



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



LİTYUM PİLLER İÇİN TERMOPLASTİK TABANLI KOMPOZİT ELEKTROTLARIN GELİŞTİRİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMASI

Doktora Tezi

Berkay Metin LEŞKERİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

İleri Malzeme Teknolojileri Doktora Programı

İzmir

2025

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**LİTYUM PİLLER İÇİN TERMOPLASTİK TABANLI
KOMPOZİT ELEKTROTLARIN GELİŞTİRİLMESİ,
KARAKTERİZASYONU VE UYGULAMASI**

Berkay Metin LEŞKERİ

Danışmanlar: Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT

Prof. Dr. Zekerya DURSUN

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

İleri Malzeme Teknolojileri Doktora Programı

İzmir

2025

Berkay Metin LEŞKERİ tarafından Doktora tezi olarak sunulan “Lityum Piller İçin Termoplastik Tabanlı Kompozit Elektrotların Geliştirilmesi, Karakterizasyonu ve Uygulaması” başlıklı bu alışma EŞ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EŞ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 27.01.2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT

Raportör Üye: Prof. Dr. Nuri NAKİBOğLU

Üye : Prof. Dr. Yoldaş SEKİ

Üye : Prof. Dr. Hakan AKAT

Üye : Doç. Dr. Burak GÖLTEKİN

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “Lityum Piller İçin Termoplastik Tabanlı Kompozit Elektrotların Geliştirilmesi, Karakterizasyonu ve Uygulaması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

27 / 01 / 2025

Berkay Metin LEŞKERİ

ÖZET

Lityum Piller İçin Termoplastik Tabanlı Kompozit Elektrotların Geliştirilmesi, Karakterizasyonu ve Uygulaması

Berkay Metin LEŞKERİ

Danışmanlar: Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT

Prof. Dr. Zekerya DURSUN

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

İleri Malzeme Teknolojileri Doktora Programı

Ocak 2025, 162 Sayfa

Bu tez çalışmasında, lityum iyon pillerde kullanılmak üzere termoplastik tabanlı kompozit elektrotların geliştirilmesi, karakterizasyonu ve uygulaması hedeflenmiştir. Kompozit elektrotların üretiminde, iletken katkı malzemeleri ve polimer matrislerin optimize edilmiş kombinasyonları kullanılarak yenilikçi bir yaklaşım benimsenmiştir.

Çalışma kapsamında, geliştirilen kompozit elektrotlar fiziksel, kimyasal ve elektrokimyasal özellikleri açısından detaylı bir şekilde karakterize edilmiştir. Elektrotların yüzey morfolojisi ve yapısal bütünlüğü mikroskopik tekniklerle incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında hazırlanan kompozit malzemelerin üretim süreçlerinde azalma sağlanmış ve geleneksel olarak kullanılan elektrotlara yakın bir deşarj kapasitesi ile rekabetçi bir çalışma yapılmıştır. Termoplastik tabanlı kompozit elektrotlar, pil teknolojilerinde yeni bir tasarım paradigmalarını teşvik ederek hem akademik hem de endüstriyel anlamda geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Lityum Piller, Polimer Kompozit Anot, Enerji Depolama, Elektrokimya



ABSTRACT

Development, Characterization and Application of Thermoplastic-Based Composite Electrodes For Lithium Batteries

Berkay Metin LEŞKERİ

Supervisors: Assoc. Prof. Mehmet SARIKANAT

Prof. Dr. Zekerya DURSUN

Department of Materials Science and Engineering

PhD Program in Advanced Materials Technologies

January 2025, 162 Pages

This thesis aims to develop, characterize, and apply thermoplastic-based composite electrodes for use in lithium-ion batteries. A novel approach has been adopted in the production of composite electrodes by utilizing optimized combinations of conductive additives and polymer matrices.

Within the scope of this study, the developed composite electrodes have been extensively characterized in terms of their physical, chemical, and electrochemical properties. The surface morphology and structural integrity of the electrodes have been examined using microscopic techniques.

Furthermore, the manufacturing processes of the composite materials developed in this study have been optimized, resulting in a reduction in processing steps. The produced electrodes exhibit competitive performance, achieving discharge capacities comparable to those of conventionally used electrodes. Thermoplastic-based composite electrodes introduce a new design paradigm in battery technologies, offering significant academic and industrial application potential.

Keywords: Lithium Batteries, Polymer Composite Anode, Energy Storage



ÖNSÖZ

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, hafif yapıları ve uzun döngü ömürleri sayesinde modern enerji depolama teknolojisinin temelini oluşturmuştur. Elektrikli araçlardan taşınabilir cihazlara kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan bu piller, yenilenebilir enerji sistemlerinin etkinliğini artırarak sürdürülebilir bir geleceğin kapılarını aralamaktadır. Enerji depolamadaki bu ilerleme, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak karbon emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlamaktadır.

Pil performansını belirleyen en kritik unsurlardan biri anot malzemesidir. Geleneksel grafit anotlar dengeli bir kapasite sunarken, silisyum ve lityum metal gibi yeni nesil malzemeler, daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha kısa şarj süreleri vaat etmektedir. Ancak bu yenilikçi malzemeler, teknik zorluklar ve maliyet gibi engellerle de karşı karşıyadır. Bu alan, pillerin enerji kapasitesini ve döngü ömrünü artırma hedefleri doğrultusunda büyük bir öneme sahiptir.

Anot teknolojilerindeki ilerlemeler, lityum iyon pillerin çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Anot malzemelerindeki yenilikler, enerji dönüşümünün itici gücü olmaya devam edecektir. Bu tez çalışması, TÜBİTAK 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında desteklenen 119C109 numaralı "Fonksiyonel Kompozit Malzemelerin Tasarımı, Üretimi, Karakterizasyonu, Sayısal Analizi ve Farklı Uygulamalarda Kullanılabilirliğinin İncelenmesi" isimli proje çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

İZMİR

27/01/2025

Berkay Metin LEŞKERİ

Ege Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü



İÇİNDEKİLER

ÖZET	ix
ABSTRACT	xi
ÖNSÖZ	xiii
1.GİRİŞ	1
1.1 Enerji ihtiyacı	1
1.2 Lityum iyon pilleri	2
1.2.1 Lityum iyon pillerin çalışma prensibi	5
1.3 Enerji Çözümleri Olarak Lityum Piller	8
1.4 Lityum Pillerinin Önemi	11
1.5 Lityum İyon Pillerinde Kullanılan Elektrot Malzemeleri	13
1.5.1 Katot Malzemesi	13
1.5.2 Anot Malzemesi	16
1.5.3 Elektrolit Malzemesi	20
1.5.4 Separatör Malzemesi	22
1.6 Mevcut Elektrot Malzemeleri ve Performansı	23
1.7 Elektrot Malzemelerinin Zorlukları	24
1.8 Elektrot Malzemelerinin Evrimi	25
1.9 Polimerler	28
1.10 Polimer Temelli Anot Malzemesi	30
1.11 Termoplastikler	32
1.12 Kompozit Malzemeler	35
1.13 Polimer Matris Kompozit Malzemeler	36
1.14 Termoplastik Matris Kompozit Malzemeler	39
1.15 Termoplastik Malzemelerin Üretim Yöntemleri	42
1.15.1 Ekstrüder	43
1.15.2 Tek vidalı Ekstrüder	46
1.15.3 Çift vidalı ekstrüder	47
1.15.4 Enjeksiyon	55

İÇİNDEKİLER (devamı)

1.16	Termoplastik Matris Kompozit Malzemelerin Elektriksel Özellikleri.....	58
1.17	Termoplastik Kompozit Malzemelerin Enerji Depolama Özelliği	62
1.18	Elektrokimya.....	65
1.19	Voltammetri ve Voltametrik Teknikler.....	72
1.20	Karakterizasyon Teknikleri.....	74
1.21	Tezin Amacı.....	77
2.	GEREÇ VE YÖNTEM.....	79
2.1	Kullanılan Ölçüm Sistemleri.....	79
2.2	Kullanılan Kimyasallar	79
2.3	Kompozit Malzeme Hazırlama Süreçleri.....	80
2.3.1	Kompozit Malzeme A'nın Hazırlanması.....	80
2.3.2	Kompozit Malzeme B'nin Hazırlanması.....	81
2.3.2	Kompozit Malzeme C'nin Hazırlanması	83
2.4	Doğal Grafitin Koşullandırılması.....	85
2.5	Koşullandırılmış Doğal Grafit ile Kompozit Malzemenin Hazırlanması	87
2.6	Pil Hücrelerinin Hazırlanması.....	89
2.6.1	Yarı Hücre Pil Sistemlerinin Hazırlanması.....	89
2.6.2	Tam Hücre Pil Sistemlerinin Hazırlanması	91
2.7	Elektrokimyasal Ölçüm Hücresinin Tasarımı Pil Testlerinin Yapılması.....	93
	Sensör Sistemi	96
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	99
3.1	Kompozit Malzemelerin Fiziksel Karakterizasyonu.....	99
3.1.1	Kompozit Malzemelerin TGA Karakterizasyonu.....	99
3.1.2	Kompozit Malzemelerin DSC Karakterizasyonu	104
3.2	Kompozit Malzemelerin Kimyasal ve Yüzey Karakterizasyonu.....	109
3.2.1	Kompozit Malzemelerin XRD Desenleri	109
3.2.2	Kompozit Malzemelerin Raman Spektrumları	112
3.2.3	Kompozit Malzemelerin XPS Spektrumları.....	115
3.2.4	Kompozit Malzemelerin SEM Görüntüleri	121
3.2.5	Grafit Malzemelerinin XRD Deseni	123
3.2.6	Grafit Malzemelerin Raman Spektrumları.....	125
3.2.7	Grafit Malzemelerin XPS Spektrumları	127
3.2.8	Grafit Malzemelerin SEM Görüntüleri.....	130

İÇİNDEKİLER (devamı)

3.3	Kompozit Malzemelerin Elektrokimyasal Karakterizasyonu.....	132
3.3.1	Kompozit A Malzemesinin Elektrokimyasal Karakterizasyonu.....	132
3.3.2	Kompozit B Malzemesinin Elektrokimyasal Karakterizasyonu	135
4.1.1	Grafit Malzemelerinin Elektrokimyasal Karşılaştırılması	139
4.1.2	Kompozit C Malzemesinin Elektrokimyasal Karakterizasyonu	143
4.	DEĞERLENDİRME	148
	KAYNAKLAR DİZİNİ.....	153
	TEŞEKKÜR	161
	ÖZGEÇMİŞ.....	162



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1 Lityum Pil Örnekleri	3
Şekil 1. 2 Lityum Pillerin Enerji Depolaması.....	4
Şekil 1. 3 Lityum İyon Pillerin Çalışma Prensibi	6
Şekil 1. 4 Fosil Yakıtlar ve Temiz Enerji	9
Şekil 1. 5 Karbon ayak izi.....	10
Şekil 1. 6 Çevreci Li-iyon Piller.....	12
Şekil 1. 7 Katot Malzemelerinin Kristal Yapıları.....	14
Şekil 1. 8 Katotların Kapasite Görseli	15
Şekil 1. 9 9 Anot malzemeleri	17
Şekil 1. 10 Grafit Gösterimi	18
Şekil 1. 11 Yüksek Kapasiteli Lityum-iyon Piller.....	19
Şekil 1. 12 Kalem Pillerin Şematik Gösterimi	21
Şekil 1. 13 Lityum iyon Pillerin Gelişimi.....	27
Şekil 1. 14 Polimer Zinciri.....	28
Şekil 1. 15 Farklı Anot Malzemeleri Kristal Yapıları	31
Şekil 1. 16 Termoplastik Örnekleri	32
Şekil 1. 17 Kompozit Malzemenin Bileşenleri.....	37
Şekil 1. 18 Termoplastik Granülleri	40
Şekil 1. 19 Ekstürder Gösterimi	43
Şekil 1. 20 Tek Vidalı Ekstrüder	46
Şekil 1. 21 Çift Vidalı Ekstrüder	49
Şekil 1. 22 Çift Vidalı Ekstrüder	53
Şekil 1. 23 Enjeksiyon Makinesi Görseli	56
Şekil 1. 24 Termoplastik Malzemeler.....	58
Şekil 1. 25 PBT Açık Yapısı.....	60
Şekil 1. 26 Elektrokimya Gösterimi	66
Şekil 1. 27 Elektrokimyasal Ölçüm Örneği.....	67
Şekil 1. 28 Voltammogram.....	73
Şekil 1. 29 SEM Çalışma Prensibi.....	74
Şekil 1. 30 XPS Çalışma Prensibi	76

ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)

Şekil 2. 1 Alt Piston	94
Şekil 2. 2 Üst Piston.....	94
Şekil 2. 3 Referans Elektrot	95
Şekil 2. 4 Pil Ölçüm Kabini Görseli	95
Şekil 2. 5 Alt Piston	96
Şekil 2. 6 Sensör.....	97
Şekil 2. 7 Basınç Sensörü.....	97
Şekil 2. 8 Pil Test Ölçüm Hücresi.....	98
Şekil 3. 1 Kompozit Malzemesi A Termogramı	100
Şekil 3. 2 Kompozit B malzemesinin Termogramı.....	101
Şekil 3. 3 Kompozit C Malzemesinin Termogramı	102
Şekil 3. 4 Kompozit Malzemelerinin TGA Termogramlarının Karşılaştırılması	104
Şekil 3. 5 Kompozit A Malzemesinin DSC Termogramı	105
Şekil 3. 6 Kompozit B Malzemesinin DSC Termogramı	106
Şekil 3. 7 Kompozit C Malzemesinin DSC Termogramı	107
Şekil 3. 8 Kompozit Malzemelerin DSC Termogramları Karşılaştırılması.....	108
Şekil 3. 9 Kompozit Malzemelerin XRD Deseni.....	110
Şekil 3. 10 Kompozit Malzemelerin Raman Spektrumları	113
Şekil 3. 11 Kompozit A Malzemesinin XPS Spektrumu	116
Şekil 3. 12 Kompozit B Malzemesinin XPS Spektrumu	118
Şekil 3. 13 Kompozit C Malzemesinin XPS Spektrumu	120
Şekil 3. 14 Kompozit Malzemelerin ve Grafitin SEM Görüntüleri.....	122
Şekil 3. 15 Doğal Grafit, Sentetik Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin XRD Deseni	124
Şekil 3. 16 Doğal Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin Raman Spektrumu.....	126
Şekil 3. 17 Doğal Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin XPS Spektrumları.....	128
Şekil 3. 18 Doğal Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin SEM Görüntüleri.....	130
Şekil 3. 19 Kompozit A Malzemesinin Döngüsel Voltammogramı	132
Şekil 3. 20 Kompozit A Malzemesinin Şarj-Deşarj Ölçümleri	134
Şekil 3. 21 Kompozit B Malzemesinin Voltammogramı.....	136
Şekil 3. 22 Kompozit B Malzemesinin Şarj-Deşarj Ölçümleri.....	138
Şekil 3. 23 Sentetik Grafit Şarj-Deşarj Ölçümleri	140
Şekil 3. 24 Doğal Grafitin Şarj-Deşarj Ölçümleri.....	141
Şekil 3. 25 Koşullandırılmış Grafitin Şarj-Deşarj Ölçümleri	142
Şekil 3. 26 Kompozit C Malzemesinin Voltammogramı.....	144
Şekil 3. 27 Kompozit C Malzemesinin Şarj-Deşarj Ölçümü	146

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1 Kompozit malzeme A'nın hazırlanmasına ilişkin çift vidalı ekstrüder üretim ve sıcaklık parametreleri.....	80
Tablo 2 Kompozit Malzeme B'nin hazırlanmasına ilişkin çift vidalı ekstrüder parametreleri	82
Tablo 3 Pil Hücresi Oluştururken Anot Malzemesi İçerikleri.....	83
Tablo 4 Kompozit Malzeme C'nin hazırlanmasına ilişkin çift vidalı ekstrüder parametreleri	84
Tablo 5 Pil Hücresi Oluştururken Anot Malzemesi İçerikleri.....	84
Tablo 6 Doğal Grafit ile Üretilen Malzemenin Hazırlanması	88
Tablo 7 Koşullandırılmış Grafit ile Yapılan Malzemenin Hazırlanması.....	89



KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
ΔE_p	Toplam Potansiyel
E_{pa}	Anodik Potansiyel
E_{pc}	Katodik Potansiyel
A	Elektrot Alanı
D	Difüzyon Katsayısı
C	Spesifik Kapasite

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
EC	Etilen karbonat
DMC	Dimetil karbonat
MEC	Metil karbonat
PC	Propilen karbonat
DEC	Dietil karbonat
CNT	Karbon nanotüp
GNS	Grafen nanoplakalar
C60	Fulleren
CV	Döngüsel Voltammetri
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XPS	X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
SG	Sentetik Grafit
NG	Doğal Grafit
PBT	Polibütilentereftalat
PP	Polipropilen



1.GİRİŞ

1.1 Enerji ihtiyacı

Son yıllarda, dünya nüfusunun hızlı artışı beraberinde artan gıda, su ve enerji gereksiniminde hızla artmasına yol açmaktadır. Özellikle enerji gereksiniminin hala büyük bir oranda fosil kökenli yakıtlardan temin edilmesi ve bu tür yakıt kaynaklarının giderek azalması yanında fosil kökenli yakıtlar gibi enerji kaynaklarının sürdürülebilir olmayan kullanımını teşvik etmekte ve onların önemli bir çevresel kirleticisi olmaları nedeniyle (Qadir et al. 2021) yenilenebilir, çevre dostu temiz yeni enerji kaynaklarını ön plana çıkarmaktadır. Fosil kökenli yakıtların tüketilmesiyle sera etkisine yol açan karbondioksit yanında insan sağlığını doğrudan etkileyen is, azot oksitler ve kükürt oksitler gibi zararlı gazlar da atmosfere salınmaktadır. Atmosferde artan gaz miktarları hem sera etkisiyle sıcaklıkların artmasına hem de atmosfer katmanlarının da etkilenmesi nedeniyle güneş gelen mor ötesi ışınların daha büyük oranda dünyaya düşmesi sonucu kimi sağlık sorunlarının da artışına yol açmaktadır. Bu nedenle son yıllarda alternatif ve temiz enerji kaynaklarına gereksinim duyulmaktadır.

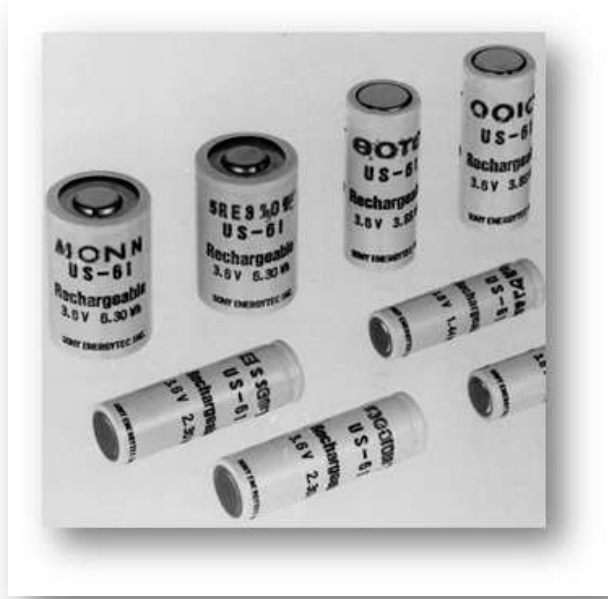
Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımlar artarken, bu kaynakların doğası gereği değişken ve tahmin edilemez olması, güvenilir ve sürekli enerji sağlama konusunda kimi zorluklarla karşılaşılmalıdır(Sinsel, Riemke, and Hoffmann 2020). Bu nedenle, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerjinin depolanması, enerji erişimindeki bu kesintileri azaltabilir ve enerji arz güvenliğini artırabilir. Bu durum, etkili enerji depolama çözümlerine olan ihtiyacı gündeme getirmekte ve lityum iyon gibi gelişmiş pil teknolojilerinin önemini artırmaktadır(Ahmed and Maraz 2023).

Enerji depolama teknolojileri, özellikle lityum iyon pillerin gelişmesi ile farklı bir boyuta evrilmiştir(Barbosa et al. 2021). Sadece enerji arzını düzenlemek ve enerji güvenliğini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliğini

artırarak çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirmekte büyük bir önem arz etmektedir. Bu piller, yüksek enerji yoğunluğu, hızlı şarj yeteneği ve uzun kullanım ömürleri ile, elektrikli araçlardan akıllı şebekelere kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Dolayısıyla, lityum iyon piller, modern dünyanın artan enerji ihtiyaçlarını karşılamada kritik bir bileşen olarak ön plana çıkmaktadır(Jingjing Xu et al. 2023).

1.2 Lityum-iyon Pilleri

Lityum iyon piller, modern enerji depolama çözümleri arasında öne çıkan teknolojilerden biridir. 1991 yılında Şekil 1.1’de gösterilmiş ticari olarak piyasaya sürülen bu piller, özellikle yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür süreleri ile dikkat çekmiştir(Armand et al. 2020). Lityum iyon piller, lityum iyonlarının katottan anoda ve anottan katoda doğru hareket ettiği elektrokimyasal bir mekanizmaya dayanmaktadır. Bu hareket, pillerin şarj ve deşarj süreçlerini mümkün kılmaktadır.



Şekil 1. 1 Lityum Pil Örnekleri

Lityum iyon pil teknolojisi, ilk kez 1970'lerde M.S. Whittingham tarafından geliştirilmiştir(Bhukya et al. 2021). Başlangıçta lityum metali doğrudan katot elektrodu olarak kullanılmış olsa da reaktif doğası ve güvenlik endişeleri nedeniyle sonraki gelişmeler lityum iyonlarına odaklanmıştır. Sony, 1991 yılında ilk ticari lityum iyon pilini piyasaya sürerek bu alanda bir dönüm noktası oluşturmuştur. O zamandan bu yana, malzeme bilimi ve mühendislikteki ilerlemelerle pil performansında önemli iyileşmeler sağlanmıştır(Ferrara et al. 2021).

Lityum iyon piller, geniş bir kullanım alanına sahiptir. Taşınabilir elektronik cihazlardan elektrikli araçlara, enerji depolama sistemlerinden medikal cihazlara kadar birçok alanda Şekil 1.2'deki gibi paketler halinde de tercih edilmektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji sistemlerinin, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi gibi değişken enerji kaynaklarının entegrasyonunda kritik rol oynamaktadır(Worku, Zheng, and Wang 2022).



Şekil 1. 2 Lityum Pillerin Enerji Depolaması

Lityum iyon pillerin temel bileşenleri; anot, katot, elektrolit ve separatörden oluşmaktadır. Anot genellikle grafit gibi karbon bazlı malzemelerden, katot ise lityum metal oksitlerinden yapılmaktadır(Ma and Li 2021). Elektrolit, lityum iyonlarının anot ile katot arasında taşınmasını sağlayan iletken bir malzeme olup genellikle lityum tuzlarının organik çözücülerde çözünmesiyle elde edilmektedir. Separatör, elektrotlar arasında fiziksel bir bariyer olup sistemdeki asıl görevleri kısa devreyi önlemektir.

Elektrot malzemeleri, lityum iyon pillerinin performansını belirleyen en önemli bileşenleridir. Anot malzemeleri olarak yaygın olarak kullanılan grafit, yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır ve şarj sırasında lityum iyonlarını depolamaktadır(J. Kim, Nithya Jeghan, and Lee 2020). Katot malzemesi olarak kullanılan lityum metal oksitler (örneğin, LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4 vb.) ise, pillerin kapasite ve voltaj seviyelerini belirlemektedir(Q. Yu et al. 2024). Yenilikçi araştırmalar, daha güvenli ve daha verimli elektrot malzemeleri geliştirmek üzere

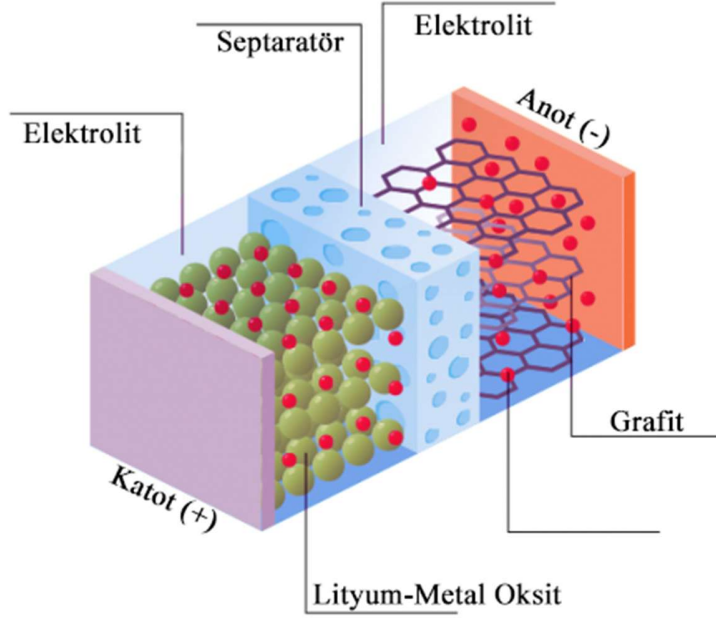
sürdürülmektedir. Özellikle, son yıllardaki çalışmalarda silikon bazlı anotlar ve yüksek nikel içerikli katotlar gibi yeni malzemelerin daha yüksek kapasite ve daha iyi performans vaat edilmektedir(Greenwood, Wentker, and Leker 2021).

Lityum iyon piller, yüksek verimlilikleri ve uzun ömür süreleri ile enerji depolama teknolojilerinde yenilikler getirmiştir. Sürekli gelişen malzeme bilimi ve mühendisliği araştırmaları bu pillerin kapasitesi ve güvenliği artırılmakta, aynı zamanda maliyetleri düşürülmektedir. Bu gelişmeler, lityum iyon pilleri günümüzün ve geleceğin enerji depolama çözümleri için vazgeçilmez kılmaktadır.

1.2.1 Lityum iyon pillerin çalışma prensibi

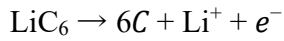
Lityum iyon piller, elektrokimyasal enerji depolama ve dönüşüm cihazları olarak tanımlanmaktadır. Bu cihazlar, elektrik enerjisinin kimyasal enerji olarak depolanması ve gerektiğinde tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemini gerçekleştirmektedir. Bu pillerin çalışma prensibi, lityum iyonlarının pilin iki temel bileşeni olan anot ve katot arasında hareket etmesine dayanmaktadır. Bu işlemler Şekil 1.3'te gösterildiği gibi şarj ve deşarj olarak adlandırılmaktadır.

Lityum İyon Pillerin Çalışma Presibi

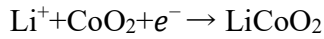


Şekil 1. 3 Lityum İyon Pillerin Çalışma Prensibi

Deşarj sırasında, lityum- grafit anotunda Li'den Li⁺ (+1 yükseltgenme durumuna) yükseltgenir ve aşağıdaki reaksiyon gerçekleşir:



Bu lityum iyonları, elektrolit ortamından katoda göç eder ve burada lityum kobalt okside dahil edilirler ve kobalt +4 değerliğinden +3 değerliğine indirgenir:

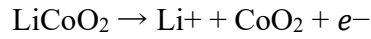


Deşarj sırasında, dış bir elektrik kaynağı pillere enerji sağlamaktadır. Bu enerji, anottan (genellikle grafit) lityum iyonlarını, elektrolit aracılığıyla katoda (genelde lityum kobalt oksit, LiCoO₂ gibi lityum metal oksitler) doğru hareket ettirmektedir.

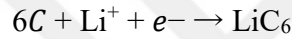
Lityum iyonlarının katoda entegrasyonu, elektronların harici devre üzerinden anottan katoda doğru akmasını sağlamaktadır. Bu da elektrik akımının devam etmesine olanak tanınmaktadır(W. Xu et al. 2022).

Bu elektrokimyasal süreçler sırasında, anotta şu reaksiyon gerçekleşir:

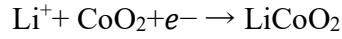
Katotta Gerçekleşen Tepkime (yükseltgeme):



Anotta Gerçekleşen Tepkime (indirgeme):



Bu reaksiyon, lityum iyonlarının anot materyalinden çıkarak elektrolite geçişini ve bir elektronun harici devreye aktarılmasını içerir. Katotta ise, lityum iyonları elektrolite geçer ve aşağıdaki reaksiyon gerçekleşir:



Bu reaksiyon, lityum iyonlarının katot materyaline entegre olmasını ve elektronların elektrik akımı olarak kullanılacak şekilde harici devreye katılmasını sağlar(Wang et al. 2021).

Lityum iyon piller, şarj ve deşarj döngüleri sırasında gösterdikleri yüksek enerji verimliliği ve uzun döngü ömürleri nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmektedir. Bu pillerin performansı, kullanılan elektrot malzemelerinin kristal yapısı ve kimyasal bileşimi, elektrolit kompozisyonunun iyonik iletkenliği ve stabilitesi, ayrıca pilin genel tasarım ve mühendislik özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Anot malzemesi olarak yaygın kullanılan grafit ve alternatif olarak araştırılan silisyum, lityum metali gibi ileri malzemeler, lityum

iyonlarının depolanma kapasitesini ve deşarj kinetiklerini doğrudan etkilemektedir.

Katot malzemeleri ise genellikle lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum demir fosfat (LiFePO_4), lityum nikel kobalt alüminyum oksit (NCA) ve lityum nikel mangan kobalt oksit (NMC) gibi kompleks oksitlerden oluşmakta olup, bu malzemelerin faz kararlılığı ve elektron iletkenliği pilin enerji yoğunluğu ve termal kararlılığı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Elektrolit olarak kullanılan sıvı, katı veya jel formundaki lityum tuzları, iyonik iletkenlik ve elektrokimyasal pencere açısından optimize edilmektedir. Bu teknik parametrelerin her biri, lityum iyon pillerinin enerji depolama kapasitesinin artırılması, güvenlik performansının iyileştirilmesi ve genel pil ömrünün uzatılması gibi kritik geliştirme süreçlerinde temel öneme sahiptir. Bu nedenle, lityum iyon pil teknolojilerinin ileriye taşınmasında malzeme bilimi ve elektrokimya alanındaki yenilikçi araştırmalar büyük bir katkı sağlamaktadır.

1.3 Elektrik Enerjinin Depolanmasında Lityum Piller

Lityum piller, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve fosil yakıtların yerini alabilecek sürdürülebilir enerji çözümleri sunma potansiyeline sahiptir. Lityum pillerin fosil yakıtlara bağlı karbon ayak izini azaltma çabalarında nasıl kritik bir rol oynayabileceğini ve yeni nesil enerji çözümleri olarak uygulanabilirliklerini hakkında çalışmalar devam etmektedir(Lander et al. 2021).

Fosil yakıtların yakılması, küresel karbon emisyonlarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır ve bu da iklim değişikliği, hava kirliliği ve asit yağmurları gibi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Enerji üretimindeki bu bağımlılığı azaltmak, çevresel sürdürülebilirlik için kritik bir adımdır. Lityum piller, bu bağımlılığı azaltmada önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Lityum piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür süreleri ve yeniden şarj edilebilir yapıları ile hem taşınabilir elektronik cihazlarda hem de elektrikli

araçlarda fosil yakıtlı alternatiflere çevreci bir alternatif sunmaktadır. Özellikle elektrikli araçlar, karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir çünkü bu araçlar, geleneksel fosil yakıtlı araçlara göre çok daha az karbon emisyonu üretmektedir.

Genel olarak, elektrikli araçlar, benzinli araçlara kıyasla "kuyudan tekerleğe" bazında %40-70 daha az karbon emisyonu üretmektedir(Vega-Perkins, Newell, and Keoleian 2023). Bu, kullanılan elektrik enerjisinin kaynağına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 4'te de gösterildiği üzere eğer elektrik yenilenebilir kaynaklardan (güneş, rüzgâr, hidroelektrik vb.) üretiliyorsa, bu oran daha da artabilir(Poornesh, Nivya, and Sireesha 2020). Örneğin, tamamen yenilenebilir enerji ile çalıştırıldığında, elektrikli araçlar neredeyse sıfır emisyon üretebilirler(Bastida-Molina et al. 2020).



Şekil 1. 4 Fosil Yakıtlar ve Temiz Enerji

ABD Enerji Enformasyon İdaresi (EIA) ve Avrupa Çevre Ajansı (EEA) gibi kuruluşların yaptığı araştırmalara göre, elektrikli araçların kullanımı, geleneksel

araçlara göre ortalama olarak yaklaşık %60 daha az karbon emisyonu ile sonuçlanmaktadır(Reichmuth, Dunn, and Anair 2022).



Şekil 1. 5 Karbon ayak izi

Lityum piller ayrıca, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin depolanmasında da kritik bir role sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğaları gereği dönersel ve tahmin edilemez olduğundan, bu enerjilerin depolanması, enerji arzının sürekliliğini ve güvenilirliğini sağlamada önemli bir faktördür. Geliştirilen yeni nesil lityum pil teknolojileri, daha da verimli ve çevre dostu hale gelmektedir. Lityum piller bu bağlamda, üretilen yenilenebilir enerjinin verimli bir şekilde depolanmasını ve gerektiğinde kullanılmasını sağlar(Lander et al. 2021). Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegrasyonları sayesinde, lityum piller yeni nesil enerji ihtiyaçları için giderek daha uygulanabilir bir seçenek haline gelmektedir. Bu süreçte, lityum pil teknolojisine yapılan yatırımların artırılması, gelecekteki enerji sistemlerinin şekillenmesinde belirleyici rol oynayacağını göstermektedir.

1.4 Lityum Pillerinin Önemi

Lityum piller, modern dünyada teknolojik inovasyonun ve sürdürülebilir enerji çözümlerinin ön cephesinde yer almaktadır. Lityum pillerin neden bu kadar önemli olduğunu ve gelecekteki enerji sistemlerinde nasıl merkezi bir rol oynayabileceğini birçok araştırma tarafından sunulmaktadır.

Lityum piller, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömür süreleri ile enerji depolama teknolojisinde önemli gelişim göstermiştir. Bu özellikler, lityum pilleri, taşınabilir cihazlardan elektrikli araçlara ve büyük ölçekli yenilenebilir enerji depolama sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanında vazgeçilmez kılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmak ve enerji arz güvenliğini artırmak için kritik bir araç olan lityum piller, enerji sistemlerinin daha esnek ve daha verimli çalışmasını sağlamaktadır(Johnson et al. 2021).

Lityum piller, düşük karbon ayak izi ve çevresel etkileri azaltma kapasitesi ile öne çıkar. Fosil yakıtların kullanımını azaltarak, küresel ısınma ve hava kirliliği gibi çevresel sorunlara karşı mücadelede önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, elektrikli araçların yaygınlaşmasında önemli bir etmen olan lityum piller, karbon emisyonlarını önemli ölçüde düşürmekte ve şehirlerdeki hava kalitesini iyileştirmektedir(Qadir et al. 2021).



Şekil 1. 6 Çevreci Li-iyon Piller

Lityum piller, enerji depolama maliyetlerini düşürme potansiyeli ile ekonomiye büyük katkıda bulunmaktadır. Şekil.7’de gösterildiği gibi çevreci veya yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin depolanması ve gerektiğinde kullanılması, enerji fiyatlarını kararlı hale getirir ve enerji piyasalarında daha fazla rekabet oluşturmaktadır. Bu da tüketicilere düşük maliyetli ve daha sürdürülebilir enerji seçenekleri sunmaktadır.

Lityum piller, enerji depolama teknolojilerinde bir devrim yaratmış olup, özellikle güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması ve verimli bir şekilde kullanılması konusunda büyük fırsatlar sunmaktadır. Bu, özellikle enerji depolama maliyetlerinin düşürülmesine büyük katkı sağlamaktadır.

Örneğin, Tesla'nın Güney Avustralya'da kurduğu Hornsdale Power Reserve, dünyanın en büyük lityum iyon pil depolama sistemidir. Bu sistem, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen fazla enerjiyi depolayarak, enerji talebinin yüksek olduğu zamanlarda bu enerjiyi şebekeye geri verebilmektedir(Sanjit et al. 2022). Sistemin devreye girmesiyle birlikte, bölgedeki enerji maliyetleri önemli ölçüde düşmüş ve enerji piyasasındaki fiyat dalgalanmaları azalmıştır. Bu tür büyük

ölçekli enerji depolama çözümleri, lityum pillerin ekonomiye olan katkısının somut örneklerinden biridir.

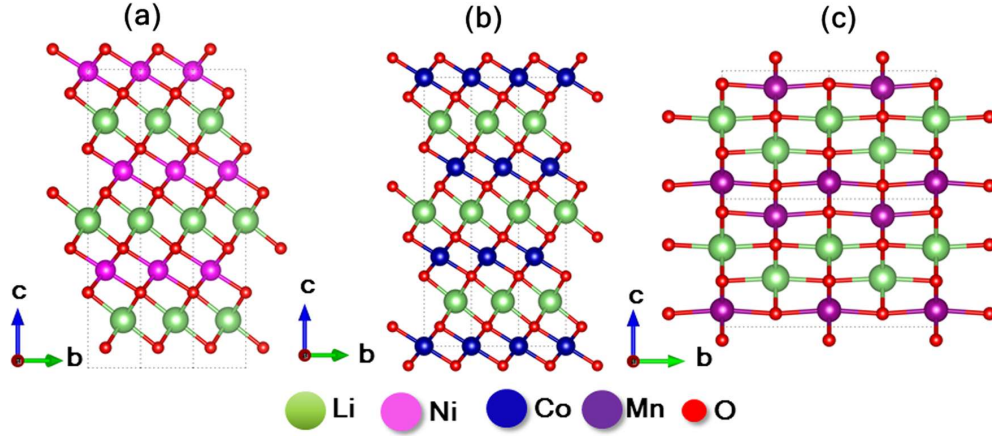
Lityum pil teknolojisi, sürekli gelişim içindedir. Daha güvenli, daha verimli ve çevre dostu pillerin geliştirilmesi için yapılan araştırmalar, bu alandaki inovasyonun sınırlarını zorlamaktadır. Örneğin, katı hal pilleri ve lityum hava pilleri gibi yeni nesil teknolojiler, bu alanın gelecekte nasıl dönüşebileceğine ilişkin heyecan verici ipuçları sunmaktadır. Lityum piller, akıllı şebekeler ve endüstriyel otomasyon gibi yeni teknolojilerle entegre edilerek, daha akıllı ve daha sürdürülebilir bir gelecek inşa etme potansiyeline sahiptir(Jingjing Xu et al. 2023).

1.5 Lityum İyon Pillerinde Kullanılan Elektrot Malzemeleri

1.5.1 Katot Malzemesi

Katot malzemesi, lityum iyon pillerin performansında belirleyici bir rol oynar. Katotlar, pilin kapasitesini, enerji yoğunluğunu, şarj süresini ve genel verimliliğini etkileyen elektrokimyasal özelliklere sahiptir. Genel olarak, katot malzemeleri lityum metal oksitlerden yapılır ve bu malzemelerin kimyasal yapısı, pillerin enerji yoğunluğunu ve voltaj seviyelerini belirler(Armand et al. 2020).

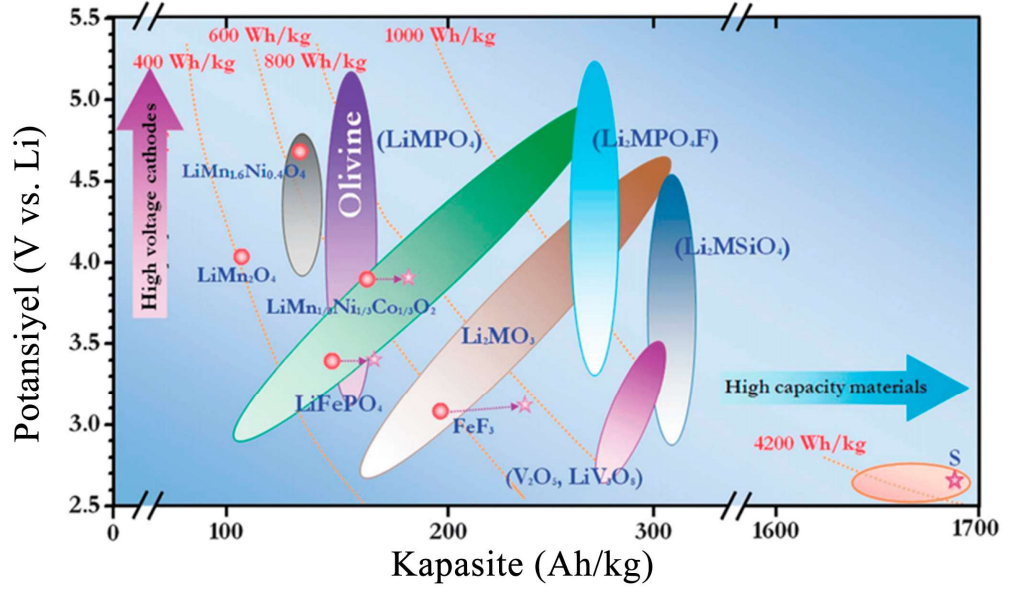
En yaygın kullanılan katot malzemeleri arasında Lityum Kobalt Oksit (LiCoO_2) bulunur. LiCoO_2 , yüksek enerji yoğunluğu ve kararlılığı nedeniyle özellikle taşınabilir elektronik cihazlarda tercih edilir. Kristal yapıları Şekil.8’de verilmiştir. Ancak, kobaltın yüksek maliyeti ve sınırlı kaynakları, yeni katot malzemelerine olan ilgiyi artırmıştır. Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4), kobalt içermeyen bir seçenek olarak öne çıkar; bu malzeme, mükemmel termal kararlılığa ve uzun ömür gibi avantajlar sunar, ancak daha düşük voltaj seviyeleri nedeniyle enerji yoğunluğu LiCoO_2 'den daha azdır(F. Li et al. 2021).



Şekil 1. 7 Katot Malzemelerinin Kristal Yapıları

Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit (NMC) ve Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) gibi diğer karmaşık oksitler de yüksek kapasite ve enerji yoğunluğu sağlamak için geliştirilmiştir. NMC, otomotiv uygulamaları için idealdir çünkü maliyet etkinliği ve uzun ömür özellikleriyle dikkat çeker. NCA ise özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılır ve yüksek enerji yoğunluğu sağlar, ancak termal kararlılık konusunda zorluklara neden olmaktadır(Saaaid et al. 2024).

Bu çeşitlilik, katot malzemelerinin seçiminde dikkate alınması gereken çeşitli faktörleri yansıtır: maliyet, kaynak bulunabilirliği, enerji yoğunluğu, güvenlik ve çevresel etki. Katot teknolojisindeki yenilikler, lityum iyon pillerin gelecekteki gelişimini şekillendirmeye devam edecektir.



Şekil 1. 8 Katotların Kapasite Diyagramı

Son yıllarda lityum iyon pillerde kullanılan katot malzemeleri üzerine yapılan bilimsel çalışmalar, bu malzemelerin deşarj kapasitelerini artırma yönünde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Şekilde. 9'da yaygın olarak kullanılan katot malzemelerinin potansiyele göre kapasiteleri verilmiştir. 2021 yılında yayımlanan "Lityum Kobalt Oksit Katotlarının Yüzey Modifikasyonu ile Performans Artışı" başlıklı çalışmada, LiCoO_2 'nin yüzey modifikasyonlarının, yüksek voltajlarda döngü kararlılığını ve kapasite korunmasını önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir; bu optimizasyonlar sayesinde 200 mAh/g kapasiteye kadar ulaşılmıştır(Mishra et al. 2021).

2021'de yapılan "Yüksek Güvenlikli Lityum-İyon Bataryalar için Lityum Demir Fosfat Katot Malzemelerindeki Son Gelişmeler" isimli araştırma, LiFePO_4 'un elektronik iletkenliğini artırmak için bir katkı maddesi stratejisi geliştirdi ve bu sayede 170 mAh/g kapasiteyle 1000 döngü üzerinde kararlı performans sağlandığını ortaya koydu(Zhao et al. 2021).

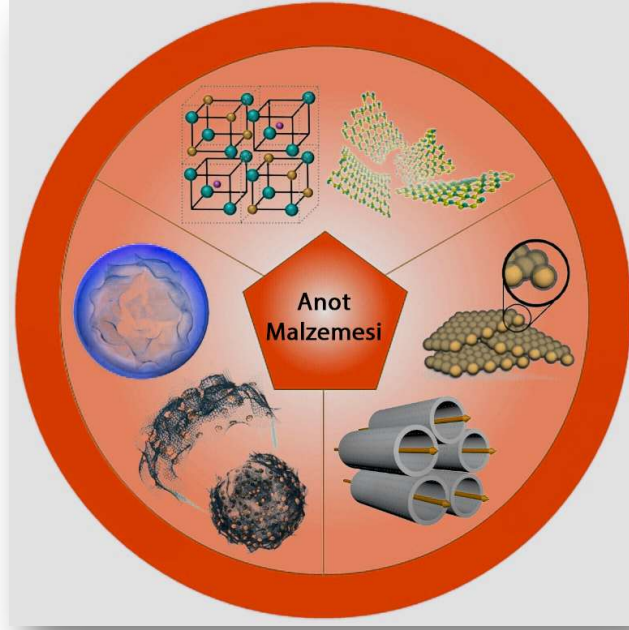
2022'de "Lityum-İyon Bataryalarında İyileştirilmiş Yüksek Sıcaklık Performansı için NMC Katotlarının Yapısal Optimizasyonu" çalışması, optimize edilmiş NMC katotlarının 220 mAh/g üzerinde deşarj kapasitesi sunabildiğini ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi termal kararlılık ve düşük aşınma ile performans gösterdiğini belirtmiştir(Darjazi et al. 2022).

2020'te yayımlanan "Yenilikçi Kaplama Teknikleri ile Yüksek Kapasiteli NCA Katotlarının Ömrünün Uzatılması" araştırması, NCA katotlarının ömrünü ve kapasitesini artırmak için yeni bir alümina kaplama işlemi kullanıldığını ve bu işlemle 230 mAh/g'ye kadar deşarj kapasitesine ulaşıldığını göstermiştir(Sun et al. 2020).

Bu çalışmalar, katot malzemelerinin performansını artırarak lityum iyon pillerin enerji depolama teknolojilerindeki yerini daha da sağlamlaştırmaktadır. Her bir malzeme, enerji yoğunluğu, maliyet ve çevresel etki gibi faktörler açısından farklı avantajlar sunarak enerji depolama teknolojilerinin geleceğini şekillendirmeye yardımcı olmaktadır.

1.5.2 Anot Malzemesi

Lityum iyon pillerde anot malzemesi, pilin genel performansı, güvenliği ve verimliliği üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Anotlar, pillerin şarj sırasında lityum iyonlarını kabul eden ve deşarj sırasında bunları geri veren elektrotlardır. Günümüzde kullanılan anot malzemeleri arasında grafit, silisyum, lityum metal ve çeşitli alaşımlar bulunmaktadır (Şekil. 10). Her bir malzemenin kimyasal yapısı ve elektrokimyasal özellikleri, onların enerji yoğunluğu, şarj hızı ve döngü ömrü gibi özellikleri belirler(Z. yuan Feng et al. 2021).

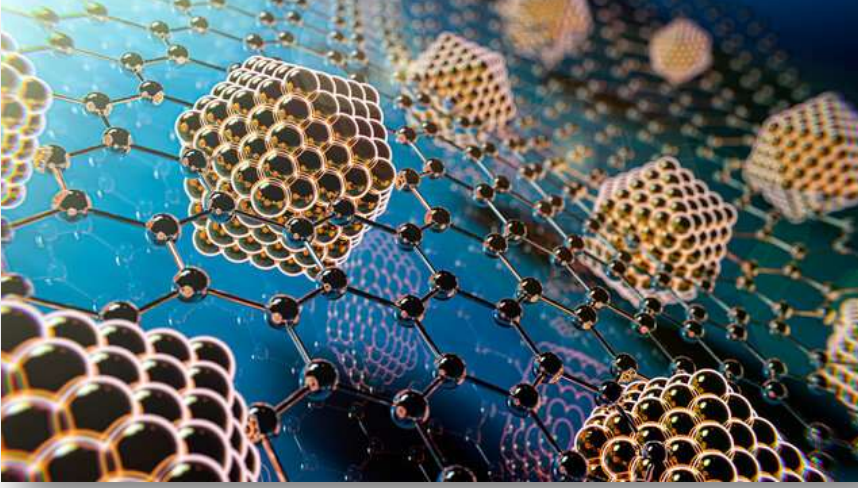


Şekil 1. 9 1 Anot malzemeleri

Grafit (Şekil.11), lityum iyon pillerinin anot malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemedir. Yüksek elektriksel iletkenliği ve kararlı kimyasal yapısı sayesinde, grafit anotlar, iyi bir döngü ömrü ve enerji yoğunluğu sunar. Grafitin katmanlı yapısı, aralarına lityum iyonlarının kolayca girip çıkabileceği geniş alanlar sağlar. Bu özellik, grafiti şarj-deşarj döngülerine karşı oldukça dayanıklı kılar ve pilin genel verimliliğini artırır. Grafit anotlar, lityum iyon piller için standart bir seçenektir ve yaklaşık 372 mAh/g gravimetrik kapasiteye sahiptir. Grafitin kararlı yapısı ve iyi iletkenliği, onu güvenilir ve tercih edilen bir malzeme yapar. Ancak, enerji yoğunluğu bakımından sınırlamaları vardır(H. Zhang et al. 2021).

Silisyum, grafit anotlarla karşılaştırıldığında lityum iyonları için çok daha fazla depolama kapasitesine sahiptir. Teorik olarak, silisyumun gravimetrik kapasitesi grafitinkinin on katına kadar çıkabilir. Ancak, silisyumun kullanımı, malzemenin şarj sırasında %300'e varan oranlarda hacim genişlemesi gibi teknik

zorlukları vardır. Bu genişleme, malzeme yapısında çatlaklara ve sonuç olarak pil performansında zamanla düşüşe yol açabilir(P. Yu et al. 2023).



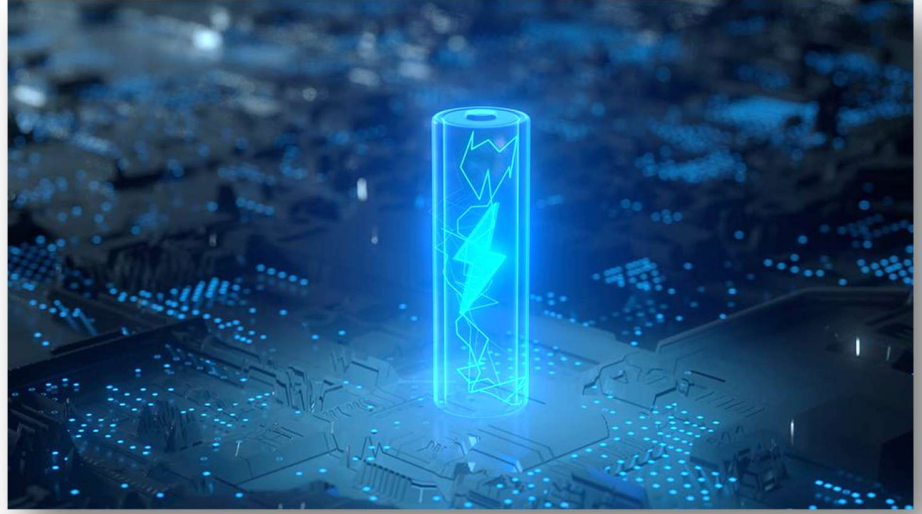
Şekil 1. 10 Grafit Gösterimi

Silisyum esaslı anotlar, teorik olarak 4200 mAh/g'e kadar çok daha yüksek bir kapasite sunar. Bu yüksek kapasite, silikonun pillerin enerji yoğunluğunu dramatik olarak artırma potansiyelini gösterir. Ancak, pratikte silisyum anotların kullanımı, hacim genişlemesi sorunları nedeniyle genellikle silisyum-grafit kompozitler şeklinde sınırlıdır. Bu hibrit malzemeler, silisyumun yüksek kapasitesinden yararlanırken, grafitin mekanik stabilitesini sağlayarak daha dengeli bir performans sunar(Z. yuan Feng et al. 2021).

Lityum metal anotlar, saf lityum kullanıldığında 3860 mAh/g'e kadar olağanüstü bir teorik kapasiteye sahiptir(T. Kim et al. 2019). Bu, lityum metalin enerji yoğunluğu açısından en iyi malzeme olduğunu gösterir. Lityum metal, lityum iyon piller için potansiyel bir anot malzemesi olarak kabul edilir çünkü saf lityum, olağanüstü yüksek bir teorik kapasiteye sahiptir. Ancak, lityum metalin kullanımı, yüksek reaktivite ve pil içerisinde istenmeyen lityum dendritlerinin

oluşumu gibi güvenlik risklerini beraberinde getirir. Dendrit oluşumu, kısa devre riskini artırarak pilin güvenliğini tehdit edebilir. Bu nedenle, lityum metal anotların ticari lityum iyon pillerde kullanımı, bu güvenlik sorunlarının üstesinden gelinene kadar sınırlıdır(Sinsel, Riemke, and Hoffmann 2020).

Anot teknolojisi alanında devam eden araştırmalar, daha güvenli, daha dayanıklı ve daha yüksek kapasiteli lityum iyon piller(Şekil.12) geliştirmeyi amaçlamaktadır. Yeni nesil anot malzemeleri arasında, nano-mühendislik yoluyla iyileştirilmiş silisyum anotlar, lityum-sülfür ve lityum-hava gibi alternatif kimya piller için lityum metal anotlar bulunmaktadır. Ayrıca, çevresel etkiyi azaltmak ve kaynak sürdürülebilirliğini artırmak amacıyla biyo-bazlı ve geri dönüştürülmüş malzemelerden anotlar geliştirilmektedir(Jinhui Xu et al. 2022).



Şekil 1. 11 Yüksek Kapasiteli Lityum-iyon Piller

Bu geniş ve dinamik araştırma alanı, lityum iyon pil teknolojisindeki yeniliklerin devam ettiğinin bir göstergesidir. Her yeni gelişme, pillerin daha uzun ömürlü, daha hızlı şarj olan ve daha güvenli olmasını sağlama potansiyeline

sahiptir. Bu nedenle, anot malzemeleri, lityum iyon pillerin gelecekteki evrimini belirleyen anahtar faktörlerden biri olarak kalmaya devam edecektir.

1.5.3 Elektrolit Malzemesi

Lityum iyon pillerde elektrolit malzemesi, anot ve katot arasındaki iyon taşıyıcısı olarak hizmet eder ve pilin performansı, güvenliği ve ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Elektrolit, lityum iyonlarının elektrotlar arasında hızlı ve verimli bir şekilde hareket etmesini sağlayarak, pilin enerji yoğunluğu ve şarj-deşarj kapasitelerini doğrudan etkiler.

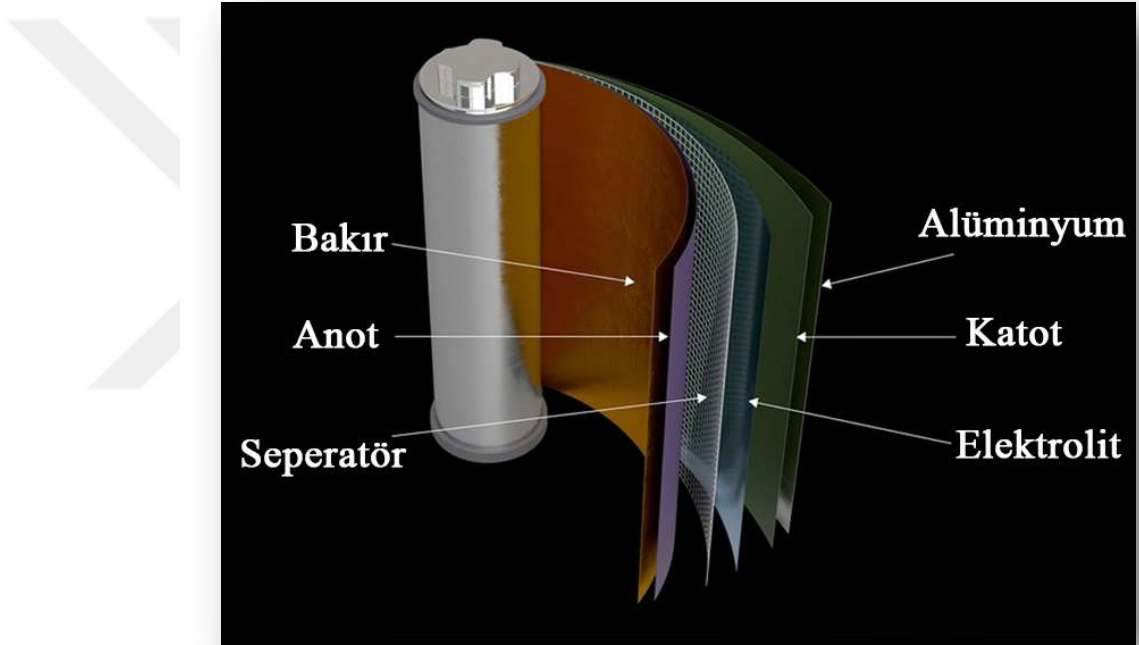
Elektrolitler, genellikle lityum tuzlarının organik çözücülerde çözülmesiyle oluşan sıvı çözeltilerdir. Lityum hekzaflorofosfat (LiPF_6) en yaygın kullanılan lityum tuzu olup, karbonat bazlı çözücülerle birleştirilmektedir. Bu çözücüler arasında etilen karbonat (EC) ve dimetil karbonat (DMC) bulunmaktadır. Bu karışımlar, yüksek iyonik iletkenlik ve geniş elektrokimyasal pencere sağlayarak, pillerin yüksek voltajlarda çalışmasını ve uzun ömürlü olmasını mümkün kılmaktadır(Haghighi, Ghalami Choobar, and Amjad-Iranagh 2020).

Son yıllarda, elektrolit malzemelerinde yapılan inovasyonlar, daha güvenli ve daha yüksek performanslı piller geliştirmeyi hedeflemektedir. Örneğin, katı hal elektrolitler, geleneksel sıvı elektrolitlere göre daha fazla güvenlik sunar çünkü yanıcı değildirler ve elektrolit sızıntısı riski taşımazlar. Katı hal elektrolitler, özellikle polimer bazlı veya seramik bazlı olabilir ve iyonik iletkenliklerinin artırılması üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemelerin kullanım alanlarını genişletmektedir.

Elektrolitlerin kimyasal kararlılığı ve termal özellikleri, lityum iyon pillerin güvenliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda veya kısa devre durumlarında, sıvı elektrolitler termal bozunmaya uğrayabilir ve bu da yangın veya patlama riskini artırabilir. Bu nedenle, elektrolit formülasyonunun

optimizasyonu, termal kararlılığı ve kimyasal uyumluluğu artırmak için kritik öneme sahiptir(Nikiforidis et al. 2021).

Ayrıca, elektrolitlerin iyonik iletkenliği, pillerin şarj ve deşarj hızlarını belirlemektedir. Daha yüksek iyonik iletkenlik, daha hızlı şarj süreleri ve daha yüksek güç çıkışları anlamına gelmektedir. Ancak, bu özellikler genellikle kimyasal kararlılığı ile dengelemek zorunda kalmakta, bu yüzden elektrolitlerin geliştirilmesi, bu iki özelliği uyumlu hale getirmeye çalışmaktadır.



Şekil 1. 12 Kalem Pillerin Şematik Gösterimi

Silisyum anotlar, teorik olarak 4200 mAh/g kapasite sunabilirken, pratikte bu değer genellikle 2000-2500 mAh/g civarında gerçekleşmektedir. Silisyum esaslı anot kullanıldığında, hacim genişlemesini kontrol altına almak ve yüksek iyonik iletkenliği desteklemek için özelleştirilmiş elektrolitler kullanılır. Örneğin, bir çalışmada, silisyum nanotel anotlarla birleştirilmiş özel bir elektrolit

kullanıldığında, piller 100 döngüden sonra bile 1500 mAh/g kapasiteyi koruyabilmiştir(Nzereogu et al. 2022b).

Lityum metal anotlar, kullanıldığında 3860 mAh/g'e kadar kapasite sunabilir. Katı hal elektrolitlerle kombinasyon halinde, bu anotlar genellikle yüksek enerji yoğunluğunu korurken güvenlik risklerini azaltır. Bazı yeni gelişmeler, lityum metal anotların katı elektrolitlerle birleştirilmesiyle 3500 mAh/g üzerinde stabil kapasiteler elde ettiğini göstermiştir(Nzereogu et al. 2022b).

Grafit anotlar tipik olarak 372 mAh/g kapasite sunar. Yüksek kaliteli elektrolitler kullanıldığında, bu anotlarla üretilen piller genellikle 300-330 mAh/g arası bir kapasite sağlar ve 500-1000 döngü üzerinde stabil bir performans gösterir(Nzereogu et al. 2022a).

Elektrolit malzemelerinin gelişimi, lityum iyon pillerin gelecekteki performansını ve uygulanabilirliğini şekillendirme potansiyeline sahiptir. Katı hal elektrolitlerin ve yeni sıvı elektrolit formülasyonlarının geliştirilmesi, daha güvenli, daha hızlı şarj olan ve daha uzun ömürlü lityum iyon pillere yol açabilir. Bu, özellikle elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi alanlarda devrim yaratacak teknolojik ilerlemelere öncü olmaktadır.

1.5.4 Separatör Malzemesi

Lityum iyon pillerdeki separatör, anot ve katot arasında elektriksel olarak izole edici bir katman olarak işlev görürken aynı zamanda iyonların geçişine izin veren gözenekli bir yapıdadır. Bu malzeme, pilin güvenliği, performansı ve döngü ömrü için kritik öneme sahiptir.

Separatörler genellikle polietilen (PE) veya polipropilen (PP) gibi poliolefinlerden üretilir. Bu malzemelerin düşük elektriksel iletkenliği ve yüksek kimyasal direnci, pil içindeki kimyasal tepkimelerden etkilenmeden elektriksel izolasyon sağlar. Ayrıca, bu malzemelerin gözenekli yapısı, iyonların elektrotlar

arasında serbestçe hareket etmesine olanak tanırken aynı zamanda fiziksel teması önleyerek kısa devre riskini en aza indirebilmektedir(Hsu et al. 2021).

Separatörün gözenek boyutu ve dağılımı, iyon akış hızını ve dolayısıyla pilin şarj-deşarj hızını doğrudan etkiler. Ayrıca, separatör malzemesinin termal kararlılığını, yüksek sıcaklıklarda pil güvenliğini artırır. Örneğin, termal daralma özelliğine sahip polietilen separatörler, aşırı sıcaklıklarda daralarak iyon akışını durdurur ve böylece kısa devre oluşumunu engelleyerek olası bir pil yangını önler.

Gelişmiş pil uygulamaları için, nanopartiküller veya seramik kaplamalar gibi yenilikçi teknolojilerle modifiye edilmiş separatörler geliştirilmektedir. Bu tür separatörler, iyon geçirgenliğini iyileştirirken mekanik ve termal dayanıklılığı artırarak pillerin daha güvenli ve daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj kapasitesi gerektiren uygulamalarda, bu gelişmiş separatörler kritik bir rol oynamaktadır(Luiso and Fedkiw 2020).

Separatör teknolojisindeki bu ilerlemeler, lityum iyon pillerin performansını ve güvenliğini artırmakta ve böylece daha geniş uygulama alanlarına olanak tanımaktadır. Bu gelişmeler, özellikle yüksek performans gerektiren endüstriyel ve tüketici elektroniği uygulamalarında, pil teknolojisinde önemli bir fark yaratmaktadır(Lu et al. 2021).

1.6 Mevcut Elektrot Malzemeleri ve Performansı

Lityum iyon pillerde kullanılan elektrot malzemeleri, pilin genel performansını, enerji yoğunluğunu, şarj süresini ve ömrünü belirleyici faktörlerdir. Pil performansı açısından anot ve katot malzemeleri hayati öneme sahiptir. En yaygın anot malzemesi grafit iken, katot malzemeleri arasında Lityum Kobalt Oksit (LiCoO_2), Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit (NMC), Lityum Nikel Kobalt Alüminyum Oksit (NCA) ve Lityum Demir Fosfat (LiFePO_4) gibi çeşitler bulunur.

Bu malzemeler, farklı uygulama gereksinimlerine göre özelleştirilebilir. Örneğin, yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyan uygulamalar için NCA ve NMC tercih edilirken, daha yüksek güvenlik gereksinimi olan durumlarda LiFePO_4 kullanılmaktadır(Armand et al. 2020).

Elektrot malzemelerinin performansı, kapasite, enerji yoğunluğu, döngü ömrü ve güvenlik gibi çeşitli ölçütlerle değerlendirilir. Enerji yoğunluğu, pilin depolayabileceği enerji miktarını ifade eder ve genellikle watt-saat/kilogram (Wh/kg) olarak ölçülür. Döngü ömrü, pilin performansının zamanla nasıl değiştiğini ve kaç şarj-deşarj döngüsüne dayanabileceğini belirler. Güvenlik ise özellikle termal kararlılık ve kimyasal reaktivite ile ilgilidir; elektrot malzemeleri yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında nasıl tepki verdiği önemlidir(L. Xu et al. 2020).

Elektrot malzemelerinde sürekli devam eden inovasyonlar, lityum iyon pillerin daha yüksek kapasitelerde ve daha uzun ömürlerde çalışmasını sağlamaktadır. Son yıllarda yürütülen araştırmalar, anot için silisyum esaslı malzemelerin ve katot için yüksek kapasiteli NCA gibi malzemelerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Ayrıca, elektrot malzemelerinin sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmesi ve çevresel etkilerinin azaltılması yönünde de çabalar bulunmaktadır(L. Xu et al. 2020).

1.7 Elektrot Malzemelerinin Zorlukları

Lityum iyon pillerin elektrot malzemeleri, birçok teknik ve operasyonel zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorluklar, malzemelerin performansını, maliyetini, sürdürülebilirliğini ve ömrünü doğrudan etkiler.

Elektrot malzemelerinin enerji depolama kapasitesi, lityum iyon pillerin en önemli özelliklerinden biridir. Ancak, mevcut anot ve katot malzemeleri, enerji yoğunluğu ve kapasite sınırlamalarına sahiptir. Özellikle, anot tarafında silisyum esaslı malzemelerde hacimsel genişlemesi ve katot tarafında yüksek voltajda

yapısal bozulmalar, malzemelerin kapasitesini sınırlayan önemli faktörlerdir(Jia et al. 2020).

Elektrot malzemelerinin döngü ömrü ve kimyasal kararlılığı, tekrarlanan şarj-deşarj döngüleri sırasında önemli ölçüde azalabilir. Özellikle, yüksek şarj hızları ve aşırı sıcaklıklar, elektrot malzemelerinin kimyasal yapısını bozarak performanslarını zamanla düşürebilir. Bu, özellikle elektrikli araçlar ve büyük ölçekli enerji depolama sistemleri gibi uygulamalarda karşılaşılan önemli sorun olarak görülmektedir.(Reichmuth, Dunn, and Anair 2022).

Lityum iyon pillerdeki elektrot malzemeleri, aşırı ısınma ve kimyasal tepkimeler nedeniyle güvenlik sorunlarına neden olabilir. Örneğin, lityum metal anotlar, yanıcı elektrolitlerle tepkimeye girdiğinde tehlikeli dendritik büyümeye yol açabilir. Bu durum, kısa devrelere ve hatta yangınlara neden olabilir(K. Zhang et al. 2021).

Elektrot malzemelerinin üretimi, çevresel açıdan önemli etkilere sahip olabilir. Örneğin, kobalt ve metallerin madenciliği, ciddi çevresel hasara ve etik sorunlara yol açabilir. Ayrıca, bu tür malzemelerin maliyeti, lityum iyon pillerin geniş çapta kullanımını zorlaştıran bir faktör olabilir.

Bu zorlukların üstesinden gelmek için dünya genelinde yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir. Bu çalışmalar, daha kararlı, daha güvenli ve daha maliyet etkin elektrot malzemeleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, elektrot malzemelerinin geri dönüşümü ve çevresel etkilerinin azaltılması üzerine de önemli ilerlemeler kaydedilmektedir.

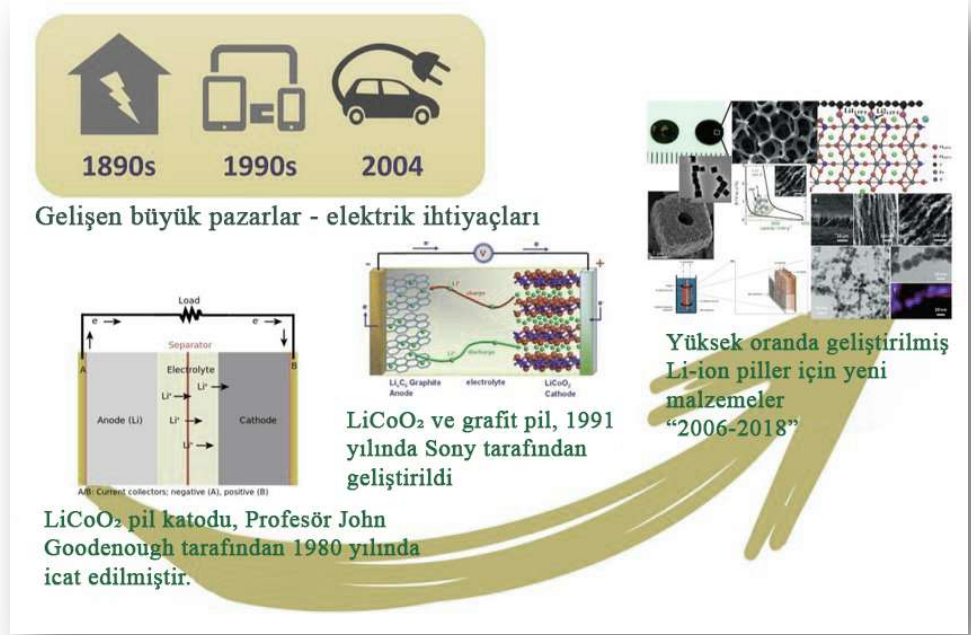
1.8 Elektrot Malzemelerinin Evrimi

Lityum iyon piller, 1970'lerde ilk kez laboratuvar ortamında geliştirilmeye başlandığında, enerji depolama teknolojilerinde yeni bir dönem başlamıştır. Bu pillerin hikayesi, sürekli bir yenilik ve gelişim süreciyle şekillendi. İlk ticari lityum

iyon pil 1991 yılında Sony tarafından piyasaya sürüldüğünde, taşınabilir elektronik cihazlar için devrim niteliğinde bir adım atılmış oldu. O günden bu yana(Şekil.14), lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve nispeten hızlı şarj kapasiteleri sayesinde dünya çapında benimsenmiştir(H. Li et al. 2009).

Başlangıçta, lityum iyon pillerin enerji yoğunluğu 150 Wh/kg edilmiştir. Ancak, malzeme bilimindeki araştırmalar ve mühendislikteki gelişmeler sayesinde enerji yoğunlunda sürekli iyileşmeyi sağlamıştır. Anot ve katot malzemelerinde yapılan geliştirmeler, elektrokimyasal kararlılık ve kapasiteyi önemli ölçüde geliştirmiştir. Özellikle, grafit anotların kullanılması ve daha sonra silisyum esaslı malzemenin keşfi, kapasite sınırlarını hep yukarıya taşımıştır. Katot tarafında ise, Lityum Kobalt Oksit'ten (LiCoO_2) Lityum Nikel Mangan Kobalt Oksit (NMC) gibi daha karmaşık bileşiklere geçiş, daha yüksek enerji yoğunluklarına ulaşılmasını sağladı(Aurbach, Markevich, and Salitra 2021).

21.yüzyılın başlarında, pillerin kapasite ve güvenlik özelliklerini daha da artırmak için katı hal teknolojilerini geliştirmeye de yönlendiler. Katı hal elektrolitler, sıvı elektrolitlere kıyasla daha yüksek termal kararlılık ve daha az yanıcılık riski sunarak, pil güvenliğinde önemli bir ilerleme sağladı. Bu teknolojik yenilikler, özellikle elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji depolama sistemleri gibi alanlarda lityum iyon pillerin kullanımını arttırmaktadır



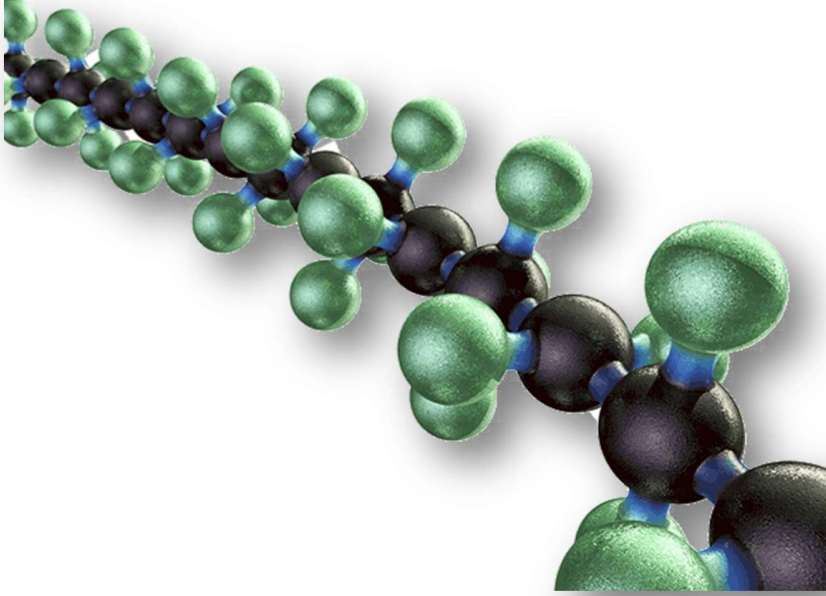
Şekil 1. 13 Lityum iyon Pillerin Gelişimi

Günümüzde, lityum iyon pil teknolojisi, 300 Wh/kg'ı aşan enerji yoğunlukları kabul edilebilir değerlere ulaşmış olmaları yanında sınırları zorlamaya devam ediyor. Ayrıca, sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim yöntemleri üzerindeki çalışmalar, pillerin çevresel ayak izini azaltmayı amaçlamaktadır. Geri dönüştürülebilir malzemeler ve daha az toksik bileşenler kullanarak yapılan piller, yeşil enerji çözümlerine olan global yönelimi desteklemektedir(Q. Li et al. 2023).

Bu tarihsel süreç boyunca, lityum iyon piller sadece teknik özelliklerini değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel etkilerini de geliştirdi. Enerji depolama teknolojilerindeki bu devrim, gelecekteki yeniliklere zemin hazırlarken, sürdürülebilir bir dünya için kritik öneme sahip olmaya devam edecektir. Bu yolculuk, bilim ve mühendisliğin sınırlarını zorlayarak enerji depolama ihtiyaçlarımızı nasıl şekillendirebileceğimizin bir kanıtıdır.

1.9 Polimerler

Polimerler (Şekil 1.14), yüksek moleküler kütlesine sahip büyük moleküllerden oluşan malzemelerdir ve doğada hem doğal hem de sentetik formlarda bulunabilirler. Temel yapıları, tekrarlayan monomerlerden oluşan uzun zincirlerdir, bu da polimerlere esneklik, dayanıklılık ve çeşitli mekanik özellikler kazandırır. Polimerler, çok yönlülükleri ve işlenebilirlikleri sayesinde birçok endüstriyel ve teknolojik uygulamada geniş bir kullanım alanı bulmuştur(Thomé et al. 2015).



Şekil 1. 14 Polimer Zinciri

Polimerlerin elektriksel iletkenliği, onları enerji depolama cihazları, özellikle de lityum iyon piller için cazip kılar. Elektriksel iletkenlik, polimerlerin yapısına iletken katkı maddeleri eklenerek artırılabilir. Bu katkı maddeleri arasında karbon nanotüpler (CNT), grafen ve iletken polimerler (örneğin, polianilin (PANI) ve

polipirol (PPy)) bulunur. Bu materyaller, polimer matrisinde bir ağı oluşturur ve elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artırır(Wang et al. 2021).

Polimerler, yüksek esneklik ve mekanik dayanıklılık sunmaktadır. Bu özellikler, özellikle şarj ve deşarj sırasında anotun hacimsel değişikliklere uğradığı lityum iyon pillerde önemlidir. Polimerler, bu değişikliklere karşı dayanıklıdır ve elektrot malzemelerinin yapısal bütünlüğünü korumasına yardımcı olur. Bu, pilin döngü ömrünü uzatır ve performansını artırmaktadır.

Polimerler, enerji depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahiptir. İletken polimerler, lityum iyonlarını etkili bir şekilde taşıyabilir ve bu da pilin genel performansını iyileştirmektedir. Ayrıca, polimer matrisler, diğer enerji depolama malzemeleriyle (örneğin, silikon veya metal oksitler) birleştirildiğinde, kompozit yapıların performansını optimize edebilir. Bu kombinasyonlar, yüksek kapasiteli ve uzun ömürlü lityum iyon pillerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır(Yuan et al. 2016).

Örneğin, polimer/silisyum kompozit anotlar, yüksek kapasiteli silikonun avantajlarını, polimerlerin mekanik esnekliği ve iletkenliği ile birleştirir. Bu tür kompozitler, lityum iyon pillerin enerji yoğunluğunu artırırken, döngü ömrünü ve güvenilirliğini iyileştirir(An et al. 2022).

Sonuç olarak, polimerlerin elektriksel iletkenlik ve enerji depolama özellikleri, lityum iyon pillerde önemli avantajlar sağlar. Polimer tabanlı malzemelerin sürekli geliştirilmesi, enerji depolama teknolojilerinde daha verimli, daha dayanıklı ve daha sürdürülebilir çözümler sunmaya devam edecektir. Bu nedenle, polimerlerin enerji depolama uygulamalarındaki rolü, gelecekteki geliştirmeler için büyük bir potansiyel taşımaktadır.

1.10 Polimer Temelli Anot Malzemeleri

Lityum iyon pillerde kullanılan anot malzemeleri, enerji yoğunluğu, şarj hızı ve döngü ömrü gibi kritik performans özelliklerini belirlemektedir. Polimer tabanlı anot malzemeleri, geleneksel grafit ve silisyum esaslı anotlara seçenek olarak son yıllarda büyük ilgi görmektedir.

Polimer tabanlı anotlar, esneklik, hafiflik ve iletkenlik gibi benzersiz özelliklere sahiptir. Polimerlerin mekanik özellikleri, anot yapısının şarj ve deşarj döngüleri sırasında meydana gelen hacim değişikliklerine karşı daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, polimerler düşük maliyetli ve işlenmesi kolay malzemeler olup, büyük ölçekli üretim için uygunluk göstermektedir.

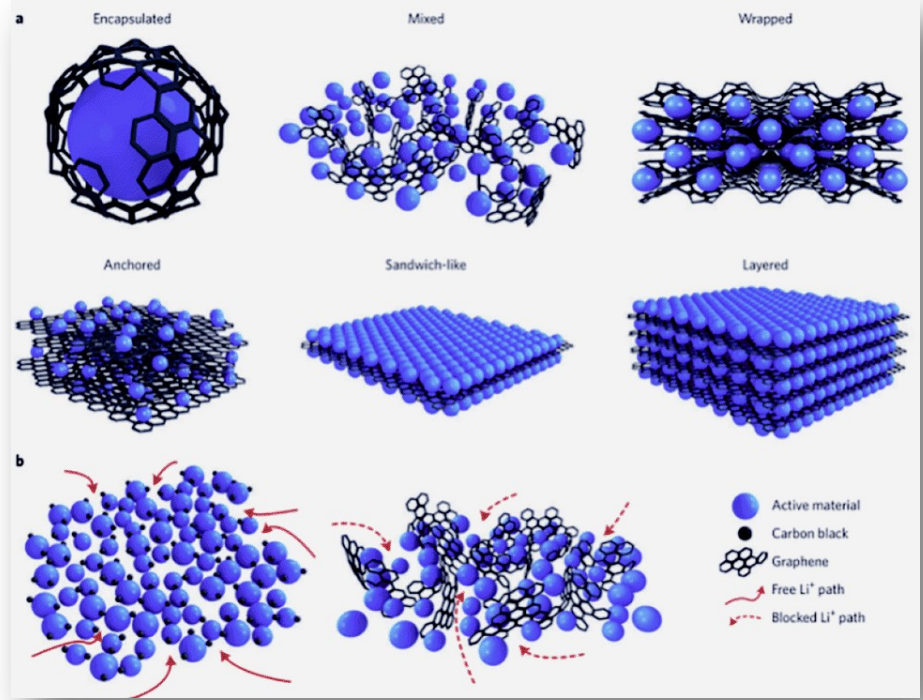
Polimer tabanlı anot malzemeleri, lityum iyon pillerin performansını artırmada birkaç önemli avantaj sunmaktadır:

- **Esneklik ve Mekanik Dayanıklılık:** Polimerlerin esnek yapısı, anotun hacim genişlemesi ve büzülmesi sırasında çatlama ve bozulma riskini azaltmaktadır.
- **İyon İletkenliği:** Polimerlerin yapısına çeşitli iletken katkı maddeleri eklenerek, iyon iletkenliği artırılabilir. Bu, pilin şarj ve deşarj hızlarını iyileştirmektedir.
- **Hafiflik:** Polimerlerin düşük yoğunluğu, pilin toplam ağırlığını azaltarak enerji yoğunluğunu artırmaktadır.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, polimer tabanlı anotların performansını optimize etmeye odaklanmıştır. Örneğin, polimer matrislerin içine gömülü nano yapıli silisyum parçacıkları, yüksek kapasite ve uzun döngü ömrü sağlamakta önemli bir ilerleme olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, polimerlerin yapısına iyon

iletkenliği artırıcı katkı maddeleri eklenerek, pilin şarj ve deşarj hızları iyileştirilmektedir(Worku, Zheng, and Wang 2022).

Bu yenilikçi yaklaşımlar, polimer tabanlı anotların gelecekteki lityum iyon pil teknolojilerinde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. Polimer tabanlı anotlar (Şekil 1.5), daha yüksek enerji yoğunluğu, daha hızlı şarj süreleri ve daha uzun ömürlü pillerin geliştirilmesine katkıda bulunarak, taşınabilir elektroniklerden elektrikli araçlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilmektedir.



Şekil 1. 15 Farklı Anot Malzemelerinin Kimyasal Yapıları

Polimer tabanlı anot malzemeleri, lityum iyon pillerin performansını ve güvenilirliğini artırma potansiyeli ile enerji depolama teknolojilerinin geleceğini şekillendirmektedir. Bu alandaki araştırmalar, sürdürülebilir ve yüksek

performanslı enerji depolama çözümlerine olan ihtiyacı karşılamada önemli ilerlemeler kaydetmeye devam etmektedir.

1.11 Termoplastikler

Termoplastikler, ısıtıldığında eriyip şekil alabilen ve soğutulduğunda tekrar sertleşen plastiklerdir. Bu özellikleri, termoplastikleri, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılan oldukça esnek ve çok yönlü malzemeler haline getirir.

Termoplastikler, moleküler yapılarında uzun zincirler halinde düzenlenmiş polimerlerdir. Bu yapı, malzemenin ısıya karşı duyarlılığını sağlar. Isıtıldıklarında zincirler arasındaki bağlar zayıflar ve malzeme yumuşar veya erir. Soğutulduğunda ise, bu bağlar yeniden oluşur ve malzeme sertleşir. Bu döngü, termoplastiklerin yeniden işlenebilirliğini ve geri dönüştürülebilirliğini mümkün kılmaktadır(Grigore 2017).



Şekil 1. 16 Termoplastik Örnekleri

Termoplastikler, genellikle yüksek darbe dayanımı, esneklik, kimyasal direnç ve düşük yoğunluk gibi avantajlar sunmaktadır. Bu özellikler, onları hafif ama dayanıklı malzemelere ihtiyaç duyulan birçok uygulama için ideal hale getirmektedir.

Termoplastiklerin işlenmesi, çeşitli tekniklerle gerçekleştirilebilir. En yaygın işleme yöntemleri arasında enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termoform bulunmaktadır.

Enjeksiyon Kalıplama: Bu yöntem, termoplastiklerin ısıtılarak erimesi ve daha sonra bir kalıp içine enjekte edilmesi prensibine dayanmaktadır. Malzeme, kalıpta soğuyup sertleştikten sonra, istenilen şekli almaktadır. Bu teknik, yüksek hacimli üretim için idealdir ve otomotiv, elektronik ve tüketim ürünleri gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır(Sardo et al. 2019).

Ekstrüzyon: Termoplastikler, ısıtılarak eriyen malzemenin bir kalıptan geçirilmesi suretiyle sürekli bir profil oluşturmaktadır. Bu yöntemle borular, profiller, filmler ve levhalar gibi ürünler üretilir. Ekstrüzyon, özellikle inşaat ve ambalaj sektörlerinde yaygındır(Mikulionok 2015).

Termoform: Termoform işleminde, termoplastik levhalar ısıtılarak yumuşatılır ve ardından bir kalıba yerleştirilerek vakum veya basınç yardımıyla şekillendirilmektedir. Bu yöntem, ambalaj, tek kullanımlık ürünler ve otomotiv iç aksamaları üretiminde kullanılmaktadır(Hassan et al. 2016).

Mühendislik plastikleri, standart termoplastiklere kıyasla daha yüksek performans özelliklerine sahip olan malzemelerdir. Bu plastikler, yüksek sıcaklık dayanımı, üstün mekanik özellikler, kimyasal direnç ve elektriksel yalıtım gibi özellikler sunar. Mühendislik plastikleri arasında polietilen tereftalat (PET),

polikarbonat (PC), poliamid (PA) ve politetrafloroetilen (PTFE) gibi malzemeler bulunmaktadır(Melton, Peters, and Arisman 2011).

- PET: Polietilen tereftalat, yüksek darbe dayanımı ve kimyasal direnç sunar. Genellikle içecek şişeleri, ambalaj malzemeleri ve tekstil elyafları üretiminde kullanılmaktadır.
- PC: Polikarbonat, yüksek optik berraklık, darbe dayanımı ve sıcaklık direnci sağlar. Otomotiv parçaları, gözlük camları, CD/DVD diskleri ve elektronik bileşenler gibi birçok uygulamada tercih edilmektedir.
- PA: Poliamid, mekanik dayanımı ve aşınma direnci ile bilinir. Otomotiv, tekstil, elektrik ve elektronik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.
- PBT (Polibütilen Tereftalat): PBT, yüksek mekanik dayanıklılık ve kimyasal dirence sahip bir termoplastiktir. Genellikle otomotiv parçaları, elektrik konnektörleri ve ev aletlerinde kullanılmaktadır. PBT'nin düşük nem emme özelliği ve mükemmel boyutsal kararlılığı, yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır.
- PTFE: Politetrafloroetilen, kimyasal inertlik ve yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Bu özellikleri ile kaplamalar, sızdırmazlık elemanları ve elektrik yalıtkanları olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Termoplastikler, sahip oldukları çok yönlü özellikler ve geniş işleme yelpazesi sayesinde modern endüstrilerin temel yapı taşlarından biridir. Bu malzemeler, inovasyon ve mühendislikteki gelişmelerle birlikte daha da geliştirilmekte ve gelecekteki uygulamalar için önemli fırsatlar sunmaktadır(Kumar and Satish 2020).

1.12 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle faz farkı oluşturularak elde edilen ve her bir bileşenin üstün özelliklerinden yararlanarak daha iyi performans sergileyen malzemelerdir. Bu malzemeler, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta ve yüksek mukavemet, düşük ağırlık, dayanıklılık gibi avantajlar sunmaktadır. Kompozit malzemeler, polimer, metal veya seramik matrislere sahip olabilmektedir ve bu matrisler içinde çeşitli takviye malzemeleri kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin temel bileşenleri, matris ve takviye malzemeleridir. Matris, kompozitin sürekli fazını oluşturarak takviye malzemelerini bir arada tutmakta ve yük transferini sağlamaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde, matris genellikle termoset veya termoplastik polimerlerden oluşmaktadır. Takviye malzemesi ise kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmekte ve malzemeye mukavemet kazandırmaktadır. Yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri arasında cam lifleri, karbon lifleri ve aramid lifleri yer almaktadır.

Kompozit malzemelerin üstün özellikleri, birçok sektörde geniş bir kullanım alanı bulmalarını sağlamaktadır. Havacılık ve uzay sektöründe, yüksek mukavemet/kütle oranı ve korozyon direnci nedeniyle kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Uçak gövdeleri, kanatları, pervaneler ve uzay araçları gibi bileşenler, kompozit malzemelerden üretilmektedir. Otomotiv sektöründe ise, yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Araç gövde panelleri, şasi bileşenleri, kaputlar ve iç döşemeler kompozit malzemelerden yapılmaktadır.

Rüzgâr enerjisi sektöründe, rüzgâr türbin kanatları, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık kombinasyonu nedeniyle kompozit malzemelerden üretilmektedir. Bu özellikler, türbinlerin daha verimli çalışmasını ve daha uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Denizcilik sektöründe ise, gemiler, yatlar ve diğer deniz taşıtlarının gövdeleri, güverteleri ve diğer yapısal bileşenleri için kompozit malzemeler

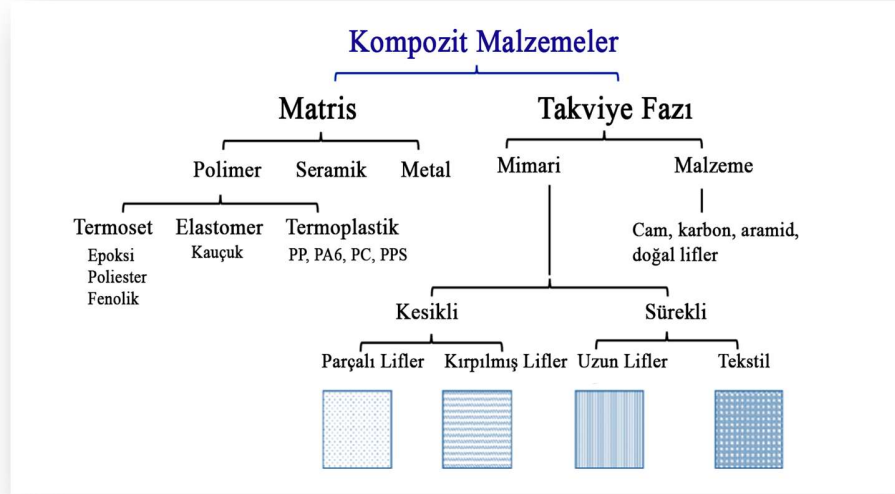
kullanılmaktadır. Korozyon direnci ve düşük bakım gereksinimleri bu sektörde önemli avantajlar sunmaktadır.

Spor malzemeleri üretiminde de kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif ve dayanıklı spor ekipmanları üretmek için bu malzemeler tercih edilmektedir. Bisiklet çerçeveleri, tenis racketleri, kayaklar ve golf kulüpleri gibi ürünler kompozit malzemelerden yapılmaktadır. İnşaat sektöründe ise, kompozit malzemeler borular, yalıtım malzemeleri, köprü elemanları ve diğer yapısal bileşenlerde kullanılmaktadır. Uzun ömürlü ve bakım gerektirmeyen özellikleri ile bilinen kompozit malzemeler, inşaat projelerinde tercih edilmektedir.

Sonuç olarak, kompozit malzemelerin kullanımı mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda sağladıkları üstün performans özellikleri sayesinde giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu malzemeler, yüksek mukavemet, düşük kütleleri ve dayanıklılık gibi üstün özellikleri nedeniyle gelecekteki yenilikçi tasarımlar ve yüksek performanslı ürünler için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Kompozitlerin çeşitli üretim yöntemleri ve geniş kullanım alanları, onları modern endüstrilerin vazgeçilmez bir parçası haline getirmektedir.

1.13 Polimer Matris Kompozit Malzemeler

Polimer matris kompozit malzemeler, polimerlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli takviye malzemeleriyle birleştirilmesiyle elde edilir (Şekil 1.17). Bu malzemeler, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda giderek daha fazla kullanılmaktadır.



Şekil 1. 17 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri

Polimer matris kompozitler, iki ana bileşenden oluşur: polimer matris ve takviye malzemesi. Polimer matris, kompozitin sürekli fazını oluşturur ve takviye malzemelerini bir arada tutar. Takviye malzemeleri ise genellikle lifler (cam, karbon, aramid gibi), partiküller veya levha şeklindedir ve kompozitin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmektedir(Yang et al. 2017).

- **Yüksek Mekanik Dayanım:** Takviye malzemeleri, kompozitin çekme, basma ve eğilme dayanımını önemli ölçüde artırmaktadır.
- **Düşük Yoğunluk:** Polimer matris kompozitler, yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olup, hafif yapıların üretiminde idealdir.
- **Korozyon Direnci:** Polimer matrisler, kimyasal etkilere karşı dirençli olup, kompozit malzemelerin korozyona dayanıklı olmasını sağlamaktadır.
- **Esneklik ve Darbe Dayanımı:** Polimer matrisler, kompozit malzemelere esneklik kazandırır ve darbe dayanımını artırmaktadır.

Polimer matris kompozitlerin üretimi, çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. En yaygın kullanılan yöntemler arasında ekstrüzyon, el yatırma, reçine transfer kalıplama (RTM), filament sarma ve pultrüzyon bulunur.

Polimer matris kompozit malzemeler, hafiflik, yüksek dayanım ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle birçok sektörde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır.

- Otomotiv: Otomotiv endüstrisi, yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak için polimer matris kompozit malzemelere yönelmektedir. Bu malzemeler, araç gövde panelleri, tamponlar, kaputlar ve iç aksamalar gibi parçalarda kullanılır.
- Havacılık ve Uzay: Havacılık ve uzay endüstrisi, yüksek performans gereksinimleri nedeniyle polimer matris kompozit malzemelere büyük ölçüde güvenmektedir. Uçak gövdeleri, kanatları, pervaneler ve uzay araçları gibi bileşenler bu malzemelerden yapılır.
- Rüzgâr Enerjisi: Rüzgâr türbin kanatları, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık kombinasyonu nedeniyle genellikle polimer matris kompozit malzemelerden yapılır. Bu özellikler, türbinlerin daha verimli çalışmasını ve daha uzun ömürlü olmasını sağlar.
- Denizcilik: Denizcilik sektöründe, polimer matris kompozit malzemeler, gemi gövdeleri, güverteler ve diğer yapısal bileşenler için kullanılır. Bu malzemeler, korozyon direnci ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle tercih edilir.
- Spor Malzemeleri: Polimer matris kompozitler, hafif ve dayanıklı spor ekipmanları üretmek için yaygın olarak kullanılır. Bisiklet çerçeveleri, tenis raketleri, kayaklar ve golf kulüpleri gibi ürünler bu malzemelerden yapılır.

Polimer matris kompozit malzemeler, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda sağladıkları üstün performans özellikleri sayesinde giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu malzemeler, gelecekteki yenilikçi tasarımlar ve yüksek performanslı ürünler için büyük bir potansiyel sunmaktadır.

1.14 Termoplastik Matris Kompozit Malzemeler

Termoplastik matris kompozit malzemeler, termoplastik polimerlerin takviye malzemeleri ile birleştirilmesiyle elde edilen ileri mühendislik malzemeleridir. Bu kompozitler, termoplastik polimerlerin yeniden işlenebilirliği ve takviye malzemelerinin mekanik dayanımı gibi özellikleri bir araya getirerek, yüksek performans ve çok yönlülük sunmaktadır. Termoplastik matris kompozitlerin polimer matrisleri, tipik olarak polipropilen (PP), polietilen (PE), poliamid (PA), polietilen tereftalat (PET) ve polibütilen tereftalat (PBT) gibi polimerlerden oluşmaktadır. Bu polimerler, takviye malzemeleri ile birleştirildiğinde üstün mekanik ve fiziksel özellikler kazanmaktadır.

Termoplastik matris kompozit malzemeler, yüksek darbe dayanımı, kimyasal direnç, düşük yoğunluk ve iyi mekanik özellikler sunmaktadır. Takviye malzemeleri, kompozitin mukavemetini ve sertliğini artırmakta ve mühendislik uygulamalarında üstün performans sağlamaktadır. Karbon lifleri, cam lifleri ve aramid lifleri, yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri arasında yer almaktadır. Karbon lifleri, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık kombinasyonu sunmakta, bu da onları özellikle havacılık ve otomotiv uygulamaları için ideal hale getirmektedir. Cam lifleri, maliyet etkinliği ve iyi mekanik özellikler sunmakta, genellikle inşaat ve spor ekipmanları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Aramid lifleri ise yüksek darbe dayanımı ve ısı direnci sağlamaktadır, bu da onları balistik zırh ve koruyucu giysilerde yaygın olarak kullanılmasına neden olmaktadır.



Şekil 1. 18 Termoplastik Granülleri

Termoplastik matris kompozitlerin polimer matrisleri, mükemmel kimyasal direnç ve çevresel dayanıklılık sağlamaktadır. Polipropilen (PP) ve polietilen (PE) gibi polimerler, düşük yoğunlukları ve yüksek kimyasal dirençleri ile bilinmektedir. Poliamid (PA) ise yüksek mekanik dayanım ve ısı direnci sunmakta, otomotiv ve elektronik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Polietilen tereftalat (PET) ve polibütilen tereftalat (PBT), yüksek mekanik özellikler ve kimyasal direnç sunmakta ve genellikle elektrik ve elektronik bileşenlerde kullanılmaktadır.

Termoplastik matris kompozit malzemeler, çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisi, araç ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla termoplastik matris kompozit malzemeleri tercih etmektedir. Bu malzemeler, araç gövde panelleri, iç döşeme parçaları, tamponlar ve aydınlatma bileşenleri gibi pek

çok otomotiv parçasında kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde bu malzemelerin kullanımı, aynı zamanda üretim süreçlerini hızlandırmakta ve maliyetleri düşürmektedir. Örneğin, elektrikli araç batarya muhafazalarında ve motor parçalarında da bu malzemelerden faydalanılmaktadır.

Havacılık ve uzay endüstrisi, termoplastik matris kompozit malzemelerin yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direnci gibi üstün özelliklerine büyük ölçüde güvenmektedir. Uçak gövdeleri, kanatları, pervaneler ve uzay araçlarının çeşitli bileşenleri bu malzemelerden üretilmektedir. Ayrıca, termoplastik kompozitler, bakım maliyetlerini azaltarak operasyonel verimliliği artırmaktadır. Havacılık endüstrisinde bu malzemeler hem ticari hem de askeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Elektronik sektöründe de termoplastik matris kompozit malzemeler, dayanıklılık ve yalıtkanlık özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Kabloların dış kaplamaları, konektörler ve çeşitli elektronik cihaz kasaları bu malzemelerden imal edilmektedir. Ayrıca, termoplastik kompozitlerin termal ve elektriksel yalıtım özellikleri, hassas elektronik bileşenlerin korunmasını sağlamaktadır. Bu malzemeler, mobil cihazlardan büyük veri merkezlerine kadar pek çok elektronik üründe kullanılmaktadır.

İnşaat sektöründe ise, termoplastik matris kompozit malzemeler, borular, yalıtım malzemeleri, pencere profilleri ve zemin kaplamaları gibi pek çok üründe kullanılmaktadır. Bu malzemeler, uzun ömürlü ve bakım gerektirmeyen özellikleri ile bilinmektedir. Ayrıca, termoplastik kompozitlerin çevresel dayanıklılığı ve kimyasal direnci, inşaat projelerinde tercih edilmelerini sağlamaktadır. Özellikle sürdürülebilir inşaat uygulamalarında bu malzemeler önemli bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, termoplastik matris kompozit malzemeler, mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda sağladıkları üstün performans özellikleri sayesinde giderek daha yaygın hale gelmektedir. Yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajları ile gelecekteki yenilikçi tasarımlar ve yüksek

performanslı ürünler için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Termoplastik matris kompozitlerin çeşitli üretim yöntemleri ve geniş kullanım alanları, onları modern endüstrilerin vazgeçilmez bir parçası haline getirmektedir.

1.15 Termoplastik Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Termoplastik matris kompozit malzemeler, termoplastik polimerlerin takviye malzemeleri ile birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu malzemeler, yüksek performans ve çok yönlülük sunmakta, çeşitli mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Termoplastik matris kompozitlerin üretiminde kullanılan başlıca yöntemler arasında enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, termoform ve filament sarma bulunmaktadır. Bu yöntemler, kompozit malzemenin istenilen şekil ve özelliklerde üretilmesine olanak tanımaktadır.

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik polimer ve takviye malzemesi karışımının ısıtılarak erime noktasına getirilmesi ve daha sonra bir kalıba enjekte edilmesi işlemine dayanmaktadır. Kalıpta soğuyan ve sertleşen malzeme, istenilen şekli almaktadır. Ekstrüzyon yönteminde ise termoplastik polimer ve takviye malzemesi karışımı, ısıtılarak erime noktasına getirildikten sonra sürekli bir profil oluşturacak şekilde bir kalıptan geçirilmekte ve borular, profiller ve levhalar gibi ürünler üretilmektedir. Termoform işlemi, termoplastik matris kompozit levhaların ısıtılarak yumuşatılması ve ardından bir kalıba yerleştirilerek vakum veya basınç yardımıyla şekillendirilmesi prensibine dayanmaktadır. Filament sarma yöntemi ise sürekli takviye liflerinin bir mandrel üzerine sarılması ve termoplastik polimer ile kaplanması prensibine dayanmaktadır.

Bu üretim yöntemleri, termoplastik matris kompozit malzemelerin yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlarla istenilen şekil ve özelliklerde üretilmesini sağlamaktadır. Termoplastik matris kompozitlerin üretiminde kullanılan bu yöntemlerin her biri, farklı uygulama ve

ihtiyaçlara y6nelik 6z6mler sunmakta ve modern end6strilerde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

1.15.1 Ekstr6der

Ekstr6der, termoplastik matris kompozit malzemelerin 6retiminde yaygın olarak kullanılan bir işleme y6ntemidir. Bu y6ntem, termoplastik polimer ve takviye malzemesi karışımının ısıtılarak erime noktasına getirilmesi ve s6rekli bir profil oluşturacak şekilde bir kalıptan geçirilmesi prensibine dayanmaktadır. Ekstr6zyon s6reci, y6ksek 6retim hızları ve d6ř6k maliyet avantajı sağlamaktadır.



şekil 1. 19 Ekst6rder Cihazı

Ekstr6derler(şekil 1.19), temel olarak besleme b6lgesi, taşıma b6lgesi, eriyik b6lgesi ve kalıptan oluşmaktadır. Besleme b6lgesi, polimer ve takviye malzemesinin ekstr6derin içine beslenmesini sağlamaktadır. Bu b6lge genellikle bir helezonla donatılmıştır ve malzemenin kontroll6 bir şekilde taşınmasını sağlamaktadır. Taşıma b6lgesi, polimer ve takviye malzemesinin ısıtılarak eritildiği ve karıştırıldığı b6lgedir. Bu b6lgede, helezonlar malzemeyi ileri doğru

taşıırken, ısıtıcılar malzemenin erime noktasına ulaşmasını sağlamaktadır. Eriyik bölgesi, malzemenin tamamen eriyerek homojen bir karışım haline geldiği bölgedir. Son olarak, kalıp bölgesi, eriyik malzemenin şekillendirilerek sürekli bir profil oluşturulmasını sağlamaktadır.

Ekstrüzyon süreci, çeşitli parametrelerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesini gerektirmektedir. Bu parametreler arasında sıcaklık, basınç, helezon hızı ve malzeme besleme hızı bulunmaktadır. Ekstrüzyon sürecinde, polimer ve takviye malzemesinin erime noktası, işleme sıcaklığının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Genellikle, polimerlerin erime noktası 150-350°C arasında değişmektedir. Takviye malzemelerinin türü ve oranı da ekstrüzyon sürecinin performansını etkilemektedir. Örneğin, karbon lifleri gibi yüksek mukavemetli takviye malzemeleri, polimer matrisin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmaktadır. Takviye malzemesi oranı genellikle %10 ile %60 arasında değişmektedir.

Ekstrüzyon sürecinin önemli bir aşaması da malzemenin homojen bir şekilde karıştırılmasıdır. Bu aşama, polimer ve takviye malzemesinin düzgün bir şekilde dağılmasını ve homojen bir karışım elde edilmesini sağlamaktadır. Homojenlik, kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Karıştırma işlemi sırasında, helezonun şekli ve hızının optimize edilmesi gerekmektedir. Heliks açısı, helezonun malzemeyi taşıma ve karıştırma kapasitesini belirlemektedir. Heliks açısının genellikle 20-30 derece arasında olması önerilmektedir. Vida hızı ise malzemenin taşınma hızını ve karıştırma etkinliğini etkilemektedir. Genellikle, laboratuvar koşullarında vida hızı 50-200 rpm arasında değişmektedir.

Ekstrüzyon sürecinde, malzemenin kalıptan geçirilmesi de kritik bir aşamadır. Kalıp, malzemenin istenilen şekli almasını sağlamaktadır. Kalıbın tasarımı ve boyutları, ekstrüzyon sürecinin performansını doğrudan etkilemektedir. Kalıbın iç çapı ve uzunluğu, malzemenin şekillendirilme süresini ve profilin boyutsal doğruluğunu belirlemektedir. Kalıbın sıcaklığı da önemli bir

parametredir. Genellikle, kalıp sıcaklığı, polimerin erime noktasının biraz altında tutulmaktadır. Bu, malzemenin kalıptan düzgün bir şekilde geçmesini ve istenilen profili almasını sağlamaktadır.

Ekstrüzyon sürecinin sonunda, malzeme soğutularak sertleştirilmekte ve istenilen profil elde edilmektedir. Soğutma işlemi, genellikle su banyosu veya hava soğutma sistemleri ile gerçekleştirilmektedir. Soğutma hızı, malzemenin kristal yapısını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Hızlı soğutma, amorf bir yapı oluştururken, yavaş soğutma kristalin bir yapı oluşturmaktadır. Kristalin yapı, malzemenin mekanik dayanımını artırmakta, amorf yapı ise darbe dayanımını artırmaktadır.

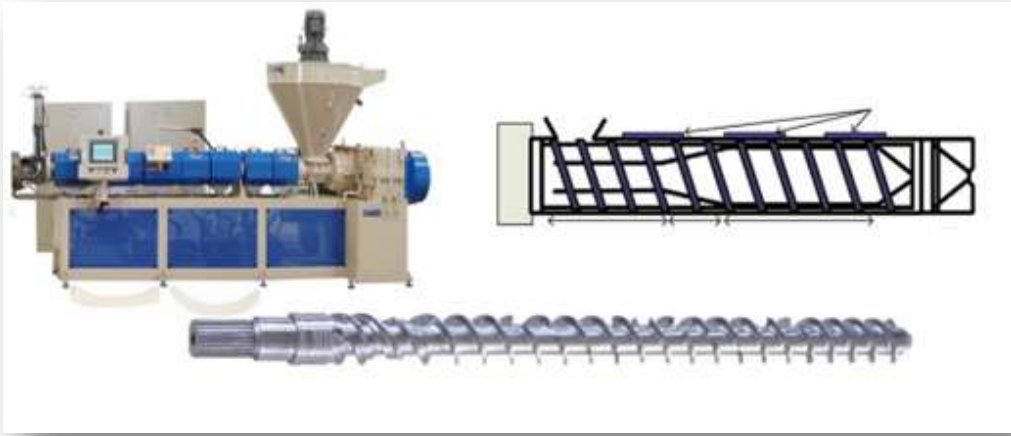
Ekstrüzyon yöntemi, polimer matris kompozit malzemelerin üretiminde geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Bu yöntemle, borular, profiller, levhalar ve filmler gibi çeşitli ürünler üretilebilmektedir. Ekstrüzyon sürecinin etkinliği ve verimliliği, polimer ve takviye malzemelerinin türü, işleme parametreleri ve ekstrüder tasarımı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, ekstrüzyon sürecinin optimize edilmesi, yüksek kaliteli ve performanslı kompozit malzemelerin üretilmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, ekstrüder yöntemi, termoplastik matris kompozit malzemelerin üretiminde önemli bir yer tutmaktadır. Bu yöntemin etkin kullanımı, polimer ve takviye malzemelerinin homojen karışımı, işleme parametrelerinin dikkatli kontrolü ve uygun kalıp tasarımı ile mümkün olmaktadır. Ekstrüzyon süreci, modern endüstrilerde yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlar sunan kompozit malzemelerin geniş bir yelpazede kullanılmasını sağlamaktadır. Bu yöntemin optimize edilmesi, gelecekteki yenilikçi tasarımlar ve yüksek performanslı ürünler için büyük bir potansiyele sahiptir.

1.15.2 Tek vidalı Ekstrüder

Tek vidalı ekstrüderler, polimer işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ekstrüzyon makineleridir. Bu ekstrüderler, tek bir vida kullanarak polimer malzemeleri eritmekte, karıştırmakta ve şekillendirmektedir. Tek vidalı ekstrüderlerin basit yapısı ve düşük maliyetli oluşu, onları çeşitli üretim süreçlerinde tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir.

Tek vidalı ekstrüderlerde en önemli parametrelerden biri L/D oranıdır. L/D oranı, vidanın uzunluğunun çapına oranını ifade etmektedir ve genellikle 20:1 ile 30:1 arasında değişmektedir. Yüksek L/D oranları, polimerin daha iyi karışmasını ve homojen bir eriyik elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, çok yüksek L/D oranları, ekstrüzyon sürecinin verimliliğini düşürebilmekte ve enerji tüketimini artırabilmektedir.



Şekil 1. 20 Tek Vidalı Ekstrüder

Şekilde. 21'deki gibi tek vidalı ekstrüderler, genellikle birden fazla kovan (bölme) içermektedir. Kovan sayısı, polimerin işleme sürecindeki farklı aşamaları ifade etmektedir. Besleme kovası, polimer granüllerinin ekstrüderin içine beslenmesini sağlamaktadır. Erime kovası, polimerin ısıtılarak eritildiği ve viskoz

bir sıvı haline getirildiği bölmedir. Karıştırma kovası, polimerin homojen bir eriyik haline getirilmesini sağlamak ve katkı maddelerinin düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Son olarak, çıkış kovası, eriyik polimerin kalıptan geçerek istenilen şekli almasını sağlamaktadır.

Tek vidalı ekstrüderler, çeşitli polimer ürünlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Boru, profil, levha, film ve filament gibi ürünlerin üretiminde tercih edilmektedir. Örneğin, PVC borular, tek vidalı ekstrüderler kullanılarak üretilmektedir. Ayrıca, termoplastik kompozit malzemelerin ekstrüzyonu için de kullanılmaktadır. Polimer ve takviye malzemelerinin homojen bir şekilde karışmasını ve istenilen şekli almasını sağlamaktadır. Elektronik sektöründe kablo kaplamaları ve yalıtkan malzemelerin üretiminde de tek vidalı ekstrüderler tercih edilmektedir.

Sonuç olarak, tek vidalı ekstrüderler, polimer işleme endüstrisinde basit yapısı, düşük maliyeti ve geniş kullanım alanı ile öne çıkmaktadır. L/D oranı ve kovan sayıları, ekstrüzyon sürecinin verimliliğini ve ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu ekstrüderler, çeşitli polimer ürünlerinin üretiminde kritik bir rol oynamakta ve modern endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır.

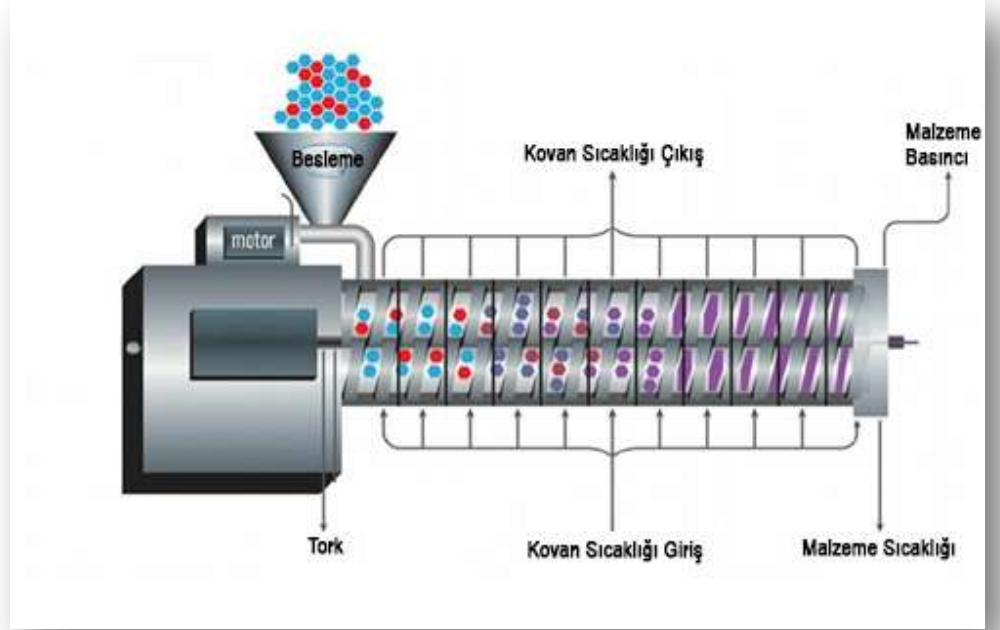
1.15.3 Çift vidalı ekstrüder

Çift vidalı ekstrüderler, polimer işleme endüstrisinde yüksek performans ve esneklik sunan gelişmiş makinelerdir. Bu ekstrüderler, iki paralel vidanın kullanılması ile polimer malzemelerin daha homojen bir şekilde karıştırılmasını ve işlenmesini sağlamaktadır. Çift vidalı ekstrüderler, mühendislik plastiklerinin üretiminde, yüksek viskoziteye sahip polimerlerin işlenmesinde ve çeşitli katkı maddelerinin polimer matrise etkin bir şekilde karıştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Mühendislik plastiklerinin üretimi, çift vidalı ekstrüderler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu makineler, yüksek mukavemet, dayanıklılık ve termal

kararlılık gerektiren polimerlerin işlenmesinde üstün performans sunmaktadır. Polikarbonat (PC), poliamid (PA), polietilen tereftalat (PET) ve polibütilen tereftalat (PBT) gibi mühendislik plastikleri, çift vidalı ekstrüderler ile üretilmektedir. Bu ekstrüderler, polimer matrisin homojen bir şekilde karışmasını ve katkı maddelerinin etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır.

Çift vidalı ekstrüderlerde önemli bir etmen de ekstrüder uzunluğunun (L) çapa (D) oranı olarak belirlenebilir. L/D oranı, vidaların uzunluğunun çapına oranını ifade etmektedir ve genellikle 20:1 ile 40:1 arasında değişmektedir. Yüksek L/D oranları, polimerin daha uzun süre işlenmesini ve daha iyi karışmasını sağlamaktadır. Ancak, çok yüksek L/D oranları, enerji tüketimini artırabilmekte ve işlem süresini uzatabilmektedir. Çift vidalı ekstrüderlerde, vidalar aynı yönde dönebilen (co-rotating) veya ters yönde dönebilen (counter-rotating) tasarımlar ile kullanılabilir. Aynı yönde dönen vidalar, yüksek karıştırma ve dağıtma verimliliği sağlamakta, ters yönde dönen vidalar ise yüksek basınç ve düşük kesme kuvveti gerektiren işlemler için uygun olmaktadır.



Şekil 1. 21 Çift Vidalı Ekstrüder

Çift vidalı ekstrüderlerin performansı, tork, devir sayısı (RPM) ve besleme hızı gibi teknik parametreler ile doğrudan ilişkilidir. Tork, vidaların polimer malzemeyi taşıma ve karıştırma kapasitesini belirlemektedir. Yüksek tork, viskoz polimerlerin etkin bir şekilde işlenmesini sağlamaktadır. Devir sayısı (RPM), vidaların dönüş hızını ifade etmektedir ve genellikle 50-500 RPM arasında değişmektedir. Yüksek RPM, polimer malzemenin hızlı bir şekilde işlenmesini sağlamakta, ancak yüksek kesme kuvvetleri nedeniyle malzemenin ısınmasına neden olabilmektedir. Besleme hızı, polimer malzemenin ekstrüderin içine beslenme hızını belirlemektedir ve bu hız, polimerin reolojik özelliklerine ve işleme parametrelerine göre ayarlanmaktadır.

Polimerlerin reolojik özellikleri, çift vidalı ekstrüderlerin performansını ve işleme verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Viskozite, polimerin akışa karşı direncini ifade etmekte ve polimerin işlenme sürecinde önemli bir parametre olmaktadır. Yüksek viskoziteli polimerler, daha yüksek tork ve basınç

gerektirmekte, düşük viskoziteli polimerler ise daha kolay işlenmektedir. Polimerlerin reolojik özellikleri, sıcaklık, kesme hızı ve katkı maddelerinin varlığı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir.

Çift vidalı ekstrüderler, amorf ve kristalin yapıya sahip polimerlerin işlenmesinde farklı yaklaşımlar gerektirmektedir. Amorf polimerler, düzensiz moleküler yapıya sahip olup, geniş bir erime aralığına sahiptir. Bu polimerler, ısıtıldığında yumuşamakta ve viskoz bir sıvı haline gelmektedir. Çift vidalı ekstrüderler, amorf polimerlerin homojen bir şekilde karıştırılmasını ve şekillendirilmesini sağlamaktadır. Kristal polimerler ise düzenli moleküler yapıya sahip olup, belirli bir erime noktasına sahiptir. Bu polimerler, ısıtıldığında erime noktasında keskin bir geçiş göstermektedir. Çift vidalı ekstrüderler, kristal polimerlerin erimesi ve homojen bir eriyik haline gelmesi için yüksek hassasiyetle kontrol edilen sıcaklık ve basınç koşulları sağlamaktadır.

Amorf polimerlerin işlenmesi sırasında, polimerin yumuşama noktası ve viskozite değişimleri dikkate alınmaktadır. Bu polimerler, düşük sıcaklıklarda viskoz bir yapı sergilemekte ve yüksek sıcaklıklarda akışkan hale gelmektedir. Çift vidalı ekstrüderler, amorf polimerlerin bu özelliklerine uygun olarak tasarlanmakta ve işleme sürecinde sıcaklık ve kesme hızının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır. Örneğin, polikarbonat (PC) gibi amorf polimerlerin işlenmesinde, sıcaklık genellikle 220-300°C aralığında tutulmakta ve yüksek viskozite nedeniyle yüksek tork ve basınç gerekmektedir.

Kristal polimerlerin işlenmesi ise daha dar bir sıcaklık aralığında gerçekleşmektedir. Polimerin erime noktası, kristal yapının çözülmeye başladığı sıcaklık olup, bu noktada polimer viskoz bir sıvı haline gelmektedir. Polietilen tereftalat (PET) ve poliamid (PA) gibi kristal polimerler, çift vidalı ekstrüderlerde işlenirken, sıcaklık genellikle 250-280°C aralığında tutulmakta ve polimerin erime noktasına dikkat edilmektedir. Kristal polimerlerin işlenmesi sırasında, polimerin kristal yapısının korunması ve istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi için sıcaklık ve basınç koşulları hassas bir şekilde kontrol edilmektedir.

Çift vidalı ekstrüderler, polimer matris kompozit malzemelerin üretiminde çeşitli avantajlar sunmaktadır. Yüksek karıştırma ve dağıtma verimliliği, polimer ve takviye malzemelerinin homojen bir şekilde karışmasını sağlamakta ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Aynı yönde dönen vidalar, polimerin daha iyi karışmasını ve katkı maddelerinin etkin bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır. Ters yönde dönen vidalar ise yüksek basınç ve düşük kesme kuvveti gerektiren işlemler için uygun olmaktadır. Bu vidalar, polimerin işlenme sürecinde daha az enerji tüketmekte ve malzemenin termal bozulmasını azaltmaktadır.

Ekstrüzyon, polimer işleme endüstrisindeki en büyük teknolojidir. Levhalar, borular, filmler gibi profillerin üretimi ve örneğin birleştirme, granülasyon vb. gibi özel işlemler için yaygın olarak kullanılır.

Ekstrüderler tek vidalı, çift vidalı ve çok vidalı makineler olarak sınıflandırılabilir. Özel ekstrüderler de müşteri istekleri doğrultusunda üretilmişlerdir. Tek vidalı makineler düz veya yivli kovanlara sahip olabilir ve eritme veya karıştırmayı yoğunlaştıran elementlere sahip geleneksel veya geleneksel olmayan vidalarla donatılabilir. Çift vidalı makineler, değişen derecelerde vida geçişi ile birlikte veya ters yönde dönebilir. Tek vidalı ekstrüzyonda karıştırma işlemi zayıftır ve erime yavaştır. Çift vidalı ekstrüzyonda karıştırma çok daha iyi ve eritme daha hızlıdır. Ekstrüderler genellikle katı polimerlerle (plastikleştirici ekstrüderler) beslenir, ancak erimiş polimerlerle de (eriyik ekstrüderler) beslenebilirler.

Bu tez çalışmasında çift vidalı ekstrüder ile üretimler gerçekleştirilecektir. Çift vidalı ekstrüzyon, vidanın dönüş yönüne bağlı olarak şu şekilde ayrılır: vidalar aynı yönde döndüğünde birlikte dönen ekstrüzyon ve vidalar ters yönde döndüğünde ters yönde dönen ekstrüzyon adını alır. Çift vidalı ekstrüzyon, değişen derecelerde ağ ile gerçekleştirilebilir. Bunlara örnek olarak; birbirine geçmeyen vidalı, teğet veya ayrık ekstrüderler ve kısmen veya yakından birbirine geçen vidalı ekstrüderler (özel tip kendinden silen vidalarla) verilebilir.

Birlikte dönen çift vidalı makineler, esas olarak, örneğin polimer karıştırma, gazdan arındırma, doldurma, güçlendirme veya reaktif ekstrüzyon gibi bileşik oluşturma için uygulanır. Bu işlemde, polimer bir vidadan diğerine akar ve bükülmüş sekiz olarak adlandırılan açık bir sekiz rakamı deseninde hareket eder. Vidalar arası boşlukta ters yönde dönen bir hareket vardır ve bunun sonucunda bu alanda yüksek kesme gerilmeleri oluşur. Ve bu nedenle, bu yöntem birleştirmede kullanılır.

Birlikte dönen çift vidalı ekstrüzyon, genellikle ekstrüderdeki basınç profilinin sürekli olmamasını sağlayan ölçülü besleme (aç besleme) ile gerçekleştirilir ve basıncın sıfıra düşürüldüğü bölümleri içerir. Bu alanlarda, yani basıncın üretilmediği alanlarda, örneğin polimer doldurma, polimer güçlendirme veya modifikasyon için çeşitli katkı maddelerinin besleyicileri yerleştirilebilir ya da reaktif ekstrüzyon sırasında kimyasal reaksiyon ürünlerinin buharlaştırılması veya uzaklaştırılması için cihazları yerleştirmek de mümkündür.

Birlikte dönen sistemlerde, her vida dönüşü sırasında polimer vidalar arasında aktarılır. Polimerin akışı, bu açıdan tek vidalı bir makinedeki akışa benzeyecek şekilde sürüklenir. Bununla birlikte, vidalar arasında hareket ederken, polimer daha uzun bir yol kat eder ve daha yüksek kesmeye maruz kalır.

Çift vidalı ekstrüder, mühendislik plastikleri üretiminde yaygın olarak kullanılan ve çeşitli polimerlerin işlenmesinde yüksek verimlilik sağlayan bir ekipmandır. Kullanılmakta olan çift vidalı ekstrüder, 48 L/D oranına sahip olup, eş yönlü (co-rotating) vidalar ile donatılmıştır. Bu yüksek L/D oranı, polimerin ergitilmesi, homojenleştirilmesi ve etkili bir şekilde karıştırılması için yeterli süre ve alan sağlar. Ekstrüderin vidaları modüler yapıdadır ve farklı işleme ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir. Bu modüler yapı, besleme, ergitme, karıştırma ve deşarj bölümlerinin optimize edilmesini mümkün kılar. Ayrıca, vidalar yüksek dayanıklılık ve aşınma direncine sahip özel alaşımlardan üretilmiştir, böylece uzun süreli kullanımlarda dahi performans kaybı yaşanmaz. Bu özellikler, üretim

sürecinin kararlılığını ve ürün kalitesini artırırken, çeşitli polimer kompozit malzemelerin üretilmesine olanak tanır.



Şekil 1. 22 Çift Vidalı Ekstrüder

Kullanılan malzemenin homojenliğini sağlamak ve içerisinde katkılanan malzemelerin homojen bir şekilde karışmasını, disperse olmasını ve dağılımının iyi olmasını sağlamak büyük önem taşır. Özellikle mekanik sistemlerde kullanılmayacak olan malzemeler için, bu homojenlik ve dağılım kritik rol oynar. Bu amaçla, mineral vidası kullanılmıştır. Mineral vidası, polimer matrisinde dolgu maddelerinin ve katkı malzemelerinin etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlayan özel bir vida türüdür.

Mineral vidası, belirli işlevlere sahip çeşitli elemanlardan oluşur:

Besleme Elemanları: Malzemenin ekstrüdere alınmasını ve vida boyunca taşınmasını sağlar. Bu bölgede vida kanalları geniş ve derindir, böylece malzeme kolayca beslenir ve ileri doğru itilir.

Ergime (Eritme) Elemanları: Polimerlerin ergimesi ve homojen bir eriyik haline gelmesi için kullanılır. Bu elemanlar, vida kanallarının derinliğini azaltarak sıkıştırma etkisi yaratır ve polimerin ergimesine yardımcı olur.

Karıştırma Elemanları: Polimer ve dolgu maddelerinin homojen bir şekilde karışmasını sağlar. Kesme ve kayma kuvvetleri oluşturarak malzemeyi karıştırır ve disperse eder. Bu elemanlar, çeşitli açılarda ve şekillerde olabilir, böylece karıştırma etkinliği artırılır.

Geri Akış Elemanları: Malzemenin geri akışını ve dolayısıyla karışımın homojenliğini artırır. Bu elemanlar, akışı ters yönde zorlayarak karışımın daha iyi homojenleşmesini sağlar.

Dağıtma (Disperse) Elemanları: Katkı maddelerinin polimer matrisine eşit olarak dağıtılmasını sağlar. Bu elemanlar, genellikle yüksek kesme kuvvetleri oluşturarak küçük partiküllerin eşit şekilde dağılmasını sağlar.

Boşaltma (Deşarj) Elemanları: İşlenmiş malzemenin ekstrüderden dışarı çıkmasını sağlar. Bu bölgede vida kanalları tekrar genişler ve malzeme kalıptan dışarı doğru itilir.

Mineral vidasının bu elemanları, polimer matrisinde dolgu maddelerinin ve katkı malzemelerinin etkin bir şekilde karışmasını ve disperse olmasını sağlar. Bu sayede üretilen malzeme homojen bir yapıya sahip olur ve istenen özellikleri kazanır. Kullanılan vida elemanlarının tasarımı ve düzeni, işlenecek malzeme ve istenen nihai ürün özelliklerine göre dikkatlice seçilmiştir. Bu, üretim sürecinin verimliliğini artırırken ürün kalitesini ve performansını optimize eder.

Bu tez çalışmasında çalışılacak olan termoplastik malzemelerin yalnız başına anot malzemesi olarak kullanılamamasının en büyük nedeni plastiklerin doğaları gereği elektriksel yalıtkan malzemeler olmasındandır. Gerçekleştirilen çalışmalarla termoplastik tabanlı kompozit malzemeler yapılarak elektriksel

iletken ve enerji depolamaya uygun hale getirilmesi sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında termoplastik malzemelere metal/metal minerali/organometalik bileşikler, seramik bileşikler ile birlikte karbon türevi takviye ve/veya dolgu elemanları katılarak elektriksel iletkenlik, enerji depolama özellikleri ve kararlılıkları iyileştirilecektir. Ayrıca geleneksel olarak kullanılan bakır levhayı da ortadan kaldırıp tamamıyla tek katmanlı yeni bir anot malzemesi geliştirilmesi için çalışmalar yapılmıştır.

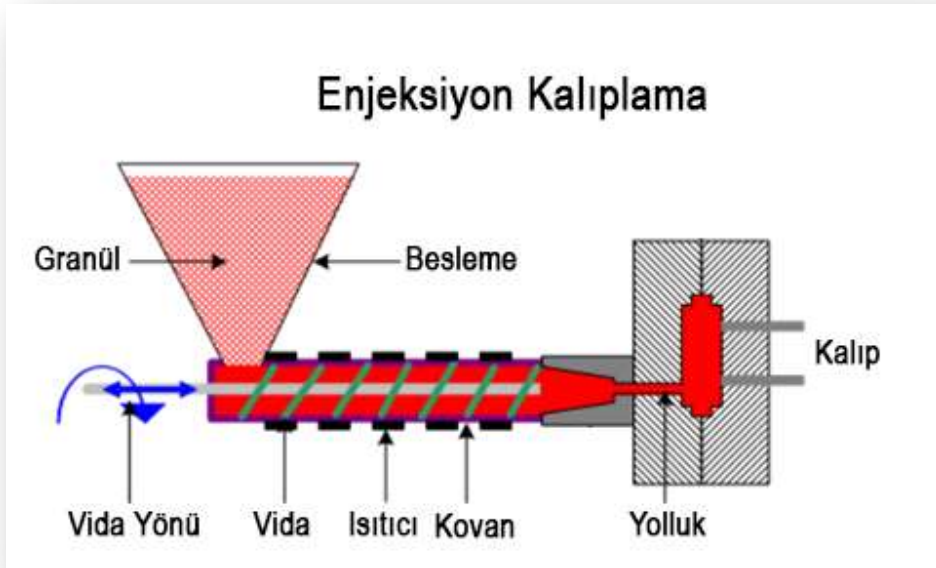
Sonuç olarak, çift vidalı ekstrüderler, polimer işleme endüstrisinde yüksek performans ve esneklik sunan gelişmiş makinelerdir. Mühendislik plastiklerinin üretiminde, yüksek viskoziteye sahip polimerlerin işlenmesinde ve çeşitli katkı maddelerinin polimer matrise etkin bir şekilde karıştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. L/D oranı, vida çeşitleri, tork, RPM ve besleme hızı gibi teknik parametreler, çift vidalı ekstrüderlerin performansını ve işleme verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Polimerlerin reolojik özelliklerine ve amorf ile kristal yapılarına göre davranışları, ekstrüzyon sürecinin optimize edilmesi için dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Çift vidalı ekstrüderler, modern endüstrilerde yüksek kaliteli ve performanslı polimer ürünlerinin üretiminde kritik bir rol oynamaktadır.

1.15.4 Enjeksiyon

Enjeksiyon kalıplama, termoplastik matris kompozit malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir işleme yöntemidir. Bu yöntemde, polimer malzeme ve takviye malzemesi karışımı ısıtılarak erime noktasına getirilmekte ve daha sonra bir kalıba enjekte edilmektedir. Kalıpta soğuyan ve sertleşen malzeme, istenilen şekli almaktadır. Enjeksiyon kalıplama, yüksek hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve üretim hızı sunması nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmektedir.

Enjeksiyon kalıplama süreci, çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. İlk olarak, polimer granülleri ve takviye malzemesi bir besleme hunisi aracılığıyla enjeksiyon

ünitesine beslenmektedir. Bu malzemeler, vidalı bir taşıma sistemi kullanılarak erime noktasına kadar ısıtılmakta ve homojen bir eriyik haline getirilmektedir. Eriyik malzeme, vidanın ileri hareketiyle kalıba enjekte edilmekte ve burada basınç altında şekillendirilmektedir. Kalıpta soğuyan malzeme, sertleşmekte ve kalıp açılarak nihai ürün elde edilmektedir.



Şekil 1. 23 Enjeksiyon Makinesi Görseli

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, polimer matris kompozit malzemelerin yüksek hassasiyetle ve düşük maliyetle üretilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde büyük avantajlar sunmaktadır. Enjeksiyon kalıplama ile üretilen ürünler arasında otomotiv parçaları, elektronik bileşenler, tıbbi cihazlar ve tüketim ürünleri bulunmaktadır.

Otomotiv endüstrisi, enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilen parçaların en büyük kullanıcılarından biridir. Araç içi döşeme parçaları, gösterge panelleri, hava kanalları, tamponlar ve far muhafazaları gibi birçok otomotiv parçası enjeksiyon kalıplama ile üretilmektedir. Bu yöntem, yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik

sunarak, otomotiv parçalarının mükemmel uyum ve performans göstermesini sağlamaktadır. Ayrıca, enjeksiyon kalıplama, polimer matris kompozitlerin düşük ağırlık ve yüksek mukavemet özelliklerinden yararlanarak, araçların yakıt verimliliğini artırmakta ve emisyonları azaltmaktadır.

Elektronik sektöründe, enjeksiyon kalıplama yöntemi, dayanıklı ve hafif bileşenlerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kabloların dış kaplamaları, konnektörler, düğmeler ve cihaz kasaları gibi bileşenler enjeksiyon kalıplama ile üretilmektedir. Bu yöntem, elektronik bileşenlerin yüksek hassasiyetle üretilmesini sağlayarak, cihazların performansını ve güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, polimer matris kompozit malzemeler, elektronik bileşenlerin elektromanyetik parazitlere karşı korunmasını sağlamaktadır.

Tıbbi cihaz üretiminde, enjeksiyon kalıplama yöntemi, yüksek duyarlılık ve sterilizasyon gereksinimlerini karşılamak için kullanılmaktadır. Şırıngalar, cerrahi aletler, kateterler ve protezler gibi tıbbi cihazlar enjeksiyon kalıplama ile üretilmektedir. Bu yöntem, tıbbi cihazların mükemmel uyum ve performans göstermesini sağlamaktadır. Ayrıca, polimer matris kompozit malzemeler, tıbbi cihazların biyouyumlu olmasını ve sterilizasyon süreçlerine dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, çeşitli tüketim ürünlerinin üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Plastik kaplar, şişeler, oyuncaklar, mutfak eşyaları ve ev aletleri gibi ürünler enjeksiyon kalıplama ile üretilmektedir. Bu yöntem, yüksek üretim hızları ve düşük maliyet avantajı sunarak, tüketim ürünlerinin geniş çapta üretilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, polimer matris kompozit malzemeler, tüketim ürünlerinin dayanıklılığını ve estetik özelliklerini artırmaktadır.



Şekil 1. 24 Termoplastik Malzemeler

Sonuç olarak, enjeksiyon kalıplama yöntemi, termoplastik matris kompozit malzemelerin üretiminde yüksek duyarlılık, tekrarlanabilirlik ve üretim hızı sunan bir işleme yöntemidir. Otomotiv parçaları, elektronik bileşenler, tıbbi cihazlar ve tüketim ürünleri gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama, polimer matris kompozit malzemelerin üstün özelliklerinden yararlanarak, yüksek kaliteli ve performanslı ürünlerin üretilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem, modern endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesi sunmakta ve gelecekteki yenilikçi tasarımlar ve yüksek performanslı ürünler için büyük bir potansiyel taşımaktadır.

1.16 Termoplastik Matris Kompozit Malzemelerin Elektriksel Özellikleri

Termoplastik matris kompozit malzemeler, üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra dikkat çeken elektriksel özelliklere de sahiptir. Bu malzemeler, polimer matrislerinin yalıtkan doğası ve takviye malzemelerinin iletken özelliklerinin birleşimiyle (karbon esaslı, metalik bileşikler vb.) çeşitli elektriksel performanslar sergilemektedir. Elektriksel iletkenlik, termoplastik matris kompozitlerin enerji

depolama, elektronik ve elektromanyetik koruma gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır.

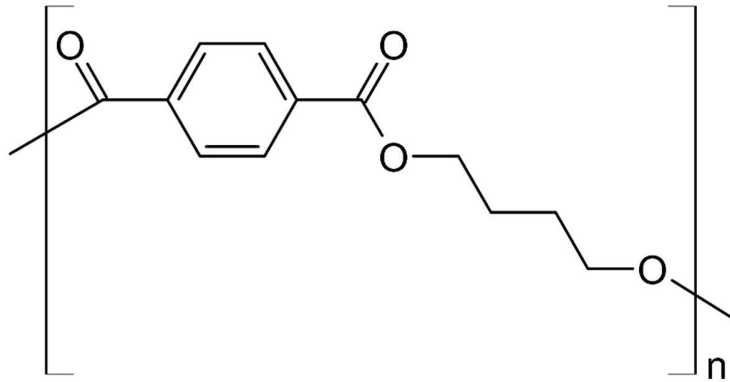
Termoplastik matris kompozit malzemelerin elektriksel özellikleri, polimer matrisin iletkenlik düzeyi ve kullanılan takviye malzemelerinin türü ile doğrudan ilişkilidir. Polimer matrisler genellikle yalıtkan malzemeler olup, elektriksel iletkenlikleri düşüktür. Ancak, iletken takviye malzemelerinin (örneğin karbon nanotüpler, grafen, karbon siyahı) eklenmesiyle, termoplastik matris kompozitlerin elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artırılabilir. Karbon nanotüpler ve grafen, yüksek elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım sunmakta, bu da onları termoplastik matris kompozitlerin elektriksel özelliklerini iyileştirmek için ideal hale getirmektedir. Bu iletken malzemeler, kompozitlerin iç yapısında iletken ağlar oluşturarak, elektriksel iletkenliği artırmaktadır.

Polimerlerin reolojik özellikleri, çift vidalı ekstrüderlerde işleme sırasında elektriksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Polimerin viskozitesi, eriyik haldeki malzemenin akış davranışını belirlemekte ve takviye malzemelerinin dağılımını etkilemektedir. Yüksek viskoziteli polimerler, daha fazla enerji gerektirmekte ve daha yüksek tork ve basınç altında işlenmektedir. Düşük viskoziteli polimerler ise daha kolay işlenmekte ve takviye malzemelerinin daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır. Polimer matrisin reolojik özellikleri, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama süreçlerinde dikkatlice kontrol edilmektedir.

Amorf ve kristal yapıya sahip polimerler, farklı elektriksel özellikler sergilemektedir. Amorf polimerler, düzensiz moleküler yapıya sahip olup, geniş bir erime aralığına sahiptir. Bu polimerler, ısıtıldığında yumuşamakta ve viskoz bir sıvı haline gelmektedir. Amorf polimerler, düşük kristalliteye sahip olmaları nedeniyle genellikle düşük elektriksel iletkenlik göstermektedir. Ancak, iletken takviye malzemeleri ile birleştirildiğinde, amorf polimer matris kompozitlerin elektriksel iletkenliği önemli ölçüde artırılabilir.

Polibütilen Tereftalat (PBT) polyester termoplastik ailesine aittir. PBT, temel olarak mühendislik uygulamaları için enjeksiyon kalıplamada kullanılan yarı kristal bir polimerdir. Polibütilen Tereftalat (PBT), tereftalik asit veya dimetil tereftalat'ın 1,4 bütandiyol ile çoklu kondenzasyonu (polycondensation) üretilmektedir. Özellikleri;

- Yüksek güç
- Yüksek sürekli kullanım sıcaklığı (150 °C'ye kadar)
- Daha yüksek sıcaklıkta bile çok iyi sürünme direnci
- Yüksek rijitlik ve sertlik
- İyi sürtünme özellikleri ve aşınma direnci
- Yüksek boyut kararlılığı
- İyi hava şartlarına direnç
- Çevresel stresten çatlamaya karşı dayanıklı



Şekil 1. 25 PBT Açık Yapısı

Polimer tabanlı kompozit malzemelerin oluşturulmasında öncelikle polimer türü olarak termoplastik polimerler kullanılıp elektriksel iletken polimer kompozit malzemeler yapılması için ön çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilen bu malzemelerin

üretimi ekstrüzyon yöntemi ile, elektriksel olarak iletken olması ve iyon geçişine izin verip vermediği potansiyostat cihazında voltammetri ve impedans teknikleri ile denemeler yapılmıştır. Belirli katkıları ile elektriksel olarak iletken hale gelen bu malzemelere elektriksel enerjiyi depolaması için katkıları eklenmesi planlanmıştır. Bu arada eklenen katkıları karbon türevi bileşikler, metal tuzları, organometalik bileşikler, seramik bileşikler vb. birçok katkı denenmiş verim, kapasite gibi özellikleri konusunda bilgi sahibi olunmuştur

Kristal polimerler ise düzenli moleküler yapıya sahip olup, belirli bir erime noktasına sahiptir. Bu polimerler, ısıtıldığında erime noktasında keskin bir geçiş göstermektedir. Kristal polimerler, yüksek kristallığe sahip olmaları nedeniyle genellikle daha yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç sunmaktadır. Kristal yapının varlığı, polimerin elektriksel iletkenliğini de etkileyebilmektedir. Kristal polimer matris kompozitler, iletken takviye malzemeleri ile birleştirildiğinde, yüksek elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım kombinasyonu sağlamaktadır.

Termoplastik matris kompozitlerin elektriksel özellikleri, enerji depolama cihazlarında, özellikle de lityum iyon pillerde kritik bir rol oynamaktadır. Lityum iyon pillerde kullanılan anot ve katot malzemeleri, yüksek elektriksel iletkenlik gerektirmektedir. Termoplastik matris kompozitler, yüksek iletkenlik sağlayarak pilin genel performansını artırmakta ve enerji yoğunluğunu yükseltmektedir. Örneğin, karbon nanotüplerle güçlendirilmiş polimer matris kompozitler, lityum iyon pillerde yüksek kapasiteli ve uzun ömürlü elektrot malzemeleri olarak kullanılabilir.

Bunun yanı sıra, termoplastik matris kompozitlerin elektriksel iletkenliği, elektronik ve elektromanyetik koruma uygulamalarında da önemli bir rol oynamaktadır. Elektronik cihazlarda kullanılan bileşenlerin elektriksel iletkenliği, cihazların performansını ve verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Termoplastik matris kompozitler, yüksek iletkenlikleri nedeniyle elektronik cihazların

performansını artırmakta ve elektromanyetik parazitleri önleyerek cihazların güvenliğini sağlamaktadır. Ayrıca, bu malzemeler, elektromanyetik dalgaların soğurulması ve yayılması yoluyla elektromanyetik koruma sağlayarak, hassas elektronik cihazların elektromanyetik parazitlerden korunmasına yardımcı olmaktadır.

Sonuç olarak, termoplastik matris kompozit malzemeler, yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç gibi üstün özelliklerinin yanı sıra dikkat çeken elektriksel özelliklere de sahiptir. Polimer matrisin yalıtkan doğası ve takviye malzemelerinin iletken özellikleri, bu malzemelerin çeşitli elektriksel performanslar sergilemesini sağlamaktadır. Elektriksel iletkenlik, termoplastik matris kompozitlerin enerji depolama, elektronik ve elektromanyetik koruma gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu malzemeler, modern endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesi sunmakta ve gelecekteki yenilikçi tasarımlar ve yüksek performanslı ürünler için büyük bir potansiyel taşımaktadır.

1.17 Termoplastik Kompozit Malzemelerin Enerji Depolama Özelliği

Termoplastik matris kompozit malzemeler, enerji depolama sistemlerinde giderek artan bir öneme sahip olmaktadır. Bu malzemeler, lityum iyon piller ve diğer enerji depolama cihazlarında yüksek performans, güvenlik ve uzun ömür sunmaktadır. Bu bölümde, termoplastik matris kompozit malzemelerin enerji depolama özellikleri ve bu özelliklerin lityum iyon pillerdeki uygulamaları ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.

Termoplastik matris kompozit malzemeler, polimer matrisin esnekliği ve takviye malzemelerinin yüksek iletkenlik ve mekanik dayanımı sayesinde enerji depolama sistemlerinde üstün performans göstermektedir. Polimer matrisler, düşük yoğunluk ve yüksek kimyasal direnç sunmakta, bu da kompozit

malzemelerin hafif ve dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Takviye malzemeleri ise, elektriksel ve termal iletkenliği artırmakta, böylece enerji depolama cihazlarının verimliliğini ve güvenliğini artırmaktadır.

Karbon nanotüpler, grafen ve metal oksitler gibi iletken takviye malzemeleri, termoplastik matris kompozitlerin enerji depolama kapasitesini ve şarj-deşarj hızını artırmaktadır. Karbon nanotüpler, yüksek yüzey alanı ve mükemmel iletkenlik özellikleri ile elektrot malzemelerinde kullanılmakta ve pilin genel performansını iyileştirmektedir. Grafen, iki boyutlu yapısı ve yüksek iletkenliği sayesinde enerji depolama sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Metal oksitler ise, yüksek kapasiteli elektrot malzemeleri olarak kullanılmakta ve pilin enerji yoğunluğunu artırmaktadır.

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve düşük kendiliğindendeşarj oranı gibi özellikleri nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Termoplastik matris kompozit malzemeler, lityum iyon pillerde anot ve katot malzemeleri olarak kullanılmakta ve pilin performansını artırmaktadır.

Anot malzemeleri, lityum iyonlarının depolanmasını ve serbest bırakılmasını sağlayan kritik bileşenlerdir. Geleneksel olarak, grafit anotlar kullanılmakta, ancak termoplastik matris kompozitler, silisyum ve diğer yüksek kapasiteli malzemelerle birleştirilerek daha yüksek performans sunmaktadır. Örneğin, karbon nanotüplerle güçlendirilmiş polimer matris kompozitler, yüksek kapasiteli ve uzun ömürlü anot malzemeleri olarak kullanılmakta ve pilin enerji yoğunluğunu artırmaktadır.

Katot malzemeleri, lityum iyonlarının serbest bırakılmasını ve depolanmasını sağlayan bir diğer önemli bileşendir. Termoplastik matris kompozitler, metal oksitler ve fosfatlar gibi yüksek kapasiteli katot malzemeleri ile birleştirilerek, pilin genel performansını ve döngü ömrünü iyileştirmektedir. Örneğin, lityum demir fosfat (LiFePO_4) katotlar, yüksek güvenlik ve uzun döngü

ömrü sunmakta ve termoplastik matris kompozitlerle birleştirildiğinde, pilin performansını daha da artırmaktadır.

Termoplastik matris kompozit malzemeler, lityum iyon pillerde güvenlik ve ısı yönetimi açısından da önemli avantajlar sunmaktadır. Polimer matrisler, pilin içindeki ısının eşit bir şekilde dağılmasını sağlayarak, aşırı ısınmayı ve termal kaçakları önlemektedir. Bu, pilin güvenliğini artırmakta ve yangın veya patlama riskini azaltmaktadır. Ayrıca, termoplastik matris kompozitler, yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanım ve kimyasal stabilite sunarak, pilin uzun ömürlü ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

Termoplastik matris kompozitlerin esnekliği, pilin çeşitli şekillerde ve boyutlarda tasarlanmasına olanak tanımakta, bu da enerji depolama cihazlarının farklı uygulamalara uyarlanabilmesini sağlamaktadır. Esnek piller, çeşitli şekil ve boyutlara adapte olabilen, bükülebilir ve katlanabilir özellikte olan, giyilebilir teknolojiler ve esnek elektronik cihazlar için tasarlanmış bir pil türüdür. Giyilebilir cihazlar, esnek elektronikler ve taşınabilir enerji depolama sistemleri gibi yeni nesil uygulamalarda kullanılmaktadır. Termoplastik matris kompozitler, bu esnek pillerin hafif, dayanıklı ve yüksek performanslı olmasını sağlamaktadır.

Termoplastik matris kompozit malzemeler, enerji depolama sistemlerinde çevresel ve ekonomik avantajlar da sunmaktadır. Polimer matrislerin geri dönüştürülebilirliği, enerji depolama cihazlarının çevresel etkisini azaltmakta ve sürdürülebilirlik sağlamaktadır. Ayrıca, termoplastik matris kompozitlerin düşük maliyetli üretimi, enerji depolama cihazlarının ekonomik olarak daha uygun hale gelmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, termoplastik matris kompozit malzemeler, enerji depolama sistemlerinde yüksek performans, güvenlik ve uzun ömür sunan ileri mühendislik malzemeleridir. Lityum iyon pillerde anot ve katot malzemeleri olarak kullanılan bu kompozitler, pilin enerji yoğunluğunu, şarj-deşarj hızını ve döngü ömrünü artırmaktadır. Güvenlik ve ısı yönetimi açısından da önemli avantajlar sunan

termoplastik matris kompozitler, esnek piller ve yeni nesil enerji depolama uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Çevresel ve ekonomik avantajları ile de öne çıkan bu malzemeler, enerji depolama teknolojilerinin geleceğinde önemli bir rol oynamaktadır.

1.18 Elektrokimya

Elektrokimya, elektrik enerjisi ile kimyasal enerji arasındaki dönüşümleri ve bunlarla ilgili süreçleri inceleyen bilim dalıdır. Elektrokimyasal tepkimeler ise, elektrolit/elektrot arayüzeyinde elektron alış veriş ya da yük aktarımı esas alındığında dinamik ($i \neq 0$) özelliklere sahip olabildiği gibi her hangi bir elektron ya da yük aktarımının olmadığı statik denge koşullarına da ($i = 0$) sahip olabilmektedir. Bu disiplin, enerji depolama sistemleri, elektroliz, elektrokaplama ve sensörler gibi birçok uygulama alanını kapsamaktadır. Elektrokimyasal süreçler, redoks tepkimelerine dayanmaktadır. Elektrokimya hem teorik hem de pratik düzeyde geniş bir bilgi yelpazesi sunmakta ve enerji dönüşüm teknolojilerinin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 1. 26 Elektrokimya Gösterimi

Elektrokimyasal hücreler, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine veya tersi şekilde dönüştüren sistemlerdir. Bu hücreler, anot ve katot adı verilen iki elektrottan ve bu elektrotlar arasında yer alan bir elektrolitten oluşmaktadır. Anot, yükseltgenme tepkimesinin gerçekleştiği elektrot olup, elektronları serbest bırakmaktadır. Katot ise indirgenme reaksiyonlarının gerçekleştiği elektrot olup, elektronları kabul etmektedir. Elektrotlar arasındaki potansiyel fark, bir dış devre üzerinden elektrik akımı üretilmesini sağlamaktadır.

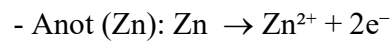
Elektrolit, iyonların iletkenliğini sağlayan bir ortamdır. Elektrolitler, sıvı, katı veya jel formunda olabilir. Sulu çözeltiler, organik çözücüler ve iyonik sıvılar, yaygın olarak kullanılan elektrolit türleridir. Elektrolitlerin iletkenliği, iyonların hareketliliği ve derişimi ile doğrudan ilişkilidir. Elektrolit içinde yer alan iyonlar, elektrik akımının taşınmasını sağlamakta ve elektrotlar arasında iyon aktarımı gerçekleştirmektedir.

Elektrokimyasal hücrelerin temel parametreleri arasında hücre potansiyeli, akım yoğunluğu, kutup potansiyeli ve hücre iç direnci bulunmaktadır. Hücre potansiyeli, anot ve katot arasındaki potansiyel farkı ifade etmekte ve hücrenin elektromotor kuvvetini belirlemektedir. Akım yoğunluğu, elektrot yüzeyine uygulanan akım miktarını ifade etmekte ve elektrokimyasal tepkimelerinin hızını etkilemektedir. Kutup potansiyeli, bir elektrotun belirli bir akım altında gösterdiği potansiyel değeri ifade etmektedir. Hücre iç direnci ise elektrotlar ve elektrolit arasındaki direnç olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 1. 27 Elektrokimyasal Ölçüm Örneği

Daniell Hücresi:



- Toplam Tepkime: $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$

- Bu hücre, çinko ve bakır elektrotlar ve sülfat gibi metal tuzları ile çalışmaktadır. Çinko, elektron kaybederek yükseltgenir (anot), bakır ise elektron kazanarak indirgenir (katot).

Lityum İyon Pili:

- Anot (Şarj): $\text{LiC}_6 \rightarrow \text{C}_6 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$

- Katot (Deşarj): $\text{LiCoO}_2 + \text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}_2\text{CoO}_2$

- Toplam Tepkime: $\text{LiC}_6 + \text{CoO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_6 + \text{LiCoO}_2$

- Lityum iyon pilleri, lityum iyonlarının anot ve katot arasında hareket ettiği şarj ve deşarj süreçlerine dayanır.

Su Elektrolizi:

- Anot: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

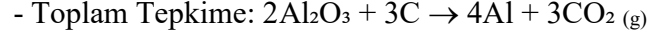
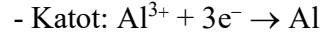
- Katot: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$

- Toplam Tepkime: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)}$

- Su elektrolizi, elektrik akımı kullanarak suyun oksijen ve hidrojen gazlarına ayrıştırılmasıdır.

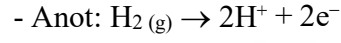
Alüminyum Üretimi (Hall-Héroult Prosesi):

- Anot: $\text{C} + 2\text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_{2(g)} + 4\text{e}^-$



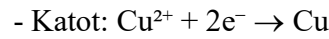
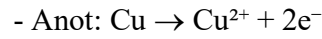
- Bu süreç, boksitten alüminyum üretmek için elektrik akımı kullanır. Alüminyum oksit (Al_2O_3), elektrolitik hücrede alüminyuma indirgenir.

Hidrojen-Oksijen Yakıt Hücresi:



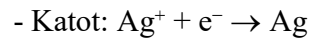
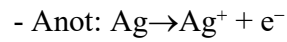
- Hidrojen-oksijen yakıt hücreleri, hidrojenin oksijenle reaksiyona girerek su ve elektrik üretmesini sağlar.

Bakır Arıtımı:



- Bakır arıtımı, elektroliz yoluyla safsızlıklardan arındırılarak saf bakır elde edilmesini sağlar.

Gümüş Plakalama:



- Gümüş plakalama, bir nesnenin yüzeyine elektroliz yoluyla gümüş kaplanmasını sağlar.

Elektrokimyasal hücreler, primer (birincil) ve sekonder (ikincil) hücreler olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Primer hücreler, tek kullanımlık olup, şarj edilememektedir. Bu hücreler, enerji tüketildikten sonra atılmakta ve yeniden kullanılamamaktadır. Örneğin, alkali pil ve çinko-karbon pil primer hücrelere örnektir.

Sekonder hücreler ise şarj edilebilir hücreler olup, defalarca kullanılabilir. Bu hücreler, elektrik enerjisi ile yeniden şarj edilmekte ve enerji depolama kapasitesi tekrar kazanılmaktadır. Lityum iyon piller, nikel-metal hidrür (NiMH) piller ve kurşun-asit piller sekonder hücrelere örnek olarak verilebilir. Sekonder hücreler, enerji depolama uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Lityum iyon piller, yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve düşük kendiliğinden deşarj oranı gibi üstün elektrokimyasal özelliklere sahiptir. Bu piller, taşınabilir elektronik cihazlar, elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemleri gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lityum iyon pillerin elektrokimyasal özellikleri, anot ve katot malzemeleri ile elektrolitlerin etkileşimi ile belirlenmektedir.

Lityum iyon pillerde kullanılan anot malzemeleri genellikle grafit veya silikon bazlı olup, lityum iyonlarının depolanmasını ve serbest bırakılmasını sağlamaktadır. Katot malzemeleri ise lityum kobalt oksit (LiCoO_2), lityum demir fosfat (LiFePO_4) ve nikel-kobalt-mangan (NCM) gibi bileşiklerden oluşmaktadır. Bu malzemeler, yüksek kapasite ve termal stabilite sunarak, pilin performansını artırmaktadır. Elektrolitler ise lityum tuzları içeren organik solventler veya katı elektrolitler olup, iyon iletkenliğini sağlamaktadır.

Lityum iyon pillerde, şarj ve deşarj süreçleri sırasında lityum iyonları anot ve katot arasında hareket etmektedir. Şarj sırasında, lityum iyonları anot üzerinde birikmekte ve elektronlar dış devre üzerinden hareket etmektedir. Deşarj sırasında ise, lityum iyonları katot üzerinde birikmekte ve elektronlar tekrar dış devre üzerinden hareket ederek elektrik akımı üretmektedir. Bu süreçler, pilin enerji depolama ve enerji sağlama kapasitesini belirlemektedir.

Elektrokimyasal analiz teknikleri, elektrokimyasal süreçlerin incelenmesinde ve elektrokimyasal hücrelerin performansının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Yaygın olarak kullanılan teknikler arasında döngüsel voltammetri, empedans spektroskopisi ve galvanostatik şarj-deşarj testleri bulunmaktadır.

- Döngüsel Voltammetri: Bu teknik, elektrokimyasal hücrelerin redoks özelliklerini incelemek için kullanılmaktadır. Döngüsel voltammetri, elektrot potansiyelinin zamanla değiştirildiği ve akımın ölçüldüğü bir yöntemdir. Bu teknik, redoks reaksiyonlarının kinetiği ve mekanizmaları hakkında bilgi sağlamaktadır.
- Empedans Spektroskopisi: Elektrokimyasal hücrelerin iç direnç ve kapasitans özelliklerini incelemek için kullanılan bir tekniktir. Empedans spektroskopisi, alternatif akım uygulanarak hücrenin empedansının frekansla değişiminin ölçülmesini sağlamaktadır. Bu teknik, hücre içindeki iletkenlik, direnç ve kapasitans bileşenlerinin analiz edilmesini mümkün kılmaktadır.
- Galvanostatik Şarj-Deşarj Testleri: Bu testler, elektrokimyasal hücrelerin enerji depolama kapasitesini ve döngü ömrünü değerlendirmek için kullanılmaktadır. Galvanostatik şarj-deşarj testlerinde, sabit akım uygulanarak hücrenin şarj ve deşarj süreçleri izlenmektedir. Bu testler, pilin kapasite kaybı, döngü stabilitesi ve verimlilik gibi performans parametrelerini belirlemektedir.

Sonuç olarak, elektrokimya, kimyasal reaksiyonların elektrik enerjisi ile etkileşimini inceleyen bir bilim dalıdır ve enerji depolama sistemleri gibi birçok uygulama alanında kritik bir rol oynamaktadır. Lityum iyon pillerin elektrokimyasal özellikleri, bu pillerin yüksek performans ve uzun ömür sunmasını sağlamaktadır. Elektrokimyasal analiz teknikleri ise bu süreçlerin detaylı bir şekilde incelenmesine ve optimize edilmesine olanak tanımaktadır.

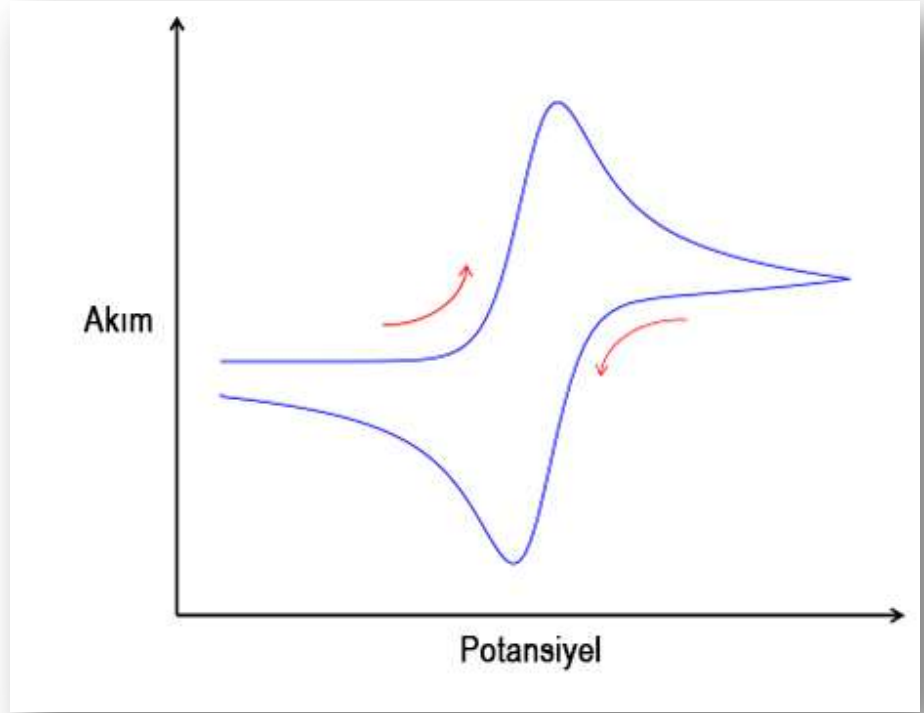
1.19 Voltammetri ve Voltammetrik Teknikler

Voltammetri, elektrokimyasal sistemlerdeki akım-potansiyel ve analit derişimini inceleyen bir grup analitik tekniğı içermektedir. Bu teknik, elektrot üzerine uygulanan potansiyelin zamana bağılı olarak değıştirilmesi ve bu sırada oluşan akımın ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Voltammetri, elektrokimyasal tepkimelerin kinetiğı, mekanizması ve termodinamiğı hakkında bilgi sağlamakta ve çeşitli elektrokimyasal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Voltammetri, birçok farklı voltammetrik teknik içerir. Bunlar arasında döngü voltammetrisi (CV), kare dalga voltammetrisi (SWV), diferansiyel puls voltammetrisi (DPV) ve normal puls voltammetrisi (NPV) bulunmaktadır.

- Döngüsel Voltammetrisi (CV): Döngüsel voltammetrisi, en yaygın kullanılan voltammetrik tekniklerden biridir. Bu teknikte, elektrot potansiyeli belirli bir hızla taranmakta ve bu tarama sırasında akım ölçülmektedir. Tarama, belirli bir potansiyel aralığında ileri ve geri yönde gerçekleştirilmektedir. CV, elektrokimyasal tepkimelerin redoks potansiyelini, tersinir, yarı tersinir veya tersinmez olup olmadıklarını belirlemeyi sağladığı gibi tepkime kinetiğini incelemek ve tepkime mekanizmasını önermek içinde kullanılmaktadır. Döngüsel voltammogramlar, karakteristik pikler göstermekte ve bu piklerin pozisyonları ve yükseklikleri, redoks türlerinin kimyasal özellikleri hakkında bilgi vermektedir.

Kare Dalga Voltammetrisi (SWV), Diferansiyel Puls Voltammetrisi (DPV), Puls Voltammetrisi (PV) gibi teknikler daha çok nicel analizlerde kullanılmaktadır. Genelde CV ile gerçekleştirilen deneysel optimizasyon çalışmalarından elde edilen en uygun koşullarda duyar ve seçimli tayinler için kullanılırlar.



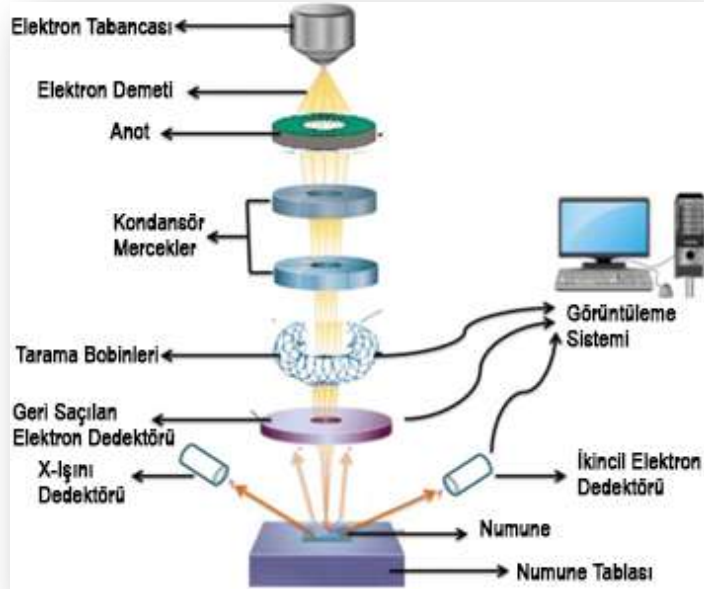
Şekil 1. 28 Şematik Olarak Döngüsel Voltammogram

Sonuç olarak, voltammetri ve voltametrik teknikler, elektrokimyasal sistemlerin incelenmesinde güçlü araçlar sunmaktadır. Bu teknikler, kimyasal sensörlerin geliştirilmesi, çevresel analiz, biyokimya ve enerji depolama sistemlerinin incelenmesi gibi çeşitli alanlarda geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Voltametrik analizler, elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği, mekanizması ve termodinamiği hakkında derinlemesine bilgi sağlamaktadır.

1.20 Karakterizasyon Teknikleri

Yüzey karakterizasyonu, malzemelerin yüzey özelliklerini incelemek ve bu yüzeylerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini aydınlatmak için kullanılan bir dizi analitik yöntemden oluşmaktadır. Yüzey analizi, malzemelerin performansı, dayanıklılığı ve işlevselliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), yüzey morfolojisi ve yapısal analiz için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. SEM, elektron demetinin malzeme yüzeyine odaklanarak yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmesini sağlamaktadır. Elektron demeti, yüzeye çarptığında yüzeyden ikincil elektronlar ve geri saçılmış elektronlar yayılmakta ve bu elektronlar bir dedektörler tarafından toplanarak yüzey görüntüsü ve yüzey kimyasal bileşenlerine ilişkin bilgi elde edilmekte. SEM, yüzeyin morfolojisi, pürüzlülüğü ve mikro yapısını incelemek için ideal bir tekniktir.



Şekil 1. 29 SEM Çalışma İlkesi

SEM, malzeme biliminde ve mühendislikte geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Özellikle, lityum iyon pillerdeki elektrot malzemelerinin yüzey morfolojisinin incelenmesinde kullanılmaktadır. SEM, elektrot yüzeyindeki çatlaklar, pürüzlülük ve partikül dağılımı gibi özellikleri belirlemek için kullanılarak, pil performansının ve ömrünün optimize edilmesine yardımcı olmaktadır.

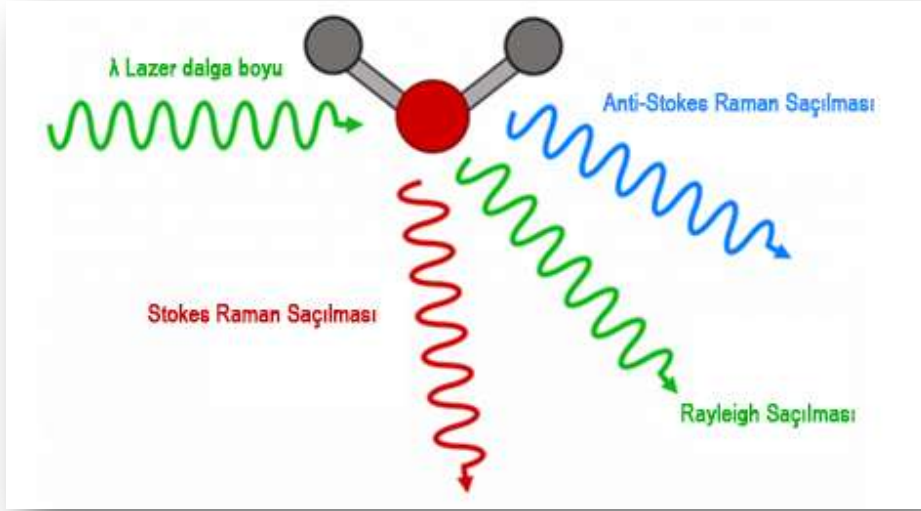
Enerji Dağılımlı X-Ray Spektroskopisi (EDS veya EDX), SEM ile birlikte kullanılan ve malzemelerin kimyasal bileşimini analiz eden bir tekniktir. EDS, elektron demetinin malzeme yüzeyine çarpması sonucu oluşan karakteristik X-ışınlarını ölçerek elementlerin tespitini sağlar. EDS, yüzeydeki elementlerin kantitatif ve kalitatif analizini yapabilmektedir.

Lityum iyon pillerde, EDS, elektrot malzemelerinin kimyasal bileşiminin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu teknik, elektrot yüzeyinde oluşan pasivasyon tabakalarının (SEI tabakası) kimyasal bileşimini analiz ederek, pilin performansı ve güvenliği hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır.

Raman spektrumu, bir numunenin moleküler yapısını ve kimyasal bağlarını incelemek için kullanılan bir spektroskopi tekniğidir. Bu teknik, Raman saçılması adı verilen ışığın inelastik saçılmasına dayanır. Bir lazer ışını, numuneye yönlendirilir ve moleküllerle etkileşime giren ışığın enerjisinde meydana gelen değişiklikler incelenir. Raman saçılması sırasında, fotonlar moleküllerle etkileşime girerek enerji alışverişinde bulunur ve bu süreçte enerjileri değişir. Bu enerjideki değişiklikler, molekülün titreşim modlarına bağlı olarak belirli frekanslarda meydana gelir ve bu frekanslar, Raman spektrumunda karakteristik bantlar olarak gözlemlenir.

Raman spektrumu, numunenin kimyasal bileşimi, kristal yapısı, faz durumu, gerilme durumu ve diğer yapısal özellikleri hakkında bilgi sağlar. Her molekülün kendine özgü bir Raman spektrumu vardır, bu nedenle Raman spektroskopisi, kimyasal tanımlama ve analiz için güçlü bir araçtır. Raman spektrumu, genellikle

dalga sayısı (cm^{-1}) biriminde ölçülen Raman kaymaları ile elde edilir. Bu kaymalar, molekülün titreşim enerjilerinin doğrudan bir göstergesidir ve moleküller arası bağların güçleri ve türleri hakkında bilgi verir.



Şekil 1. 30 Raman Spektrumu Çalışma İlkesi

X-Ray Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), yüzey kimyası ve kimyasal bağ analizi için kullanılan bir tekniktir. XPS, malzeme yüzeyine X-ışınları gönderilerek yüzeyden fotoelektronların salınmasını ve bu elektronların enerjilerinin ölçülmesini sağlar. Bu ölçümler, yüzeydeki elementlerin kimyasal durumunu ve bağ yapısını belirlemek için kullanılır.

XPS, lityum iyon pillerde elektrot malzemelerinin yüzey kimyasını analiz etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik, SEI tabakasının kimyasal bileşimini ve elektrot yüzeyindeki reaksiyon ürünlerini inceleyerek, pilin döngü ömrü ve stabilitesi hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Dört Nokta Prob Ölçümü, malzemelerin elektriksel iletkenliğini belirlemek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte, dört adet prob kullanılarak malzeme

yüzeyine akım uygulanır ve iki prob arasında oluşan voltaj farkı ölçülerek elektriksel iletkenlik hesaplanır.

Lityum iyon pillerde yüzey karakterizasyonu, elektrot yüzeylerinin analizi ve SEI tabakasının incelenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Elektrot yüzeylerindeki morfolojik ve kimyasal değişiklikler, pil performansını doğrudan etkilemektedir. SEM, EDS, Raman, XPS gibi teknikler, elektrot yüzeylerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlayarak, pilin performansını ve ömrünü optimize etmeye yönelik değerli veriler sunmaktadır.

Sonuç olarak, yüzey karakterizasyon teknikleri, malzemelerin yüzey özelliklerini ve bu özelliklerin enerji depolama sistemlerindeki performansını anlamak için hayati öneme sahiptir. Bu teknikler, malzemelerin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi, topografyası ve elektriksel iletkenliği hakkında kapsamlı bilgiler sağlamaktadır. Lityum iyon pillerde, yüzey karakterizasyonu, pil performansını ve güvenliğini artırmak için kritik bir rol oynamaktadır.

1.21 Tezin Amacı

Bu doktora tez çalışmasında lityum iyon pillerde kullanılmak üzere yenilikçi ve yüksek performanslı termoplastik matris kompozit anot malzemeleri geliştirmektir. Bu malzemelerden üretilecek lityum iyon pillerin, enerji verimi yüksek, uzun ömürlü, çevre dostu, kısa sürede şarj olabilen ve şarj-deşarj döngüsü yüksek olan yeni sistemlerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca yönelik, PBT ve PP gibi termoplastik matrisler, sentetik ve doğal grafit ile bakır metal tozu gibi iletken katkı malzemeleri kullanılarak yeni anot malzemeleri geliştirilerek, hücre boyutunda prototip lityum iyon piller hazırlanıp ve pillerin performans testleri laboratuvar koşullarında gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlardan en iyi performansa sahip pil saptanacaktır.

Araştırma sürecinde, geliştirilen kompozit anot malzemelerinin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi, elektriksel iletkenliği ve enerji depolama kapasitesi

detaylı olarak incelenecektir. Yüzey karakterizasyon teknikleri (SEM, EDS, XPS) ve elektrokimyasal analiz yöntemleri (döngü voltammetrisi, galvanostatik şarj-deşarj testleri) kullanılarak, malzemelerin performans parametreleri belirlenecektir.

Bu tez, lityum iyon pillerde performans ve güvenliği artıracak, maliyet etkin ve çevre dostu termoplastik matris kompozit anot malzemeleri geliştirmeyi hedeflemektedir. Sonuç olarak, bu araştırma, enerji depolama teknolojilerinde yenilikçi çözümler sunarak, sürdürülebilir ve verimli enerji sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1 Kullanılan Ölçüm Sistemleri

Voltammetrik ve empedans ölçümler Autolab PGSTAT302N ile gerçekleştirilmiş. Şarj-deşarj ölçümleri Autolab 302N ile entegre Autolab Duo Coin Holder ve Autolab PGSTAT204 ile entegre tasarlanan test hücresi ile yapılmıştır. Sentezlenen ve hazırlanan kompozit malzemelerin; morfoloji Thermo Scientific Apreo S taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışınları (SEM/EDX), fiziksel özellikleri Termal Gravimetrik Analiz (TA) ve Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC), kimyasal özellikleri ve yapıları X-ışını difraksiyon (XRD) (Rigaku Smartlab), Raman Spektrometresi (Renishaw) ve X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) (Thermo Scientific K-Alpha) teknikleri kullanılarak aydınlatılmıştır.

Pil Ölçüm test hücresi MTI Compact & Fast Gas Driven Crimper for CR20XX Series Coin Cells, MTI Compact Precision Disc Cutter with 4 Sets of Cutting Die, presleme işlemi Carver Bench Top Auto Presses ile yapılmıştır.

2.2 Kullanılan Kimyasallar

Tüm kimyasallar analitik saflıkta olup; nitrik asit % 65'lik (HNO_3 , Merck), lik hidroklorik asit %37' (HCl , Merck), sodyum hidroksit (NaOH Sigma-Aldrich), n-polivinilidin florür - ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$ Nanografi), super P(Nanografi), N-Metil-2-Pirrolidon ($\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}$ Carlo Erba), bakır levha, alüminyum levha, lityum folyo, N,Ndimethylformamide (DMF Merck), izopropil alkol, ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ Carlo Erba), polipropilen(Sabic), polybutilen tereftalat(SASA), bakır tozu ($<45\mu\text{m}$ Baran Group), sentetik grafit (Imerys), doğal grafit (Doğuş Döküm), çinko oksit (ZnO MELOS), kobalt tozu(Baran Group), ketjen black, lityum demir fosfat (LiFePO_4 Nanografi), lityum nikel mangan kobalt oksit ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ Nanografi) özelliklerinde kullanılmıştır.

2.3 Kompozit Malzeme Hazırlama Süreçleri

2.3.1 Kompozit Malzeme A'nın Hazırlanması

Malzeme üretimi için çift vidalı ekstrüder kullanılmıştır. Çift vidalı ekstrüderin üstündeki beslemelerden 3 katkı maddesi de eklenmiştir. Sırasıyla ana beslemeden termoplastik polimer olarak 7 kg polibütilen tereftalat (PBT), 1. yan beslemeden 3 kg sentetik grafit (%30) ve 2. yan beslemeden elektriksel iletkenliği artırmak için sırasıyla %5, %10 ve %15 oranında 40 mikron altı bakır tozu eklenmiş kompozitler hazırlanmıştır. Proses parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 Kompozit malzeme A'nın hazırlanmasına ilişkin çift vidalı ekstrüder üretim ve sıcaklık parametreleri

Malzeme Adı	Makine Devri (rpm)	Üretim Hızı (kg/h)	Tork (%)	Sıcaklık Parametreleri (°C)
PBT 30SG 5Cu (P11A)	320	20	60	260-190
PBT 30SG 10 Cu (P12A)	320	20	60	260-190
PBT 30SG 15Cu (P13A)	320	20	60	260-190

Tablo1’ deki koşullarda üretilen malzeme A, ekstrüzyon işleminden sonra granül formunda elde edilmiştir. Bir sonraki adımda granül ürün öğütülmüş ve 40 mesh elekten geçirilerek toz formuna dönüştürülmüştür.

Üretimler yapıldıktan sonra yarı pil hücresi olarak pil kapama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 2.6.1 başlığında ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Üretilen pillerin içerikleri aşağıdaki Tablo 1’te verilmiştir.

2.3.2 Kompozit Malzeme B'nin Hazırlanması

Malzeme B’ nin üretimi için çift vidalı ekstrüder kullanılmıştır. Termoplastik polimer olarak PBT kullanılıp, kompozit malzeme A üzerine yapılan denemelerin üzerine tüm katkı maddelerini aynı anda termoplastik hammaddeye yüklemek yerine 3 defa ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır.

İlk aşamada, 7 kg PBT ve 3 kg doğal grafit Tablo 2’de belirtilen parametreler ile işlem görmüştür. Bu işlemde, doğal grafitin PBT matrisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır. Ekstrüzyon işlemi sonunda elde edilen kompozit malzeme granül hale getirilmiştir.

Birinci aşamada üretilen granüller, ikinci ekstrüzyon işlemi için yeniden kullanılmıştır. Bu aşamada, 8 kg birinci aşama ürünü, 1 kg PBT ile 1 kg bakır tozu, çift vidalı ekstrüderde aynı sıcaklık profili altında işlenmiştir. Bakır tozunun eklenmesiyle malzemenin elektriksel iletkenlik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu işlem sırasında bakır tozunun homojen bir şekilde dağılımı sağlanmıştır. Elde edilen malzeme, granül formunda elde edilmiştir.

Son aşamada, ikinci aşama üründen 7,8 kg alınarak 1 kg çinko oksit (ZnO), 1 kg PBT ve 0,2 kg kobalt (Co) tozu katkı maddeleriyle birlikte işlem görmüştür. Üçüncü ekstrüzyon işlemi sırasında, tüm bileşenlerin homojen bir şekilde karışımı sağlanmış ve son ürün, nihai kompozit malzeme olarak hazırlanmıştır.

Tablo 2 Kompozit malzeme B'nin hazırlanmasına ilişkin çift vidalı ekstrüder parametreleri

Numune isimleri ve içerikleri	Makine Devri (rpm)	Üretim Hızı (kg/h)	Tork (%)	Sıcaklık Parametreleri (°C)
PBT +30NG (PBT1)	320	20	60	260-190
PBT1 +10PBT + 10 Cu (PBT2)	320	20	60	250-190
PBT2+ 10ZnO+2Co +10PBT (PBT3)	320	20	60	240-190

Tablo 2' deki koşullarda üretilen malzeme B, ekstrüzyon işleminden sonra granül formunda elde edilmiştir. Bir sonraki adımda granül ürün öğütülmüş ve 40 mesh elekten geçirilerek toz formuna dönüştürülmüştür

Üretimler yapıldıktan sonra yarı pil hücresi ve tam pil hücresi olarak 2 farklı pil kapama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 2.6.1 ve 2.6.2 başlıklarında ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Üretilen pillerin içerikleri aşağıdaki Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3 Pil Hücresi Oluştururken Anot Malzemesi İçerikleri

KATOT Hücresi	ANOT Hücresi	ELEKTROLİT
Li Folyo	%85 Doğal Grafit + %10 Super P + %5 PVDF	Lityum hekzaflorofosfat
Li Folyo	%90 PBT3 + %5 Super P + %5 PVDF	Lityum hekzaflorofosfat
NMC	%90 PBT3 + %5 Super P + %5 PVDF	Lityum hekzaflorofosfat
LFP	%90 PBT3 + %5 Super P + %5 PVDF	Lityum hekzaflorofosfat

2.3.2 Kompozit Malzeme C'nin Hazırlanması

Kompozit Malzeme C'nin üretimi, çift vidalı ekstrüder kullanılarak iki aşamalı bir süreçle gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, polibütilen tereftalat (PBT) ve koşullandırılmış doğal grafit (NG) belirli bir oranla karıştırılarak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Bu aşamada, katkı maddesinin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmış, 7 kg PBT ile 3 kg koşullandırılmış grafit üretilmiş ve granül forma dönüştürülerek ikinci aşama için hazır hale getirilmiştir. Bu işlem sırasında kullanılan sıcaklık ve ekstrüder parametreleri, katkı maddesinin özelliklerini koruyacak şekilde optimize edilmiştir. Kullanılan parametreler Tablo 4'te belirtilmiştir.

İkinci aşamada, birinci aşamada elde edilen 7,8 kg PBT1 malzemesi, eklenen 1 kg saf PBT, 1 kg bakır (Cu) ve 0,2 kg kobalt (Co) ile birlikte yeniden ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş. Üretim süreci sonunda, katkı maddelerinin homojen bir şekilde dağılımı sağlanmış ve nihai kompozit malzeme granül formunda elde edilmiştir.

Tablo 4 Kompozit Malzeme C'nin hazırlanmasına ilişkin çift vidalı ekstrüder parametreleri

Numune isimleri ve içerikleri	Makine Devri (rpm)	Üretim Hızı (kg/h)	Tork (%)	Sıcaklık Parametreleri (°C)
PBT +30NG (PBT1)	320	20	60	260-190
PBT1 +10PBT + 10 Cu +2Co (PBT2)	320	20	60	250-190

Tablo 4' deki koşullarda üretilen malzeme C, ekstrüzyon işleminden sonra granül formunda elde edilmiştir. Bir sonraki adımda granül ürün öğütülmüş ve 40 mesh elekten geçirilerek toz formuna dönüştürülmüş.

Üretimler yapıldıktan sonra yarı pil hücresi olarak pil kapama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 2.6.1 başlığında ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Üretilen pillerin içerikleri aşağıdaki Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5 Pil Hücresi Oluştururken Anot Malzemesi İçerikleri

KATOT Hücresi	ANOT Hücresi	ELEKTROLİT
Li Folyo	%85 Doğal Grafit + %10 Super P + %5 PVDF	Lityum heksaflorofosfat
Li Folyo	%85 PBT2 + %10 Super P + %5 PVDF	Lityum heksaflorofosfat

2.4 Doğal Grafitin Koşullandırılması

Ticari olarak temin edilen—doğal grafitin karbon içeriği koşullandırma işlemine başlamadan elementel analiz tekniği ile yaklaşık olarak %85 olduğu saptandıktan sonra-hem laboratuvar ölçekli hem de pilot ölçekli olacak şekilde iki farklı koşullandırma, saflaştırma ve karbon içeriğinin artırılması işlemi uygulanmıştır.

İlk Saflaştırma yönteminde; doğal grafitin öncelikle alkali (bazik) yıkama yapılarak içerisinde var olan kalsiyum, silisyum ve kimi karbonatlı bileşiklerden giderilmesi için katı 1 g NaOH ve 5 g doğal grafit karışımına 40-50 mL saf su eklenerek yaklaşık iki saat karıştırılıp bulamaç elde edilmiş. Bulamaç halindeki grafit krozeye aktarılıp 600°C’de 2 saat ısıtılmış daha sonra saf su ile yıkanmış ve yıkama suyunun pH değeri 7.00 oluncaya kadar yıkama işlemi sürdürülmüştür.

Alkali ortamda koşullandırma ve yıkama işlemlerinin ardından, malzeme önce hidroklorik asit (HCl) ile yıkanmış, ardından saf su ile durulanmıştır. Bu aşamada çözelti içerisinde kalan özellikle demir ve kobalt gibi metal iyonlarının giderilmesi amaçlanmaktadır. Yıkama işlemi, çıkan yıkama suyunun berraklaşmasına kadar devam ettirilmiş ve yıkama sırasında suyun pH değeri dikkate alınmamıştır. Yıkama suyunun tamamen berrak hale gelmesinin ardından, doğal grafit nitrik asit (HNO₃) ile yeniden yıkanmıştır. Bu işlem sonrası, grafit süspansiyonunun pH değeri 7’ye ulaşana kadar defalarca saf su ile durulanarak nötr hale getirilmiştir.

Koşullandırılan ve yıkanan grafit 700°C’ye kademeli olarak ısıtılıp 2 saat boyunca 700°C’de sabit sıcaklıkta bekletilmiştir. Daha sonra soğutulan bu malzeme agat havan ile toz haline getirilmiştir.

Laboratuvar koşullarında koşullandırılan grafitin pilot ölçekli olarak yapılması ya da daha yüksek miktarlarda koşullandırılıp optimize edilmesi için çalışmalar yapılmıştır.

Laboratuvar ölçekli yapılan üretim sonrasında planlanan takvim ile pilot ölçekli üretim için aşamalar aşağıdaki gibidir.

Ticari olarak temin edilen 10 kg doğal grafit ve 3 kg katı NaOH bulamaç formunu alana kadar yaklaşık 5 L saf su eklenerek 4 saat boyunca karıştırılmış. Bu karışım uygun krozelere konularak 600°C’de atmosfer ortamında 2 saat boyunca ısıtılmış. Elde edilen malzeme bir vakumlu huni yardımıyla defalarca saf su ile yıkanıp pH~7 oluncaya kadar yıkama işlemi yapılmıştır.

Alkali yıkaması tamamlanan doğal grafit, laboratuvar ölçekli olarak yapılan çalışmalardan farklı olarak iki aşamalı bir asidik yıkama işlemi yapılmadan doğrudan, 3 L HCl (%37) ve 3 L HNO₃ (%65) (1:1) karışımında yaklaşık 3 saat muamele edildikten sonra üzerine 15 L saf su eklenip 2 saat karıştırılıp 12 saat boyunca bekletildi. Bekleme sonrası vakumlu bir huni yardımıyla defalarsa saf su ve ultra saf su ile yıkanıp pH~7 olana kadar yıkama işlemi yapılmış. Grafit kontrollü olarak ısıtılıp 700°C’de 2 saat bekletildi. Daha sonra soğutulan bu malzeme agat havanda toz haline getirilmiştir.

Pilot ölçek ile koşullandırılan grafitin daha büyük miktarlarda yapılması ve kompozit malzemede kullanılması için çalışmalar başlamıştır.

Ticari olarak alınan 25 kg doğal grafit ve 7,5 kg katı NaOH bulamaç formunu alana kadar yaklaşık 15 L saf su eklenerek 4 saat boyunca karıştırıldı. Bu karışım uygun krozelere konularak 600°C’de atmosfer ortamında 2 saat boyunca ısıtılmış. Elde edilen malzeme bir vakumlu huni yardımıyla defalarca saf su ve ultra saf su ile yıkanıp pH~7 oluncaya kadar yıkama işlemi yapılmıştır.

Alkali yıkaması tamamlanan malzeme laboratuvar ölçekli olarak yapılan çalışmalardan farklı olarak iki aşamalı bir asidik yıkama işlemi yapılmadan 7,5 L HCl (%37) ve 7,5 L HNO₃ (%65) karışımında yaklaşık 3 saat muamele edildikten sonra üzerine 45 L saf su eklenip 5 saat aralıklarla karıştırılıp 48 saat boyunca bekletildi.

Bekleme sonrası vakumlu bir huni yardımıyla saf su ile yıkama suyu pH' ı yaklaşık 7.00 olana kadar yıkama işlemi yapılmıştır. Elde edilen koşullandırılmış ve saflaştırılmış doğal grafitin 700°C'de 2 saat kül fırınında termal koşullandırması yapılmıştır. Daha sonra soğutulan bu malzeme agat havanda toz haline dönüştürülmüştür.

2.5 Koşullandırılmış Doğal Grafit ile Kompozit Malzemenin Hazırlanması

Koşullandırılmış doğal grafit ile kompozit malzemenin üretimi, çift vidalı ekstrüder kullanılarak iki aşamalı bir süreçle gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, polibütilen tereftalat (PBT) ve koşullandırılmış doğal grafit (kNG) belirli bir oranla karıştırılarak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Bu aşamada, katkı maddesinin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağılması sağlanmıştır, 7 kg PBT ile 3 kg koşullandırılmış grafit üretilmiş ve granül forma dönüştürülerek ikinci aşama için hazır hale getirilmiştir. Bu işlem sırasında kullanılan sıcaklık ve ekstrüder parametreleri, katkı maddesinin özelliklerini koruyacak şekilde optimize edilmiştir. Kullanılan parametreler Tablo 6'te belirtilmiştir.

İkinci aşamada, birinci aşamada elde edilen 7,8 kg PBT1 malzemesi, eklenen 1 kg saf PBT, 1kg 40 mikron altı bakır tozu (Cu) ve 0,2 kg kobalt tozu (Co) ile birlikte yeniden ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Üretim süreci sonunda, katkı maddelerinin homojen bir şekilde dağılımı sağlanmış ve nihai kompozit madde granül formunda elde edilmiştir.

Tablo 6 Doğal Grafit ile Üretilen Malzemenin Hazırlanması

Numune isimleri ve içerikleri	Makine Devri (rpm)	Üretim Hızı (kg/h)	Tork (%)	Sıcaklık Parametreleri (°C)
PBT +30NG (PBT1)	320	20	60	260-190
PBT1 +10PBT + 10 Cu +2Co (PBT2)	320	20	60	250-190

Termoplastik polimer olarak, önceki çalışmalarda kullanılan PBT polimerinin yerine, polipropilen (PP) kullanılmıştır. PP polimerinin seçimi, polimer film üretimi yapmak ve üretilen filmin anot davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Üretim sürecinde, koşullandırılmış doğal grafit hammadde kullanılarak kompozit malzeme üretilmiştir. Daha önce uygulanan üretim yöntemleri, PP bazlı sistemlerde de adaptasyon sağlanarak bu çalışmada kullanılmıştır. Üretim sırasında, mevcut hammadde üzerine yeni katkı maddeleri eklenmiş ve bunların dağılımını optimize etmek amacıyla homojen dispersiyonu artırmaya yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, polimer kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliğini artırmak amacıyla karbon siyahı eklenmiş bir kompozit malzeme tasarlanmıştır. Geleneksel olarak elektriksel iletkenlik sağlamak için kullanılan bakır tozu yerine, karbon siyahının aynı işlevi yerine getirip getiremeyeceği test edilmiştir.

Yapılan işlemler aşağıdaki Tablo 7’de belirtilmiştir.

Tablo 7 Koşullandırılmış Grafit ile Yapılan Malzemenin Hazırlanması

Numune isimleri ve içerikleri	Makine Devri (rpm)	Üretim Hızı (kg/h)	Tork (%)	Sıcaklık Parametreleri (°C)
PBT +30NG (PBT1)	320	20	60	260-190
PBT1 +10PBT + 10 Cu +2Co (PBT2)	320	20	60	250-190
PP + 5 CB + 2 Co (PP1)	320	20	60	220-170

2.6 Pil Hücrelerinin Hazırlanması

2.6.1 Yarı Hücre Pil Sistemlerinin Hazırlanması

Bu kesimde lityum iyon pil yarı hücresi hazırlanarak anot ve katot malzemelerinin elektrokimyasal performansı değerlendirilmek üzere hazırlık aşaması anlatılmıştır. Anot malzemesi olarak grafit ve oluşturulan kompozit malzemeler, katot malzemesi olarak ise lityum folyo kullanılmıştır. Yarı hücre, CR2032 düğme pil formatında tasarlanmış ve aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir.

Anot malzemesi hazırlanırken grafit (%85), bağlayıcı polimer PVDF (%10) ve karbon siyahı (%5) bir çözücü olan 5 mL N-metil-2-pirolidon (NMP) içerisinde homojen bir şekilde karıştırılmış. Elde edilen viskoz pasta, akım toplayıcı olarak

kullanılan bakır folyo üzerine düzgün bir şekilde kaplanmıştır. Bu işlem sırasında filmin bakır folyo yüzeyine homojen kaplanması sağlanmış ve yüzeyde herhangi bir kusur oluşmasının önüne geçilmiştir.

Kaplanan bakır folyo, 120°C’de vakum altında kurutularak çözücü tamamen uzaklaştırılmıştır. Kurutma işlemi, anot malzemesinin gözenekli bir yapıya sahip olmasını ve elektrolitin etkili bir şekilde emilmesine olanak sağlamıştır. Kurutma sonrasında bakır folyo, CR2032 düğme pil boyutlarına uygun şekilde kesilmiştir.

Hazırlanan anot ve karşı elektrot olarak kullanılan lityum folyo ile birlikte yarı hücre içerisinde birleştirilmiştir. Lityum folyo, yüksek saflıkta seçilmiş ve düzgün bir yüzeye sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Anot ve lityum folyo arasında iyonik iletkenliği sağlayan ve kısa devreyi önleyen bir ayırıcı (separator) tabaka yerleştirilmiştir. Separator olarak poliolefin bazlı gözenekli bir malzeme kullanılmış ve elektrolit emilimini artırmak için dikkatle işlenmiştir.

Elektrolit olarak lityum hekzaflorofosfat (LiPF₆) çözeltisi, etilen karbonat (EC) organik çözücü karışımı içinde hazırlanmıştır. Elektrolit, hücre içine dikkatlice enjekte edilmiş ve tüm bileşenlerin iyonik temasının sağlandığından Voltmetre ile test yapılarak emin olunmuştur. Elektrolitin dağılımının homojen olmasına dikkat edilmiştir.

Yarı hücre, tüm bileşenlerin metal pil gövdesine yerleştirilmesinin ardından kapatılmıştır. Kapama işlemi, bir glovebox içerisinde inert argon atmosferinde gerçekleştirilmiş ve hücrenin oksijen ya da neme maruz kalmaması sağlanmıştır. Metal kasa, presleme yöntemiyle sıkıca kapatılmış ve sızdırmaz hale getirilmiştir. Kapama sırasında, anot terminali ve lityum folyosu ile bağlantılı katot terminali arasındaki izolasyon, bir conta kullanılarak sağlanmıştır. Conta, elektriksel izolasyonun yanı sıra hücredeki sıvı elektrolitin dışarı sızmasını da engellemiştir.

Hazırlanan yarı hücre, kalite kontrol testlerine tabi tutulmuştur. İlk olarak, hücrenin iç direnci ve açık devre voltajı (OCV) ölçülmüş ve istenen standartlara

uygun olduğu doğrulanmıştır. Daha sonra, elektrot malzemelerinin elektrokimyasal davranışını incelemek amacıyla şarj-deşarj döngü testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında hücrenin kapasite değerleri, stabilitesi ve döngü ömrünü belirleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2.6.2 Tam Hücre Pil Sistemlerinin Hazırlanması

Tez çalışmasının bu adımında, tam hücre lityum iyon pil tasarlanarak grafit anot malzemesi ile iki farklı katot malzemesi (LiFePO_4 ve NMC) kullanılmış. Hücreler CR2032 düğme pil yapısında üretilmiş ve üretim süreci aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir.

Anot malzemesi hazırlanırken, %85 her bir grafit ya da üretilen kompozit A, B ve C malzemeleri, %10 bağlayıcı polimer PVDF ve %5 iletken katkı malzemesi karbon siyahı bir çözücü olan N-metil-2-pirolidon (NMP) içerisinde homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Karışım, viskoz bir pasta haline getirilmiştir ve bu pasta akım toplayıcı olarak kullanılan bakır folyo üzerine düzgün bir şekilde kaplanmıştır. Kaplama işlemi sırasında kalınlığın homojenliği doctor-blade film kaplayıcı ile yapılmış ve kaplama kusurlarının oluşması engellenmiştir.

Kaplanan bakır folyo, 120°C 'de vakum altında kurutularak çözücü tamamen uzaklaştırılmış. Kurutma işlemi, anot malzemesinin gözenekli yapısını korumasını ve elektrolit emilim kapasitesinin artmasını sağlamıştır. Kurutulan anot folyo, CR2032 düğme pil boyutlarına uygun şekilde kesilmiştir.

Katot malzemesi olarak iki farklı aktif malzeme, LiFePO_4 (Lityum demir fosfat) ve NMC (nikel-mangan-kobalt oksit), kullanılmıştır. Her iki katot malzemesi, %85 aktif malzeme, %10 bağlayıcı polimer PVDF ve %5 karbon siyahı içerecek şekilde bir çözücü (NMP) ile homojenleştirilmiştir. Elde edilen

viskoz karışım, alüminyum bir akım toplayıcı üzerine düzgün bir şekilde kaplanmıştır.

Kaplama işlemi sonrasında katot malzemesi, 120°C’de vakum altında kurutulmuş ve solventin tamamen uzaklaştırılması sağlanmıştır. Kurutulan katot malzemesi, CR2032 hücre boyutlarına uygun şekilde kesilerek tam hücre montajına hazır hale getirilmiştir.

Tam hücre montajında, hazırlanan grafit anot ve LiFePO_4 veya NMC katot, CR2032 düğme pil gövdesi içerisinde birleştirilmiştir. Anot ve katot arasında kısa devreyi önlemek ve iyonik iletkenliği sağlamak amacıyla bir separatör tabakası yerleştirilmiştir. Separatör olarak poliolefin bazlı gözenekli bir malzeme kullanılmıştır ve elektroliti emerek iyonların hareketine olanak tanıdığı doğrulanmıştır.

Elektrolit olarak, lityum hekzaflorofosfat (LiPF_6) çözeltisi, etilen karbonat (EC) ve dimetil karbonat (DMC) organik çözücülerinde hazırlanmıştır. Elektrolit, hücreye dikkatlice enjekte edilmiş ve tüm iç bileşenlerin iyonik teması sağlanmıştır. Montaj sırasında, malzemelerin doğru şekilde yerleştirildiği ve homojen bir elektrolit dağılımı olduğu kontrol edilmiştir.

Montaj tamamlandıktan sonra, hücre metal bir pil gövdesine yerleştirilmiş ve presleme yöntemiyle kapatılmıştır. Kapama işlemi, inert bir argon atmosferinde gerçekleştirilmiş ve hücrenin oksijen ve neme maruz kalmaması sağlanmıştır. Hücrenin sızdırmaz hale getirilmesi, pilin uzun ömürlü ve güvenli çalışması için kritik bir adım olarak gerçekleştirilmiştir. Kapama sırasında anot terminali (alt kısım) ve katot terminali (üst kısım), bir conta ile elektriksel olarak izole edilmiştir.

Tam hücreler, kapama işlemi tamamlandıktan sonra kalite kontrol testleri sırasıyla hücrelerin açık devre voltajı (OCV) ve iç dirençleri ölçülerek yapılmış. Daha sonra, şarj-deşarj döngü testleri yapılarak kapasiteleri, enerji

yoğunlukları ve kararlılıkları değerlendirilmiştir. LiFePO_4 veya NMC esaslı katotların için ayrı ayrı ölçümler yapılmış ve sonuçların karşılaştırılması ve tartışması 3.Bölümde sonuç ve tartışma kesiminde verilmiştir.

2.7 Elektrokimyasal Ölçüm Hücresinin Tasarımı Pil Testlerinin Yapılması

Üç elektrotlu pil test hücreleri, elektrokimyasal enerji depolama sistemlerinin (pillerin) davranışını incelemek için bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılan önemli araçlardır. Bu hücreler, geleneksel iki elektrotlu (anot ve katot) yapıya bir referans elektrot ekleyerek pilin elektrokimyasal tepkimelerin daha duyar bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Bu sayede, pil performansını etkileyen faktörler daha iyi anlaşılır ve yeni pil teknolojilerinin geliştirilmesi için önemli bilgiler elde edilir

Aşağıda, test hücresinin ana bileşenleri ve işlevleri detaylandırılacaktır.

Üst Bileşenler

Altın Kaplı Piston

Altın kaplamalı piston, yüksek iletkenlik sağlamak amacıyla kullanılan bir bileşendir. Bu piston, elektrotlar üzerinde homojen bir basınç uygulayarak elektrokimyasal reaksiyonların tutarlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Altın kaplama, yüzeyin yükseltgenmesini engeller ve iletkenliği artırır.



Şekil 2. 1 Alt Piston

Üst Elektrot Pistonu

Üst elektrotun sabitlenmesi ve basınç uygulanması için kullanılan bu piston, elektrotun yerinde kalmasını sağlar. Bu bileşen, elektrotların düzgün hizalanmasını ve sabit basınç altında test edilmesini sağlar.



Şekil 2. 2 Üst Piston

Elektrot Sistemi

Karşılaştırma Elektrotları

Karşılaştırma Elektrotları, elektro-kimyasal ölçümlerde karşılaştırma amacıyla kullanılır. Referans elektrot, elektrot yığını ile temas ederek ölçümlerin doğru ve

tutarlı olmasını sağlar. Bu bileşen, hücredeki potansiyel farkların doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar.



Şekil 2. 3 Referans Elektrot

Elektrot Ölçüm Kabini

Elektrot kabini, test edilen elektrotların yer aldığı ana ölçüm alanıdır. Bu bölüm, çalışma elektrotu, karşı elektrot ve karşılaştırma elektrottan oluşur. Elektrot yığını, hücredeki elektro-kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yerdir ve bu nedenle dikkatli bir şekilde hazırlanmalıdır.



Şekil 2. 4 Pil Ölçüm Kabini Görseli

Alt Bileşenler

Kuvvet Dağıtım Plakası

Kuvvet dağıtım plakası, uygulanan kuvvetin eşit dağılımını sağlar. Bu plaka, tüm elektrot yüzeyine homojen bir basınç uygulayarak elektro-kimyasal reaksiyonların tutarlı olmasını sağlar. Bu, ölçümlerin doğruluğunu artırır ve malzemelerin performansını doğru bir şekilde değerlendirmeyi mümkün kılar.

Alt Elektrot Pistonu

Alt elektrotun sabitlenmesi ve basınç uygulanması için kullanılan bu piston, alt elektrotun yerinde kalmasını sağlar. Bu bileşen, hücredeki basıncın sabit ve dengeli olmasını sağlayarak ölçümlerin tutarlı olmasını garanti eder.



Şekil 2. 5 Alt Piston

Sensör Sistemi

Güç Sensörü

Kuvvet sensörü, uygulanan kuvveti hassas bir şekilde ölçen bir bileşendir. Bu sensör, USB bağlantısı ile bilgisayara veri göndererek uygulanan basıncın gerçek zamanlı olarak izlenmesini sağlar. Bu, test sırasında basıncın kontrol edilmesini ve ölçümlerin hassasiyetinin artırılmasını sağlar.



Şekil 2. 6 Güç Sensör

Güç Sensör Yuvası

Kuvvet sensörünün monte edildiği yer olan bu bileşen, sensörün sabitlenmesini ve doğru çalışmasını sağlar. Sensör montajı, sensörün güvenli bir şekilde yerleştirilmesini ve doğru ölçümler yapmasını sağlar.

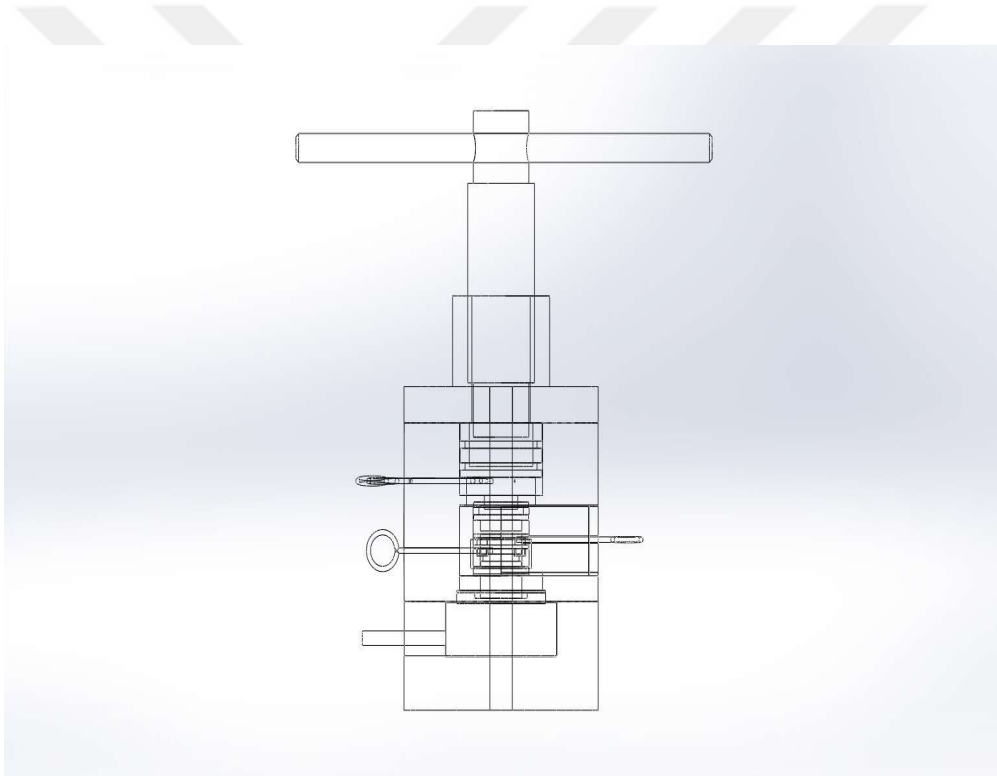


Şekil 2. 7 Basınç Sensörü

Üç elektrotlu pil test hücresi, bileşenlerinin yüksek duyarlılık ve işlevselliği sayesinde batarya ve süperkapasitör malzemelerinin performansını değerlendirmede etkin bir araçtır. Her bir bileşen, elektro-kimyasal ölçümlerin doğruluğunu ve tutarlılığını sağlamak için özenle tasarlanmıştır. Bu hücre, ileri

düzey araştırmalarda ve endüstriyel uygulamalarda güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılır.

Üç elektrotlu pil test hücresi, pilin şarj ve deşarj döngüleri sırasında elektrokimyasal reaksiyonları izlemek için kullanılır. Referans elektrot, sabit bir potansiyel sağlayarak çalışma elektrodu ve karşı elektrot arasındaki potansiyel farkının doğru bir şekilde ölçülmesine olanak tanır. Bu sayede, her bir elektrotun reaksiyonlara katkısı ayrı ayrı analiz edilebilir. Ayrıca, hücreye entegre edilebilen bir kuvvet sensörü (resimde yer almamaktadır), elektrotlar arasındaki basıncı ölçerek pilin mekanik bütünlüğü ve performansı hakkında bilgi verir.



Şekil 2. 8 Pil Test Ölçüm Hücresi

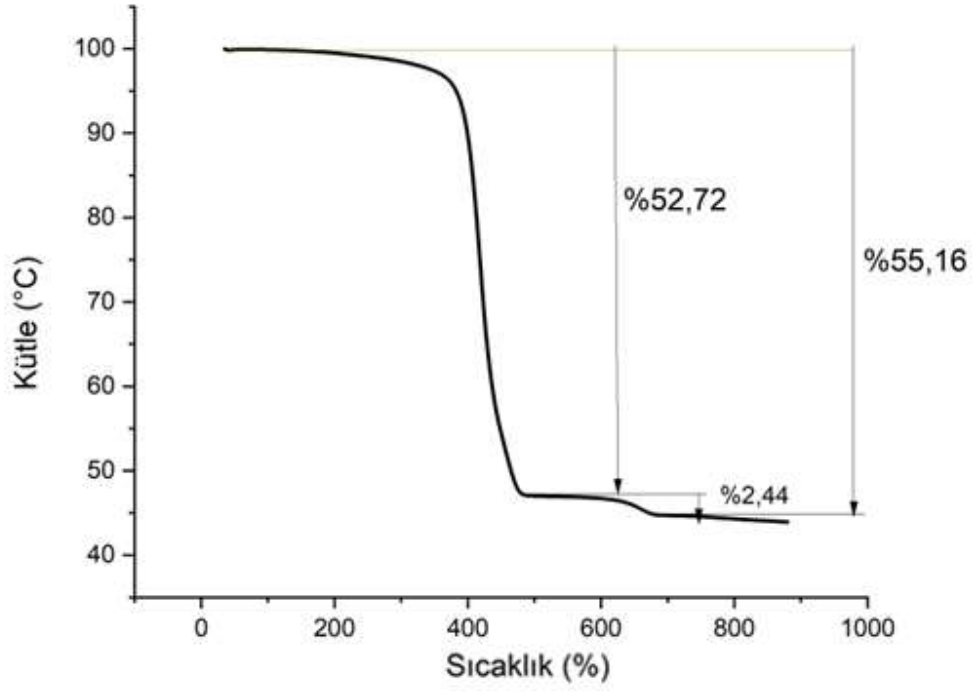
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Kompozit Malzemelerin Fiziksel Karakterizasyonu

Kompozit A, Kompozit B ve Kompozit C malzemeleri için yapılan fiziksel karakterizasyonlar Termal Gravimetrik Analiz (TGA), Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) olarak yapılmıştır. Yapılan analizler aşağıda verilmiştir.

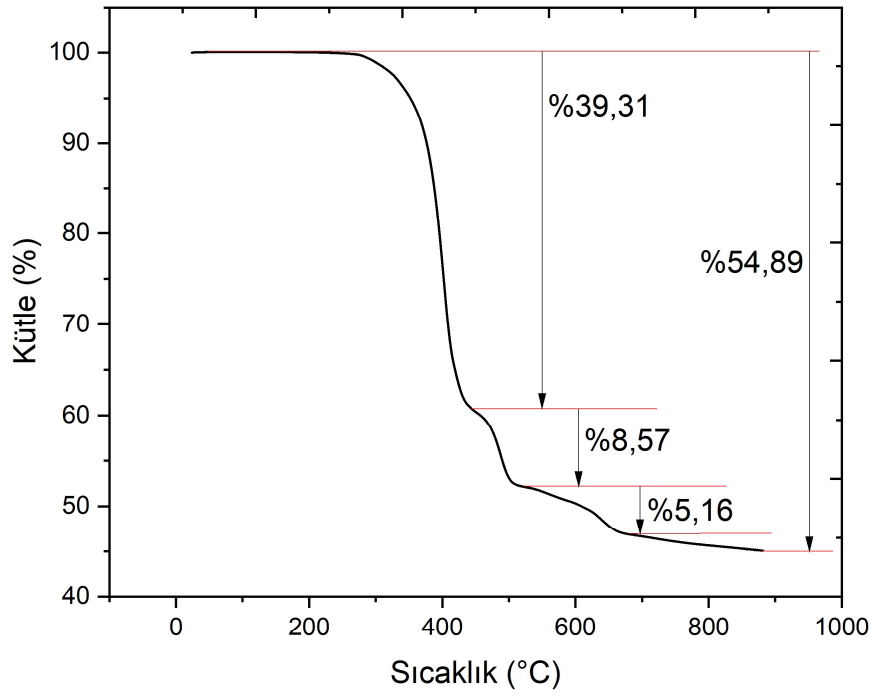
3.1.1 Kompozit Malzemelerin TGA Karakterizasyonu

Kompozit malzemelerin termal stabilitesi ve bozunma davranışı, TGA analizleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen termogramlar, matris ve takviye bileşenlerinin ayrışma sıcaklıklarını, kütle kaybı oranlarını ve kalıntı miktarlarını belirlemek için incelenmiştir.



Şekil 3. 1 Kompozit Malzemesi A Termogramı

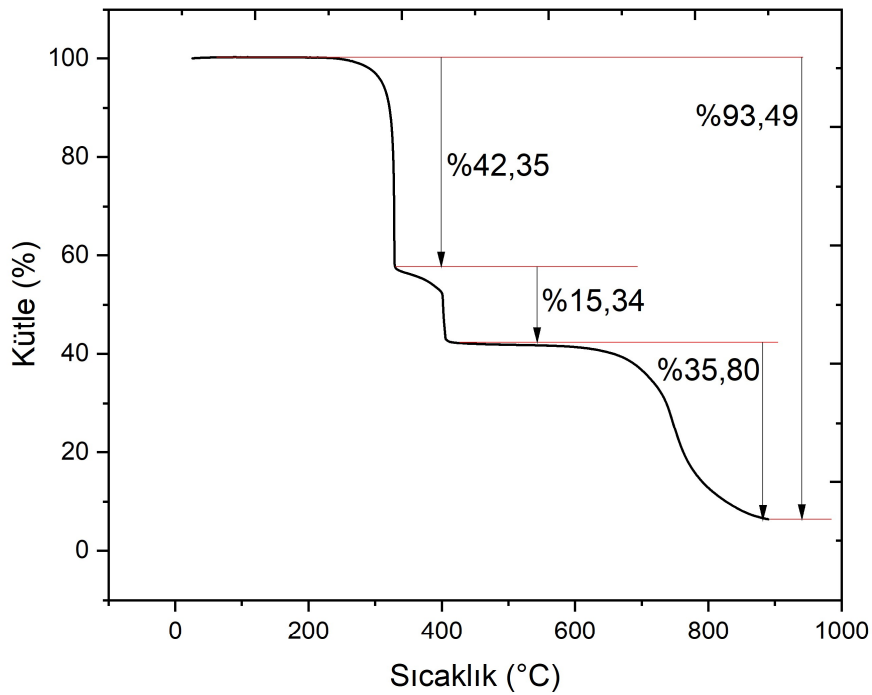
TGA termogramı Şekil.3.1’de verilmiştir. Kompozit A, B ve C malzemelerinin termal davranışları aşağıda ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 3. 2 Kompozit B malzemesinin Termogramı

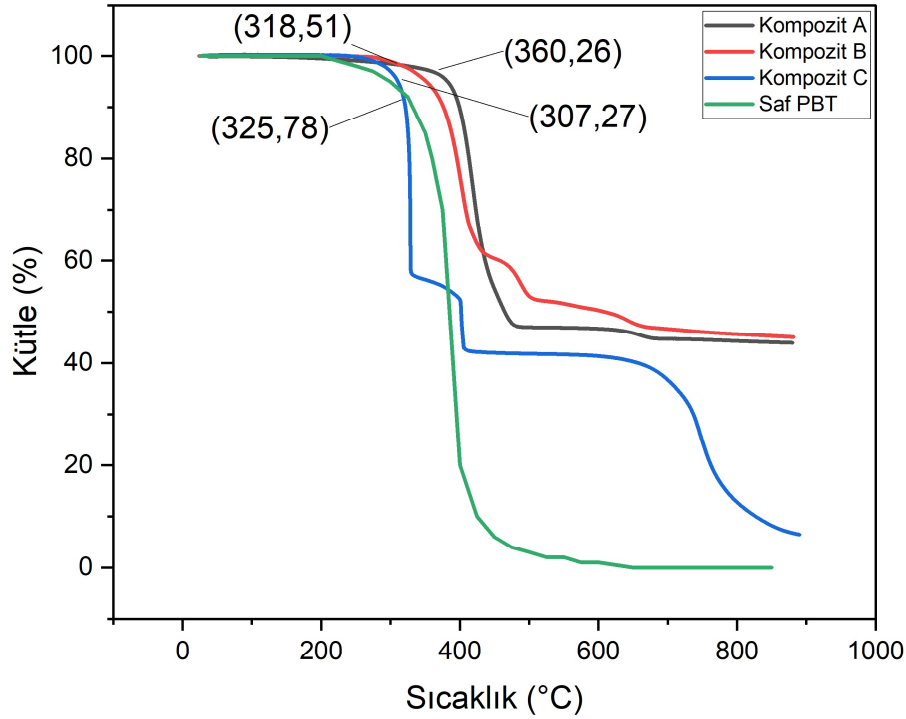
Şekil 3.1’de Kompozit A malzemesinin TGA termogramı, %40 inorganik dolgu maddesi içeren PBT polimerinin termal bozunma davranışını göstermektedir. Dolgu maddesi bileşimi %30 grafit ve %10 bakır tozundan oluşmaktadır. Eğri, sıcaklık arttıkça malzemenin kütle kaybına uğradığı izlenmiştir. İlk kütle kaybı (202,32-360,59°C), polimerin uçucu bileşenlerinin buharlaşması ve düşük molekül kütleli bileşenlerin bozunması sonucu oluşur ve bu aşamada yaklaşık %5’lik bir kayıp gözlenir. Ana kütle kaybı 360,59°C’de polimerin karbon iskeletinin parçalanmasıyla gerçekleşir ve %50 civarında kütle kaybına neden olur. 500°C üzerinde, grafit ve bakır tozunun termal kararlılığı nedeniyle kütle kaybı durur ve kalan %40 oranında dolgu maddesi sabit kalır. Bu sonuçlar, inorganik dolguların PBT’nin termal dayanıklılığını artırdığını ve polimerin bozulma sürecinde önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

Şekil 3.2’de Kompozit B malzemesinin ilk olarak, 0-300 °C aralığında kayda değer bir kütle kaybı gözlenmemesi, numunenin düşük sıcaklıklarda kararlı olduğunu ortaya koymaktadır. 321,77 °C’den sonra ise %39,31’lik belirgin bir kütle kaybı meydana gelmiştir; bu durum, numunedeki ana bileşen olan PBT polimerinin ayrışmasıyla ilişkilendirilebilir. 500-700 °C aralığında %8,57’lik daha düşük seviyede bir kütle kaybı gözlenmiş olup, grafitte bağlı bazı katmanlar gibi zor bozunan yapıların ayrışmasıyla açıklanabilir. Son olarak, 700-1000 °C aralığında %5,16’lık bir kütle kaybı daha gerçekleşmiştir, bu da inorganik veya dirençli yapıların termal bozunmasına işaret etmektedir. %45,11 oranında bozunmadan kalan malzeme gözükmemektedir. Bu da yüklemenin düzgün şekilde yapıldığı anlamına gelmektedir.



Şekil 3. 3 Kompozit C Malzemesinin Termogramı

Şekil 3.3'te numunenin termal stabilitesine dair önemli bilgiler sunulmaktadır. 0-300 °C aralığında, kayda değer bir kütle kaybı gözlenmemektedir; bu durum, numunenin düşük sıcaklıklarda termal olarak kararlı olduğunu göstermektedir. 300-500 °C aralığında belirgin bir kütle kaybı meydana gelmektedir. Bu sıcaklık aralığında gerçekleşen kayıp, numunenin esas polimer matrisinin ayrışması ile ilişkilendirilmektedir. 500-700 °C aralığında daha düşük bir oranda kütle kaybı gözlemlenmektedir. Bu kaybın, polimer yapısından geriye kalan daha dirençli bileşenlerin ayrışmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. 700-1000 °C aralığında gerçekleşen son kütle kaybı, inorganik veya karbonlaşmış yapıların yüksek sıcaklıklarda bozunmasına işaret etmektedir. Sonuç olarak, belirli bir miktarda bozunmadan kalan kalıntının varlığı, numunenin inorganik dolgu maddesi gibi termal olarak dayanıklı bileşenler içerdiğini ve bu malzemenin termal yüklere dayanıklılığını ortaya koymaktadır.

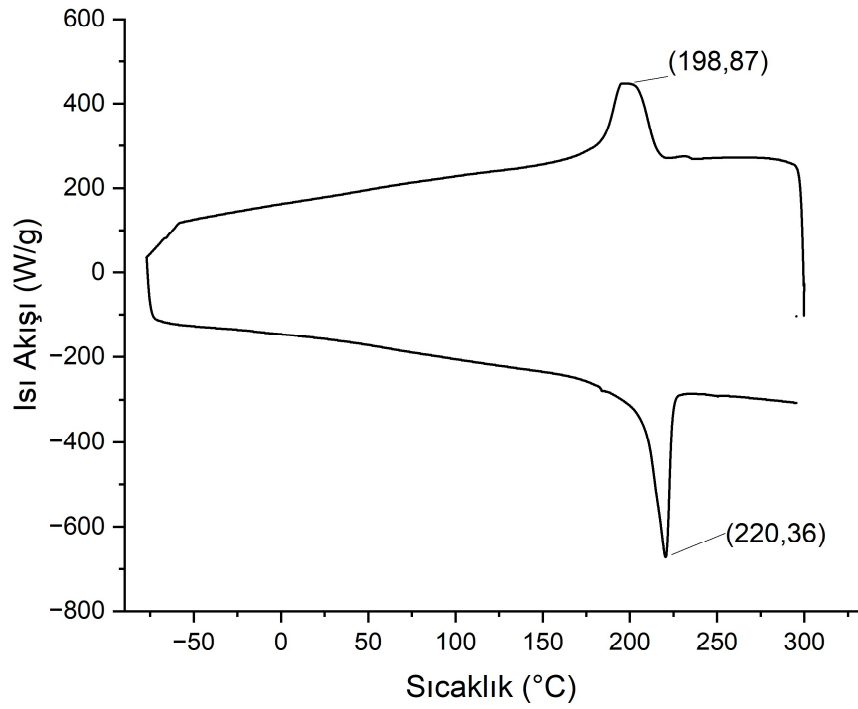


Şekil 3. 4 Kompozit Malzemelerinin TGA Termogramlarının Karşılaştırılması

3.1.2 Kompozit Malzemelerin DSC Karakterizasyonu

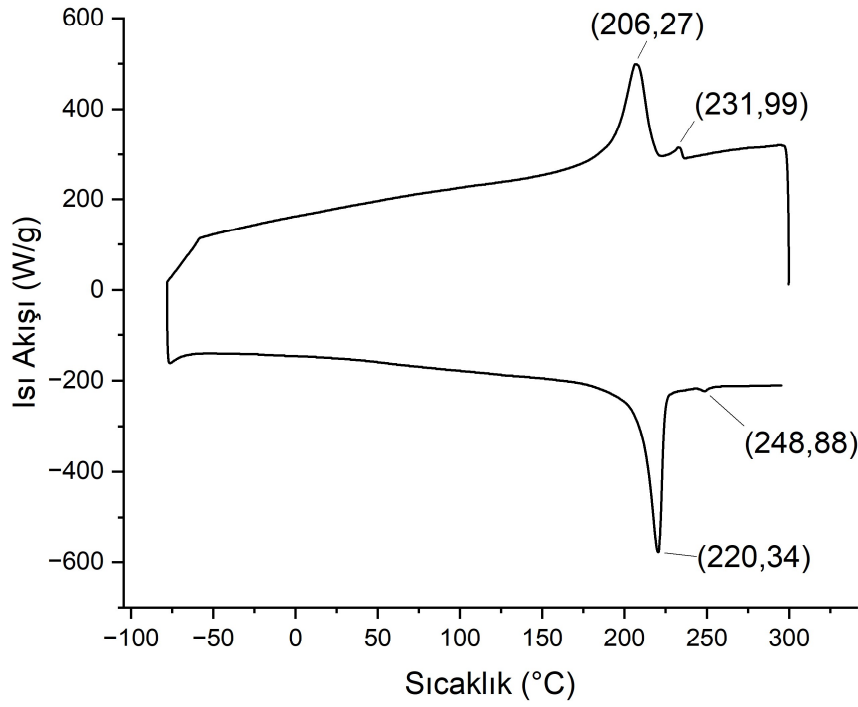
Şekil 3.5'teki grafikte, sıcaklık (°C) yatay ekseninde, ısı akışı (W/g) ise dikey ekseninde verilmiştir. Endotermik ve ekzotermik olayların yönleri belirtilmiş olup, analiz sırasında malzemenin belirli sıcaklıklarda faz geçişleri ve ısıl olaylar gösterdiği gözlemlenmektedir. Kompozit A malzemesi, %30 grafit ve %10 bakır tozu içeren %40 inorganik dolgulu PBT polimerinin DSC davranışı incelenmiş elde edilen DSC Termogramı Şekil 3.5' de verilmiştir. DSC eğrisinde, 200-220°C aralığında kristalizasyon sıcaklığı (Tc) bulunur ve grafit ile bakır tozu dolgu maddeleri bu süreci etkileyebilir. 220-230°C civarında ise polimerin erime sıcaklığı (Tm) görülür, bu sıcaklıkta PBT'nin kristal yapısı erir ve DSC eğrisinde büyük bir endotermik pik olarak ortaya çıkar. Dolgu maddelerinin varlığı, erime sıcaklığını çok fazla etkilemez, ancak termal iletkenlik nedeniyle erime piki daha

keskin olabilir. Ayrıca, dolgu maddelerinin termal iletkenliği sayesinde polimerin yüksek sıcaklıklarda termal stabilitesi artar.



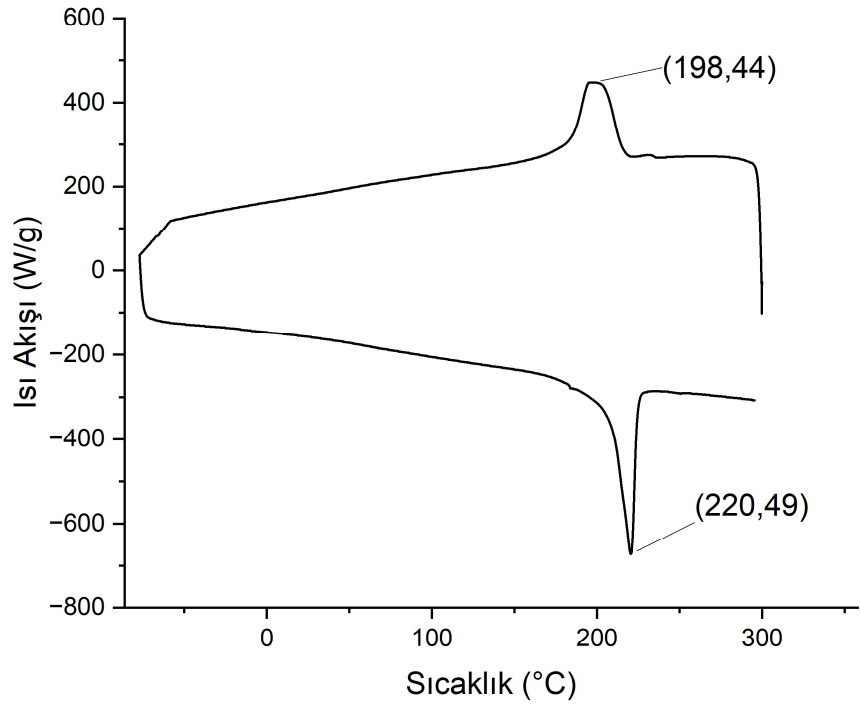
Şekil 3. 5 Kompozit A Malzemesinin DSC Termogramı

Kompozit B malzemesinin DSC termogramında görüldüğü gibi malzemenin sıcaklıkla gerçekleşen termal geçişlerini ortaya koymaktadır. 206,27 °C’de gözlemlenen ekzotermik pik, muhtemelen bir kristalleşme veya faz geçişi sürecine işaret etmekte olup numunenin enerji açığa çıkardığını göstermektedir. 220,34 °C’de ise bir endotermik pik gözlenmiştir; bu sıcaklık, numunenin erime veya termal bozunma sıcaklığına karşılık gelebilir ve numunenin ısı enerjisini emdiğini ifade eder. Son olarak, 248,88 °C civarında termogramda gözlemlenen stabilizasyon, numunenin geçişlerini tamamlayarak termal olarak daha kararlı hale geldiğini düşündürmektedir.



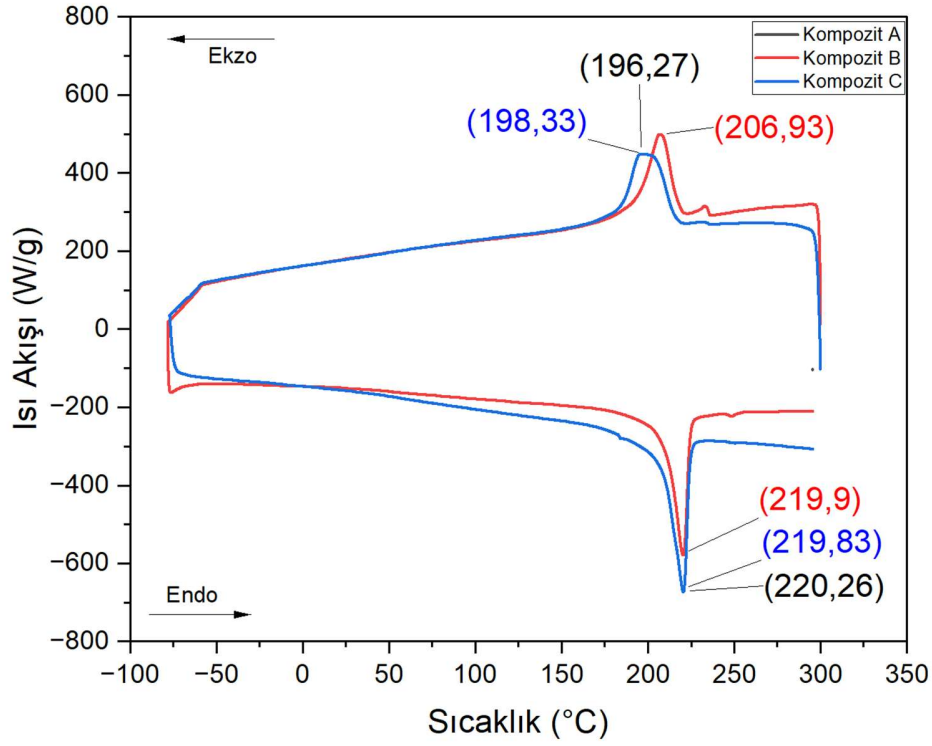
Şekil 3. 6 Kompozit B Malzemesinin DSC Termogramı

Kompozit C olarak adlandırılan malzemenin termal davranışını termogramda gösterilmektedir. Termogramda, yaklaşık 196,27°C'de belirgin bir ekzotermik pik gözlenmektedir. Bu sıcaklık, genellikle kristalizasyon sıcaklığı (T_c) olarak yorumlanabilir ve kompozitin soğuma sırasında kristal yapısını oluşturduğu noktayı gösterir. Kristalizasyon piki, malzemenin kristalleşme kinetiği ve yapısındaki katkı maddelerinin etkisini değerlendirmek için önemlidir.



Şekil 3. 7 Kompozit C Malzemesinin DSC Termogramı

Buna ek olarak, 219,83°C'de belirgin bir endotermik pik bulunmaktadır. Bu sıcaklık, malzemenin erime sıcaklığı (T_m) olarak değerlendirilebilir. Erime piki, matris polimerinin ve takviye malzemesinin termal kararlılığı açısından kritik bir parametredir. Erime sıcaklığı genellikle polimerin moleküler yapısı, kristal düzeni ve takviye malzemelerinin etkisiyle değişkenlik gösterebilir.



Şekil 3. 8 Kompozit Malzemelerin DSC Termogramları Karşılaştırılması

Genel olarak, bu DSC termogramı, "Kompozit C" malzemesinin kristalizasyon ve erime davranışlarını açıkça ortaya koymaktadır. Kristalizasyon ve erime sıcaklıklarının arasındaki fark, malzemenin soğuma sırasında ne kadar sürede kristalize olduğunu ve termal geri kazanım kapasitesini anlamak açısından önemlidir. Bu sonuçlar, kompozitin işlenebilirliği, mekanik özellikleri ve kullanım sıcaklık aralığının belirlenmesi açısından değerlendirilmelidir.

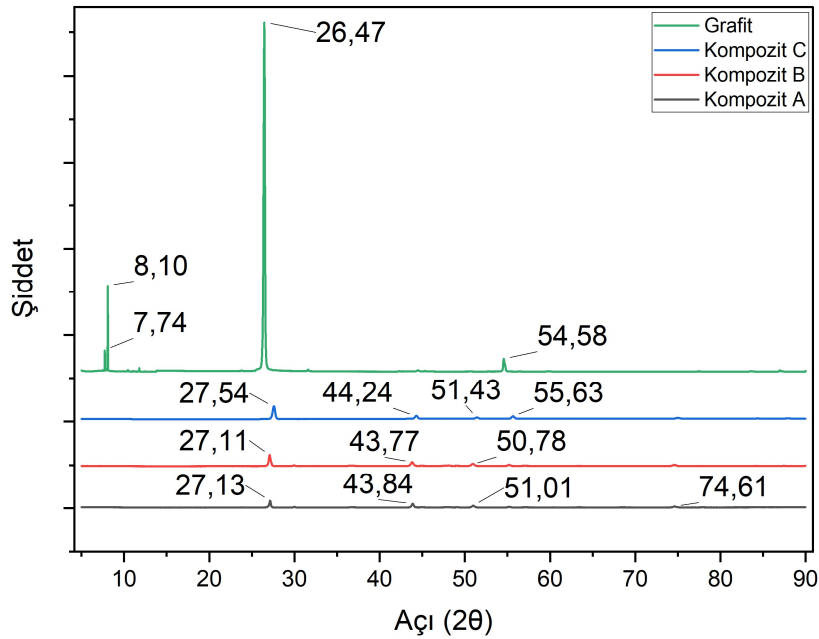
3.2 Kompozit Malzemelerin Kimyasal ve Yüzey Karakterizasyonu

Kompozit A malzemesi için yapılan karakterizasyonlar XRD, SEM, Raman ve XPS olarak yapılmış ve oluşturulan kompozit malzemenin kimyasal bileşimi aydınlatılmıştır. Aşağıda yapılan karakterizasyonlar verilmiştir.

3.2.1 Kompozit Malzemelerin XRD Desenleri

Kompozit A, PBT matris içinde %30 sentetik grafit ve %10 bakır içeren, çinko oksit katkısı bulunmayan bir yapıdadır. XRD deseninde en belirgin piklerden biri $27,13^\circ$ (2θ) açısında gözlemlenmiş olup, bu pik sentetik grafitin (002) düzlemi ile ilişkilendirilmektedir. Sentetik grafit, doğal grafitte kıyasla daha düzenli ve kristalin bir yapıya sahip olduğundan, bu pik oldukça keskin bir form sergilemektedir. $43,90^\circ$ ve $51,00^\circ$ civarında tespit edilen pikler, grafitin (100) ve (101) düzlemlerine karşılık gelmekte olup, malzemenin kristalin yapısını destekleyen kanıtlar sunmaktadır(Martin et al. 2023). Grafitin yüksek kristaliniteye sahip olması, malzemenin elektriksel ve ısı iletkenliğini olumlu yönde etkilemektedir.

Kompozit A'da yer alan %10 oranındaki bakır içeriği, özellikle $50-56^\circ$ aralığında ek piklerin oluşmasına neden olmaktadır, zira bakır kristalitleri genellikle bu bölgede belirgin fazlar oluşturmaktadır(Han et al. 2022). Piklerin keskinliği ve dar genişlikleri, yüksek kristalinite ve düşük amorf yapı oranına işaret etmektedir. Sonuç olarak, sentetik grafit içeren Kompozit A'nın, diğer kompozitlere kıyasla daha düzenli bir karbon yapısına sahip olduğu ve elektriksel/ısı iletkenlik açısından avantaj sunduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3. 9 Kompozit Malzemelerin XRD Deseni

Kompozit B, PBT matris içinde %30 doğal grafit, %8 bakır, %2 kobalt ve %10 çinko oksit içeren bir yapıya sahiptir. XRD deseninde 27,09° (2θ) açısında belirgin bir pik gözlemlenmiş olup, bu pik doğal grafitin (002) düzlemine karşılık gelmektedir. Doğal grafit, sentetik grafitte kıyasla daha düzensiz bir kristal yapıya sahip olduğundan, bu pikin genişliği ve yoğunluğu Kompozit A ile farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca 43,82° ve 50,94° civarında tespit edilen pikler, grafitin (100) ve (101) düzlemlerine karşılık gelmekte olup, malzemenin kristalin yapısını doğrulayan önemli göstergelerdir.

Kompozit B'nin içerdiği %8 oranındaki bakır ve %2 oranındaki kobalt katkıları, özellikle 50-56° aralığında yeni fazların oluşmasına neden olmaktadır. Bakır ve kobalt kristalitleri, bu bölgede piklerin yoğunluğunu artırarak malzemenin kristal yapısını etkilemektedir. Çinko oksit içeriği (%10) nedeniyle 74° civarında belirgin bir ZnO piki tespit edilmiştir, bu da çinko oksit fazının

kristalin yapıda önemli bir bileşen olarak bulunduğunu göstermektedir(S. Feng et al. 2023).

Piklerin genişliği incelendiğinde, doğal grafitin sentetik grafitte kıyasla daha düzensiz bir kristal yapıya sahip olması nedeniyle, kristalinitenin bir miktar azaldığı ve amorf yapı oranının nispeten arttığı görülmektedir. Bu durum, grafitin iletkenlik özellikleri ve mekanik dayanımı üzerinde belirli etkiler yaratabilir. Sonuç olarak, Kompozit B, içerdiği doğal grafit ve çinko oksit fazları nedeniyle, Kompozit A'ya kıyasla daha düşük kristaliniteye sahip olmakla birlikte, çinko oksitin varlığı nedeniyle farklı fonksiyonel özellikler sunmaktadır.

Kompozit C, PBT matris içinde %35 koşullandırılmış grafit, %8 bakır, %2 kobalt ve %5 çinko oksit içeren bir yapıya sahiptir. XRD deseninde $27,59^\circ$ (20) açısında belirgin bir pik gözlemlenmiş olup, bu pik grafitin (002) düzlemine karşılık gelmektedir. Koşullandırılmış grafit, sentetik ve doğal grafitte kıyasla modifiye edilmiş bir kristal yapıya sahip olduğundan, bu pikin yoğunluğu ve genişliği malzemenin grafitik yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. $43,90^\circ$ ve $51,41^\circ$ civarında tespit edilen pikler, grafitin (100) ve (101) düzlemleri ile ilişkilendirilmekte olup, kristal yapının doğrulanmasına katkı sağlamaktadır.

Kompozit C'de bulunan %8 oranındaki bakır ve %2 oranındaki kobalt içerikleri, özellikle $50-56^\circ$ aralığında faz oluşumuna neden olmaktadır. Bu metallerin varlığı, kristal yapıdaki pik yoğunluklarını değiştirerek malzemenin faz dağılımını etkilemektedir. Kompozit B ile karşılaştırıldığında, çinko oksit içeriğinin %5 seviyesinde olması, 74° civarındaki ZnO piklerinin şiddetini azaltmaktadır. ZnO'nun daha düşük oranda bulunması nedeniyle, ZnO'ya özgü piklerin yoğunluğu Kompozit B'ye kıyasla daha düşüktür.

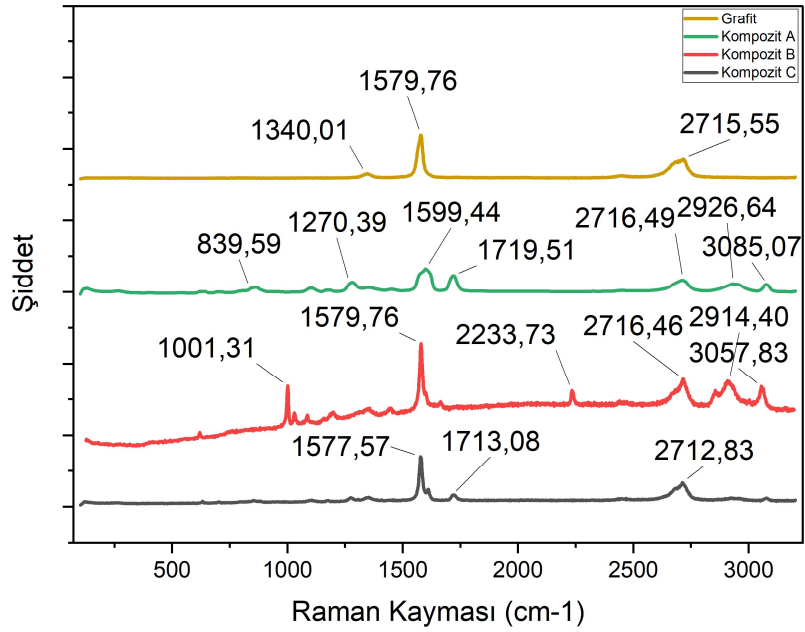
Pik genişlikleri dikkate alındığında, koşullandırılmış grafitin kristal yapısı sentetik grafitte göre daha düzensiz, ancak doğal grafitten daha organize bir form sergilemektedir. Bu durum, kristalinite seviyesinin doğal grafit içeren Kompozit B ile sentetik grafit içeren Kompozit A arasında bir geçiş gösterdiğini

düşündürmektedir. Sonuç olarak, Kompozit C, koşullandırılmış grafitin etkisiyle belirli düzeyde kristalin bir yapı sunarken, içerdiği ZnO, bakır ve kobalt fazları sayesinde fonksiyonel özelliklerinde farklılık göstermektedir.

Kompozit A, sentetik grafit içermesi nedeniyle en yüksek kristaliniteye sahip olup, en keskin ve dar piklere sahiptir. Bu, daha düzenli bir karbon yapısına ve yüksek elektriksel iletkenliğe işaret etmektedir. Kompozit B’de doğal grafit kullanımı, kristalin yapının daha düzensiz olmasına ve piklerin genişlemesine neden olmaktadır. Ayrıca, %10 çinko oksit içeriği nedeniyle ZnO pikleri en belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Kompozit C’de ise koşullandırılmış grafit kullanımı nedeniyle kristalinite seviyesi Kompozit A ile B arasında bir geçiş göstermektedir. Çinko oksit içeriğinin %5 olması, ZnO piklerinin Kompozit B’ye kıyasla daha düşük şiddette olmasına yol açmıştır. Bakır ve kobalt içeriği her üç kompozitte benzer olup, özellikle 50-56° aralığında benzer faz oluşumlarına neden olmuştur. Sonuç olarak, Kompozit A en yüksek kristaliniteye sahipken, Kompozit B amorf faz oranı açısından en yüksek değere sahiptir, Kompozit C ise ara bir yapı sergilemektedir.

3.2.2 Kompozit Malzemelerin Raman Spektrumları

Kompozit A, sentetik grafit içeren bir yapıya sahip olduğundan, Raman spektrumunda belirgin D-bandı ($\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$) ve G-bandı ($\sim 1576 \text{ cm}^{-1}$) gözlemlenmektedir. G-bandı, sp^2 bağlı karbon atomlarının titreşimlerinden kaynaklanmakta olup, grafitin kristalin yapısını temsil etmektedir. Sentetik grafitin yüksek düzenliliği nedeniyle, bu bant oldukça keskin ve yoğun gözlemlenmektedir. D-bandı (1350 cm^{-1}) ise grafit yapısındaki kusurlar ve düzensizliklerle ilişkilidir. Kompozit A’da D-bandının şiddeti nispeten düşük olup, bu durum grafit yapısının daha düzenli ve kusurlarının az olduğunu göstermektedir(Oraby et al. 2024).



Şekil 3. 10 Kompozit Malzemelerin Raman Spektrumları

Bunun yanı sıra, $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ ve 631 cm^{-1} bölgelerinde bazı ekstra bantlar bulunmaktadır. Bu bantlar, özellikle bakır ve kobaltın yapıya etkisiyle oluşan sekonder titreşim modlarıyla ilişkili olabilir (Afroz et al. 2023). Ayrıca, 2715 cm^{-1} ve 3074 cm^{-1} bölgelerinde ikinci dereceden Raman bantları tespit edilmiştir. Bu bantlar, grafitin elektron-foton etkileşimleri ile bağlantılı olup, yüksek kristaliniteye sahip karbon bazlı malzemelerde daha belirgin şekilde gözlemlenmektedir.

Genel olarak, kompozit A en yüksek kristaliniteye sahip olup, en düşük $I(D)/I(G)$ oranını göstermektedir. Bu da sentetik grafitin oldukça düzenli bir yapıya sahip olduğunu ve yüksek elektriksel iletkenlik sunduğunu doğrulamaktadır.

Kompozit B, doğal grafit içerdiğinden, Raman spektrumunda D-bandı ($\sim 1341 \text{ cm}^{-1}$) ve G-bandı ($\sim 1579 \text{ cm}^{-1}$) belirgin şekilde gözlemlenmektedir. G-bandı, grafitin sp^2 bağlı karbon atomlarının düzenli titreşimlerini temsil etmekte

olup, grafitin kristal yapısının göstergesidir. Ancak, Kompozit A'ya kıyasla G-bandının daha geniş olması, doğal grafitin sentetik grafitte göre daha düzensiz bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. D-bandı (1341 cm^{-1}), grafitteki kusurlarla ilişkilidir ve Kompozit B'de oldukça yüksek bir yoğunluk sergilemektedir, bu da doğal grafitin daha fazla yapısal düzensizlik içerdiğini ve kusur oranının yüksek olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, 1436 cm^{-1} , 1663 cm^{-1} ve 2233 cm^{-1} gibi ek bantlar tespit edilmiştir. Bu bantlar, çinko oksit ve kobalt katkılarının yapıya etkisiyle oluşan sekonder titreşim modlarıyla ilişkilendirilebilir(Shakti et al. 2024). Özellikle 2908 cm^{-1} , 2713 cm^{-1} ve 3054 cm^{-1} bölgelerindeki ikinci dereceden Raman bantları, karbon bazlı sistemlerde görülen çift fonon saçılmaları ile ilişkilidir. ZnO içeriğinin %10 olması nedeniyle, ZnO'nun tipik Raman pikleri de spektrumda gözlemlenmektedir.

I(D)/I(G) oranı, Kompozit A'ya kıyasla daha yüksektir, bu da doğal grafitin kusur seviyesinin daha fazla olduğunu ve daha düşük kristaliniteye sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Kompozit B daha amorf bir yapıya sahip olup, kristalinite açısından sentetik grafit içeren Kompozit A'dan daha düşük düzeyde bir yapı sergilemektedir.

Kompozit C, koşullandırılmış grafit içeren bir yapıya sahip olup, Raman spektrumunda D-bandı ($\sim 1354\text{ cm}^{-1}$) ve G-bandı ($\sim 1577\text{ cm}^{-1}$) belirgin şekilde gözlemlenmektedir. G-bandının genişliği ve yoğunluğu, grafitin kristal yapısının Kompozit A ve B arasında bir geçiş gösterdiğini işaret etmektedir. Sentetik grafit içeren Kompozit A'ya kıyasla daha geniş bir G-bandı gözlemlenmekte olup, doğal grafit içeren Kompozit B'ye kıyasla ise daha keskin bir yapıya sahiptir. Bu durum, koşullandırılmış grafitin kısmen düzenli, ancak doğal grafitte kıyasla daha az kusurlu bir yapı sunduğunu göstermektedir.

D-bandı ($\sim 1354\text{ cm}^{-1}$) yüksek yoğunluk göstermekte olup, I(D)/I(G) oranı Kompozit A'dan yüksek, ancak Kompozit B'den düşüktür. Bu, koşullandırılmış

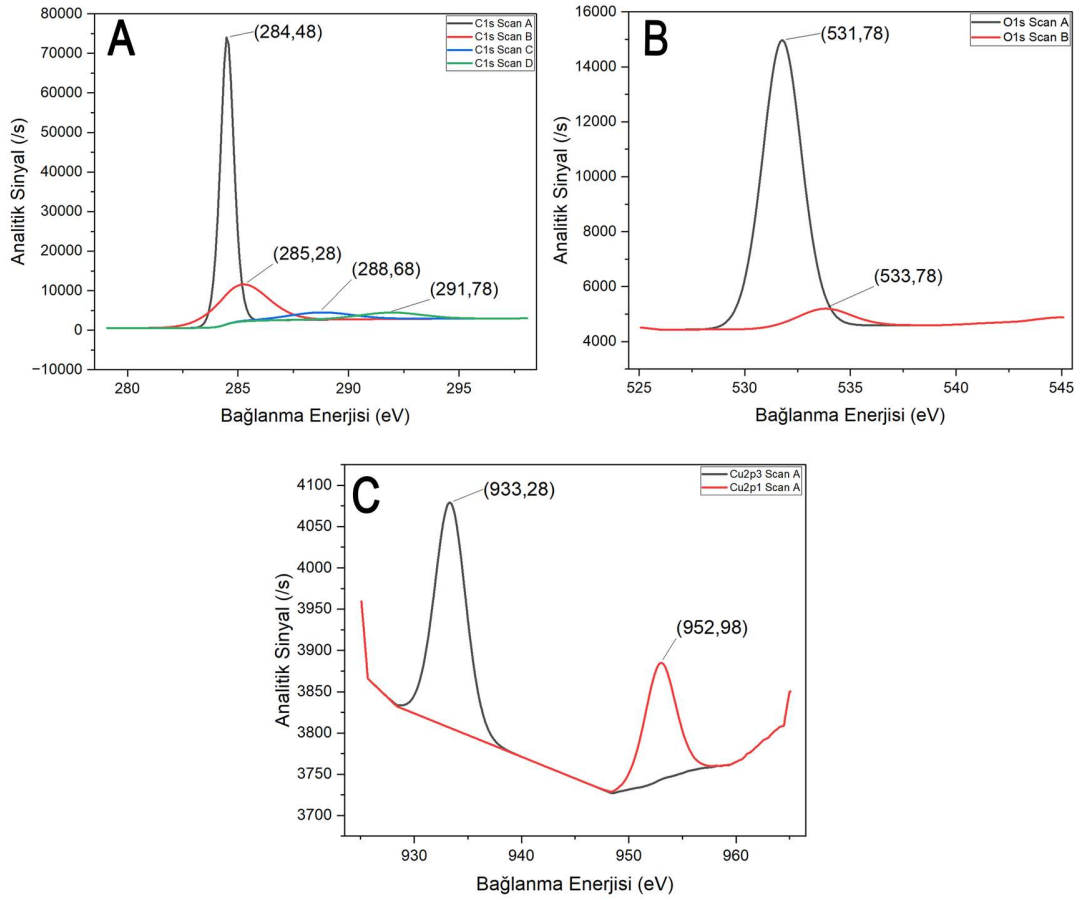
grafitin belirli bir derecede kusurlu olmasına rağmen, doğal grafitte kıyasla daha düzenli bir yapı kazandığını göstermektedir. 1611 cm^{-1} ve 1718 cm^{-1} bölgelerinde ek pikler gözlemlenmekte olup, bu pikler kobalt ve çinko oksit katkılarının varlığını doğrulayan titreşim modlarıyla ilişkilendirilebilir.

Ayrıca, 2712 cm^{-1} ve 2908 cm^{-1} bölgelerinde çift fonon saçılmaları kaynaklı ikinci dereceden Raman bantları tespit edilmiştir. Çinko oksit içeriğinin Kompozit B'ye kıyasla daha düşük (%5) olması nedeniyle, ZnO ile ilişkilendirilen Raman pikleri daha düşük yoğunlukta gözlemlenmiştir.

Kompozit A, B ve C karşılaştırıldığında, Kompozit A en yüksek kristaliniteye, en düşük $I(D)/I(G)$ oranına ve en keskin G-bandına sahip olup, en düzenli grafit yapısını sunmaktadır. Kompozit B, doğal grafit içermesi nedeniyle en yüksek kusur oranına ve amorf yapıya sahiptir, bu da iyon difüzyonunu artırabilir ancak elektriksel iletkenliği azaltabilir. Kompozit C, koşullandırılmış grafit içermesiyle ara bir yapı sergilemekte, kristalinite açısından B'den daha iyi, ancak A'dan daha düşük bir düzeyde bulunmaktadır.

3.2.3 Kompozit Malzemelerin XPS Spektrumları

XPS spektrumu, Kompozit A'nın yüzey kimyasal bileşimini ve bağlanma enerjilerini incelemek için kullanılmıştır. Şekil 3.12A'da $C1s$ spektrumu, en belirgin pik olarak $284,48\text{ eV}$ 'de yoğun bir sinyal vermektedir. Bu pik, sp^2 bağlı karbon atomlarına karşılık gelmekte olup, grafitik yapının varlığını doğrulamaktadır. $285,28\text{ eV}$, $288,68\text{ eV}$ ve $291,78\text{ eV}$ bölgelerinde gözlenen ek pikler, oksitlenmiş karbon türleri ($C-O$, $C=O$ ve $O-C=O$ bağları) ile ilişkilendirilebilir. Bu durum, yüzeyde hafif oksidasyonun meydana geldiğini düşündürmektedir.



Şekil 3. 11 Kompozit A Malzemesinin XPS Spektrumu

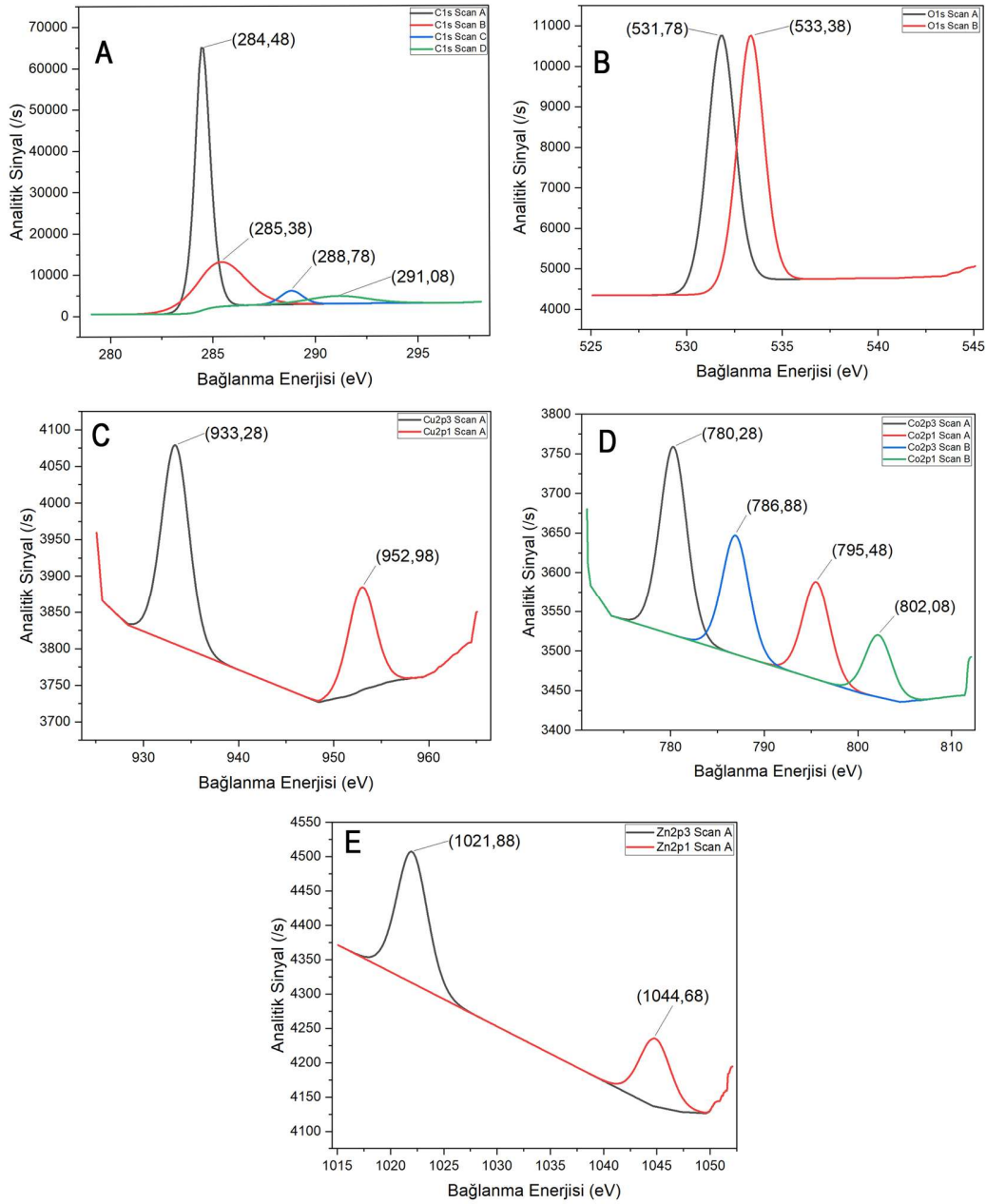
Şekil 3.12B'de O1s spektrumu, 531,78 eV'de belirgin bir pik göstermektedir. Bu pik, karbon yapısındaki oksijen içeren fonksiyonel gruplar veya ZnO bileşeninden kaynaklanabilir. 533,78 eV'de gözlenen daha düşük şiddetli pik, yüzeyde bulunan organik oksijen bileşikler veya su adsorpsiyonu ile ilişkili olabilir.

Şekil 3.12C'de Cu2p spektrumu, 933,28 eV ve 952,98 eV bölgelerinde yoğun pike sahiptir, bu da Cu^{2+} iyonlarının varlığını desteklemektedir. Bakır içeriği nedeniyle yüzeydeki bakır oksit formlarının bulunduğu anlaşılmaktadır. Pik pozisyonları, CuO ve Cu_2O bileşiklerinin az miktar varlığıyla

örtüşmektedir(Torres-Ochoa et al. 2023), bu da malzemenin elektriksel özelliklerine ve yüzey reaktivitesine katkıda bulunabilir.

Sonuç olarak, XPS analizi, Kompozit A'nın grafit içeriğiyle yüksek karbon oranına sahip olduğunu, oksijen içeriğinin düşük seviyede bulunduğunu ve bakırın oksitlenmiş formda varlık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, elektriksel iletkenlik ve yüzey etkileşimleri açısından olumlu özellikler sunduğunu göstermektedir.

XPS analizi, Kompozit B'nin yüzey kimyasal bileşimini ve elementel bağlanma durumlarını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.13A (C1s spektrumu), 284,48 eV'de yoğun bir ana pik göstermektedir, bu pik sp^2 bağlı karbon atomlarına karşılık gelmekte olup, grafitik yapı ile uyumludur. 285,38 eV, 288,78 eV ve 291,08 eV bölgelerinde görülen ek pikler, karbon-oksijen bağları (C–O, C=O ve O–C=O) ile ilişkilendirilmektedir. Kompozit A ile karşılaştırıldığında, oksijen içeren fonksiyonel grupların varlığı daha belirgin olup, bu durum yüzeyde daha fazla oksidasyonun gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 3. 12 Kompozit B Malzemesinin XPS Spektrumu

Şekil 3.13B (O1s spektrumu), 531,78 eV ve 533,38 eV’de iki belirgin pik içermektedir. 531,78 eV’deki pik, karbon bazlı oksijen içeren gruplar ve metal oksitlerle ilişkilendirilebilirken, 533,38 eV’deki ikinci pik, organik oksijen bileşikleri veya ZnO’nun varlığıyla bağlantılı olabilir. Bu piklerin yoğunluğu, yüzeyde oksitlenmiş türlerin bulunduğunu göstermektedir.

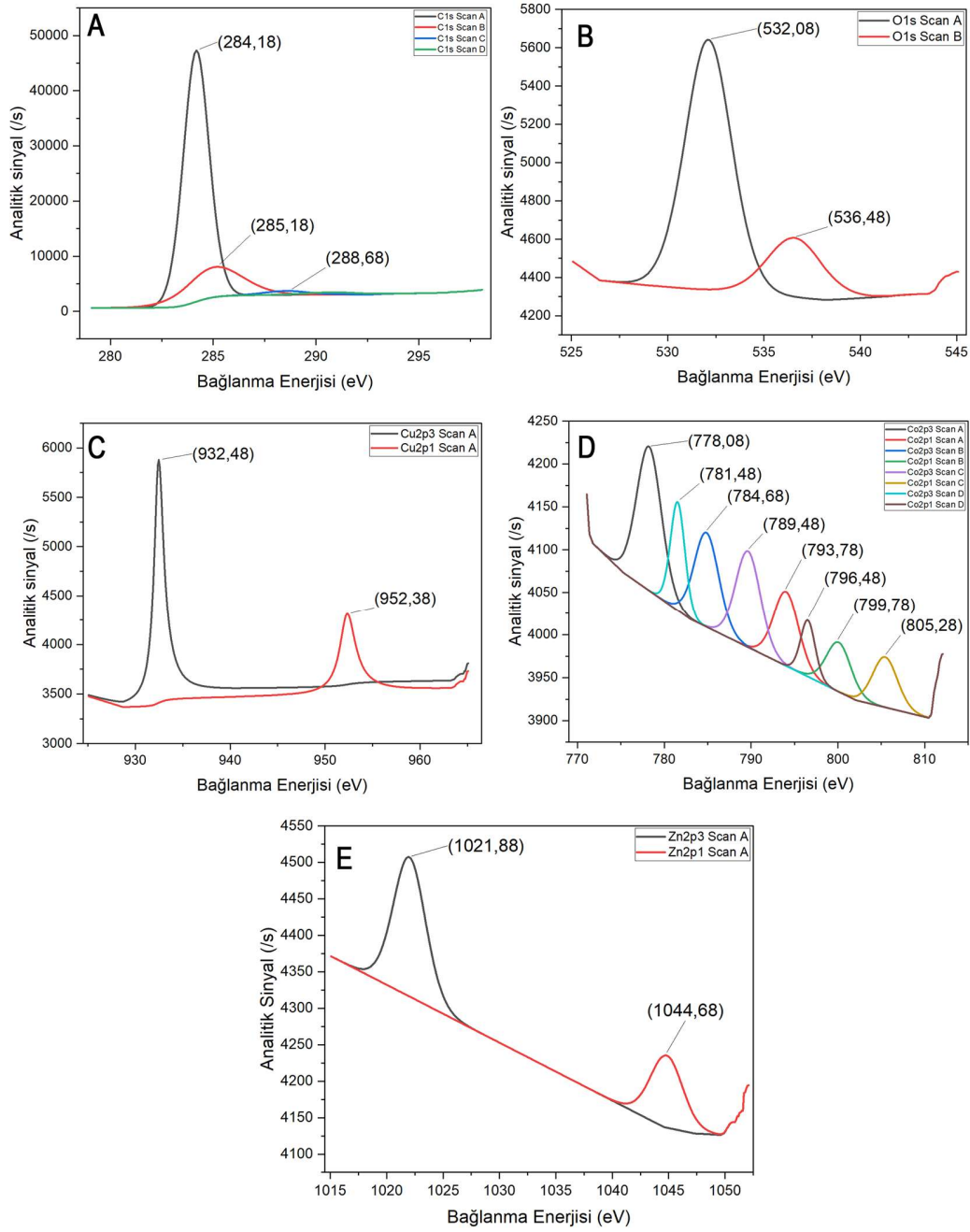
Şekil 3.13C (Cu2p spektrumu), 933,28 eV ve 952,98 eV’de iki ana pik içermekte olup, bu bantlar Cu^{2+} iyonlarına karşılık gelmektedir. Bu sonuçlar, Kompozit A ile benzer şekilde CuO ve Cu_2O fazlarının varlığını doğrulamaktadır.

Şekil 3.13D (Co2p spektrumu), 780,28 eV, 786,88 eV, 795,48 eV ve 802,08 eV’de pikler göstermektedir. Bu bantlar, Co^{2+} ve Co^{3+} türlerinin yüzeyde bulunduğunu desteklemektedir. Kobalt içeriğinin varlığı, yüzeyde geçiş metallerine bağlı oksitlenme süreçlerinin meydana geldiğini göstermektedir(Anwar et al. 2022).

Şekil 3.13E (Zn2p spektrumu), 1021,88 eV ve 1044,68 eV’de belirgin pikler içermekte olup, bunlar ZnO bileşiği ile uyumludur. Kompozit A’dan farklı olarak, Kompozit B’nin içerdiği çinko oksit miktarı daha yüksektir (%10), dolayısıyla ZnO’ya ait XPS sinyalleri daha belirgin ve güçlüdür.

Genel olarak, Kompozit B’nin yüzeyinde oksitlenmiş karbon yapıları ve metal oksitlerin varlığı daha belirgin olup, özellikle ZnO içeriğinin yüksek olması nedeniyle ZnO’ya ait sinyaller güçlüdür. Bu durum, malzemenin yüzey reaktivitesini artırabilir, ancak oksitlenmiş yapıların elektriksel iletkenliği bir miktar düşürebileceği de göz önünde bulundurulmalıdır.

XPS analizi, Kompozit C’nin yüzey kimyasal bileşimini ve bağlanma enerjilerini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7A (C1s spektrumu), 284,18 eV’de yoğun bir ana pik içermekte olup, bu pik sp^2 bağlı karbon atomlarına karşılık gelmektedir ve grafitik yapı ile uyumludur. 285,18 eV ve 288,68 eV bölgelerinde gözlenen ek pikler, karbon-oksijen bağları (C–O, C=O) ile ilişkilidir. Kompozit A ve B ile kıyaslandığında, oksijen içeren karbon türlerinin daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, koşullandırılmış grafitin yüzey oksidasyonunun nispeten düşük olduğunu düşündürmektedir.



Şekil 3. 13 Kompozit C Malzemesinin XPS Spektrumu

Şekil 3.14B (O1s spektrumu), 532,08 eV ve 536,48 eV’de iki belirgin pik içermektedir. 532,08 eV’deki pik, karbon bazlı oksijenli gruplar ve metal oksitler ile ilişkilendirilebilirken, 536,48 eV’deki pik, organik oksijen türleriyle bağlantılı

olabilir. Kompozit B'ye kıyasla oksijen içeriğinin daha düşük olması, malzemenin yüzeyde daha az oksidasyona uğradığını göstermektedir.

Şekil 3.14C (Cu2p spektrumu), 932,48 eV ve 952,38 eV bölgelerinde belirgin pikler içermekte olup, Cu^{2+} iyonlarının varlığını doğrulamaktadır. Bakır içeriği, Kompozit A ve B ile benzer olup, CuO ve Cu_2O fazlarının bulunduğunu desteklemektedir.

Şekil 3.14D (Co2p spektrumu), 778,08 eV, 781,48 eV, 784,68 eV, 789,48 eV, 793,78 eV, 796,48 eV, 799,78 eV ve 805,28 eV'de birçok pik içermektedir. Bu geniş pik dağılımı, Co^{2+} ve Co^{3+} iyonlarının bir arada bulunduğunu göstermektedir. Kobaltın bu oksidasyon durumları, yüzeydeki aktif bölgelerin kimyasal etkileşim mekanizmalarına katkıda bulunabilir.

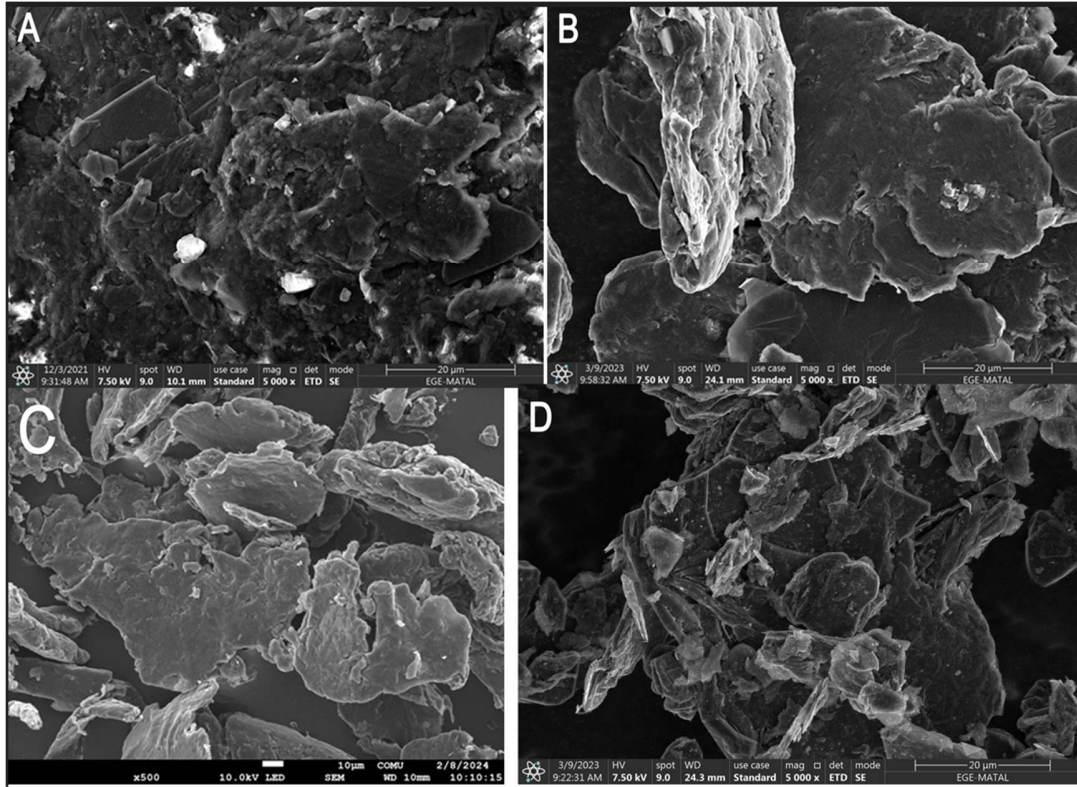
Şekil 3.14E (Zn2p spektrumu), 1021,88 eV ve 1044,68 eV bölgelerinde iki belirgin pik içermekte olup, ZnO varlığını desteklemektedir. Kompozit B'ye kıyasla daha düşük çinko oksit içeriği (%5) nedeniyle, ZnO'ya ait sinyaller daha düşük yoğunlukta gözlemlenmiştir.(Kinra et al. 2022)

Genel olarak, Kompozit C'nin XPS verileri, yüzeydeki oksijen içeriğinin Kompozit B'ye göre daha düşük olduğunu, ancak kobaltın farklı oksidasyon durumlarında bulunduğunu ve ZnO içeriğinin nispeten düşük olduğunu göstermektedir. Yüzeydeki oksitlenmiş yapıların az olması, elektriksel iletkenliği artırırken, kobaltın çoklu oksidasyon durumları malzemenin katalitik aktivitesini artırabilir.

3.2.4 Kompozit Malzemelerin SEM Görüntüleri

Kompozit A'nın SEM görüntüsü $5.000\times$ büyütmede incelendiğinde, daha kompakt, yoğun ve düzensiz bir morfolojiye sahip olduğu gözlemlenmektedir. Sentetik grafit içeren bu yapı, grafit partiküllerinin homojen şekilde dağıldığını, ancak yüzeyin gözeneksiz ve sıkı bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca,

parlak bölgeler farklı bileşenlerin yüzeyde birikimini veya oksitlenmiş fazları temsil ediyor olabilir. Malzemenin sıkı yapısı, yüksek mekanik dayanım ve iyi elektriksel iletkenlik sunabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 3. 14 Kompozit Malzemelerin ve Grafitin SEM Görüntüleri

Kompozit B'nin SEM görüntüsü, doğal grafitin varlığı nedeniyle daha katmanlı ve tabakalı bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Grafit partikülleri arasındaki boşluklar daha belirgin olup, gevşek bir yapı oluşmuştur. Bu durum, doğal grafitin sentetik grafitte kıyasla daha düzensiz bir dağılım sergilediğini ve parçacıkların daha az sıkıştığını göstermektedir. Ayrıca, malzemenin gözenekli yapısı, iyon difüzyonu için avantaj sağlayabilir, ancak elektriksel iletkenlik açısından dezavantaj yaratabilir.

Kompozit C'nin SEM görüntüsü daha büyük ölçekli bir büyütmede (500×) çekilmiş olup, grafit partiküllerinin iyi organize olmuş, tabakalı ve büyük yüzey

alanına sahip bir yapı sergilediğini göstermektedir. Koşullandırılmış grafitin etkisiyle parçacıklar arasında belirli bir düzen olduğu, ancak tam anlamıyla sıkı bir yapı oluşmadığı gözlemlenmektedir. Bu yapı, elektriksel iletkenliği artırabilecek geniş temas yüzeylerine sahip olmasına rağmen, doğal grafit içeren Kompozit B'ye kıyasla daha sıkı bir morfoloji göstermektedir.

Aralında bir kıyas yapmak gerekirse;

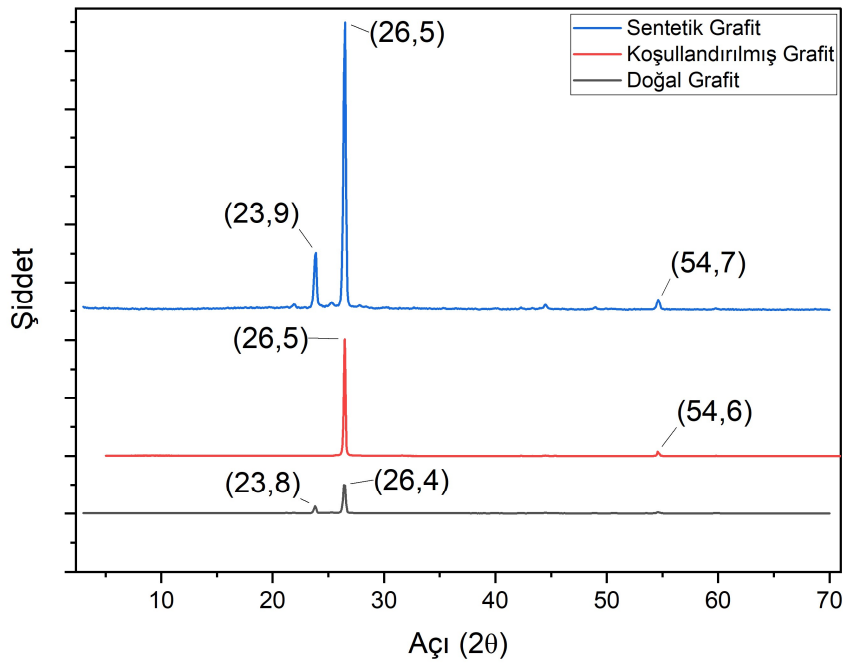
- Kompozit A, en kompakt ve yoğun yapıya sahip olup, mekanik dayanımı ve elektriksel iletkenliği en iyi olması beklenen malzemedir. Ancak, iyon hareketliliği açısından en kısıtlı yapıyı sunabilir.
- Kompozit B, doğal grafit içerdiği için en düzensiz ve gözenekli yapıya sahip olup, iyon difüzyonu için avantaj sağlayabilir ancak mekanik stabilitesi ve elektriksel iletkenliği Kompozit A'dan düşük olabilir.
- Kompozit C, koşullandırılmış grafit içermesi nedeniyle daha organize, geniş yüzey alanına sahip ve dengeli bir yapı sergilemektedir. Kompozit B'den daha iyi elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım sunarken, Kompozit A'ya kıyasla iyon taşınımı açısından daha avantajlı olabilir.

Bu sonuçlara göre, lityum iyon pilleri için anot malzemesi olarak Kompozit C, hem iyon difüzyonu hem de elektriksel iletkenlik açısından en uygun aday olabilir.

3.2.5 Grafit Malzemelerinin XRD Deseni

X-ışını kırınımı (XRD) desenleri, koşullandırılmış grafit ve doğal grafitin kristalin yapısını karşılaştırmak amacıyla Şekil 3.16'da incelenmiştir. Her iki malzemenin de karakteristik (002) düzlemine karşılık gelen ana pikleri yaklaşık $26,4^\circ$ (2θ) civarında gözlemlenmiştir (Martin et al. 2023). Ancak, koşullandırılmış grafitte bu pik daha keskin ve dar bir yapıya sahipken, doğal grafitte geniş ve düşük

yoğunluklu bir pik elde edilmiştir. Bu durum, koşullandırılmış grafitin daha yüksek kristaliniteye ve daha düzenli grafit katmanlarına sahip olduğunu göstermektedir. Doğal grafitteki daha geniş (002) piki, tabaka arası düzensizliklerin ve kusurların daha fazla olduğunu, dolayısıyla daha yüksek amorf faz oranına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. 15 Doğal Grafit, Sentetik Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin XRD Deseni

Bunun yanı sıra, doğal grafitte 23,8° civarında ek bir pik tespit edilmiştir. Bu pik, muhtemelen grafitin kristal yapısındaki düzensizlikler, bozuk karbon fazları veya oksitlenmiş karbon türlerinden kaynaklanmaktadır. Koşullandırılmış grafitte bu pik gözlemlenmemiştir, bu da malzemenin yüzey işlemleriyle birlikte daha düzenli bir yapıya ulaştığını göstermektedir. Benzer şekilde, her iki grafitte de yaklaşık 54,6° civarında (004) düzlemine karşılık gelen bir pik gözlemlenmiştir, ancak koşullandırılmış grafitte bu pik daha keskin ve yoğun olarak ortaya

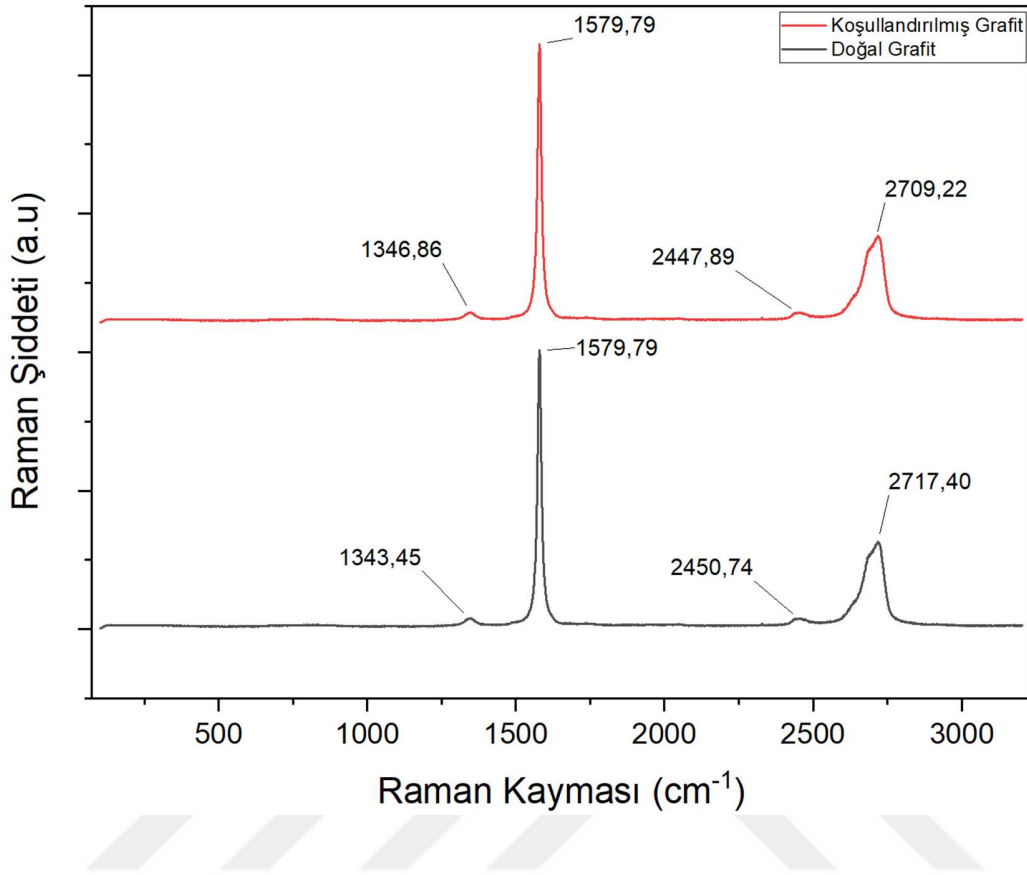
çıkıştır. (004) düzleminin daha belirgin olması, grafit katmanlarının daha iyi hizalanmış ve düzenlenmiş olduğuna işaret etmektedir.

Elde edilen XRD sonuçları değerlendirildiğinde, koşullandırılmış grafitin kristalin yapısının doğal grafitte kıyasla daha düzenli olduğu ve kristalinite seviyesinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, grafit tabakalarının daha iyi hizalanması ve aralarındaki düzensizliklerin azalması nedeniyle elektriksel ve ısı iletkenliğin artmasına katkı sağlayabilir. Buna karşılık, doğal grafitte gözlemlenen daha geniş pike ek olarak, düşük açılardaki ilave piklerin varlığı, malzemenin daha fazla kusur içerdiğini ve tabakalar arası düzensizliklerin arttığını göstermektedir. Kusurların ve amorf faz miktarının fazla olması, iyon depolama kapasitesini artırabilir, ancak aynı zamanda iletkenlik değerlerini düşürebilir.

Bu bağlamda, lityum iyon pilleri için anot malzemesi olarak değerlendirildiğinde, koşullandırılmış grafit daha uygun bir yapı sunmaktadır. Yüksek kristalinite, anot malzemesinde düşük iç direnç ve uzun çevrim ömrü açısından avantaj sağlarken, doğal grafitin daha amorf yapısı, hızlı şarj-deşarj döngülerinde belirli avantajlar sunabilir. Ancak, yüksek iletkenlik ve yapısal stabilitenin kritik olduğu uygulamalarda, koşullandırılmış grafitin tercih edilmesi daha uygun olacaktır.

3.2.6 Grafit Malzemelerin Raman Spektrumları

Raman spektroskopisi ile elde edilen spektrumlar, doğal grafit ve koşullandırılmış grafitin yapısal kusurlarını, kristalinite seviyesini ve karbon bağlarının düzenliliğini değerlendirmek için analiz edilmiştir. Her iki malzemede de grafit yapısına özgü D-bandı ($\sim 1343\text{-}1346\text{ cm}^{-1}$) ve G-bandı ($\sim 1579\text{ cm}^{-1}$) belirgin şekilde gözlemlenmektedir.



Şekil 3. 16 Doğal Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin Raman Spektrumu

Koşullandırılmış grafit (kırmızı spektrum), D-bandı ($\sim 1346 \text{ cm}^{-1}$) ile G-bandı ($\sim 1579 \text{ cm}^{-1}$) arasında daha düşük bir $I(D)/I(G)$ oranına sahiptir, bu da grafitin daha yüksek kristaliniteye sahip olduğunu ve daha düzenli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Doğal grafitte (siyah spektrum), D-bandı ($\sim 1343 \text{ cm}^{-1}$) daha belirgin ve geniştir, bu da doğal grafitin yapısal kusurlarının ve düzensizliklerinin daha fazla olduğunu göstermektedir. G-bandı ($\sim 1579 \text{ cm}^{-1}$) her iki grafitte de gözlemlenmekte olup, grafitin sp^2 bağlı karbon yapısını doğrulamaktadır. Ancak, doğal grafitte G-bandının hafifçe genişlediği görülmektedir, bu da grafit tabakalarının daha düzensiz hizalandığını ve kristalin yapının kısmen bozulduğunu düşündürmektedir (Carolina Sparavigna 2024).

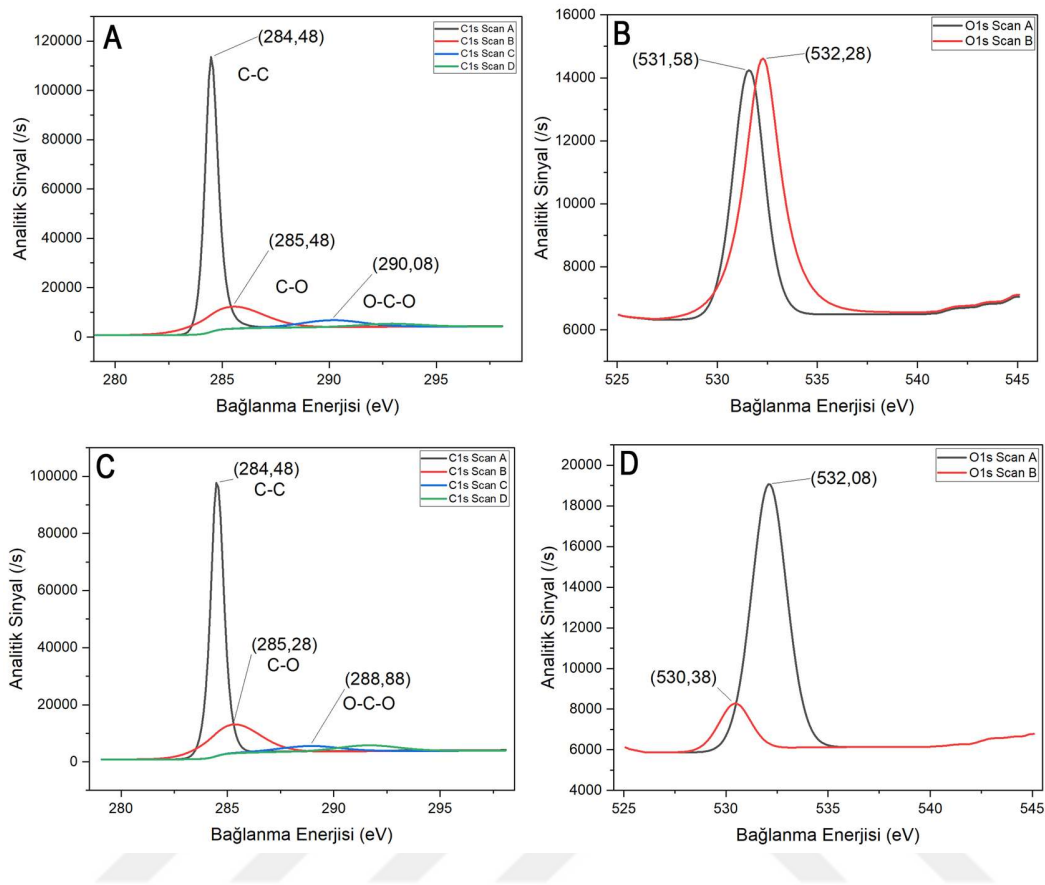
Ayrıca, $2717\text{-}2709 \text{ cm}^{-1}$ bölgelerinde ikinci dereceden (2D) Raman bantları gözlemlenmiştir. Koşullandırılmış grafitte 2D bandının daha keskin ve yoğun

olduğu, doğal grafitte ise daha düşük yoğunluklu ve geniş bir 2D bandı bulunduğu görülmektedir. Bu durum, koşullandırılmış grafitin daha iyi düzenlenmiş ve katman yapısı korunmuş bir grafit türü olduğunu desteklemektedir. Bununla birlikte, 2450 cm^{-1} ve 2447 cm^{-1} bölgelerinde gözlemlenen düşük yoğunluklu pikler, elektron-fonon etkileşimleri ile ilişkilendirilebilir ve malzemenin işlem görme sürecine bağlı olarak değişebilir.

Genel olarak, koşullandırılmış grafit, daha düşük I(D)/I(G) oranı, daha keskin 2D bandı ve belirgin G-bandı ile yüksek kristalinite sergilemektedir. Bu yapı, yüksek elektriksel iletkenlik ve mekanik stabilite sunarak lityum iyon pilleri için daha uygun bir anot malzemesi olabileceğini göstermektedir. Buna karşılık, doğal grafitte daha belirgin bir D-bandı ve genişlemiş bant yapısı gözlemlenmiş olup, kusur oranının yüksek olduğunu ve iyon depolama kapasitesinin koşullandırılmış grafitte kıyasla daha iyi olabileceğini düşündürmektedir. Ancak, iletkenlik ve yapısal stabilite açısından koşullandırılmış grafit daha avantajlı görünmektedir.

3.2.7 Grafit Malzemelerin XPS Spektrumları

X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizleri, doğal grafit (Şekil 3.11A ve B) ile koşullandırılmış grafit (Şekil 3.11C ve D) arasındaki yüzey kimyasal bileşimini ve oksitlenme durumlarını karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. C1s ve O1s spektrumları incelenerek, karbon bağlanma türleri ve oksijen içeriğindeki farklılıklar değerlendirilmiştir.



Şekil 3. 17 Doğal Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin XPS Spektrumları

Doğal grafit (Şekil 3.18A) ve koşullandırılmış grafit (Şekil 3.18C) için C1s spektrumu incelendiğinde, her iki grafitte de 284,48 eV’de güçlü bir ana pik gözlemlenmektedir, bu pik sp^2 hibritleşmiş C=C bağlarına karşılık gelmekte ve grafit yapısının varlığını doğrulamaktadır. Bunun yanı sıra, doğal grafitte 285,48 eV (C–O) ve 290,08 eV (O–C=O) bağlanma enerjilerinde daha belirgin pikler tespit edilmiştir, bu da oksitlenmiş karbon türlerinin doğal grafitte daha fazla olduğunu göstermektedir.

Koşullandırılmış grafitte (Şekil 3.18C), oksijen içeren fonksiyonel gruplara (C–O, O–C=O) karşılık gelen piklerin yoğunluğu daha düşüktür. Özellikle O–C=O pikinin bağlanma enerjisi (~288,88 eV) doğal grafitte kıyasla daha zayıftır, bu da koşullandırılmış grafitte oksitlenmiş karbon türlerinin daha az olduğunu ve

yüzeyde oksijen içeriğinin düşük seviyede bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, koşullandırılmış grafitin daha yüksek kristaliniteye ve daha az yüzey oksitlenmesine sahip olduğunu desteklemektedir.

O1s spektrumları incelendiğinde, doğal grafitte (Şekil 3.18B) oksijen piklerinin bağlanma enerjisi 531,58 eV ve 532,28 eV olarak tespit edilmiştir. Bu pikler sırasıyla oksitlenmiş karbon türleri (C=O, C–O) ve yüzeyde bulunan oksijen içeriği ile ilişkilidir. Oksijen içeriğinin daha fazla olması, doğal grafitin yüzeyinde daha fazla oksitlenme meydana geldiğini ve daha fazla kusur içerdiğini göstermektedir.

Koşullandırılmış grafitte (Şekil 3.18D), oksijen piklerinin bağlanma enerjisi 530,38 eV ve 532,08 eV olarak belirlenmiştir. Doğal grafitte kıyasla oksijen sinyalinin daha düşük olması, koşullandırılmış grafitin daha az oksijen içeren fonksiyonel gruplara sahip olduğunu ve yüzeydeki oksitlenmenin büyük ölçüde azaldığını göstermektedir (Blume et al. 2015).

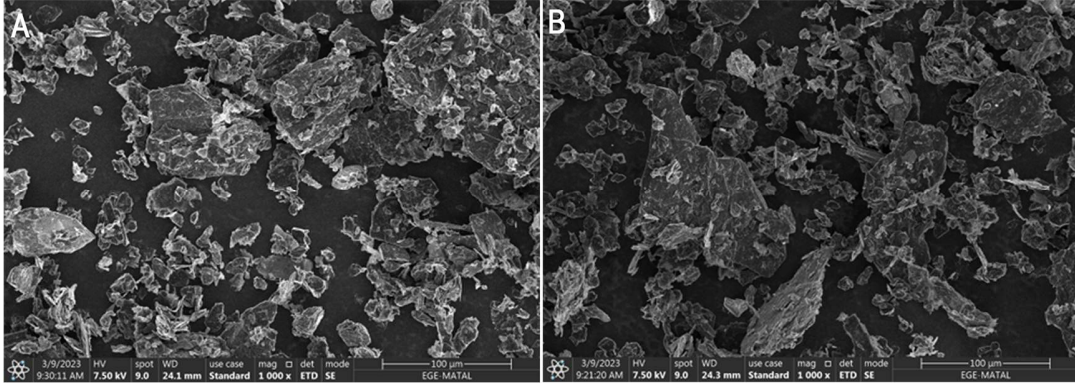
Genel olarak doğal grafit, oksitlenmiş karbon türlerini (C–O, O–C=O) daha fazla içermekte olup, yüzeydeki oksijen içeriği koşullandırılmış grafitte kıyasla daha yüksektir. Bu durum, yüzeyde daha fazla kusur ve düzensizlik olduğunu göstermektedir. Koşullandırılmış grafit, oksitlenmiş karbon türlerinin daha düşük yoğunlukta olması ve oksijen içeriğinin azalması nedeniyle daha düzenli bir grafit yapısı sergilemektedir. Kristalin yapının daha iyi korunması, iletkenlik ve kimyasal stabilite açısından avantaj sağlayabilir. Doğal grafit, oksijen içeriği yüksek olduğu için iyon depolama açısından daha fazla aktif bölgeye sahip olabilir, ancak bu durum elektriksel iletkenliği olumsuz yönde etkileyebilir. Koşullandırılmış grafitte daha düşük oksijen içeriği ve daha az kusur bulunması, daha yüksek iletkenlik ve termal stabilite sağlamaktadır, bu da onu lityum iyon pilleri için daha uygun bir anot malzemesi yapabilir.

Sonuç olarak, XPS analizleri koşullandırılmış grafitin daha düşük yüzey oksidasyonuna sahip olduğunu ve daha kararlı bir grafit yapısı sunduğunu ortaya

koymaktadır. Lityum iyon pilleri gibi yüksek iletkenlik ve uzun çevrim ömrü gerektiren uygulamalarda koşullandırılmış grafit daha avantajlı bir seçenek olabilir.

3.2.8 Grafit Malzemelerin SEM Görüntüleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, doğal grafit (Şekil A) ve koşullandırılmış grafit (Şekil B) için yüzey morfolojisini karşılaştırmak amacıyla incelenmiştir. 1000× büyütme ile alınan bu görüntüler, parçacıkların boyutu, tabakalanma yapısı ve yüzey pürüzlülüğü hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 3. 18 Doğal Grafit ve Koşullandırılmış Grafitin SEM Görüntüleri

Doğal grafit (Şekil 3.19A), tipik olarak tabakalı ve büyük ölçekli parçacıklardan oluşmakta olup, parçacıkların yüzeyi pürüzsüz ve kompakt bir yapı sergilemektedir. Parçacık boyutları oldukça değişken olmakla birlikte, grafit tabakalarının büyük ölçüde bir arada kaldığı ve ayrışmanın minimum seviyede olduğu görülmektedir. Bu yapı, doğal grafitin daha yüksek kristaliniteye sahip olduğunu ve daha az kusurlu olduğunu desteklemektedir. Bununla birlikte, parçacıklar arasındaki etkileşimlerin sınırlı olması nedeniyle, elektrokimyasal reaksiyonlarda düşük yüzey alanı sunabileceği ve iyon difüzyonunun sınırlı olabileceği öngörülmektedir.

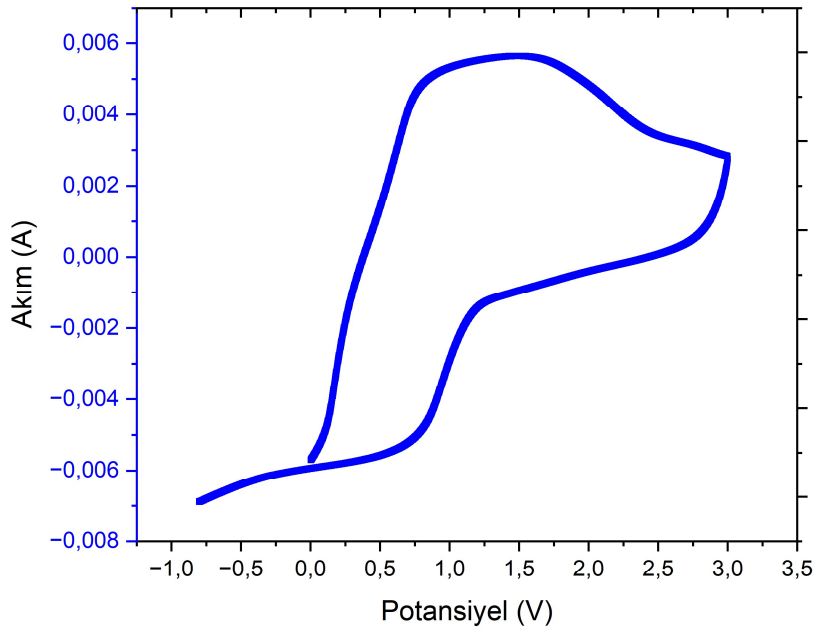
Koşullandırılmış grafit (Şekil 3.19B), daha küçük ve daha parçalanmış tabakalar içeren bir yapı sergilemektedir. Görüntüde, grafit tabakalarının daha fazla ayrıştığı, düzensiz kenarlara sahip olduğu ve yüzeyin doğal grafitte kıyasla daha pürüzlü olduğu gözlemlenmektedir. Bu yapı, koşullandırma işlemleri sonucunda grafit tabakalarının kısmen bozulduğunu ve daha fazla kusur oluştuğunu göstermektedir. Parçalanmış yapı, daha büyük bir yüzey alanı sağlayarak iyonların katmanlar arasına daha kolay nüfuz etmesine olanak tanıyabilir, bu da elektrokimyasal performans açısından belirli avantajlar sunabilir. Ancak, bu yapısal değişiklikler, mekanik dayanımı ve grafitin kristalin yapısını kısmen azaltabilir.

Genel olarak, doğal grafit büyük ve kompakt tabakalardan oluşan, düşük yüzey alanına sahip bir morfolojiye sahipken, koşullandırılmış grafit daha parçalanmış, düzensiz ve daha geniş yüzey alanı sunan bir yapı sergilemektedir. Elektrokimyasal uygulamalar açısından değerlendirildiğinde, koşullandırılmış grafit, iyon depolama kapasitesini artırma potansiyeline sahipken, doğal grafit daha yüksek mekanik stabilite ve iletkenlik sağlayabilir. Lityum iyon pilleri için anot malzemesi olarak kullanımı düşünüldüğünde, koşullandırılmış grafitin daha geniş yüzey alanı ve daha fazla aktif bölge sunması nedeniyle daha avantajlı bir yapı sunduğu söylenebilir.

3.3 Kompozit Malzemelerin Elektrokimyasal Karakterizasyonu

3.3.1 Kompozit A Malzemesinin Elektrokimyasal Karakterizasyonu

Kompozit A malzemesinin döngüsel voltammetri voltammogramı ve şarj-deşarj sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. 19 Kompozit A Malzemesinin Döngüsel Voltammogramı

Döngüsel voltammogram (CV) verilerine dayanarak, PBT (polibütilen tereftalat) matrisinde %30 sentetik grafit ve %10 bakır (Cu) içeren kompozit malzeme, belirgin bir elektrokimyasal davranış sergilemektedir. Voltammogramda

görülen tersinir akım-potansiyel profili, malzemenin hem indirgenme hem de yükseltgenme reaksiyonları gerçekleştirebildiğini göstermektedir.

Grafikte, 0 V civarından itibaren başlayan akım artışı, malzemenin elektrokimyasal aktif bölgelerindeki bir indirgenme reaksiyonunu temsil etmektedir.

Yükseltgenme sırasında gözlemlenen pik, malzemenin bakır içeriği ile ilişkili olarak elektron transferine duyarlı bir süreç olduğunu göstermektedir. Sentetik grafit, geniş bir potansiyel aralığında stabilize bir elektriksel iletkenlik sağlayarak bu sürece

Yükseltgenme sırasında gözlemlenen pik, malzemenin bakır içeriği ile ilişkili olarak elektron transferine duyarlı bir süreç olduğunu göstermektedir. Sentetik grafit, geniş bir potansiyel aralığında stabilize bir elektriksel iletkenlik sağlamaktadır.

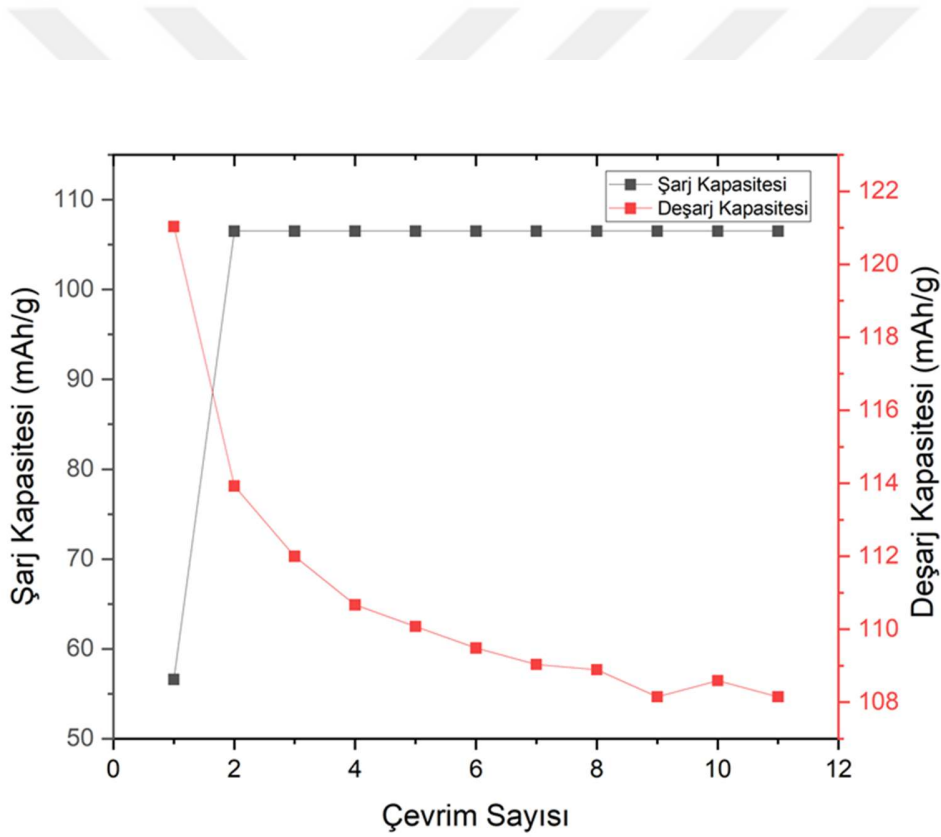
Bu durum, grafit parçacıklarının yüksek yüzey alanı ve iletkenliği ile açıklanabilmektedir.

Voltammogram eğrisinin genişliği ve akım değerlerinin büyüklüğü, kompozit malzemenin yüksek bir kapasitif davranış sergilediğine işaret

etmektedir. Bu sonuç, malzemenin enerji depolama uygulamaları için uygun olabileceğini düşündürmektedir.

Ayrıca, bakırın mevcut olması, redoks çiftlerinin etkinliğini artırarak elektrokimyasal tepkime kinetiklerini iyileştirmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen döngüsel voltammogram verisi, PBT bazlı bu kompozitin hem yüksek iletkenliğe sahip olduğunu hem de potansiyel olarak enerji depolama veya katalitik uygulamalarda kullanılabilirliğini işaret etmektedir.



Şekil 3. 20 Kompozit A Malzemesinin Şarj-Deşarj Ölçümleri

Şarj-deşarj grafiği, PBT (%30 sentetik grafit ve %10 Cu) kompozit malzemesinin elektrokimyasal enerji depolama performansını göstermektedir. İlk

döngüde gözlemlenen yüksek deşarj kapasitesi, malzemenin başlangıçta oldukça aktif bir iyon depolama davranışı sergilediğini göstermektedir. Ancak, bu kapasite, izleyen döngülerde hızlı bir şekilde azalmaktadır ve bu durum, elektrot malzemesi ile elektrolit arasındaki tepkimeler nedeniyle kapasite kaybını göstermektedir(Liao et al. 2024).

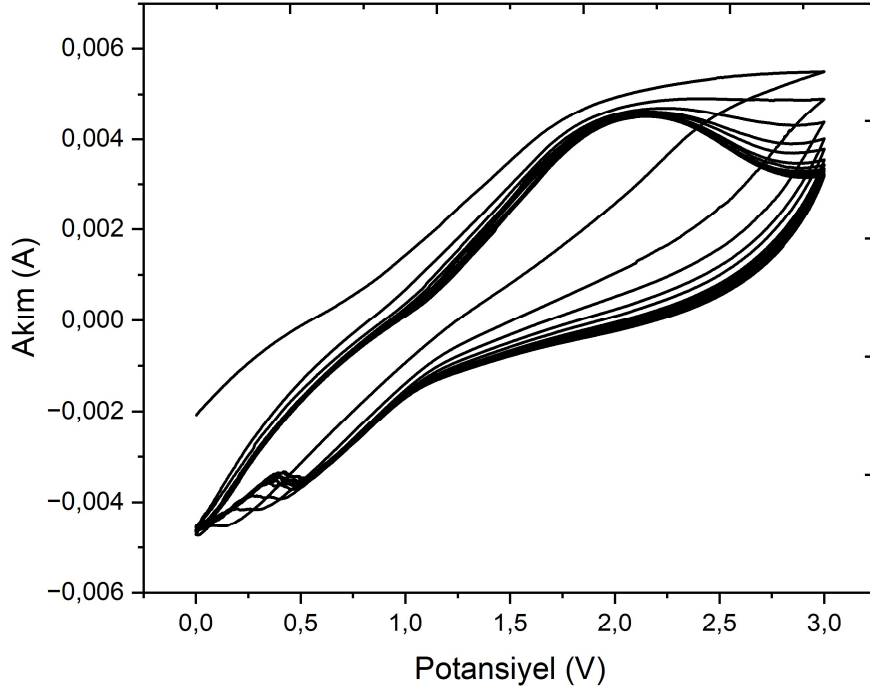
İlk döngüde gözlenen kapasite kaybı genellikle katı elektrolit arayüz tabakasının oluşumuyla ilişkilidir. Bu tabaka, elektrolitin indirgenmesiyle oluşan bir ara fazdır ve genellikle bu tabakanın büyümesi sırasında lityum iyonlarının geri dönüşümsüz olarak hapsedilmesine yol açmaktadır. Bununla birlikte, grafitte yer alan yüzey grupları veya bakır ile oluşabilecek yan tepkimelerde kapasite kaybını artırıcı bir etkiye sahip olabilir. Bu tür tepkimeler, deşarj kapasitesinin şarj kapasitesine kıyasla daha hızlı azalmasına neden olmaktadır.

Deşarj kapasitesinin hızlı düşüşü, kompozit malzemenin yapısal bütünlüğünün döngüler boyunca korunmadığını göstermektedir. Sentetik grafit fazı, yüksek iletkenlik ve iyon difüzyon yolları sağlasa da bakır içeriği ile elektrolit arasındaki etkileşimlerin bu durumu olumsuz yönde etkileyebileceğini düşündürmekte. Bakır, genellikle redoks aktif bir bileşen olarak davranabilmekte ve bu da malzemenin kararlılığını düşürebilmektedir.

Şarj kapasitesinin sabit kalması, elektrot malzemesinin geri dönüşümlü lityum iyon depolama süreçlerinde bir miktar verimlilik gösterdiğini ifade etmektedir. Ancak, deşarj kapasitesindeki sürekli azalma, kulombik verimin düşüklüğünü (%63) işaret etmektedir.

3.3.2 Kompozit B Malzemesinin Elektrokimyasal Karakterizasyonu

Kompozit B malzemesinin döngüsel voltammogramı, şarj-deşarj eğrileri ve sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. 21 Kompozit B Malzemesinin Voltammogramı

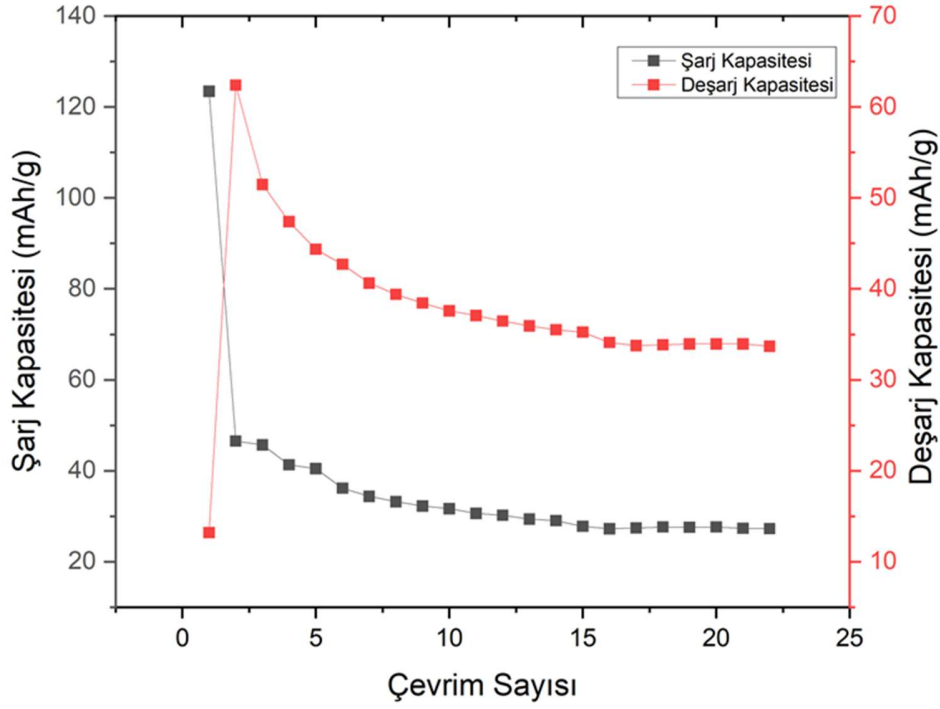
Bu voltammogram, polibütilen tereftalat (PBT) matris içinde %30 grafit, %8 bakır, %2 kobalt ve %10 çinko oksit (ZnO) içeren bir kompozit malzemenin elektrokimyasal davranışını göstermektedir. Döngüsel voltammetri ile alınan bu veri, malzemenin indirgenme ve yükseltgenme tepkimelerini gerçekleştirebilen redoks aktif bölgeler içerdiğini göstermektedir. Voltammogramda 2,2 V’ da oluşan yükseltgenmeye ilişkin geniş pik ve 0,6 V daki indirgenme piki, redoks tepkimelerinin yarı tersinir nitelikte olduğunu göstermektedir (Singh, Sharma, and Chaurasia 2024). Bu durum, grafitin yüksek elektriksel iletkenlik sağladığı ve aktif bileşenlerin (bakır, kobalt ve ZnO) elektrokimyasal tepkimelerde etkin bir şekilde rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Voltammogramda gözlemlenen keskin eğriler, malzemede redoks çiftlerinin bulunduğunu işaret etmektedir. Bakır ve kobalt iyonları, bu reaksiyonlarda aktif

merkezler olarak işlev görebilir. Örneğin, $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ çiftinin elektrot yüzeyinde redoks aktivitesine katkı sağlaması beklenebilir. ZnO , genellikle geniş bir potansiyel aralığında kararlılık sağlayan yarı iletken bir bileşen olarak bilinir. Bu özellik, redoks tepkimelerinin kararlı olmasına yardımcı olabilir.

Voltammogramın belirgin histerezis döngüsü, sistemin kapasitif bir davranış sergilediğini göstermektedir. Grafit, kompozitin elektriksel iletkenliğini artırırken, aynı zamanda geniş yüzey alanı ile çift tabaka kapasitansına katkı sağlamaktadır. Bakır ve kobalt iyonlarının redoks aktif doğası, bu kapasitif özellikleri güçlendirmektedir. Ancak, yüksek ZnO içeriği, yarı iletken yapısı nedeniyle akım değerlerini sınırlandırabilir. Döngüde gözlemlenen histerezis (şarj ve deşarj sırasında oluşan fark), malzemenin enerji depolama uygulamaları için uygunluğunu değerlendirmek adına önemli bir parametredir. Bu voltammogram hem faradik hem de kapasitif süreçlerin gerçekleştiğini göstermektedir(Ramachandran and Hamed 2024).

Voltammogramda gözlemlenen belirgin anodik ve katodik pikler, polibütilen tereftalat (PBT) matrisindeki %30 grafit, %8 bakır, %2 kobalt ve %10 ZnO içeriğinin redoks aktif bir sistem oluşturduğunu göstermektedir. Anodik pikler, özellikle bakırın $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ ve kobaltın $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ redoks çiftleri üzerinden yükseltgenme reaksiyonlarını desteklediğini, katodik pikler ise bu iyonların indirgenme süreçlerinde etkin olduğunu ortaya koymaktadır. Grafitin yüksek elektriksel iletkenliği, redoks reaksiyonlarının kinetiğini artırırken, ZnO 'nun yarı iletken doğası malzemenin kararlılığına katkı sağlamaktadır. Anodik ve katodik pikler arasındaki potansiyel fark, sistemin yarı tersinir olduğunu, ancak faradik süreçlerin güçlü bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu malzeme, özellikle enerji depolama uygulamalarında yüksek performansa sahip olabileceğini göstermektedir(Wei et al. 2022).



Şekil 3. 22 Kompozit B Malzemesinin Şarj-Deşarj Ölçümleri

Bu şarj-deşarj grafiği, PBT matrisli (%30 grafit, %8 bakır, %2 kobalt ve %10 ZnO) kompozit malzemenin enerji depolama kapasitesini döngüsel olarak değerlendirmektedir.

İlk döngüde deşarj kapasitesinin (kırmızı kareler) şarj kapasitesine (siyah kareler) göre oldukça yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bu, genellikle elektrot-elektrolit ara yüzeyinde meydana gelen yan reaksiyonlar (örneğin, Solid Electrolyte Interface (SEI) tabakası oluşumu) ve aktif lityum iyonlarının geri dönüşümsüz olarak hapsedilmesiyle ilişkilidir. İlk deşarj kapasitesinin yaklaşık 120 mAh/g olması, başlangıçta yüksek bir aktiflik olduğunu göstermektedir. Ancak bu değer hızlı bir şekilde düşmektedir.

Şarj kapasitesinde ve özellikle deşarj kapasitesinde belirgin bir azalma gözlenmektedir. Bu durum, döngü stabilitesinin düşük olduğunu ve malzemenin uzun süreli performansının sınırlı olduğunu göstermektedir. İlk birkaç döngüde meydana gelen kapasite kaybı, malzemenin yapısal bütünlüğünde bozulmalar veya aktif bölgelerde iyon kaybı olduğunu düşündürmektedir.

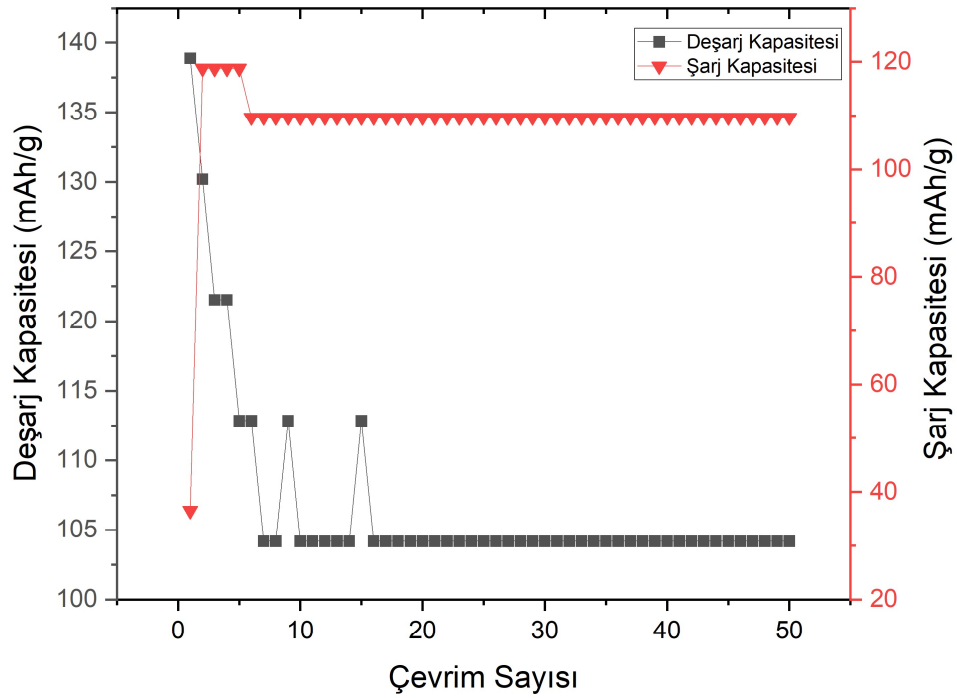
Deşarj kapasitesi 10. döngüden itibaren yaklaşık 30-40 mAh/g civarında sabitlenmekte, ancak bu değer düşük kabul edilebilir. Bu, malzemenin döngü stabilitesinin zayıf olduğu anlamına gelir. Şarj kapasitesi de yaklaşık 30 mAh/g civarında sabitlenmiştir, bu da malzemenin uzun vadeli geri dönüşümlü iyon depolama kapasitesinin düşük olduğunu göstermektedir.

Malzemenin içeriğine bağlı olarak, grafit yüksek iletkenlik sağlamasına rağmen yüzeyindeki aktif bölgelerin sınırlı olması uzun vadeli kapasitif davranışını azaltmış olabilir. Bakır ve kobalt gibi redoks aktif türler, başlangıçta yüksek kapasiteye katkı sağlamış olsa da yapıdaki olası bozunmalar nedeniyle döngü ilerledikçe etkinliklerini kaybetmiş olabilir. ZnO ise yarı iletken özellikleri sayesinde malzemenin stabilitesine katkıda bulunmuş olsa da bu katkı deşarj kapasitesinin düşük seviyelerde sabitlenmesini önlemeye yetmemiştir. Bu durum, malzemenin performansının optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

3.3.3 Grafit Malzemelerinin Elektrokimyasal Karşılaştırılması

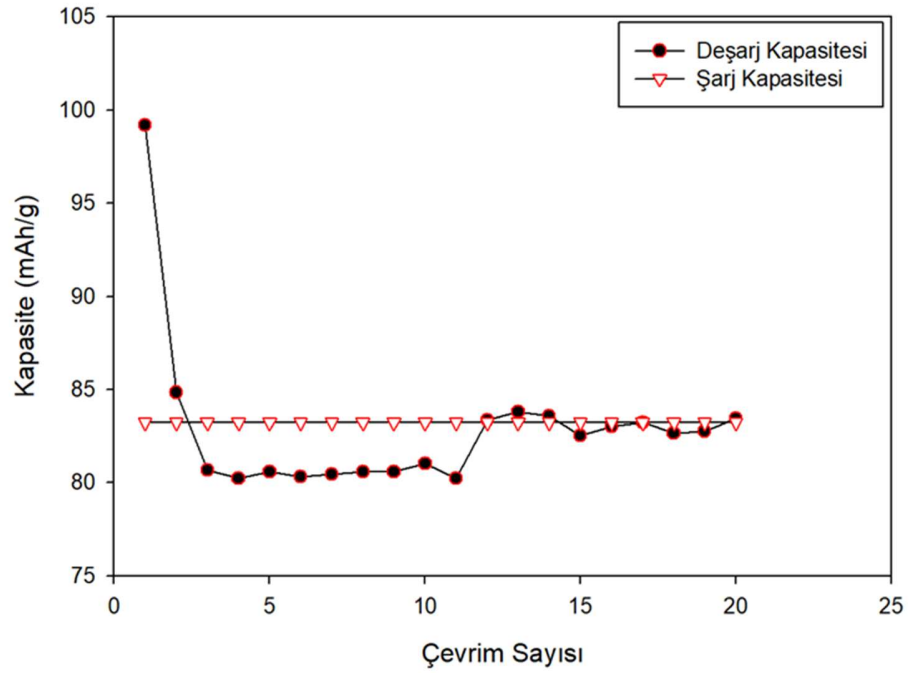
Sentetik grafitin şarj-deşarj grafiğine göre, sentetik grafit malzemesinin elektrokimyasal çevrim stabilitesi değerlendirildiğinde, ilk çevrimde yüksek bir kapasite gözlemlenmesine rağmen, hızlı bir kapasite kaybı yaşandığı görülmektedir. Özellikle deşarj kapasitesi, ilk birkaç çevrimde belirgin şekilde düşerek stabil bir seviyeye otururken, şarj kapasitesinin nispeten sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, genellikle elektrot yüzeyinde geri dönüşümsüz lityum kaybı, SEI (katı-elektrolit ara yüzeyi) oluşumu ve yapısal bozulma ile ilişkilendirilebilir. Elektrokimyasal performans açısından, uzun çevrimlerde düşük kapasite korunumu, grafit malzemenin belirli uygulamalarda sınırlayıcı

olabileceğini düşündürmektedir ve yüzey modifikasyonu, bağlayıcı optimizasyonu veya katkı maddesi kullanımı gibi stratejilerle iyileştirilmeye açık olduğu söylenebilir.



Şekil 3. 23 Sentetik Grafit Şarj-Deşarj Ölçümleri

Grafikte doğal grafitin şarj (kırmızı üçgenler) ve deşarj (siyah noktalar) kapasiteleri çevrim sayısına bağlı olarak gösterilmektedir. İlk deşarj kapasitesinin yaklaşık 100 mAh/g seviyesinde olduğu görülmekte, ancak bu değer ilk birkaç döngüde hızlı bir şekilde düşerek yaklaşık 80 mAh/g seviyesine kadar azalmaktadır. Bu kapasite kaybı, lityum iyon pillerde yaygın olarak gözlemlenen ilk döngü kaybı (initial capacity loss) fenomeni ile ilişkilendirilebilir. Bu kayıp, elektrot malzemesinin yüzeyinde katı-elektrolit ara fazının (SEI) oluşumu ve aktif lityum iyonlarının geri dönüşümsüz reaksiyonlarla bağlanmasından kaynaklanmaktadır.

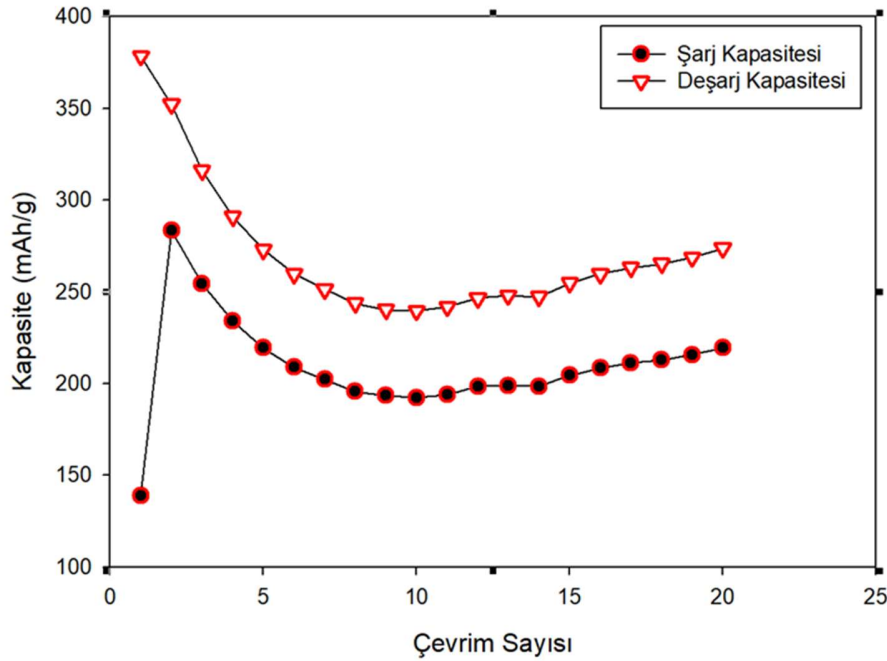


Şekil 3. 24 Doğal Grafitin Şarj-Deşarj Ölçümleri

İlk birkaç döngü sonrasında kapasite yaklaşık 80-85 mAh/g arasında stabilize olmaktadır. Şarj ve deşarj kapasiteleri 20. döngüye kadar nispeten istikrarlı bir seyir izlemekte olup, bu durum doğal grafitin belirli bir döngü stabilitesine ulaştığını göstermektedir. Bununla birlikte, şarj ve deşarj kapasitesi arasındaki fark (Coulomb verimi) başlangıçta düşük olup, sonraki döngülerde artarak 1'e yaklaşmaktadır. Bu da malzemenin belirli bir döngüden sonra daha kararlı bir elektrokimyasal performans sergilediğini göstermektedir.

Grafikte, koşullandırılmış grafitin şarj kapasitesi (kırmızı noktalar) ve deşarj kapasitesi (kırmızı üçgenler) çevrim sayısına bağlı olarak gösterilmektedir. İlk döngüde, şarj kapasitesi yaklaşık 150 mAh/g seviyesinde başlamakta ve ikinci döngüde 270 mAh/g seviyesine yükselmektedir. Deşarj kapasitesi ise ilk döngüde

yaklaşık 370 mAh/g seviyesinde olup, sonraki döngülerde 200-250 mAh/g arasında bir dengeye ulaşmaktadır.



Şekil 3. 25 Koşullandırılmış Grafitin Şarj-Deşarj Ölçümleri

İlk döngüde yüksek kapasite kaybı gözlemlenmektedir, bu durum genellikle SEI (Solid Electrolyte Interphase) tabakasının oluşumu, elektrot-elektrolit etkileşimleri ve aktif lityum iyonlarının geri dönüşümsüz kaybı ile ilişkilendirilebilir. Ancak doğal grafitte kıyasla, koşullandırılmış grafitte başlangıç kapasitesinin daha yüksek olması ve çevrimler boyunca kapasitenin artış göstermesi dikkat çekicidir.

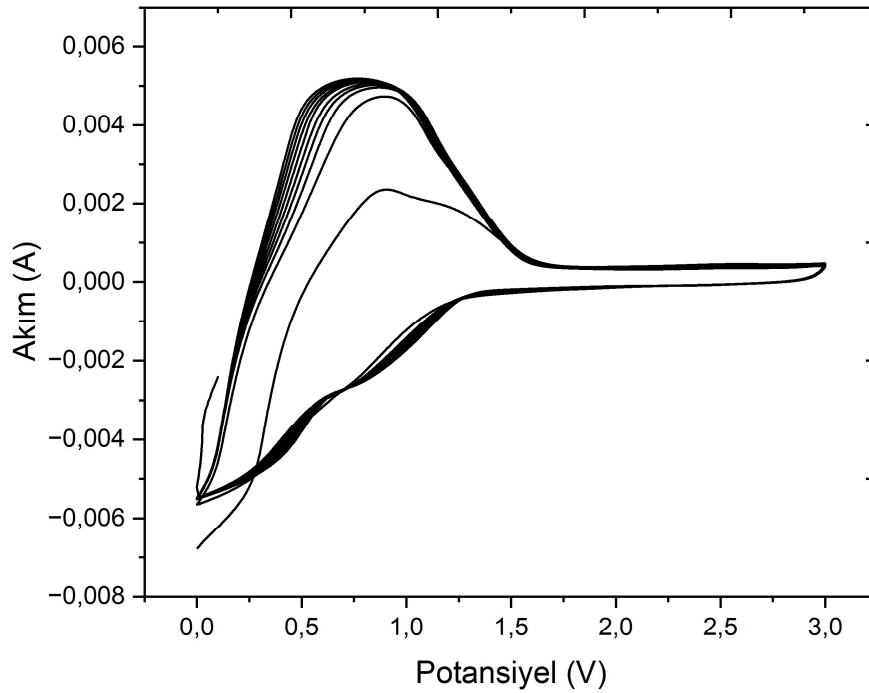
İlk birkaç döngüde kapasitenin azaldığı, ancak yaklaşık 10. çevrimden sonra kapasitenin tekrar yükselişe geçtiği gözlemlenmektedir. Bu durum, koşullandırılmış grafitin yapısal adaptasyon sürecinden geçtiğini ve malzemenin çevrimler boyunca stabil hale geldiğini göstermektedir. Deşarj kapasitesinin

zamanla artması, malzemenin elektrokimyasal aktivitesinin geliştiğini ve elektrot-elektrolit arayüzünün daha stabil hale geldiğini düşündürmektedir.

Genel olarak, koşullandırılmış grafit doğal grafitte kıyasla daha yüksek kapasite sunmakta ve çevrimler ilerledikçe kapasitesini koruyarak hatta arttırmaktadır. Bu özellik, koşullandırılmış grafitin lityum iyon pilleri için daha iyi bir elektrokimyasal performans sunduğunu göstermektedir. Yüksek kapasite ve artan çevrim stabilitesi, bu malzemenin anot malzemesi olarak daha verimli çalışabileceğine işaret etmektedir.

3.3.4 Kompozit C Malzemesinin Elektrokimyasal Karakterizasyonu

Kompozit C malzemesi için yapılan elektrokimyasal karakterizasyonlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. 26 Kompozit C Malzemesinin Voltammogramı

Bu voltammogram, %30 doğal grafit, %8 bakır ve %2 kobalt ve % 5 ZnO içeren bir kompozit malzemenin elektrokimyasal davranışını göstermektedir. Grafikteki anodik ve katodik pikler, malzemede aktif redoks merkezlerinin bulunduğunu ve bu merkezlerin potansiyel uygulandığında oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarına katıldığını göstermektedir.

Voltammogramda, 0.5-1.5 V aralığında görülen belirgin anodik pik, bakırın $\text{Cu}^+ \rightarrow \text{Cu}^{2+}$ reaksiyonları gibi yükseltgenme süreçlerinden kaynaklanabilir. Ayrıca kobaltın $\text{Co}^{2+} \rightarrow \text{Co}^{3+}$ redoks çifti de bu piklere katkıda bulunabilir.

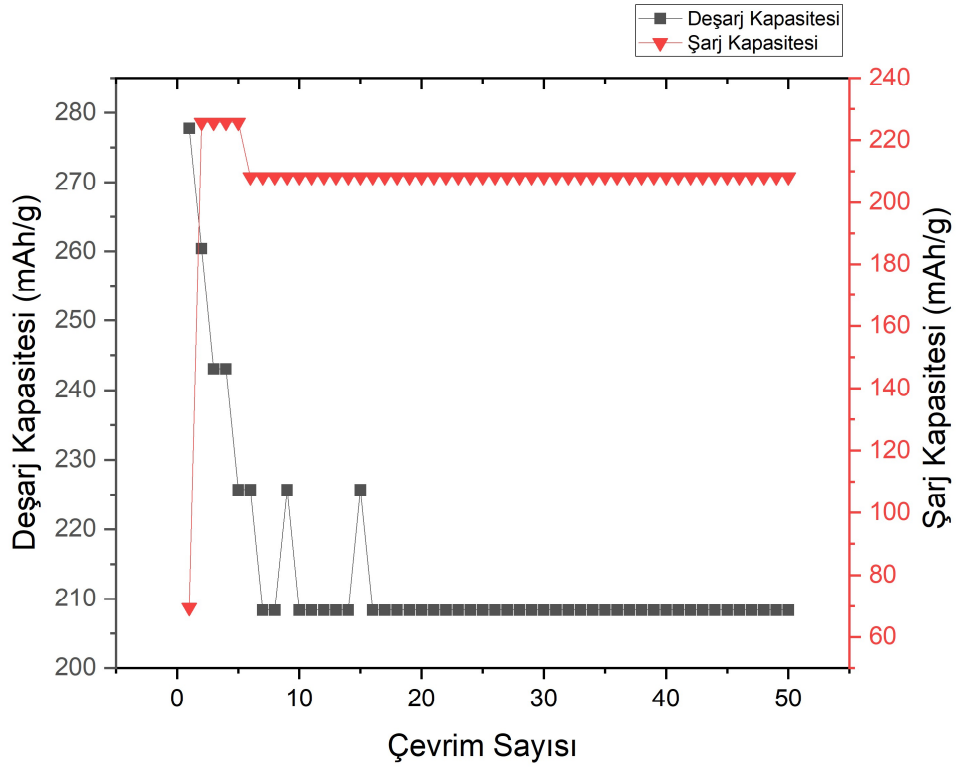
Yaklaşık 0.0-0.5 V aralığında görülen katodik pik, bakır ve kobalt türlerinin indirgenmesiyle ilişkilidir. Örneğin, $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Cu}^+$ ve $\text{Co}^{3+} \rightarrow \text{Co}^{2+}$ reaksiyonları

burada aktif olabilir. Bu pikler, redoks çiftlerinin tersinirliğini ve elektrot malzemesinin enerji depolama kapasitesine katkısını temsil eder.

Grafit, geniş yüzey alanı ve yüksek iletkenlik özellikleri ile çift tabaka kapasitansına önemli katkı sağlamaktadır. Bu durum, akım yoğunluğundaki sürekli artış veya azalmalar ile desteklenmektedir. Kapasitif davranış, faradik reaksiyonlarla birlikte malzemenin hibrit enerji depolama mekanizmalarına uygun olduğunu göstermektedir.

Voltammogramda üst üste binen döngüler, malzemenin döngü stabilitesinin iyi olduğunu ve redoks reaksiyonlarının tekrar eden döngülerde büyük bir bozulma olmaksızın gerçekleştiğini göstermektedir. Doğal grafit, malzemeye yüksek iletkenlik sağlayarak elektron transferini hızlandırmaktadır. Bu da, bakır ve kobaltın redoks reaksiyonlarının daha verimli gerçekleşmesini mümkün kılar.

Bu voltammogram, malzemenin hem faradik redoks reaksiyonlarını hem de kapasitif enerji depolama mekanizmalarını desteklediğini göstermektedir. Bakır ve kobaltın redoks aktif doğası, malzemenin enerji depolama ve dönüşüm uygulamaları için umut vaat eden bir aday olduğunu ortaya koymaktadır. Grafitin iletkenliği sayesinde reaksiyon kinetikleri artırılmış ve döngü stabilitesi iyileştirilmiştir.



Şekil 3. 27 Kompozit C Malzemesinin Şarj-Deşarj Ölçümü

İlk döngüde deşarj kapasitesinin oldukça yüksek (~ 275 mAh/g) olduğu görülmektedir. Bu durum, malzemenin başlangıçta oldukça aktif bir iyon depolama mekanizmasına sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, şarj kapasitesinin düşük (~ 220 mAh/g) olması, geri dönüşümsüz yan reaksiyonların gerçekleştiğini ve bu reaksiyonların lityum iyonlarının bir kısmını hapsederek sistemin verimliliğini düşürdüğünü işaret etmektedir. Bu, genellikle elektrot yüzeyinde Solid Electrolyte Interface (SEI) tabakasının oluşumu ile ilişkilidir.

İlk döngüden sonra hem şarj hem de deşarj kapasitesinde belirgin bir düşüş yaşanmaktadır. Deşarj kapasitesi, yaklaşık 200-210 mAh/g seviyelerine sabitlenirken, şarj kapasitesi bu seviyeye ulaşamamıştır. Bu, malzemenin elektrokimyasal kararlılığının sınırlı olduğunu ve kapasitenin döngü ilerledikçe sürdürülebilir bir şekilde korunamadığını göstermektedir.

Deşarj kapasitesinin 10. döngüden sonra stabil bir eğilim gösterdiği ve ~210 mAh/g civarında sabitlendiği gözlemlenmektedir. Ancak şarj kapasitesi, stabil görünmekle birlikte, deşarj kapasitesinin altında kalmıştır. Bu fark, Coulombic verim düşüklüğüne işaret etmektedir ve sistemin enerji depolama ve salma süreçlerinde tam bir tersinirlik sergileyemediğini göstermektedir.

Coulombic verim, şarj ve deşarj kapasitesi arasındaki farkın azaldığı döngülerde artış göstermektedir. Döngü ilerledikçe Coulombic verim nispeten sabitlenmiş ve sistemin enerji depolama döngüleri arasında bir denge kurduğu gözlemlenmiştir.



4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada elde edilen bulgular, termoplastik tabanlı kompozit elektrotların geliştirilmesi, karakterizasyonu ve performans özelliklerinin incelenmesine yönelik önemli bilgiler sunmuştur. Değerlendirme bölümünde, elde edilen sonuçların literatürle karşılaştırılması ve gelecekteki çalışmalar için öneriler detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Bulgular, geliştirilen kompozit elektrotların döngü stabilitesinde sınırlamalar olduğunu göstermektedir. Özellikle deşarj kapasitesindeki sürekli düşüş, kullanılan polimer matrisin ve iletken katkı maddelerinin uzun vadeli elektrokimyasal dayanımını artırmaya yönelik iyileştirme gerekliliğini ortaya koymaktadır. Literatürde polimer tabanlı anot malzemelerinde döngü ömrünü iyileştirmek amacıyla nano yapıli katkıların kullanıldığı bilinmektedir (Zhang et al., 2021). Bu bağlamda, optimize edilmiş malzeme oranlarının belirlenmesi ve katkıların homojen dağılımının sağlanması, performansı artırmak için kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, kompozit elektrotların termal stabilitesine ilişkin bulgular, kullanılan dolgu maddelerinin ve polimer matrisin yapısal özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. TGA sonuçları, inorganik dolgu maddelerinin polimer matrisin termal bozunma sıcaklıklarını belirgin bir şekilde artırdığını ortaya koymaktadır. Bu sonuç, dolgu maddelerinin polimer matrisin termal dayanımına katkı sağladığını ancak bu etkinin elektrokimyasal performansa doğrudan yansımadığını göstermektedir. Termal stabilitenin artırılmasına yönelik çalışmalar literatürde yaygın olarak ele alınmış olup, özellikle nano ölçekli dolgu maddelerinin kullanımıyla matris-dolgu ara yüzey uyumunun iyileştirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Zhao et al., 2021).

DSC analizleri, dolgu maddelerinin kristallenme sıcaklığı (T_c) ve erime sıcaklığı (T_m) üzerindeki etkilerini göstermiştir. Bulgular, kompozitlerin T_c değerlerinde belirgin bir artış olduğunu ancak erime sıcaklığında minimal bir değişim gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, dolgu maddelerinin polimer zincir hareketliliğini sınırlandırarak mekanik dayanıklılığı artırdığı ancak aynı zamanda matrisin kristalin yapısında önemli bir değişikliğe neden olmadığı anlamına gelir. Bu bulgu, dolgu malzemelerinin kimyasal yapısının ve yüzey modifikasyonlarının optimizasyonunun, termal özelliklerin yanı sıra mekanik özelliklere de katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Dolgu maddelerinin yüzey özellikleri ve polimer matrise bağlanma mekanizması, termal stabilite üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Çalışmada kullanılan dolgu maddelerinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizi ile belirlenen yüzey morfolojisi, dolgu-matris arayüzey uyumunun geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, yüzey modifikasyonlarının, dolgu maddelerinin polimer matrisle etkileşimini artırarak termal stabiliteyi ve mekanik dayanıklılığı iyileştirebileceğini göstermektedir (Feng et al., 2021).

Kimyasal dayanım açısından değerlendirildiğinde, elektrotların uzun süreli elektrokimyasal döngüler sırasında kimyasal yapılarında meydana gelen değişiklikler önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır. Bulgular, dolgu maddelerinin hazırlanan Kompozit A, Kompozit B ve Kompozit C malzemelerinin kimyasal stabilitesine katkıda bulunduğunu, ancak yüzeyde gözlemlenen oksidatif bozunma izlerinin, özellikle yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreli döngülerde, performans kaybına yol açacağı öngörülmektedir. Bu tür bir bozunma, dolgu maddelerinin yüzey özelliklerinin ve dağılımının optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. (Kim et al., 2020).

Termal dayanımın elektrokimyasal performansa olan etkisi de tartışmanın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Çalışmada elde edilen veriler, termal olarak daha dayanıklı kompozitlerin, elektrot stabilitesine olumlu katkı sağladığını

göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda iletken katkı maddelerinin performans kaybı yaşadığı ve bu durumun döngü stabilitesini sınırladığı gözlemlenmiştir. Literatürde, termal dayanıklılığı artırmak için dolgu malzemelerinin nano boyutlarda kullanılmasının ve polimer matris içinde homojen bir şekilde dağılımının sağlanmasının önerildiği görülmektedir (Yu et al., 2023). Bu doğrultuda, mevcut sistemlerin, nano ölçekli katkı maddeleri ve yüzey modifikasyonlarıyla optimize edilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen termoplastik tabanlı kompozit elektrotların elektrokimyasal performansı, özellikle döngü stabilitesi, şarj-deşarj kapasitesi ve redoks etkinlikleri açısından detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Voltammetrik analizler ve galvanostatik döngü testleri, kullanılan katkı maddeleri ve polimer matrisin elektrokimyasal davranış üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Çalışmada geliştirilen kompozit elektrotlar, başlangıç döngülerinde yüksek şarj-deşarj kapasitesi sergilemiş, ancak döngü sayısının artmasıyla bu kapasitede belirgin bir azalma gözlenmiştir. Örneğin, Kompozit Malzeme A ve B’de ilk döngüde elde edilen yüksek kapasite değerlerinden sonra sırasıyla düşüşler gözlenmiştir. Bu durum, elektrot malzemelerinde meydana gelen yapısal bozulmalar ve iletken katkı maddelerinin dağılımında görülen değişikliklerle ilişkilendirilmektedir. Literatürde de belirtildiği gibi, döngü stabilitesinin artırılması için elektrot yapısında homojen bir iletken ağ oluşturulması kritik öneme sahiptir (Zhao et al., 2021). Bu durum Kompozit Malzeme C’de düşürülmeye çalışılmış ve başarılı olunmuştur. Daha stabil ve daha yüksek spesifikdeşarj kapasitesine sahip bir kompozit malzeme elde edilmiştir.

Voltammetrik analizler, bakır (Cu) ve kobalt (Co) gibi redoks aktif elementlerin başlangıç döngülerinde elektrokimyasal süreçlere olumlu katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu elementler, redoks tepkimelerinde rol oynayarak elektrot performansını artırmakta ve pilin kapasitesine katkı sağlamaktadır. Ancak, döngü sayısının artmasıyla birlikte bu katkının azaldığı gözlenmiştir. Bunun

nedenleri arasında, yüzeydeki bu elementlerin oksidatif bozunmaya uğraması ve elektrot yapısında dendritik oluşumların meydana gelmesi yer almaktadır. Bu durum, redoks aktif elementlerin stabilitesini artıracak yüzey kaplama tekniklerinin uygulanması gerektiğine işaret etmektedir. Örneğin, bu tür elementlerin yüzeylerine uygulanan karbon bazlı kaplamalar hem kimyasal hem de elektrokimyasal stabiliteyi artırabilir (Kim et al., 2020).

Elektrotların elektrokimyasal davranışını etkileyen temel faktörlerden biri de elektron ve iyon taşınımı mekanizmalarıdır. Çalışmada, iletken katkı maddelerinin polimer matris içerisinde homojen dağılım gösterdiği, ancak bazı bölgelerde aglomerasyon problemlerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, iletken ağın sürekliliğini bozarak elektron taşınımını sınırlamaktadır. Literatür, karbon nanotüplerin yüzey modifikasyonu veya grafen ile hibrit yapılar oluşturulmasının, iletkenlik özelliklerini artırabileceğini öne sürmektedir (Yu et al., 2023). Benzer şekilde, polimer matrisin iyon iletkenliğini artırmak için lityum iyonlarına yüksek afinite gösteren katkı maddelerinin dahil edilmesi, pil performansını optimize etmek için etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

SEM analizleri, elektrot yüzeyinde gözlemlenen morfolojik değişikliklerin, özellikle döngü stabilitesini olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Elektrot yüzeyindeki çatlaklar ve boşluklar, döngü sırasında elektrolitin bu bölgelere sızmasına ve bu durumun elektrokimyasal bozunmaya neden olmasına yol açmaktadır. Literatürde, bu tür yüzey sorunlarının minimize edilmesi için elektrot üretiminde kontrollü kaplama tekniklerinin (örneğin, spreycaplama veya elektroforetik biriktirme) kullanılması önerilmektedir (Feng et al., 2021).

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan dolgu maddelerinin kimyasal ve termal dayanım üzerindeki etkileri incelenmiş ve mevcut sınırlamalar ortaya konulmuştur. Üretim yöntemindeki geliştirmeler ve kullanılan katkı malzemelerin oranlarının optimizasyonu ile deneme yapılan çalışmalarda Kompozit Malzeme C'de yaklaşık 210 mAh/g spesifik deşarj kapasitesiyle önemli bir sonuç elde edilmiştir. Termoplastik kompozit malzemelerin lityum pillerde anot malzeme

olarak kullanılması hem üretim sürecini düşürürken ayrıca maliyet ve hafiflik avantajları kazandırmaktadır. Ayrıca, termoplastik kompozit malzemelerin sürdürülebilirlik açısından da çok fazla olumlu etkisi vardır. Bu tarz malzemeler geri dönüştürülebilir oldukları için tekrar kullanımı ya da farklı bir alanda kullanımı için gelecek vadetmektedir. Karbon ayak izi ve geri dönüşüm sürecini önemsememiz gereken günümüz koşullarında sürdürülebilir malzemelerin kullanımlarının ve geliştirilmelerinin yapılması sağlanmalıdır.

Gelecekteki çalışmalar, dolgu maddelerinin kimyasal stabilitesini artırmak, termal dayanımı optimize etmek ve bu iyileştirmelerin elektrokimyasal performansa olan etkilerini detaylı bir şekilde incelemek üzerine odaklanmalıdır. Bu tür optimizasyonlar, kompozit elektrotların enerji depolama uygulamalarındaki etkinliğini artırabilir ve uzun ömürlü sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Afroz, Laila, Muhammad Rafaqat, M. Ashfaq Ahmad, Tariq Bashir, Muhammad Naqvi, Ghazanfar Abbas, Ghulam M. Mustafa, and Rizwan Raza.** 2023. "Nanocomposite Catalyst (1 - x)NiO- XCuO /YGDC for Biogas Fueled Solid Oxide Fuel Cells." *ACS Applied Energy Materials* 6 (21): 10918–28.
- Ahmed, Md. Dipu, and Kazi Madina Maraz.** 2023. "Revolutionizing Energy Storage: Overcoming Challenges and Unleashing the Potential of next Generation Lithium-Ion Battery Technology." *Materials Engineering Research* 5 (1): 265–78.
- An, Weili, Peng He, Zongzhou Che, Chengmao Xiao, Eming Guo, Chunlei Pang, Xueqin He, et al.** 2022. "Scalable Synthesis of Pore-Rich Si/C@C Core-Shell-Structured Microspheres for Practical Long-Life Lithium-Ion Battery Anodes." *ACS Applied Materials and Interfaces* 14 (8): 10308–18.
- Anwar, Mustafa, Muhammed Ali Shaikh Abdul, Uneeb Masood Khan, Muhammad Hassan, Asif Hussain Khoja, and Andanastuti Muchtar.** 2022. "A Review of X-ray Photoelectron Spectroscopy Technique to Analyze the Stability and Degradation Mechanism of Solid Oxide Fuel Cell Cathode Materials." *Materials* 15 (7).
- Armand, Michel, Peter Axmann, Dominic Bresser, Mark Copley, Kristina Edström, Christian Ekberg, Dominique Guyomard, et al.** 2020. "Lithium-Ion Batteries – Current State of the Art and Anticipated Developments." *Journal of Power Sources* 479 (September).
- Aurbach, Doron, Elena Markevich, and Gregory Salitra.** 2021. "High Energy Density Rechargeable Batteries Based on Li Metal Anodes. The Role of Unique Surface Chemistry Developed in Solutions Containing Fluorinated Organic Co-Solvents." *Journal of the American Chemical Society* 143 (50): 21161–76.
- Barbosa, João C., Renato Gonçalves, Carlos M. Costa, and Senentxu Lanceros-Mendez.** 2021. "Recent Advances on Materials for Lithium-Ion Batteries." *Energies* 14 (11).
- Bastida-Molina, Paula, Elías Hurtado-Pérez, Elisa Peñalvo-López, and María Cristina Moros-Gómez.** 2020. "Assessing Transport Emissions Reduction While Increasing Electric Vehicles and Renewable Generation Levels." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 88 (September).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Bhukya, Ramu, Praveen Kumar Nalli, Kalyan Sagar Kadali, and Mahendra Chand Bade.** 2021. "Designing of Lithium - Ion Battery Pack Rechargeable on a Hybrid System with Battery Management System (BMS) for DC Loads of Low Power Applications –A Prototype Model." *Journal of Physics: Conference Series* 2089 (1).
- Blume, Raoul, Dirk Rosenthal, Jean Philippe Tessonier, Henan Li, Axel Knop-Gericke, and Robert Schlögl.** 2015. "Characterizing Graphitic Carbon with X-Ray Photoelectron Spectroscopy: A Step-by-Step Approach." *ChemCatChem* 7 (18): 2871–81.
- Carolina Sparavigna, Amelia.** 2024. "Graphene, Graphene Oxide and Carbon Nanotubes in Raman Spectroscopy." *International Journal of Sciences* 13 (07): 1–26.
- Darjazi, Hamideh, S. Javad Rezvani, Sergio Brutti, and Francesco Nobili.** 2022. "Improvement of Structural and Electrochemical Properties of NMC Layered Cathode Material by Combined Doping and Coating." *Electrochimica Acta* 404:139577.
- Feng, Shixuan, Hao Zhang, Haowen Wang, Rui Zhao, Xuan Ding, Huahua Su, Futian Zhai, Tingxi Li, Mingliang Ma, and Yong Ma.** 2023. "Fabrication of Cobalt-Zinc Bimetallic Oxides@polypyrrole Composites for High-Performance Electromagnetic Wave Absorption." *Journal of Colloid and Interface Science* 652 (PB): 1631–44.
- Feng, Zhi yuan, Wen jie Peng, Zhi xing Wang, Hua jun Guo, Xin hai Li, Guo chun Yan, and Jie xi Wang.** 2021. "Review of Silicon-Based Alloys for Lithium-Ion Battery Anodes." *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 28 (10): 1549–64.
- Ferrara, Chiara, Riccardo Ruffo, Eliana Quartarone, and Piercarlo Mustarelli.** 2021. "Circular Economy and the Fate of Lithium Batteries: Second Life and Recycling." *Advanced Energy and Sustainability Research* 2 (10).
- Greenwood, Matthew, Marc Wentker, and Jens Leker.** 2021. "A Bottom-up Performance and Cost Assessment of Lithium-Ion Battery Pouch Cells Utilizing Nickel-Rich Cathode Active Materials and Silicon-Graphite Composite Anodes." *Journal of Power Sources Advances* 9 (March): 100055.
- Grigore, Mădălina Elena.** 2017. "Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers." *Recycling* 2 (4): 1–11.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Haghkhah, Hasty, Behnam Ghalami Choobar, and Sepideh Amjad-Iranagh.** 2020. "Effect of Salt Concentration on Properties of Mixed Carbonate-Based Electrolyte for Li-Ion Batteries: A Molecular Dynamics Simulation Study." *Journal of Molecular Modeling* 26 (8).
- Han, Tielong, Chao Hou, Zhi Zhao, Xintao Huang, Fawei Tang, Yurong Li, and Xiaoyan Song.** 2022. "W–Cu Composites with Excellent Comprehensive Properties." *Composites Part B: Engineering* 233 (October 2021): 109664.
- Hassan, Nik Ruqiyah Nik, Farah Amira Mohd Ghazali, Abdul Aziz Jaafar, and Noor Mazni Ismail.** 2016. "Preparation of Polypropylene Thermoplastic Container via Thermoforming Process." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 114 (1).
- Hsu, Wen Dung, Po Wei Yang, Hung Yuan Chen, Po Hsien Wu, Pin Chin Wu, Chih Wei Hu, Lakshmanan Saravanan, et al.** 2021. "Preferential Lattice Expansion of Polypropylene in a Trilayer Polypropylene/Polyethylene/Polypropylene Microporous Separator in Li-Ion Batteries." *Scientific Reports* 11 (1): 1–15.
- Jia, Haiping, Xiaolin Li, Junhua Song, Xin Zhang, Langli Luo, Yang He, Binsong Li, et al.** 2020. "Hierarchical Porous Silicon Structures with Extraordinary Mechanical Strength as High-Performance Lithium-Ion Battery Anodes." *Nature Communications* 11 (1): 1–9.
- Johnson, Samuel C., Dimitri J. Papageorgiou, Michael R. Harper, Joshua D. Rhodes, Kevin Hanson, and Michael E. Webber.** 2021. "The Economic and Reliability Impacts of Grid-Scale Storage in a High Penetration Renewable Energy System." *Advances in Applied Energy* 3 (June): 100052..
- Kim, Jisu, Shrine Maria Nithya Jeghan, and Gibaek Lee.** 2020. "Superior Fast-Charging Capability of Graphite Anode via Facile Surface Treatment for Lithium-Ion Batteries." *Microporous and Mesoporous Materials* 305 (April): 110325..
- Kim, Taehoon, Wentao Song, Dae Yong Son, Luis K. Ono, and Yabing Qi.** 2019. "Lithium-Ion Batteries: Outlook on Present, Future, and Hybridized Technologies." *Journal of Materials Chemistry A* 7 (7): 2942–64.
- Kinra, Shashank, Mritunjoy Prasad Ghosh, Sipun Mohanty, Ravi Kant Choubey, and Samrat Mukherjee.** 2022. "Manganese Ions Substituted ZnO Nanoparticles: Synthesis, Microstructural and Optical Properties." *Physica B: Condensed Matter* 627 (October 2021): 413523.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Kumar, Harish, and Dr.S.V. Satish.** 2020. “Thermoplastic Materials As Promising Materials in Welding Technology-a Review.” *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology* 5 (2): 494–97.
- Lander, Laura, Evangelos Kallitsis, Alastair Hales, Jacqueline Sophie Edge, Anna Korre, and Gregory Offer.** 2021. “Cost and Carbon Footprint Reduction of Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries through Efficient Thermal Management.” *Applied Energy* 289 (March): 116737.
- Li, Fan, Ran Tao, Xinyi Tan, Jinhui Xu, Dejia Kong, Li Shen, Runwei Mo, Jinlai Li, and Yunfeng Lu.** 2021. “Graphite-Embedded Lithium Iron Phosphate for High-Power-Energy Cathodes.” *Nano Letters* 21 (6): 2572–79.
- Li, Hong, Zhaoxiang Wang, Liquan Chen, and Xuejie Huang.** 2009. “Research on Advanced Materials for Li-Ion Batteries.” *Advanced Materials* 21 (45): 4593–4607.
- Li, Quan, Yang Yang, Xiqian Yu, and Hong Li.** 2023. “A 700 W·h·kg⁻¹ Rechargeable Pouch Type Lithium Battery.” *Chinese Physics Letters* 40 (4).
- Liao, Yiqing, Huiyan Zhang, Yufan Peng, Yonggang Hu, Jinding Liang, Zhengliang Gong, Yimin Wei, and Yong Yang.** 2024. “Electrolyte Degradation During Aging Process of Lithium-Ion Batteries: Mechanisms, Characterization, and Quantitative Analysis.” *Advanced Energy Materials* 14 (18): 1–29.
- Lu, Ziheng, Fan Sui, Yue E. Miao, Guohua Liu, Cheng Li, Wei Dong, Jiang Cui, Tianxi Liu, Junxiong Wu, and Chunlei Yang.** 2021. “Polyimide Separators for Rechargeable Batteries.” *Journal of Energy Chemistry* 58:170–97.
- Luiso, Salvatore, and Peter Fedkiw.** 2020. “Lithium-Ion Battery Separators: Recent Developments and State of Art.” *Current Opinion in Electrochemistry* 20:99–107.
- Ma, Jianmin, and Yu Tao Li.** 2021. “Preface to the Special Issue: Anode Materials for Rechargeable Batteries.” *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 34 (3): 289–90.
- Martin, Jacob W., Jason L. Fogg, Gabriel R. Francas, Kate J. Putman, Ethan P. Turner, Irene Suarez-Martinez, and Nigel A. Marks.** 2023. “Graphite Rapidly Forms via Annihilation of Screw Dislocations.” *Carbon* 215 (August): 118386.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Melton, George H., Edward N. Peters, and Ruth K. Arisman.** 2011. *Engineering Thermoplastics. Applied Plastics Engineering Handbook.* Elsevier.
- Mikulionok, I. O.** 2015. "Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials." *Chemical and Petroleum Engineering* 51 (1): 14–19.
- Mishra, Govind Kumar, Manoj Gautam, Supriya Sau, and Sagar Mitra.** 2021. "Surface-Modified Lithium Cobalt Oxide (LiCoO₂) with Enhanced Performance at Higher Rates through Li-Vacancy Ordering in the Monoclinic Phase." *ACS Applied Energy Materials* 4 (12): 14260–72.
- Nikiforidis, Georgios, Mohamed Raghibi, Adnan Sayegh, and Mérièm Anouti.** 2021. "Low-Concentrated Lithium Hexafluorophosphate Ternary-Based Electrolyte for a Reliable and Safe NMC/Graphite Lithium-Ion Battery." *Journal of Physical Chemistry Letters* 12 (7): 1911–17.
- Nzereogu, P. U., A. D. Omah, F. I. Ezema, E. I. Iwuoha, and A. C. Nwanya.** 2022a. "Anode Materials for Lithium-Ion Batteries: A Review." *Applied Surface Science Advances* 9 (December 2021): 100233..
- Nzereogu, P.U., A.D. Omah, F.I. Ezema, E.I. Iwuoha, and A.C. Nwanya.** 2022b. "Anode Materials for Lithium-Ion Batteries: A Review." *Applied Surface Science Advances* 9 (March): 100233.
- Oraby, Hussein, Mohammad Darwish, Magdy H. Senna, and Hesham Ramzy Tantawy.** 2024. "Optimization of Mechanical and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Expanded Graphite/Polyurethane Composite Foams." *SPE Polymers* 5 (3): 331–42.
- Poornesh, Kavuri, Kuzhivila Pannickottu Nivya, and K. Sireesha.** 2020. "A Comparative Study on Electric Vehicle and Internal Combustion Engine Vehicles." *Proceedings - International Conference on Smart Electronics and Communication, ICOSEC 2020*, no. Icosec, 1179–83..
- Qadir, Sikandar Abdul, Hessah Al-Motairi, Furqan Tahir, and Luluwah Al-Fagih.** 2021. "Incentives and Strategies for Financing the Renewable Energy Transition: A Review." *Energy Reports* 7:3590–3606.
- Ramachandran, Tholkappiyan, and Fathalla Hamed.** 2024. "Fabrication of Dual-1D/2D Shaped ZnCo₂O₄ -ZnO Electrode Material for Highly Efficient Electrochemical Supercapacitors." *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 188 (February): 111915.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Reichmuth, David, Jessica Dunn, and Don Anair.** 2022. “Driving Cleaner Electric Cars and Pickups Beat Gasoline on Lifetime Global Warming Emissions.”
- Saaïd, Farish Irfal, Muhd Firdaus Kasim, Tan Winie, Kelimah Anak Elong, Azira Azahidi, Nurul Dhabitah Basri, Muhamad Kamil Yaakob, et al.** 2024. “Ni-Rich Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide Cathode Materials: A Review on the Synthesis Methods and Their Electrochemical Performances.” *Heliyon* 10 (1): e23968.
- Sanjit, F., Harris John, Rani Chinnappa Naidu, S. Hemachandra, Derick Mathew, and Rajeshkumar Muthu.** 2022. “State of Charge Estimation for a Lithium-Ion Battery Pack.” *2022 7th International Conference on Environment Friendly Energies and Applications: Renewable and Sustainable Energy Systems, Hybrid Transportation Systems, Energy Transition, and Energy Security, EFEA 2022 - Proceedings*, 1–8.
- Sardo, L., W. Daldoul, M. Vincent, and Thomas Toulorge.** 2019. “Simulations of Heat Transfer in Thermoplastic Injection Molds Manufactured by Additive Techniques.” *International Polymer Processing* 34 (1): 37–46.
- Shakti, Nanda, Tapendu Mandal, Nayan Mani Das, Dhrubojyoti Roy, Shyam Sunder, Sandeep Kumar, and Rahul Pal.** 2024. “Growth and Electrochemical Properties of CuO Nanowires-ZnO Microrods Composite.” *Hybrid Advances* 5 (July 2023): 100124.
- Singh, Manoj K., Atul Kumar Sharma, and Sujeet Kumar Chaurasia.** 2024. “Enhanced Energy Density of Quasi-Solid-State Supercapacitor Based on Activated Carbon Electrode Derived from Honeycomb and Gel Polymer Electrolyte with Redox-Additive Methylene Blue.” *Energy Storage* 6 (1): 1–15.
- Sinsel, Simon R., Rhea L. Riemke, and Volker H. Hoffmann.** 2020. “Challenges and Solution Technologies for the Integration of Variable Renewable Energy Sources—a Review.” *Renewable Energy* 145:2271–85.
- Sun, H. Hohyun, Hoon Hee Ryu, Un Hyuck Kim, Jason A. Weeks, Adam Heller, Yang Kook Sun, and C. Buddie Mullins.** 2020. “Beyond Doping and Coating: Prospective Strategies for Stable High-Capacity Layered Ni-Rich Cathodes.” *ACS Energy Letters* 5 (4): 1136–46.
- Thomé, Thais, Maria C. G. Erhardt, Ariene A. Leme, Isra Al Bakri, Ana K. Bedran-Russo, and Luiz E. Bertassoni.** 2015. *Biodegradable Natural Polymers*, in *Advanced Polymers in Medicine*, Cham: Springer International Publishing, 2015, Pp. 33–66. *Advanced Polymers in Medicine*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Torres-Ochoa, Jorge Alejandro, Dagoberto Cabrera-German, Orlando Cortazar-Martinez, Mariela Bravo-Sanchez, Gustavo Gomez-Sosa, and Alberto Herrera-Gomez.** 2023. "Peak-Fitting of Cu 2p Photoemission Spectra in Cu₀, Cu₁⁺, and Cu₂⁺ Oxides: A Method for Discriminating Cu₀ from Cu₁⁺." *Applied Surface Science* 622 (March): 156960.
- Vega-Perkins, Jesse, Joshua P. Newell, and Gregory Keoleian.** 2023. "Mapping Electric Vehicle Impacts: Greenhouse Gas Emissions, Fuel Costs, and Energy Justice in the United States." *Environmental Research Letters* 18 (1).
- Wang, Guanyu, Tom Fearn, Tengyao Wang, and Kwang Leong Choy.** 2021. "Insight Gained from Using Machine Learning Techniques to Predict the Discharge Capacities of Doped Spinel Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries Applications." *Energy Technology* 9 (5): 1–7.
- Wei, Tingting, Nan Zhang, Yurui Ji, Junhong Zhang, Yanrong Zhu, and Tingfeng Yi.** 2022. "Nanosized Zinc Oxides-Based Materials for Electrochemical Energy Storage and Conversion: Batteries and Supercapacitors." *Chinese Chemical Letters* 33 (2): 714–29.
- Worku, Biru Eshete, Shumin Zheng, and Bao Wang.** 2022. "Review of Low-Temperature Lithium-Ion Battery Progress: New Battery System Design Imperative." *International Journal of Energy Research* 46 (11): 14609–26.
- Xu, Jingjing, Xingyun Cai, Songming Cai, Yaxin Shao, Chao Hu, Shirong Lu, and Shuijiang Ding.** 2023. "High-Energy Lithium-Ion Batteries: Recent Progress and a Promising Future in Applications." *Energy and Environmental Materials* 6 (5): 1–26.
- Xu, Jinhui, Qingyang Yin, Xinru Li, Xinyi Tan, Qian Liu, Xing Lu, Bocheng Cao, et al.** 2022. "Spheres of Graphene and Carbon Nanotubes Embedding Silicon as Mechanically Resilient Anodes for Lithium-Ion Batteries." *Nano Letters* 22 (7): 3054–61.
- Xu, Lei, Wei Liu, Yubing Hu, and Langli Luo.** 2020. "Stress-Resilient Electrode Materials for Lithium-Ion Batteries: Strategies and Mechanisms." *Chemical Communications* 56 (87): 13301–12.
- Xu, Wei, Connor Welty, Margaret R. Peterson, Jeffrey A. Read, and Nicholas P. Stadie.** 2022. "Exploring the Limits of the Rapid-Charging Performance of Graphite as the Anode in Lithium-Ion Batteries." *Journal of The Electrochemical Society* 169 (1): 010531.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devamı)

- Yang, Yiqi, Jianyong Yu, Helan Xu, and Baozhong Sun.** 2017. *Porous Lightweight Composites Reinforced with Fibrous Structures. Porous Lightweight Composites Reinforced with Fibrous Structures.*
- Yu, Peilun, Zhenwei Li, Meisheng Han, and Jie Yu.** 2023. “Growth of Vertical Graphene Sheets on Silicon Nanoparticles Well-Dispersed on Graphite Particles for High-Performance Lithium-Ion Battery Anode.” *Small* 2307494:1–12.
- Yu, Qiusheng, Liang Ma, Shenyang Xiao, Xueqi Du, Lanmei Yang, Chao Sun, Lijun Wang, et al.** 2024. “Aging Mechanisms and Evolution Patterns of Commercial LiFePO₄ Lithium-Ion Batteries.” *Journal of Electronic Materials*, no. 0123456789, 2–11.
- Yuan, Tao, Jiafeng Ruan, Weimin Zhang, Zhuopeng Tan, Junhe Yang, Zi Feng Ma, and Shiyu Zheng.** 2016. “Flexible Overoxidized Polypyrrole Films with Orderly Structure as High-Performance Anodes for Li- and Na-Ion Batteries.” *ACS Applied Materials and Interfaces* 8 (51): 35114–22.
- Zhang, Hao, Yang Yang, Dongsheng Ren, Li Wang, and Xiangming He.** 2021. “Graphite as Anode Materials: Fundamental Mechanism, Recent Progress and Advances.” *Energy Storage Materials* 36 (December 2020): 147–70.
- Zhang, Kai, Yongling An, Chuanliang Wei, Yi Qian, Yuchan Zhang, and Jinkui Feng.** 2021. “High-Safety and Dendrite-Free Lithium Metal Batteries Enabled by Building a Stable Interface in a Nonflammable Medium-Concentration Phosphate Electrolyte.” *ACS Applied Materials and Interfaces* 13 (43): 50869–
- Zhao, Qun Fang, Shu Qiong Zhang, Min Yi Hu, Chang Wang, and Guang Hui Jiang.** 2021. “Recent Advances in LiFePO₄ Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. First-Principles Research.” *International Journal of Electrochemical Science* 16:1–10.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sürecinde danışmanlığımı yapan, tez çalışmasının ilk evresinden son evresine kadar çalışmanın yürütülmesi için bütün imkanları sağlayan hem akademik hem de manevi yönden desteğini esirgemeyen hocalarım Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT ve Prof. Dr. Zekerya DURSUN'a, akademik çalışmalarının yanında sanayi danışmanlığından desteğini esirgemeyen Akın İŞBİLİR'e, 2244 kapsamında bu tezi yapmamda büyük desteği olan TÜBİTAK'a, her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Aydan ELÇİ'ye, Doç. Dr. Şükriye KARABİBERĞLU'na, Dr. Merve AKTÜRK'e, Dr. Şebnem Gül İLARSLAN'a, tez çalışmalarımın gerçekleştirilmesi için bana bütün laboratuvar imkanlarını sunan TÜBİTAK MAM'dan Gülşen UYAR'a, çalışma boyunca manevi destek veren Onur YILDIZ'a, Dr. Tamer YEŞİL'e, İbrahim Kayahan ÖZBOZKURT'a, Sertaç GENÇ'e, tez çalışması kapsamında tüm kahrımı çeken Emre Can BAĞCIVAN'a, Eray AKTAŞLI'ya, Tarık GÜNDÜR'e her zaman arkamda duran ve bu süreçte de maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem Gülümser LEŞKERİ'ye, babam Hasan LEŞKERİ'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

İsim Soyisim: Berkay Metin Leşkeri

Eğitim Bilgileri

2020-2024 Doktora, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye / Malzeme Bilimi ve Mühendisliği / İleri Malzeme Teknolojileri

2016-2019 Yüksek Lisans, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye / Malzeme Bilimi ve Mühendisliği

2011-2016 Lisans, Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Türkiye / Kimya bölümü

Proje Bilgileri

2020- Tübitak 2244 kapsamında 119C109 nolu Fonksiyonel kompozit Malzemelerin Tasarımı, Üretimi, Karakterizasyonu, Sayısal Analizi ve Farklı Uygulamalarda Kullanabilirliğinin İncelenmesi projesi