

ATIKTAN ÜRETİLEN POROZ MALZEMEYLE ISIL ENERJİ DEPOLAMA

Ece Tuğba MIZIK

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zehra YİĞİT AVDAN

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Şenay BALBAY)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2022

Bu tez çalışması 2210-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

17/01/2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Ece Tuğba MIZIK, ATIKTAN ÜRETİLEN POROZ MALZEMEYLE ISIL ENERJİ DEPOLAMA başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Zehra YİğİT AVDAN

ÖZET

ATIKTAN ÜRETİLEN POROZ MALZEMEYLE ISIL ENERJİ DEPOLAMA

Ece Tuğba MIZIK

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zehra YİĞİT AVDAN

(İkinci Danışman: Doç. Dr. Şenay BALBAY)

Artan enerji talebiyle enerjinin verimli kullanımı ve enerji tasarrufu için çözümlerin geliştirilmesi büyük önemli kazanmıştır. Son zamanlarda, yüksek enerji yoğunluğu ve yüksek gizli ısı içeriğine sahip olan faz değişim malzemelerinin (FDM) kullanımı ile termal enerji depolaması (TED) adından sıkça söz ettirmektedir. Tez çalışmasında çevre sorunları oluşturan evsel arıtma çamuru ile akrilik reçineler ve inorganik katkıları kullanılarak poroz malzeme üretimi ve poroz malzemelere emdirilen parafin esaslı FDM yardımıyla yenilikçi bir TED malzemesi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Poroz malzemelerin ve parafin emdirilmiş FDM'lerin termal enerji depolama sürecinde kullanım potansiyelleri kısa analiz, elementel analiz, porozite testi, FTIR, Raman spektroskopisi, XRD, TGA ve DSC analizleri gerçekleştirilerek incelenmiştir. İncelemeler sonucunda üretilen poroz malzemelerin yüksek porozite, düşük kusur ve yüksek derecede grafitleşme derecesine sahip oldukları ve emdirilen parafin ile kimyasal reaksiyona girmeden bütünleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin}$ FDM'nin (76,0773 J/g) termal enerji depolama kapasitesinin saf parafinin (150,6972 J/g) yaklaşık olarak yarısı kadar olduğu ve diğer FDM'lere göre termal enerji depolama kapasitesinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, döngüsel ekonomi kapsamında üretilen $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin}$ FDM'nin TED depolama uygulamalarında kullanımı için geliştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: Evsel arıtma çamuru, Faz Değişim Malzemesi, Parafin, Termal Enerji Depolama, Döngüsel Ekonomi.

ABSTRACT

THERMAL ENERGY STORAGE WITH THE WASTE-PRODUCED POROUS MATERIAL

Ece Tuğba MIZIK

Department of Environmental Engineering

Programme in Environmental Science

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2022

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Zehra YİĞİT AVDAN

(Co-Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Şenay BALBAY)

In conjunction with the increasing energy demand, the development of solutions for efficient use of energy and energy-saving has become very important. Recently, thermal energy storage (TES) has been frequently mentioned with the use of phase change materials (PCM) with high energy density and high latent heat content. In the thesis study, it was aimed to develop an innovative TES material with the help of paraffin-based PCM impregnated with porous materials and porous material production using municipal wastewater treatment sludge which causes environmental problems, acrylic resins and inorganic addition agents. The potentials of porosity materials and paraffin impregnated PCMs for use in the thermal energy storage process were investigated by performing proximate analysis, elemental analysis, porosity test, FTIR, Raman spectroscopy, XRD, TGA and DSC analyzes. As a result of the investigations, it has been determined that the porous materials produced have high porosity, low defect, and a high degree of graphitization and integrate with the impregnated paraffin without chemical reaction. In addition, it has been determined that the thermal energy storage capacity of $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Paraffin}$ PCM (76,0773 J/g) is approximately half that of pure paraffin (150,6972 J/g) and that its thermal energy storage capacity is high compared to other PCMs. This study reveals that the $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Paraffin}$ PCM produced within the context of the circular economy has development potential for use in TES storage applications.

Keywords: Municipality sewage sludge, Phase Change Material, Paraffin, Thermal Energy Storage, Circular Economy.

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimin başlangıcından itibaren öğrenme, öğretme sevgisine hayran kaldığım, akademik alanda yaptığı çalışmaları hayranlıkla izlediğim her daim yanımda olan öğrencisi olmaktan her zaman gurur ve mutluluk duyduğum hayatımda önemli bir yere sahip saygıdeğer danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zehra YİĞİT AVDAN'a,

Tez çalışmalarım sürecinde yaptığım çalışmalarda bilgi birikimi ve hoşgörüsü ile her zaman yanımda olan ikinci danışman hocam Sayın Doç Dr. Şenay BALBAY'a,

Tez çalışmalarım sürecinde malzemelerin karakterizasyonu sürecinde desteklerini esirgemeyen Eskişehir Teknik Üniversitesi Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi ve müdürü saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Eftade Emine GAGA'ya,

Çocukluğum, her daim beni destekleyen şu an hayatta olmasalar da varlıklarını hep hissettiğim, başardıklarımı gördüklerine inandığım ve bana yuva olan canımdan can dedem İbrahim KIZILTAN'a ve canım ananem Şükran KIZILTAN'a,

Hayatımın her anında yaptığım hatalarla ve doğrularla hep yanımda olan benim hem annem hem babam olup kanatları altında beni koruyup kollayan ve bu günlere gelmemi sağlayan canım annem Figen KIZILTAN'a,

Her an yanımda olan yapamayacağım dediğim her an bana ayna tutup başarabilirsin diyerek desteğini ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen biricik erkek arkadaşım Ayberk ÇETİNKAYA'ya,

Tez çalışmam sürecinde hep yanımda olan psikolojik desteklerini her daim hissettiğim benim ikinci ailemin biricik fertleri Ece ALPER'e, Kadriye UYGUR YANAR'a, Nisa YANAR'a, Dilara ÇAM'a, Atahan TAŞKIN'a, Burak ÇAM'a, Furkan YANAR'a ve Ufuk SABANOĞLU'na,

Akademik dünyada karşıma çıkan bana bir kız kardeş olup desteğini hiç esirgemeyen canım arkadaşım İlknur DEMİRTAŞ'a,

Son olarak bu tez çalışmasını 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ece Tuğba MIZIK

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Ece Tuğba MIZIK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Çalışmaları.....	3
2. ATIK ÜRETİMİNE GENEL BİR BAKIŞ.....	13
2.1. Dünya’da Arıtma Çamuru Üretimi ve Yönetimi Metodolojileri.....	14
2.2. Türkiye’de Arıtma Çamuru Üretimi ve Yönetimi.....	15
3. ENERJİYE GENEL BAKIŞ.....	16
4. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA (TED) TEKNOLOJİSİ	17
4.1. TED Sınıflandırılması.....	19
4.1.1. Duyulur ısı depolama	19
4.1.2. Termokimyasal enerji depolama	21
4.1.3. Gizli ısı depolama	22
4.2. TED Türlerinin Karşılaştırılması.....	24
5. FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ.....	26
5.1. FDM’lerin Kimyasal Özelliklerine Göre Sınıflandırılması.....	30

5.1.1. İnorganik FDM'ler	30
5.1.2. Ötektik FDM'ler	31
5.1.3. Organik FDM'ler	31
5.2. Parafin Bazlı FDM'ler	32
5.3. FDM Türlerinin Avantaj ve Dezavantajları.....	33
5.4. FDM'lerin Uygulama Alanları	35
6. MATERYAL VE METOT.....	36
6.1. Malzemeler.....	36
6.2. Çalışmada Kullanılan Cihaz, Araç ve Gereçler	38
6.3. Metot.....	39
6.3.1. Arıtma çamurunun hazırlanması	39
6.3.2. Kürlendirme işlemi.....	40
6.3.3. Kalsinasyon işlemi	41
6.3.4. Faz değişim malzemesinin (FDM) hazırlanması	42
6.3.5. İnorganik kimyasalların etkisinin belirlenmesi.....	42
6.4. Karakterizasyon	43
6.4.1. Kısa analiz.....	43
6.4.1.1. <i>Nem tayini</i>	43
6.4.1.2. <i>Kül tayini</i>	43
6.4.1.3. <i>Uçucu madde tayini</i>	44
6.4.1.4. <i>Sabit karbon tayini</i>	44
6.4.2. Elementel analiz.....	44
6.4.3. Porozite testi.....	45
6.4.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi	46
6.4.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	47
6.4.6. X – ışını difraksiyonu (XRD) analizi.....	48
6.4.7. Raman spektroskopisi analizi.....	49
6.4.8. Termogravimetrik (TGA) analiz	50
6.4.9. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi	51
7. BULGULAR.....	52
7.1. Arıtma Çamuru Hammaddesinin Kısa Analiz ve Elementel Analiz	
Sonuçlarının Değerlendirilmesi	52

7.2. Arıtma Çamur Hammaddesinden Üretilen Malzemelerin Porozite Testlerinin Değerlendirilmesi.....	53
7.3. Arıtma Çamuru Hammaddesinin FT-IR Analizinin Değerlendirilmesi	54
7.4. Arıtma Çamuru Hammaddesinden Elde Edilen Malzemelerin FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	55
7.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizlerinin Değerlendirilmesi	68
7.6. X – ışını Difraksiyonu (XRD) Analizlerinin Değerlendirilmesi	74
7.7. Raman Spektroskopisi Analizlerinin Değerlendirilmesi	79
7.8. Termogravimetrik (TGA) Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	87
7.9. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizlerinin Değerlendirilmesi	93
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKÇA.....	108
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. 2017 yılında ülkelerdeki arıtma çamuru üretimi ve bertarafı	14
Tablo 2.2. Arıtma çamurlarının bertaraf ve geri kazanım miktarları	15
Tablo 4.1. Duyulur ısı TED kullanılan tipik malzemeler	21
Tablo 4.2. Güneş enerjisiyle mahal ısıtması ve sıcak su üretimi uygulamaları için farklı TED teknolojilerinin karşılaştırılması	25
Tablo 5.1. FDM'ler için istenilen özellikler	28
Tablo 5.2. C atom sayısı 12 ila 28 arasında olan parafin mumlarının termal özellikleri	33
Tablo 5.3. FDM türlerinin avantaj ve dezavantajları	34
Tablo 6.1. SAK ve VAK'ın kimyasal özellikleri	37
Tablo 6.2. KMS'nin spesifikasyonları	38
Tablo 7.1. Arıtma çamurunun kısa ve elementel analiz değerleri.....	53
Tablo 7.2. Arıtma çamurundan elde edilen poroz malzemelerin porozite yüzdeleri	54
Tablo 7.3 İnorganik katkılı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin I_D/I_G oranları	87
Tablo 7.4. Çalışmada hazırlanmış malzemelerin ve literatürdeki malzemelerin termal özelliklerinin karşılaştırılması	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1. TED sürecinin akış diyagramı	18
Şekil 4.2. Termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan metot ve kimyasal örnekleri	19
Şekil 4.3. Duyulur ısı depolama süreci	20
Şekil 4.4. Termokimyasal enerji depolama sisteminin ısı depolama süreçleri	22
Şekil 4.5. Gizli ısı depolama süreçlerinde katı-sıvı faz değişimini	23
Şekil 4.6. Farklı FDM türleri için erime aralıkları ve erime entalpileri	23
Şekil 4.7. TED teknolojilerinin hacimsel depolama kapasiteleri	26
Şekil 5.1. Duyulur ve gizli ısı depolama durumunda belirli bir ΔT sıcaklık aralığında depolanan ısı miktarı	27
Şekil 5.2. FDM'lerin kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılması ve örnekleri	30
Şekil 5.3. Parafinlerin kimyasal yapısı	32
Şekil 5.4. FDM'lerin termal enerji depolama için güç ve sıcaklık aralıkları	36
Şekil 6.1. Kurutma öncesi arıtma çamuru örneği	36
Şekil 6.2. Deney sürecinde kullan cihaz örnekleri	39
Şekil 6.3. Atık hammaddelerin hazırlanması süreci	40
Şekil 6.4. Arıtma çamurunun kürlenme süreci	41
Şekil 6.5. Kalsinasyon süreci ve hazırlığı.....	41
Şekil 6.6. Kaplama sürecinde kullanılan deney düzeneğinin çizimi	42
Şekil 6.7. Thermo Scientific Flash Smart elementel analiz cihazı	45
Şekil 6.8. SHIMADZU IRTracer – 100 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı	47
Şekil 6.9. Zeiss Sigma 300 Taramalı elektron Mikroskobu (SEM) cihazı.....	48
Şekil 6.10. PANalytical Empyrean X-ışını Difraksiyonu (XRD) cihazı	49
Şekil 6.11. WITec alpha300R Series Raman Spektroskopisi cihazı	50
Şekil 6.12. Linseis/STA TG-DSC/DTA PT1600 cihazı.....	51
Şekil 6.13. Perkin Elmer/DSC 4000 cihazı	52
Şekil 7.1. Arıtma çamur hammaddesinin FTIR spektrumu.....	55
Şekil 7.2. Arıtma çamuru hammaddesi ve AÇ poroz malzemesinin FTIR spektrumu.....	56
Şekil 7.3. AÇ-Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu	57

Şekil 7.4. Arıtma çamurundan elde edilen poroz malzemelerin FTIR spektrumları.....	58
Şekil 7.5. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu	59
Şekil 7.6. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu	60
Şekil 7.7. $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu.....	61
Şekil 7.8. $Al_2O_3@A\check{C}$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu	62
Şekil 7.9. $SnO_2@A\check{C}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu.....	63
Şekil 7.10. $SnO_2@A\check{C}$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu	64
Şekil 7.11. $AgNO_3@A\check{C}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu	65
Şekil 7.12. $AgNO_3@A\check{C}$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu	66
Şekil 7.13. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu	67
Şekil 7.14. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@A\check{C}$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu	68
Şekil 7.15. $A\check{C}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX	69
Şekil 7.16. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX.....	70
Şekil 7.17. $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX.....	71
Şekil 7.18. $SnO_2@A\check{C}$ poroz malzemesinin; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX SEM görüntüleri	72
Şekil 7.19. $AgNO_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)1.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX.....	73
Şekil 7.20. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX.....	74
Şekil 7.21. İnorganik katkılı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin XRD spektrumları	75
Şekil 7.22. $A\check{C}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları	75
Şekil 7.23. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları.....	76
Şekil 7.24. $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları	77
Şekil 7.25. $SnO_2@A\check{C}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları	77
Şekil 7.26. $AgNO_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları.....	78
Şekil 7.27. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları.....	79
Şekil 7.28. İnorganik katkılı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin Raman spektrumları	80

Şekil 7.29. AÇ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi	81
Şekil 7.30. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi	82
Şekil 7.31. $Al_2O_3@AÇ$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi	83
Şekil 7.32. $SnO_2@AÇ$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi	84
Şekil 7.33. $AgNO_3@AÇ$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi	85
Şekil 7.34. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi	86
Şekil 7.35. İnorganik katkılı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin termogramı	87
Şekil 7.36. AÇ poroz malzemesinin termogramı	88
Şekil 7.37. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı	89
Şekil 7.38. $Al_2O_3@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı	90
Şekil 7.39. $SnO_2@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı	91
Şekil 7.40. $AgNO_3@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı	92
Şekil 7.41. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı	93
Şekil 7.42. Parafin ve parafin emdirilmiş arıtma çamuru poroz malzemeleri FDM'lerin termogramı	94
Şekil 7.43. AÇ-Parafin FDM'nin termogramı	95
Şekil 7.44. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ -Parafin FDM'nin termogramı	96
Şekil 7.45. $Al_2O_3@AÇ$ -Parafin FDM'nin termogramı	97
Şekil 7.46. $SnO_2@AÇ$ -Parafin FDM'nin termogramı	98
Şekil 7.47. $AgNO_3@AÇ$ -Parafin FDM'nin termogramı	99
Şekil 7.48. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ -Parafin FDM'nin termogramı	100

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ΔH_{KK}	: Katı-katı faz değişiminin gizli ısısı
ΔH_{KS}	: Katı-sıvı faz değişiminin gizli ısısı
ΔH_{TE}	: Toplam erime gizli ısısı
Δq	: Erime gizli ısısı (J)
ΔT	: Isı artışı
0B	: Sıfır boyutlu
1B	: Bir boyutlu
2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
AB	: Avrupa Birliği
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ATT	: Atıksu arıtma tesisi
BP	: Bristish Petroleum
cp	: Özgül ısı kapasitesi
Cps	: santipuaz
DI	: Duyulur ısı
DID	: Duyulur ısı depolama
DSC	: Diferansiyel Tarama Kalorimetresi
ESEM	: Çevresel Taramalı Elektron Mikroskobu
f	: Erime oranı
FDM	: Faz Değişim Malzemeleri
FTIR	: Fourier Transform Kızılötesi Spektroskopisi
GI	: Gizli ısı
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
h-HDPE	: Yüksek moleküler ağırlıklı yüksek yoğunluklu polietilen
IR	: Kızılötesi
Kg	: Kilogram
Kj	: Kilojoule
KMS	: Karboksil Metil Selüloz
KN	: Karbon nanotip

l-HDPE	: Düşük moleküler ağırlıklı yüksek yoğunluklu polietilen
m	: metre
MKFDM	: Mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemesi
mm	: milimetre
Mtep	: Milyon ton eşdeğer petrol
NIR	: Yakın-kızılötesi
°C	: Santigrat derece
OM	: Optik Mikroskopi
ÖYFC	: Öğütülmüş yüksek fırın cürufuna
PP	: Polipropilen
Qs	: Depolama kapasitesi (J)
R''	: Temas direnci
RG	: Raman görüntüleme
RS	: Raman spektroskopisi
SAK	: Stiren Akrilik Kopolimer
SEBS	: Stiren-etilen-bütilen-stiren
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SGDG	: Sıkıştırılmış genişletilmiş doğal grafit
TABS	: Atık Beyan Sistemi
TED	: Termal Enerji Depolama
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz
TİD	: İlk dönüşüm sıcaklığı
TİE	: İlk erime sıcaklığı
Tm	: Erime sıcaklığı (°C)
TSD	: Son dönüşüm sıcaklığı
TSE	: Son erime sıcaklığı
TTD	: Tepe dönüşüm sıcaklığı
TTE	: Erime sıcaklığı tepe noktası
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UV	: Ultra Viyole
UV-VIS-	: Ultraviyole, görünür ışık ve yakın kızılötesi
NIR	

VAK	:	Vinil Akrilik Kopolimer
VIS	:	Görünür
$W m^{-1} K^{-1}$	:	Isı İletkenlik Katsayısı
xGnP	:	Pul pul dökülmüş nanoyapraklar
XRD	:	X – ışını difraksiyonu



1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı doğal kaynakların tüketilmesinin yanında atık miktarının artmasına da neden olmaktadır. Katı atıklar, üreticisi tarafından istenilmeyen insan ve çevre sağlığını olumsuz yönde etkileyebildiğinden düzenli bir biçimde bertaraf edilmesi gereken katı maddeler olarak ifade edilmektedir (Gündüzalp ve Güven, 2016). Dünyada ve ülkemizde pek çok kaynaktan sıkça katı atık üretimi gerçekleştirilmektedir. Avrupa Birliği'nin (AB) 15 ülkesinde sadece günlük üretilen kentsel katı atık miktarı 1,39 kg iken ABD'de 2,09 kg, dünyada ise ortalama 0,838 kg'dır (Yaman ve Olhan, 2010). Ülkemizde 2018 yılındaki verilere göre kişi başı 1,16 kg/gün evsel katı atık ve 0,78 kg/gün endüstriyel katı atık olmak üzere toplam 1,94 kg/gün katı atık üretilmektedir (<http-1>).

Katı atık türlerinden biri olan arıtma çamurunun organik madde içeriği yüksek olup, atıksu arıtım süreçleri sonucunda oluşan biyolojik katı olarak ifade edilmektedir. Evsel atık suların arıtımı sürecinde oluşan arıtma çamurları yüksek organik madde içeriği, büyük hacim kaplamaları ve kötü koku oluşturma potansiyelleri nedeniyle yönetimi oldukça zor olan bir atık türüdür. Ülkemizde yoğun olarak oluşan arıtma çamurları yönetim sürecinde genel olarak düzenli/vahşi depolama sahalarında depolanmakta, gübre olarak tarımsal süreçlerde kullanılmakta veya yakma ya da geri kazanım yolu ile bertarafı gerçekleştirilmektedir.

İnsanoğlu teknolojik gelişmeler ve artan üretim-tüketim talebi ile enerji kaynaklarını hayatının vazgeçilmez bir parçası haline getirmiştir. Fosil yakıt gibi yenilenemez enerji kaynaklarının tüketimi iklim değişikliği, çevre kirliliği ve enerji kaynaklarının tükenme derecesine gelmesi gibi sorunlara yol açtığından sürdürülebilir kaynaklara yönelimi gün geçtikçe arttırmaktadır. Günümüzde yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları bol, uzun vadeli, erişilebilir ve çevre dostu olduklarından yenilenemez enerji kaynaklarına bir alternatif haline gelmiştir (Hosenuzzaman vd., 2015; Hossain vd., 2015). Ancak birçok yenilenebilir enerji kaynağının kesintili olması, enerji dönüşüm verimliliğini önemli ölçüde azaltarak yenilebilir enerji üretim teknolojilerinin gelişiminde büyük bir kısıtlama oluşturmaktadır (Waterson, 2017). Günümüzde enerjinin yeniden kullanılabilirliğinin sağlanması ve enerjinin depolanmasına dair çalışmalar gün geçtikçe daha da popüler hale gelmiştir. Enerji türlerinden biri olan termal enerjinin depolanması ve dönüştürülmesi süreci ısının depolanması, taşınması ve yeniden

kullanımın sağlanması yanında ısıнын kalitesinin ve miktarının değiştirilerek ısıtma ve soğutma süreçlerine katılmasını sağlamaktadır (Cot Gores, 2012; İslam vd., 2016; L. Kumar vd., 2019).

Termal enerjinin depolanması, yaygın olarak gizli ısıнын depolanmasına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Gizli ısı enerjisinin depolanması sürecinde genel olarak faz değişim malzemeleri (FDM) olarak adlandırılan ve faz değişim süreci sırasında yüksek miktarda termal enerjinin depolanmasını ve serbest bırakılmasını sağlayan malzemeler kullanılmaktadır. FDM'ler ısı enerjisinin verimli bir biçimde depolanması ve kullanılmasında büyük bir potansiyele sahiptir (Pielichowska ve Pielichowski, 2014). Bu doğrultuda termal enerjinin depolanması sürecinde FDM'lerin kullanılması pek çok sektörde termal enerjinin depolanarak yeniden kullanımının sağlanması ve enerji verimliliğinin artırılmasında basit ve gerçekçi bir çözüm oluşturmaktadır (Dincer ve Rosen, 2021; Farid vd., 2004; İbrahim vd., 2017; Kenisarin ve Mahkamov, 2007).

Günümüzdeki yapılan çalışmalarda termal enerjinin depolanması sürecinde yüksek entalpi yoğunluğu, faz geçişi sürecinde istenilen sıcaklık ve ihmal edilebilir faz ayrışması özelliklerine sahip olan FDM'lerden biri olan parafin sıkça kullanılmaktadır (Atinafu vd., 2018; Shazim Ali Memon, 2014; A. Sharma vd., 2009). Ancak yüksek sıcaklık koşullarında sıvı forma dönüşen parafin malzemesinin stabilitesinin artırılması, şeklinin korunması ve termal iletkenliğinin artırılması için çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Tezin amacı çevre sorunları oluşturan evsel arıtma çamurunun sıfır atık ve döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilerek termal enerji depolama uygulamalarında kullanılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda akrilik reçineler kullanılarak geliştirilecek yeni yöntemle arıtma çamurundan üretilen poroz malzemelere parafin esaslı FDM yardımıyla ısı enerji depolanarak yenilikçi bir TED malzemesi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca evsel arıtma çamurundan üretilen poroz malzemeye emdirilen parafin karışımı sayesinde daha fazla ısı enerji depolanarak parafinin dezavantajları (stabil olmaması ve termal enerji depolama kapasitesinin artırılması) giderilerek literatüre katkı sağlanacaktır. Tez kapsamında üretilen yenilikçi TED malzemesi ile hem endüstriyel simbiyoz hem de enerji tasarrufu ve atık yönetimi sağlanarak döngüsel ekonominin oluşturulması yolunda önemli bir adım atılacaktır.

1.1. Literatür Çalışmaları

Fosil yakıtlardan kaynaklı çevresel sorunlar ile yenilenebilir enerji kaynaklarının geniş alanlarda kullanımı ve endüstriyel ısının geri kazanımının sıkça uygulanması TED uygulamalarını önemli bir odak noktası haline getirmiştir. TED uygulamaları enerji talebi ve arzı arasındaki uyumsuzluğun ortadan kaldırılması ile enerji verimliliğinin artırılmasını sağlamaktadır (Z. Yang ve Garimella, 2013; Bing-chen Zhao vd., 2017).

TED süreci temel olarak hissedilebilir ısınının depolanması (Elouali vd., 2019), gizli ısının depolanması (Narasimhan, 2019) ve kimyasal ısının depolanması (Uchiyama vd., 2019) süreçlerinden herhangi biri seçilerek gerçekleştirilmektedir. FDM'nin kullanıldığı gizli ısı termal enerji depolama uygulamaları yüksek enerji depolama performansları (Agyenim vd., 2010), yüksek potansiyelli enerji tasarrufu kapasiteleri (Jeon vd., 2012) ve faz geçişi sırasındaki sabit sıcaklıkları (Haiquan Zhang vd., 2018) nedeniyle oldukça büyük ilgi görmektedir (X. Zhang vd., 2020).

TED sürecinde kullanılan FDM faz geçiş modellerine göre katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı-gaz sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. FDM temel olarak parafin, yağ asitleri ve polibazik alkoller içeren organik maddeler ve hidratlandırılmış tuz, erimiş tuz ve metal malzemeleri içeren inorganik ve ötektik malzemelerden oluşmaktadır. Neredeyse saf olan FDM'ler (metalikler hariç) yaygın bir düşük iletkenliğe sahiptir (Yaxue Lin, Jia, vd., 2018). Bu nedenle, yüksek enerji depolama potansiyeline sahip termal iletkenliğin iyileştirilmesi, yüksek termal iletkenlik matrisi eklenmesi ve katkı maddesi yüzeyinin kimyasal olarak işlenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu iyileştirme süreçleri yüzeylerin ve grafit edilmiş fonksiyonel grupların modifikasyonunu ve poroz üç boyutlu (3B), iki boyutlu (2B), tek boyutlu (1B) ve sıfır boyutlu (0B) katkı maddelerinin eklenmesini içermektedir (S. Wu vd., 2020).

Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve stiren-etilen-bütilen-stiren (SEBS) gibi organik termal katkı maddeleri kullanılarak üretilen FDM'ler için yapılan çalışmaları incelediğimizde;

Inaba ve Hu (1997) yaptıkları çalışmada parafin ve HDPE eritip karıştırarak kompozit bir FDM elde etmişlerdir. FDM'nin içeriği ağırlıkça %26 HDPE ve %74 parafinden oluşmaktadır. FDM'nin yoğunluk, özgül ısı, gizli ısı ve etkin ısı iletkenliği belirlenmiştir. Sonuç olarak FDM'nin termofiziksel özelliklerinin sabit olmadığı

gözlenmiştir. Ayrıca termofiziksel özelliklerinde sıcaklığa bağlı olarak sırasıyla her katı hal, geçiş katı hali ve sıvı hal aralığında farklılıklar gözlemlemiştirler (Inaba ve Tu, 1997).

Lee ve Choi (1998) yaptıkları çalışmada HDPE/parafin karışımının dayanıklılığı ve parafinin sızma davranışını incelemiştir. Çalışmada düşük moleküler ağırlıklı HDPE (l-HDPE) ve yüksek moleküler ağırlıklı HDPE (h-HDPE) olmak üzere iki temsili HDPE kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 80 ısıtma-soğutma döngüsüne kadar h-HDPE/parafin mum karışımının sızdırmazlık özelliğinin l-HDPE/parafin mum karışımından oldukça iyi olduğunu belirlemiştir (Lee ve Choi, 1998).

Xiao ve arkadaşları (2002) yaptıkları çalışmada parafin için destekleyici bir materyal olarak termoplastik bir elastomer poli (stireb-bütadien-stiren) (SBS) ve genişletilmiş grafit ile muamele ederek yeni FDM elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda parafinin kütle yüzdesinin %80'e kadar çıkabildiği ve 60 °C'lik bir sıcaklıkta FDM'de parafin sızıntısının oluşmadığını gözlemlemiştirler (Xiao vd., 2002).

Peng ve arkadaşları (2004) yaptıkları çalışmada TED kompozit malzemeleri oluşturmak için oda sıcaklığındaki bisfenol-A epoksi ve SEBS polimerleri ile parafin faz değişim malzemesini kullanmışlardır. Çalışmada parafin parçacıklarını epoksi matrisler kullanarak kapsüllemişlerdir. Elde edilen malzemenin karakteristiğinin ve özelliklerinin belirlenmesi için parçacık boyutu dağılımı, termal iletkenliği, temas direncini R'' , termal yayılımı ve kompozitlerin gizli ısısını belirlemiştirler. Yapılan analizler sonucunda parafin/epoksi kompozit malzemesi arasındaki etkileşimin yeterli termal ve mekanik performansı sağladığı gözlemlenmiştir (S. Peng vd., 2004).

Kaygusuz ve Sarı (2007) yaptıkları çalışmada termal enerji depolanması için formda kararlı katı-sıvı FDM olarak parafin/HDPE kompozitlerin hazırlanması ve termofiziksel özelliklerinin belirlenmesine odaklanmışlardır. Çalışma kapsamında erime sıcaklıkları 48 °C – 50 °C (P1) ve 63 °C – 65 °C (P2) olan iki parafin mum kullanmışlardır. Elde edilen kompozit FDM'lerin mikro yapısının belirlenmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve termal özelliklerinin belirlenmesi için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) metodlarını kullanmışlardır. Ayrıca çalışma kapsamında termal iletkenliğin iyileştirilmesi sürecinde genişletilmiş ve pul pul ayrılmış grafit ilavesinin termal iletkenlik üzerindeki etkilerini de değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda elde

edilen form kararlı P1/HDPE ve P2/HDPE kompozitlerine uygulanan DSC analizi sonrasında ergime ve gizli ısı değerlerinin sırasıyla 44,32 °C ve 61,66 °C ile 179,63 J/g ve 198,14 J/g olduğunu belirlemişlerdir. Ek olarak, ağırlıkça %3 oranında genişletilmiş ve pul pul ayrılmış grafit ilavesinin kompozit FDM'lerin termal iletkenliğini P1/HDPE için yaklaşık %33,3 ve P2/HDPE için %52,3 olarak iyileştirdiğini tespit etmişlerdir (Kaygusuz ve Sari, 2007).

Alkan ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada termal enerji depolama uygulamaları için yeni bir form-kararlı FDM olarak parafin/polipropilen (PP) kompozitin hazırlanmasına, termal özelliklerinin ve termal güvenilirliğinin karakterizasyonuna odaklanmışlardır. Çalışma kapsamında elde edilen kompozit malzemelerin karakterizasyonu için Fourier Transform Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR), Optik Mikroskopi (OM), DSC ve Termogravimetrik (TGA) analiz tekniklerini kullanmışlardır. DSC analizi sonucunda, formda kararlı parafin/PP kompozitinin 44,77 - 45,52 °C'de eridiğini ve 53,55 - 54,80 °C'de kristalleştiğini belirlemişlerdir. Ayrıca erimeleri ve kristalleşmeleri için sırasıyla 136,16 ve -136,59 J/g gizli ısılarına sahip olduklarını belirlemişlerdir (Alkan vd., 2009).

Parafin stabilitesini ve/veya termal iletkenliğini arttırmak amacıyla kullanılan karbonik (grafen ve genişletilmiş grafit gibi) olarak adlandırılan organik termal destek maddeleri kullanılarak üretilen FDM çalışmalarında;

Fukai ve arkadaşları (2000) yaptıkları çalışmada termal iletkenliğin artırılması için karbon fiber kullanılarak oluşturulan iki tekniği incelemişlerdir. Çalışmada uygulanan ilk teknikte karbon fiberler FDM içerisinde rastgele dağılırken, ikinci teknikte karbon fiberlerin yönleri ısı akışı ile çakışacağı şekilde bir fiber fırçası kullanmışlardır. Çalışma sonucunda her iki tipte kullanımın termal iletkenliği arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ancak rastgele dağıtıma bağlı olarak fiber fırça etkisinin termal iletkenlikte daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir (Fukai vd., 2000).

Py ve arkadaşları (2001) yaptıkları çalışmada sıkıştırılmış genişletilmiş doğal grafit (SGDG) matrisine emdirilmiş parafin mum ile yüksek iletkenliğe sahip yeni bir kompozit faz değişim malzemesi elde etmeyi hedeflemişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen kompozitin termal iletkenliğinin (saf parafin termal iletkenliği değerinin 0,24 W m⁻¹ K⁻¹ 'den 70 W m⁻¹ K⁻¹ termal iletkenlik değerine yükseldiği) tek gözenekli grafit matrisine

eşit olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca kompozit malzeme içerisindeki SGDĞ'nin genel katılaşma süresinin azaldığını ve termal depolama gücünün stabilizasyonuna destek olduğunu belirlemişlerdir (Py vd., 2001).

Elgafy ve Lafdi (2005) yaptıkları çalışmada parafinin termal performansını arttırmak için karbon nanofiber kullanmışlardır. Çalışmada karbon nanofiberi parafin içerisine farklı kütle oranlarında ilave etmişlerdir. Elde edilen nanokompozitlerin termal özelliklerini deneysel olarak ölçmüş ve soğutma hızını tahmin etmek için katılaşma işlemi sırasında her bir nanokompozitin geçici sıcaklık tepkisini incelemişlerdir. Ayrıca yeni nanokompozitlerin termal iletkenliğini tahmin etmek için analitik bir model tanıtmışlardır. Çalışma sonucunda nanokompozit içerisine dahil edilmiş karbon nanofiber malzemenin parafinin termal iletkenliğinin ve soğutma hızını arttırdığını belirlemişlerdir. Sonuç olarak, nanokompozitlerin termal iletkenliğini tahmin etmek için tasarlanan analitik bir modelden elde edilen verilerin deneysel verilerle uyum içinde olduğunu belirlemişlerdir (Elgafy ve Lafdi, 2005).

Kim ve Drazel (2009) yaptıkları çalışmada pul pul dökülmüş nanoyapraklar (xGnP) ve parafini kullanarak yüksek elektrik iletkenliği, termal iletkenlik ve gizli ısı depolanması için kompozit faz değişim malzemeleri hazırlamışlardır. Çalışma sonucunda SEM ile yapılan incelemelerde xGnP'nin parafin içinde düzgün bir dağılım gösterdiği ve bunun yüksek elektrik iletimine yardımcı olduğunu belirlemişlerdir. DSC ölçümü sonucunda ise iki tepe noktası gösterdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca kompozit FDM'deki termal iletkenlik ile xGnP'nin kütle oranı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu açıkça belirlemişlerdir (Kim ve Drzal, 2009).

Teng ve Yu (2012) yaptıkları çalışmada parafine alümina, titanya (Titanyum dioksit/TiO₂), silika ve çinko oksit parçacıklarını karıştırarak doğrudan sentez yöntemi kullanarak nano-kompozit ile güçlendirilmiş FDM'lerin potansiyellerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada elde edilen nano-geliştirilmiş FDM'lerin ve parafinin özelliklerini değerlendirmek için hem ısı iletimi hem de DSC analizlerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda titanya ile karıştırılarak oluşturulan parafinin daha iyi ısı iletimi ve termal depolama performansı sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca titanyanın parafinin erime başlangıç sıcaklığını düşürüp katılaşma başlangıç sıcaklığını arttırdığını belirlemişlerdir (Teng ve Yu, 2012).

Li (2013) yaptığı çalışmada parafinin ısı iletimini hızlandırmak ve enerji depolama teknolojilerinin verimliliğini arttırmada nano-grafitlerin etkisini incelemiştir. İnceleme sürecinde malzemelerin mikroyapısı ve termal özelliklerini Çevresel Taramalı Elektron Mikroskobu (ESEM) ve DSC ile incelemiştir. Çalışma sonucunda, nano-grafitin parafin içinde rastgele dağıldığını ve termal iletkenliği kademeli olarak arttırdığını belirlemiştir. Ayrıca nano-grafit miktarının artış göstermesine bağlı olarak nano-grafit/parafin kompozitinin termal özelliği artarken gizli ısıısının giderek azaldığını belirlemiştir (Min Li, 2013).

Li ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada farklı polihidrik alkoller kullanılarak aşılınmış karbon nanotüpler (KN) ve parafini karıştırarak FDM hazırlamışlardır. Çalışmada polihidrik alkoller ile aşılınmış KN'leri Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), x-ışını difraksiyonu (XRD), FTIR ve TGA analizleri ile karakterize etmişlerdir. Elde edilen kompozit FDM'lerin termal iletkenliğini sıcak disk yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda polihidrik alkoller ile aşılınmış KN/parafin kompozit FDM'lerin termal iletkenliğinin ham KN/parafin kompozit FDM'lerden yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca aşılınmış polihidrik alkolün karbon sayısının KN kullanılan kompozit FDM'lerin termal iletkenliğini etkilediğini gözlemlemişlerdir (Min Li vd., 2014).

Karthik ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada grafit köpük ve parafin kullanarak geliştirilmiş termal taşıma ve kararlı bir kompozit FDM üretmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında hem katı ($2,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) hem de sıvı ($1,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) fazlarda parafin/grafit-köpük kompozitinin termal iletkenliğinin sırasıyla saf parafinin ($0,24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) katı fazından yaklaşık 11 kat (%980) daha yüksek ve sıvı fazından ($0,11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ise yaklaşık 16 kat (%1530) daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Parafindeki termal iletkenlik artışının hem grafit köpüğünün morfolojisi hem de grafit içeriğinden kaynaklandığını belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen kararlı parafin/grafit-köpük kompozitinin bina, araç ısıtma ve soğutma, güneş enerjisi ile termal hasat ve elektrokimyasal enerji depolama gibi uygulamalar için umut verici bir malzeme olabileceğini göstermişlerdir (Karthik vd., 2017).

Termal enerji depolama teknolojilerinde kullanılan parafinin stabilitesini ve termal iletkenliğini arttırmak için kullanılan 0B, 1B, 2B ve 3B malzemelerin yanında inorganik katkı maddeleri de yoğun olarak kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında parafinin

stabilitesini ve termal iletkenliğini arttırmak için kullanılan alüminyum oksit (Al_2O_3), zirkonyum (IV) oksit klorür oktahidrat ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), gümüş nitrat (AgNO_3), kobalt (II) nitrat hekzahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve kalay (IV) oksit (SnO_2) inorganik katkılarının literatürdeki kullanımlarına dair çalışmalardan birkaçı aşağıda verilmiştir.

Arasu ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada ucuz ve yaygın olarak kullanılan bir gizli ısı termal enerji depolama malzemesi olan parafin içerisine katılan alüminyum oksit (Al_2O_3) ve bakır oksit (CuO) nanopartiküllerinin ısı transferini iyileştirme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu nanopartiküllerin hacimsel konsantrasyonunun erime ve katılaşma performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda parafinin termal performansının Al_2O_3 ve CuO nanoparçacıklarının dağılımı ile arttığını belirlemişlerdir. Ancak parafinin hem erime hem de katılaşma süreçlerinin daha düşük nanopartikül konsantrasyonları için daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak çalışmada Al_2O_3 'nin dinamik viskozitesinin CuO 'e göre yüksek olması nedeniyle erime sürecinde kilit rol oynaması ve termal iletkenliğinin yüksek olması Al_2O_3 'nin avantajlı olduğunu göstermiştir (Arasu vd., 2012).

Valan Arasu ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada bir eşmerkezli çift borulu eşanjördeki parafinin termal iletkenliğini arttırmak için nano-alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanımının etkisini sayısal bir analiz ile değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamında solar distiller kullanımının düşük termal iletkenliği dolayısıyla ısı transfer oranını arttırdığını belirlemişlerdir. Ancak ısı transfer hızındaki artışın ısı iletiminin hâkim olduğu katılaştırma sürecinin doğal taşınımından dolayı eritme sürecinden daha belirgin olduğunu belirlemişlerdir (Valan Arasu vd., 2013).

Chaichan ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada alüminyum oksit (Al_2O_3) ve titanyum oksit (TiO_2) nanoparçacıklarını %1, 2, 3, 4 ve 5'lik parafinin bir kütle fraksiyonuna eklemişlerdir. Çalışma sonucunda nanoparçacıkların kütle fraksiyonlarının artışına bağlı olarak parafinin termal iletkenliğinin doğrusal olarak artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Kısacası eklenen nano parçacıkların, enerji depolama kapasitesini düşürmeden büyük ölçüde geliştirilmiş termal iletkenliğe sahip nano-kompozit FDM'leri hazırlamak için umut verici bir yöntem olduğunu göstermişlerdir (Miqdam T Chaichan vd., 2015).

Zhang ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada yoğun olarak kullanılan bir parafin türü olan n-eikozan ile zirkonyum oksit (ZrO_2) içeren gizli ısı depolama/serbest bırakma ve fotoluminesans özelliklerine sahip yeni bir FDM tabanlı mikrokapsül tasarlamışlardır. Çalışma kapsamında çift işlevli olarak oluşturulan mikrokapsüllerin iyi faz değiştirme özellikleri gösterdiğini ve ZrO_2 kabuğunun kompaktlığı nedeniyle yüksek bir termal depolama kapasitesi, yüksek termal güvenilirlik ve iyi termal stabilite oluşturduğunu belirlemişlerdir. Çalışmada elde edilen yenilikçi çift işlevli mikrokapsüllerin akıllı lifler veya tekstiller, elektronik cihazlar, ısıya duyarlı ve ışığa duyarlı sensörler, bilgi depolama birimleri gibi alanlarda potansiyel uygulamalara sahip olduğunu göstermişlerdir (Y. Zhang vd., 2015).

Sarier ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada sıkça kullanılan parafinlerden n-hekzadekan ve n-oktadekan çekirdeklerinden yüksek miktarda ısı absorplayabilen ve salabilen mikrokapsüller üretmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca üretilen mikrokapsüllerin yüksek enerji depolama, artan ısı transfer alanı, iyi termal kararlılık, iyileştirilmiş termal iletkenlik ve yeterli dayanıklılığın sağlanması için içerisine gümüş (Ag) nanoparçacıkları dahil etmişlerdir. Sonuç olarak, geliştirilmiş işlem parametreleri ile kapsülleme yöntemi büyük ölçekli üretimler için umut verici olduğu gözlenmiştir. Çok yüksek termal depolama kapasiteleri, iyi dayanıklılık, termal stabilite ve iyileştirilmiş termal iletkenliğe sahip üretilen FDM mikrokapsüllerinin, geniş bir ürün yelpazesi için oldukça uygun olduğunu belirlemişlerdir (Sarier vd., 2015).

Zhang ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada bir parafin türü olan n-dodekan ile farklı nadir toprak elementleriyle katkılanmış zirkonyum oksit (ZrO_2) kabuğu içeren yenilikçi mikrokapsüllü bir FDM sentezlemişlerdir. Çalışmada pürüzsüz bir yüzeye ve düzgün bir boyut dağılımına sahip küresel morfolojiye sahip mikrokapsüller elde etmişlerdir. Elde edilen mikrokapsüllerin, yüksek kapsülleme ve enerji depolama verimliliğine, iyi faz değiştirme özelliklerine ve iyi termal düzenleme yeteneğine sahip olduğunu belirlemişlerdir (Y. Zhang vd., 2016).

Chaichan ve Kazem (2018) yaptıkları çalışmada parafine eklenmiş nanopartiküllerin basit güneş damıtıcılar üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Bu kapsamda hiçbir modifikasyon yapılmamış, sadece parafin eklenmiş ve parafin mum/nano- Al_2O_3 kombinasyonlarının eklendiği güneş damıtıcıların termal iletkenliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda nano- Al_2O_3 'ün parafine dahil

edilmesinin parafinin viskozitesini, yoğunluğunu ve termal iletkenliğini arttırdığını ancak özgül ısısını azalttığını belirlemişlerdir (Miqdam Tariq Chaichan ve Kazem, 2018).

Zhao ve arkadaşları (2018) yaptıkları çalışmada parafinin halloysit kabuğuna kapsüllenmesi, polidopaminle modifikasyonu ve gümüş (Ag) nanoparçacıklarının biriktirilmesi yoluyla güneş enerjisi depolamalı kendi kendini ısıtan bir katalizör sentezlemişlerdir. Elde edilen yenilikçi Ag-Parafin@Halloysit kompozitlerinin güneş ısınımı üzerine hızlı güneş hasadı (görünür ışık) ve ışık-termal dönüşüm gerçekleştirebileceğini ifade etmişlerdir. Çalışma sonucunda elde edilen Ag-Parafin@Halloysit kompozitlerinin saf parafine göre daha yüksek termal iletkenliğe, daha iyi ısı depolama/salma kapasitesine ve daha hızlı geçici termal tepkiye sahip olduklarını belirlemişlerdir. Kısacası çalışma sonucunda elde edilen Ag-Parafin@Halloysit'in kataliz ve çevresel uygulamalarda umut verici bir malzeme olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir (Yafei Zhao vd., 2018).

Ma ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışmada yerinde çökeltme reaksiyonu kullanarak yüksek ısı transfer kapasitesine ve ısı depolama kapasitesine sahip parafin@SnO₂/KNs kompozit faz değişim malzemesi hazırlamışlardır. Çalışmada SEM, XRD ve FTIR analiz sonuçlarına göre saf parafinin kalay oksit (SnO₂) kabuk içinde iyi bir şekilde kapsüllendiği ve 1-5 µm çapta yarı küresel bir yapıya sahip mikrokapsüller üretildiğini belirlemişlerdir. Çalışma kapsamında yapılan TGA sonucunda parafinin kabuk malzemesinin koruması altında mükemmel bir termal stabiliteye sahip olduğunu belirlemişlerdir (Ma vd., 2020).

George ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada termal sistem uygulaması için saf A70 faz değişim malzemesi ve Al₂O₃'nin prob sonikasyon yöntemi ile oluşturdukları FDM kompozitini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında gizli ısı depolama kapasitesini DSC, TGA ve ışık iletimini ultraviyole, görünür ışık ve yakın kızılötesi (UV-VIS-NIR) spektrometresi ile analiz etmişlerdir. Ölçülen parametreler doğrultusunda Al₂O₃'nin doğrudan soğurucu güneş enerjisi uygulamalarında kullanımı için uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda kompozit FDM'nin saf parafine kıyasla daha yüksek ışık geçirgenlik yüzdesine sahip olduğunu ve doğrudan güneş absorpsiyon uygulaması için uygun olmayabileceğini belirlemişlerdir (George vd., 2021).

Sharshir ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada parafin faz değişim malzemesinin termal performansını arttırmak için ağırlıkça %3'lük bakır oksit (CuO) ve kobalt oksit (Co₃O₄) içeren mono nanopartiküller ile hibrit CuO@Co₃O₄ nanokompozit elde etmişlerdir. Çalışma kapsamında elde edilen malzemeler XRD, FTIR ve DSC ile analiz edilmişlerdir. Ayrıca üretilen malzemelerin güneş ışığı depolama kapasitesinin belirlenmesi için çöl ikliminde dışarıda doğrudan ve dolaylı olarak güneş radyasyonuna maruz bırakmışlardır. Çalışma sonucunda DSC analizine göre, parafinin erime entalpisi CuO, Co₃O₄ ve CuO@Co₃O₄ eklenmesi ile sırasıyla %11, %20 ve %19,7 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Doğrudan güneşe maruz kalma altında, öğlen saatlerinde, nano-Co₃O₄ ile geliştirilmiş, nano-CuO ile geliştirilmiş ve nano-CuO@Co₃O₄ ile geliştirilmiş nano bazlı FDM'lerin sıcaklıkları, saf parafinden sırasıyla %6,29; %10,03 ve %14,52 oranında daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir (Sharshir vd., 2021).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda kompozit FDM'lerin üretimi sürecinde literatürde sıkça kullanılan matris malzemelerin yerine dolgu malzemesi olarak atıkların kullanımı gündeme gelmiştir (Ghani vd., 2021). Parafin katkılı FDM'lerin termal özelliklerinin iyileştirilmesi ve/veya şekil stabilitesini sağlamak için yapılmış çalışmalara göre;

Memon ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışmada kompozit faz değişim malzemesi üretimi için yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden kaolin ve öğütülmüş yüksek fırın cürufuna (ÖYFC) vakum emdirme yoluyla parafin eklemesi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen kompozit FDM'lerin karakterizasyonu için ESEM, FTIR, DSC ve TGA analiz tekniklerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda kaolin ve ÖYFC tarafından tutulan maksimum parafin yüzdesinin sırasıyla %18 ve %9 olduğunu belirlemişlerdir. FTIR analizi sonucunda kompozit FDM'deki bileşenler arasındaki etkileşimin fiziksel olduğunu ve katıdan sıvıya faz geçişi sırasında parafin sızıntısını önlemekten sorumlu olduğunu göstermişlerdir. DSC analizi sonrasında geliştirilmiş olan kompozit FDM'lerin faz değişim sıcaklıklarının insan konforu için uygun sıcaklık aralıklarında olduğunu belirlemişlerdir. Son olarak TGA analizi sonucunda yapılan kompozit FDM'lerden hiçbirinin 150 °C'nin altında bozulma belirtisi göstermediği ve ağırlık kaybının neredeyse hiç gözlenmediğini tespit etmişlerdir (Shazim A Memon vd., 2015).

Ansone ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada grafit fırça üretimi gerçekleştiren yerel bir sanayi kuruluşundan temin edilmiş atık grafit tozu ve metal parçaları ile parafin kullanarak kapsüllenmiş bir faz değişim malzemesi üretmişlerdir. Çalışma kapsamında

küresel olarak kapsüllenmiş FDM'lerin enerji birikiminin ve kompozit malzemelerin her fazda biriktirdiği enerji miktarını ve hızını belirleyip analiz etmek için matematiksel hesaplamalar kullanmışlardır. Çalışma sonucunda geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının içeriğinin net olarak bilinmemesi ve bileşenlerinin homojen olmaması nedeniyle sorunlara yol açabileceğinden söz etmişlerdir. Ayrıca geri dönüştürülmüş grafitin enerji biriktirme performansının daha yüksek olduğu ve termal iletkenliği arttırdığını belirlemişlerdir (Ansone vd., 2016).

Shao ve arkadaşları (2018) yaptıkları çalışmada çevresel problemlere neden olan genişletilmiş polistiren köpük atıkları ve parafin ile faz ayırma yöntemi kullanarak bir mikrokapsüllenmiş faz değişim malzemesi (MKFDM) oluşturmuşlardır. Elde edilen yeni MKFDM'i karakterize etmek için SEM, FTIR, TGA ve sızdırmazlık testi uygulamışlardır. Çalışma sonucunda başarıyla hazırlanmış olan MKFDM numunelerinin küresel yapılı ve çapları 1,5-3,5 μm aralığında olduğunu gözlemlemişlerdir. Hazırlama sürecinde hiçbir kimyasal reaksiyonun oluşmadığı ve parafinin sadece genişletilmiş polistiren köpük atıkları tarafından kapsüllendiğini belirlemişlerdir. Yapılan SEM ve FTIR analizleri sonucunda hiçbir safsızlık bulunmadığını belirlemişlerdir. Ayrıca yapılan TGA analizi sonucunda elde edilen MKFDM'nin gizli ısının 72,52 J/g olduğunu belirlemişlerdir (Shao vd., 2018).

Li ve arkadaşları (2019) yaptıkları çalışmada gözenekli demir cevheri artıkları, gözenekli seramik atıkları ve parafin kullanarak bir kompozit faz değişim malzemesi oluşturmuş ve elde edilen numunelerin fiziksel ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda artık seramiğin arzu edilen gözenek boyutu dağılımı gösterdiğini belirlemişlerdir. SEM analizi sonucunda ise gözeneklerinin %97'sinden fazlasının sıvı parafin ile doldurulabileceğini tespit etmişlerdir. Bunun yanında atık malzemenin sıvı parafin gözeneklerinin çerçevesine sıkıca tutunduğu ve bu çerçevenin parafinin dışarıya sızmasını engellediğini belirlemişlerdir. Farklı gözenekliliklere sahip kompozit FDM'lerin termal iletkenlik değerlerini incelediklerinde gözenekliliğin %89'dan %71'e düştüğünde termal iletkenliğin 0,30 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ değerinden 0,51 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ 'e yükseldiğini tespit etmişlerdir (R. Li vd., 2019).

2. ATIK ÜRETİMİNE GENEL BİR BAKIŞ

Günümüzde artan nüfus, gelişen ekonomi, hızlı kentleşme ve yükselen yaşam standartları başta gelişmekte olan ülkeler olmak üzere dünya çapında doğal kaynakların tüketimini ve atık oluşumunu büyük ölçüde hızlandırmıştır (Guerrero vd., 2013; Minghua vd., 2009). Dünyada 1900’lü yıllarda nüfus 220 milyon iken günde yaklaşık olarak 300.000 tondan az atık (kırık ev eşyaları, kül, gıda atıkları ve ambalaj atıkları gibi) oluşurken 2000 yılına gelindiğinde, şehirlerde yaşayan 2,9 milyar insan (dünya nüfusunun %49’u) günde 3 milyon tondan fazla atık oluşturmuştur. 2025 yılına gelindiğinde ise bu miktarın iki katı olacağı yani her gün 5.000 kilometre uzunluğundaki bir çöp kamyonunu doldurmaya yetecek kadar atık oluşacağı tahmin edilmektedir. Bu atıkların da çoğunlukla kağıt plastik ve gıda/organik atıklardan oluşacağı düşünülmektedir (Hoornweg vd., 2013). Özellikle atık üretiminin yüksek olduğu az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde bilimsel atık yönetim stratejilerinin oldukça kısıtlı olması atık yönetimini büyük bir sorun haline getirmektedir. Örneğin, Hindistan’ın kırsal alanlarında organik ve biyolojik olarak parçalanabilir 0,3-0,4 milyon ton katı atık üretimi gerçekleşmekte ancak atıklar üretilen atık alanlarında ayrıştırılmadığından büyük bir sorun haline gelmektedir (National Institute Of Rural Development & Panchayati Raj, 2016).

Dünya’da üretimi gerçekleştirilen atıkların %33’lük bir kısmı güvenli olmayan bir biçimde işlenmekte ve yasadışı çöplüklere veya denetlenmeyen alanlara atılmaktadır (Kaza vd., 2018). Bu uygulamalar yeraltı su kaynaklarının kirlenmesi, arazi bozulmalarının yaşanması, kanser vakalarının artması, çocuk ölümleri ve doğum anomalileri gibi çevresel ve sağlık risklerinin oluşmasına neden olmaktadır (Abdallah vd., 2020; Triassi vd., 2015). Bu kapsamda ciddi çevresel ve sağlık riskleri oluşturan atıkların yönetimi oldukça önemli bir yere sahiptir. Her ülkenin karşı karşıya olduğu zorlu bir görev olan atık yönetimi; toplama, ayırma, taşıma, yeniden işleme, geri dönüşüm ve bertaraf dahil olmak üzere birçok adımı içermektedir (Trivedi vd., 2020). Atık yönetimi metodolojileri atıkların özellikleri, kaynakları ve miktarları gibi faktörlere bağlı olarak belirlenmektedir.

Dünya’da ve Türkiye’de arıtma çamuru üretimi ve yönetiminde uygulanan metodolojilerle ilgili bilgiler aşağıda başlıklar halinde anlatılmıştır.

2.1. Dünya’da Arıtma Çamuru Üretimi ve Yönetimi Metodolojileri

Arıtma çamuru, dünya çapında sürekli olarak üretilen bir atıksu arıtma süreci yan ürünüdür. Bugüne kadar, arıtma çamurunun çevreden tamamen elimine edilmesini sağlayacak hiçbir teknoloji ve çözüm geliştirilmemiştir. Bunun yanında yüksek arıtma performansına sahip biyolojik ve kimyasal atıksu arıtma yöntemlerinin geliştirilmesiyle arıtma çamuru miktarı arttığından işlenme süreci arıtma tesislerindeki teknolojik süreçlerin ayrılmaz bir parçası haline gelmektedir. AB raporuna göre 2008 yılında 26 üye ülkede arıtma çamuru üretimi 10 milyon tondan fazla kuru katı maddedir (Kwarciak-Kozłowska, 2019). 2010 yılında 27 ülkedeki yıllık arıtma çamuru üretimiye 11,5 milyon ton kuru katı madde iken 2020 yılında bu miktar 13 milyon tona yükselmiştir (Rorat vd., 2019). Tablo 2.1’de OECD’ye göre seçilen ülkeler için arıtma çamurunun üretimi ve bertarafı ile ilgili veriler gösterilmektedir. Veriler incelendiğinde gelişmiş ülkelerde arıtma çamuru üretiminin teknolojik gelişmeler, yüksek nüfus ve kentleşme ile oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ülkelerce üretilen toplam atıkların yalnızca %80’lik bir kısmı bertaraf edilmektedir. Bertaraf sürecinde arıtma çamurunun büyük bir kısmı içeriğindeki organik madde yükünden dolayı tarımsal alanlarda (%26) gübre niteliğinde kullanılmaktadır. Oldukça küçük bir kısmı ise düzenli depolama sahalarında (%10) bertaraf edilmektedir.

Tablo 2.1. 2017 yılında ülkelerdeki arıtma çamuru üretimi ve bertarafı (<http-2>)

Ülke	Arıtma çamuru üretimi (Bin ton)	Toplam bertaraf (Bin ton)	Tarımsal kullanım (Bin ton)	Kompost ve diğer uygulamalar (Bin ton)	Düzenli depolama (Bin ton)	Yakma (Bin ton)	Diğer (Bin ton)
Bulgaristan	69	45	23	4	7	0	12
Çekya	223	223	103	73	22	25	-
İrlanda	60	59	46	10	0,087	0	2
Fransa	1.174	809	299	318	13	149	30
Hırvatistan	18	3	1	0,003	2	0	0,352
Kıbrıs	7	7	1	3	0	0,788	2
Letonya	25	24	3	6	0,022	0,098	15
Polonya	584	584	109	26	15	106	329
Romanya	283	283	35	2	168	0,02	78
Slovenya	37	37	0	0,4	0,3	12	24
Slovakya	55	55	0	25	8	12	10
İsviçre	177	177	0	0	0	177	0
Sırbistan	13	13	-	-	13	-	-

2.2. Türkiye’de Arıtma Çamuru Üretimi ve Yönetimi

Arıtma çamuru, sıvıların ve katıların ayrıldığı atıksu arıtma süreci sonrasında üretilen kalıntı olarak ifade edilmektedir (Fytli ve Zabaniotou, 2008). Atıksu arıtma tesislerinden (AAT) kaynaklanan yüksek miktarlardaki arıtma çamurları büyük bir sorun oluşturmaktadır. Ayrıca arıtma çamuru arıtma maliyetleri genellikle toplam atıksu arıtma maliyetlerinin %50’sinden fazlasını oluşturmaktadır (Rulkens, 2008). Ayrıca evsel ve endüstriyel faaliyetler sonucunda oluşan atık suların arıtımı ile oluşan arıtma çamurları yüksek organik madde içeriklerinin yanında sağlık ve/veya çevresel riskler oluşturan bir dizi kimyasal içerebildiğinden oldukça önemli bir atıktır (Lasaridi vd., 2018). Bu kapsamda oluşan bu sorunlu arıtma çamurları genel olarak vahşi depolama, düzenli depolama, kompostlama, geri dönüşüm, geri kazanım ve yakma yollarıyla yönetilmektedir (Yılmaz ve Bozkurt, 2010). Bu yönetim yollarının yanında biyolojik katıların değerlendirilmesinde çamurdan yağ üretimi, çamurdan türetilmiş yakıt (Yıldız vd., 2009), biyokömür (Sümer vd., 2016), biyogaz (Caliskan ve Ozdil, 2020) üretimi gibi ekonomik potansiyeli olan süreçler gerçekleştirilmektedir. TÜİK’in en son yayınladığı istatistikler doğrultusunda ülkemizde atıksu arıtma süreci sonucunda 318.503 ton arıtma çamuru meydana gelmektedir. Tablo 2.2’de gösterildiği üzere toplam arıtma çamurun %44,9’luk kısmı enerji geri kazanımlı yakma ile geri kazanılmakta ve %26,8’lik kısmı düzenli depolama tesislerinde bertaraf sürecine tabi tutulmaktadır (http-3).

Tablo 2.2. Arıtma çamurlarının bertaraf ve geri kazanım miktarları (http-3)

Bertaraf ve Geri Kazanım Yöntemleri	Miktar (Ton)	(%)
Enerji geri kazanımlı yakma	142 858	44,9
Düzenli depolama tesisinde bertaraf edilen	85 382	26,8
Belediye çöplüğünde bertaraf edilen	36 135	11,3
Tarım yararına veya ekolojik iyileştirme amacıyla araziye uygulanan	11 356	3,6
Araziye atılan	6 710	2,1
Geçici depolanan	29 596	9,3
Diğer ⁽¹⁾	6 467	2,0
Toplam	318 503	100

1)Gömülen, nehir ya da göle dökülen arıtma çamurunu ifade etmektedir.

3. ENERJİYE GENEL BAKIŞ

Teknolojik gelişmelerle birlikte dünyadaki enerji talebinin artışından kaynaklanan sorunların üzerinden gelinmesi ve Paris anlaşması kapsamında küresel ortalama sıcaklık artışının bu yüzyılın sonunda 2 °C'nin altında olması için çalışmalar gerçekleştirilmektedir (Kona vd., 2018). Son yıllarda Bristish Petroleum (BP) şirketinin istatistiklerine göre dünya genelindeki enerji tüketimi 1995 yılında 8.588,9 milyon ton eşdeğer petrol (Mtep) iken bu miktar 2015 yılında 13.147,3 Mtep seviyelerine yükselmiştir. Küresel enerji tüketimi incelendiğinde de küresel toplam enerji ihtiyacının yaklaşık olarak %86'lık kısmının fosil yakıt bazlı enerjilerden temin edildiği görülmektedir (Dong vd., 2020). 130 ülkenin katılımıyla imzalanmış olan Paris anlaşması kapsamında küresel ısınmanın temel nedeni olan mevcut CO₂ emisyonlarının azaltılması için pek çok hedef konulmuştur . Bu hedeflerin sağlanabilmesinin yalnızca dünyanın her yerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ile karşılanabileceği düşünülmektedir. Yenilenebilir kaynaklarının dünya enerji arzındaki payı sürekli artmakta ancak bu oran sadece %4,2'de kalmaktadır (Koçak vd., 2020).

Ülkemizdeki enerji tüketimi değerlerini incelediğimizde toplam enerji tüketiminin 2018 yılında 143,666 Mtep olduğu belirlenmiştir. Bu değer yıl bazlı değişimi incelendiğinde 2018 yılı toplam enerji değişiminin 1990'a oranla %174, 2005'e oranla %62 artış ve 2017'e oranla ise %1,1 azalış gösterdiği belirlenmiştir. Ülkemizdeki enerji tüketiminin dağılımını incelediğimizde enerji tüketiminin en çok %25,3'le sanayi sektörüne ait olduğu ve arkasından %24'lük bir oranla enerji ve çevrim sektörüne ait olduğu görülmüştür. Enerji tüketiminin kaynaklarını düşündüğümüzde ülkemizde 2018'in sonu ile birlikte birincil enerji arzının 143,666 Mtep olduğu ve bu miktarın 39,675 Mtep'lik kısmının yerli enerji üretim sürecinden sağlandığı bilinmektedir. 39,675 Mtep'lik yerli enerji üretiminin de %50'lik kısmının yenilenebilir enerjiden sağlandığı ve bu enerji miktarının 1990'a oranla %105 arttığı belirlenmiştir (http-4).

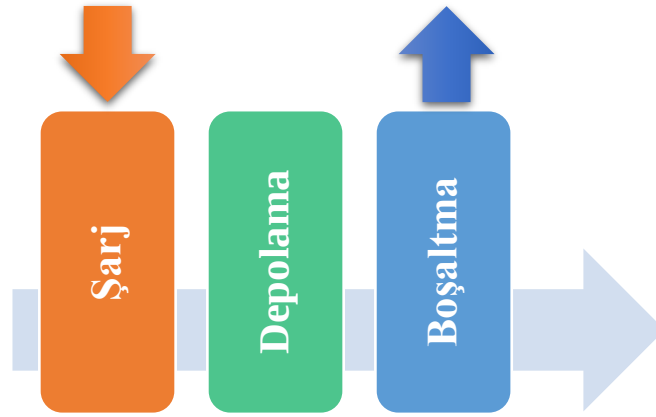
Sürdürülebilir enerji yönetiminin sağlanması ve enerji tüketiminin azalmasına bağlı olarak küresel ısınma etkilerinin minimize edilmesi hatta ortadan kaldırılacak seviyeye gelmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması öne çıkan çözümlerden bir tanesidir. Ancak yenilebilir enerji kaynaklarının çoğunun doğası gereği kesintili olması, bu kaynakların mevcut güç şebekesine entegrasyonu, verimlilik, kararlılık ve güvenilirlik açısından zorluklar oluşturmaktadır. Günümüzde bu

zorlukların ortadan kaldırılması veya minimize edilmesi için adından çokça söz ettiren enerji depolama teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Enerji depolama teknolojileri depolanan enerji bazında sınıflandırılmaktadır ve genel olarak mekanik, termokimyasal, kimyasal, termal ve elektriksel enerji olarak sınıflandırılmaktadır (Rahman vd., 2020).

4. TERMAL ENERJİ DEPOLAMA (TED) TEKNOLOJİSİ

Teknolojik gelişmeler, nüfus artışı ve endüstrileşme ile enerji kaynaklarına olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Artan enerji talebine karşılık enerjinin verimli kullanımı ve enerji tasarrufunun sağlanması için çözümler geliştirilmesi büyük önem kazanmıştır. Enerji depolama daha sonra yararlanılabilecek ve belirli süreçlerde faydalı bir biçimde yeniden kullanılabilecek bir tür enerjinin depolanması olarak ifade edilmektedir. Enerji depolama teknolojileri, enerji ekipmanlarının etkin kullanımının artırılması ve enerji arz ve talebi arasındaki dengesizliğin ortadan kaldırılması için uygulanmaktadır (D. Fernandes vd., 2012). Enerji; mekanik, elektrokimyasal, kimyasal, elektromanyetik ve termal enerji formlarında depolanabilmektedir (H. Zhao vd., 2015).

Termal enerji depolama (TED), bir depolama ortamını ısıtarak veya soğutarak termal enerjiyi stoklayan ve depolanan enerjinin daha sonra ısıtma yada soğutma uygulamaları ve güç üretimi için kullanılabilmesini sağlayan bir teknolojidir (L F Cabeza vd., 2015; Mehling ve Cabeza, 2008; Sarbu ve Sebarchievici, 2018). TED sistemlerinde termal enerji saatler, günler veya aylar sonra ısıtma ya da soğutma uygulamalarında hatta elektrik üretiminde kullanılabilmek için depolanabilmektedir (Enescu vd., 2020). Şekil 4.1’de gösterildiği üzere TED sistemlerinde tam bir depolama döngüsü şarj, depolama ve boşaltma olmak üzere üç adımda gerçekleşmektedir (Luisa F Cabeza vd., 2021).

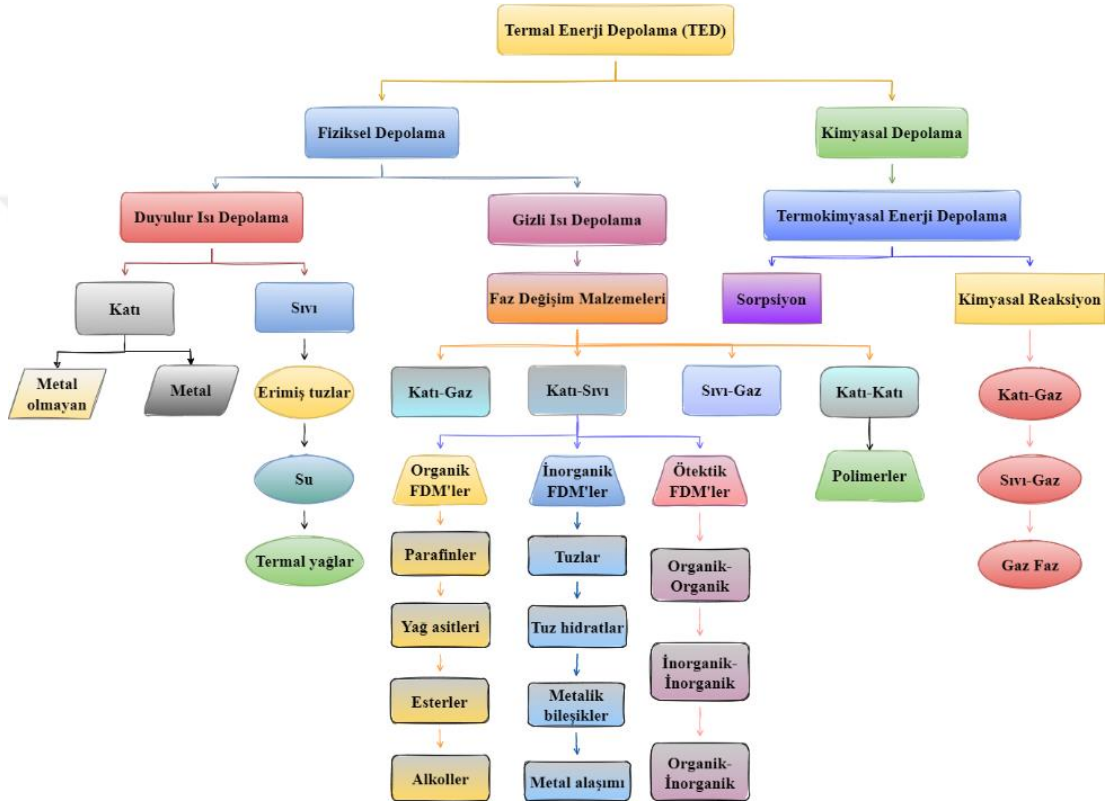


Şekil 4.1. TED sürecinin akış diyagramı (L F Cabeza vd., 2015)

TED sistemleri, enerji arzı fazla olduğunda enerji depolayabilir ve enerji arzı yetersiz olduğunda enerjiyi serbest bırakabilmektedir. Ek olarak enerji arz ve talebi arasındaki boşluğu çözebilmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kesinti ve dalgalanmalarının üstesinden gelebilmektedir. Ayrıca, endüstrilerin veya diğer alanların atık ısısı, termal enerji depolama sistemleri ile geri kazanılabilir ve yeniden kullanılabilir, bu da enerji kullanımını ve verimliliğini büyük ölçüde artırmaktadır (Yaxue Lin, Alva, vd., 2018). TED sistemleri enerji verimliliğinin sağlanmasının yanında termal enerjiyi kullanan ekipman ve sistemlerin etkin kullanımı yoluyla yakıt tüketimini azaltmaya yardımcı olarak küresel ısınma etkilerinin minimize edilmesine katkı sağlamaktadır (Nazir vd., 2019). TED sistemlerinde enerjinin depolanması için çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. TED malzemeleri belirlenmiş termal uygulama için uygun bir erime noktası, yüksek gizli ısı, yüksek özgül ısı ve yüksek termal iletkenlik gibi uygun termofiziksel özelliklere sahip olmalıdır. Ayrıca TED malzemelerinin düşük aşırı soğuma, düşük maliyet, kolay bulunabilirlik, termal kararlılık, kimyasal kararlılık, düşük hacim değişimi, toksik olmayan, uyumlu erime ve düşük yanıcılık gibi özelliklere sahip olması istenilmektedir (Alva vd., 2018).

4.1. TED Sınıflandırılması

Termal enerji depolama (TED), duyulur ısı, gizli ısı veya termokimyasal ısı depolama yöntemlerinden biri kullanılarak etkili bir enerji yönetimi sistemi olarak kullanılmaktadır (Ikutegbe ve Farid, 2020). Şekil 4.2’de TED sistemlerinde kullanılan metotlar ve bu metotlarda kullanılan malzemeler ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

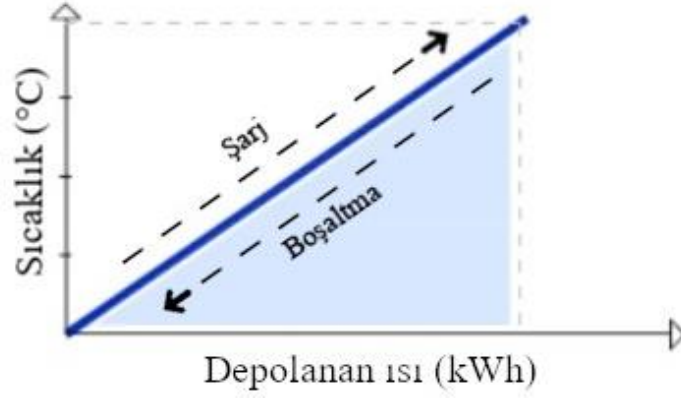


Şekil 4.2. Termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan metot ve kimyasal örnekleri (Nazir vd., 2019)

4.1.1. Duyulur ısı depolama

Duyulur ısı depolama (DID) sistemleri, bir ortamın (genellikle katı veya sıvı) sıcaklığını yükselterek depolamayı sağlamaktadır. Bu nedenle duyulur ısı depolama malzemeleri, depolama işleminin sıcaklık aralığı üzerinde faz değişikliğine uğramamaktadır (Kuravi vd., 2013). Şekil 4.3’te duyulur ısı depolama sistemlerinde ısı depolama süreci gösterilmektedir (Akeiber vd., 2016). Duyulur ısı depolama süreci en yaygın basit, düşük maliyetli ve uzun süredir kullanılan bir yöntemdir. Bu depolama sistemi, ısı enerjisini bir depolama ortamında (genellikle katı veya sıvı) duyulur ısıya çevirir ve gerektiğinde serbest bırakmaktadır. Bir malzemede depolanan duyulur ısı

miktarı, ısı kapasitesine (enerji yoğunluğu) ve termal yayılımına (ısının yayılabileceği ve çıkartılabileceği oran) bağlıdır (Abdin ve Khalilpour, 2019).



Şekil 4.3. Duyulur ısı depolama süreci (Akeiber vd., 2016)

DID malzemeleri, ısı enerjisini kendi özgül ısı kapasitelerinde (c_p) depolamaktadır. Duyulur ısı tarafından depolanan termal enerji Denklem 4.1'deki şekilde ifade edilmektedir:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Burada m kütle (kg), C_p özgül ısı kapasitesi (J/kg·K) ve ΔT (°C) şarj işlemi sürecindeki ısı artışıdır (Alva vd., 2018). DID'de depolanan ısı miktarı, depolanan malzemenin kütlesine, ısı kapasitesine ve ilk-son durumlar arasındaki sıcaklık gradyanına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Nazir vd., 2019). Su, yüksek özgül ısı (4190 J/kg·K) ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle orta sıcaklık aralığında (0-100 °C) mevcut olan ve en yaygın kullanılan DID sıvısıdır. 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklar için sıvı metaller, yağlar ve erimiş tuzlar gibi muhafaza ortamları daha çok tercih edilmektedir (Hussain vd., 2020). Tablo 4.1'de DID dayalı termal enerji depolama süreçlerinde tipik olarak kullanılan malzemeler gösterilmektedir. DID malzemelerinin ısı kapasitesinin yüksek olması, bol ve ucuz olmaları gerekmektedir. Ayrıca malzeme seçim sürecinde özellikle yoğunluk, özgül ısı termal iletkenlik ve yayılma, buhar basıncı, kap malzemeleriyle uyumluluk ve kimyasal kararlılık özelliklerine bakılması gerekmektedir. Duyulur ısı, katı veya sıvı içinde depolanabilmektedir. Hava depolama sistemleri gibi gaz

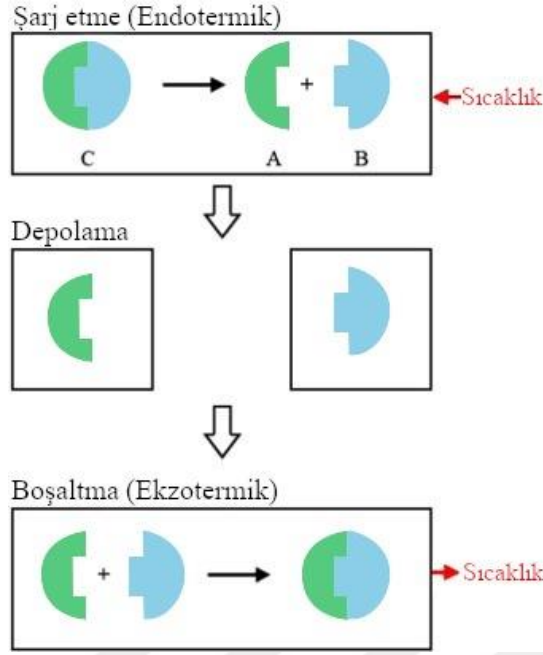
madde ortamları da kullanılabilmektedir ancak daha büyük depolama alanları gerekmektedir (Luisa F Cabeza vd., 2021).

Tablo 4.1. Duyulur ısı TED kullanılan tipik malzemeler (Luisa F Cabeza vd., 2021)

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı (J/kg·K)	Hacimsel termal kapasite (10 ⁶ J/m ³ ·K)
Kıl	1458	879	1,28
Tuğla	1800	837	1,51
Kumtaşı	2200	712	1,57
Odun	700	2390	1,67
Beton	2000	880	1,76
Cam	2710	837	2,27
Alüminyum	2710	896	2,43
Demir	7900	452	3,57
Çelik	7840	465	3,68
Çakıllı toprak	2050	1840	3,77
Manyetit	5177	752	3,89
Su	988	4182	4,17

4.1.2. Termokimyasal enerji depolama

Termokimyasal enerji depolama sistemleri, tamamen tersinir olabilen bir kimyasal reaksiyonla moleküler bağların kırılması ve yeniden oluşturulması sonucunda absorplanan ve salınan enerjiye dayanmaktadır. Bu sistemlerde depolanan ısı, depolama malzemesinin miktarına, reaksiyonun endotermik ısıısına ve dönüşüm derecesine bağlıdır (A. Sharma vd., 2009). Termokimyasal enerji depolama sistemlerinde ısı depolama süreçleri şarj etme, depolama ve boşaltma olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Şekil 4.4'te bir termokimyasal ısı depolama sisteminin tersinir süreci temsili olarak gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği üzere şarj sürecinden (endotermik) sonra, farklı özelliklere sahip olan B ve C bileşenleri ortam sıcaklığında ayrı ayrı depolandığı depolama süresi boyunca sistemde çok az ısı kaybı yaşar veya hiç ısı kaybı yaşanmaz. Bu nedenle, bu tür termal enerji depolama süreçleri uzun süreli enerji depolama yani mevsimlik depolama için daha uygundur (Mahlia vd., 2014).

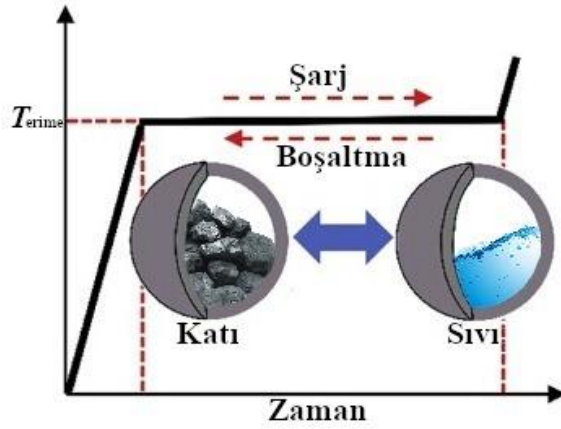


Şekil 4.4. Termokimyasal enerji depolama sisteminin ısı depolama süreçleri (Mahlia vd., 2014)

Termokimyasal enerji depolama sistemlerinde boşaltma sürecinde ise depolanan ürünler birlikte karıştırılır ve ekzotermik bir reaksiyonla ilk reaktanı oluşturmak üzere tepkimeye girmektedir. Reaksiyon sırasında da açığa çıkan ısı bir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır (Aneke ve Wang, 2016). Termokimyasal enerji depolama, kimyasal reaksiyonlar ve sorpsiyon sistemleri olarak iki kategoride değerlendirilmektedir. Kimyasal reaksiyonlarda, malzemelerde yüksek enerji depolama yoğunluğu ve tersinirlik gerekmektedir. Genellikle, kimyasal enerji dönüşümü, fiziksel yöntemlerden (duyarlı ve gizli ısı depolama) daha iyi enerji depolama performans verimliliğine sahiptir. Ancak sürecin en büyük zorluğu, kullanılan enerji kaynağı için uygun tersinir kimyasal reaksiyonu bulmaktır (Luisa F Cabeza vd., 2021).

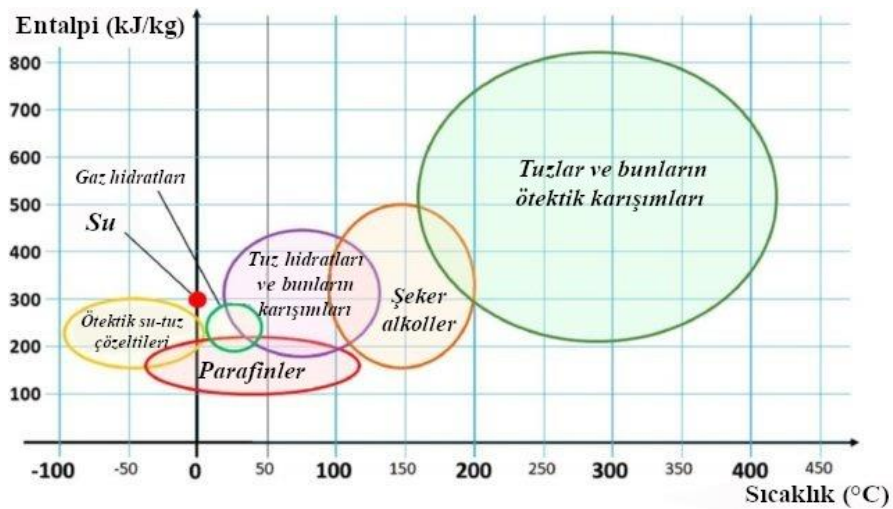
4.1.3. Gizli ısı depolama

Bir maddenin bir fazdan diğerine geçmesi sırasında meydana gelen ısı transferine gizli ısı adı verilmektedir. Gizli ısı değişimi, belirli bir ortamın özgül ısısıyla ilgili olan duyulur ısı değişiminden genellikle çok daha yüksektir (Dincer ve Rosen, 2011). Gizli ısı depolaması, bir depolama malzemesinin katıdan sıvıya veya sıvıdan gaza veya tam tersi faz değişimi sırasında ısı salınımına veya ısı absorpsiyonuna dayanmaktadır (Mahlia vd., 2014). Şekil 4.5'te gizli ısı depolama süreçlerinde katı-sıvı faz değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Gizli ısı depolama süreçlerinde katı-sıvı faz değişimini (Shchukina vd., 2018)

Gizli ısı depolama sistemlerinde genellikle faz değiştiren malzemeler (FDM) kullanılmaktadır. Enerji depolama uygulamalarında malzemenin fazı (genellikle katıdan sıvıya), termal güç kaynağına uygun sıcaklıklara göre değişiklik göstermektedir (Aneke ve Wang, 2016). Katı-sıvı faz değişimli FDM'lere dayalı gizli ısı depolama sistemlerinin, sıvı-buhar ve katı-katı faz değişimlerine kıyasla çok verimli olduğu düşünülmektedir. Sıvı-gaz fazı değişimi, FDM için büyük hacimli bir depolama alanı gerektirmekte ve katı-katı faz değişimi, düşük bir gizli ısı değeri sağlamaktadır. Bu durum da her iki alternatifin termal enerji depolama süreçlerinde kullanımını azaltmaktadır (Huili Zhang vd., 2016). Şekil 4.6'da farklı FDM türleri için erime aralıkları ve erime entalpileri gösterilmektedir (Kushwah vd., 2020).



Şekil 4.6. Farklı FDM türleri için erime aralıkları ve erime entalpileri (Kushwah vd., 2020)

Malzemelerin gizli ısı depolama kapasitesi Denklem 4.2 ve 4.3 kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_m} m c_p dt + m f \Delta q + \int_{t_m}^{t_f} m c_p dt \quad (4.2)$$

$$Q_s = m [c_{ps} (t_m - t_i) + f \Delta q + c_{pl} (t_f - t_m)] \quad (4.3)$$

Burada,

Q_s depolama kapasitesi (J),

t_i başlangıç sıcaklığı (°C),

t_m erime sıcaklığı (°C),

t_f son sıcaklık (°C),

m FDM malzemesinin ağırlığı (kg),

c_{ps} katı fazın t_i ve t_m sıcaklıkları arasındaki ortalama özgül ısısı,

c_{pl} sıvı fazın t_m ve t_f sıcaklıkları arasındaki ortalama özgül ısısı,

f erime oranı,

Δq erime gizli ısısı (J) olarak ifade edilmektedir (Hussain vd., 2020).

Gizli ısı depolama sistemleri, genellikle kompakt olmaları açısından avantajlıdır. Belirli bir ısı depolama miktarı için FDM'lerin hacmi, duyulur ısı depolama malzemelerinin hacmine kıyasla önemli ölçüde daha azdır. Ayrıca FDM'ler küçük sıcaklık değişimlerinde büyük miktarda ısı depolayabilmekte, izotermal koşullarda çalışabildikleri ve yüksek depolama yoğunluğuna sahip oldukları için değişmez çalışma sıcaklığında uygulanabilme özelliklerine sahiptirler. Gizli ısı depolama sistemleri, duyulur ısı depolama sistemlerine kıyasla yaklaşık beş ila on kat daha yüksek depolama yoğunluğuna sahiptir. Ek olarak, FDM'lerin depolama hacimleri sudan iki kat daha azdır (Hailu, 2021).

4.2. TED Türlerinin Karşılaştırılması

Termal enerji depolama teknolojilerinin kullanımı sürdürülebilir enerji yönetimi için oldukça önemlidir. Bu doğrultuda enerji yönetim sürecinde kullanılan TED

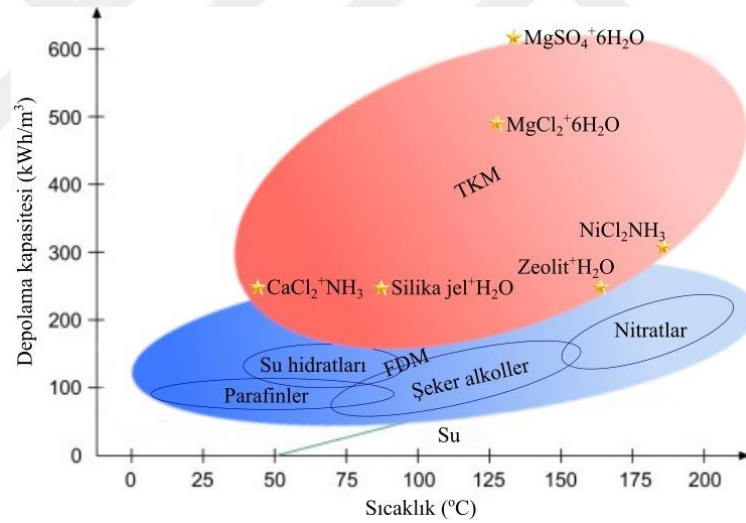
sistemlerinden hangi türlerin seçileceği verimli enerji kullanımı açısından önemli olan en temel konudur. Bu kapsamda Tablo 4.2’de güneş enerjisiyle mahal ısıtması ve sıcak su üretimi uygulamaları için farklı TED teknolojilerinin karşılaştırması gösterilmektedir (L F Cabeza vd., 2015; Luisa F Cabeza vd., 2021).

Tablo 4.2. Güneş enerjisiyle mahal ısıtması ve sıcak su üretimi uygulamaları için farklı TED teknolojilerinin karşılaştırılması (L F Cabeza vd., 2015)

	Duyulur ısı depolama		Gizli ısı termal depolama malzemesi (FDM)
	Su	Kaya	
Farklı ısı depolama ortamları arasında karşılaştırma			
Çalışma sıcaklığı aralığı	Sınırlı (0 °C – 100 °C)	Geniş	Geniş, malzeme seçimine bağlı olarak
Özgül ısı	Yüksek	Düşük	Orta
Termal iletkenlik	Düşük ısı yayımı etkileri, ısı transfer oranını iyileştirir	Düşük	Çok düşük, yalıtım özellikleri
Küçük sıcaklık farkları için birim kütle ve hacim başına termal depolama kapasitesi	Düşük	Düşük	Yüksek
Termal döngü kararlılığı	İyi	İyi	Yetersiz veri
Bulunabilirlik	Geniş kapsamlı	Hemen hemen kapsamlı	Malzeme seçimine bağlı
Maliyet	Ucuz	Ucuz	Masraflı
Farklı tipteki termal depoların ısı transfer özelliklerinin ve ömürlerinin karşılaştırılması			
Gerekli ısı eşanjörü geometrisi	Basit	Basit	Karmaşık
Şarj ve boşaltma sırasındaki sıcaklık gradyanları	Büyük	Büyük	Küçük
Eşzamanlı şarj ve boşaltma	Mümkün	Mümkün değil	Uygun ısı eşanjörü seçimi ile mümkün
Güneş enerjisiyle ısıtma/soğutma sistemleriyle entegrasyon	Su sistemleri ile doğrudan entegrasyon	Hava sistemleri ile	Dolaylı entegrasyon

		doğrudan entegrasyon	
Pompalar, fanlar vb. için maliyetler	Düşük	Yüksek	Düşük
Geleneksel inşaat malzemeleriyle korozyon	Korozyon inhibitörleri ile korozyon ortadan kaldırılır	Korozif değil	Şu anda sınırlı bilgi bulunmakta
Ömür	Uzun	Uzun	Kısa

Çalışma sıcaklıklarına göre duyulur ısı (bir örnek olarak su), gizli ısı (faz değişim malzemeleri), ve termokimyasal malzemeler (TKM) gibi farklı TED teknolojileri Şekil 4.7’de gösterilmektedir (Sarbu ve Sebarchievici, 2018).



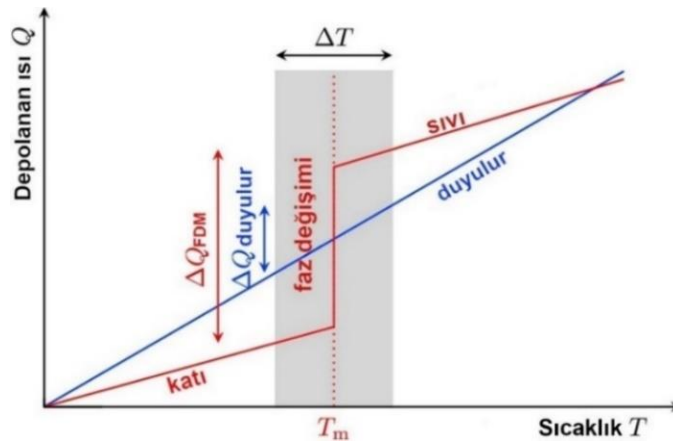
Şekil 4.7. TED teknolojilerinin hacimsel depolama kapasiteleri (L F Cabeza vd., 2015; Luisa F Cabeza vd., 2021)

5. FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ

Toplumun gelişmesi, ekonomik büyüme ve beraberinde gelen modernizasyon nedeniyle enerji talebi dünya çapında büyük ölçüde artmıştır. Son birkaç yüzyıldaki endüstriyel gelişmeler ve nüfus patlaması ile birlikte enerji talebinde yılda yaklaşık %2,3'lük muazzam bir artış olmuştur (Zhou vd., 2012). Artan enerji talebiyle birlikte, enerji krizi, iklim değişikliği, küresel ısınma ve sera gazı emisyonları gibi enerji

tüketimine bağlı olumsuz etkiler nedeniyle enerji tüketiminin azaltılması gezegenin sürdürülebilirliği için oldukça önemlidir (Dyball, 2013). Günümüzde konvansiyonel olarak gerekli forma dönüştürülebilen enerjinin uygun formlarda depolanması teknoloji uzmanlarının büyük çabalarından birisi haline gelmiştir (Garg vd., 1985; A. Sharma vd., 2009). Enerji tüketiminin azaltılmasının yanında gündeme gelen enerji depolama teknolojileri sürdürülebilir enerji yönetimi için yenilikçi bir yaklaşım haline gelmektedir. 1973-1974 yıllarında enerji krizini takiben, duyulur ısı (DI) ve gizli ısı (GI) olarak salınabilen termal enerjinin depolanması (TED) için faz değişim malzemelerinin (FDM) kullanılması enerji yönetimi için önemli bir unsur haline gelmiştir (Pielichowska ve Pielichowski, 2014). FDM'ler küçük bir sıcaklık aralığında bir faz geçişinde gizli ısı yoluyla ısıyı depolayan malzemeler olarak adlandırılmaktadır (Noël vd., 2016). FDM'ler sabit sıcaklıkta ısı alışverişi yapabildiğinden ve aldığı enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayabildiğinden daha yüksek enerjinin depolanmasına olanak sağlamaktadır (Giro-Paloma vd., 2015; R. K. Sharma vd., 2015). Bu kapsamda FDM'ler enerjinin depolanması ve yeniden kullanılabilmesi ile sürdürülebilir enerji yönetiminin sağlanması açısından büyük bir öneme sahiptir (Khudhair ve Farid, 2004; Z. Wang vd., 2018; Zalba vd., 2003).

Şekil 5.1'de gösterildiği üzere FDM'ler erime sıcaklığı olan T_m civarındaki küçük sıcaklık aralıklarında duyulur ısı depolayan malzemelere kıyasla daha üstün bir enerji depolama yoğunluğu sağlamaktadır. Bu durum özellikle optimum çalışma sıcaklığının korunması gereken sistemler için büyük bir avantaj oluşturmaktadır (Browne vd., 2015; Yeşilyurt vd., 2019).



Şekil 5.1. Duyulur ve gizli ısı depolama durumunda belirli bir ΔT sıcaklık aralığında depolanan ısı miktarı (Browne vd., 2015)

FDM'ler kimyasal bileşenlerine ve geçiş sıcaklıklarına bağlı olarak binalar, iklimlendirme sistemleri, yalıtkanlar, taşınabilir termal piller, güneş pilleri ve tekstil endüstrisi gibi alanlarda kullanılabilmektedir (Abdeali vd., 2020; Solé, 2015). Bu kapsamda Tablo 5.1'de gösterildiği üzere FDM'lerin kullanım alanına uygun olan termal, fiziksel, kinetik, kimyasal ve ekonomik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Ancak hiçbir malzeme ideal bir termal depolama ortamı için gerekli tüm özelliklere sahip olamayacağından mevcut malzemeleri kullanmak ve uygun tasarımlar ile zayıf fiziksel özelliklerin önüne geçilmesi gerekmektedir (M. Rathod, 2018).

Tablo 5.1. FDM'ler için istenilen özellikler (M. Rathod, 2018; Salah, 2020)

Termodinamik özellikler	• Özel uygulamalar için uygun erime noktası • Birim hacim başına yüksek gizli ısı • Daha iyi ısı transferi için katı ve sıvı fazların yüksek ısı iletkenliği • İlave duyulur ısı depolaması için daha yüksek özgül ısı
Fiziksel özellikler	• Uygun faz dengesi • Daha küçük muhafaza kabı hacmi için yüksek yoğunluk • Faz geçişi sırasında küçük hacim değişikliği • Muhafaza sorununu azaltmak için düşük buhar basıncı • Tüm termal döngü boyunca tekrar üretilebilirlik
Kinetik özellikler	• Donma süreci sırasında hiç ya da çok az aşırı soğutma yaşanması (Birkaç dereceden fazla aşırı soğutma ısı alımını engellemektedir.) • Yüksek oranda çekirdeklenme ve yüksek oranda kristal büyümesi (Yani, eriyik termodinamik donma noktasında kristalleşmelidir.) • Özellikle izotermal koşullarda etkili ısı transferi
Kimyasal özellikler	• Birkaç donma/eritme döngüsü sonrasında bozulma olmaması • Yapı malzemelerinin aşındırmaması • Kimyasal ayrışma olmaması • Toksik olmaması • Güvenlik kısıtlamaları olan (Zehirsiz, parlayıcı olmayan, çevreyi kirletmeyen ve patlayıcı olmayan vb.)
Ekonomik kriterler	• Bol miktarda bulunmak • Ucuz olmak • Kolay geri dönüştürülen ve işlenen

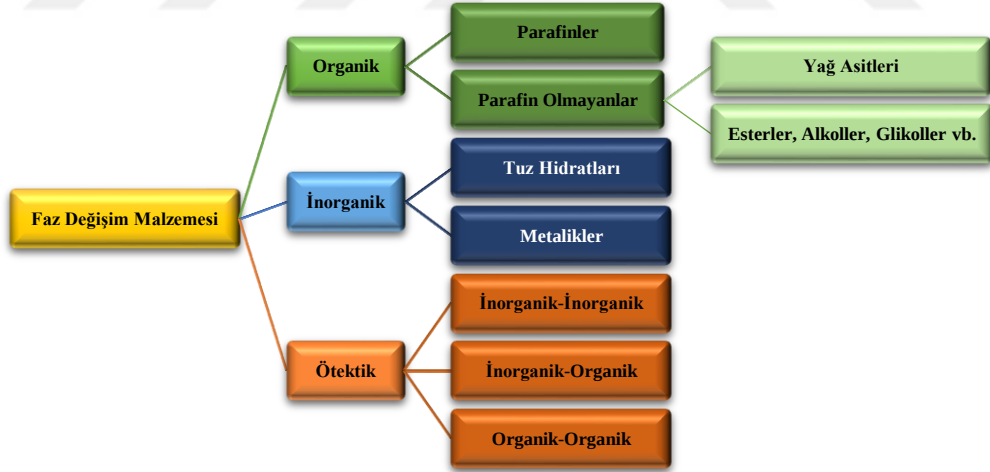
Tablo 5.1’de açıklanmış problemlerin üzerinden gelinmesi için farklı stratejiler geliştirilmiştir. Bunlar aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır

1. Faz değişimi ayrımı, iki veya daha fazla bileşenli sistemin erime noktasının üzerinde ısıtıldığında farklı fazlara ayrılması ve ardından erime sıcaklığının altında tekrar katılaşması anlamına gelmektedir. Bu durumda yerçekimi nedeniyle yoğunluğu yüksek olan faz dibe çökecek ve yoğunluğu düşük olan faz yukarıya çıkacağından dolayı orijinal kompozisyon değişecektir. Bu durum bileşenlerin erime sıcaklıklarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Buradaki en önemli sorun depolama yoğunluğunun azaltılabilmesi, yani katılaşma gizli ısının genellikle tamamen serbest bırakılamamasıdır. Bu problemin ortadan kaldırılması için karıştırma kullanılabilir ancak ana dezavantajı ekipman gerektirmesidir, bir başka çözüm yolu ise homojenizasyon için difüzyon proseslerinin kullanılmasıdır, ancak bu sadece küçük ölçekli çalışmalar için etkilidir. Diğer bir çözüm yolu, FDM’nin viskozitesini arttırmak olacaktır, yüksek viskozite nedeniyle tüm FDM katı olana kadar farklı fazlara ayrılmamaktadır.
2. Aşırı soğutma: Birçok FDM, erime noktasının altında soğutulduğunda katılaşmaz ama erime sıcaklığından hemen sonra kristalleşmeye başlamaktadır. Isı ekstraksiyonu sırasında, aşırı soğutma nedeniyle erime sıcaklığına ulaşıldığında gizli ısı serbest bırakılmaz ve çekirdeklenme gerçekleşmezse, yalnızca duyulur ısı depolanacağı için teknik uygulamada ciddi bir sorun olabilmektedir. FDM seviyesinde aşırı soğutmadan kurtulmak amacıyla en yaygın yaklaşım, heterojen çekirdeklenmeye neden olan çekirdekleştiriciler olarak da adlandırılan özel katkı maddelerini eklemektir.
3. Sızıntının önlenmesi ve ısı transferinin iyileştirilmesi: Faz değişim süreci sırasında sıvı FDM’nin sızmasını önlemenin iki yolu vardır; ilk olarak, fonksiyonel FDM’nin kompozite mekanik mukavemet vermesi beklenen gözenekli destek malzemelerine emdirilmesiyle üretilen kararlı FDM’yi oluşturmaktır. Sızıntıyı önlemenin başka bir yolu da FDM’yi kapsüllemektir, kapsülleme sürecinin mikro ve makro kapsülleme olarak iki şekli vardır. Ayrıca, kapsülleme yöntemi ısı transferini iyileştirmeye yardımcı olur ve mekanik stabilite sağlamaktadır.

4. Mekanik stabilitenin ve termal iletkenliğin iyileştirilmesi: FDM'nin termal iletkenliğinin iyileştirilmesi, iletken metalik ve karbon bazlı nanopartiküller, metalik köpükler ve FDM'nin kapsüllenmesi ile yapılmaktadır. Ek olarak, bir kompozit malzeme oluşturmak üzere emprenye edilebilen seramik granüller ve karolar mekanik stabiliteyi iyileştirebilmektedir (Al-Absi vd., 2020; Salah, 2020).

5.1. FDM'lerin Kimyasal Özelliklerine Göre Sınıflandırılması

Malzemelerin faz değişimleri katı-katı, katı-sıvı, gaz-katı ve gaz-sıvı olmak üzere dört durum içinde sınıflandırılabilir. Yükleme/boşaltma prosesleri katı-sıvı faz dönüşümü kategorisindeki FDM'ler organik, inorganik ve ötektik FDM olarak üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Amaral vd., 2017; Faraj vd., 2020; Jelle ve Kalnæs, 2017). Şekil 5.2'de FDM'lerin kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılması ve bu FDM türlerine dair örnekler yer almaktadır.



Şekil 5.2. FDM'lerin kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılması ve örnekleri (Amaral vd., 2017; M. K. Rathod ve Banerjee, 2013)

5.1.1. İnorganik FDM'ler

İnorganik FDM'ler, oldukça yüksek bir gizli ısıya sahip olan tuz hidratlar (M_nH_2O), hidratlar ve metallerdir. Bu malzemeler ayrıca yanıcı değildirler, ucuzdurlar ve kolaylıkla

temin edilebilmektedirler (Tebaldi vd., 2016). Genel olarak, inorganik FDM'ler organik FDM'lere göre birim hacim başına iki kat daha fazla ısı depolama kapasitesine sahiptir. Ayrıca organik FDM'lere göre daha yüksek termal iletkenliğe, daha yüksek çalışma sıcaklıklarına ve daha düşük maliyetlere sahiptirler. Ancak inorganik FDM'ler metallerin aşınmasına neden olarak sistemin servis ömrünün kısılmasına ve maliyetin artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte inorganik FDM'ler (tuzlar ve tuz hidratlar), enerji depolama kapasitesini tersine çevrilebilir şekilde etkileyecek olan faz ayrımı ve aşırı soğumadan zarar görebilmektedirler. Bahsedilen bu dezavantajlar metaller ve metalik alaşımlar için geçerli değildir ve bu da yüksek sıcaklardaki uygulamalarda kullanılmalarının önünü açmaktadır (Yaxue Lin, Alva, vd., 2018; Mohamed vd., 2017).

5.1.2. Ötektik FDM'ler

Ötektik FDM çözeltileri, belirli bir oranda karıştırıldığında donma/erime noktası suyun sıcaklığının altında veya üstünde olan iki veya daha fazla kimyasalın karışımlarıdır. Ötektik FDM'ler termal enerji depolama sistemleri (TES) için -114 ile 164 °C arasındaki sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlamaktadır (Tebaldi vd., 2016). Ötektikler organiklerin ve/veya inorganiklerin alaşımları olarak bulunurlar ve çoğunlukla (inorganik tuz-hidratlar) faz ayrımı olmaksızın uyumlu erime/donma özelliğine sahiptirler (Faraj vd., 2020; Mohamed vd., 2017). Bu bileşiklerle ilgili birincil sorun maliyettir. Organik veya inorganik FDM'lere göre iki veya üç kat daha maliyetlidirler. Termal enerji depolama sistemleri için tercih edilen herhangi bir erime noktası için sayısız ötektik üretilmektedir. Bununla birlikte, bu malzemelerin kullanımı termal depolama uygulamalarında çok yeni olduğundan, ötektiklerin termofiziksel özellikleri hakkında sınırlı veriler mevcuttur (M. Rathod, 2018).

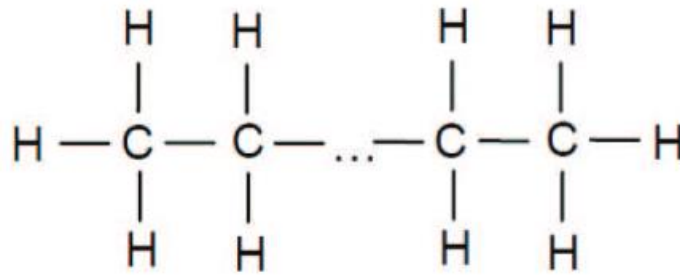
5.1.3. Organik FDM'ler

Organik FDM'ler geniş bir aralığı kapsamalarına rağmen, gizli ısı depolama sürecinde en çok bilinenleri saf n-alkanlar, yağ asitleri ve esterlerdir. Organik FDM'ler, daha yüksek gizli ısı yoğunlukları, uygun faz geçiş sıcaklıkları ve kararlı fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle yoğun şekilde kullanılmaktadır. Saf organik FDM'ler, düşük termal iletkenlik (organik FDM'ler için genellikle 0,2 W/m·K'den azdır), yüksek

hacim değişimi ve faz geçişi sırasında sıvı sızıntısı dahil olmak üzere pratikte uygulama kısıtlamalarına sahiptirler (Akeiber vd., 2016; Mehrali vd., 2014). Organik FDM'ler çok çeşitli erime sıcaklıklarını yani 0 °C ve yaklaşık 200 °C arasındaki sıcaklıkları kapsamaktadır. Organik FDM'lerin büyük kısmı kovalent bağları nedeniyle daha yüksek sıcaklıklarda kararlı değildirler. Ayrıca çoğu durumda organik FDM'lerin yoğunluğu inorganik FDM'lerden daha azdır yani 103 kg/m³'ten azdır. Bu nedenle organik FDM'lerin genellikle hacmi başına erime gizli ısıları inorganik FDM'lerden daha düşüktür (M. Rathod, 2018). Organik FDM'ler parafin ve parafin olmayanlar olmak üzere iki kategoride değerlendirilmektedirler.

5.2. Parafin Bazlı FDM'ler

Parafinler, genellikle CH₃ – (CH₂)_n – CH₃ genel formülüne sahip düz zincirli n-alkanların bir karışımıdır. şekil 5.3'te parafinlerin kimyasal yapısı gösterilmektedir. Bunun yanında, bazı durumlarda parafin alkanların bir başka adı olarak da kullanılmaktadır. Parafin için zincir uzunluğunun artması, erime gizli ısısı ve erime noktasında bir artış oluşmasını sağlamaktadır. Bir parafinin erime noktası -12 °C ila 71 °C arasındadır ve 128 kJ/kg ila 198 kJ/kg arasında ısı depolayabilmektedir. Parafin malzemesi aşındırıcı olmayan, güvenli, emniyetli, ucuz ve yüksek gizli ısıya sahip olduğundan en popüler FDM'lerden birisidir (Akeiber vd., 2016).



şekil 5.3. Parafinlerin kimyasal yapısı (M. Rathod, 2018)

Bazı parafinlerin erime sıcaklıkları ve gizli ısıları Tablo 5.2'de gösterilmektedir (Payada, 2019). Parafinler karbon atomlarının sayılarına ve fiziksel durumlarına göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmaya göre oda sıcaklığında, 1-4 karbon sayıları

gaz fazındaki saf alkanlara karşılık gelmekte, 5-17 karbon sıvı parafinlerdir ve 17'den fazla karbonlular katı mumlar olarak bilinmektedir. Bu mumsu katı parafinler, lineer, izo, yüksek dallı ve sikloalkanlar gibi doymuş hidrokarbonların bir karışımını ifade etmektedir (Vakhshouri, 2020).

Tablo 5.2. *C atom sayısı 12 ila 28 arasında olan parafin mumlarının termal özellikleri (Vakhshouri, 2020)*

Parafin Mum	Molekül Formülü	Erime Sıcaklığı (°C)	Kristalizasyon Sıcaklığı (°C)	ΔH_{fus} (kJ/kg)
n-Dodekan	$CH_3(CH_2)_{10}CH_3$	-10	-16	216
n-Tridekan	$CH_3(CH_2)_{11}CH_3$	-5	-9	160
n-Tetradekan	$CH_3(CH_2)_{12}CH_3$	5-6	0	227
n-Pentadekan	$CH_3(CH_2)_{13}CH_3$	10	5	205
n-Hekzadekan	$CH_3(CH_2)_{14}CH_3$	18-19	17	237
n-Heptadekan	$CH_3(CH_2)_{15}CH_3$	22	22	171
n-Oktadekan	$CH_3(CH_2)_{16}CH_3$	28	25	542
n-Nonadekan	$CH_3(CH_2)_{17}CH_3$	32-33	27	222
n-Eikozan	$CH_3(CH_2)_{18}CH_3$	36-37	31	247
n-Heneikozan	$CH_3(CH_2)_{19}CH_3$	39-41	32	201
n-Dokosan	$CH_3(CH_2)_{20}CH_3$	42-45	43	157
n-Trikosan	$CH_3(CH_2)_{21}CH_3$	48,9	51	142
n-Tetrakozan	$CH_3(CH_2)_{22}CH_3$	50-51	48-49	160
n-Pentakozan	$CH_3(CH_2)_{23}CH_3$	54	47	164
n-Hekzakozan	$CH_3(CH_2)_{24}CH_3$	56	53-54	255
n-Heptakozan	$CH_3(CH_2)_{25}CH_3$	59	53	159
n-Oktakozan	$CH_3(CH_2)_{26}CH_3$	61	54	202

5.3. FDM Türlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Termal enerji depolama uygulamaları için önemli bir yere sahip olan FDM'lerin seçim sürecinde avantaj ve dezavantajlarının bilinmesi oldukça önemlidir. Tablo 5.3'te

organik, inorganik ve ötektik FDM'lerinin avantaj ve dezavantajları gösterilmektedir (Nazir vd., 2019).

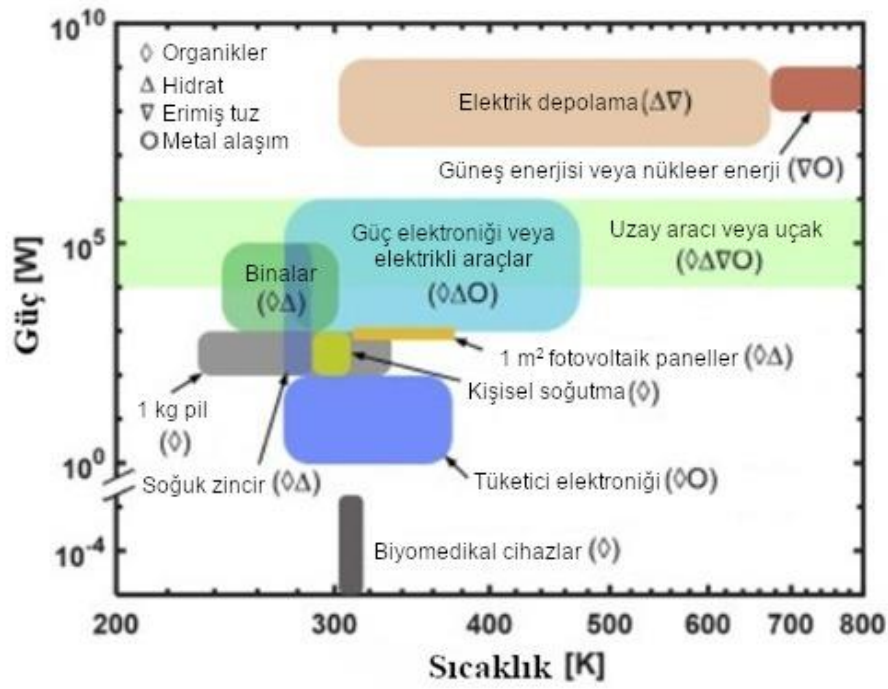
Tablo 5.3. FDM türlerinin avantaj ve dezavantajları (Nazir vd., 2019)

Tür	Avantaj	Dezavantaj
Organik FDM	Aşırı soğutma veya süper soğutma olmadan dondurma	Katı hallerinde düşük ısı iletkenliği
	Doğrudan kullanılabilme yeteneği	Bazıları suda kolayca çözünmez
	Faz değişim sürecinde düşük buhar basıncı	Kolayca yanabilen
	İyi termal performans	Düşük faz değişim entalpisi
	Uyumlu bir şekilde erime yeteneği	Düşük yoğunluk
	Kendiliğinden çekirdeklenme özellikleri	Geniş yüzey alanı gerektirir.
	Konvansiyonel yapı malzemeleri ile uyumluluk	Donma döngüsü sırasında yüksek ısı transfer oranları gereklidir.
	Geniş sıcaklık aralığında kullanılabilirlik	Hacimsel gizli ısı depolama kapasitesi düşüktür.
	Ayrışma yok	Yanıcı. Bu, uygun bir kap ile kolayca hafifletilebilir.
	Kimyasal olarak kararlı	Daha pahalı
İnorganik FDM	Yüksek erime ısısı	Yüksek hacimsel genişleme
	Güvenli ve reaktif olmayan	Düşük ısı kapasitesi
	Geri dönüştürülebilir	
	Yüksek ısı iletkenliği	Süper soğutma yüksek
	Büyük ısı depolama kapasitesi	Termal kararlılık eksikliği
	Daha düşük hacimsel genişleme	Faz ayrımı
	Birim hacim başına yüksek füzyon ısısı	Termal döngü sırasında uyumsuz erime ve dehidrasyon
	Daha az maliyetli	Bazılarının ağırlığı yüksek
	Alev almaz	Korozif
	Keskin faz değişimi	Bozulmaya eğilimli
	Daha büyük faz değişim entalpisi	Kimyasal kararsızlık

Ötektik FDM	Geri dönüştürülebilir	Bazı yapı malzemeleriyle uyumluluk sorunları
		Kapsayıcı ve destek gerektirir
	Keskin erime sıcaklığı	Termo-fiziksel özelliklere ilişkin mevcut test verilerinin olmaması
	Yüksek hacimsel termal depolama yoğunluğu	Düşük toplam gizli ısı kapasitesi
	Faz ayrımı ve uyumlu faz değişimi yok	Bazı ötektikler aşırı soğutma etkisinden muzdariptir
		Güçlü Koku
		Pahalı

5.4. FDM'lerin Uygulama Alanları

Faz değişim malzemelerinin kullanımına dayanan termal enerji depolama uygulamaları küçük-çaplı elektronik aletler (~ 1 mm), ortalama-çaplı bina enerjisi termal depolamasına (~ 1 m), büyük ölçekli yoğun güneş enerjisi üretimi (~ 100 m) olarak geniş bir aralığa sahiptir. Şekil 5.4'te termal enerji depolama süreçlerinde kullanılan FDM türleri ile bunların termal enerji depolama için güç ve sıcaklık aralıkları gösterilmektedir (T. Yang vd., 2021). FDM'ler genel olarak bina enerji depolama sistemlerinde, atık ısı geri kazanım sistemlerinde, ısı-düzenleyici fiberler, akıllı tekstil malzemelerinde, bataryaların termal yönetimi, mikroelektroniklerin sıcaklık yönetiminde, fotovoltaiik termal uygulamalar, uzay ve dünya termal enerji depolama uygulamalarında ve seraların sıcaklık yönetiminde kullanılmaktadır (Nazir vd., 2019).



Şekil 5.4. FDM'lerin termal enerji depolama için güç ve sıcaklık aralıkları (T. Yang vd., 2021)

6. MATERYAL VE METOT

6.1. Malzemeler

Çalışmada malzeme üretim sürecinde kullanılan arıtma çamuru T.C. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi ESKİ Genel Müdürlüğü'ne bağlı Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisinden temin edilmiştir. Şekil 6.1'de çalışma kapsamında kullanılan arıtma çamuru gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Kurutma öncesi arıtma çamuru örneği

Arıtma çamuru, atıksu arıtma sürecindeki birincil arıtma (fiziksel veya kimyasal), ikincil arıtma (biyolojik) ve çamur arıtma ünitelerindeki çamur susuzlaştırma işlemi sonucunda elde edilen bir yan üründür. Arıtma çamurlarının içeriği azot ve fosfor bileşikleri, organik karbon bileşikleri, inorganik tuzlar, patojenler ve sudan oluşmaktadır. Ayrıca arıtma çamuru toksik olmayan organik bileşikler, nükleik asitler, proteinler, polisakaritler, hümitik maddeler, lipitler, bozunma ürünleri ve sindirilmemiş organik maddeler dahil olmak üzere bakteriyel bileşenlerden de oluşmaktadır (Yi-di Chen vd., 2020).

Çalışmada kullanılan diğer malzemelerden Stiren Akrilik Kopolimer (SAK) ve Vinil Akrilik Kopolimer (VAK); ASAL Boya Kimya Sanayi Tic. Ltd. Şti., Karboksil Metil Selüloz (KMS); Denkim Denizli Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Parafin mum (CAS No: 8002-74-2); SIGMA-ALDRICH'ten tedarik edilmiştir. Tablo 6.1'de SAK ve VAK kimyasallarının özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 6.1. SAK ve VAK'ın kimyasal özellikleri ([http-5](http://5))

Kimyasal Bileşimi	Toplam Katı Madde (%)	Özgül Ağırlık (g/cm ³ , 25 °C)	pH	Malzeme Tanımı
Stiren	49-50	1,04 ± 0,02	7,5 – 8,5	Kuruduğunda şeffaf, yumuşak ve esnek bir film oluşturmaktadır.
Akrilik Kopolimer				Yüksek su dayanımı, esnek film ile yapışma kuvvetine sahip bir malzemedir.
Vinil	49-50	1,07 ± 0,02	3,5 – 4,5	Kuruduğunda şeffaf, yumuşak ve esnek bir film oluşturmaktadır.
Akrilik Kopolimer				Yüksek su dayanımı, esnek film ile yapışma kuvvetine sahip bir malzemedir. Suyu birlikte alkali direnci yüksek bir film oluşturmaktadır.

Tablo 6.2'de ise tekstil, boya, kâğıt, seramik ve yapı kimyasalları gibi alanlarda kullanılabilen KMS'nin spesifikasyonları gösterilmektedir.

Tablo 6.2. KMS'nin spesifikasyonları (http-6)

Kimyasal Bileşimi	%2 Brookfield Viskozitesi (cps.)	Substitüsyon Derecesi Aralığı	Görünüm
Karboksil Metil Selüloz	40 – 600	Orta, Yüksek	Granül ve Toz

Çalışmada inorganik bileşiklerin etkisinin değerlendirilmesi için zirkonyum (IV) oksit klorür oktahidrat ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$, Merck, CAS numarası: 13520-92-8), alüminyum oksit (Al_2O_3 , Merck 101095, CAS numarası: 1344-28-1), kalay (IV) oksit (Sn_2O , Sigma-Aldrich, 204714, CAS numarası: 18282-10-5), gümüş nitrat ($AgNO_3$, Merck 101512, CAS numarası: 7761-88-8) ve kobalt (II) nitrat hekzahidrat ($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, Merck, CAS numarası: 10026-22-9) kullanılmıştır.

6.2. Çalışmada Kullanılan Cihaz, Araç ve Gereçler

Çalışmada malzeme üretimi esnasında arıtma çamurunun kurutulması sürecinde etüv (Nüve Dry Air Sterilizer FN 055) kullanılmıştır. Hammaddelerin malzeme üretme sürecine hazırlanmasında arıtma çamurunun öğütülmesi için Sinbo SCM-2934 kahve öğütücü kullanılmıştır. Malzeme hazırlanması sürecinde arıtma çamuru kimyasalların tartımları esnasında hassas terazi (OHAUS Adventurer-Pro) kullanılmıştır. Ek olarak deneysel süreçte malzemelerin hazırlanması sürecinde ultra saf su (Millipore Milli-Q® Direct 8 Water Purification System) kullanılmıştır. Malzemelerin kalsinasyon sürecinde Eskişehir Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği, Temel İşlemler ve Süreçler laboratuvarında yer alan kül fırını (PROTHERM PLF 130/45) kullanılmıştır. Üretilen malzemelerin porozite testinin gerçekleştirilmesi sürecinde ısıtıcılı manyetik karıştırıcı (Heidolph MR 3001 K) kullanılmıştır. Şekil 6.2'de deneysel süreç içerisinde kullanılan cihazların bazılarına ait fotoğraflar gösterilmektedir.



(a) Etüv



(b) Hassas terazi



(c) Isıticılı manyetik karıştırıcı



(d) Kül fırını

Şekil 6.2. Deney sürecinde kullan cihaz örnekleri

6.3. Metot

6.3.1. Arıtma çamurunun hazırlanması

Arıtma çamuru, yapısında bulunan uçucu maddeleri kaybetmemek için etüvde (Nüve Dry Air Sterilizer FN 055) 50 °C sıcaklıkta 24 saat süre boyunca kurutulmuş (Balbay, 2017) ve daha sonra Sinbo SCM-2934 kahve öğütücü kullanılarak öğütülmüştür. Şekil 6.5'te arıtma çamurunun kurutulması ve öğütülmesini ifade eden diyagram gösterilmektedir.



Şekil 6.3. Atık hammaddelerin hazırlanması süreci

6.3.2. Kürlendirme işlemi

Belirlenen oranlarda arıtma çamuru, Stiren Akrilik Kopolimer (SAK), Vinil Akrilik Kopolimer (VAK) ve Karboksil Metil Selüloz (KMS) karıştırılarak normal koşullarda kürlendirilmiştir. Daha sonra 600 °C’de ve 120 dk’lık sürede kalsine edilmiştir. Şekil 6.4’de arıtma çamurunun kürlendirme süreci gösterilmektedir. Üretilen poroz malzemelere ASTM B 962-15’e göre porozite testleri yapılmış ve en yüksek poroz sonucuna sahip oran belirlenmiştir.



Şekil 6.4. Arıtma çamurunun kürlenme süreci

Kalsinasyon işlemi

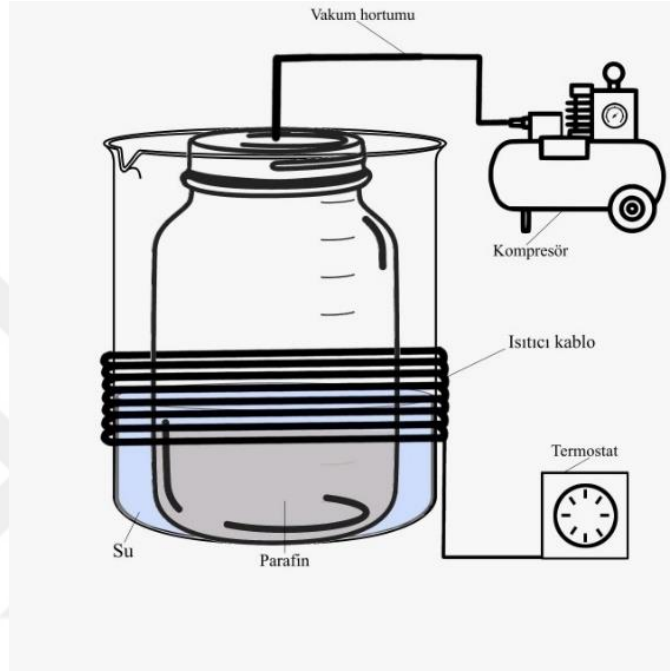
Belirlenen atık/SAK/VAK/KMS oranında hazırlanan karışımın kürlendirme işlemi tamamlandıktan sonra farklı sıcaklıklarda (400 – 600 – 800 °C) ve farklı sürelerde (30 – 60 – 120 – 180 – 240 dk) kalsine edilmiştir. Üretilen poroz malzemelere ASTM B 962-15'e göre porozite testleri yapılmış ve en yüksek porozite sonucuna sahip sıcaklık ve süre belirlenmiştir. Şekil 6.5'de malzemelerin kalsinasyon sürecine hazırlığı ve kalsinasyon süreci sonrası gösterilmektedir.



Şekil 6.5. Kalsinasyon süreci ve hazırlığı

6.3.3. Faz değişim malzemesinin (FDM) hazırlanması

Sıcak su banyosunda (80 °C) parafin eritilmiş ve Şekil 6.6’da gösterilmiş olan vakum ortamında poroz malzemelere parafin emdirilerek FDM üretimi gerçekleştirilmiştir (Shi vd., 2021).



Şekil 6.6. Kaplama sürecinde kullanılan deney düzeneğinin çizimi

6.3.4. İnorganik kimyasalların etkisinin belirlenmesi

İnorganik kimyasalların termal iletkenlik ve termal malzeme stabilizasyonu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için optimum arıtma çamuru, SAK, VAK ve KMS miktarı belirlenmiş malzemelere farklı oranlarda (0,1 gr; 0,3 gr; 0,5 gr; 0,7 gr ve 1 gr) zirkonyum (IV) oksit klorür oktahidrat ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$), alüminyum oksit (Al_2O_3), kalay (IV) oksit (SnO_2), gümüş nitrat ($AgNO_3$) ve kobalt (II) nitrat heksahidrat ($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) kimyasallarından eklenerek karıştırılmış ve normal koşullarda kürlendirilmiştir. Daha sonra 600 °C ve 120 dk sürede kalsine edilmiştir. Üretilen poroz malzemelere ASTM B 962-15’e göre porozite testleri yapılmış ve en yüksek porozite sonucuna sahip oran belirlenmiştir. Belirlenen atık çamur/SAK/VAK/KMS ve inorganik kimyasal oranında hazırlanan karışımın kürlendirme işlemi tamamlandıktan sonra farklı sıcaklıklarda (400-600-800 °C) ve farklı sürelerde (30-60-120-180-240 dk) kalsine

edilmiştir. Üretilen poroz malzemelere ASTM B 962-15'e göre poroz testleri yapılmış ve en yüksek poroz sonucuna sahip sıcaklık ve süre belirlenmiştir. Sonrasında üretilen malzemeler içerisinde belirlenen optimum malzemelere Şekil 6.6'da gösterilmiş olan vakum ortamı kullanılarak FDM üretilmiştir.

6.4. Karakterizasyon

6.4.1. Kısa analiz

Çalışmada malzeme üretimi sürecinde hammadde olarak kullanılan arıtma çamurunun nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon miktarının belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir. Arıtma çamuru hammaddesi 50 °C'de 24 saat kurutulup öğütüldükten sonra kısa analiz kapsamında kül, nem ve uçucu madde içerikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Sabit karbon içeriği ise belirlenmiş olan kül, nem ve uçucu madde değerlerinin toplanarak 100'den çıkartılması sonucunda elde edilmiştir. Aşağıda uygulanan nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon analizlerinin açıklamaları yer almaktadır.

6.4.1.1. Nem tayini

Numunenin nem tayini ASTM D3173'e göre yapılmıştır. Havada kuru olarak tartılmış $1 \pm 0,1$ g numune sabit tartıma getirilmiş bir kroze içerisinde konulmuştur ve 104-110 °C'ye kadar ısıtılmış etüvde hava atmosferinde 1 saat bekletilmiştir. Bu ısıtma işlemi 30'ar dakika aralıklarla tartım sabitlenene kadar devam ettirilmiştir. Numunedeki nem oranı aşağıdaki Denklem 6.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Nem} = (A - B) \times 100/A \quad (6.1)$$

A: Nem tayininde kullanılan numune ağırlığı (g), B: Nemi uzaklaştırılan numune ağırlığı (g)

6.4.1.2. Kül tayini

Numunenin nem tayini ASTM D3174 - 12'ye göre yapılmıştır. Havada kuru olarak tartılmış $1 \pm 0,1$ g numune sabit tartıma getirilmiş olan kroze içine ince bir tabaka olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kül fırınında 1 saat ısıtma işlemi sonunda 500 °C sıcaklığa ve 2

saat ısıtma işlemi sonunda 750 °C sıcaklığa ve 3 saat ısıtma işlemi sonunda 950 °C sıcaklığa ısıtılmıştır. Örnek, bu sıcaklıkta sabit tartıma gelinceye kadar bekledikten sonra, çıkarılıp bir desikatörde soğutulmuş ve tartılmıştır. Örnekteki külün yüzde olarak miktarı aşağıdaki Denklem 6.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Kül} = (G2) \times 100 / G1 \quad (6.2)$$

G1 : alınan örneğin ağırlığı (g), G2 : külün ağırlığı (g)

6.4.1.3. Uçucu madde tayini

Numunenin nem tayini ASTM D3175 - 11'e göre yapılmıştır. Havada kuru olarak tartılmış 1 g numune sabit tartıma getirilmiş kroze içinde önceden ısıtılmış 950±20 °C sıcaklıktaki kül fırınına konulmuştur. Numune kroze içinde 950 °C'de 7 dakika tutulmuştur. Numunedeki uçucu madde yüzdesi, aşağıdaki Denklem 6.3'e göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Uçucu Madde} = \{(M1-M2) \times 100 / M1\} - \% \text{ Nem} \quad (6.3)$$

M1 : Alınan numune ağırlığı, M2 : Isıl işlem sonrası numune ağırlığı (g)

6.4.1.4. Sabit karbon tayini

Numunelerin kuru temelde sabit karbon içerikleri; uçucu madde, nem ve kül yüzdeleri toplamını 100'den çıkarmak suretiyle hesaplanmıştır. Numunedeki sabit karbon yüzdesi Denklem 6.4'e göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Sabit karbon} = 100 - (\% \text{ Kül} + \% \text{ Uçucu Madde} + \% \text{ Nem}) \quad (6.4)$$

6.4.2. Elementel analiz

Elementel analiz, bilinmeyen bir maddenin elementel bileşimi hakkında bilgi edinmek için kullanılan klasik bir yöntemdir. Yöntemde belirli bir miktarda bilinmeyen madde yalnızca nicelleştirilecek elementi içeren basit ve bilinen bileşiklere dönüştürülmektedir (Sellergren ve Hall, 2001). Elementel analiz karbon, hidrojen, oksijen, nitrojen, fosfor, kükürt, halojen ve C/H, O/C ve C/N element oranlarını içermektedir (Filella vd., 2005). Elementel analiz kısa analizler sonucunda elde edilen

kül, uçucu madde, nem ve sabit karbon değerlerinin desteklenmesi amacı ile gerçekleştirilmektedir. Elementel analiz öncesinde arıtma çamuru numunesinin 50 °C’de 24 saat kurulmuş ve öğütülmüştür. Arıtma çamuru hammaddesinin elementel analizi Şekil 6.7’deki Harran Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (HÜBTAM) bünyesinde yer alan Thermo Scientific Flash Smart Elementel Analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oksijen içeriği ise belirlenmiş olan C, H, N ve S miktarının 100’den çıkartılması sonucunda elde edilmiştir (C. Peng vd., 2017).



Şekil 6.7. Thermo Scientific Flash Smart elementel analiz cihazı

6.4.3. Porozite testi

Numunelerin porozite testleri ASTM B 962-15’e göre yapılmıştır. Numuneler ilk olarak yapısında bulunan gazı gidermek için 40 dakika saf suda kaynatılmış ve daha sonra soğutulmuştur. İkinci olarak bu numunelerin gözeneklerini doldurmak için suya daldırılmış ve ağırlıkları belirlenmiştir (A1). Üçüncü olarak numunelerin suyu temizlenerek tartılmıştır (A2). Son olarak numuneler 1 saat 105 °C’lik etüvde kurutulmuş ve tartılmıştır (A3). Bu işlemler sonrasında numunelerin porozite %’si Denklem 6.5’e göre hesaplanmıştır.

$$\text{Porozite (\%)} = \frac{A2-A3}{A2-A1} \times 100 \quad (6.5)$$

6.4.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi analizi

Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), kızılötesi radyasyon demetini kullanarak malzemelerdeki (gaz, sıvı ve katı) fonksiyonel grupları tanımlamak için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Kızılötesi spektroskopisi, moleküldeki her bir bağ tarafından yapılan kızılötesi (IR) radyasyonunun absorpsiyonunu ölçer ve sonuç olarak genellikle dalga sayısına (cm^{-1}) karşılık geçirgenlik (Transmitans, %) olarak adlandırılan spektrumu vermektedir (Khan vd., 2018). FTIR analizinde yaklaşık olarak 10.000 – 100 cm^{-1} 'lik bir kızılötesi radyasyon gönderilir ve bu radyasyonun bir kısmı malzeme tarafından emilmekte ve bir kısmı ise malzeme içerisinden geçmektedir. Absorplanan radyasyon numune tarafından titreşim ya da dönme enerjisine dönüştürülmektedir. Dedektörlerden elde edilen sonuçtaki sinyal, numunelerin moleküler parmak izini temsil eden, genellikle 4000 ila 400 cm^{-1} arasındaki bir spektrumdur. Elde edilen bu parmak izi spektrumları bilinmeyen malzemeleri tanımlama ve karakterize etme, bir malzemedeki kirleticileri tespit etme, katkı maddelerini bulma ile bozulma ve oksidasyonu belirlenmesini sağlamaktadır (Titus vd., 2019). Tez kapsamında üretilen FDM kaplamalı ve kaplamasız malzemelerin karakterizasyonu Eskişehir Teknik Üniversitesi Çevre Sorunları Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde yer alan Şekil 6.8'de gösterilen SHIMADZU IRTracer – 100 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler arıtma çamuru, arıtma çamuru poroz malzemeleri ve parafin kaplı poroz malzemelerdeki fonksiyonel grupların belirlenmesi amacı ile 4000 – 400 cm^{-1} dalga boyu aralığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.8. SHIMADZU IRTracer – 100 Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi cihazı

6.4.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

SEM analizi veya tekniği olarak bilinen taramalı elektron mikroskobu, dünya çapında birçok disiplinde kullanılmaktadır. Organik ve inorganik malzemelerin nanometreden (nm) mikrometreye (μm) kadar olan ölçek analizinde etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Mohammed ve Abdullah, 2018). SEM’de optik mikroskopta olduğu gibi bir ışık demeti yerine bir elektron demeti numuneye doğru yönlendirmekte ve numunenin yüzeyini elektron ışınlarıyla taramaktadır. Bu nedenle SEM büyütülmüş bir görüntü oluşturmak için ışık dalgalarının kullanıldığı geleneksel ışık mikroskoplarından farklılık göstermektedir (Titus vd., 2019). SEM, boyut ve şekil, topografya ve yüzey bileşimi gibi morfolojik özelliklerin analizi için oldukça önemli bir tekniktir. Ayrıca basit numune hazırlanması ve kolay kullanımı nedeniyle en yaygın kullanılan mikroskobik tekniktir. SEM’de iyi görüntüleme uygulamaları için yeterli sinyal bulunmadığından iletken olmayan biyomolekülleri karakterize etmek için ultra ince bir altın kaplama yapılması gerekmektedir (Rani vd., 2022). Çalışmada SEM analizi, Şekil 6.9’da gösterilen 1 kV çözünürlük değeri 2.3 nm ve 15 kv çözünürlük değeri 1.5 nm olan x1.000.000 büyütme yapabilen ve EDX dedektörü olan Zeiss Sigma 300 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Zeiss Sigma 300 Taramalı elektron Mikroskobu (SEM) cihazı

6.4.6. X – ışını difraksiyonu (XRD) analizi

X – ışını difraksiyonu (XRD), bir malzemenin altında yatan kristal yapısını belirlemek için kullanılan bir tekniktir; bir numunenin kristalliğini ve yapısını doğrulamayı sağlamaktadır. XRD, malzemelerin kimyasal yapısı hakkında hiçbir bilgi vermemektedir (Fleck vd., 2021). Ek olarak, XRD kristaldeki fazlar, yönelimler, kusurlar ve gerilimlerle ilgili bilgiler sağlayabilmektedir. XRD analizi Braggs denklemi olarak ifade edilen $n\lambda = 2d\sin(\theta)$ üzerinde çalışır, bu denklemde λ dalga boyunu, θ gelen ışınlar ve kristalin yüzeyi arasındaki açıyı, d atomların katmanları arasındaki boşluğu ve n yapıcı girişimi gösteren bir tamsayıyı (1, 2, 3 ve 4) ifade etmektedir. XRD'nin iki temel türü olarak (1) x-ışınlarının dalga boyunun kırılma açısı sabit tutularak değiştirildiği Laue yöntemi ve (2) kırınım açısının x-ışının dalga boyunu sabit tutarak değiştirildiği toz kırınım yöntemi bulunmaktadır (Rani vd., 2022). Malzemelerin kristal yapılarının incelenmesi sürecinde Şekil 6.10'da gösterilen 4 kW (max 60 kV, max 100 mA) enerji aralığında çalışan PANalytical Empyrean XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.10. PANalytical Empyrean X-ışını Difraksiyonu (XRD) cihazı

6.4.7. Raman spektroskopisi analizi

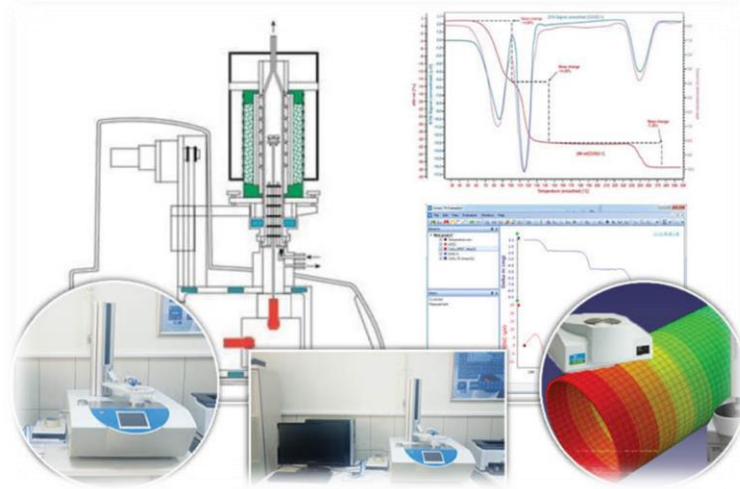
Raman spektroskopisi (RS) ve yakın zamanda, Raman görüntüleme (RG) katı ve sıvı numunelerin benzersiz “kimyasal parmak izlerini” araştırmak için son derece güçlü tekniklerdir. RS, esas olarak bir numunedeki titreşim, dönme ve diğer düşük frekans modlarını araştırmak için kullanılan bir titreşim spektroskopi yöntemidir (Adya ve Canetta, 2014). Genel olarak elde edilen spektrumlar, bir malzemenin bilinen spektrumları ile karşılaştırılmaktadır. Küçük nokta boyutu nedeniyle bu teknik, bir numunedeki yerel faz değişikliklerine/safsızlıklara karşı çoğu genel XRD sistemine göre daha hassastır ve daha sığ penetrasyon derinliği (1 μm düzeyinde) nedeniyle ince film analizi için uygundur. Numuneler oda sıcaklığında ve atmosfer basıncında ölçülebilmektedir. Bu, katıların, sıvıların ve hatta gazların analizine izin vermekte ve Raman spektroskopisini çok yönlü bir teknik haline getirmektedir (Fleck vd., 2021). Şekil 6.11’de 350-1050 nm aralığında çalışabilen 400 nm (yatay XY tabla düzleminde) mekânsal çözünürlüğe sahip WITec alpha300R Series Raman Spektroskopisi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.11. WITec alpha300R Series Raman Spektroskopisi cihazı

6.4.8. Termogravimetrik (TGA) analiz

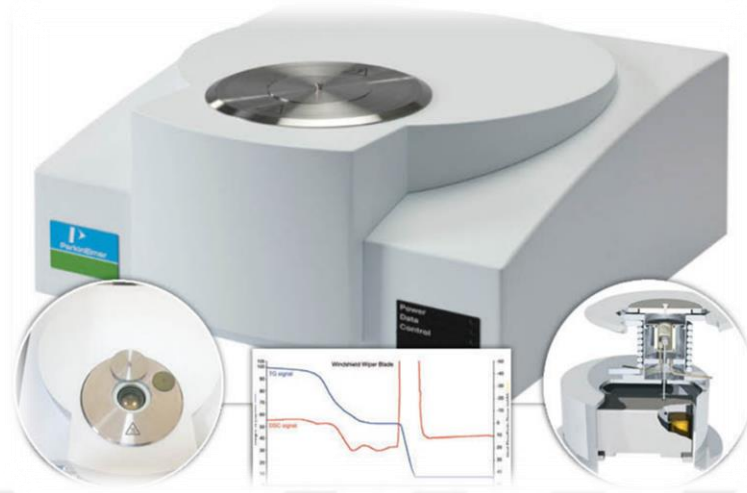
Termogravimetri, zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bir maddenin ağırlığındaki değişimi araştıran termal analiz dalı ile ilgilidir. Analiz sürecinde numune kontrollü bir şekilde ısıtma veya soğutma ortamına tabi tutularak ağırlık değişim profili kaydedilmektedir. Termogravimetrik analizin (TGA) ana prensibi, bir numunenin kütle değişiminin programlanmış koşullar altında çalışılabilmesidir. Bu nedenle, TGA esas olarak absorpsiyon, adsorpsiyon, desorpsiyon, buharlaşma, süblimasyon, bozunma, oksidasyon ve indirgeme gibi belirli termal olayları anlamak için kullanılmaktadır (Loganathan vd., 2017). TGA, fırın, mikro terazi sıcaklık kontrolörü ve bir veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Numune, önceden belirlenmiş programa göre fırında ısıtılırken veya soğutulurken mikro terazide ölçülmektedir. TGA düşük maliyetli bir tekniktir, küçük bir örneğe ihtiyaç duyar ve nicel veya nitel analize izin vermektedir. Ancak, TGA yıkıcı bir analizdir ve numunede uçucu bileşenlerin bulunması nedeniyle analiz doğru olmayabilmektedir (Tomoda vd., 2020). Malzemenin termal bozunma eğrisinin elde edilmesinde Şekil 6.12’de gösterilen 25 – 1750 °C sıcaklık aralığında, 0,5 ug çözünürlüklü Linseis/STA TG-DSC/DTA PT1600 cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.12. Linseis/STA TG-DSC/DTA PT1600 cihazı

6.4.9. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi

Kalorimetri, sıcaklık ve maddelerin belirli fiziksel özellikleri arasında bir bağlantı kurmak için malzemelerin termal özelliklerini ölçmek için birincil bir tekniktir ve ilgilenilen süreçle ilişkili entalpinin doğrudan belirlenmesi için tek yöntemdir. Kalorimetreler kimya, biyokimya, hücre biyolojisi, biyoteknoloji, farmakoloji ve son zamanlarda nanobilimde biyomoleküllerin ve nanoboyutlu malzemelerin termodinamik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), kalorimetri çeşitleri arasında en popüler olanıdır (Gill vd., 2010). Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), sıcaklığın bir fonksiyonu olarak numunelerin molar ısı kapasitesini ölçen analitik bir tekniktir. Diferansiyel taramalı kalorimetri, düzenlenmiş bir sıcaklık değişimi sırasında bir referansa göre bir numunede meydana gelen ısı enerjisi alımındaki farkı doğrudan ölçen deneysel bir yöntemdir. Diferansiyel taramalı kalorimetrede gerçekleştirilen yöntem, zaman içinde her iki hücrenin sıcaklığını aynı şekilde arttırırken aynı anda bir numune hücresine ve bir de referans hücreye ısı enerjisinin verilmesini sağlamaktadır. Süreçte numunenin ve referansın bileşimindeki farklılıklar nedeniyle, hücrelerin sıcaklığını yükseltmek için farklı miktarlarda enerji gerekmektedir. Böylece, hücreler arasındaki sıcaklık farkını karşılamak için gereken fazla enerji miktarı ölçülmekte ve numunenin spesifik termodinamik özellikleriyle doğrudan ilişkilendirilmektedir (Durowoju vd., 2017). Malzemenin DSC analizinde Şekil 6.13'te gösterilen -50 – 250 °C sıcaklık aralığında çalışan Perkin Elmer/DSC 4000 cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.13. Perkin Elmer/DSC 4000 cihazı

7. BULGULAR

7.1. Arıtma Çamuru Hammaddesinin Kısa Analiz ve Elementel Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Analiz sonuçları değerlendirildiğinde arıtma çamuru hammaddesinin nem içeriğinin literatür çalışmalarındaki arıtma sürecinden ve arıtma süreci sonundan alınan arıtma çamurlarına göre oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir (Ayol vd., 2018; Kabakcı ve Doğancan, 2019). Bu durum arıtma çamurunun yeterli düzeyde kurutulamadığını ve su tuttuğunu göstermektedir. Ek olarak arıtma çamuru hammaddesinin kül ve uçucu madde içeriğinin literatür çalışmalarındaki arıtma sürecinden ve arıtma süreci sonundan alınan arıtma çamurlarına göre düşük olduğu belirlenmiştir (Aydın, 2004; Ayol vd., 2018; Kabakcı ve Doğancan, 2019; Tolay vd., 2010). Uçucu madde, kül ve nem yüzdesi arıtma çamurlarının yakıt olarak kullanımı hakkında bilgi vermektedir (Boylu ve Karaağaçoğlu, 2018). Bu doğrultuda düşük uçucu madde ve kül içeriği ile yüksek nem içeriğine sahip olan arıtma çamuru hammaddesinin yakıt olarak kullanım potansiyelinin oldukça düşük olduğunu söylemek mümkündür. Elementel analiz sonuçları incelendiğinde arıtma çamurunun C, H ve N içeriğinin susuzlaştırılmış arıtma çamuru örnekleri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir (Deng vd., 2019; Erkekardes, 2014; Y. Li vd., 2020; Peker ve Dadaşer Çelik, 2019; C. Yang vd., 2021). Ancak literatür çalışmalarında arıtma çamurlarının oldukça düşük S içeriğine sahip olmasına rağmen çalışmada kullanılan

arıtma çamurunda S rastlanmamıştır (Yan Lin vd., 2017; Pulka vd., 2019; Bing Zhao vd., 2017). Parafin katkılı faz değişim malzemesinin (FDM) desteklenmesi için tez kapsamında üretilen malzemelerin hammaddesi olan arıtma çamurunun kısa ve elementel analiz sonuçları Tablo 7.1’de gösterilmektedir.

Tablo 7.1. Arıtma çamurunun kısa ve elementel analiz değerleri

Kısa analiz, %				Elementel analiz, %				
Kül	Nem	Uçucu madde	Sabit karbon**	C	H	N	S	O*
27,17	28,15	30,06	14,62	40,18	4,58	4,68	n.d.***	50,56

* Oksijen yüzdesi şu hesaplama ile belirlenmiştir: $O = 100 - (C + H + N + S)$

** Sabit karbon = $100 - (\text{kül} + \text{nem} + \text{uçucu madde})$

***Belirlenememiştir.

7.2. Arıtma Çamur Hammaddesinden Üretilen Malzemelerin Porozite Testlerinin Değerlendirilmesi

Poroz malzemelerde kullanılan arıtma çamuru ve kimyasalların optimum miktarlarının belirlenmesi için malzemelere porozite testi gerçekleştirilmiştir. Tablo 7.2’de çalışma kapsamında optimum miktarları belirlenmiş olan arıtma çamurundan elde edilmiş malzemelerin porozite yüzdeleri görülmektedir. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde arıtma çamuru poroz malzemesinin üretim sürecine dahil edilen inorganik bileşiklerin alüminyum oksitli arıtma çamuru poroz malzemesi hariç genel olarak malzemelerdeki porozite yüzdesini arttırdığını göstermektedir. Porozite, malzemelerin mikro yapılarının karakterizasyonu için önemli bir parametredir. Malzemenin toplam hacmi ile ilgili olarak sıvı içeren boşlukların hacmine de karşılık gelmektedir (Issaadi vd., 2018).

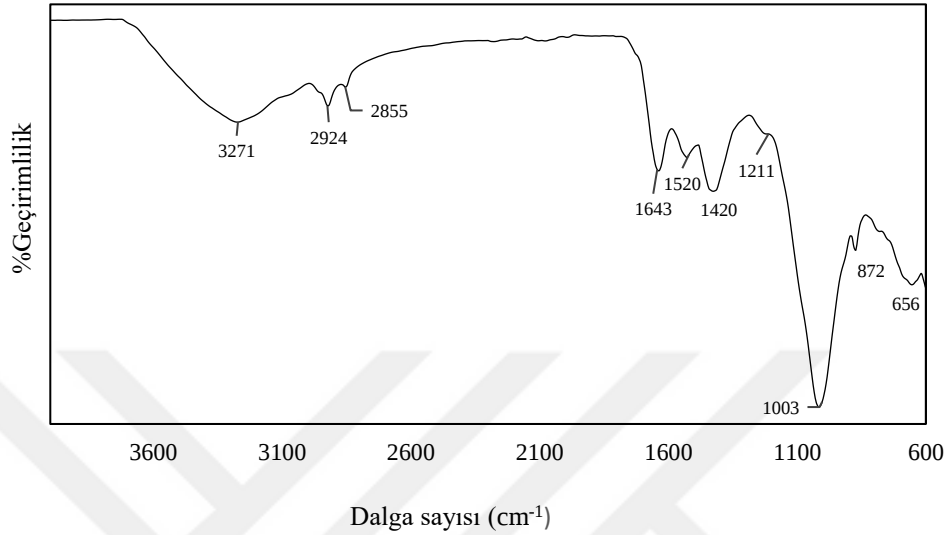
Tablo 7.2. Arıtma çamurundan elde edilen poroz malzemelerin porozite yüzdeleri

Malzemenin Kodu	Malzemenin Adı	Porozite Yüzdesi
AÇ	Arıtma çamuru poroz malzemesi	%94,00
ZrOCl ₂ ·8H ₂ O@AÇ	Zirkonyum (IV) oksit klorür içeren arıtma çamuru poroz malzemesi	%98,41
AgNO ₃ @AÇ	Gümüş nitrat içeren arıtma çamuru poroz malzemesi	%98,00
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O@AÇ	Kobalt (II) nitrat hekzahidrat içeren arıtma çamuru poroz malzemesi	%104,16
Al ₂ O ₃ @AÇ	Alüminyum oksit içeren arıtma çamuru poroz malzemesi	%90,67
SnO ₂ @AÇ	Kalay (IV) oksit içeren arıtma çamuru poroz malzemesi	%97,03

7.3. Arıtma Çamuru Hammaddesinin FT-IR Analizinin Değerlendirilmesi

FT-IR analizi öncelikli olarak malzeme üretim sürecinde kullanılan arıtma çamuru hammaddesinin kimyasal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak amacı ile gerçekleştirilmiştir. FT-IR analizi FDM üretiminde kullanılan parafin ve arıtma çamuru hammaddesinden elde edilen malzemeler arasındaki kimyasal uyumun belirlenmesinde kullanılmıştır. Ek olarak arıtma çamuru ile üretilen her bir poroz malzemenin parafin emdirilmiş ve emdirilmemiş formlarının FT-IR analizleri de gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1’de hammadde olarak kullanılan arıtma çamuru hammaddesinin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Arıtma çamurunun FT-IR spektrumu, alkoller, karboksilik asitler ve amid/aminler gibi bileşiklerin mevcudiyetini gösteren O-H ve N-H gerilme titreşimlerinin olduğu 3000 cm⁻¹ ile 3600 cm⁻¹ dalga sayısı arasında geniş ve orta bir bant göstermektedir. 2924 cm⁻¹ ve 2855 cm⁻¹ pikleri bir alifatik zincirin varlığını ifade eden C-H’nin asimetrik ve simetrik gerilme titreşimlerini ifade etmektedir (Réveillé vd., 2003). 1643 cm⁻¹ piki karbon çift bağ oksijen (C=O) arasındaki germe titreşimlerini içeren bir amid I bağının varlığını ve 1520 cm⁻¹’de tepe noktası içeren düşük bir bant (amidin NH₂ deformasyonu) olan amid II bant karakteristiğini göstermektedir (Abdel-Aziz vd., 2017; Yunan Chen vd., 2013; Grube vd., 2006). Spektrumun parmak izi bölgesinde yer alan 1420 cm⁻¹’de tepe noktası olan orta şiddetli bant aralığı arıtma çamurunda nitritin (N-O gerilmesi) varlığını göstermektedir (V. Kumar vd., 2020; P. Zhao vd., 2013). Parmak izi bölgesinde yer alan 1003 cm⁻¹’de tepe noktası içeren kuvvetli geniş bant Si-O ve Al-O bağlarını ifade etmektedir (Adar vd., 2020a). Bu arıtma çamuru hammaddesi için bulunan ana bantlar, daha önceden yapılmış olan çalışmadakilerden niteliksel olarak farklı değildir (Abdel-

Aziz vd., 2017; Abrego vd., 2009; Adar vd., 2020a; Grube vd., 2006; Réveillé vd., 2003) ancak literatürdeki spektrum yorumlamaları arasında farklılıklar bulunabilmektedir.

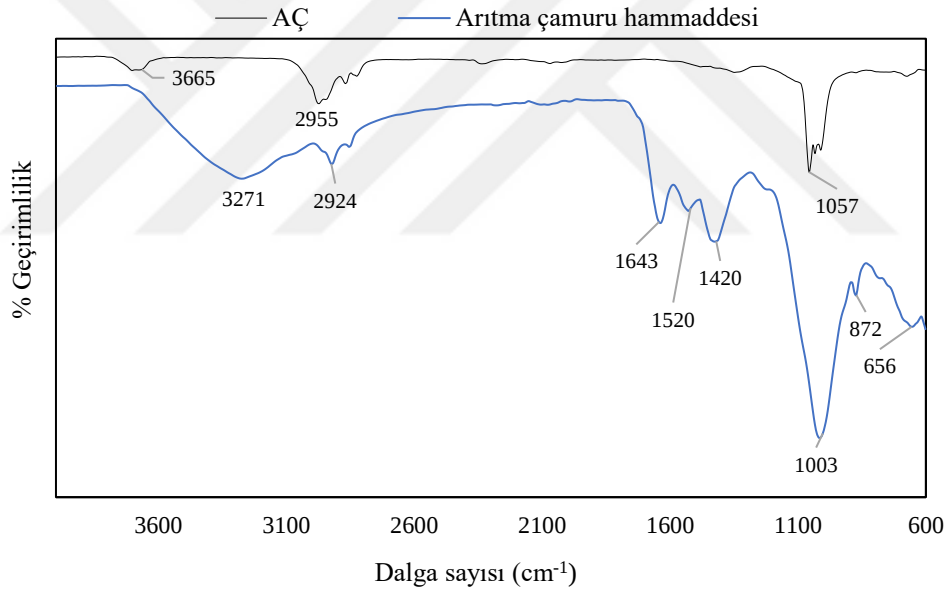


Şekil 7.1. Arıtma çamur hammaddesinin FTIR spektrumu

7.4. Arıtma Çamuru Hammaddesinden Elde Edilen Malzemelerin FT-IR Analizlerinin Değerlendirilmesi

Evsel atıksu arıtma tesislerinde yönetimsel ve çevresel problemlere neden olan arıtma çamurlarından termal enerji depolama sürecinde kullanılan FDM'lerden biri olan parafin için destek malzemesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen arıtma çamuru poroz malzemesinin kimyasal yapısının değerlendirilmesi amacı ile FT-IR analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.2'de arıtma çamuru hammaddesi ve arıtma çamuru poroz malzemesinin (AÇ) FTIR spektrumları gösterilmektedir. Arıtma çamuru hammaddesinden farklı olarak AÇ'de $3700 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ zayıf bant aralığı, $3000 \sim 2700 \text{ cm}^{-1}$ orta bant aralığı ve $1200 \sim 870 \text{ cm}^{-1}$ yüksek bant aralığı görülmektedir. Bu bant aralıklarını incelediğimizde $3650 \text{ ile } 3250 \text{ cm}^{-1}$ aralığındaki geniş bir bant hidrat (H_2O), hidroksil ($-\text{OH}$), amonyum veya amonyum hidrat varlığını göstermektedir. Ancak bu bant oldukça zayıf olduğundan ve literatürde pik verilen alan hakkında dar bir bilgi olduğundan net bir yorum yapılması oldukça zordur. 2955 cm^{-1} ve 2870 cm^{-1} 'de pik veren iki orta bant arıtma çamuru poroz malzemesinde C-H asimetric ($2970 - 2950 \text{ cm}^{-1}$) ve simetric ($2880 - 2860 \text{ cm}^{-1}$) germe titreşimleri lipidlerin varlığını göstermektedir (Abdel-

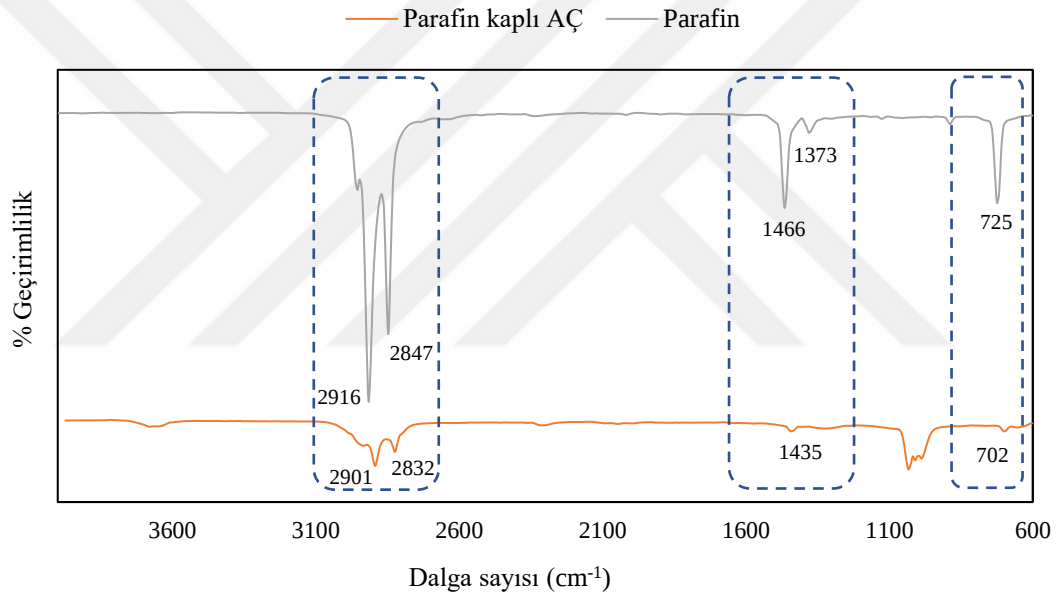
Aziz vd., 2017; Yunan Chen vd., 2013; Réveillé vd., 2003). 1643 cm^{-1} 'deki bant tepe noktası, karbon çift bağ oksijen (C=O) arasındaki germe titreşimlerini içeren bir amid I bağının varlığını ve 1520 cm^{-1} 'de tepe noktası içeren düşük bir bant (amidin NH₂ deformasyonu) olan amid II bant karakteristiğini göstermektedir (Abdel-Aziz vd., 2017; Yunan Chen vd., 2013; Grube vd., 2006). Bu bant varlığı arıtma çamuru hammaddesi ile aynı bölgelerde yer aldığından arıtma çamuru poroz malzemesinin bütünleştiğini gözler önüne sermektedir. Ayrıca spektrumun parmak izi bölgesi incelendiğinde arıtma poroz çamuru malzemesi için 1057 cm^{-1} 'de tepe noktası oluşturan güçlü geniş bir bant olduğu görülmektedir. 1200 ~ 870 cm^{-1} bölgesindeki geniş ve güçlü bant literatürle karşılaştırıldığında, C-O gerilmesine ve silikatın Si-O gerilmesine karşılık gelmektedir (Abrego vd., 2009; P. Zhao vd., 2013).



Şekil 7.2. Arıtma çamuru hammaddesi ve AÇ poroz malzemesinin FTIR spektrumu

Şekil 7.3'te parafin emdirilmiş poroz arıtma çamuru poroz malzemesine (AÇ-Parafin) ait FDM ve parafinin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. FT-IR spektrumlarını incelediğimizde parafinin 2916, 2847, 1466, 1373 ve 725 cm^{-1} 'de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. 2916 ve 2847 cm^{-1} 'deki iki karakteristik tepe noktası metilen gruplarının C-H gerilmesini gösterirken (Coates, 2000; Falahi vd., 2010; Mehrali vd., 2013), 725 cm^{-1} 'de tepe noktasına sahip bant metilen gruplarının salınımını göstermektedir (Coates, 2000; Mehrali vd., 2013; Shazim Ali Memon vd., 2013).

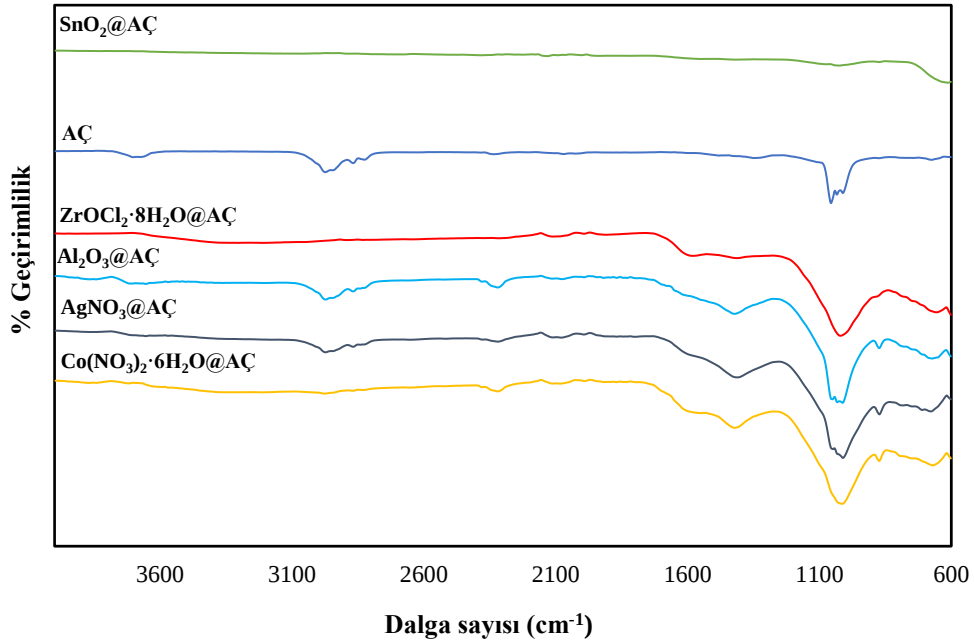
Bunların yanında çalışmada kullanılan parafin karakteristik tepe noktalarından olan 1466 cm^{-1} 'de metilen/metil gruplarının C-H bandını ve 1373 cm^{-1} 'deki zayıf karakteristik tepe noktası metil gruplarının C-H bandını göstermektedir (Coates, 2000; Shazim Ali Memon vd., 2013; Su vd., 2002). Parafin emdirilmiş arıtma çamuru poroz malzemesinin FT-IR spektrumlarını incelediğimizde parafinin ana tepe noktalarına benzer olarak 2901, 2832, 1435 ve 702 cm^{-1} 'de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışmada kullanılan parafin ve arıtma çamuru poroz malzemesinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığını ve fiziksel olarak bütünleştiğini göstermektedir (Liu vd., 2021; X. Lu vd., 2020; Mehrali vd., 2013; D. Wu vd., 2015).



Şekil 7.3. AÇ-Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu

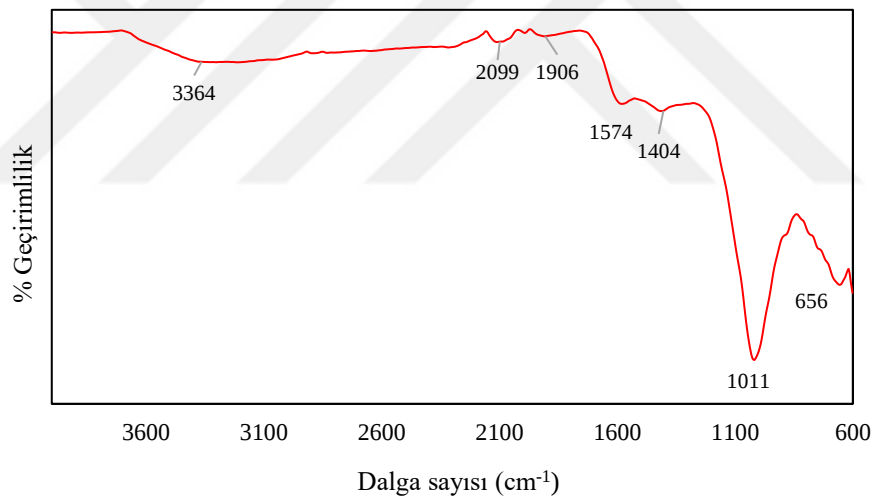
Termal enerji depolama malzemesinin gözenekliliğinin ve termal enerji depolama kapasitesinin artırılması amacıyla arıtma çamuruna inorganik bileşikler (zirkonyum (IV) oksit klorür oktahidrat ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), alüminyum oksit (Al_2O_3), kalay (IV) oksit (SnO_2), gümüş nitrat (AgNO_3) ve kobalt (II) nitrat hekzahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)) dahil edilerek etkileri değerlendirilmiştir. Şekil 7.4'te arıtma çamurundan elde edilen AÇ, $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$, $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$, $\text{SnO}_2@$, $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ ve $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ malzemelerinin FT-IR spektrumları gösterilmektedir. FT-IR spektrumları incelendiğinde AÇ, $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$ ve $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ malzemelerinin karboksilik O-H ($2500\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$) ve C-H gerilimi ($2950\text{--}2850\text{ cm}^{-1}/2880\text{--}2860\text{ cm}^{-1}$) fonksiyonel gruplarına ait dalga

boylarına ait bant aralıklarına sahip olduğu ancak diğer malzemelerde bu bant aralıklarında pik oluşturmadığı görülmektedir. $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$ ve $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ malzemelerinin alkil gruplarının $-\text{CH}_2$ ve $-\text{CH}_3$ gerilme titreşimlerinin $-\text{C}-\text{H}$ gerilme bantlarına sahip olduğu görülmektedir (L. C. Fernandes vd., 2019). $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$, $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ ve $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ malzemeleri $2150\text{-}1990\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu aralıklarındaki izosiyanta ($-\text{NCS}$) ait bant aralıklarına sahip olduğu ancak diğer malzemelerde bu bant aralıklarında pik oluşturmadığı görülmektedir (Nandiyanto vd., 2019). AÇ , $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$, $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$, $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ ve $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ malzemelerinin $1200 \sim 870\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki geniş ve güçlü bandı literatürle karşılaştırıldığında, $\text{C}-\text{O}$ gerilmesine ve silikatın $\text{Si}-\text{O}$ gerilmesine karşılık geldiği belirlenmiştir (Abrego vd., 2009; P. Zhao vd., 2013). Ayrıca bu pikler incelendiğinde AÇ 'deki bandın daha dar ve zayıf olduğu diğer malzemelerdeki bant aralığının ise oldukça geniş ve güçlü olduğu görülmektedir. Ayrıca $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$, $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$, $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ ve $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ malzemelerinin metal- $\text{O}-\text{H}$ $600\text{-}950\text{ cm}^{-1}$ bant aralığında tepe noktalara sahip olduğu belirgin olarak görülürken AÇ ve $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ malzemelerinde bu tepe noktalar mevcut değildir (Bilgiç ve Bilgiç, 2019).



Şekil 7.4. Arıtma çamurundan elde edilen poröz malzemelerin FTIR spektrumları

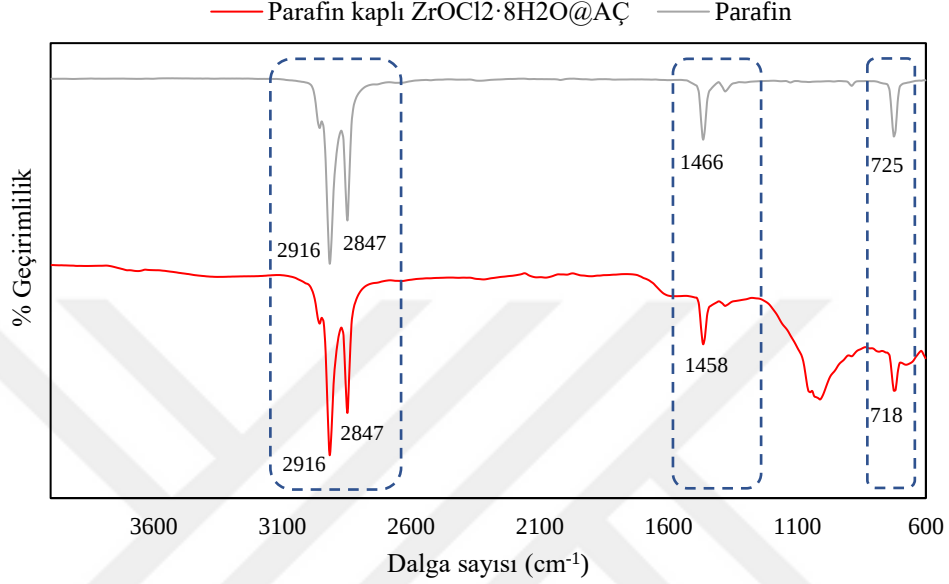
Şekil 7.5'teki $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin FT-IR spektrumu incelendiğinde 3364, 2099, 1906, 1574, 1404, 1011 ve 656 cm^{-1} 'de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. 3364 cm^{-1} 'de tepe noktası veren zayıf ve geniş bant su varlığını ifade eden -OH hidroksil grubu ve -NH gruplarının varlığını göstermektedir (Adar vd., 2020b). 2099 cm^{-1} 'deki tepe noktası izotiyosiyanat (-NCS) bandının varlığı ve 1906 cm^{-1} 'deki tepe noktası geçiş metali karbonilinin varlığını göstermektedir (Coates, 2000; Nandiyanto vd., 2019). 1574 ve 1404 cm^{-1} 'deki tepe noktaları karboksilat (karboksilik asit tuzu) bandının varlığını göstermektedir (Pertou vd., 2021). 1011 cm^{-1} 'de tepe noktası olan geniş ve güçlü bant arıtma çamuru poroz malzemesine benzer olarak C-O ve silikatın Si-O gerilmesine karşılık gelmektedir (Abrego vd., 2009; P. Zhao vd., 2013). 656 cm^{-1} 'deki tepe noktası tiyoeter $\text{CH}_3\text{-S-}$ (C-S gerilmesi) bileşiklerinin varlığını göstermektedir (Coates, 2000; Nandiyanto vd., 2019).



Şekil 7.5. $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu

Şekil 7.6'da parafin emdirilmiş zirkonyum (IV) oksit klorür oktahidrat içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ -Parafin) ait FDM ve parafinin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Parafin kaplanmış olan zirkonyum (IV) oksit klorür oktahidrat içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin FT-IR spektrumlarını incelediğimizde parafinin ana tepe noktalarına benzer olarak 2916, 2847, 1458 ve 718 cm^{-1} 'de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışmada kullanılan parafin ve zirkonyum (IV) oksit klorür oktahidrat içeren arıtma çamuru poroz

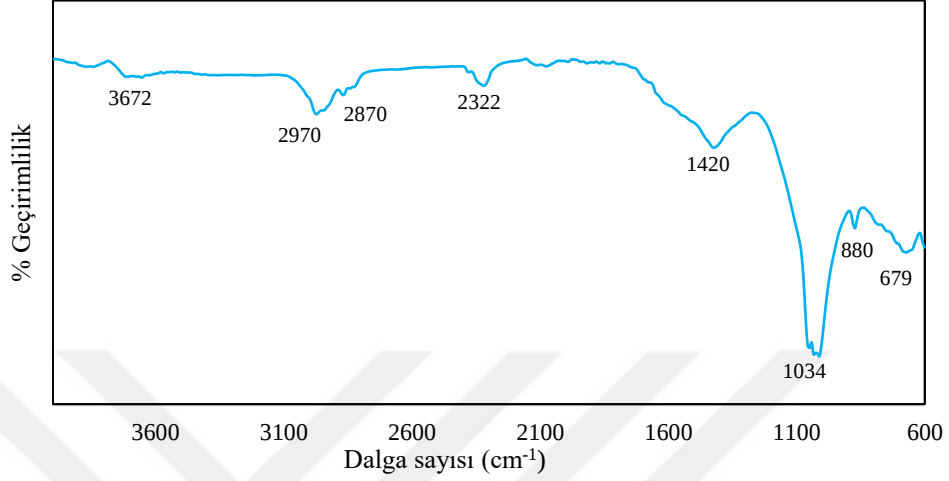
malzemesinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığını ve fiziksel olarak bütünleştiğini göstermektedir (Liu vd., 2021; X. Lu vd., 2020; Mehrli vd., 2013; D. Wu vd., 2015).



Şekil 7.6. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu

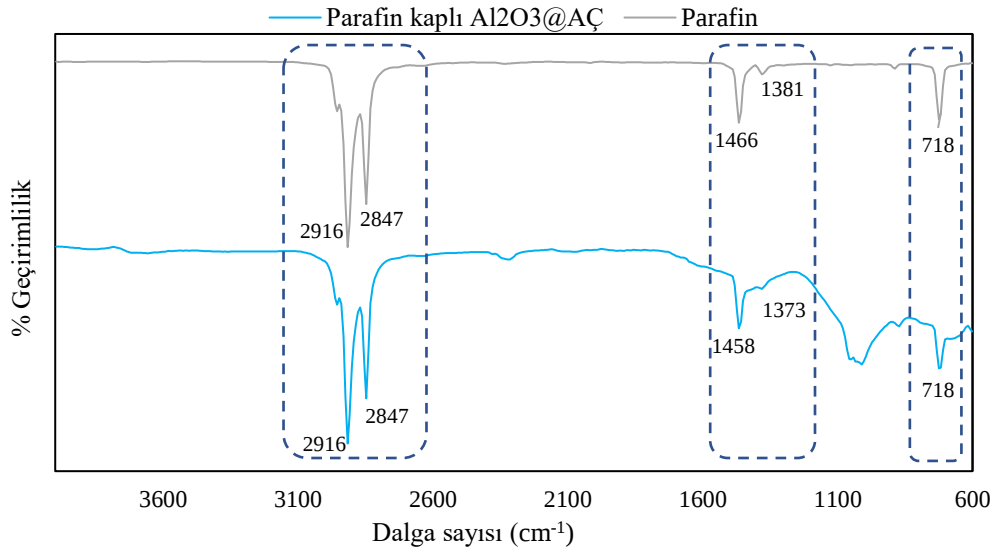
Şekil 7.7’de alüminyum oksit (Al_2O_3) içeren arıtma çamurundan üretilen poröz malzemenin ($Al_2O_3@AÇ$) FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Malzemeye ait FT-IR spektrumu incelendiğinde 3672, 2970, 2870, 2322, 1420, 1034, 880 ve 679 cm^{-1} ’de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. 3672 cm^{-1} ’de zayıf ve dar bir tepe noktası oluşturan bant genel olarak O-H gerilme bölgesi olarak ifade edilmektedir (Al Bsoul vd., 2021; Ayodele vd., 2020). 2970 ve 2870 cm^{-1} ’de tepe noktaları bulunan orta ve geniş bant alkil gruplarının $-CH_2$ ve $-CH_3$ gerilme titreşimlerinin $-C-H$ gerilme bantlarını temsil etmektedir (L. C. Fernandes vd., 2019; Yassin vd., 2015). 1420 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan geniş ve orta bant C-O gerilme titreşim bandını göstermektedir (Kocak, 2020). 880 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan dar ve zayıf bant 1420 cm^{-1} ’deki C-O gerilme titreşiminden görüleceği üzere birincil ve ikincil alkollerin C-C-O düzlem içi gerilmesini ve $-CH$ deformasyonunu (polifenoller) göstermektedir (Dıblan vd., 2018). 1034 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan geniş ve güçlü bant literatürle karşılaştırıldığında, C-O ve silikatın Si-O gerilmesine karşılık gelmektedir (Abrego vd., 2009; P. Zhao vd., 2013). 679 cm^{-1} ’de

tepe noktası bulunan dar ve zayıf bant alifatik bromo bileşikler C-Br gerilmesini göstermektedir (Coates, 2000; Larkin, 2017; Nandiyanto vd., 2019).



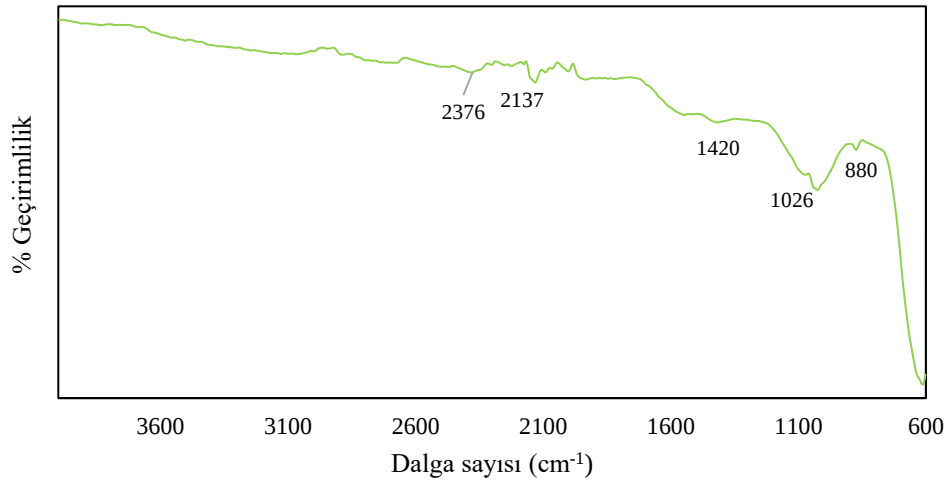
Şekil 7.7. $Al_2O_3@AÇ$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu

Şekil 7.8’de parafin emdirilmiş alüminyum oksit (Al_2O_3) içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ($Al_2O_3@AÇ$ -Parafin) ait FDM ve parafinin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Parafin kaplanmış olan alüminyum oksit (Al_2O_3) içeren arıtma poroz çamuru malzemesinin FT-IR spektrumlarını incelediğimizde parafinin ana tepe noktalarına benzer olarak 2916, 2847, 1458 ve 718 cm^{-1} ’de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışmada kullanılan parafin ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığını ve fiziksel olarak bütünleştiğini göstermektedir (Liu vd., 2021; X. Lu vd., 2020; Mehrli vd., 2013; D. Wu vd., 2015).



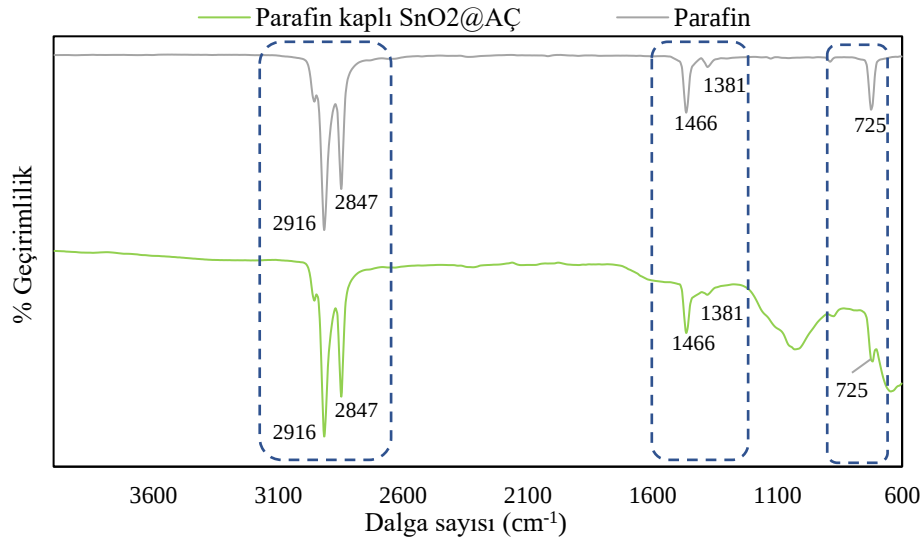
Şekil 7.8. $Al_2O_3@AÇ$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu

Şekil 7.9’da kalay (IV) oksit (SnO_2) içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin ($SnO_2@AÇ$) FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Malzemeye ait FT-IR spektrumu incelendiğinde 2376, 2137, 1420, 1026 ve 880 cm^{-1} ’de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. 2137 cm^{-1} ’deki tepe noktasına sahip olan zayıf ve dar bant terminal (uç) alkoller $C\equiv C$ göstermektedir (Coates, 2000; Nandiyanto vd., 2019). 1420 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan geniş ve orta bant C-O gerilme titreşim bandını göstermektedir (Kocak, 2020). 1026 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan geniş ve güçlü bant literatürle karşılaştırıldığında, C-O ve silikatın Si-O gerilmesine karşılık gelmektedir (Abrego vd., 2009; P. Zhao vd., 2013). 880 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan dar ve zayıf bant 1420 cm^{-1} ’deki C-O gerilme titreşiminden görüleceği üzere birincil ve ikincil alkollerin C-C-O düzlem içi gerilmesini ve -CH deformasyonunu (polifenoller) göstermektedir (Dıblan vd., 2018).



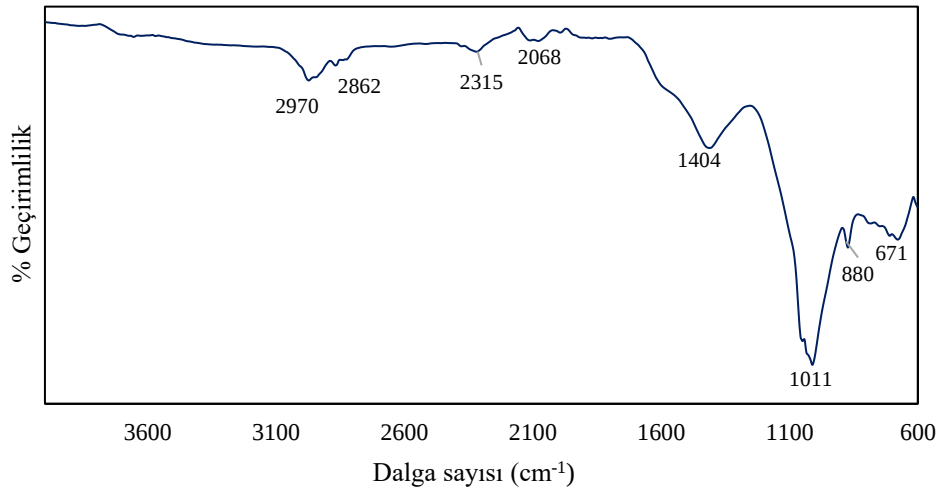
Şekil 7.9. $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu

Şekil 7.10’da parafin emdirilmiş kalay (IV) oksit (SnO_2) içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ($\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ -Parafin) ait FDM ve parafinin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Parafin emdirilmiş olan kalay (IV) oksit (SnO_2) içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ait FDM FT-IR spektrumlarını incelediğimizde parafinin ana tepe noktalarına benzer olarak 2916, 2847, 1466 ve 725 cm^{-1} ’de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışmada kullanılan parafin ve kalay (IV) oksit (SnO_2) içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığını ve fiziksel olarak bütünleştiğini göstermektedir (Liu vd., 2021; X. Lu vd., 2020; Mehrali vd., 2013; D. Wu vd., 2015).



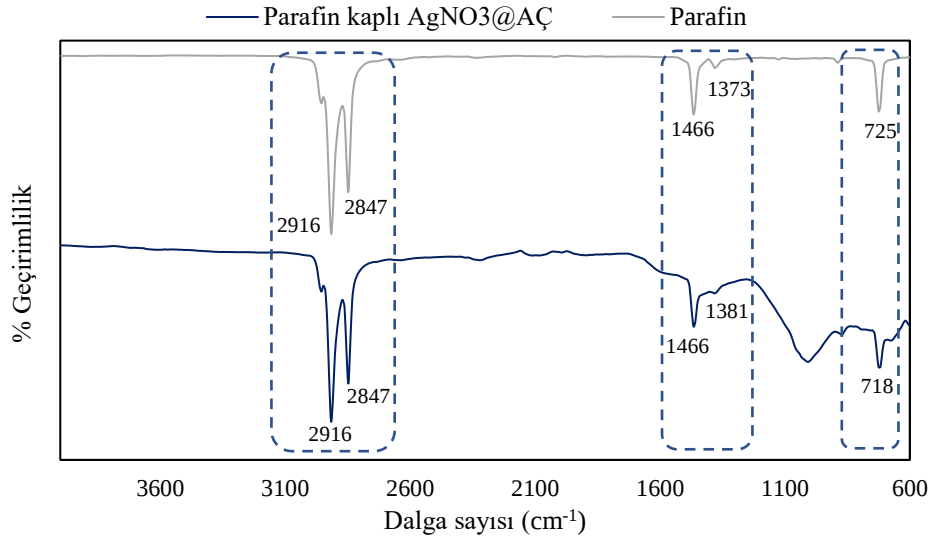
Şekil 7.10. $\text{SnO}_2\text{@AÇ}$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu

Şekil 7.11’de gümüş nitrat (AgNO_3) içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin ($\text{AgNO}_3\text{@AÇ}$) FT-IR spektrumu gösterilmektedir. 2970, 2862 ve 1404 cm^{-1} ’de tepe noktaları bulunan orta ve geniş bant alkil gruplarının $-\text{CH}_2$ ile $-\text{CH}_3$ gerilme titreşimlerinin $-\text{C}-\text{H}$ gerilme bantlarını temsil etmektedir (L. C. Fernandes vd., 2019; Yassin vd., 2015). 2068 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan bant propadien, keten, izosiyanat, izotiyosiyanatları ($\text{X} = \text{C} = \text{Y}$) göstermektedir (Pavia vd., 2014). 1011 cm^{-1} ’de tepe noktası olan geniş ve güçlü bant arıtma çamuru poroz malzemesine benzer olarak, C-O ve silikatın Si-O gerilmesine karşılık gelmektedir (Abrego vd., 2009; P. Zhao vd., 2013). 880 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan dar ve zayıf bant birincil ve ikincil alkollerin C-C-O düzlem içi gerilmesini ve $-\text{CH}$ deformasyonunu (polifenoller) göstermektedir (Dıblan vd., 2018). 671 cm^{-1} ’de tepe noktası bulunan dar ve zayıf bant alifatik bromo bileşikler C-Br gerilmesini göstermektedir (Coates, 2000; Larkin, 2017; Nandiyanto vd., 2019).



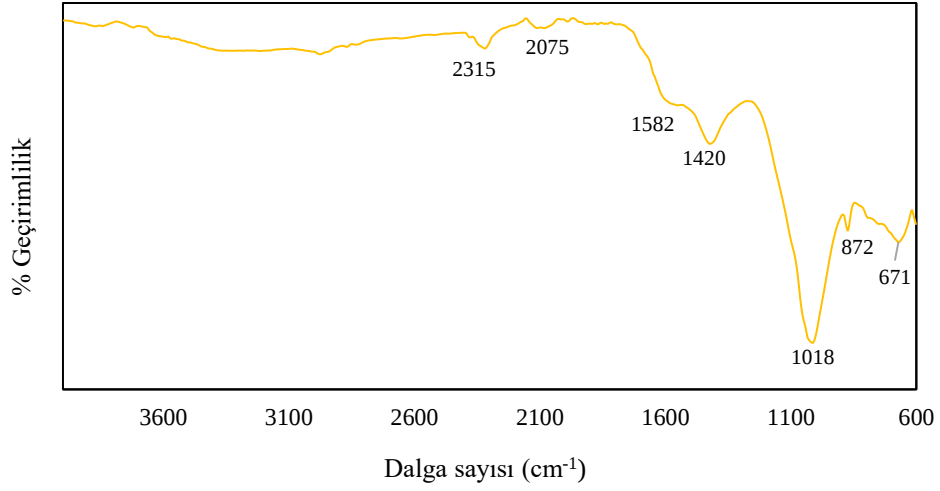
Şekil 7.11. $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu

Şekil 7.12’de parafin emdirilmiş gümüş nitrat (AgNO_3) içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ($\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ -Parafin) ait FDM ve parafinin FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Parafin emdirilmiş gümüş nitrat (AgNO_3) içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ait FDM’nin FT-IR spektrumlarını incelediğimizde parafinin ana tepe noktalarına benzer olarak 2916, 2847, 1466 ve 718 cm^{-1} ’de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışmada kullanılan parafin ve gümüş nitrat (AgNO_3) içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığını ve fiziksel olarak bütünleştiğini göstermektedir (Liu vd., 2021; X. Lu vd., 2020; Mehrali vd., 2013; D. Wu vd., 2015).



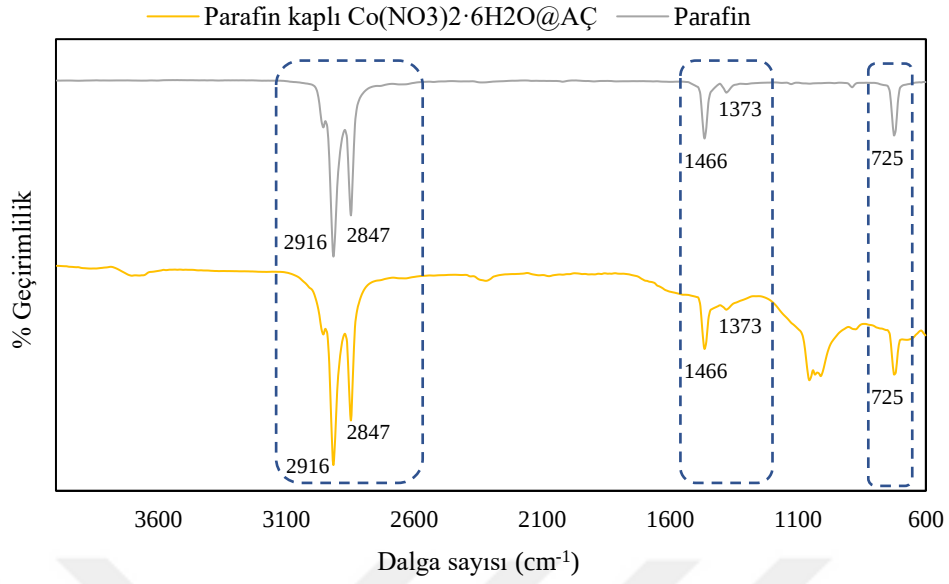
Şekil 7.12. $AgNO_3@AÇ$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu

Şekil 7.13'te kobalt (II) nitrat heksahidrat ($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin ($Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$) FT-IR spektrumu gösterilmektedir. 2075 cm^{-1} 'de tepe noktası bulunan bant propadien, keten, izosiyanat, izotiyosiyanatları ($X = C = Y$) göstermektedir. 1582 cm^{-1} 'de tepe noktası bulunan zayıf bant birincil ve ikincil aminler ve amidlerin N-H bandının mevcut olduğunu göstermektedir (Pavia vd., 2014). 1018 cm^{-1} 'de tepe noktası olan geniş ve güçlü bant arıtma çamuru poroz malzemesine benzer olarak, C-O ve silikatın Si-O gerilmesine karşılık gelmektedir (Abrego vd., 2009; P. Zhao vd., 2013). 1420 ve 872 cm^{-1} 'de tepe noktaları bulunan iki bant yapısı karbonat iyonunu ve 671 cm^{-1} 'de tepe noktası bulunan dar ve zayıf bant alifatik bromo bileşikler C-Br gerilmesini göstermektedir (Coates, 2000; Larkin, 2017; Nandiyanto vd., 2019).



Şekil 7.13. $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait FTIR spektrumu

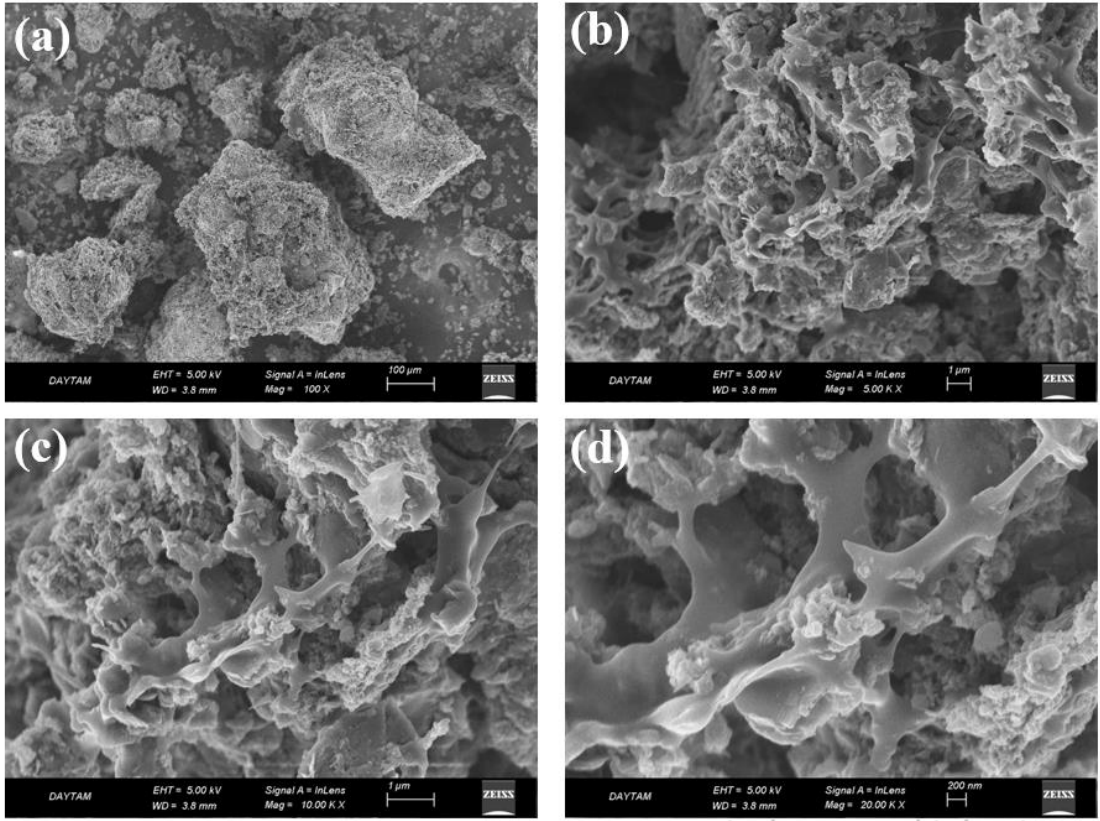
Şekil 7.14’te parafin emdirilmiş kobalt (II) nitrat hekzahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ -Parafin) ait FDM için FT-IR spektrumu gösterilmektedir. Parafin emdirilmiş kobalt (II) nitrat hekzahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ait FDM’nin FT-IR spektrumlarını incelediğimizde parafinin ana tepe noktalarına benzer olarak 2916, 2847, 1466 ve 725 cm^{-1} ’de tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, çalışmada kullanılan parafin ve kobalt (II) nitrat hekzahidrat ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığını ve fiziksel olarak bütünleştiğini göstermektedir (Liu vd., 2021; X. Lu vd., 2020; Mehrali vd., 2013; D. Wu vd., 2015).



Şekil 7.14. $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ -Parafin FDM ve parafinin FTIR spektrumu

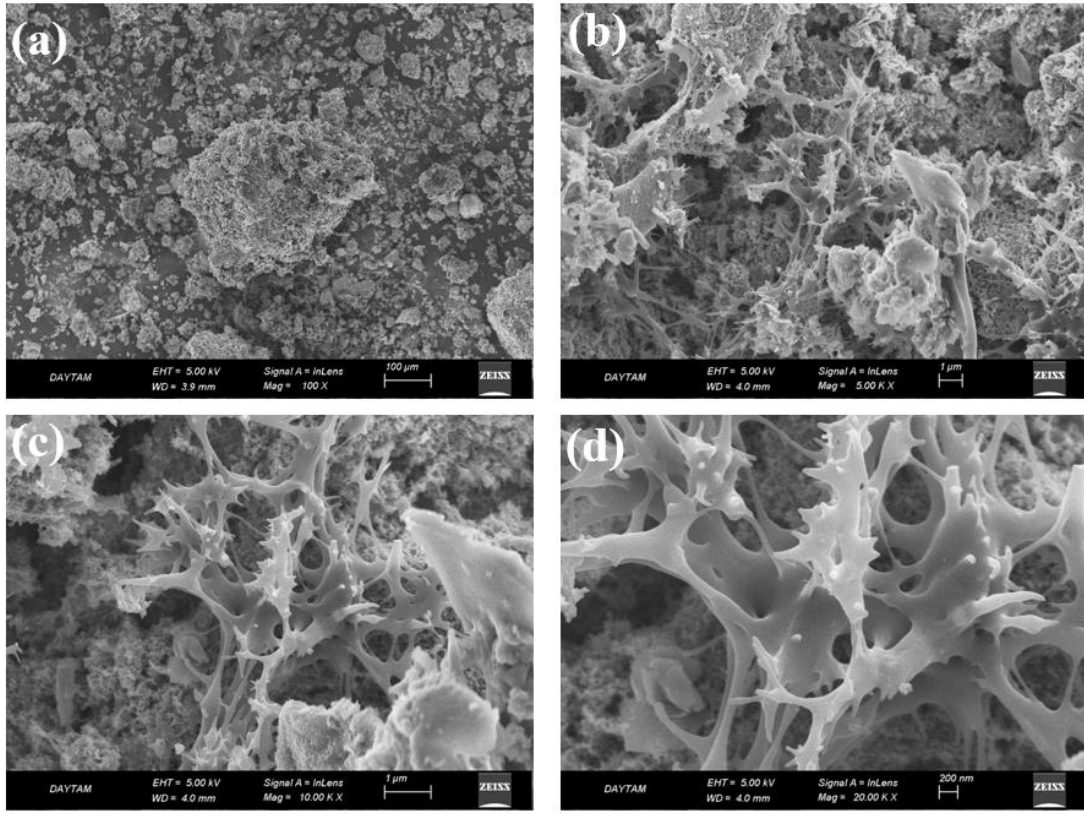
7.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizlerinin Değerlendirilmesi

Arıtma çamuru ve inorganik maddelerin katkıları ile elde edilen poroz malzemelerin morfolojik yapı analizi Zeiss Sigma 300 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz süreci öncesinde AÇ, $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$, $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$, $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$, $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ ve $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ malzemeler organik yapıları olduğundan uygun kalınlıkta altın ile kaplanmıştır. Termal enerji depolama sürecinde parafin katkılı üretilen FDM'lere katkı sağlayacak destek malzemelerinin SEM görüntüleri Şekil 7.15 – 7.20 arasında gösterilmektedir. Çalışmada malzemelerin daha ayrıntılı olarak incelenebilmesi adına SEM görüntülerinin alınması sürecinde 100, 5.000, 10.000 ve 20.000 kat büyütme yapılmıştır. Şekil 7.15'te arıtma çamuru poroz malzemesinin (AÇ) SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde malzemenin homojen olarak dağılım göstermeyen kümeleşmiş yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Bu yapıları yakından incelediğimizde kümelenmiş ağ yapıları ve homojen olarak dağılım göstermeyen gözeneklerden meydana geldikleri görülmektedir.



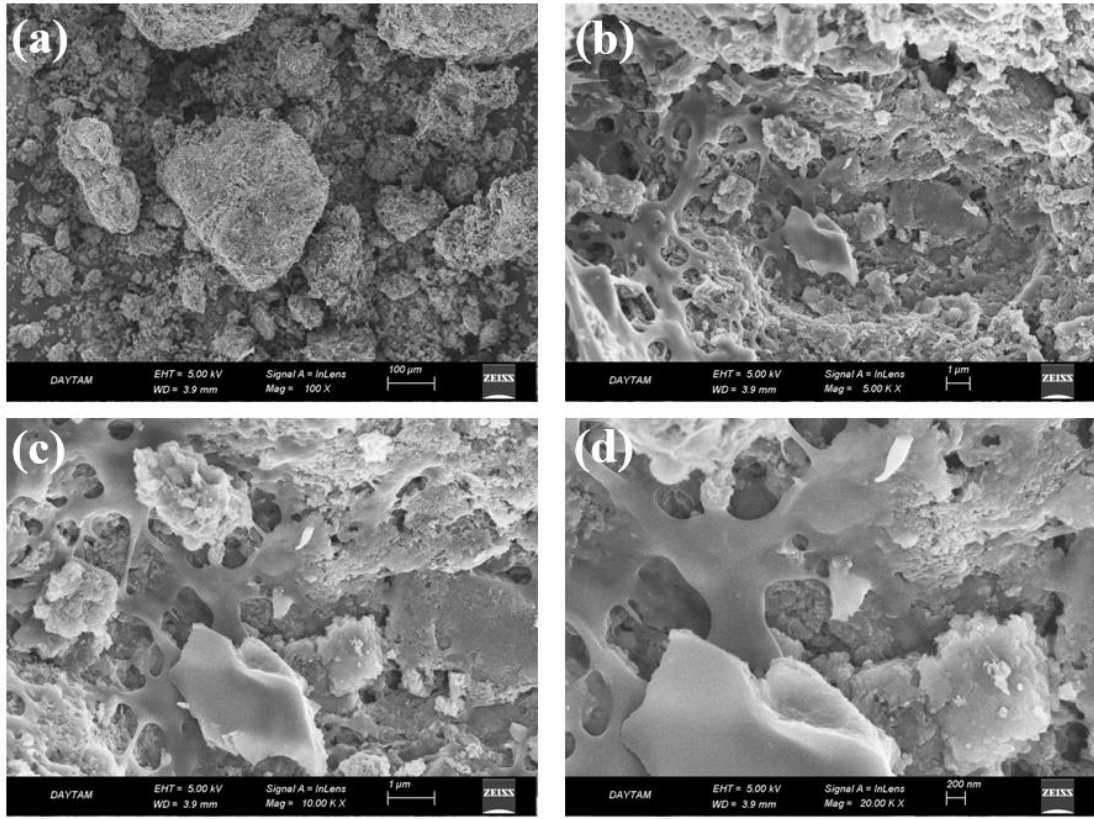
Şekil 7.15. AÇ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX

Şekil 7.16’da $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ içeren arıtma çamuru poroz malzemesine ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde malzemenin dağılım göstermeyen kümeleşmiş yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca malzemedeki kümeleşmiş yapıların dağılımının AÇ malzemesinden farklı olduğu görülmektedir. Malzeme içerisinde kümeler halinde bulunan yapıları incelediğimizde arıtma çamuru hammaddesine dahil edilen $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ ile ağ yapılarının daha sivri ve keskin bir hal aldıkları görülmektedir. Bu durum malzeme porozitesinin artmasına (%98,41) katkı sağlamıştır. Artan porozite ve keskin ağ yapısı ile malzemeye emdirilen parafinin tutulumunun artmasını sağlamıştır.



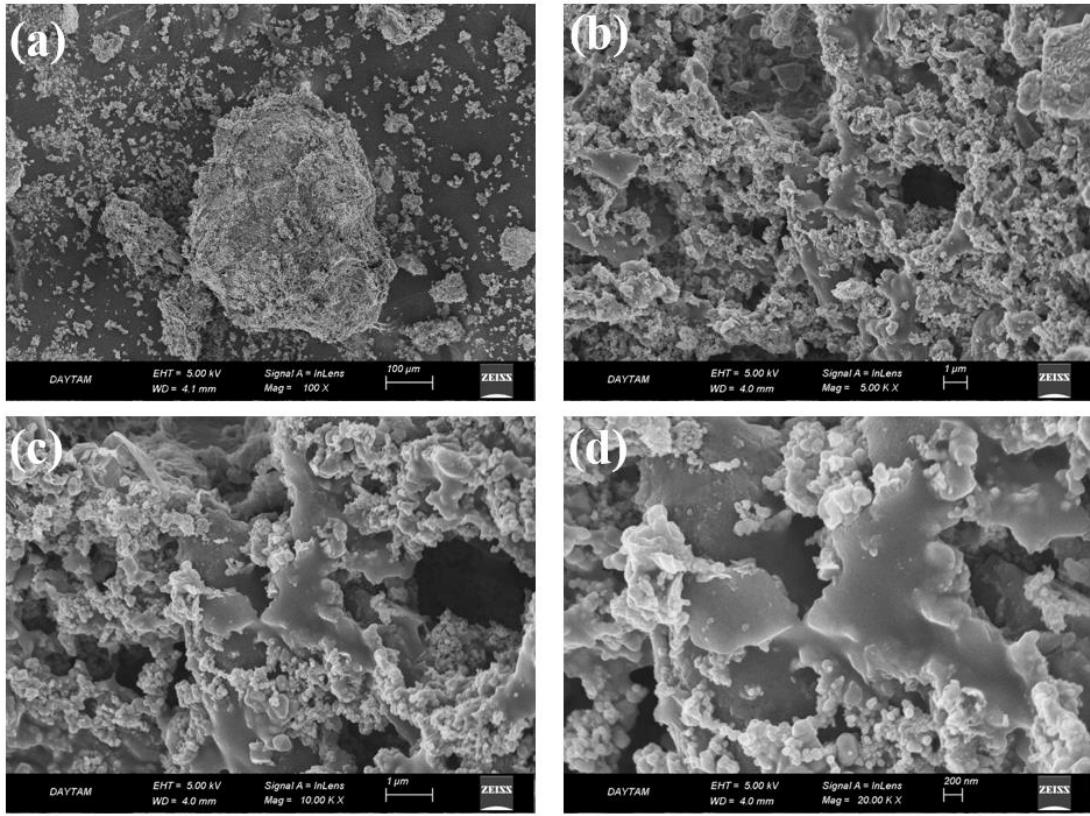
Şekil 7.16. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX

Şekil 7.17’de Al_2O_3 içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde malzemenin AÇ ve $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ malzemelerine benzer olarak homojen dağılım göstermeyen kümeleşmiş yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Bu kümeleşmiş yapıların dağılımı incelendiğinde AÇ malzemesi ile benzer bir görünüm sergilediği görülmektedir. Ayrıca bu yapıları incelediğimizde bir ağ görünümüne sahip olduklarını ve Al_2O_3 inorganik maddesinin yapıdaki gözenekler arasına girdiği görülmektedir. Bu durum malzemenin porozitesinin azalmasına (%90,67) ve termal enerji depolama sürecinde kullanılan parafinin malzeme içerisinde tutulumunun azalmasına neden olmuştur.



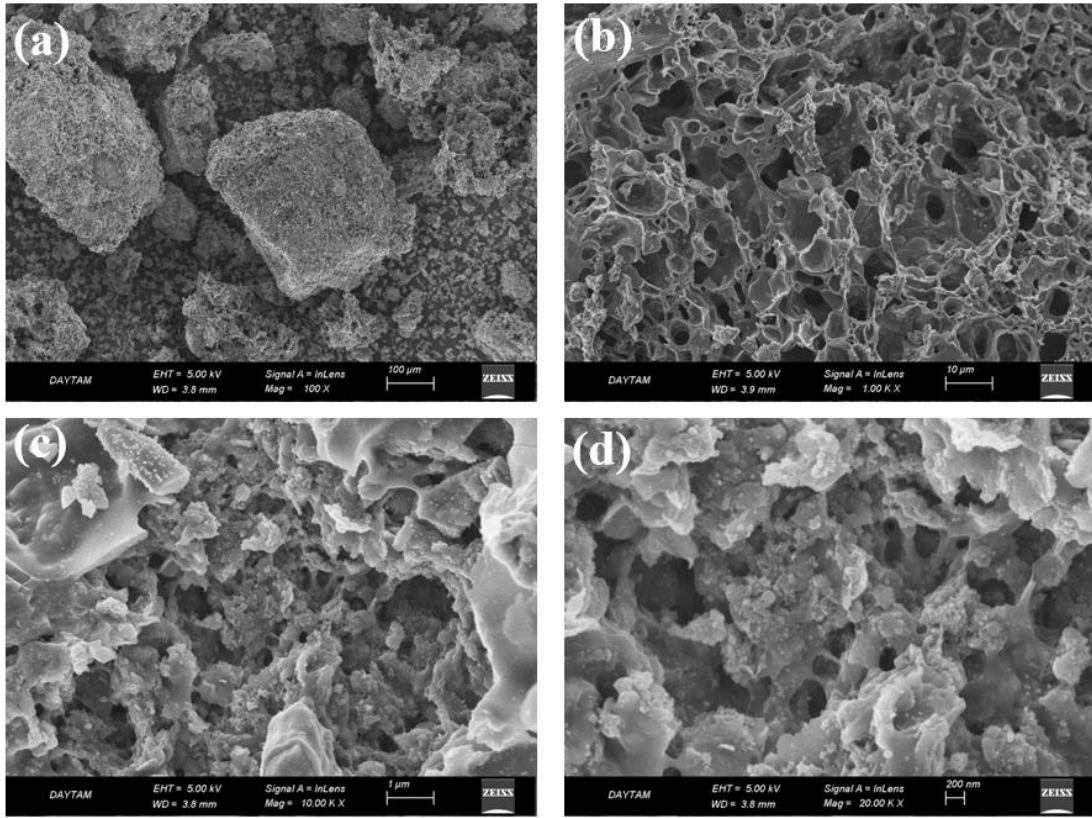
Şekil 7.17. $Al_2O_3@AC$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX

Şekil 7.18’de SnO_2 içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde homojen olarak dağılım göstermeyen kümeleşmiş yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Bu kümeleşmiş yapıların dağılımı incelendiğinde $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ malzemesi ile benzer bir görünüm sergilediği görülmektedir. Ayrıca bu yapıları incelediğimizde bir ağ görünümüne sahip olduklarını ve SnO_2 inorganik maddesinin ağ yapılarının kenarlarında tutulum gösterdiği görülmektedir. Ayrıca ağ yapısının kenarlarında tutulan SnO_2 inorganik maddesinin daha küçük gözeneklerin meydana gelmesini sağlayarak malzemenin porozitesini (%97,03) arttırdığı görülmektedir.



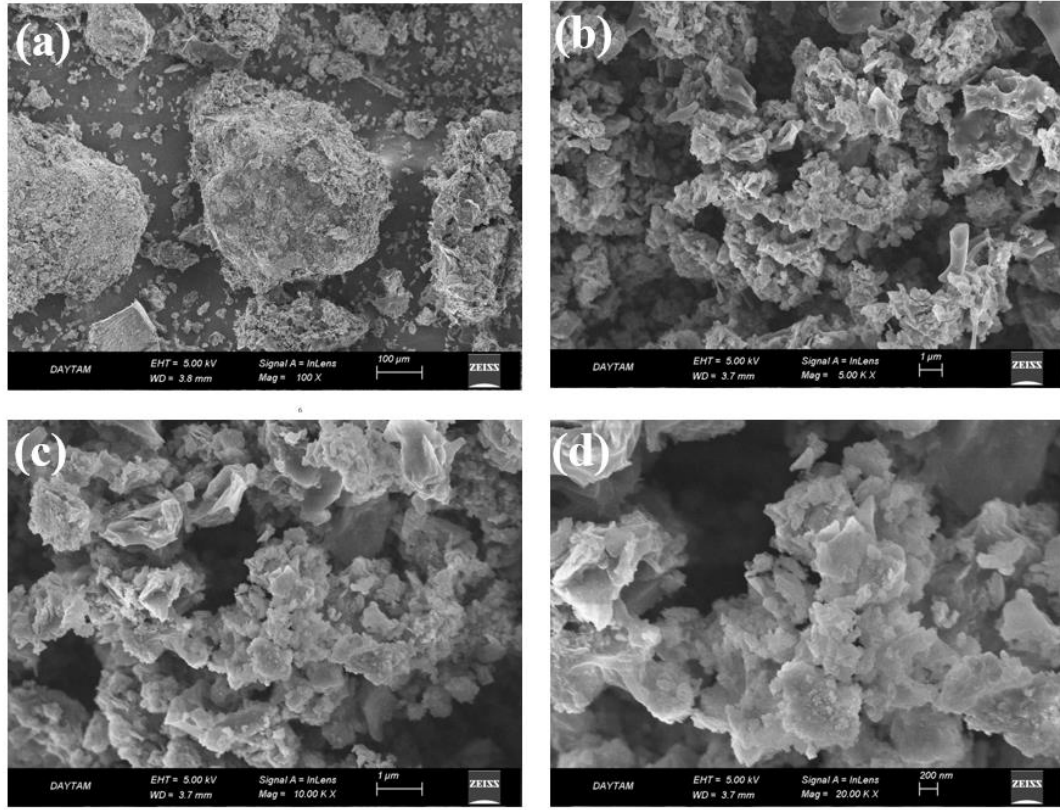
Şekil 7.18. $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX SEM görüntüleri

Şekil 7.19’da AgNO_3 içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ malzemesinin AÇ, $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$ malzemelerine benzer olarak homojen dağılım göstermeyen kümeleşmiş yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Bu kümeleşmiş yapılar incelendiğinde bir ağ yapısında olduğu ve homojen dağılıma sahip olmayan gözenekler içerdiği görülmektedir.



Şekil 7.19. $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)1.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX

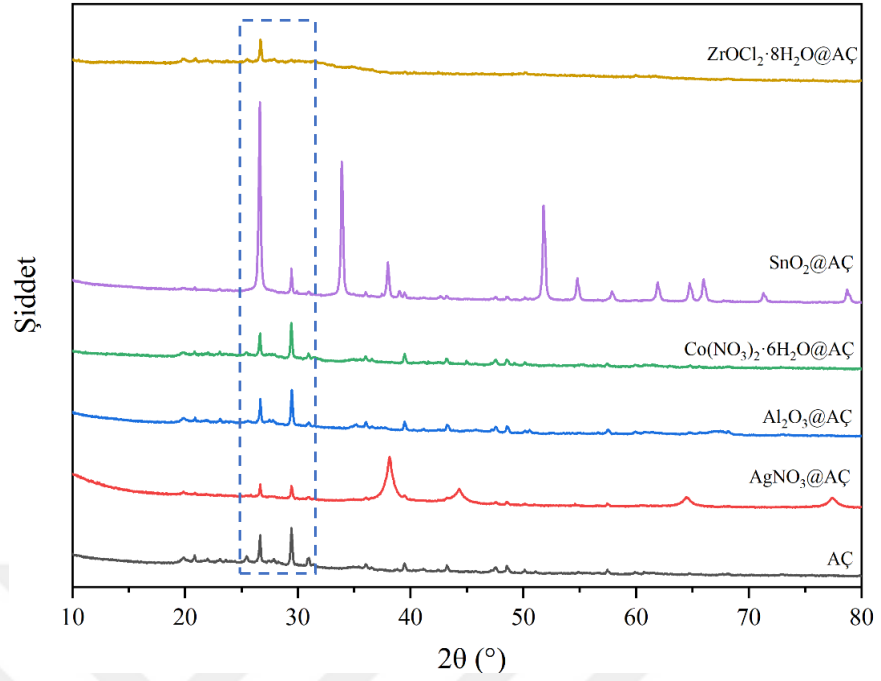
Şekil 7.20’de $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ içeren arıtma çamuru poroz malzemesinin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde homojen olarak dağılım göstermeyen kümeleşmiş yapılardan meydana geldiği görülmektedir. Bu kümeleşmiş yapıların dağılımı incelendiğinde bir ağ yapısı gösterdikleri ancak diğer malzemelerden farklı olarak birbirleri ile bağlantılı olmayan ve yığın halinde toplanmış formda oldukları görülmektedir. Bu durum bazı bölgelerde ağ yapısının oluşmamasından kaynaklanan büyük boşlukların meydana gelmesini ve malzemenin porozite yüzdesinin (%104,16) oldukça yüksek olmasını sağlamıştır.



Şekil 7.20. $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri; (a)100x, (b)5.00KX, (c)10.00KX ve (d)20.00KX

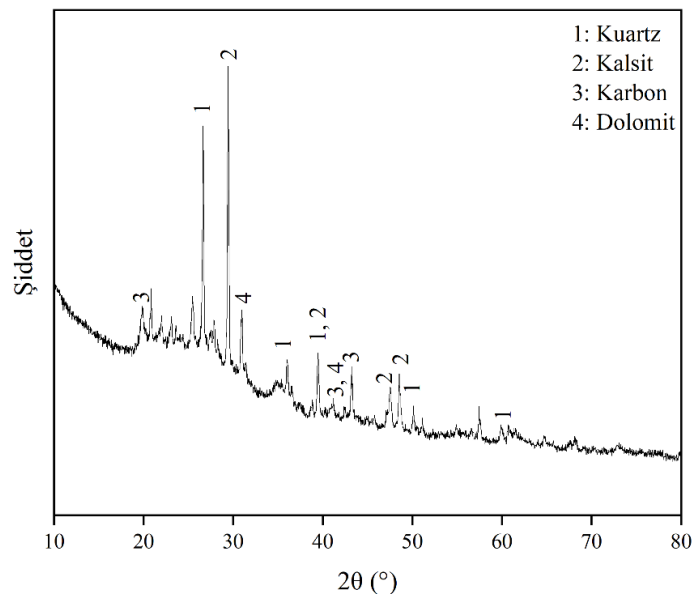
7.6. X – ışını Difraksiyonu (XRD) Analizlerinin Değerlendirilmesi

İnorganik madde katkılı ve katkısız malzemelerin kristal yapısının ve kimyasal kompozisyonun belirlenmesi için XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.22’de inorganik katkılı ve katkısız malzemelerin XRD spektrumları gösterilmektedir. XRD spektrumlarında gözlenen kestik tepe noktaları malzemelerin kristal yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Onchoke vd., 2018). Ayrıca XRD spektrumları incelendiğinde inorganik madde katkılı ve katkısız malzemelerde arıtma çamurundan kaynaklanan $2\theta = \sim 26,6^\circ$ ve $2\theta = \sim 29,5^\circ$ açılarında iki temsili tepe noktası gözlemlenmiştir (Ameri vd., 2020).



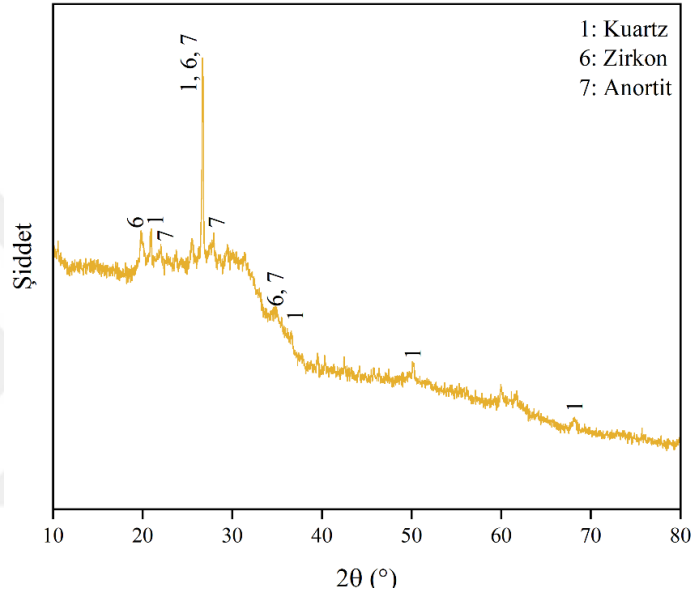
Şekil 7.21. İnorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin XRD spektrumları

Şekil 7.22’de gösterilen AÇ malzemesine ait XRD spektrumuna göre malzeme üretim sürecinde kullanılan VAK, SAK, KMS ve arıtma çamuru maddeleri kalsinasyon süreci sonucunda kuartz (SiO_2), kalsit (CaCO_3), karbon (C) ve dolomite ($\text{Ca}_{0,5}\text{Mg}_{0,5}\text{CO}_3$) dönüşmüştür.



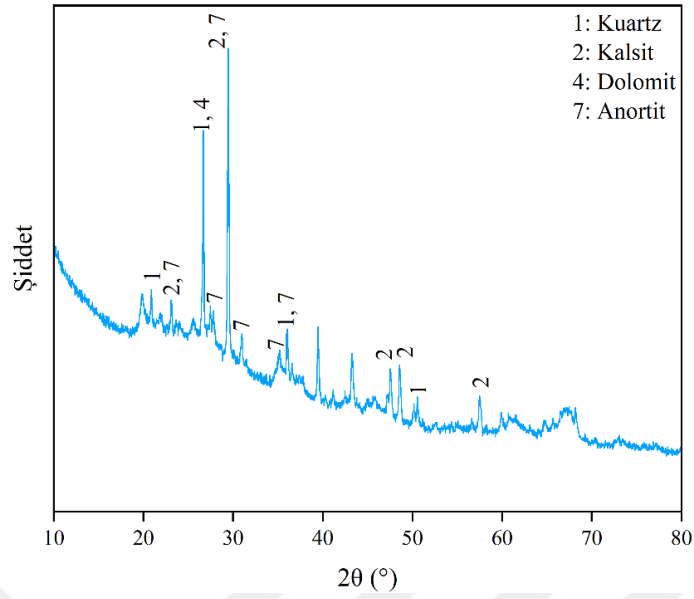
Şekil 7.22. AÇ poroz malzemesinin XRD spektrumları

Şekil 7.23'te gösterilen $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait XRD spektrumuna göre malzeme üretim sürecinde kullanılan VAK, SAK, KMS, arıtma çamuru ve $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ maddeleri kalsinasyon süreci sonucunda kuartz (SiO_2), zirkon ($\text{Zr}(\text{SO}_4)$) ve anortite ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$) dönüşmüştür. XRD spektrumlarına göre belirlenen zirkon ($\text{Zr}(\text{SO}_4)$) bileşiği malzemeye dahil edilen inorganik $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinin malzeme ile bütünleştiğini göstermektedir.



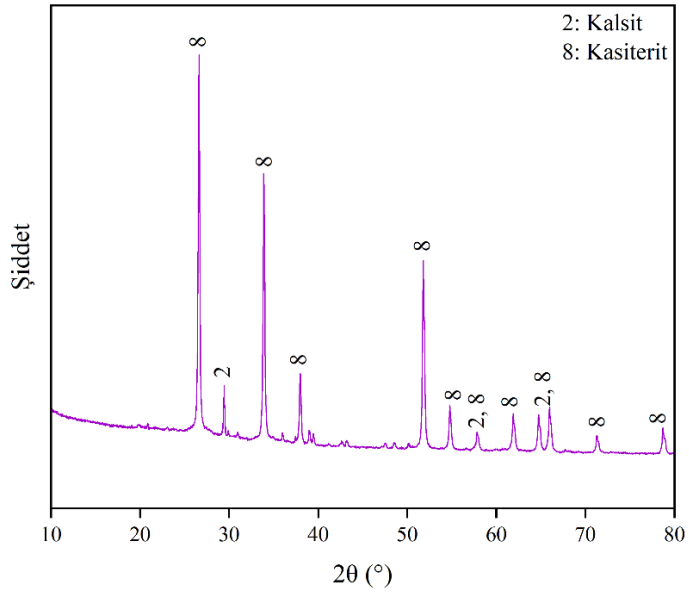
Şekil 7.23. $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları

Şekil 7.24'te gösterilen $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$ malzemesine ait XRD spektrumuna göre malzeme üretim sürecinde kullanılan VAK, SAK, KMS, arıtma çamuru ve Al_2O_3 maddeleri kalsinasyon süreci sonucunda kuartz (SiO_2), kalsit (CaCO_3), dolomite ($\text{Ca}_{0.5}\text{Mg}_{0.5}\text{CO}_3$) ve anortite ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$) dönüşmüştür. XRD spektrumlarına göre belirlenen anortit ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$) bileşiği malzemeye dahil edilen inorganik Al_2O_3 bileşiğinin malzeme ile bütünleştiğini göstermektedir.



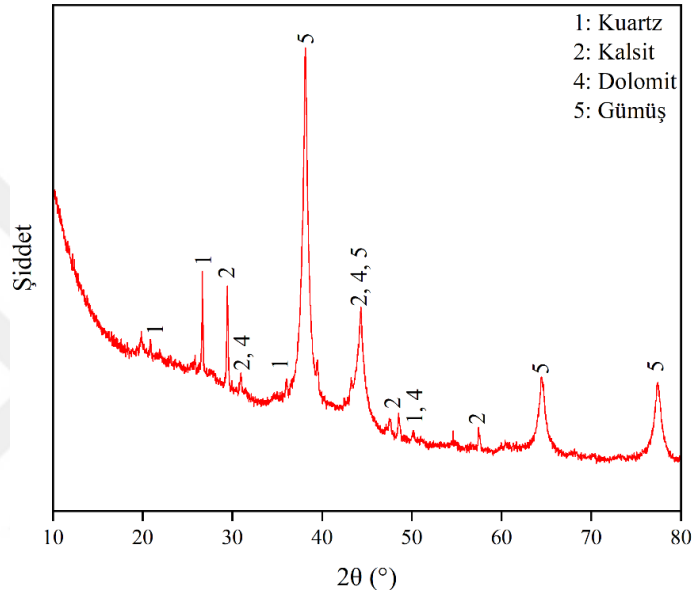
Şekil 7.24. $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları

Şekil 7.25'te gösterilen $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait XRD spektrumuna göre malzeme üretim sürecinde kullanılan VAK, SAK, KMS, arıtma çamuru ve SnO_2 maddeleri kalsinasyon süreci sonucunda kalsit (CaCO_3) ve kalsiterite (SnO_2) dönüşmüştür. XRD spektrumlarına göre belirlenen kalsiterit (SnO_2) bileşiği malzemeye dahil edilen inorganik SnO_2 bileşiğinin malzeme ile bütünleştiğini göstermektedir.



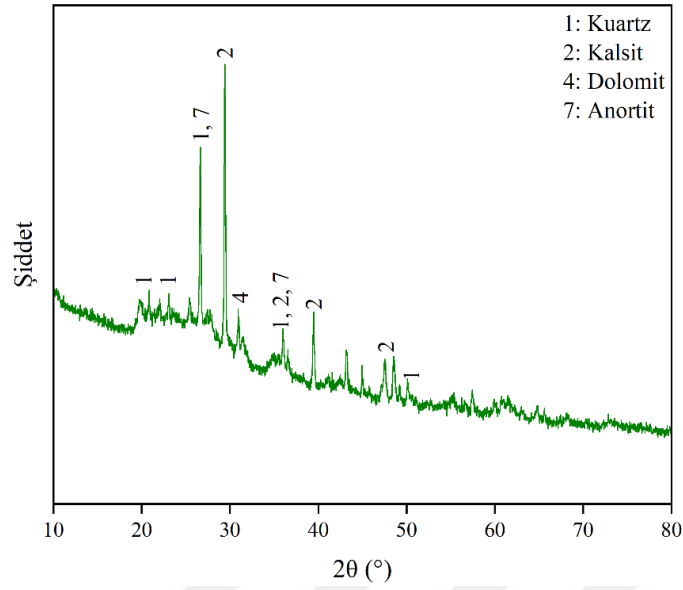
Şekil 7.25. $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları

Şekil 7.26’da gösterilen $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait XRD spektrumuna göre malzeme üretim sürecinde kullanılan VAK, SAK, KMS, arıtma çamuru ve AgNO_3 maddeleri kalsinasyon süreci sonucunda kuartz (SiO_2), kalsit (CaCO_3), dolomite ($\text{Ca}_{0,5}\text{Mg}_{0,5}\text{CO}_3$) ve gümüşe (Ag) dönüşmüştür. XRD spektrumlarına göre belirlenen gümüş (Ag) elementi malzemeye dahil edilen inorganik AgNO_3 bileşiğinin malzeme ile bütünleştiğini göstermektedir.



Şekil 7.26. $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları

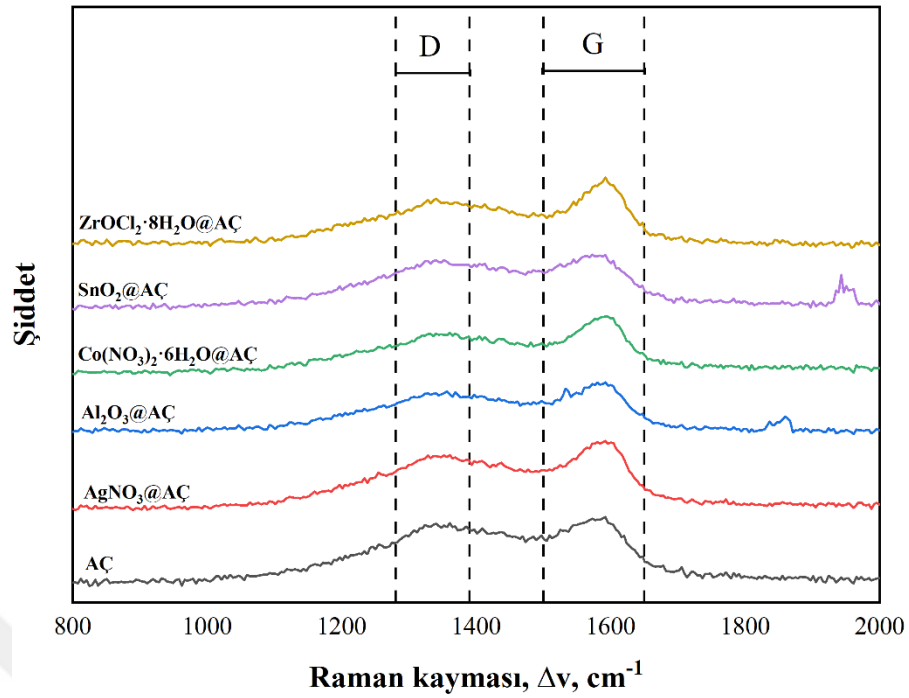
Şekil 7.27’de gösterilen $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesine ait XRD spektrumuna göre malzeme üretim sürecinde kullanılan VAK, SAK, KMS, arıtma çamuru ve $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ maddeleri kalsinasyon süreci sonucunda kuartz (SiO_2), kalsit (CaCO_3), dolomite ($\text{Ca}_{0,5}\text{Mg}_{0,5}\text{CO}_3$) ve anortite ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$) dönüşmüştür. XRD spektrumlarına göre belirlenen bileşikler kobalt (Co) elementi içermediğinden malzemeye dahil edilen inorganik $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinin malzeme ile bütünleşmediği görülmektedir. Bu durumda $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinin karbonizasyon sürecinde sıcaklık kaynaklı parçalandığı söylenebilmektedir. Ayrıca bu durum porozite testi ve SEM analizinde belirlenen yüksek porozite değerini açıklayabilmektedir.



Şekil 7.27. $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin XRD spektrumları

7.7. Raman Spektroskopisi Analizlerinin Değerlendirilmesi

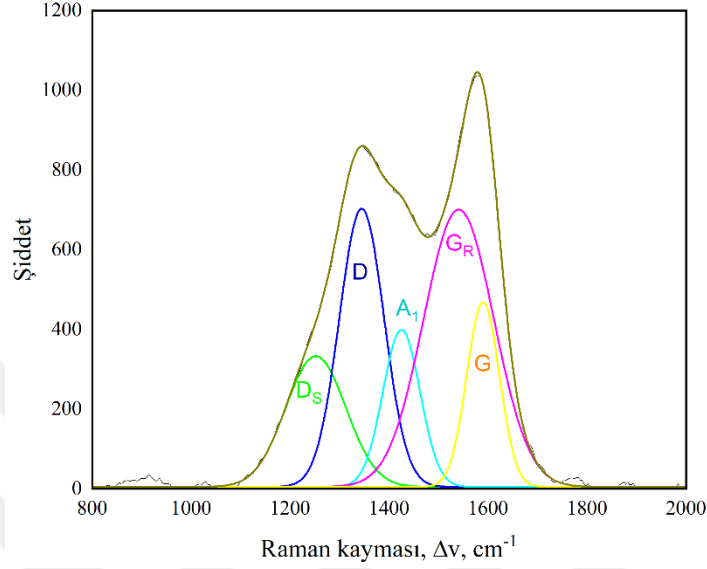
Şekil 7.28’de inorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin Raman spektrumları gösterilmektedir. Arıtma çamuru poroz malzemelerinin Raman spektrumları incelendiğinde 800 ve 2000 cm^{-1} arasındaki bölgede arıtma çamuru bazlı malzemeler üzerine yapılan diğer Raman çalışmaları ile benzer karakteristik piklere sahip oldukları görülmektedir. Her spektrumda, iki belirgin birinci dereceden tepe noktası içeren sp^2 karbonlarının tipik yapısı mevcuttur (Tsaneva vd., 2014). $\sim 1590 \text{ cm}^{-1}$ tepe noktası (G – bandı olarak adlandırılır), genellikle C-C bağlarının gerilmesini içeren sp^2 karbon atomlarının düzlem içi kafes titreşimlerini temsil etmektedir (Malard vd., 2009; Ren vd., 2018; H. Wang vd., 2020). Ayrıca arıtma çamurlarından elde edilen malzemelerdeki G bandı, biyolojik örnekler için $\sim 1575 \text{ cm}^{-1}$ ’deki Raman sinyalleriyle uyumlu olan guanin/adenin gibi olefinik/konjuge zincirlerin sp^2 -bağlı karbon germe titreşimlerini de temsil etmektedir (Mi Li vd., 2018). Bir diğer tepe noktası olan $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$ ’de (D1 – bandı olarak adlandırılır), genellikle polikristal grafit için gözlemlenen “düzensizlik” tepe noktası olarak adlandırılan düzlem içi yapısal kusurlar sp^2 bağlı karbonun grafit kafes titreşimini göstermektedir (Ferrari ve Robertson, 2000; Yan Wang vd., 1990).



Şekil 7.28. İnorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin Raman spektrumları

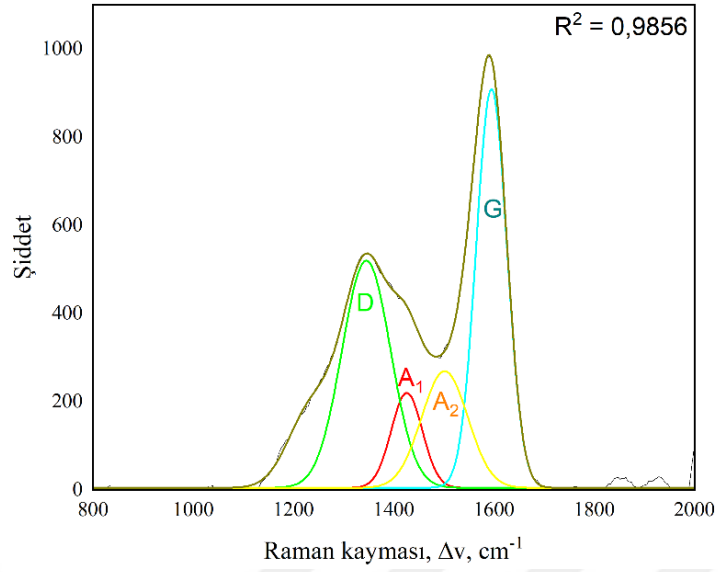
Arıtma çamurundan elde edilen poroz malzemelerin yüzeyindeki kimyasal yapıyı daha iyi anlamak için 800 ve 2000 cm^{-1} aralığındaki karakteristik Raman spektrumları Origin 2021b programı kullanılarak 6 Gauss tepe noktası ile eğri uydurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.29'da AÇ malzemesinin eğri uydurma işlemi sonrasındaki Raman spektrumu gösterilmektedir. AÇ malzemesindeki bantları incelediğimizde Ds bandı lineer (para) aromatikleri ve D bandı çok düzenli karbonlu malzemelerde aromatik halkalar ile en az altı halkalı aromatiklerin sp^2 bağlı karbon atomlarını ifade etmektedir. D bandı her zaman grafit için yapı bozukluklarını gösterirken amorf karbonlar için gelişimin yapı sıralamasını göstermektedir (Mi Li vd., 2018; X. Li vd., 2006). A₁ bandı metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonlarını göstermektedir (Moško vd., 2021). G_R bandı iyi yapılandırılmış ve amorf karbon yapılarının bir arada bulunduğunu gösteren küçük aromatik halkaları (3-5 halka) ve G bandı grafit kristallerin varlığını gösteren aromatik halkalı alken $\text{C}=\text{C}$ sp^2 bağlarını göstermektedir (C. Peng vd., 2018, 2020; Yijun Zhao vd., 2016). Raman spektrumunda, D ve G bandının entegre yoğunluğunun oranı (I_D/I_G), arıtma çamuru poroz malzemelerinin kusur yapısının ve düzensizlik derecesi hakkında bilgi verebilmektedir. Yüksek I_D/I_G oranı arıtma çamuru poroz malzemelerinin yüksek kusurlu olduğunu ve düzensizlik derecesini göstermektedir (Yanlin Wang vd.,

2021). AÇ malzemesinin I_D/I_G oranı Gauss tepe noktası ile eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen D ve G bandı verileri doğrultusunda 0,8458 olarak belirlenmiştir.



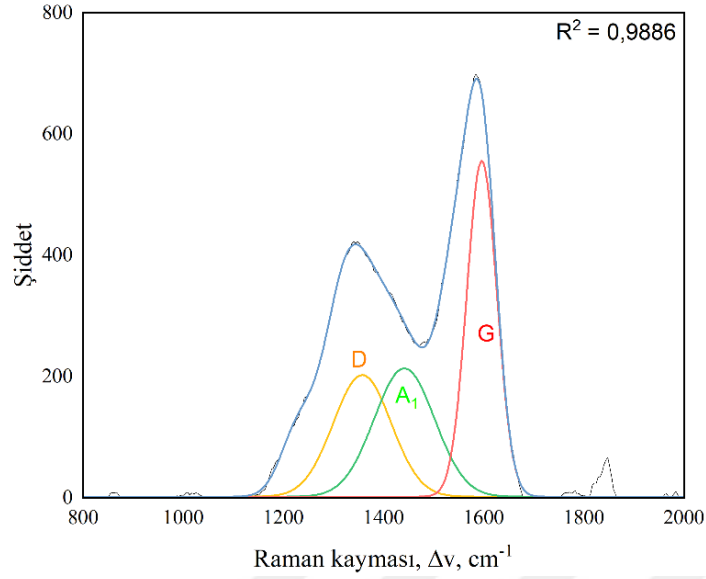
Şekil 7.29. AÇ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi

Şekil 7.30’da $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin eğri uydurma işlemi sonrasındaki Raman spektrumu gösterilmektedir. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ poroz malzemesindeki bantları incelediğimizde D bandı çok düzenli karbonlu malzemelerde aromatik halkalar ile en az altı halkalı aromatiklerin sp^2 bağlı karbon atomlarını ifade etmektedir. D bandı her zaman grafit için yapı bozukluklarını gösterirken amorf karbonlar için gelişimin yapı sıralamasını göstermektedir (Mi Li vd., 2018; X. Li vd., 2006). A_1 bandı metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonlarını ve A_2 bandı 3-5 halkalı aromatiklerin varlığını göstermektedir. Ayrıca A_2 bandı varlığı arıtma çamuru bazlı charlarda Raman açısından önemli olan 3-5 halkalı poliaromataik hidrokarbonları ifade etmektedir (Moško vd., 2021). Son olarak G bandı grafit kristallerin varlığını gösteren aromatik halkalı alken $C=C$ sp^2 bağlarını göstermektedir (C. Peng vd., 2018, 2020; Yijun Zhao vd., 2016). $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin I_D/I_G oranı Gauss tepe noktası ile eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen D ve G bandı verileri doğrultusunda 0,8434 olarak belirlenmiştir.



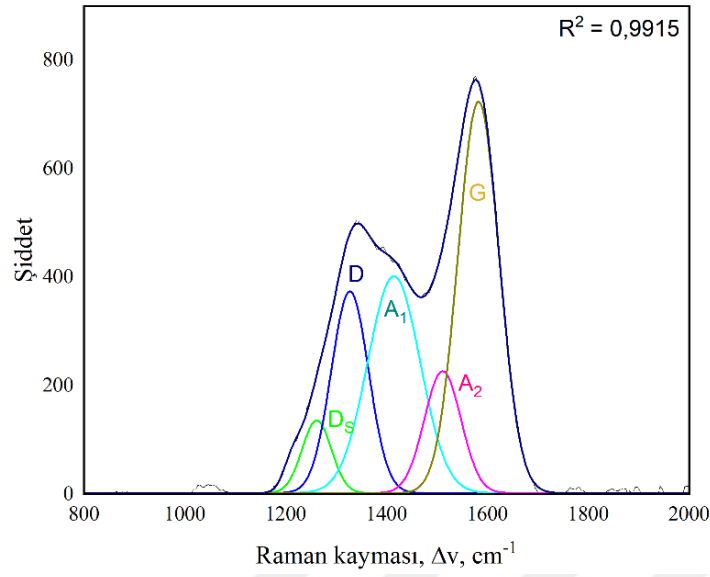
Şekil 7.30. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi

Şekil 7.31’de $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin eğri uydurma işlemi sonrasındaki Raman spektrumu gösterilmektedir. $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesindeki bantları incelediğimizde D bandı çok düzenli karbonlu malzemelerde aromatik halkalar ile en az altı halkalı aromatiklerin sp^2 bağlı karbon atomlarını ifade etmektedir. D bandı her zaman grafit için yapı bozukluklarını gösterirken amorf karbonlar için gelişimin yapı sıralamasını göstermektedir (M. Li et al., 2018; X. Li et al., 2006). A_1 bandı metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonlarını göstermektedir (Moško et al., 2021). Son olarak G bandı grafit kristallerin varlığını gösteren aromatik halkalı alken $C=C$ sp^2 bağlarını göstermektedir (Peng et al., 2018, 2020; Y. Zhao et al., 2016). $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin I_D/I_G oranı Gauss tepe noktası ile eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen D ve G bandı verileri doğrultusunda 0,8504 olarak belirlenmiştir.



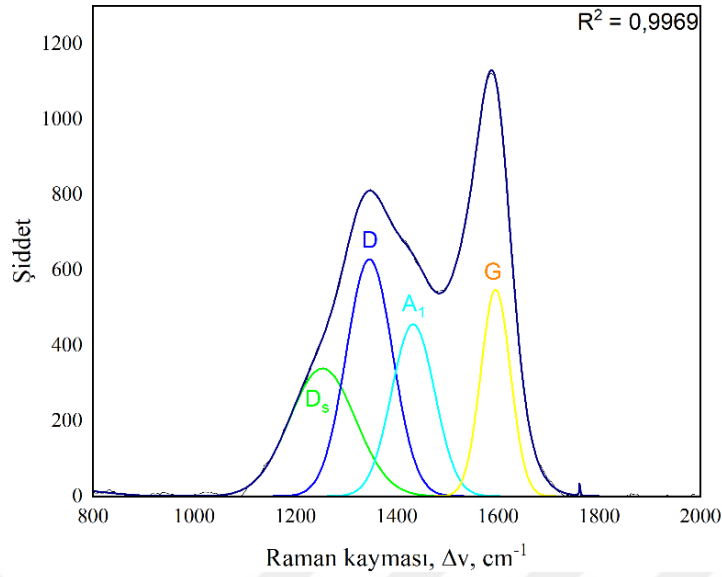
Şekil 7.31. $Al_2O_3@A\dot{C}$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi

Şekil 7.32’de $SnO_2@A\dot{C}$ poroz malzemesinin eğri uydurma işlemi sonrasındaki Raman spektrumu gösterilmektedir. $SnO_2@A\dot{C}$ poroz malzemesindeki bantları incelediğimizde D_s bandı lineer (para) aromatikleri ve D bandı çok düzenli karbonlu malzemelerde aromatik halkalar ile en az altı halkalı aromatiklerin sp^2 bağlı karbon atomlarını ifade etmektedir. D bandı her zaman grafit için yapı bozukluklarını gösterirken amorf karbonlar için gelişimin yapı sıralamasını göstermektedir (Mi Li vd., 2018; X. Li vd., 2006). A_1 bandı metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonlarını ve A_2 bandı 3-5 halkalı aromatiklerin varlığını göstermektedir. Ayrıca A_2 bandı arıtma çamuru bazlı biyokömürlerde varlığı Raman açısından önemli olan 3-5 halkalı poliaramotik hidrokarbonları ifade etmektedir (Moško vd., 2021). G bandı grafit kristallerin varlığını gösteren aromatik halkalı alken $C=C$ sp^2 bağlarını göstermektedir (C. Peng vd., 2018; Yijun Zhao vd., 2016). $SnO_2@A\dot{C}$ poroz malzemesinin I_D/I_G oranı Gauss tepe noktası ile eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen D ve G bandı verileri doğrultusunda 0,8388 olarak belirlenmiştir.



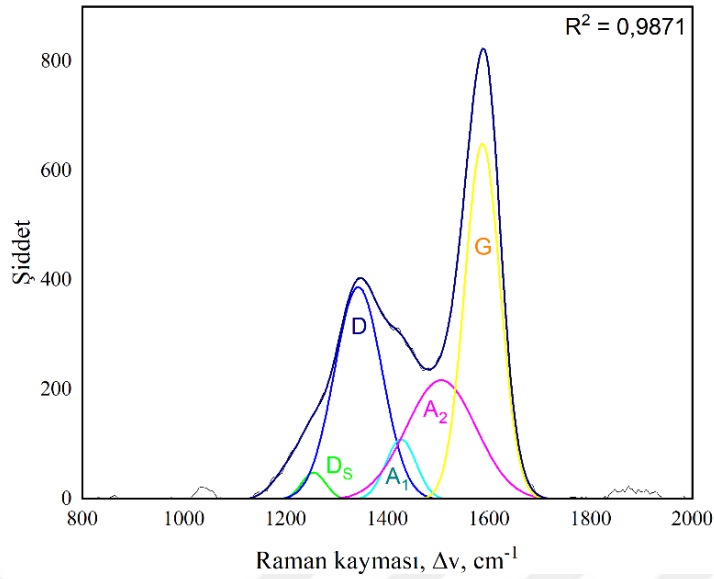
Şekil 7.32. $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi

Şekil 7.33'te $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin eğri uydurma işlemi sonrasındaki Raman spektrumu gösterilmektedir. $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesindeki bantları incelediğimizde Ds bandı lineer (para) aromatikleri ve D bandı çok düzenli karbonlu malzemelerde aromatik halkalar ile en az altı halkalı aromatiklerin sp^2 bağlı karbon atomlarını ifade etmektedir. D bandı her zaman grafit için yapı bozukluklarını gösterirken amorf karbonlar için gelişimin yapı sıralamasını göstermektedir (Mi Li vd., 2018; X. Li vd., 2006). A₁ bandı metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonlarını göstermektedir (Moško vd., 2021). Son olarak G bandı grafit kristallerin varlığını gösteren aromatik halkalı alken $\text{C}=\text{C}$ sp^2 bağlarını göstermektedir (C. Peng vd., 2018; Yijun Zhao vd., 2016). $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin I_D/I_G oranı Gauss tepe noktası ile eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen D ve G bandı verileri doğrultusunda 0,8438 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.33. $AgNO_3@AÇ$ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi

Şekil 7.34'te $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin eğri uydurma işlemi sonrasındaki Raman spektrumu gösterilmektedir. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesindeki bantları incelediğimizde Ds bandı lineer (para) aromatikleri ve D bandı çok düzenli karbonlu malzemelerde aromatik halkalar ile en az altı halkalı aromatiklerin sp^2 bağlı karbon atomlarını ifade etmektedir. D bandı her zaman grafit için yapı bozukluklarını gösterirken amorf karbonlar için gelişimin yapı sıralamasını göstermektedir (Mi Li vd., 2018; X. Li vd., 2006). A₁ bandı metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonlarını ve A₂ bandı 3-5 halkalı aromatiklerin varlığını göstermektedir. Ayrıca A₂ bandı arıtma çamuru bazlı charlarda varlığı Raman açısından önemli olan 3-5 halkalı poliaromotaik hidrokarbonları ifade etmektedir (Moško vd., 2021). G bandı grafit kristallerin varlığını gösteren aromatik halkalı alken $C=C$ sp^2 bağlarını göstermektedir (C. Peng vd., 2018; Yijun Zhao vd., 2016). $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin I_D/I_G oranı Gauss tepe noktası ile eğri uydurma işlemi sonucunda elde edilen D ve G bandı verileri doğrultusunda 0,8462 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.34. *Co(NO₃)₂·6H₂O@AÇ poroz malzemesinin Raman Spektroskopisi*

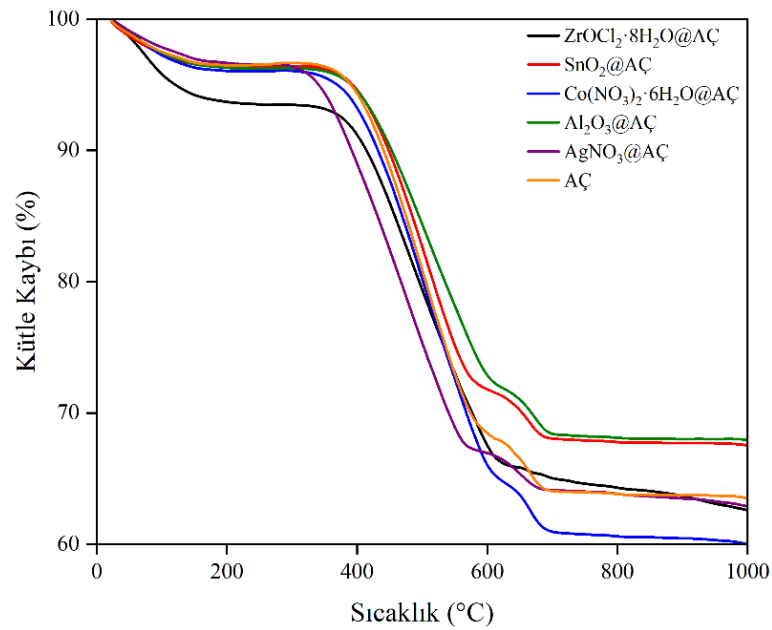
Tablo 7.3'te arıtma çamuru poroz malzemelerinin kusur yapısının ve düzensizlik derecesi hakkında bilgi veren I_D/I_G oranları gösterilmektedir. 600 °C'de kalsinasyon sürecine tabii tutulan malzemelerin I_D/I_G oranları incelendiğinde değerlerin benzer olduğu yani benzer grafitleşme derecesine sahip oldukları görülmektedir. Bu durum literatürde arıtma çamurunun pirolizi ve hidrotermal karbonizasyonu ile elde edilen malzemelerin sıcaklık değişimine bağlı olarak I_D/I_G oranlarının değişiklik göstermesiyle açıklanabilmektedir (Y. Lu vd., 2021; Pei vd., 2021; Qiu vd., 2022; Wan vd., 2021). İnorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin aynı kalsinasyon sıcaklığında karbonlaştırılmış olması G ve D bantlarının benzer yapıda olmasını sağlamaktadır. Ayrıca inorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin literatürdeki arıtma çamurunun 600 °C'de pirolizi ile elde edilen malzemelerden daha düşük I_D/I_G oranına sahip oldukları görülmektedir (Pei vd., 2021; Qiu vd., 2022). Bu durum kalsinasyon süreci ile elde edilen inorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemeler için I_D/I_G oranlarının 1'den küçük olması düşük kusurlu ve yüksek derecede grafitleşme derecesine sahip olduğu göstermektedir (W. Chen vd., 2021; Y. Lu vd., 2021).

Tablo 7.3. İnorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin I_D/I_G oranları

Malzemenin Kodu	I_D/I_G oranı
AÇ	0,8458
$ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$	0,8434
$AgNO_3@AÇ$	0,8438
$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$	0,8462
$Al_2O_3@AÇ$	0,8504
$SnO_2@AÇ$	0,8388

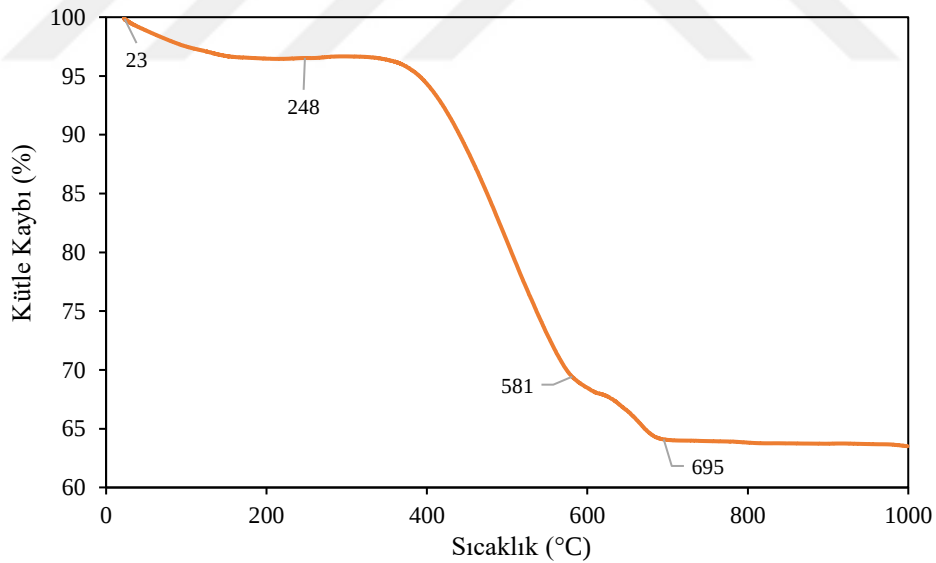
7.8. Termogravimetrik (TGA) Analizlerinin Değerlendirilmesi

TGA analizi, sıcaklık artışı ile birlikte numunelerin kütlelerinde oluşacak değişikliği nicel olarak incelenmesini sağlamaktadır. TGA analizi sonucunda termogram adı verilen eğriler elde edilmektedir. Termogram eğrileri sıcaklık değişimi ile numuneden meydana gelen ağırlık değişimini sıcaklığa karşılık ağırlık ya da sıcaklığa karşılık kütle değişimi olarak vermektedir. Şekil 7.35'te inorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerine ait termogram grafiği gösterilmektedir. Termogram incelendiğinde malzemeler yaklaşık olarak 360 °C'de sonra bozulmaya başlamıştır. Ayrıca malzemelerin termal kararlılıkları birbirinden farklıdır ve bu durum inorganik katkı malzemelerin karakteri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.35. İnorganik katkı ve katkısız arıtma çamuru poroz malzemelerinin termogramı

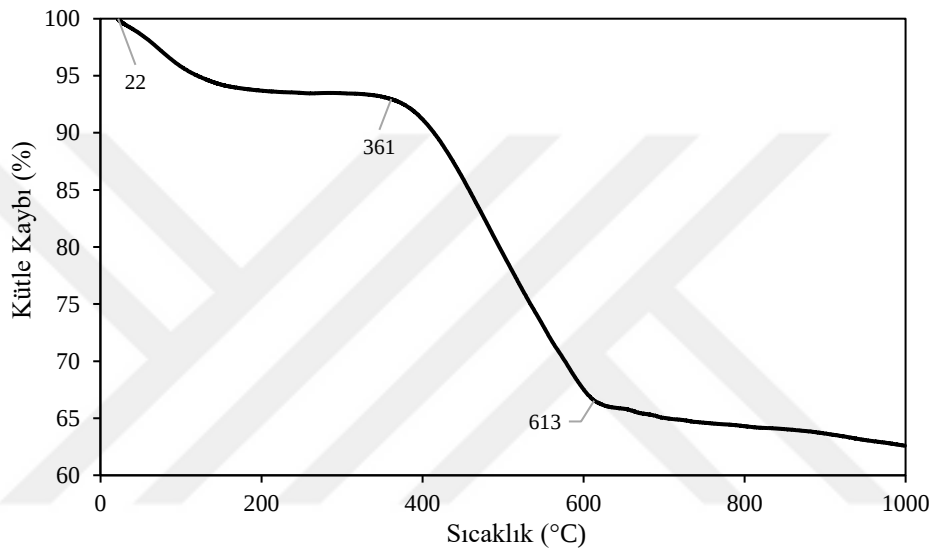
Şekil 7.36’da AÇ poroz malzemesinin termogramı gösterilmektedir. Termogram incelendiğinde malzemenin termal ayrışmasının üç aşamada olduğu görülmektedir. İlk aşama, 23 °C’den 248 °C’ye kadar gözlemlenmiştir. Bu ilk aşama yüzeydeki nemin serbest kalmasına veya serbest bağlı su ve düşük kaynama noktalı uçucuların varlığını göstermektedir (Mian ve Liu, 2019). İkinci aşama 248 °C ile 581 °C arasındaki sıcaklığı içermektedir. Bu aşama hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeleri göstermektedir (Gao vd., 2020; Ghodke vd., 2021). 23 °C’den 581 °C’ye kadar olan bu aralıkta AÇ malzemesinde %32,56’lık önemli bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu durum arıtma çamuru hammaddesinin yüksek karbon içeriğini (%40,18) gösteren elementel analiz sonucunu desteklemektedir. Son olarak üçüncü aşamada 581 °C’den 695 °C’ye kadarki küçük kütle kaybı malzemedeki kalsiyum karbonat ve kül gibi inorganik maddelerin ayrıştığını göstermektedir (Ghodke vd., 2021; Yanlin Wang vd., 2021). Bu aşamada da AÇ malzemesinde %4,95’lik bir kütle kaybı oluşmuştur.



Şekil 7.36. AÇ poroz malzemesinin termogramı

Şekil 7.37’de $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin termogramı gösterilmektedir. Termogram incelendiğinde malzemenin termal ayrışmasının iki aşamada olduğu görülmektedir. İlk aşama, 22 °C’den 361 °C’ye kadar gözlemlenmiştir. Bu ilk aşama yüzeydeki nemin serbest kalmasına veya serbest bağlı su ve düşük kaynama

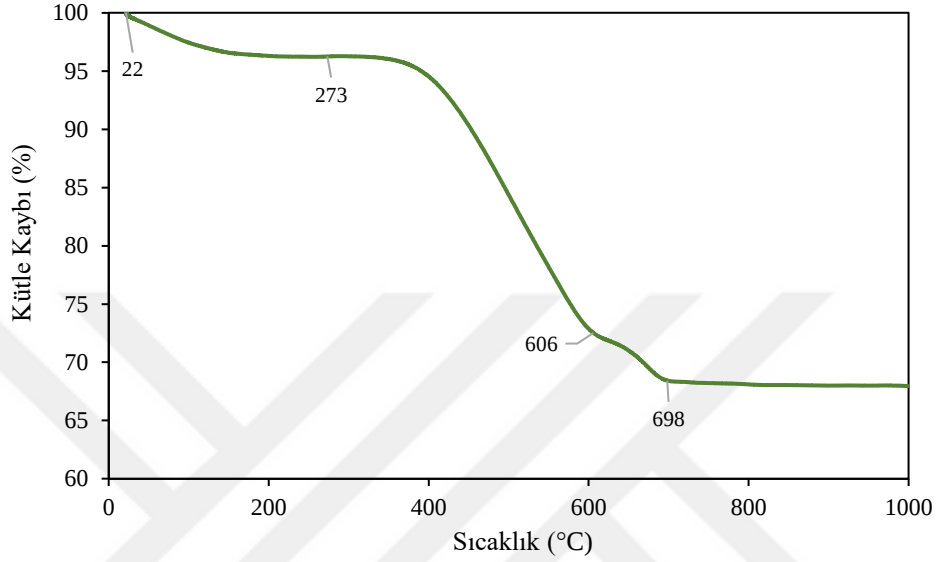
noktalı ile uçucu maddelerin küçük bir kısmının varlığını göstermektedir. 361 °C'den 613 °C'ye kadar olan aşamada hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeleri göstermektedir (Gao vd., 2020; Ghodke vd., 2021; Mian ve Liu, 2019). 22 °C'den 613 °C'ye kadar olan bu aralıkta $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinde %33,45'lik önemli bir kütle kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 7.37. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin termogramı

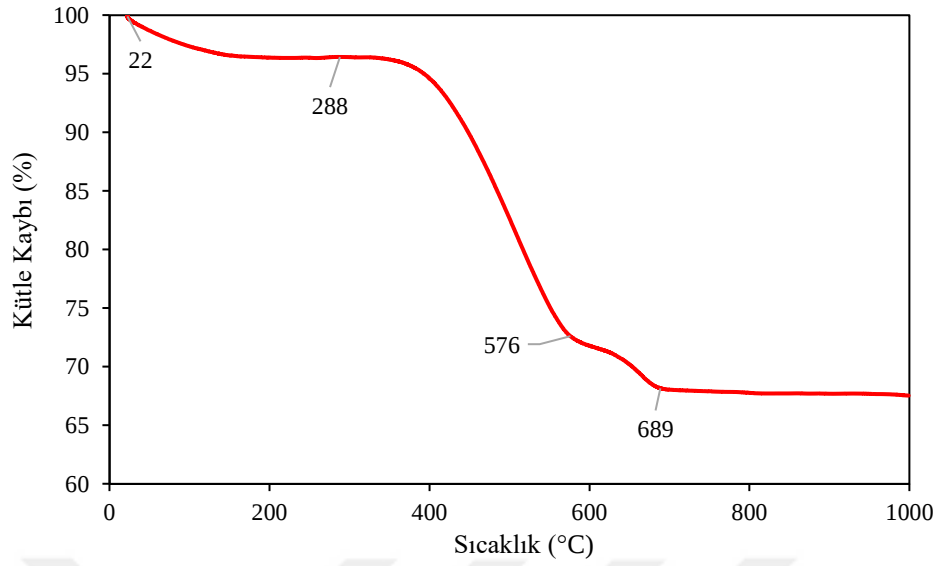
Şekil 7.38'de $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin termogramı gösterilmektedir. Termogram incelendiğinde malzemenin termal ayrışmasının üç aşamada olduğu görülmektedir. İlk aşama, 22 °C'den 273 °C'ye kadar gözlemlenmiştir. Bu ilk aşama yüzeydeki nemin serbest kalmasına veya serbest bağlı su ve düşük kaynama noktalı uçucuların varlığı göstermektedir (Mian ve Liu, 2019). İkinci aşama 273 °C ile 606 °C arasındaki sıcaklığı içermektedir. Bu aşama hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeleri göstermektedir (Gao vd., 2020; Ghodke vd., 2021). 22 °C'den 606 °C'ye kadar olan bu aralıkta $Al_2O_3@A\check{C}$ malzemesinde %27,96'lık önemli bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Bu kütle kaybı $A\check{C}$ ve $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemelerindeki kayıptan oldukça düşüktür. Bu durum malzeme içerisine dahil edilen Al_2O_3 ile içeriğindeki nem ve uçucu madde miktarında bir azalma olduğu ile açıklanabilmektedir. Son olarak 606 °C'den 698

°C'ye kadarki küçük kütle kaybı malzemedeki kalsiyum karbonat ve kül gibi inorganik maddelerin ayrıştığını göstermektedir (Gao vd., 2020; Mian ve Liu, 2019). Bu aşamada da AÇ poroz malzemesinde %4,08'lik bir kütle kaybı oluşmuştur.



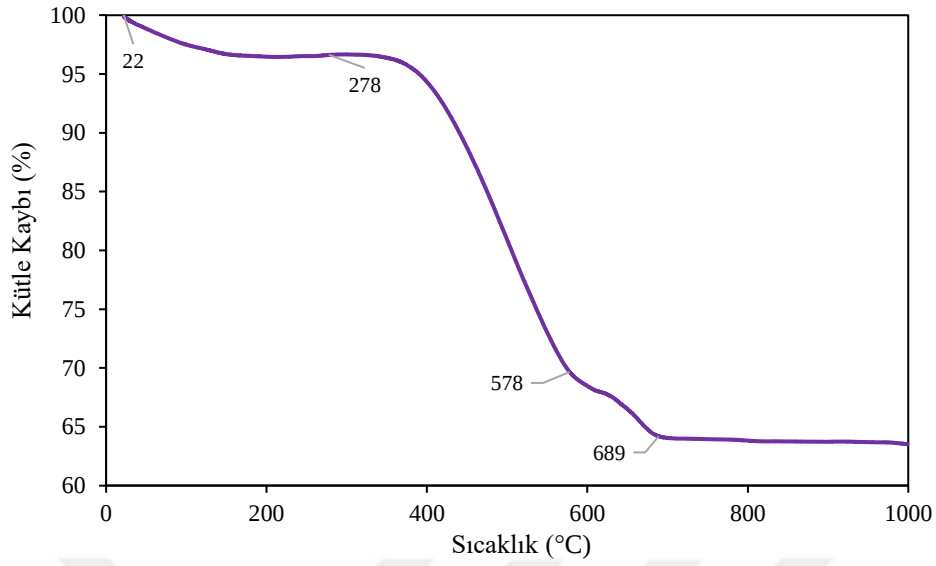
Şekil 7.38. $Al_2O_3@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı

Şekil 7.39'da $SnO_2@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı gösterilmektedir. Termogram incelendiğinde malzemenin termal ayrışmasının üç aşamada olduğu görülmektedir. İlk aşama, 22 °C'den 288 °C'ye kadar gözlemlenmiştir. Bu ilk aşama yüzeydeki nemin serbest kalmasına veya serbest bağlı su ve düşük kaynama noktalı uçucuların varlığı göstermektedir (Mian ve Liu, 2019). İkinci aşama 288 °C ile 576 °C arasındaki sıcaklığı içermektedir. Bu aşama hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeleri göstermektedir (Gao vd., 2020; Ghodke vd., 2021). 22 °C'den 576 °C'ye kadar olan bu aralıkta $SnO_2@AÇ$ poroz malzemesinin $Al_2O_3@AÇ$ poroz malzemesine benzer olarak %28'lik önemli bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Son olarak 576 °C'den 689 °C'ye kadarki küçük kütle kaybı malzemedeki kalsiyum karbonat ve kül gibi inorganik maddelerin ayrıştığını göstermektedir (Gao vd., 2020; Mian ve Liu, 2019). Bu aşamada da $SnO_2@AÇ$ poroz malzemesinde %4,47'lik bir kütle kaybı oluşmuştur.



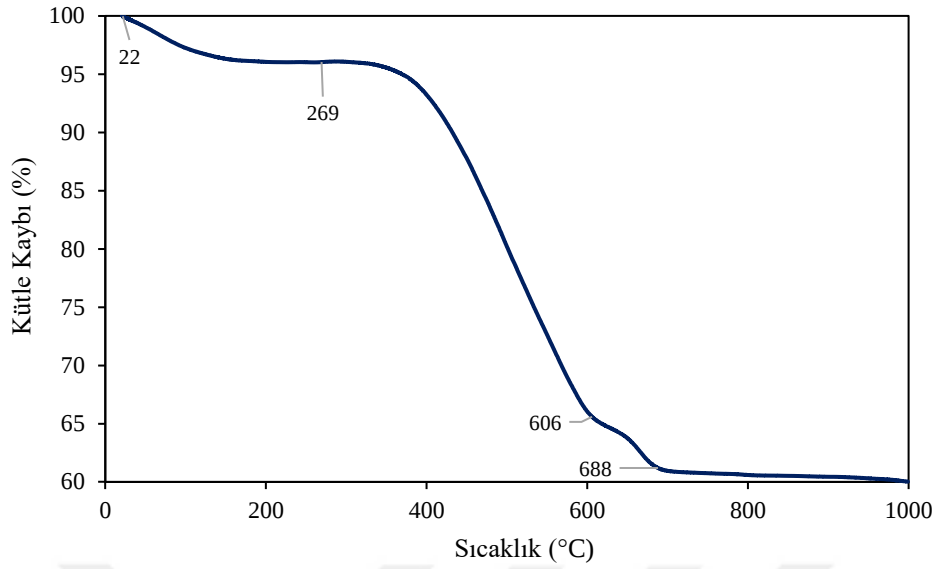
Şekil 7.39. $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin termogramı

Şekil 7.40'ta $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin termogramı gösterilmektedir. Termogram incelendiğinde malzemenin termal ayrışmasının üç aşamada olduğu görülmektedir. İlk aşama, 22 °C'den 278 °C'ye kadar gözlemlenmiştir. Bu ilk aşama yüzeydeki nemin serbest kalmasına veya serbest bağlı su ve düşük kaynama noktalı uçucuların varlığı göstermektedir (Mian ve Liu, 2019). İkinci aşama 278 °C ile 578 °C arasındaki sıcaklığı içermektedir. Bu aşama hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeleri göstermektedir (Gao vd., 2020; Ghodke vd., 2021). 22 °C'den 578 °C'ye kadar olan bu aralıkta $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesi ve $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemelerine benzer olarak %32,73'lük önemli bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Son olarak 578 °C'den 689 °C'ye kadarki küçük kütle kaybı malzemedeki kalsiyum karbonat ve kül gibi inorganik maddelerin ayrıştığını göstermektedir (Gao vd., 2020; Mian ve Liu, 2019). Bu aşamada da $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinde %4,39'luk bir kütle kaybı oluşmuştur.



Şekil 7.40. $AgNO_3@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı

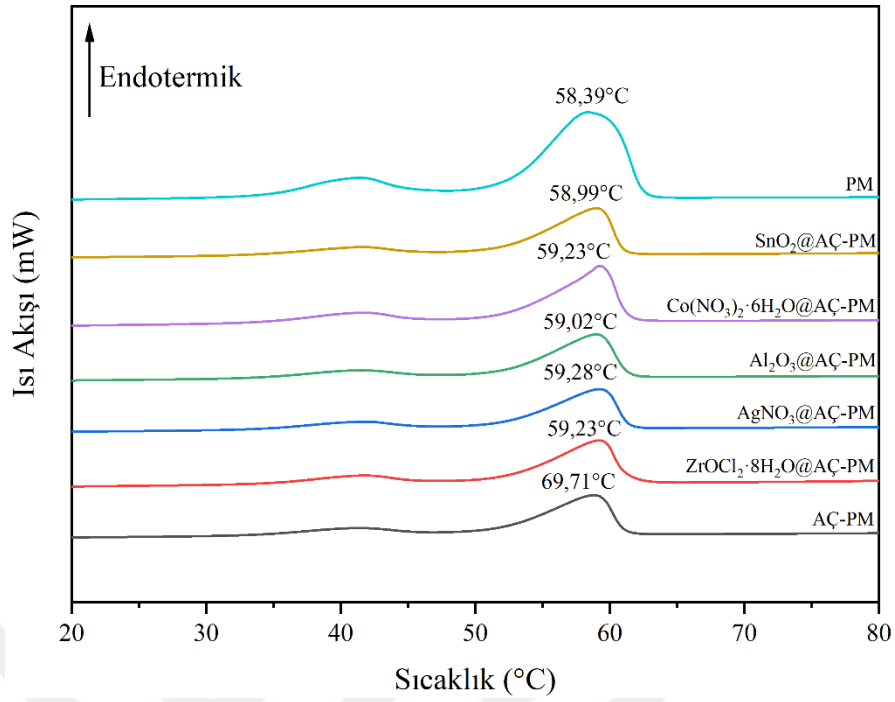
Şekil 7.41’de $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesinin termogramı gösterilmektedir. Termogram incelendiğinde malzemenin termal ayrışmasının üç aşamada olduğu görülmektedir. İlk aşama, 22 °C’den 269 °C’ye kadar gözlemlenmiştir. Bu ilk aşama yüzeydeki nemin serbest kalmasına veya serbest bağlı su ve düşük kaynama noktalı uçucuların varlığı göstermektedir (Mian ve Liu, 2019). İkinci aşama 269 °C ile 606 °C arasındaki sıcaklığı içermektedir. Bu aşama hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeleri göstermektedir (Gao vd., 2020; Ghodke vd., 2021). 22 °C’den 606 °C’ye kadar olan bu aralıkta $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesi, $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@AÇ$ ve $AgNO_3@AÇ$ poroz malzemelerine yakın olarak %34,83’lük önemli bir kütle kaybı meydana gelmiştir. Son olarak 606 °C’den 688 °C’ye kadarki küçük kütle kaybı malzemedeki kalsiyum karbonat ve kül gibi inorganik maddelerin ayrıştığını göstermektedir (Gao vd., 2020; Mian ve Liu, 2019). Bu aşamada da $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ poroz malzemesinde %5,18’lik bir kütle kaybı oluşmuştur.



Şekil 7.41. $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin termogramı

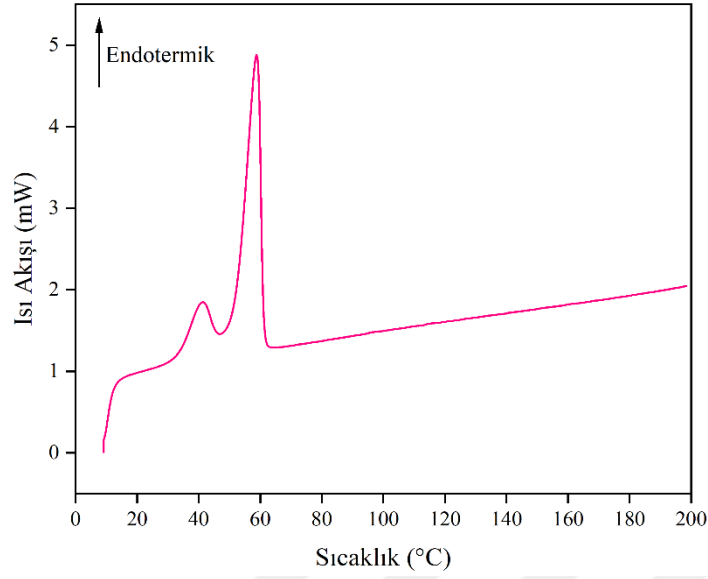
7.9. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizlerinin Değerlendirilmesi

Parafin kaplı inorganik katkılı ve katkısız poroz malzemelerin erime noktaları ve gizli ısıları gibi termal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla DSC analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.42’de parafin emdirilmiş inorganik katkılı ve katkısız poroz malzemelerin DSC termogramı gösterilmektedir. DSC termogramı incelendiğinde destek malzemesi olarak kullanılan malzemelere dahil edilen inorganik maddelerin erime sıcaklıklarında farklılıklar oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca parafin emdirilmiş inorganik katkılı ve katkısız poroz malzemelerin DSC termogramlarında parafine benzer biçimde katı-katı faz değişimini temsil eden küçük tepe noktası ve katı-sıvı faz değişimini (erime süreci) ifade eden ana tepe noktası olmak üzere iki ısı soğurucu tepe noktası bulunduğu görülmektedir (Fang vd., 2010; Z. Zhang ve Fang, 2006). Bu durum parafin (PM) ve parafin emdirilmiş inorganik katkılı ve katkısız poroz malzemelerinin gözenekli karbon iskeletinin parafin katı-sıvı faz geçişini etkilemediğini göstermektedir (Sheng vd., 2020). DSC termogramı incelendiğinde en yüksek erime sıcaklığına sahip olan malzemenin inorganik madde içermeyen AÇ-parafin FDM ve en düşük erime sıcaklığı kalay (IV) oksit (SnO_2) içeren $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ -parafin FDM olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ -parafin ve $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ -parafin FDM’lerin erime sıcaklıkları birbirleri ile aynıdır.



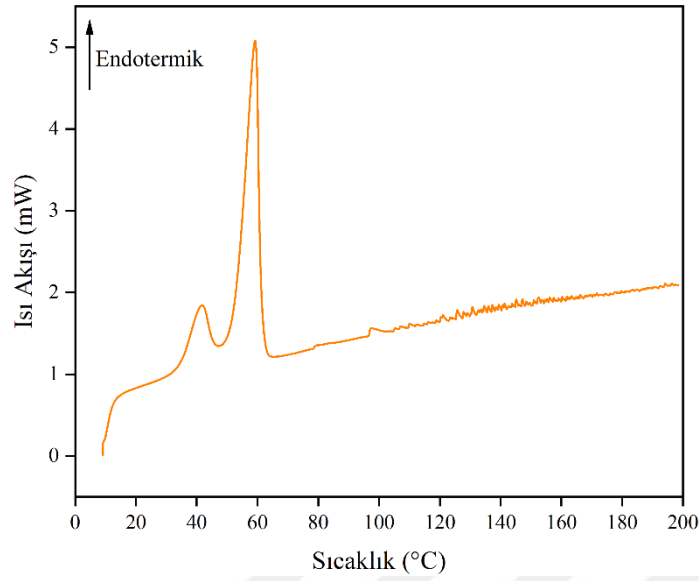
Şekil 7.42. Parafin ve parafin emdirilmiş arıtma çamuru poroz malzemeleri FDM'lerin termogramı

Şekil 7.43'te AÇ-Parafin FDM'nin DSC termogramı gösterilmektedir. AÇ-Parafin FDM'sine ait DSC termogramı incelendiğinde iki tepe noktasına sahip olduğu görülmektedir. Keskin veya ana tepe noktası AÇ-Parafin FDM'nin katı-sıvı faz değişimini (ilk erime sıcaklığı (T_{IE}): 51,97 °C, erime sıcaklığı tepe noktası (T_{TE}): 69,71 °C ve son erime sıcaklığı (T_{SE}): 169,24 °C) temsil ederken ana tepe noktasının solunda yer alan küçük tepe AÇ-Parafin FDM'nin katı-katı faz geçişine (geçiş sıcaklığı) (ilk dönüşüm sıcaklığı (T_{ID}): 33,22 °C, tepe dönüşüm sıcaklığı (T_{TD}): 41,02 °C ve son dönüşüm sıcaklığı (T_{SD}): 45,53 °C) karşılık gelmektedir. AÇ-Parafin FDM'nin toplam erime gizli ısı (ΔH_{TE}); sırasıyla katı-katı (ΔH_{KK}) ve katı-sıvı (ΔH_{KS}) faz değişimlerinin gizli ısıları olan 9,7609 J/g ile -4,0423 J/g'nin toplamı olan 5,7186 J/g'dır.



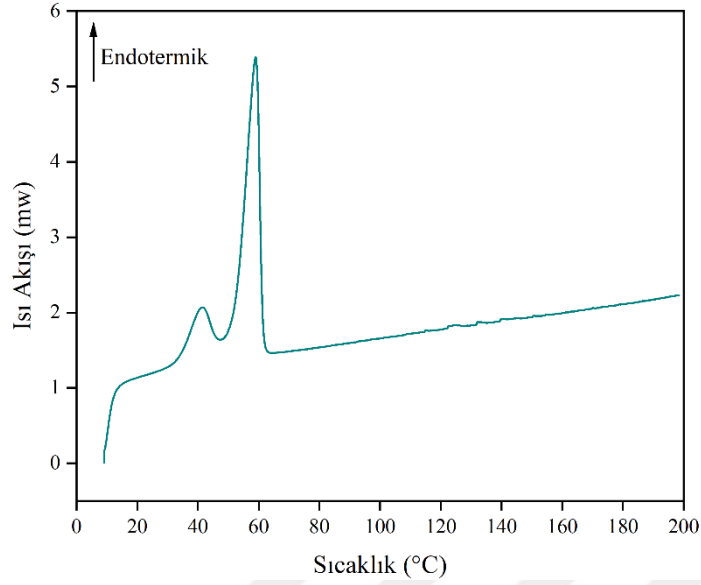
Şekil 7.43. AÇ-Parafin FDM'nin termogramı

Şekil 7.44'te $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin FDM}$ 'nin DSC termogramı gösterilmektedir. $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin FDM}$ 'nin DSC termogramı incelendiğinde iki tepe noktasına sahip olduğu görülmektedir. Keskin veya ana tepe noktası $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin FDM}$ 'nin katı-sıvı faz değişimini (ilk erime sıcaklığı (T_{IE}): 52,52 °C, erime sıcaklığı tepe noktası (T_{TE}): 59,23 °C ve son erime sıcaklığı (T_{SE}): 61,17 °C) temsil ederken ana tepe noktasının solunda yer alan küçük tepe $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin FDM}$ 'nin katı-katı faz geçişine (geçiş sıcaklığı) (ilk dönüşüm sıcaklığı (T_{ID}): 34,22 °C, tepe dönüşüm sıcaklığı (T_{TD}): 41,65 °C ve son dönüşüm sıcaklığı (T_{SD}): 45,30 °C) karşılık gelmektedir. $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin FDM}$ 'nin toplam erime gizli ısısı (ΔH_{TE}); sırasıyla katı-katı (ΔH_{KK}) ve katı-sıvı (ΔH_{KS}) faz değişimlerinin gizli ısısı olan 11,6269 J/g ile 62,5292 J/g'ın toplamı olan 74,1561 J/g'dır.



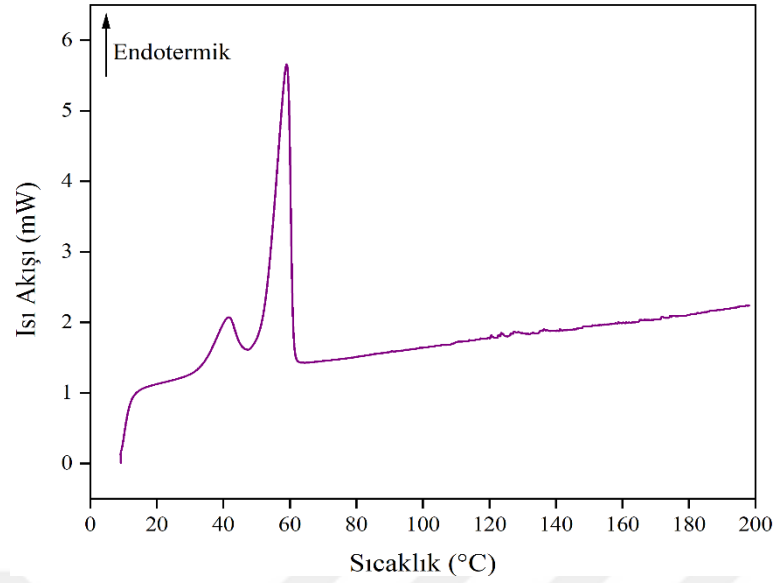
Şekil 7.44. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ -Parafin FDM'nin termogramı

Şekil 7.45'te $Al_2O_3@A\check{C}$ -Parafin FDM'sinin DSC termogramı gösterilmektedir. $Al_2O_3@A\check{C}$ -Parafin FDM'sinin DSC termogramı incelendiğinde iki tepe noktasına sahip olduğu görülmektedir. Keskin veya ana tepe noktası $Al_2O_3@A\check{C}$ -Parafin FDM'nin katı-sıvı faz değişimini (ilk erime sıcaklığı (T_{IE}): 52,39 °C, erime sıcaklığı tepe noktası (T_{TE}): 59,02 °C ve son erime sıcaklığı (T_{SE}): 61,24 °C) temsil ederken ana tepe noktasının solunda yer alan küçük tepe $Al_2O_3@A\check{C}$ -Parafin FDM'nin katı-katı faz geçişine (geçiş sıcaklığı) (ilk dönüşüm sıcaklığı (T_{ID}): 33,01 °C, tepe dönüşüm sıcaklığı (T_{TD}): 41,32 °C ve son dönüşüm sıcaklığı (T_{SD}): 45,72 °C) karşılık gelmektedir. $Al_2O_3@A\check{C}$ -Parafin FDM'nin toplam erime gizli ısısı (ΔH_{TE}); sırasıyla katı-katı (ΔH_{KK}) ve katı-sıvı (ΔH_{KS}) faz değişimlerinin gizli ısısı olan 10,1688 J/g ile 61,6961 J/g'ın toplamı olan 71,8649 J/g'dır.



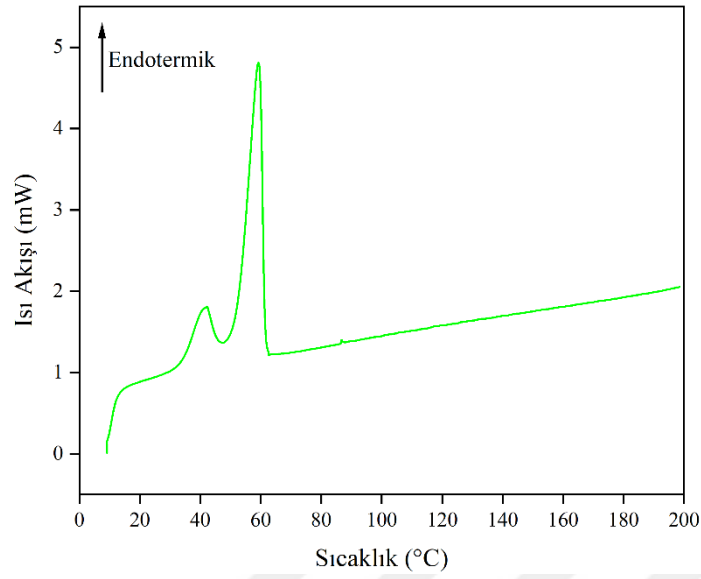
Şekil 7.45. $Al_2O_3@AÇ$ -Parafin FDM'nin termogramı

Şekil 7.46'da $SnO_2@AÇ$ -Parafin FDM'nin DSC termogramı gösterilmektedir. $SnO_2@AÇ$ -Parafin FDM'nin DSC termogramı incelendiğinde iki tepe noktasına sahip olduğu görülmektedir. Keskin veya ana tepe noktası $SnO_2@AÇ$ -Parafin FDM'nin katı-sıvı faz değişimini (ilk erime sıcaklığı (T_{IE}): 52,31 °C, erime sıcaklığı tepe noktası (T_{TE}): 58,99 °C ve son erime sıcaklığı (T_{SE}): 60,94 °C) temsil ederken ana tepe noktasının solunda yer alan küçük tepe $SnO_2@AÇ$ -Parafin FDM'nin katı-katı faz geçişine (geçiş sıcaklığı) (ilk dönüşüm sıcaklığı (T_{ID}): 33,51 °C, tepe dönüşüm sıcaklığı (T_{TD}): 41,43 °C ve son dönüşüm sıcaklığı (T_{SD}): 45,09 °C) karşılık gelmektedir. $SnO_2@AÇ$ -Parafin FDM'nin toplam erime gizli ısısı (ΔH_{TE}); sırasıyla katı-katı (ΔH_{KK}) ve katı-sıvı (ΔH_{KS}) faz değişimlerinin gizli ısısı olan 9,1161 J/g ile 66,1626 J/g'ın toplamı olan 64,2787 J/g'dır.



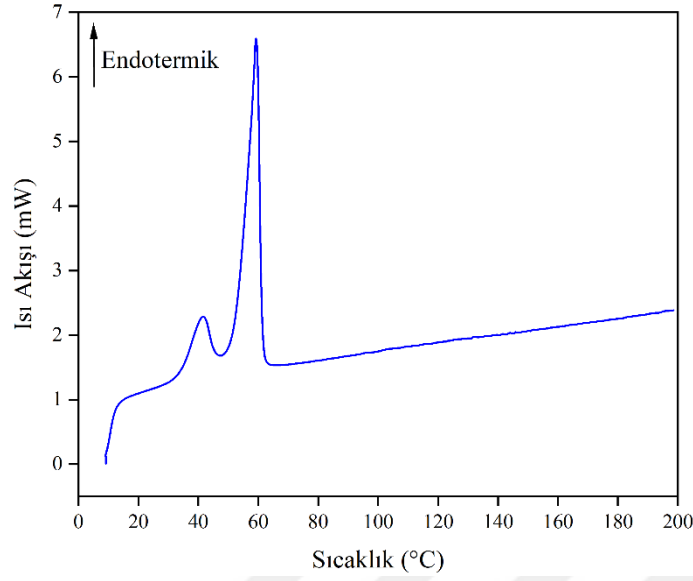
Şekil 7.46. $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin termogramı

Şekil 7.47'de $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin DSC termogramı gösterilmektedir. $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin DSC termogramı incelendiğinde iki tepe noktasına sahip olduğu görülmektedir. Keskin veya ana tepe noktası $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin katı-sıvı faz değişimini (ilk erime sıcaklığı (T_{IE}): 52,23 °C, erime sıcaklığı tepe noktası (T_{TE}): 59,28 °C ve son erime sıcaklığı (T_{SE}): 61,32 °C) temsil ederken ana tepe noktasının solunda yer alan küçük tepe $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin katı-katı faz geçişine (geçiş sıcaklığı) (ilk dönüşüm sıcaklığı (T_{ID}): 33,95 °C, tepe dönüşüm sıcaklığı (T_{TD}): 42,25 °C ve son dönüşüm sıcaklığı (T_{SD}): 45,30 °C) karşılık gelmektedir. $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin toplam erime gizli ısısı (ΔH_{TE}); sırasıyla katı-katı (ΔH_{KK}) ve katı-sıvı (ΔH_{KS}) faz değişimlerinin gizli ısısı olan 9,1928 J/g ile 58,6683 J/g'ın toplamı olan 67,8611 J/g'dır.



Şekil 7.47. $AgNO_3@AÇ$ -Parafin FDM'nin termogramı

Şekil 7.48'de $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ -Parafin FDM'nin DSC termogramı gösterilmektedir. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ -Parafin FDM'nin DSC termogramı incelendiğinde iki tepe noktasına sahip olduğu görülmektedir. Keskin veya ana tepe noktası $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ -Parafin FDM'nin katı-sıvı faz değişimini (ilk erime sıcaklığı (T_{IE}): 54,92 °C, erime sıcaklığı tepe noktası (T_{TE}): 59,23 °C ve son erime sıcaklığı (T_{SE}): 61,16 °C) temsil ederken ana tepe noktasının solunda yer alan küçük tepe $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ -Parafin FDM'nin katı-katı faz geçişine (geçiş sıcaklığı) (ilk dönüşüm sıcaklığı (T_{ID}): 33,43 °C, tepe dönüşüm sıcaklığı (T_{TD}): 41,36 °C ve son dönüşüm sıcaklığı (T_{SD}): 45,34 °C) karşılık gelmektedir. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@AÇ$ -Parafin FDM'nin toplam erime gizli ısısı (ΔH_{TE}); sırasıyla katı-katı (ΔH_{KK}) ve katı-sıvı (ΔH_{KS}) faz değişimlerinin gizli ısısı olan 12,0278 J/g ile 64,0495 J/g'ın toplamı olan 76,0773 J/g'dır.



Şekil 7.48. $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O@A\check{C}$ -Parafin FDM'nin termogramı

Tablo 7.4'te çalışma kapsamında hazırlanan malzemeler ve literatürde yer alan malzemelerin termal özellikleri gösterilmektedir. Tabloda görüldüğü üzere parafin emdirilmiş malzemelerin erime sıcaklığı parafinin erime sıcaklığına benzerdir. Çalışma kapsamında parafin emdirilmiş FDM'lerin gizli ısı değerleri, parafin gizli ısısının yaklaşık olarak yarısı kadardır. Bu nedenle, çalışmada hazırlanan parafin emdirilmiş FDM'lerin termal enerji depolamada umut verici bir geleceğe sahip olduğunu söylemek mümkündür.

Tablo 7.4. Çalışmada hazırlanmış malzemelerin ve literatürdeki malzemelerin termal özelliklerinin karşılaştırılması

Destek Malzemesi	Faz Değişim Malzemeleri	Erime Sıcaklığı (°C)	Gizli Isı (J/g)	Kaynak
Genişletilmiş grafit	Parafin mum	31,85/48,93	46,55/114,9	(Z. Zhang ve Fang, 2006)
Genişletilmiş grafit	Parafin mum	44,95	126,4	(Cheng vd., 2017)
Hurma kabuğu çekirdeği yağı-Aktif karbon	Parafin mum	31,6	57,3	(Chin vd., 2020)
Grafen oksit modifiye etilen propilen dien monomer	Parafin mum	42,88	99,05	(Ding vd., 2020)
3 boyutlu karbon köpük	Parafin mum	59,42/61,62	118,2/131,52	(Ola vd., 2020)

-	Parafin mum	58,39	150,6972	-
Atık çamur (AÇ) malzemesi	Parafin mum	69,71	5,7186	-
ZrOCl ₂ ·8H ₂ O katkılı AÇ malzemesi	Parafin mum	59,23	74,1561	-
AgNO ₃ katkılı AÇ malzemesi	Parafin mum	59,28	67,8611	-
Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O katkılı AÇ malzemesi	Parafin mum	59,23	76,0773	-
Al ₂ O ₃ katkılı AÇ malzemesi	Parafin mum	59,02	71,8649	-
SnO ₂ katkılı AÇ malzemesi	Parafin mum	58,99	64,2787	-

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında T.C. Eskişehir Büyükşehir Belediyesi ESKİ Genel Müdürlüğü Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisinden temin edilen arıtma çamuru, akrilik reçineler (SAK ve VAK), KMS ve inorganik bileşikler kullanılarak poroz malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen poroz malzemelere parafin emdirilmiş FDM'lerin termal enerji depolama sürecinde kullanılam potansiyeli kısa analiz, elementel analiz, porozite testi, FTIR, Raman spektroskopisi, XRD, TGA ve DSC analizleri gerçekleştirilerek incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ❖ Arıtma çamuru hammaddesinin uçucu madde (%30,06), kül (%27,17) ve nem (%28,15) içeriğinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun yanında yapılan elementel analiz sonucunda arıtma çamuru hammaddesinin karbon (C) içeriğinin (%40,18) literatürdeki çalışmalara benzer olarak yüksek olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Arıtma çamuru hammaddelerinden elde edilen inorganik katkılı ve katkısız poroz malzemelerin porozite değerleri incelendiğinde inorganik katkı içermeyen AÇ poroz malzemesinin porozite yüzdesinin %94 olduğu belirlenmiştir. İnorganik katkı eklenen poroz malzemeler incelendiğinde Co(NO₃)₂·6H₂O@AÇ (%104,16) ve ZrOCl₂·8H₂O@AÇ (%98,41) poroz malzemelerinin yüksek poroziteye sahip olduğu belirlenmiştir.
- ❖ Arıtma çamuru hammaddesinin FT-IR spektrumu incelendiğinde alkoller, karboksilik asitler ve amid/aminler gibi bileşiklerin mevcudiyetini gösteren

O-H ve N-H gerilme titreşimleri belirlenmiştir. Bunun yanında lipidlerdeki bir alifatik zincirin varlığını ifade eden C-H'nin asimetrik ve simetrik gerilme titreşimleri, karbon çift bağ oksijen (C=O) arasındaki germe titreşimlerini içeren bir amid I bağı, amid II bandı ile nitritin (N-O gerilmesi) belirlenmiştir. Ayrıca parmak izi bölgesinde yer alan kuvvetli geniş bant Si-O ve Al-O bağlarının varlığını göstermiştir.

❖ AÇ malzemesinin FT-IR spektrumu incelendiğinde arıtma çamuru hammaddesine benzer olarak alkoller, karboksilik asitler, amid/aminler, lipidler, amid I ve amid II bağının varlığı belirlenmiştir. Bunun yanında parmak izi bölgesinde yer alan kuvvetli geniş ve kuvvetli bandın polisakkaritin C-O gerilmesine ve silikatın Si-O gerilmesine karşılık geldiği belirlenmiştir. Bu durum AÇ hammaddesinin organik bağlarını taşıdığı ve yapının kimyasal olarak değişime uğramadığını göstermiştir. FTIR analizleri sonucu TGA analizi sonucunda belirlenen nem, hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeler ile uyumludur. Raman spektroskopisi analizi sonucunda malzemenin kristal yapıların düzeni hakkında bilgi veren G (aromatik halkalı alken C=C sp² bağları), G_R (küçük aromatik halkaları (3-5 halka)), D, D_S ((para) aromatikleri), ve A₁ (metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonları) bantlarını içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin yapı bozukluklarını gösteren I_D/I_G oranının 0,8458 olduğu tespit edilmiştir. Organik bağların yanında inorganik bağ ve kristal yapıları incelendiğinde AÇ poroz malzemesinin kuartz, kalsit, karbon ve dolomit bileşiklerini içerdiği belirlenmiştir.

❖ AÇ poroz malzemesine parafin emdirilmiş FDM'nin ve parafinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı ve fiziksel olarak bütünleştiği belirlenmiştir. AÇ poroz malzemesinin SEM görüntüleri incelendiğinde kümeleşmiş ağ yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Parafin emdirilmiş AÇ poroz malzemesi FDM'nin DSC analizi incelendiğinde erime sıcaklığının 69,71 °C ve gizli ısısının 5,7186 J/g olduğu belirlenmiştir. Bu durum parafinin malzeme yapısında oldukça düşük oranda tutulduğunu ve bunun malzemenin termal enerji depolama potansiyelinin önüne geçtiğini göstermektedir.

- ❖ $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin özellikleri incelendiğinde FT-IR spektrumunun AÇ poroz malzemesine benzer olarak -OH grupları, -NH grupları ve ve silikatın Si-O gerilmesi belirlenmiştir. Bunun yanında izotiyosiyanat (-NCS) bandı, karbonil, karboksilat ve tiyoeter $\text{CH}_3\text{-S-}$ (C-S gerilmesi) bileşiklerinin de malzemede mevcut olduğu belirlenmiştir. FT-IR analizleri sonucu ve TGA analizi sonucunda belirlenen nem, hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeler ile uyumludur. Raman spektroskopisi analizi sonucunda malzemenin kristal yapıların düzeni hakkında bilgi veren G (aromatik halkalı alken $\text{C}=\text{C}$ sp^2 bağları), D, A_1 (metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonları) ve A_2 (3-5 halkalı poliaromatik hidrokarbonları) bantlarını içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin yapı bozukluklarını gösteren $\text{I}_\text{D}/\text{I}_\text{G}$ oranının 0,8434 olduğu tespit edilmiştir. Organik bağların yanında inorganik bağ ve kristal yapıları incelendiğinde $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin kuartz, zirkon ve anortit bileşiklerini içerdiği belirlenmiştir.
- ❖ $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesine parafin emdirilmiş FDM ve parafinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı ve fiziksel olarak bütünleştiği belirlenmiştir. Yüksek poroziteye sahip olan $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin SEM görüntüleri incelendiğinde keskin ağ yapısı ile malzemeye emdirilen parafinin tutulumunu arttıracakı tespit edilmiştir. Parafin emdirilmiş $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin DSC analizi incelendiğinde erime sıcaklığının $59,23^\circ\text{C}$ ve gizli ısısının $74,1561 \text{ J/g}$ olduğu belirlenmiştir. Bu durum parafinin malzeme yapısında yüksek oranda tutulduğunu ve bunun termal enerji depolama potansiyelini arttırdığını göstermiştir.
- ❖ $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin özellikleri incelendiğinde FT-IR spektrumunun AÇ poroz malzemesine benzer olarak -OH grupları ve C-O gerilmesi belirlenmiştir. Bunun yanında alkil gruplarının - CH_2 ve - CH_3 gerilme titreşimleri, birincil ve ikincil alkollerin C-C-O düzlem içi gerilmesini, -CH deformasyonu ve bromo bileşiklerinin (C-Br gerilmesi) mevcut olduğu tespit edilmiştir. FT-IR analizleri sonucu TGA analizi sonucunda belirlenen nem, hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit,

polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeler, kalsiyum karbonat ve kül gibi inorganik maddeler ile uyumludur. Raman spektroskopisi analizi sonucunda malzemenin kristal yapıların düzeni hakkında bilgi veren G (aromatik halkalı alken $C=C$ sp^2 bağları), D ve A_1 (metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonları) bantlarını içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin yapı bozukluklarını gösteren I_D/I_G oranının 0,8504 olduğu tespit edilmiştir. Organik bağların yanında inorganik bağ ve kristal yapıları incelendiğinde $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O@A\check{C}$ poroz malzemesinin kuartz, kalsit, dolomit ve anortit bileşiklerini içerdiği belirlenmiştir.

- ❖ $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesine parafin emdirilmiş FDM ve parafinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı ve fiziksel olarak bütünleştiği belirlenmiştir. Malzemenin SEM görüntüleri incelendiğinde Al_2O_3 inorganik maddesinin yapıdaki gözenekler arasına girerek poroziteyi azalttığı belirlenmiştir. Parafin emdirilmiş $Al_2O_3@A\check{C}$ poroz malzemesinin DSC analizi incelendiğinde erime sıcaklığının $59,28^\circ C$ ve gizli ısısının $67,8611 J/g$ olduğu belirlenmiştir. Bu durum parafinin malzeme yapısında tutulumunun azaldığı ve bunun termal enerji depolama potansiyelini azalttığını göstermiştir.
- ❖ $SnO_2@A\check{C}$ poroz malzemesinin özellikleri incelendiğinde FT-IR spektrumunun terminal (uç) alkileri $C\equiv C$, C-O gerilme titreşim bandı, C-O gerilme titreşiminden görüleceği üzere birincil ve ikincil alkollerin C-C-O düzlem içi gerilmesini ve -CH deformasyonunun (polifenoller) mevcut olduğu tespit edilmiştir. FT-IR analizleri sonucu TGA analizi sonucunda belirlenen nem, hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeler ile uyumludur. Raman spektroskopisi analizi sonucunda malzemenin kristal yapıların düzeni hakkında bilgi veren G (aromatik halkalı alken $C=C$ sp^2 bağları), D D_s ((para) aromatikleri), A_1 (metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonları) ve A_2 (3-5 halkalı poliaromatik hidrokarbonları) bantlarını içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin yapı bozukluklarını gösteren I_D/I_G oranının 0,8388 olduğu tespit edilmiştir. Organik bağların yanında

inorganik bağ ve kristal yapıları incelendiğinde $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin kalsit ve kalsiterit bileşiklerini içerdiği belirlenmiştir.

- ❖ $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesine parafin emdirilmiş FDM ve parafinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı ve fiziksel olarak bütünleştiği belirlenmiştir. Malzemenin SEM görüntüleri incelendiğinde keskin ağ yapısına sahip olduğu poroziteyi arttırdığını belirlenmiştir. Parafin kaplı $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin DSC analizi incelendiğinde erime sıcaklığının $58,99\text{ }^\circ\text{C}$ ve gizli ısısının $64,2787\text{ J/g}$ olduğu belirlenmiştir. Bu durum parafinin malzeme yapısında tutulumunun sağlandığını ve bunun termal enerji depolama potansiyelini arttırdığını göstermiştir.
- ❖ $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin özellikleri incelendiğinde FT-IR spektrumunun $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin FT-IR spektrumuna benzer olduğu tespit edilmiştir. FT-IR analizleri ve TGA analizi sonucunda belirlenen nem, hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeler, kalsiyum karbonat ve kül gibi inorganik maddeler ile uyumludur. Raman spektroskopisi analizi sonucunda malzemenin kristal yapıların düzeni hakkında bilgi veren G (aromatik halkalı alken $\text{C}=\text{C}$ sp^2 bağları), D, D_s ((para) aromatikleri) ve A_1 (metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonları) bantlarını içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin yapı bozukluklarını gösteren $\text{I}_\text{D}/\text{I}_\text{G}$ oranının $0,8438$ olduğu tespit edilmiştir. Organik bağların yanında inorganik bağ ve kristal yapıları incelendiğinde $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin kuartz, kalsit, dolomit ve gümüş bileşiklerini içerdiği belirlenmiştir.
- ❖ $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesine parafin emdirilmiş FDM ve parafinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı ve fiziksel olarak bütünleştiği belirlenmiştir. Malzemenin SEM görüntüleri incelendiğinde ağ yapısına sahip olduğu ve homojen dağılıma sahip gözenekler içerdiği belirlenmiştir. Parafin kaplı $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin DSC analizi incelendiğinde erime sıcaklığının $59,28\text{ }^\circ\text{C}$ ve gizli ısısının $59,28\text{ J/g}$ olduğu belirlenmiştir. Bu durum parafinin malzeme

yapısında tutulumunun sağlandığı ve termal enerji depolama potansiyeli oluşturduğunu göstermiştir.

- ❖ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin özellikleri incelendiğinde FT-IR spektrumunda propadien, keten, izosiyanat, izotiyosiyanat ($\text{X} = \text{C} = \text{Y}$), birincil ve ikincil aminler ve amidlerin N-H bandı, karbonat iyonu ile alifatik bromo bileşiklerinin (C-Br gerilmesini) mevcut olduğu tespit edilmiştir. FT-IR analizleri sonucu TGA analizi sonucunda belirlenen nem, hidrokarbonlar, proteinler, karboksilik asit, polisakaritler ve alifatik bileşiklerin ayrışması ile oluşan uçucu maddeler ile uyumludur. Raman spektroskopisi analizi sonucunda malzemenin kristal yapıların düzeni hakkında bilgi veren G (aromatik halkalı alken $\text{C}=\text{C}$ sp^2 bağları), D, D_s ((para) aromatikleri), A_1 (metil gruplarından (poli)aromatik hidrokarbonları) ve A_2 (3-5 halkalı poliaromatik hidrokarbonları) bantlarını içerdiği belirlenmiştir. Ayrıca malzemenin yapı bozukluklarını gösteren $\text{I}_\text{D}/\text{I}_\text{G}$ oranının 0,8462 olduğu tespit edilmiştir. Organik bağların yanında inorganik bağ ve kristal yapıları incelendiğinde $\text{SnO}_2@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin kuartz, kalsit, dolomit ve anortit bileşiklerini içerdiği belirlenmiştir.
- ❖ $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ poroz malzemesine parafin emdirilmiş FDM ve parafinin fonksiyonel grupları arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon olmadığı ve fiziksel olarak bütünleştiği belirlenmiştir. Malzemenin SEM görüntüleri incelendiğinde birbirleri ile bağlantılı olmayan ve yığın halinde toplanmış formda kümeleşmiş yapılardan meydana geldiği belirlenmiştir. Parafin kaplı $\text{AgNO}_3@\text{AÇ}$ poroz malzemesinin DSC analizi incelendiğinde erime sıcaklığının $59,23^\circ\text{C}$ ve gizli ısısının $76,0773 \text{ J/g}$ olduğu belirlenmiştir. Bu durum parafinin malzeme yapısında tutulumunun sağladığını ve termal enerji depolama potansiyelini arttırdığını göstermiştir.

Sonuç olarak tez çalışması kapsamında hazırlanan inorganik katkılı ve katkısız malzemeler arasında yüksek poroziteye sahip $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin termal enerji depolama kapasitesinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ}$ -Parafin FDM'nin termal enerji depolama sürecinde kullanılan parafin, FDM'nin gizli ısısının yaklaşık olarak yarısını depoda edebilmektedir. Malzemenin termal enerji depolama kapasitesinin artırılmasında porozitenin artırılması

için çalışmada kullanılan SAK ve VAK akrilik reçineler yerine farklı ticari reçinelerin kullanım potansiyeli incelenecektir. Bunun yanında ilerleyen çalışmalarda malzemenin termal enerji depolama kapasitesinin arttırılması için literatürde sıkça kullanılan metalik nanokatkıların ya da inorganik katkıların doğrudan parafin katkılı FDM içerisine dahil edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilecektir. Üretilen yenilikçi FDM'lerin bina yalıtımı süreçlerinde kullanımının değerlendirilmesi amacı ile termal kamera yardımıyla incelemeleri gerçekleştirilecektir. Ayrıca destek malzemesi olarak kullanılan poroz malzemelerin nem tutma, arıtma süreçlerinde kullanımı gibi uygulamalardaki potansiyelleri değerlendirilecektir. Ek olarak ticarileştirilme potansiyeline sahip olan yenilikçi FDM'nin üretim maliyetlerinin belirlenmesi için bir çalışma gerçekleştirilecektir. Sonuç olarak döngüsel ekonomi kapsamı içerisinde tez çalışmasında elde edilen $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}@\text{AÇ-Parafin}$ FDM'nin sıcaklık düzenlenmesi ve atık ısı geri kazanımında pratik uygulamalar için umut verici bir potansiyele sahiptir.

KAYNAKÇA

- Abdallah, M., Abu Talib, M., Feroz, S., Nasir, Q., Abdalla, H., Mahfood, B. (2020). "Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review". *Waste Management*, 109, 231–246.
- Abdeali, G., Bahramian, A. R., Abdollahi, M. (2020). "Review on Nanostructure Supporting Material Strategies in Shape-stabilized Phase Change Materials". *Journal of Energy Storage*, 29, 101299.
- Abdel-Aziz, M. H., Bassyouni, M., Soliman, M. F., Gutub, S. A., Magram, S. F. (2017). "Removal of heavy metals from wastewater using thermally treated sewage sludge adsorbent without chemical activation". *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(5), 1737–1747.
- Abdin, Z., Khalilpour, K. R. (2019). "Chapter 4 - Single and Polystorage Technologies for Renewable-Based Hybrid Energy Systems". İçinde K. R. B. T.-P. with P. for C. and E. H. Khalilpour (Ed.) (ss. 77–131). Academic Press.
- Abrego, J., Arauzo, J., Sánchez, J. L., Gonzalo, A., Cordero, T., Rodríguez-Mirasol, J. (2009). "Structural changes of sewage sludge char during fixed-bed pyrolysis". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(6), 3211–3221.
- Adar, E., Ince, M., Bilgili, M. S. (2020a). "Characteristics of Liquid Products in Supercritical Water Gasification of Municipal Sewage Sludge by Continuous Flow Tubular Reactor". *Waste and Biomass Valorization*, 11(11), 6321–6335.
- Adar, E., Ince, M., Bilgili, M. S. (2020b). "Supercritical water gasification of sewage sludge by continuous flow tubular reactor: A pilot scale study". *Chemical Engineering Journal*, 391, 123499.
- Adya, A. K., Canetta, E. (2014). "Chapter 14 - Nanotechnology and Its Applications to Animal Biotechnology". İçinde A. S. Verma & A. B. T.-A. B. Singh (Ed.) (ss. 247–263). San Diego: Academic Press.
- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M. (2010). "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)". *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 615–628.

- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Zeynali Famileh, I., ... Zaki, S. A. (2016). "A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470–1497.
- Al Bsoul, A., Hailat, M., Abdelhay, A., Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Al-kharabsheh, I. N., Al-Taani, A. A. (2021). "Efficient removal of phenol compounds from water environment using Ziziphus leaves adsorbent". *Science of The Total Environment*, 761, 143229.
- Al-Absi, Z. A., Mohd Isa, M. H., Ismail, M. (2020). "Phase Change Materials (PCMs) and Their Optimum Position in Building Walls". *Sustainability*.
- Alkan, C., Kaya, K., Sari, A. (2009). "Preparation, thermal properties and thermal reliability of form-stable paraffin/polypropylene composite for thermal energy storage". *Journal of Polymers and the Environment*, 17(4), 254.
- Alva, G., Lin, Y., Fang, G. (2018). "An overview of thermal energy storage systems". *Energy*, 144, 341–378.
- Amaral, C., Vicente, R., Marques, P., Barros-Timmons, A. (2017). "Phase change materials and carbon nanostructures for thermal energy storage: A literature review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 1212–1228.
- Ameri, B., Hanini, S., Boumahdi, M. (2020). "Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge". *Renewable Energy*, 147, 1107–1119.
- Aneke, M., Wang, M. (2016). "Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review". *Applied Energy*, 179, 350–377.
- Ansone, A., Dzikevics, M., Zandeckis, A. (2016). "Energy Accumulation Using Encapsulated Phase Change Materials with Recycled Material Components". *Energy Procedia*, 95, 153–158.
- Arasu, A., Sasmito, A., Mujumdar, A. (2012). "Thermal performance enhancement of paraffin wax with Al₂O₃ and CuO nanoparticles—a numerical study". *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 2(4).

- Atinafu, D. G., Dong, W., Wang, J., Huang, X., Wang, J., Gao, H., Wang, G. (2018). "Synthesis and characterization of paraffin/metal organic gel derived porous carbon/boron nitride composite phase change materials for thermal energy storage". *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2018(48), 5167–5175.
- Aydın, S. (2004). "Atıksu Arıtma Tesisi Çamurlarının Değişik Amaçlarla Kullanımının Araştırılması". İstanbul Üniversitesi.
- Ayodele, O. B., Sulaimon, A. A., Alaba, P. A., Tian, Z.-Y. (2020). "Influence of metakaolinization temperature on the structure and activity of metakaolin supported Ni catalyst in dry methane reforming". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103239.
- Ayol, A., Yurdakoş, Ö. T., Gürgen, A. (2018). "Eysel Arıtma Çamurlarından Gazlaştırma Teknolojisi İle Enerji Geri Kazanım". *Çevre Mühendisleri Odası Çevre Bilim ve Teknoloji Teknik Dergi*, (3(2)), 16–36. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.ekodenge.com/tr/wp-content/uploads/2019/05/CMO-Makale2018.pdf>
- Balbay, Ş. (2017). "Atık Lastiklerin Kimyasal Yöntemle Bozundurulması ve Elde Edilen Ürünlerin Değerlendirilmesi. Bilecik: Anadolu Üniversitesi & Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi". Doktora Tezi.
- Bilgiç, C., Bilgiç, Ş. (2019). "Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisinin Killerin Analizlerinde Kullanılması". *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 37–46.
- Boylu, F., Karaağaçoğlu, İ. E. (2018). "Kömür bileşenlerinin kalorifik değer üzerindeki etkisi üzerine değerlendirme". *Yerbilimleri*, 39(3), 221–236.
- Browne, M. C., Norton, B., McCormack, S. J. (2015). "Phase change materials for photovoltaic thermal management". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 762–782.
- Cabeza, L F, Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I., Barreneche, C. (2015). "1 - Introduction to thermal energy storage (TES) systems". İçinde L. F. B. T.-A. in T. E. S. S. Cabeza (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Energy* (ss. 1–28). Woodhead Publishing.

- Cabeza, Luisa F, Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I., Barreneche, C., Cabeza, L. F., ... Barreneche, C. (2021). "1 - Introduction to thermal energy storage systems". İçinde L. F. B. T.-A. in T. E. S. S. (Second E. Cabeza (Ed.), Woodhead Publishing Series in Energy (ss. 1–33). Woodhead Publishing.
- Caliskan, M., Ozdil, N. F. T. (2020). "Potential of Biogas and Electricity Production from Animal Waste in Turkey". *BioEnergy Research*, 1–10.
- Chaichan, Miqdam T, Kamel, S. H., Al-Ajeely, A. N. M. (2015). "Thermal conductivity enhancement by using nano-material in phase change material for latent heat thermal energy storage systems". *Saussurea*, 5(6), 48–55.
- Chaichan, Miqdam Tariq, Kazem, H. A. (2018). "Single slope solar distillator productivity improvement using phase change material and Al₂O₃ nanoparticle". *Solar Energy*, 164, 370–381.
- Chen, W., Zhao, B., Guo, Y., Guo, Y., Zheng, Z., Pak, T., Li, G. (2021). "Effect of hydrothermal pretreatment on pyrolyzed sludge biochars for tetracycline adsorption". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106557.
- Chen, Yi-di, Wang, R., Duan, X., Wang, S., Ren, N., Ho, S.-H. (2020). "Production, properties, and catalytic applications of sludge derived biochar for environmental remediation". *Water Research*, 187, 116390.
- Chen, Yunan, Guo, L., Jin, H., Yin, J., Lu, Y., Zhang, X. (2013). "An experimental investigation of sewage sludge gasification in near and super-critical water using a batch reactor". *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(29), 12912–12920.
- Cheng, F., Wen, R., Huang, Z., Fang, M., Liu, Y., Wu, X., Min, X. (2017). "Preparation and analysis of lightweight wall material with expanded graphite (EG)/paraffin composites for solar energy storage". *Applied Thermal Engineering*, 120, 107–114.
- Chin, C. O., Yang, X., Paul, S. C., Wong, L. S., Kong, S. Y. (2020). "Development of thermal energy storage lightweight concrete using paraffin-oil palm kernel shell-activated carbon composite". *Journal of Cleaner Production*, 261, 121227.
- Coates, J. (2000). "Interpretation of infrared spectra, a practical approach". Citeseer.
- Cot Gores, J. (2012). "Recycling of Wastes and Thermal Energy Storage, Two Different

Ways to Improve Our Environment". Universitat de Lleida.

- Deng, W., Ma, J., Xiao, J., Wang, L., Su, Y. (2019). "Orthogonal experimental study on hydrothermal treatment of municipal sewage sludge for mechanical dewatering followed by thermal drying". *Journal of Cleaner Production*, 209, 236–249.
- Dıblan, S., Kadiroglu, P., Aydemir, L. Y. (2018). "FT-IR spectroscopy characterization and chemometric evaluation of legumes extracted with different solvents". *Food and Health*, 4(2), 80–88.
- Dincer, I., Rosen, M. A. (2011). "Thermal energy storage systems and applications, Second Edition". John Wiley & Sons.
- Dincer, I., Rosen, M. A. (2021). "Thermal energy storage systems and applications". John Wiley & Sons.
- Ding, Z., Yang, W., He, F., Jiang, Z., He, R., Fan, J., Zhang, K. (2020). "GO modified EPDM/paraffin shape-stabilized phase change materials with high elasticity and low leakage rate". *Polymer*, 204, 122824.
- Dong, K., Dong, X., Jiang, Q. (2020). "How renewable energy consumption lower global CO₂ emissions? Evidence from countries with different income levels". *The World Economy*, 43(6), 1665–1698.
- Durowoju, I. B., Bhandal, K. S., Hu, J., Carpick, B., Kirkitadze, M. (2017). "Differential scanning calorimetry—a method for assessing the thermal stability and conformation of protein antigen". *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (121), e55262.
- Dyball, D. L. (2013). "An innovative wall-lining for buildings incorporating phase change materials". University of Brighton.
- Elgafy, A., Lafdi, K. (2005). "Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials". *Carbon*, 43(15), 3067–3074.
- Elouali, A., Kousksou, T., El Rhafiki, T., Hamdaoui, S., Mahdaoui, M., Allouhi, A., Zeraouli, Y. (2019). "Physical models for packed bed: Sensible heat storage systems". *Journal of Energy Storage*, 23, 69–78.
- Enescu, D., Chicco, G., Porumb, R., Seritan, G. (2020). "Thermal Energy Storage for

- Grid Applications: Current Status and Emerging Trends". *Energies*.
- Erkekkaŗeŗ, E. (2014). "Susuzlaŗtırılmıŗ Arıtma  amurlarının Enerjilerinden Faydalanılabilirliğinin Araŗtırılması ve Nihai Bertarafı". T.C. Erciyes Üniversitesi.
- Falahi, E., Barmar, M., Haghighat, K. M. (2010). "Preparation of phase-change material microcapsules with paraffin or camel fat cores: application to fabrics".
- Fang, G., Chen, Z., Li, H. (2010). "Synthesis and properties of microencapsulated paraffin composites with SiO₂ shell as thermal energy storage materials". *Chemical Engineering Journal*, 163(1), 154–159.
- Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C. (2020). "Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109579.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S. (2004). "A review on phase change energy storage: materials and applications". *Energy conversion and management*, 45(9–10), 1597–1615.
- Fernandes, D., Piti , F., Cáceres, G., Baeyens, J. (2012). "Thermal energy storage: “How previous findings determine current research priorities”". *Energy*, 39(1), 246–257.
- Fernandes, L. C., Correia, D. M., García-Astrain, C., Pereira, N., Tariq, M., Esperança, J. M. S. S., Lanceros-Méndez, S. (2019). "Ionic-Liquid-Based Printable Materials for Thermochromic and Thermoresistive Applications". *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(22), 20316–20324.
- Ferrari, A. C., Robertson, J. (2000). "Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon". *Physical review B*, 61(20), 14095.
- Filella, M., Buffle, J., Parthasarathy, N. (2005). "Humic and Fulvic Compounds".  inde P. Worsfold, A. Townshend, & C. B. T.-E. of A. S. (Second E. Poole (Ed.), *Encyclopedia of Analytical Science* (Second Edi, ss. 288–298). Oxford: Elsevier.
- Fleck, N., Amli, H., Dhanak, V., Ahmed, W. (2021). "Chapter 11 - Characterization techniques in energy generation and storage".  inde W. Ahmed, M. Booth, & E. B. T.-E. N. for R. E. Nourafkan (Ed.), *Micro and Nano Technologies* (ss. 259–285). Elsevier.

- Fukai, J., Kanou, M., Kodama, Y., Miyatake, O. (2000). "Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers". *Energy Conversion and Management*, 41(14), 1543–1556.
- Fytili, D., Zabaniotou, A. (2008). "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 116–140.
- Gao, N., Kamran, K., Quan, C., Williams, P. T. (2020). "Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review". *Progress in Energy and Combustion Science*, 79, 100843.
- Garg, H. P., Mullick, S. C., Bhargava, A. K. (1985). "Solar thermal energy storage".
- George, M., Pandey, A. K., Rahim, N. A., Shahabuddin, S., Tyagi, V. V, Saidur, R. (2021). "Investigation on Thermal Properties of Al_2O_3 Based Phase Change Material Composite for Solar Thermal System Application". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1127(1), 12010.
- Ghani, S. A. A., Jamari, S. S., Abidin, S. Z. (2021). "Waste materials as the potential phase change material substitute in thermal energy storage system: a review". *Chemical Engineering Communications*, 208(5), 687–707.
- Ghodke, P. K., Sharma, A. K., Pandey, J. K., Chen, W.-H., Patel, A., Ashokkumar, V. (2021). "Pyrolysis of sewage sludge for sustainable biofuels and value-added biochar production". *Journal of Environmental Management*, 298, 113450.
- Gill, P., Moghadam, T. T., Ranjbar, B. (2010). "Differential scanning calorimetry techniques: applications in biology and nanoscience". *Journal of Biomolecular Techniques*: JBT, 21(4), 167–193. Tarihinde adresinden erişildi <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21119929>
- Giro-Paloma, J., Barreneche, C., Martínez, M., Šumiga, B., Cabeza, L. F., Fernández, A. I. (2015). "Comparison of phase change slurries: Physicochemical and thermal properties". *Energy*, 87, 223–227.
- Grube, M., Lin, J. G., Lee, P. H., Kokorevicha, S. (2006). "Evaluation of sewage sludge-based compost by FT-IR spectroscopy". *Geoderma*, 130(3), 324–333.

- Guerrero, L. A., Maas, G., Hogland, W. (2013). "Solid waste management challenges for cities in developing countries". *Waste Management*, 33(1), 220–232.
- Gündüzalp, A. A., Güven, S. (2016). "Atık, çeşitleri, atık yönetimi, geri dönüşüm ve tüketici: Çankaya belediyesi ve semt tüketicileri örneği". *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, 9, 1–19.
- Hailu, G. (2021). "8 - Energy systems in buildings". İçinde D. Borge-Diez & E. B. T.-E. S. F. and F. Rosales-Asensio (Ed.), *Energy Services and Management* (ss. 181–209). Academic Press.
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., Kennedy, C. (2013). "Environment: Waste production must peak this century". *Nature News*, 502(7473), 615.
- Hosenuzzaman, M., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A. B. M. A., Nahar, A. (2015). "Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 284–297.
- Hossain, F. M., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., Ping, H. W. (2015). "Impact of renewable energy on rural electrification in Malaysia: a review". *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(4), 859–871.
- http-1:** <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=cevre-ve-enerji-103&dil=1>
(Erişim tarihi: 10.10. 2021)
- http-2:** <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
(Erişim tarihi: 17.10.2021)
- http-3:** <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Belediye-Atiksu-Istatistikleri-2018-30667> (Erişim tarihi: 10.10. 2021)
- http-4:** <https://cevresehgostergeler.csb.gov.tr/yenilenebilir-enerji-kaynaklarinin-tuketim-icin-deki-payi-i-85809> (Erişim tarihi 18.11.2020)
- http-5:** <http://www.asalkimya.com.tr/index.php/polimer-emulsiyonlari/>
(Erişim tarihi: 14.11.2021)
- http-6:** <https://www.denkim.com.tr/urunler.php> (Erişim tarihi: 14.11.2021)

- Hussain, F., Rahman, M. Z., Sivasengaran, A. N., Hasanuzzaman, M. (2020). "Chapter 6 - Energy storage technologies". İçinde M. D. Hasanuzzaman & N. A. B. T.-E. for S. D. Rahim (Ed.) (ss. 125–165). Academic Press.
- Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rahman, S., Yilbas, B. S., Sahin, A. Z. (2017). "Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 26–50.
- Ikutegbe, C. A., Farid, M. M. (2020). "Application of phase change material foam composites in the built environment: A critical review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110008.
- Inaba, H., Tu, P. (1997). "Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material". *Heat and Mass Transfer*, 32(4), 307–312.
- Islam, M. M., Pandey, A. K., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A. (2016). "Recent progresses and achievements in photovoltaic-phase change material technology: a review with special treatment on photovoltaic thermal-phase change material systems". *Energy Conversion and Management*, 126, 177–204.
- Issaadi, N., Aït-Mokhtar, A., Belarbi, R., Hamami, A. (2018). "8 - Effect of Variability of Porous Media Properties on Drying Kinetics: Application to Cement-based Materials". İçinde F. Nicot & O. B. T.-A. in M.-P. and M.-S. C. in G.-E. M. Millet (Ed.) (ss. 243–289). Elsevier.
- Jelle, B. P., Kalnæs, S. E. (2017). "Chapter 3 - Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings". İçinde F. Pacheco-Torgal, C.-G. Granqvist, B. P. Jelle, G. P. Vanoli, N. Bianco, & J. B. T.-C.-E. E. E. B. R. Kurnitski (Ed.) (ss. 57–118). Woodhead Publishing.
- Jeon, J., Jeong, S.-G., Lee, J.-H., Seo, J., Kim, S. (2012). "High thermal performance composite PCMs loading xGnP for application to building using radiant floor heating system". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101, 51–56.
- Kabakcı, S. B., Doğançan, K. (2019). "Enerji geri kazanımı için arıtma çamurunun hidrotermal karbonizasyonu". Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

- Mühendislik Dergisi, 10(3), 1061–1072.
- Karthik, M., Faik, A., D'Aguanno, B. (2017). "Graphite foam as interpenetrating matrices for phase change paraffin wax: A candidate composite for low temperature thermal energy storage". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 172, 324–334.
- Kaygusuz, K., Sari, A. (2007). "High Density Polyethylene/Paraffin Composites as Form-stable Phase Change Material for Thermal Energy Storage". *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(3), 261–270.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). "What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050". World Bank Publications.
- Kenisarin, M., Mahkamov, K. (2007). "Solar energy storage using phase change materials". *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(9), 1913–1965.
- Khan, S. A., Khan, S. B., Khan, L. U., Farooq, A., Akhtar, K., Asiri, A. M. (2018). "Fourier transform infrared spectroscopy: fundamentals and application in functional groups and nanomaterials characterization". *Çinde Handbook of Materials Characterization* (ss. 317–344). Springer.
- Khudhair, A. M., Farid, M. M. (2004). "A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials". *Energy Conversion and Management*, 45(2), 263–275.
- Kim, S., Drzal, L. T. (2009). "High latent heat storage and high thermal conductive phase change materials using exfoliated graphite nanoplatelets". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(1), 136–142.
- Koçak, B., Fernandez, A. I., Paksoy, H. (2020). "Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects". *Solar Energy*, 209, 135–169.
- Kona, A., Bertoldi, P., Monforti-Ferrario, F., Rivas, S., Dallemand, J. F. (2018). "Covenant of mayors signatories leading the way towards 1.5 degree global warming pathway". *Sustainable Cities and Society*, 41, 568–575.
- Kumar, L., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A. (2019). "Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A

- review". *Energy conversion and management*, 195, 885–908.
- Kumar, V., Jaiswal, K. K., Vlaskin, M. S., Nanda, M., Tripathi, M. K., Gururani, P., ... Joshi, H. C. (2020). "Hydrothermal liquefaction of municipal wastewater sludge and nutrient recovery from the aqueous phase". *Biofuels*, 1–6.
- Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D. Y., Rahman, M. M., Stefanakos, E. K. (2013). "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants". *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(4), 285–319.
- Kushwah, A., Gaur, M., Pandit, R. (2020). "The Role of Phase Change Materials for Lifetime Heating of Buildings in Cold Climatic Conditions". *International Journal of Built Environment and Sustainability* (C. 7).
- Kwarciak-Kozłowska, A. (2019). "15 - Co-composting of sewage sludge and wetland plant material from a constructed wetland treating domestic wastewater". İçinde M. N. V. Prasad, P. J. de Campos Favas, M. Vithanage, & S. V. B. T.-I. and M. S. Mohan (Ed.) (ss. 337–360). Butterworth-Heinemann.
- Larkin, P. (2017). "Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation". Amsterdam: Elsevier.
- Lasaridi, K.-E., Manios, T., Stamatiadis, S., Chroni, C., Kyriacou, A. (2018). "The Evaluation of Hazards to Man and the Environment during the Composting of Sewage Sludge". *Sustainability*.
- Lee, C. H., Choi, H. K. (1998). "Crystalline morphology in high-density polyethylene/paraffin blend for thermal energy storage". *Polymer Composites*, 19(6), 704–708.
- Li, Mi, Tang, Y., Ren, N., Zhang, Z., Cao, Y. (2018). "Effect of mineral constituents on temperature-dependent structural characterization of carbon fractions in sewage sludge-derived biochar". *Journal of Cleaner Production*, 172, 3342–3350.
- Li, Min, Chen, M., Wu, Z., Liu, J. (2014). "Carbon nanotube grafted with polyalcohol and its influence on the thermal conductivity of phase change material". *Energy Conversion and Management*, 83, 325–329.
- Li, Min. (2013). "A nano-graphite/paraffin phase change material with high thermal

- conductivity". *Applied Energy*, 106, 25–30.
- Li, R., Zhou, Y., Duan, X. (2019). "A novel composite phase change material with paraffin wax in tailings porous ceramics". *Applied Thermal Engineering*, 151, 115–123.
- Li, X., Hayashi, J., Li, C.-Z. (2006). "FT-Raman spectroscopic study of the evolution of char structure during the pyrolysis of a Victorian brown coal". *Fuel*, 85(12), 1700–1707.
- Li, Y., Chang, F., Huang, B., Song, Y., Zhao, H., Wang, K. (2020). "Activated carbon preparation from pyrolysis char of sewage sludge and its adsorption performance for organic compounds in sewage". *Fuel*, 266, 117053.
- Lin, Yan, Liao, Y., Yu, Z., Fang, S., Ma, X. (2017). "A study on co-pyrolysis of bagasse and sewage sludge using TG-FTIR and Py-GC/MS". *Energy Conversion and Management*, 151, 190–198.
- Lin, Yaxue, Alva, G., Fang, G. (2018). "Review on thermal performances and applications of thermal energy storage systems with inorganic phase change materials". *Energy*, 165, 685–708.
- Lin, Yaxue, Jia, Y., Alva, G., Fang, G. (2018). "Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage". *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 2730–2742.
- Liu, X., Lin, F., Zhang, X., Liu, M., Sun, Z., Zhang, L., ... Huang, Z. (2021). "Paraffin/Ti3C2Tx Mxene@ Gelatin Aerogels Composite Phase-Change Materials with High Solar-Thermal Conversion Efficiency and Enhanced Thermal Conductivity for Thermal Energy Storage". *Energy & Fuels*, 35(3), 2805–2814.
- Loganathan, S., Valapa, R. B., Mishra, R. K., Pugazhenti, G., Thomas, S. (2017). "Chapter 4 - Thermogravimetric Analysis for Characterization of Nanomaterials". İçinde S. Thomas, R. Thomas, A. K. Zachariah, & R. K. B. T.-T. and R. M. T. for N. C. Mishra (Ed.), *Micro and Nano Technologies* (ss. 67–108). Elsevier.
- Lu, X., Zheng, Y., Yang, J., Qu, J. (2020). "Multifunctional paraffin wax/carbon nanotube sponge composites with simultaneous high-efficient thermal management and

- electromagnetic interference shielding efficiencies for electronic devices". *Composites Part B: Engineering*, 199, 108308.
- Lu, Y., Xie, Q., Tang, L., Yu, J., Wang, J., Yang, Z., ... Zhang, S. (2021). "The reduction of nitrobenzene by extracellular electron transfer facilitated by Fe-bearing biochar derived from sewage sludge". *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123682.
- Ma, X., Liu, H., Chen, C., Liu, Y., Zhang, L., Xu, B., Xiao, F. (2020). "Synthesis of novel microencapsulated phase change material with SnO₂/CNTs shell for solar energy storage and photo-thermal conversion". *Materials Research Express*, 7(1), 15513.
- Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H., Matseelar, H. S. C. (2014). "A review of available methods and development on energy storage; technology update". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 532–545.
- Malard, L. M., Pimenta, M. A., Dresselhaus, G., Dresselhaus, M. S. (2009). "Raman spectroscopy in graphene". *Physics Reports*, 473(5), 51–87.
- Mehling, H., Cabeza, L. F. (2008). "Basic thermodynamics of thermal energy storage". *Heat and cold storage with PCM* (ss. 1–10). Springer.
- Mehrali, M., Latibari, S. T., Mehrali, M., Metselaar, H. S. C., Silakhori, M. (2013). "Shape-stabilized phase change materials with high thermal conductivity based on paraffin/graphene oxide composite". *Energy Conversion and Management*, 67, 275–282.
- Mehrali, M., Tahan Latibari, S., Mehrali, M., Mahlia, T. M. I., Sadeghinezhad, E., Metselaar, H. S. C. (2014). "Preparation of nitrogen-doped graphene/palmitic acid shape stabilized composite phase change material with remarkable thermal properties for thermal energy storage". *Applied Energy*, 135, 339–349.
- Memon, Shazim A, Liao, W., Yang, S., Cui, H., Shah, S. F. (2015). "Development of Composite PCMs by Incorporation of Paraffin into Various Building Materials". *Materials*.
- Memon, Shazim Ali, Lo, T. Y., Barbhuiya, S. A., Xu, W. (2013). "Development of form-stable composite phase change material by incorporation of dodecyl alcohol into ground granulated blast furnace slag". *Energy and Buildings*, 62, 360–367.

- Memon, Shazim Ali. (2014). "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review". *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 870–906.
- Mian, M. M., Liu, G. (2019). "Sewage sludge-derived TiO₂/Fe/Fe₃C-biochar composite as an efficient heterogeneous catalyst for degradation of methylene blue". *Chemosphere*, 215, 101–114.
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Qichang, H., Vicentini, F., Bingkai, L., ... Yi, L. (2009). "Municipal solid waste management in Pudong New Area, China". *Waste Management*, 29(3), 1227–1233.
- Mohamed, S. A., Al-Sulaiman, F. A., Ibrahim, N. I., Zahir, M. H., Al-Ahmed, A., Saidur, R., ... Sahin, A. Z. (2017). "A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1072–1089.
- Mohammed, A., Abdullah, A. (2018). "Scanning electron microscopy (SEM): A review". İçinde *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania* (ss. 7–9).
- Moško, J., Pohořelý, M., Skoblia, S., Fajgar, R., Straka, P., Soukup, K., ... Meers, E. (2021). "Structural and chemical changes of sludge derived pyrolysis char prepared under different process temperatures". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105085.
- Nandiyanto, A. B. D., Oktiani, R., Ragadhita, R. (2019). "How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material". *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97–118.
- Narasimhan, L. N. (2019). "Assessment of latent heat thermal storage systems operating with multiple phase change materials". *Journal of Energy Storage*, 23, 442–455.
- National Institute Of Rural Development & Panchayati Raj. (2016). "Solid Waste Management in Rural Areas A Step-by-Step Guide for Gram Panchayats". Tarihinde adresinden erişildi www.nird.org.in
- Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F. J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., ... Kannan, A. M. (2019). "Recent developments in phase change materials for energy

- storage applications: A review". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491–523.
- Noël, J. A., Kahwaji, S., Desgrosseilliers, L., Groulx, D., White, M. A. (2016). "Chapter 13 - Phase Change Materials". İçinde T. M. B. T.-S. E. Letcher (Ed.) (ss. 249–272). Oxford: Elsevier.
- Ola, O., Chen, Y., Niu, Q., Xia, Y., Mallick, T., Zhu, Y. (2020). "Ultralight three-dimensional, carbon-based nanocomposites for thermal energy storage". *Journal of Materials Science & Technology*, 36, 70–78.
- Onchoke, K. K., Franclemont, C. M., Weatherford, P. W. (2018). "Structural characterization and evaluation of municipal wastewater sludge (biosolids) from two rural wastewater treatment plants in East Texas, USA". *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 204, 514–524.
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., Vyvyan, J. A. (2014). "Introduction to spectroscopy" (Fifth Edit). Bellingham, Washington: Cengage Learning.
- Payada, Ö. (2019). "Preparation and Characterization of Phase Change Materials to Tedeuce Internal Temperature Changes in Refrigerators". Istanbul Technical University.
- Pei, X.-Y., Ren, H.-Y., Xing, D.-F., Xie, G.-J., Cao, G.-L., Meng, J., ... Liu, B.-F. (2021). "Electron transfer mechanism of peroxydisulfate activation by sewage sludge-derived biochar for enhanced degradation of sulfamethoxazole". *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(9), 1563–1575.
- Peker, B., Dadaşer Çelik, F. (2019). "Termal ve Kimyasal Önişlemlerin Atıksu Çamuru ve Şeker Pancarı Küspesi Karışımından Biyogaz Eldesindeki Etkilerinin Belirlenmesi". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 679–686.
- Peng, C., Zhai, Y., Hornung, A., Li, C., Zeng, G., Zhu, Y. (2018). "Promoting Effect of ZSM-5 Catalyst on Carbonization via Hydrothermal Conversion of Sewage Sludge". *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(7), 9461–9469.
- Peng, C., Zhai, Y., Hornung, A., Wang, B., Li, S., Wang, T., ... Zhu, Y. (2020). "In-depth

- comparison of morphology, microstructure, and pathway of char derived from sewage sludge and relevant model compounds". *Waste Management*, 102, 432–440.
- Peng, C., Zhai, Y., Zhu, Y., Wang, T., Xu, B., Wang, T., ... Zeng, G. (2017). "Investigation of the structure and reaction pathway of char obtained from sewage sludge with biomass wastes, using hydrothermal treatment". *Journal of Cleaner Production*, 166, 114–123.
- Peng, S., Fuchs, A., Wirtz, R. A. (2004). "Polymeric phase change composites for thermal energy storage". *Journal of Applied Polymer Science*, 93(3), 1240–1251.
- Perton, F., Cotin, G., Kiefer, C., Strub, J.-M., Cianferani, S., Greneche, J.-M., ... Mertz, D. (2021). "Iron Stearate Structures: An Original Tool for Nanoparticles Design". *Inorganic Chemistry*, 60(16), 12445–12456.
- Pielichowska, K., Pielichowski, K. (2014). "Phase change materials for thermal energy storage". *Progress in materials science*, 65, 67–123.
- Pulka, J., Manczarski, P., Koziel, J. A., Białowiec, A. (2019). "Torrefaction of Sewage Sludge: Kinetics and Fuel Properties of Biochars". *Energies*.
- Py, X., Olives, R., Mauran, S. (2001). "Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(14), 2727–2737.
- Qiu, J., Hou, H., Liang, S., Yang, L., Gan, Q., Tao, S., ... Yang, J. (2022). "Hierarchically porous biochar preparation and simultaneous nutrient recovery from sewage sludge via three steps of alkali-activated pyrolysis, water leaching and acid leaching". *Resources, Conservation and Recycling*, 176, 105953.
- Rahman, M. M., Oni, A. O., Gemechu, E., Kumar, A. (2020). "Assessment of energy storage technologies: A review". *Energy Conversion and Management*, 223, 113295.
- Rani, M., Keshu, Shanker, U. (2022). "Chapter 3 - Green nanomaterials: An overview". İçinde U. Shanker, C. M. Hussain, & M. B. T.-G. F. N. for E. A. Rani (Ed.), *Micro and Nano Technologies* (ss. 43–80). Elsevier.
- Rathod, M. (2018). "Phase Change Materials and Their Applications". DTU Energy.
- Rathod, M. K., Banerjee, J. (2013). "Thermal stability of phase change materials used in

- latent heat energy storage systems: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246–258.
- Ren, N., Tang, Y., Li, M. (2018). "Mineral additive enhanced carbon retention and stabilization in sewage sludge-derived biochar". *Process Safety and Environmental Protection*, 115, 70–78.
- Réveill  , V., Mansuy, L., Jard  ,   ., Garnier-Sillam,   . (2003). "Characterisation of sewage sludge-derived organic matter: lipids and humic acids". *Organic Geochemistry*, 34(4), 615–627.
- Rorat, A., Courtois, P., Vandenbulcke, F., Lemiere, S. (2019). "8 - Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management".   inde M. N. V. Prasad, P. J. de Campos Favas, M. Vithanage, & S. V. B. T.-I. and M. S. Mohan (Ed.) (ss. 155–180). Butterworth-Heinemann.
- Rulkens, W. (2008). "Sewage Sludge as a Biomass Resource for the Production of Energy: Overview and Assessment of the Various Options". *Energy & Fuels*, 22(1), 9–15.
- Salah, M. K. (2020). "Modelling A Radiant Floor System With Phase Change Material Using A Building Simulation Tool: Analysis Of A Floor Heating System". Technical University of Denmark.
- Sarbu, I., Sebarchievici, C. (2018). "A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage". *Sustainability*.
- Sarier, N., Onder, E., Ukuser, G. (2015). "Silver incorporated microencapsulation of n-hexadecane and n-octadecane appropriate for dynamic thermal management in textiles". *Thermochimica Acta*, 613, 17–27.
- Sellergren, B., Hall, A. J. (2001). "Chapter 2 - Fundamental aspects on the synthesis and characterisation of imprinted network polymers".   inde B. B. T.-T. and I. in A. C. Sellergren (Ed.), *Molecularly Imprinted Polymers* (C. 23, ss. 21–57). Elsevier.
- Shao, Y., Jiang, H., Li, S., Yang, J., Zhang, M., Li, J. (2018). "Preparation of microencapsulated phase change materials based on expanded polystyrene foam wastes". *Micro & Nano Letters*, 13(7), 998–1000.

- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D. (2009). "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications". *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318–345.
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., Sandaran, S. C. (2015). "Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage". *Energy Conversion and Management*, 95, 193–228.
- Sharshir, S. W., El-Shafai, N. M., Ibrahim, M. M., Kandeal, A. W., El-Sheshtawy, H. S., Ramadan, M. S., ... El-Mehasseb, I. M. (2021). "Effect of copper oxide/cobalt oxide nanocomposite on phase change material for direct/indirect solar energy applications: Experimental investigation". *Journal of Energy Storage*, 38, 102526.
- Shchukina, E. M., Graham, M., Zheng, Z., Shchukin, D. G. (2018). "Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems". *Chemical Society Reviews*, 47(11), 4156–4175.
- Sheng, N., Rao, Z., Zhu, C., Habazaki, H. (2020). "Honeycomb carbon fibers strengthened composite phase change materials for superior thermal energy storage". *Applied Thermal Engineering*, 164, 114493.
- Shi, T., Zhang, X., Qiao, J., Wu, X., Chen, G., Leng, G., ... Huang, Z. (2021). "Preparation and characterization of composite phase change materials based on paraffin and carbon foams derived from starch". *Polymer*, 212, 123143.
- Solé, A. (2015). "Phase change materials characterization (PCM) and thermochemical materials (TCM) development and characterization towards reactor design for thermal energy storage". *Universitat de Lleida*.
- Su, Y., Wang, J., Liu, H. (2002). "FTIR Spectroscopic Study on Effects of Temperature and Polymer Composition on the Structural Properties of PEO–PPO–PEO Block Copolymer Micelles". *Langmuir*, 18(14), 5370–5374.
- Sümer, S. K., Kavdır, Y., Çiçek, G. (2016). "Türkiye’de tarımsal ve hayvansal atıklardan biyokömür üretim potansiyelinin belirlenmesi". *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 19(4), 379–387.
- Tebaldi, M. L., Belardi, R. M., Montoro, S. R. (2016). "Chapter 8 - Polymers with Nano-

- Encapsulated Functional Polymers: Encapsulated Phase Change Materials". İçinde S. Thomas, R. Shanks, & S. B. T.-D. and A. of N. P. B. and N. S. Chandrasekharakurup (Ed.), *Micro and Nano Technologies* (ss. 155–169). Boston: William Andrew Publishing.
- Teng, T.-P., Yu, C.-C. (2012). "Characteristics of phase-change materials containing oxide nano-additives for thermal storage". *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 611.
- Titus, D., James Jebaseelan Samuel, E., Roopan, S. M. (2019). "Chapter 12 - Nanoparticle characterization techniques". İçinde A. K. Shukla & S. B. T.-G. S. Iravani *Characterization and Applications of Nanoparticles* (Ed.), *Micro and Nano Technologies* (ss. 303–319). Elsevier.
- Tolay, M., Baileys, R., Waterschoot, A. (2010). "Arıtma Çamurlarının Gazlaştırılması İle Enerji Üretimi". 8. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu.
- Tomoda, B. T., Yassue-Cordeiro, P. H., Ernesto, J. V., Lopes, P. S., Péres, L. O., da Silva, C. F., de Moraes, M. A. (2020). "Chapter 3 - Characterization of biopolymer membranes and films: Physicochemical, mechanical, barrier, and biological properties". İçinde M. A. de Moraes, C. F. da Silva, & R. S. B. T.-B. M. and F. Vieira (Ed.) (ss. 67–95). Elsevier.
- Triassi, M., Alfano, R., Illario, M., Nardone, A., Caporale, O., Montuori, P. (2015). "Environmental pollution from illegal waste disposal and health effects: A review on the “Triangle of Death”". *International journal of environmental research and public health*, 12(2), 1216–1236.
- Trivedi, M., Mathur, M., Johri, P., Singh, A., Tiwari, R. K. (2020). "Waste management: A paradigm shift". İçinde *Environmental concerns and sustainable development* (ss. 337–363). Springer.
- Tsaneva, V. N., Kwapinski, W., Teng, X., Glowacki, B. A. (2014). "Assessment of the structural evolution of carbons from microwave plasma natural gas reforming and biomass pyrolysis using Raman spectroscopy". *Carbon*, 80, 617–628.
- Uchiyama, N., Takasu, H., Kato, Y. (2019). "Cyclic durability of calcium carbonate materials for oxide/water thermo-chemical energy storage". *Applied Thermal Engineering*, 160, 113893.

- Vakhshouri, A. R. (2020). "Paraffin as phase change material". *Paraffin Overview*, 1–23.
- Valan Arasu, A., Sasmito, A. P., Mujumdar, A. S. (2013). "Numerical performance study of paraffin wax dispersed with alumina in a concentric pipe latent heat storage system". *Thermal science*, 17(2), 419–430.
- Wan, C., Li, H., Zhao, L., Li, Z., Zhang, C., Tan, X., Liu, X. (2021). "Mechanism of removal and degradation characteristics of dicamba by biochar prepared from Fe-modified sludge". *Journal of Environmental Management*, 299, 113602.
- Wang, H., Guo, W., Liu, B., Si, Q., Luo, H., Zhao, Q., Ren, N. (2020). "Sludge-derived biochar as efficient persulfate activators: Sulfurization-induced electronic structure modulation and disparate nonradical mechanisms". *Applied Catalysis B: Environmental*, 279, 119361.
- Wang, Yan, Alsmeyer, D. C., McCreery, R. L. (1990). "Raman spectroscopy of carbon materials: structural basis of observed spectra". *Chemistry of Materials*, 2(5), 557–563.
- Wang, Yanlin, Jia, L., Guo, J., Wang, B., Zhang, L., Xiang, J., Jin, Y. (2021). "Thermogravimetric analysis of co-combustion between municipal sewage sludge and coal slime: Combustion characteristics, interaction and kinetics". *Thermochimica Acta*, 706, 179056.
- Wang, Z., Huang, Z., Zheng, S., Zhao, X. (2018). "6 - Solar Water Heaters". İçinde T. M. Letcher & V. M. B. T.-A. C. G. to S. E. S. Fthenakis (Ed.) (ss. 111–125). Academic Press.
- Waterson, M. (2017). "The characteristics of electricity storage, renewables and markets". *Energy Policy*, 104, 466–473.
- Wu, D., Ni, B., Liu, Y., Chen, S., Zhang, H. (2015). "Preparation and characterization of side-chain liquid crystal polymer/paraffin composites as form-stable phase change materials". *Journal of materials chemistry A*, 3(18), 9645–9657.
- Wu, S., Yan, T., Kuai, Z., Pan, W. (2020). "Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review". *Energy Storage Materials*, 25, 251–295.

- Xiao, M., Feng, B., Gong, K. (2002). "Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity". *Energy conversion and management*, 43(1), 103–108.
- Yaman, K., Olhan, E. (2010). "Atık yönetiminde sıfır atık yaklaşımı ve bu anlayışa küresel bir bakış". *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1), 53–57.
- Yang, C., Wang, S., Li, Y., Zhang, Y., Cui, C. (2021). "Thermodynamic analysis of hydrogen production via supercritical water gasification of coal, sewage sludge, microalga, and sawdust". *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34), 18042–18050.
- Yang, T., King, W. P., Miljkovic, N. (2021). "Phase change material-based thermal energy storage". *Cell Reports Physical Science*, 2(8), 100540.
- Yang, Z., Garimella, S. V. (2013). "Cyclic operation of molten-salt thermal energy storage in thermoclines for solar power plants". *Applied energy*, 103, 256–265.
- Yassin, F. A., El Kady, F. Y., Ahmed, H. S., Mohamed, L. K., Shaban, S. A., Elfadaly, A. K. (2015). "Highly effective ionic liquids for biodiesel production from waste vegetable oils". *Egyptian Journal of Petroleum*, 24(1), 103–111.
- Yeşilyurt, M. K., Nadaroglu, H., Çomaklı, Ö. (2019). "Materials and Selection Thereof for Encapsulated Phase Change Materials for Heat Transfer Applications". *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 3(2), 16–22.
- Yıldız, Ş., Yılmaz, E., Ölmez, E. (2009). "Evsel nitelikli arıtma çamurlarının stabilizasyonla bertaraf alternatifleri: İstanbul örneği". *Türkiye’de Katı Atık Yönetim Sempozyumu (TÜRKAY 2009) YTÜ*, 15–17.
- Yılmaz, A., Bozkurt, Y. (2010). "Türkiye’de kentsel katı atık yönetimi uygulamaları ve Kütahya katı atık birliği (KÜKAB) örneği". *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(1), 11–28.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H. (2003). "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications". *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251–283.
- Zhang, Haiquan, Sun, Q., Yuan, Y., Zhang, Z., Cao, X. (2018). "A novel form-stable

- phase change composite with excellent thermal and electrical conductivities". *Chemical Engineering Journal*, 336, 342–351.
- Zhang, Huili, Baeyens, J., Cáceres, G., Degève, J., Lv, Y. (2016). "Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects". *Progress in Energy and Combustion Science*, 53, 1–40.
- Zhang, X., Lin, Q., Luo, H., Luo, S. (2020). "Three-dimensional graphitic hierarchical porous carbon/stearic acid composite as shape-stabilized phase change material for thermal energy storage". *Applied Energy*, 260, 114278.
- Zhang, Y., Wang, X., Wu, D. (2015). "Design and fabrication of dual-functional microcapsules containing phase change material core and zirconium oxide shell with fluorescent characteristics". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 133, 56–68.
- Zhang, Y., Wang, X., Wu, D. (2016). "Microencapsulation of n-dodecane into zirconia shell doped with rare earth: Design and synthesis of bifunctional microcapsules for photoluminescence enhancement and thermal energy storage". *Energy*, 97, 113–126.
- Zhang, Z., Fang, X. (2006). "Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material". *Energy Conversion and Management*, 47(3), 303–310.
- Zhao, Bing, Xu, X., Xu, S., Chen, X., Li, H., Zeng, F. (2017). "Surface characteristics and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the bio-char produced by co-pyrolysis from municipal sewage sludge and hazelnut shell with zinc chloride". *Bioresource Technology*, 243, 375–383.
- Zhao, Bing-chen, Cheng, M., Liu, C., Dai, Z. (2017). "Cyclic thermal characterization of a molten-salt packed-bed thermal energy storage for concentrating solar power". *Applied Energy*, 195, 761–773.
- Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., Rasmussen, C. N. (2015). "Review of energy storage system for wind power integration support". *Applied Energy*, 137, 545–553.
- Zhao, P., Chen, H., Ge, S., Yoshikawa, K. (2013). "Effect of the hydrothermal pretreatment for the reduction of NO emission from sewage sludge combustion". *Applied Energy*, 111, 199–205.

- Zhao, Yafei, Kong, W., Jin, Z., Fu, Y., Wang, W., Zhang, Y., ... Zhang, B. (2018). "Storing solar energy within Ag-Paraffin@Haloysite microspheres as a novel self-heating catalyst". *Applied Energy*, 222, 180–188.
- Zhao, Yijun, Feng, D., Zhang, Y., Huang, Y., Sun, S. (2016). "Effect of pyrolysis temperature on char structure and chemical speciation of alkali and alkaline earth metallic species in biochar". *Fuel Processing Technology*, 141, 54–60.
- Zhou, D., Zhao, C. Y., Tian, Y. (2012). "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications". *Applied Energy*, 92, 593–605.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Ad Soyad: Ece Tuğba MIZIK

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans: Anadolu Üniversitesi Çevre Mühendisliği (3,05/4)

Yüksek Lisans: Eskişehir Teknik Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü/ Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı/ Çevre Bilimleri Bilim Dalı (Tezli) (YL) (3.74/4)

İŞ DENEYİMLERİ

ESKİ Eskişehir Atıksu Arıtma Tesisi / 06.06.2016-14.07.2016 (Staj)

Anadolu Cam Sanayi A.Ş. - Eskişehir / 18.07.2016-19.08.2016 (Staj)

BAŞARILAR / EĞİTİMLER

Kalite Yönetim Sistemlerinin Dokümantasyonu Eğitimi (İstanbul İşletme Enstitüsü)

Toplam Kalite Yönetimi Eğitimi (İstanbul İşletme Enstitüsü)

Kalite Yönetim Sistemleri İç Tetkikçi Eğitimi (İstanbul İşletme Enstitüsü)

İletişim ve Danışmanlık Eğitimi (ABDA Danışmanlık)

Kişisel Gelişim ve Beden Dili Eğitimi (Kariyer Kulübü)

PROJELER / YAYINLAR.

Eskişehir Teknik Üniversitesi/Bilimsel Araştırma Projesi (Tarım Topraklarının Uzaktan Algılama Teknolojisi ile Tuzluluk, Nem ve Organik Madde İlişkisinin Belirlenmesi, Proje No: 19ADP084 - Bursiyer

TÜBİTAK 4004 Doğa Eğitimi ve Bilim Okulları Projesi, Benim Su ayak İzim, Proje No:119B517- Öğretmen

TÜBİTAK 4004 Doğa Eğitimi ve Bilim Okulları Projesi, Geleceğin Yeşil Yakalıları, Proje No: 121B497- Öğretmen

2210-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı 2021/1 – Proje No: 649B022102893 - Bursiyer

MIZIK, E. T., & Avdan, Z. Y. (2020). Sürdürülebilirliğin Temel Taşı: Ekolojik Ayak İzi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(2), 451-467.

Avdan, U., Kaplan, G., Y.Avdan, Z., K. Matcı, D., Erdem, F., **Mızık, E.T.**, Özüdoğru İ. (2021). “Comparison of Remote Sensing Soil Electrical Conductivity from PlanetScope and Ground Measured Data in Wheat and Beet Yields”, 1st International Electronic Conference on Agronomy.

Avdan, U., Kucuk Matci, D., Kaplan, G., Yigit Avdan, Z., Erdem, F., Demirtas, I., & **Mızık, E. T.** (2021). Evaluating the Atmospheric Correction Impact on Landsat 8 and Sentinel-2 Data for Soil Salinity Determination. *Geodetski list*, 75(3), 225-240.

