle sıcaklık değerleri diğer iki modele göre daha düşük bir hızla artış göstermektedir. Buna neden olarak dış duvara açık gözeneklerdeki RT-28'in tam erime sağlayacak biçimde gizli enerji depolamasıdır. Gerçekten de dış duvar sıcaklığının yaklaşık olarak 15. dakikadan itibaren RT-28'in erime başlangıç sıcaklığı olan 26.5 °C'nin üzerine çıktığı görülmektedir. 180. dakika itibariyle çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin dış duvar sıcaklıkları sırasıyla 34.6 °C, 34.2 °C 31.7 °C olduğu belirlenmiştir. Görüleceği üzere (RT-28/biyokömür)/(çimento) kullanılması durumunda dış duvar sıcaklığı açısından çimentoya göre 2.9 °C civarında bir iyileşme elde edilmiştir. Bu durumda çimentoya

göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin ısıtma performansının %8.4 iyileştirildiği belirlenmiştir.

43 °C dış ortam koşulunda üç farklı duvar modeli için iç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.10’da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 İç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (43 °C)

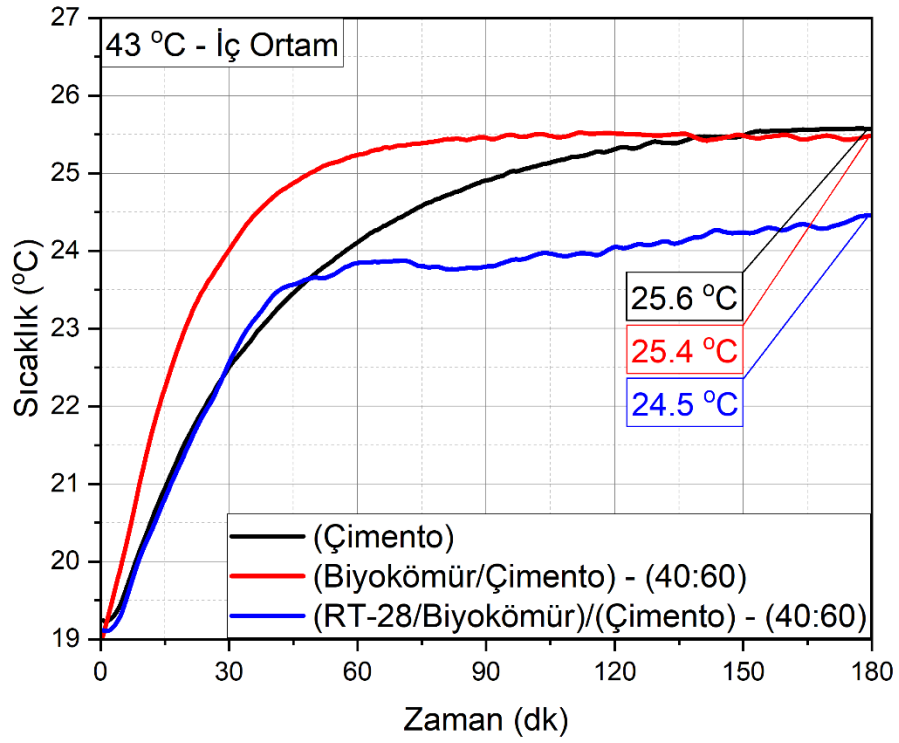
İç duvar açısından yapılan değerlendirmeye göre biyokömür/çimento duvar modeli zamana göre en hızlı sıcaklık artışı oluşturması nedeniyle en kötü performansa sahiptir. Bu durum esasen, biyokömür/çimento duvar modelinin en düşük özgül ısıya sahip olması nedeniyle en düşük duyulur ısı depolama yeteneğine sahip olmasının bir sonucudur. Başka bir ifadeyle biyokömür/çimento duvar modeli hızlı bir sıcaklık artışı gerçekleştirmekte olup 29 °C sıcaklıkta termal denge konumuna ulaşmaktadır. Biyokömür gözeneklerine RT-28 emdirilmesi suretiyle elde edilmiş olan (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modeli ise yaklaşık olarak 26.5 °C’ ye kadar duyulur ısı depolaması şeklinde enerji depolamaktadır. Ancak bu duyulur ısı depolaması sırasında sıcaklık artışının biyokömür/çimentoya göre daha yavaş olduğu görülmektedir. Bunun nedenlerinden birisi (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin özgül ısısının biyokömür/çimento duvar modeline göre görece olarak daha

yüksek olmasıdır. Diğer neden ise 15.dakikadan itibaren dış duvardan iç doğru biyokömür gözeneklerindeki RT-28'in faz değişim sürecine girmeye başlamış olması olarak gösterilebilir. Başka bir deyişle iç duvara ulaşan ve sıcaklık artışına neden olan ısı'nın duvar boyunca yakalanarak azaltılmasıdır. Bununla birlikte RT-28'in faz değişim sürecinin asıl etkisini 60. dakikadan sonra göstermeye başladığı da söylenebilir. Bunun nedeni olarak dış duvardan iç duvara doğru gerçekleşen RT-28 faz değişim sürecinin etkisinin gecikmeli ortaya çıkmasıdır. Bununla birlikte sıvı RT-28'in ısı iletkenliğinin katı RT-28'e göre düşük olduğu daha önce belirlenmişti. Bu sebepten dolayı gözenekler içerisindeki RT-28'in sıvı hale geçmesiyle kompozit yığın ısı iletkenliğinde ek bir azalma olacağı da açıktır. Kompozit ısı iletkenliğinde bu ek düşüşün de (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin sıcaklık artışının kısıtlamasında etkisi bulunmaktadır. 180. dakika itibariyle biyokömür/çimento, çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin dış duvar sıcaklıkları sırasıyla 29.0 °C, 28.7 °C 27.3 °C olduğu belirlenmiştir. Görüleceği üzere (RT-28/biyokömür)/(çimento) kullanılması durumunda iç duvar sıcaklığı açısından çimentoya göre 1.4 °C civarında bir iyileşme elde edilmiştir. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin ısıtma performansının %4.9 iyileştirildiği belirlenmiştir.

İç duvar sıcaklığının 180. dakika itibariyle 27.3 °C olmasından çıkarılabilecek bir diğer gözlem ise (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin içerisindeki RT-28'in tamamının erime sürecini bitirmediğidir. Bu sonuç RT-28 için erime sonlanma sıcaklığının 28.47 °C olmasından çıkarılabilir.

43 °C dış ortam koşulunda üç farklı duvar modeli için iç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. İç ortam sıcaklıklarındaki değişimin, dış duvar ve iç duvar değişimlerine paralel olduğu görülmektedir. 180. dakika itibariyle çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin iç ortam sıcaklıkları sırasıyla 25.6 °C, 25.4 °C 24.5 °C olduğu belirlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında çimento duvar modeline göre 1.1 °C bir iyileşme elde edildiği söylenebilir. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin ısıtma performansının %4.3 iyileştirildiği belirlenmiştir.

Bununla birlikte kompozit içerisindeki RT-28'in faz değişimine uğramamış kısımlarının mevcut ısı depolama kapasiteleri, 43 °C ortam koşulunda konfor sıcaklığını 180 dakikadan daha fazla uzatabileceği de söylenebilir.



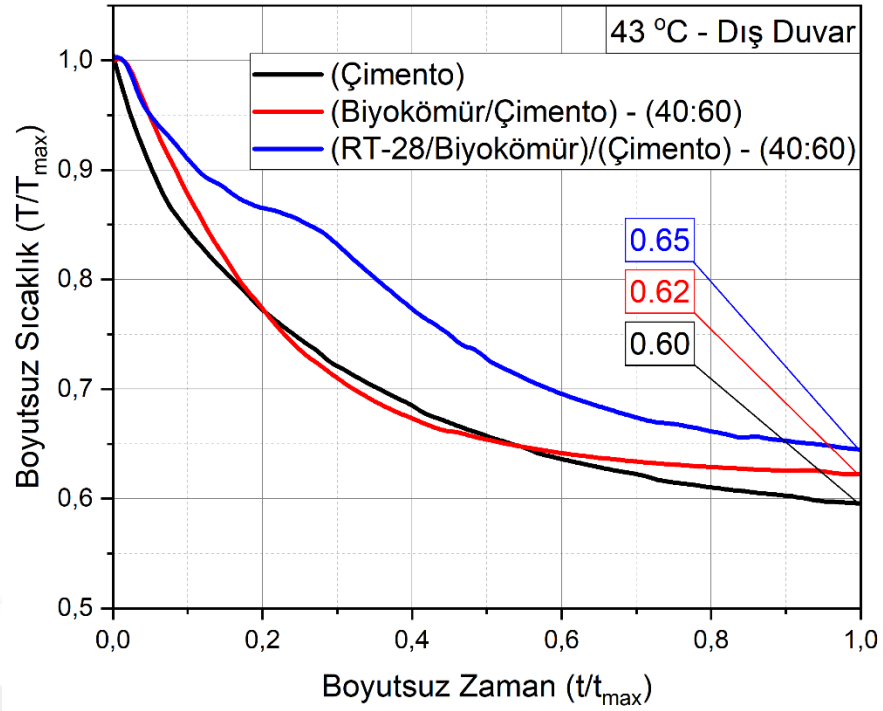
Şekil 4.11 İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi (43°C)

43 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan şarj performans ölçümleri sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır.

- ✓ (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in eriyerek sıvı hale gelmesi kompozit ısıl iletkenliğinde düşüğe neden olmaktadır.
- ✓ 43 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28, eriyerek ortam sıcaklığının düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

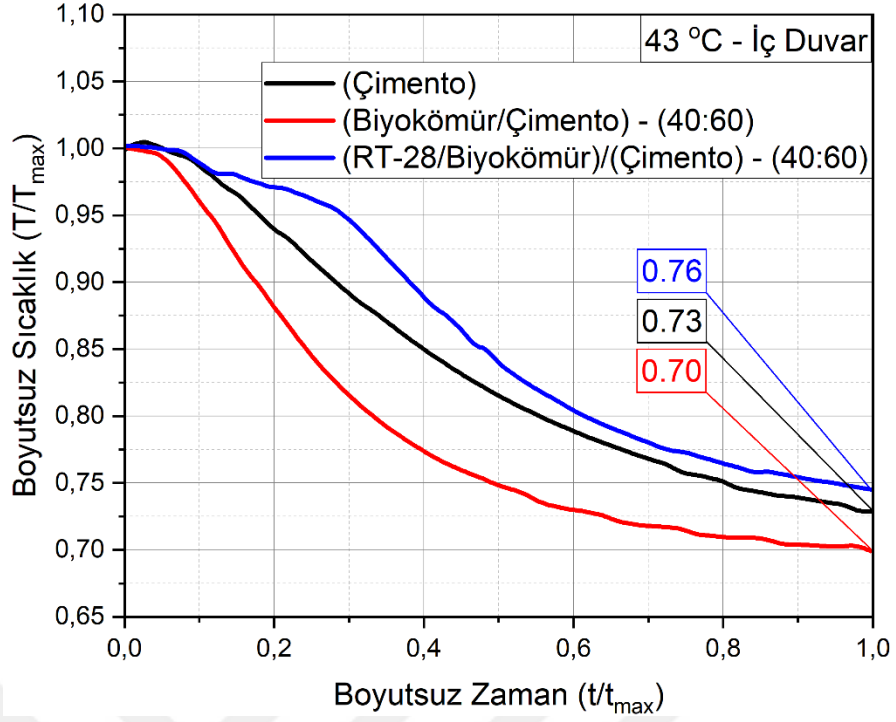
4.2.2. Soğutma (Deşarj) Performans Ölçümleri

Soğutma (deşarj) performans ölçümleri ısıtma kaynağının devre dışı bırakılmasından itibaren üç farklı duvar bileşeninin sıcaklığının zamana göre değişimleri belirlenerek elde edilmiştir. Deşarj başlangıç noktasını aynı tutmak amacıyla her bir duvar bileşeni için sıcaklıklar ilgili bileşenin maksimum sıcaklığına bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir.



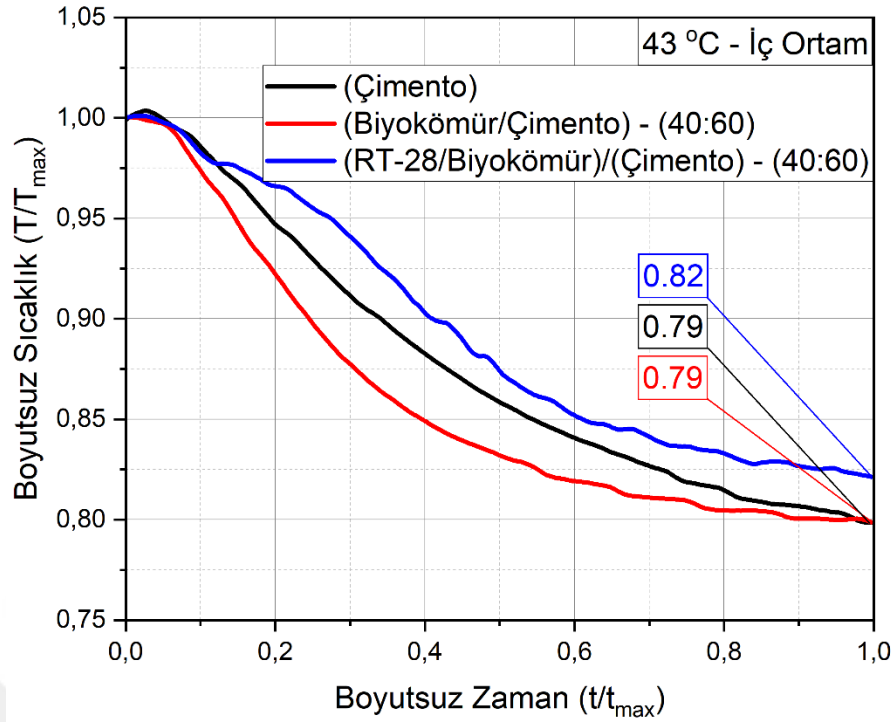
Şekil 4.12 Dış duvar soğuma eğrileri (43 °C)

Şekil 4.12; çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için dış duvara ait deşarj eğrilerini vermektedir. 0.1 ile 0.3 boyutsuz zaman aralığında çimento ve biyokömür/çimento duvar modellerinin aksine (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde belirgin bir yavaşlama görülmektedir. Bu yavaşlama esasen RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde gözenek içerisinde şarj işlemi sırasında depolanan gizli ısının tekrar geriye bırakılması işlemidir. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0.60, 0.62 ve 0.65 olarak ölçülmüştür. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin soğuma performansının %8.3 iyileştirildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.13 İç duvar soğuma eğrileri (43 °C)

Şekil 4.13; çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için iç duvar soğuma eğrilerini göstermektedir. İç duvar açısından soğuma performanslarının karşılaştırılmasından hızlıdan yavaşa doğru soğuma sırasının biyokömür/çimento, çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) biçiminde olduğu görülmektedir. 33 °C ortam koşulundan farklı olarak RT-28 içeren kompozitin en iyi deşarj performansını sergilediği belirlenmiştir. 0.1 ile 0.3 boyutsuz zaman aralığında çimento ve biyokömür/çimento duvar modellerinin aksine (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde belirgin bir yavaşlama görülmektedir. Bu yavaşlama esasen RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde gözenek içerisinde depolanmış gizli ısının deşarj işlemi sonucunda bırakılması işlemidir. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0.73, 0.70 ve 0.76 olarak ölçülmüştür. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin soğuma performansının %4.1 iyileştirildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.14 İç ortam soğuma eğrileri (43 °C)

43 °C dış ortam koşulları için iç ortam deşarj davranışlarının zamana göre değişimi ise Şekil 4.14'te gösterilmiştir. İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimlerinin iç duvar sıcaklıkları ile benzer davranışlar gösterdiği belirlenmiştir.

Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0,79, 0,79 ve 0,82 olarak ölçülmüştür. İç ortam açısından soğuma performanslarının karşılaştırılmasından hızlıdan yavaşa doğru soğuma sırasının biyokömür/çimento, çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) biçiminde olduğu görülmektedir. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür/(çimento) duvar modelinin soğuma performansının % 3,8 iyileştirildiği belirlenmiştir.

43 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan deşarj performans ölçümleri sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır.

- ✓ (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in eriyerek sıvı hale gelmesi sonucunda kompozit ısı iletkenliğinde meydana gelen ek düşüş, avantaj oluşturmaktadır.

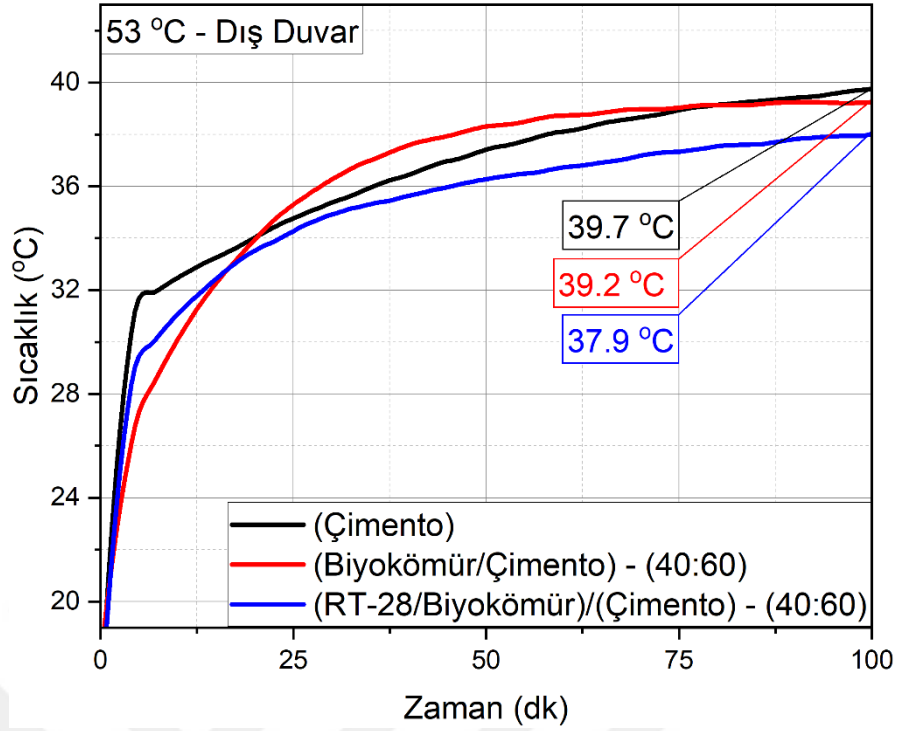
- ✓ 43 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki kısmen erimiş RT-28'in depolamış olduğu ısı enerjisi geri salması soğuma hızını yavaşlatmaktadır.

4.3. 53 °C Ortam Sıcaklığı için Performans Ölçümleri

4.3.1 Isıtma (Şarj) Performans Ölçümleri

Farklı duvar modelleri için dış duvar, iç duvar ve iç ortam ısıtma (şarj) performansları 53 °C dış ortam koşulunda ve 100 dakikalık zaman dilimi için termal cevapların ölçülmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Zaman diliminin diğerlerinden farklı olarak 100 dakika olarak belirlenmesindeki temel gerekçe, 53 °C dış ortam sıcaklığında performans testleri gerçekleştirilirken (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin iç duvar sıcaklığının RT-28 in erime sonlanma sıcaklığı olan 28.5 °C sıcaklık değerine ulaşması olarak gösterilebilir. Başka bir ifadeyle biyokömür gözeneklerine hapsedilen RT-28, tam olarak eriyerek termal enerji depolama kapasitesini doldurmaktadır.

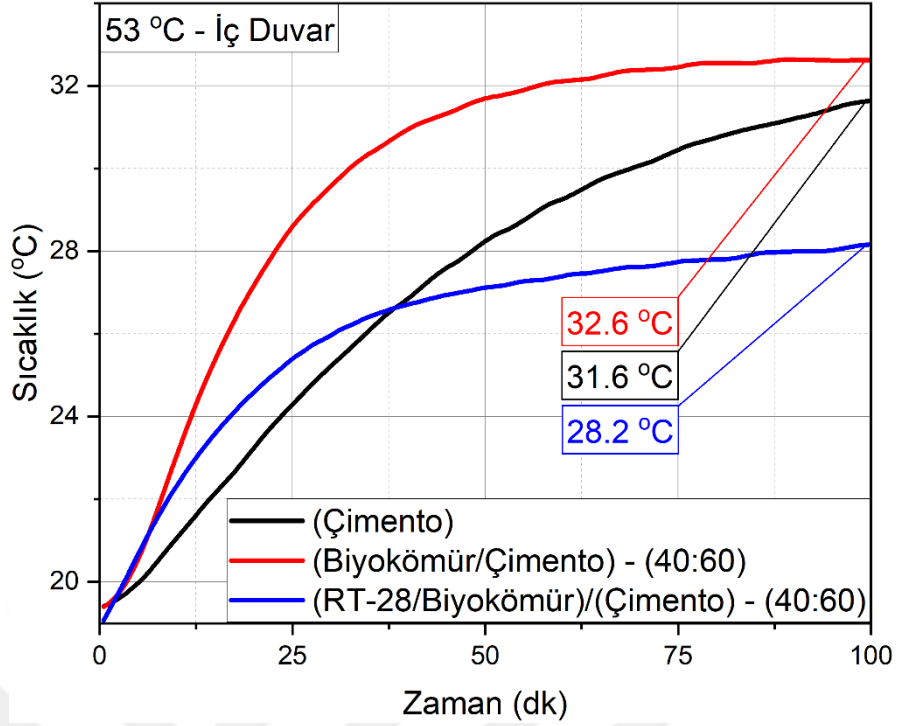
53 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.15'de verilmiştir. Üç farklı duvar modeli için dış duvar sıcaklıklarının zamana göre değişimleri yukarıda 33 °C ve 43 °C dış ortam koşulu için anlatılan mekanizmaya benzer olarak gerçekleşmektedir. Ortam sıcaklığının daha yüksek olması ile orantılı olarak sıcaklık eğrileri, daha büyük artışlar sergilemektedirler. Başka bir ifadeyle 53 °C dış ortam koşulunda dış duvar sıcaklığı daha yüksek bir sıcaklık değerinde termal dengeye gelmektedirler. Çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modellerinde dış sıcaklıklar 37 °C civarını aşmaktadırlar. 43 °C dış ortam koşulu ile karşılaştırılacak şekilde sıcaklık artış eğrileri incelendiğinde çimento ve biyokömür/çimento duvar modellerinde sıcaklık artış eğrilerinin yine birbirine yakın olduğu görülmektedir. Buna karşılık (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin dış duvar sıcaklık eğrisinin 43 °C dış ortam koşulunda olduğu gibi diğer duvar modellerine göre bariz bir farklılık göstermediği görülmektedir. Buna neden olarak agresif ısıtma koşulları gerçekleştirildiğinde duvar modellerinin benzer davranışlar sergileyerek ısı dengeye gelmesi gösterilebilir.



Şekil 4.15 Dış duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (53 °C)

100. dakika itibariyle çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin dış duvar sıcaklıkları sırasıyla 39.7 °C, 39.2 °C 37.9 °C olduğu belirlenmiştir. Görüleceği üzere (RT-28/biyokömür)/(çimento) kullanılması durumunda dış duvar sıcaklığı açısından çimentoya göre 1.8 °C civarında bir iyileşme elde edilmiştir. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin ısıtma performansının % 4.5 iyileştirildiği belirlenmiştir.

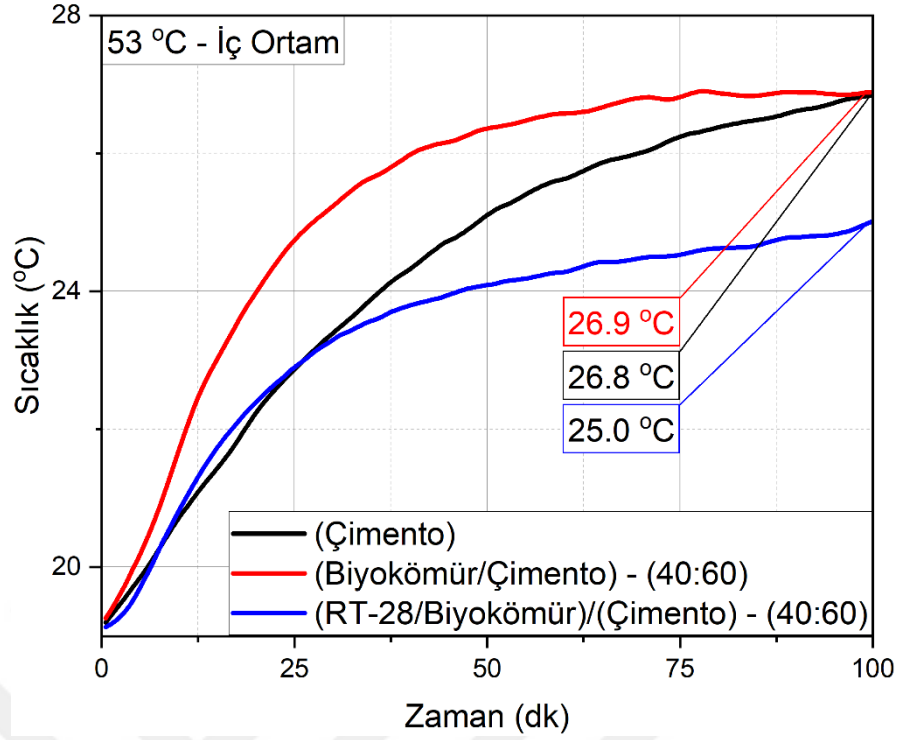
53°C dış ortam koşulunda üç farklı duvar modeli için iç duvar sıcaklığının zamana göre değişim eğrileri Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Zamana göre en hızlı sıcaklık artışı göstermesi nedeniyle iç duvar açısından yapılan değerlendirmeye göre biyokömür/çimento duvar modeli en kötü performansa sahiptir. İç duvarlarda biyokömür/çimento duvar modelinin en düşük performans göstermesinin nedeni, modelin en düşük özgül ısıya ve dolayısıyla en düşük duyulur ısı depolama kapasitesine sahip olmasıdır.



Şekil 4.16 İç duvar sıcaklığının zamana göre değişimi (53°C)

Biyokömür gözeneklerine RT-28 emdirilmesi suretiyle elde edilmiş olan (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde 25. dakikadan itibaren sıcaklık artışının belirgin bir yavaşlamaya uğradığı görülmektedir. Bu durum dış duvardan itibaren biyokömür gözeneklerinde tutulan RT-28'in faz değişimine uğrayarak termal enerjinin depolamasının doğal bir sonucudur. Başka bir ifadeyle duvarın enerji depolama karakterine sahip olması nedeniyle iç duvara ulaşan ısı miktarı azalmaktadır. İç duvar sıcaklığının 100. dakika itibarıyla 28.2 °C olmasından çıkarılabilecek başka bir sonuç, (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin içerisindeki RT-28'in hemen hemen tamamının erimeye uğramasıdır. 100. dakika itibarıyla biyokömür/çimento, çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin dış duvar sıcaklıkları sırasıyla 32.6 °C, 31.6 °C ve 28.2 °C olduğu belirlenmiştir. Görüleceği üzere (RT-28/biyokömür)/(çimento) kullanılması durumunda iç duvar sıcaklığı açısından çimentoya göre 3.4 °C civarında bir iyileşme elde edilmiştir. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin ısıtma performansının % 10.8 iyileştirildiği belirlenmiştir.

53 °C dış ortam koşulunda üç farklı duvar modeli için iç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimi (53°C)

İç ortam sıcaklıklarındaki değişimin, dış duvar ve iç duvar değişimlerine paralel olduğu görülmektedir. 100. dakika itibariyle çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitlerinin iç ortam sıcaklıkları sırasıyla 26.8 °C, 26.9 °C 25.0 °C olduğu belirlenmiştir. Bu açıdan bakıldığında çimento duvar modeline göre 1.8 °C bir iyileşme elde edildiği söylenebilir. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin ısıtma performansının % 6.7 iyileştirildiği söylenebilir.

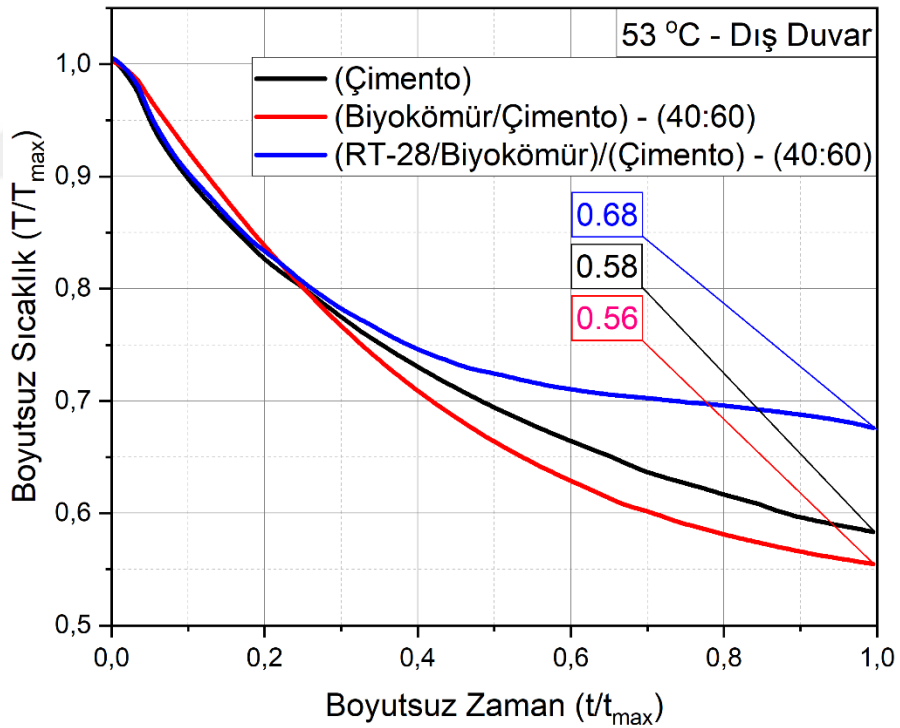
53°C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan performans ölçümleri sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır.

- ✓ (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in tamamen eriyerek sıvı hale gelmesi kompozit ısı iletkenliğinde düşüşü daha da azaltmaktadır.
- ✓ 33 °C ve 43 °C dış ortam koşulları ile karşılaştırıldığında RT-28'in tamamının erimesiyle daha etkin bir enerji depolama süreci gerçekleşmiştir.

- ✓ 53 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28 tamamen erimesi duvar boyunca ısı geçişini yavaşlatmaktadır.
- ✓ 53 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitine etkin bir biçimde enerji depolama kabiliyeti kazandırılmasıyla iç duvar ve iç ortam açısından termal koruma sağlandığı belirlenmiştir.

4.3.2 Soğutma (deşarj) performans ölçümleri

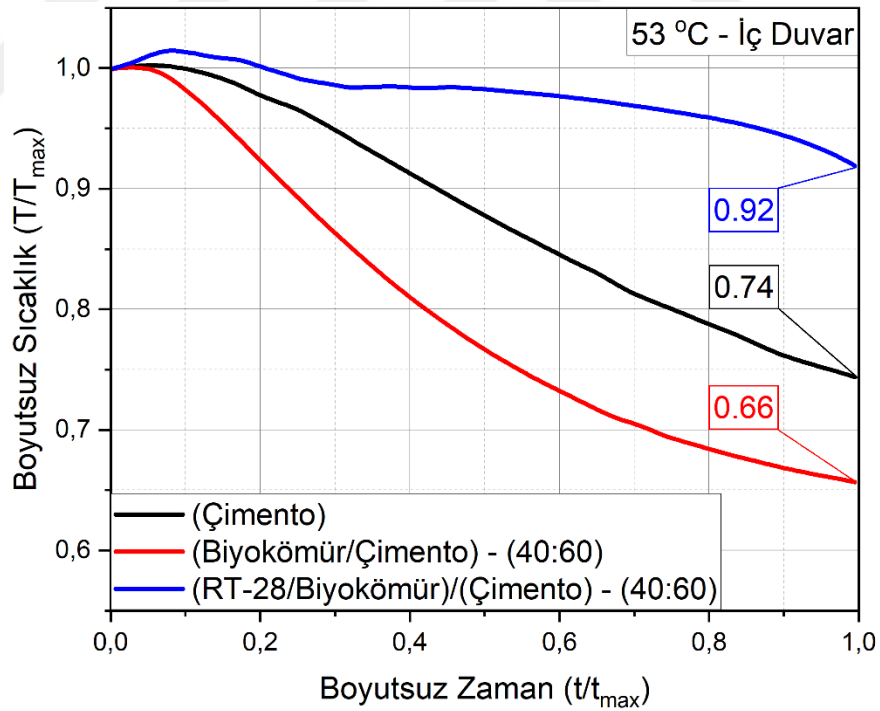
Soğutma (deşarj) performans ölçümleri ısıtma kaynağının 100. dakikada devre dışı bırakılmasından itibaren üç farklı duvar bileşeninin sıcaklığının zamana göre değişimleri belirlenerek elde edilmiştir. Deşarj başlangıç noktasını aynı tutmak amacıyla her bir duvar bileşeni için sıcaklıklar ilgili bileşenin maksimum sıcaklığına bölünerek boyutsuz hale getirilmiştir.



Şekil 4.18 Dış duvar soğuma eğrileri (53 °C)

Şekil 4.18; çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için dış duvara ait deşarj eğrilerini vermektedir. 53 °C dış ortam sıcaklığında kompozit dış duvar sıcaklıkları 38-40 °C aralığına kadar çıkmış olduğundan

başlangıçta hızlı bir biçimde soğuma görülmektedir. Bu durum duyulur ısı olarak depolanan enerjinin serbest bırakılması olarak açıklanabilir. RT-28'in katılaşma sıcaklığına yaklaşıldığında (yaklaşık olarak 28.5 °C) gizli ısı olarak depolanan ısımanın serbest bırakılmaya başlaması RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin soğuma hızını önemli ölçüde yavaşlatmaktadır. Öyle ki 0.3 boyutsuz zamandan itibaren çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modellerinin deşarj eğrileri arasındaki fark giderek açılmaktadır. 0.45 boyutsuz zamandan itibaren ise (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde belirgin bir yavaşlama görülmektedir. Bu yavaşlamanın nedeni, RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde gözenek içerisinde şarj işlemi sırasında depolanan gizli ısının tekrar geriye bırakılmasıdır. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0.58, 0.56 ve 0.68 olarak ölçülmüştür. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin soğuma performansının %17.24 iyileştirildiği belirlenmiştir.

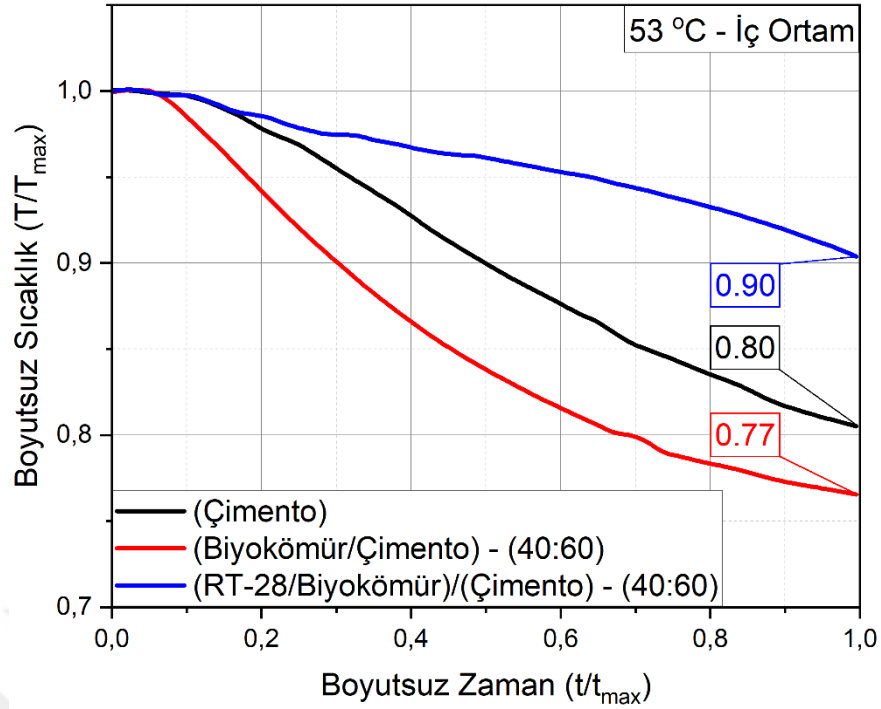


Şekil 4.19 İç duvar soğuma eğrileri (53°C)

Şekil 4.19; çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için iç duvar soğuma eğrilerini göstermektedir. İç duvar açısından soğuma

performanslarının karşılaştırılmasından hızlıdan yavaşa doğru soğuma sırasının biyokömür/çimento, çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) biçiminde olduğu görülmektedir. 0.3 boyutsuz zamandan itibaren çimento ve biyokömür/çimento duvar modellerinin aksine (RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde belirgin bir yavaşlama görülmektedir. Bu yavaşlama esasen RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinde gözenek içerisinde depolanmış gizli ısınnın deşarj işlemi sonucunda bırakılması işlemidir. Bu açıdan bakıldığında en iyi soğuma performansının RT-28/biyokömür)/(çimento) olduğu söylenebilir. Deşarj eğrilerinin incelenmesinden çıkarılabilecek başka bir sonuç ise (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozit duvarının ısıtma kaynağının devre dışı bırakılmasından itibaren 10 dakika süresince ısınmaya devam etmesidir. Başka bir ifadeyle RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozit iç duvarı ısıtma işleminin sona ermesine gecikmeli olarak tepki vermektedir. Buna neden olarak ısıtıcıdan verilen ısının ve dış duvara yakın gözeneklerdeki RT-28'in katılaşması sonucu bırakılan ısının birlikte hareket ederek iç duvara gecikmeli olarak ulaşması gösterilebilir. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0.74, 0.66 ve 0.92 olarak ölçülmüştür. Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin soğuma performansının % 24.3 iyileştirildiği belirlenmiştir.

53 °C dış ortam koşulları için iç ortam deşarj davranışlarının zamana göre değişimi Şekil 4.20'de gösterilmiştir. İç ortam sıcaklığının zamana göre değişimlerinin iç duvar sıcaklıkları ile benzer davranışlar gösterdiği belirlenmiştir. Deşarj işlemi sonucunda boyutsuz sıcaklık değerleri çimento, biyokömür/çimento ve RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelleri için sırasıyla 0.80, 0.77 ve 0.90 olarak ölçülmüştür. İç ortam açısından soğuma performanslarının karşılaştırılmasından hızlıdan yavaşa doğru soğuma sırasının biyokömür/çimento, çimento ve (RT-28/biyokömür)/(çimento) biçiminde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.20. İç ortam soğuma eğrileri (53°C)

Bu durumda çimentoya göre RT-28/biyokömür)/(çimento) duvar modelinin soğuma performansının % 12.5 iyileştirildiği belirlenmiştir.

53 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan deşarj performans ölçümleri sonucunda aşağıdaki yargılara varılmıştır.

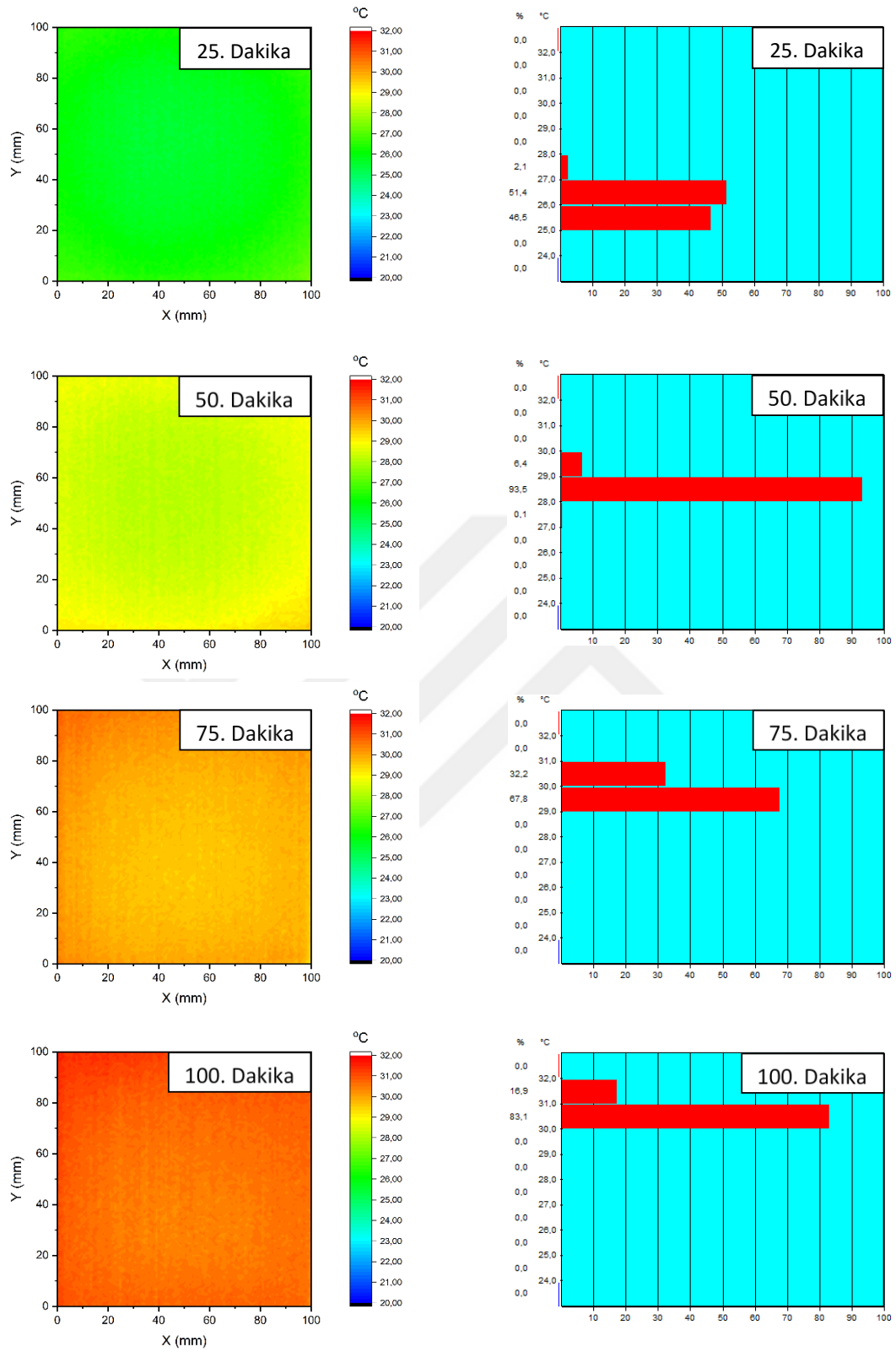
- ✓ (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin çimento ve biyokömür/çimento kompozitine göre daha geç tepki vermesi önemli bir avantajdır.
- ✓ 53 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki tamamen erimiş RT-28'in depolamış olduğu ısı enerjisi geri salması soğuma hızını önemli ölçüde yavaşlatmaktadır.

4.4 Termal Kamera Ölçümleri

Tek noktadan yapılan termal performans testlerine ilave olarak duvar yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılabilmesi için eş sıcaklık konturları elde edilmiştir. Eş sıcaklık konturları 53 °C dış ortam sıcaklık koşullarında; çimento, biyokömür/çimento ve (RT-28/biyokömür)/çimento duvar modellerinin iç duvarı üzerinden termal kamera aracılığıyla elde edilmiştir.

Şekil 4.21, 53 °C dış ortam koşulunda çimento duvar modelinin iç yüzeyinden termal kamera ile 25 dakika aralıklarla alınan eş sıcaklık konturlarını vermektedir. Şekil 4.21 ayrıca her bir eş sıcaklık konturuna ait gruplandırılmış sıcaklık histogramlarını da içermektedir. Genel olarak sıcaklık dağılımının iç duvar yüzeyi boyunca homojen olduğu görülmektedir.

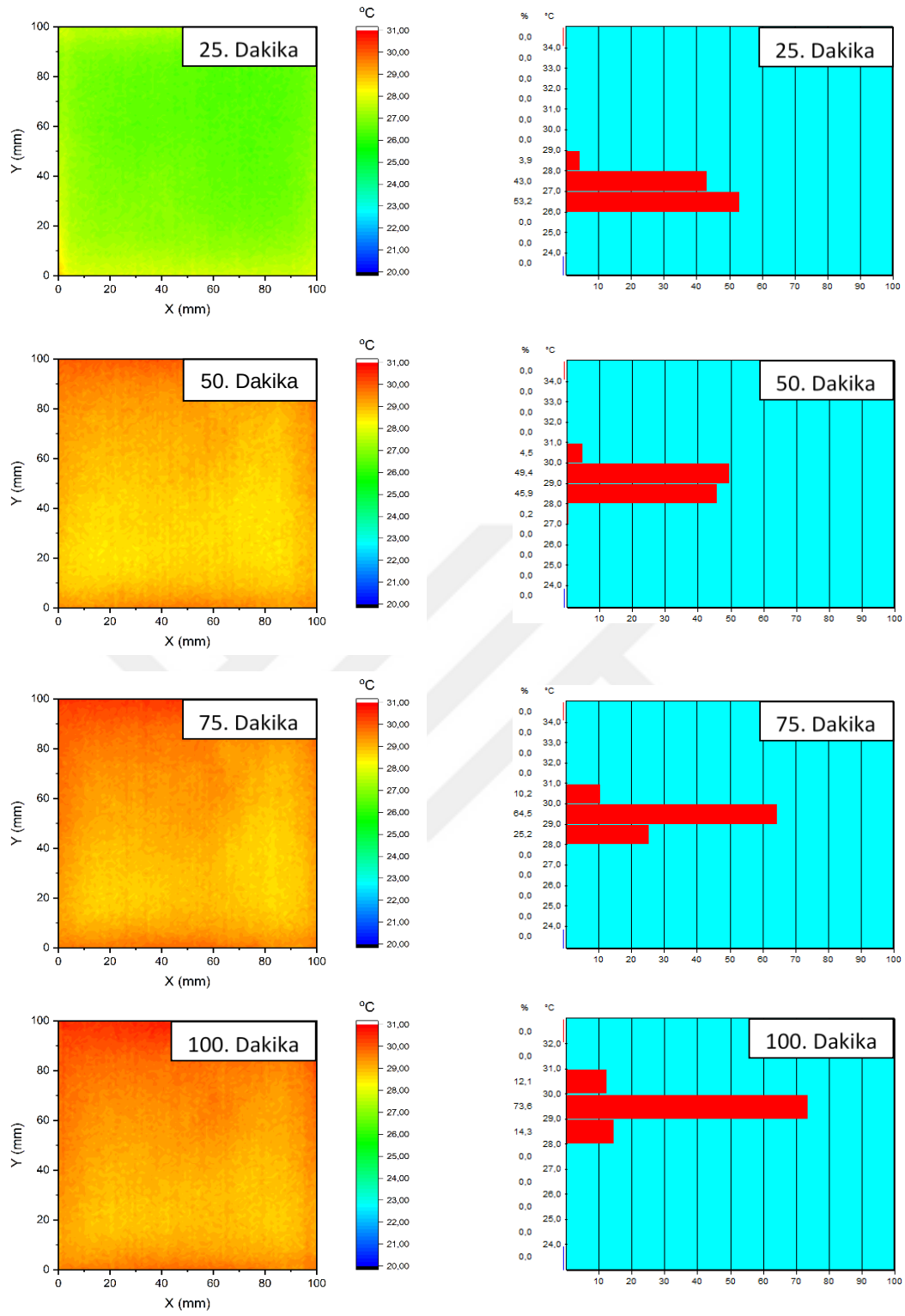
25. dakika anında elde edilen eş sıcaklık konturu için iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığı 26 °C olarak ölçülmüştür. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %46.5'i 25 °C-26 °C, %51.4'ünün 26 °C-27 °C, %2.1'inin ise 27 °C-28 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %6.9 olarak ölçülmüştür. 50. dakikaya gelindiğinde yüzey sıcaklığındaki artış kontur değişiminden ve histogram barlarının yukarı kaymasından anlaşılmaktadır. 50. dakika anında elde edilen eş sıcaklık konturunun analizi sonucunda ortalama yüzey sıcaklığının 28.5 °C olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte yüzey sıcaklık dağılımının %0.1'inin 27 °C-28 °C, %93.5'unun 28 °C-29 °C, %6.4'ünün ise 29 °C-30 °C aralığına girdiği tespit edilmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %3.9 olarak ölçülmüştür. 75. dakika anında elde edilen eş sıcaklık konturunun incelenmesi sonucunda iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığı 29.8 °C olarak ölçülmüştür. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %67.8'i 29 °C-30 °C, %32.2'si ise 30 °C-31 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %4.7 olarak ölçülmüştür. 100. dakika itibari ile eş sıcaklık konturundan iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığının 30.7 °C olduğu belirlenmiştir. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %83.1'i 30 °C-31 °C, %16.9'u ise 31 °C-32 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %4.2 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.21 53 °C dış ortam koşulunda çimento duvar modelinin eş sıcaklık konturları ve histogramları

Şekil 4.22, 53 °C dış ortam koşulunda biyokömür/çimento duvar modelinin iç yüzeyinden termal kamera ile 25 dakika aralıklarla alınan eş sıcaklık konturlarını ve bunlara ait sıcaklık histogramlarını göstermektedir. Eş sıcaklık konturlarının zamana göre sıcaklık artışı gösterdiği ancak aynı zaman anı için sıcaklık dağılımının genel olarak homojen yapıda olduğu belirlenmiştir.

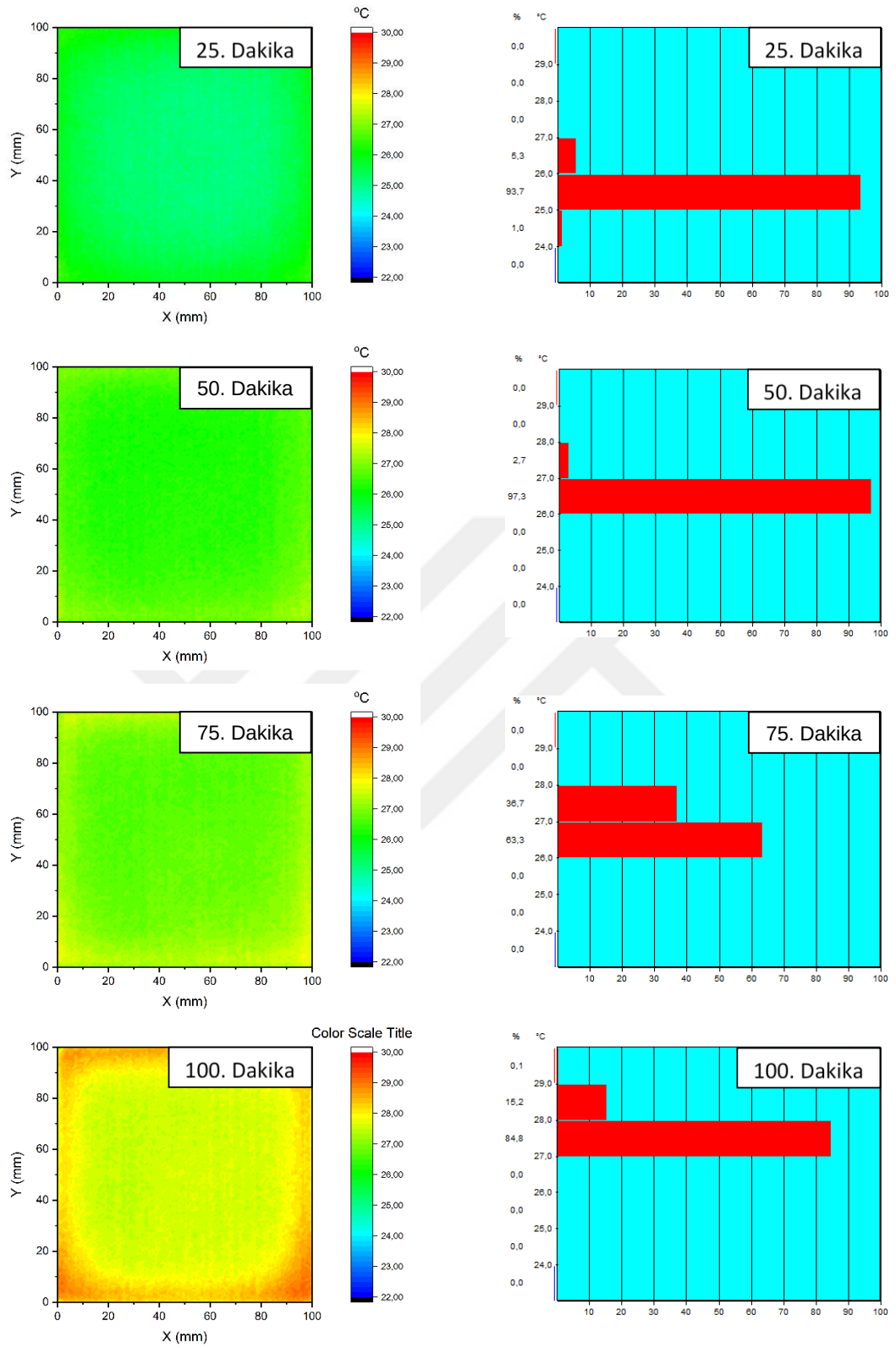
Eş sıcaklık konturlarının incelenmesinden 25. dakika anında iç duvar yüzeyine ait ortalama sıcaklık değerinin 27 °C olduğu görülmektedir. Aynı zaman anı için ortalama yüzey sıcaklığı çimento duvar modelinin iç yüzey sıcaklığına kıyasla 1 °C daha yüksektir. Ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvara göre daha yüksek olması onun çimento duvara göre daha kötü performans sergilediğinin bir ölçüsüdür. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %53.2'si 26 °C-27 °C, %43'ünün 27 °C-28 °C, %3.9'unun ise 28 °C-29 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Ortalama sıcaklığa göre sapma ise %7.4 olarak ölçülmüştür. 50. dakika anı için eş sıcaklık konturu ve histogram barlarının incelenmesinden iç duvar ortalama yüzey sıcaklığının 29.1 °C olduğu ölçülmüştür. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvar modelinden 0.6 °C daha yüksek olduğu görülmektedir. Başka bir ifadeyle ortalama yüzey sıcaklığı açısından (RT-28/biyokömür)/çimento duvarının beligen biçimde daha kötü performans gösterdiği söylenebilir. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %45.9'u 28 °C-29 °C, %49.4'ü 29 °C-30 °C, %4.5'inin ise 30 °C-31 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığına göre sapma ise %5.8 olarak ölçülmüştür. 75. dakika anında elde edilen eş sıcaklık konturunun incelenmesi sonucunda iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığı 29.3 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvar modelinden 0.5 °C daha düşük olduğu ve daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %25,2'sinin 28 °C-29 °C, %64.5'inin 29 °C-30 °C ve %10.2'sinin de 30 °C-31 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %5.1 olarak ölçülmüştür. 100. dakika itibari ile eş sıcaklık konturundan iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığının 29.4 °C olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvar modelinden 1.3 °C daha düşük olduğu ve daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %14.3.'ü 28 °C-29 °C, %73.6'sının ise 29 °C-30 °C ve %12.1'inin 30 °C-31 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %4.8 olarak ölçülmüştür. Çimento duvar modeline kıyasla duvar yüzeyi boyunca homojenliğin hafifçe bozulduğu söylenebilir.



Şekil 4.22 53 °C dış ortam koşulunda biyokömür/çimento duvar modelinin eş sıcaklık konturları ve histogramları

Şekil 4.23, 53 °C dış ortam koşulunda (RT-28/biyokömür)/çimento duvar modelinin iç yüzeyinden termal kamera ile 25 dakika aralıklarla alınan eş sıcaklık konturlarını vermektedir. Şekil 4.23 ayrıca her bir eş sıcaklık konturu için sıcaklık histogramlarını da göstermektedir.

25. dakika anında elde edilen eş sıcaklık konturu için iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığı 25.4 °C olarak ölçülmüştür. Aynı zaman anı için ortalama yüzey sıcaklığı çimento duvar modelinin iç yüzey sıcaklığına kıyasla 0.6 °C daha düşüktür. Ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvara göre daha düşük olması onun çimento duvara göre daha iyi performans sergilediğinin bir ölçüsüdür. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %1'i 24 °C-25 °C, %93.7'sinin 25 °C-26 °C, %5.3'ünün ise 26 °C-27 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %4.7 olarak ölçülmüştür. 50. dakika anı için eş sıcaklık konturu ve histogram barlarının incelenmesinden iç duvar ortalama yüzey sıcaklığının 26.5 °C olduğu ölçülmüştür. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvar modelinden 2 °C daha yüksek olduğu görülmektedir. Başka bir ifadeyle ortalama yüzey sıcaklığı açısından (RT-28/biyokömür)/çimento duvarının belığın biçimde daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %97.3'ü 26 °C-27 °C, %2.7'si 27 °C-28 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığına göre sapma ise %3.8 olarak ölçülmüştür. 75. dakika anında elde edilen eş sıcaklık konturunun incelenmesi sonucunda iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığı 26.9 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvar modelinden 2.9 °C daha düşük olduğu ve daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %63.3'ü 26 °C-27 °C, %36.7'si ise 27 °C-28 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %4.1 olarak ölçülmüştür. 100. dakika itibari ile eş sıcaklık konturundan iç duvar yüzeyinin ortalama sıcaklığının 27.7 °C olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama yüzey sıcaklığının çimento duvar modelinden 3 °C daha düşük olduğu ve daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Yüzey boyunca sıcaklık dağılımının %84.8'i 27 °C-28 °C, %15.2'si ise 28 °C-29 °C aralığında olduğu belirlenmiştir. Bu durumda ortalama sıcaklığa göre maksimum sapma %3.6 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.23 53 °C dış ortam koşulunda (RT-28/biyokömür)/(çimento) çimento duvar modelinin eş sıcaklık konturları ve histogramları

53 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modelinin ortalama yüzey sıcaklıkları açısından karşılaştırması sonucunda elde edilen bulgular Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Tablo 4.1 belirli zaman anlarındaki çimento duvar modelinin ortalama yüzey sıcaklıklarını ve diğer duvar modellerinin ortalama yüzey sıcaklıklarının çimento duvar modeline göre fark değerlerini vermektedir. Bu açıdan bakıldığında çimento duvar modeline kıyasla negatif fark değerlerinin oluşması konfor koşullarına yaklaşma olarak algılanabilir. Başka bir ifadeyle ortalama yüzey sıcaklıkları açısından en iyi performansın (RT-28/biyokömür)/çimento duvar modelinde elde edildiği açıktır. Bu sonucun daha önce tek nokta ölçümü ile elde edilen sonuçlara paralel olduğu da görülmektedir.

Çizelge 4.1 Ortalama Yüzey Sıcaklıkları

Zaman (dakika)	Çimento (°C)	Biyokömür-Çimento (°C)	(RT-28/Biyokömür)-(Çimento) (°C)
25	26	+1	-0.6
50	28.5	+0.6	-2
75	29.8	-0.5	-2.9
100	30.7	-1.3	-3.0

Ortalama yüzey sıcaklığına göre maksimum sapma yüzdelerinin üç duvar modeli açısından karşılaştırması ise Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 Duvar modellerinde homojenlik değerlerine göre standart sapma yüzdeleri

Zaman (dakika)	Çimento (%)	Biyokömür/Çimento (%)	(RT-28/Biyokömür)/(Çimento) (%)
25	6.9	7.4	4.7
50	3.9	5.8	3.8
75	4.7	5.1	4.1
100	4.2	4.8	3.6

Çizelge 4.2'ye bakıldığında biyokömür/çimento duvar modeli homojenlik açısından en kötü duvar modeli olarak görülmektedir. Akabinde çimento duvar modelinin biyokömür/çimento duvar modeline göre daha başarılı bir performans sergilemiştir. Buna karşılık (RT-28/Biyokömür)/(Çimento) kompozit duvar modelinin, Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere en düşük sapma yüzdelerine sahip olduğu dolayısıyla bu açıdan da en iyi performansa sahip olduğu belirlenmiştir.



5. SONUÇLAR

Bu tez; enerji verimli binaların tasarımında kullanılacak bina bileşenlerinin oluşturulmasında farklı gözenekli malzemelere faz değiştiren malzeme (FDM) hapsedilmesiyle elde edilen FDM kompozitlerinin yapı bileşenleri ile karıştırılması sağlanarak basitleştirilmiş bir bina modelinde enerji depolama kabiliyetinin belirlenmesi ile ilgili çalışmalar içermektedir. Bu amaçla, tarımsal atık ürünlerinden, piroliz yöntemi kullanılarak biyokömür üretimi yapılmıştır. Üretilen biyokömür gözeneklerine vakum empregnasyon yöntemi ile FDM emdirilerek biyokömür/FDM kompozitleri elde edilmiştir. Elde edilen FDM/biyokömür kompozitleri yapı malzemeleri içerisine katılarak yapı harcı haline getirilmiştir. Hazırlanan kompozit malzeme ve yapı harçları ayrı ayrı kullanılarak bina modelleri hazırlanıp farklı deney setleri oluşturulmuştur. Bu bina modellerinde ölçümler gerçekleştirildikten sonra elde edilen veriler ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan bulgular ve değerlendirmelerden elde edilen sonuçlar aşağıda özet olarak sunulmuştur.

1. RT-28 için elde edilen endoterm eğrisinin analiz edilmesi sonucunda erime başlangıç sıcaklığı $T_{eb}=26,44$ °C, erime pik sıcaklığı $T_{ep}=27.1$ °C, erime sonlanma sıcaklığı ise $T_{es}=28.47$ °C olarak ölçülmüştür. Buna ilave olarak erime gizli ısı $H_e=210,08$ J/g olarak belirlenmiştir.
2. Altı farklı organik malzeme gözeneklerine RT-28 hapsedilmesiyle elde edilen RT-28/Organik malzeme kompozitleri için erime başlangıç, erime pik, erime sonlanma sıcaklıkları çok fazla bir değişime uğramamaktadır. Başka bir ifadeyle RT-28'in erime sıcaklıkları malzeme türünden etkilenmemektedir.
3. DTK analizi sonucunda RT-28/Kavak talaşı kompozitinin en yüksek gizli ısıya ($H_e=50.05$ J/g) sahip olduğu belirlenmiştir.
4. Altı farklı malzemeden elde edilen biyokömür/RT-28 kompozitlerinin erime sıcaklıklarının biyokömür malzemesinden bağımsız olduğu belirlenmiştir.
5. Kullanılan tüm organik malzemelerin biyokömür haline getirilmesi sonucunda RT-28 hapsedilme kapasiteleri artmaktadır. Bununla birlikte en yüksek gizli ısı değeri 700 °C maksimum sıcaklık, 10 °C/dk ısıtma hızı ve 1 saat bekleme süresinde piroliz işlemi gerçekleştirilerek $H_e=75.12$ J/g ile RT-28/kavak talaşı

biyokömürü için elde edilmiştir. Bu durumda bina duvarında kullanılmak üzere en uygun kompozitin RT-28/kavak talaşı biyokömürü olduğu belirlenmiştir.

6. Isıtma hızı ($10\text{ }^{\circ}\text{C/ dk}$) ve bekleme süresi (1 saat) sabit tutularak farklı piroliz sıcaklıklarında ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) kavak talaşından biyokömür sentezlenerek gözeneklere RT-28 emdirilmesi ile elde edilen kompozitlerin gizli ısı değerleri sırası ile 75.12 J/g , 91.84 J/g , 96.40 J/g , 98.17 J/g ve 101.04 J/g 'dır. En uygun maksimum sıcaklık değeri $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir.
7. Maksimum piroliz sıcaklığı ($300\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve bekleme süresi (1 saat) sabit tutularak farklı ısıtma hızlarında ($10\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$, $7.5\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$ ve $5\text{ }^{\circ}\text{C/ dk}$) kavak talaşından biyokömür sentezlenerek gözeneklere RT-28 emdirilmesi ile elde edilen kompozitlerin gizli ısı değerleri sırası ile 101.4 J/g , 91.26 j/g ve 85.25 J/g 'dır. En uygun ısıtma hızı $10\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$ olarak belirlenmiştir.
8. Maksimum piroliz sıcaklığı ($300\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve ısıtma hızı ($10\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$) sabit tutularak farklı bekleme sürelerinde (1 saat, 2 saat ve 3 saat) kavak talaşından elde edilen biyokömür gözeneklerine RT-28 emdirilmesi ile elde edilen kompozitlerin gizli ısı değerleri sırası ile 101.04 J/g , 101.11 J/g ve 103.54 J/g 'dır. En uygun bekleme süresi 3 saat olarak belirlenmiştir.
9. Gerçekleştirilen DTK analizleri sonucunda RT-28/biyokömür kompozitine etkin bir enerji depolama kabiliyeti kazandırabilmek için; organik malzeme olarak kavak talaşı kullanılması, maksimum piroliz sıcaklığının $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ olması, ısıtma hızının $10\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$ olması ve bekleme süresinin de 1 saat olması kararlaştırılmıştır.
10. Sızdırmazlık testleri sonrasında filtre kâğıdının gözle incelenmesi sonucunda herhangi bir RT-28 izine rastlanmamıştır. Bu gözlem RT-28'in gözeneklerden dışarıya sızmadığını göstermekte olup elde edilen RT-28/kavak talaşı biyokömür kompozitlerinin bina duvar bileşenlerinde kullanılabilecek şekil kararlılığını taşıdığını göstermektedir.
11. Saf çimentonun ısıl iletkenlik değeri 0.362 W/mK ve özgül ısı değeri $1.762\text{ MJ/m}^3\text{K}$ olarak ölçülmüştür. Kütlece 40:60 oranında biyokömür/çimento karışımının ısıl iletkenlik değeri 0.114 W/mK ve özgül ısı ise 0.799

MJ/m³K'tür. Gözeneklerine RT-28 hapsedilmiş biyokömürün 40:60 oranında çimento ile karıştırılması sonucunda elde edilen kompozitin ısı iletkenlik değeri ise 0.198 W/mK ve özgül ısı değeri 1.267 MJ/m³K olarak ölçülmüştür.

12. 33 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan şarj performans ölçümleri sonucunda biyokömür kullanılması durumunda elde edilen kompozitin ısı iletkenliği düşmesinin avantaj oluşturduğu belirlenmiştir. Buna karşılık biyokömür kullanılması durumunda elde edilen kompozitin özgül ısısının düşmesi ise dezavantaj yaratmaktadır. 33 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in çoğunlukla erimemesi nedeniyle duvar bileşenine etkin bir enerji depolama yeteneği kazandırılmadığı söylenebilir.

13. 33 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan deşarj performans ölçümleri sonucunda, çimento içerisine biyokömür katkılanması durumunda ısı iletkenliğin ve özgül ısının düşmesinin soğuma performansı üzerindeki kümülatif etkisinin olumsuz olduğu görülmüştür. Ayrıca gözeneklerine RT-28 emdirilmiş biyokömür/çimento kompozitinin ısı iletkenliğinin ve özgül ısısının çimentoya kıyasla düşük olmasının soğuma performansı üzerindeki kümülatif etkisi de negatiftir. 33 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in çoğunlukla erimemiş olması etkin olarak kullanılamamasına neden olmaktadır.

14. 43 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan şarj performans ölçümleri sonucunda (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in eriyerek sıvı hale gelmesiyle kompozitin ısı iletkenliğinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. 43 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28 eriyerek ortam sıcaklığının düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Çimentoya kıyasla (RT-28/kavak talaşı biyokömürü)/(çimento) kompozit duvarının; 43 °C dış ortam koşulunda iç ortam sıcaklığını 1.1 °C düşürdüğü gözlemlenmiştir.

15. 43 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan deşarj performans ölçümleri sonucunda (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in eriyerek sıvı hale gelmesiyle, kompozitin ısı

iletkenliğinde meydana gelen ek düşüş avantaj oluşturmıştır. 43 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki kompozitinin içerisindeki kısmen erimiş RT-28'in depolamış olduğu ısı enerjisi geri salması soğuma hızını yavaşlatmaktadır. (RT-28/kavak talaşı biyokömürü)/(çimento) kompozit duvarının sadece çimento kullanılan duvar modeline kıyasla 43 °C dış ortam koşullarında deşarj performansını %3.8 iyileştirebildiği gözlemlenmiştir.

16. 53 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan şarj performans ölçümleri sonucunda (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28'in tamamen eriyerek sıvı hale gelmesiyle, kompozitin ısı iletkenliğinde meydana gelen düşüşü daha da azaltmaktadır. 33 °C ve 43 °C dış ortam koşulları ile karşılaştırıldığında RT-28'in tamamının erimesiyle daha etkin bir enerji depolama süreci gerçekleşmiştir. 53 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki RT-28 tamamen erimesi duvar boyunca ısı geçişini yavaşlatmıştır. 53 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitine etkin bir biçimde enerji depolama kabiliyeti kazandırılmasıyla iç duvar ve iç ortam açısından termal koruma sağlandığı belirlenmiştir. Çimentoya kıyasla (RT-28/kavak talaşı biyokömürü)/(çimento) kompozit duvarının, 53 °C dış ortam koşullarında iç ortam sıcaklığını 1.8 °C düşürdüğü belirlenmiştir.

17. 53 °C dış ortam sıcaklığında üç farklı duvar modeli için yapılan deşarj performans ölçümleri sonucunda (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin çimento ve biyokömür/çimento kompozitine göre daha geç tepki vermesinin önemli bir avantaj olduğu görülmüştür. 53 °C dış ortam koşullarında (RT-28/biyokömür)/(çimento) kompozitinin içerisindeki tamamen erimiş RT-28'in depolamış olduğu ısı enerjisi geri salması soğuma hızını önemli ölçüde yavaşlatmıştır. (RT-28/kavak talaşı biyokömürü)/(çimento) kompozit duvarının sadece çimento kullanılan duvar modeline kıyasla 53 °C dış ortam koşullarında deşarj performansını %17.24 iyileştirebildiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında faz değiştiren malzeme olarak RT-28 kullanılmıştır. Başka bir ifadeyle faz değişimi çoğunlukla 28 °C'ye yakın gerçekleşmektedir. Bu açıdan bakıldığında ortam sıcaklığının konfor şartlarında tutulabilmesi için 24 °C veya 25 °C

sıcaklık civarında faz değişimine sahip bir faz değiştiren malzeme kullanımının daha uygun olabileceği sonucuna varılmıştır. İlerleyen dönemlerde çalışmaların buna yönelik olarak gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. 250 °C ile 350 °C aralığında farklı ara değer parametrelerinin uygulanmasıyla elde edilecek biyokömürlerin gözeneklerine FDM emdirilmesi sonucunda elde edilecek kompozitlerin, gizli ısı depolama etkilerinin incelenmesi açısından faydalı olabileceği düşünölmektedir. Ham organik malzemeler biyokömüre dönüştürölüp vakum emdirme işlemi uygulandıktan sonra yapılan DTK ölçömlerinde, en yüksek iyileştirme yüzdesine sahip organik malzemenin yer fıstığı kabuğu olduğu tespit edilmiştir. Piroliz koşullarının değiştirilmesiyle elde edilecek yer fıstığı kabuğu biyokömürlerine FDM emdirilerek oluşturulacak kompozitlerin, kavak talaşına kıyasla daha yüksek gizli ısı depolama özelliğine sahip olma potansiyelinin araştırılması ise ayrı bir çalışma olarak ele alınabilir. Ponza taşı, vermikölit gibi farklı gözenekli malzemelere FDM emdirilerek elde edilen kompozitlerin bina duvar modellerinde kullanılması da literatüre önemli katkılar sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Atinafu, D. G., Jin Chang, S., Kim, K.-H. and Kim, S.** (2020a). Tuning surface functionality of standard biochars and the resulting uplift capacity of loading/energy storage for organic phase change materials. *Chemical Engineering Journal*, 394, 125049.
- Atinafu, D. G., Chang, S. J. and Kim, S.** (2020b). Infiltration properties of n-alkanes in mesoporous biochar: The capacity of smokeless support for stability and energy storage. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 123041.
- Atinafu, D. G., Yeol Yun, B., Uk Kim, Y., Wi, S. and Kim, S.** (2021a). Introduction of eicosane into biochar derived from softwood and wheat straw: Influence of porous structure and surface chemistry. *Chemical Engineering Journal*, 415, 128887.
- Atinafu, D. G., Yun, B. Y., Wi, S., Kang, Y. and Kim, S.** (2021b). A comparative analysis of biochar, activated carbon, expanded graphite, and multi-walled carbon nanotubes with respect to PCM loading and energy-storage capacities. *Environmental Research*, 195, 110853.
- Atinafu, D. G., Wi, S., Yun, B. Y. and Kim, S.** (2021b). Engineering biochar with multiwalled carbon nanotube for efficient phase change material encapsulation and thermal energy storage. *Energy*, 216, 119294.
- Atinafu, D. G., Yun, B. Y., Yang, S. and Kim, S.** (2022a). Encapsulation of dodecane in gasification biochar for its prolonged thermal/shape stability, reliability, and ambient enthalpy storage. *Chemical Engineering Journal*, 437, 135407.
- Atinafu, D. G., Yang, S., Yun, B. Y., Kang, Y. and Kim, S.** (2022b). Use of biochar co-mediated chitosan mesopores to encapsulate alkane and improve thermal properties. *Environmental Research*, 212, 113539.
- Atinafu, D. G., Yun, B. Y., Choi, J. Y., Yuan, X., Ok, Y. S. and Kim, S.** (2023). Introduction of sustainable food waste-derived biochar for phase change material assembly to enhance energy storage capacity and enable circular economy. *Journal of Energy Storage*, 72, 108338.
- Atinafu, D. G., Choi, J. Y., Yun, B. Y., Nam, J., Kim, H. B. and Kim, S.** (2024). Energy storage and key derives of octadecane thermal stability during phase change assembly with animal manure-derived biochar. *Environmental Research*, 240, 117405.
- Chen, Y., Cui, Z., Ding, H., Wan, Y., Tang, Z., and Gao, J.** (2018). Cost-Effective Biochar Produced from Agricultural Residues and Its Application for Preparation of High Performance Form-Stable Phase Change Material via Simple Method. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10).
- Chen, J., Kang, S., Jiaqiang, E., Huang, Z., Wei, K., Zhang, B., ... and Liao, G.** (2019). Effects of different phase change material thermal management strategies on the cooling performance of the power lithium ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 442, 227228.
- Cheng, W. L., Mei, B. J., Liu, Y. N., Huang, Y. H. and Yuan, X. D.** (2011). A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation. *Energy*, 36(10), 5797-5804.
- Cheng, X., Zhai, X. and Wang, R.** (2016). Thermal performance analysis of a packed bed cold storage unit using composite PCM capsules for high temperature solar cooling application. *Applied thermal engineering*, 100, 247-255.

- Das, D., Bordoloi, U., Muigai, H. H., and Kalita, P.** (2020). A novel form stable PCM based bio composite material for solar thermal energy storage applications. *Journal of Energy Storage*, 30, 101403.
- Demir, İ.** (2006). Kyoto protokolü amaçlarına ulaşabilme yolunda dünya enerji kullanımında meydana gelebilecek değişiklikler. *Gazi Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(2), 241-251.
- Fabiani, C., Santini, C., Barbanera, M., Giannoni, T., Rubino, G., Cotana, F., and Pisello, A. L.** (2023a). Phase change materials-impregnated biomass for energy efficiency in buildings: Innovative material production and multiscale thermophysical characterization. *Journal of Energy Storage*, 58, 106223.
- Fabiani, C., Santini, C., Barbanera, M., Giannoni, T., Rubino, G., Cotana, F., and Pisello, A. L.** (2023b). Phase change materials-impregnated biomass for energy efficiency in buildings: Innovative material production and multiscale thermophysical characterization. *Journal of Energy Storage*, 58, 106223.
- He, Q., Fei, H., Zhou, J., Liang, X., and Pan, Y.** (2023). Utilization of carbonized water hyacinth for effective encapsulation and thermal conductivity enhancement of phase change energy storage materials. *Construction and Building Materials*, 372, 130841.
- Hekimoğlu, G., Sari, A., Arunachalam, S., Arslanoğlu, H., and Gencel, O.** (2021). Porous biochar/heptadecane composite phase change material with leak-proof, high thermal energy storage capacity and enhanced thermal conductivity. *Powder Technology*, 394, 1017-1025.
- Holman J. P.** (2012). *Experimental methods for engineers, 8th edition*. Mcgraw-hill, New York, 739p.
- Jeon, J., Park, J. H., Wi, S., Yang, S., Ok, Y. S., and Kim, S.** (2019a). Characterization of biocomposite using coconut oil impregnated biochar as latent heat storage insulation. *Chemosphere*, 236, 124269.
- Jeon, J., Park, J. H., Wi, S., Yang, S., Ok, Y. S., & Kim, S.** (2019b). Latent heat storage biocomposites of phase change material-biochar as feasible eco-friendly building materials. *Environmental Research*, 172, 637-648.
- Johansson, M. T. and Söderström, M.** (2014). Electricity generation from low-temperature industrial excess heat—an opportunity for the steel industry. *Energy efficiency*, 7, 203-215.
- Kabeel, A. E., Khalil, A., Shalaby, S. M. and Zayed, M. E.** (2016). Experimental investigation of thermal performance of flat and v-corrugated plate solar air heaters with and without PCM as thermal energy storage. *Energy Conversion and management*, 113, 264-272.
- Kaizawa, A., Maruoka, N., Kawai, A., Kamano, H., Jozuka, T., Senda, T. and Akiyama, T.** (2008). Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system. *Heat and mass transfer*, 44, 763-769.
- Kim, Y. U., Yun, B. Y., Nam, J., Choi, J. Y., Wi, S., & Kim, S.** (2021). Evaluation of thermal properties of phase change material-integrated artificial stone according to biochar loading content. *Construction and Building Materials*, 305, 124682.
- Konuklu, Y., ve Paksoy, H. Ö.** (2011). Faz değiştiren maddeler ile binalarda enerji verimliliği. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir.
- Kumar, P., Thomas, S., Sobhan, C. B. and Peterson, G. P.** (2024). Activated carbon foam composite derived from PEG400/ Terminalia Catappa as form stable PCM for sub-zero cold energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 434, 139993.

- Liang, Q., Pan, D. and Zhang, X.** (2023). Construction and application of biochar-based composite phase change materials. *Chemical Engineering Journal*, 453, 139441.
- Lv, L., Wang, J., Ji, M., Zhang, Y., Huang, S., Cen, K. and Zhou, H.** (2022). Effect of structural characteristics and surface functional groups of biochar on thermal properties of different organic phase change materials: Dominant encapsulation mechanisms. *Renewable Energy*, 195, 1238-1252.
- Lv, L., Huang, S. and Zhou, H.** (2024). Effect of introducing chemically activated biochar as support material on thermal properties of different organic phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 264, 112617.
- Mahfuz, M. H., Anisur, M. R., Kibria, M. A., Saidur, R. And Metselaar, I. H. S. C.** (2014). Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, 132-139.
- Mandal, S., Ishak, S., Adnin, R. J., Lee, D.-E. and Park, T.** (2023a). An approach to utilize date seeds biochar as waste material for thermal energy storage applications. *Journal of Energy Storage*, 68, 107739.
- Mandal, S., Ishak, S., Mohd Ariffin, M. A., Lee, D.-E. and Park, T.** (2023b). Effect of pore structure on the thermal stability of shape-stabilized phase change materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 465-479.
- Muratore, C., Aouadi, S. M. and Voevodin, A. A.** (2012). Embedded phase change material microinclusions for thermal control of surfaces. *Surface and Coatings Technology*, 206(23), 4828-4832.
- Mondieig, D., Rajabalee, F., Laprie, A., Oonk, H. A., Calvet, T. and Cuevas-Diarte, M. A.** (2003). Protection of temperature sensitive biomedical products using molecular alloys as phase change material. *Transfusion and apheresis science*, 28(2), 143-148.
- Muzyka, R., Misztal, E., Hrabak, J., Banks, S. W. and Sajdak, M.** (2023). Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar. *Energy*, 263, 126128.
- Ohkawara, H., Kitagawa, T., Fukushima, N., Ito, T., Sawa, Y. and Yoshimine, T.** (2012, May). A newly developed container for safe, easy, and cost-effective overnight transportation of tissues and organs by electrically keeping tissue or organ temperature at 3 to 6 C. In *Transplantation proceedings* (Vol. 44, No. 4, pp. 855-858). Elsevier.
- Sarier, N. and Onder, E.** (2012). Organic phase change materials and their textile applications: an overview. *Thermochimica acta*, 540, 7-60.
- Sawadogo, M., Benmahiddine, F., Hamami, A. E. A., Belarbi, R., Godin, A. and Duquesne, M.** (2022). Investigation of a novel bio-based phase change material hemp concrete for passive energy storage in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 212, 118620.
- Sharma, A. and Dewangan, S. K.** (2022). Performance analysis of melting behavior of phase change material encapsulated within differently shaped macro-capsule. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 1-18.
- Xiong, T., Ok, Y. S., Dissanayake, P. D., Tsang, D. C. W., Kim, S., Kua, H. W. and Shah, K. W.** (2022). Preparation and thermal conductivity enhancement of a paraffin wax-based composite phase change material doped with garlic stem biochar microparticles. *Science of The Total Environment*, 827, 154341.

- Wang, S. M., Matiašovský, P., Mihálka, P. and Lai, C. M.** (2018). Experimental investigation of the daily thermal performance of a mPCM honeycomb wallboard. *Energy and Buildings*, 159, 419-425.
- Wang, C., Cheng, C., Jin, T. and Dong, H.** (2022). Water evaporation inspired biomass-based PCM from daisy stem and paraffin for building temperature regulation. *Renewable Energy*, 194, 211-219.
- Yao, C., Kong, X., Li, Y., Du, Y. and Qi, C.** (2018). Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building. *Energy conversion and management*, 155, 20-31.
- Yue, X., Zhang, R., Jin, X., Zhang, X., Bao, G. and Qin, D.** (2023). Bamboo-derived phase change material with hierarchical structure for thermal energy storage of building. *Journal of Energy Storage*, 62, 106911.
- Zhang, N., Pan, X., Zhang, Z., Yuan, Y., Sultan, M. and Attia, S.** (2024). Carbonated balsa-based shape-stable phase change materials with photothermal conversion and application in greenhouse. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 266, 112699.
- Zhao, P.-P., Deng, C., Zhao, Z.-Y., Lu, P., He, S. and Wang, Y.-Z.** (2021). Hypophosphite tailored graphitized hierarchical porous biochar toward highly efficient solar thermal energy harvesting and stable Storage/Release. *Chemical Engineering Journal*, 420, 129942.