

T.C
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MALZEME BİLİMİ VE NANOTEKNOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

POLİ(DİETİLAMİNO ETİL METAKRİLAT-KO-ETİL
METAKRİLAT)/POLİİNDOL KOMPOZİTLERİN SENTEZİ VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak TÜFEKÇİ

MAYIS, 2025
UŞAK

T.C
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MALZEME BİLİMİ VE NANOTEKNOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

POLİ(DİETİLAMİNO ETİL METAKRİLAT-KO-ETİL
METAKRİLAT)/POLİİNDOL KOMPOZİTLERİN SENTEZİ VE
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak TÜFEKÇİ

UŞAK, 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı 2243049005 No'lu öğrencisi Burak TÜFEKÇİ'nin "POLİ(DİETİLAMİNO ETİL METAKRİLAT-KO-ETİL METAKRİLAT)/POLİİNDOL KOMPOZİTLERİN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU" adlı tezi 30/05/2025 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Uşak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca, Yüksek Lisans Tezi olarak değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Jüri	Adı Soyadı	İmza
Danışman	:	
Üye	:	
Üye	:	

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içerisinde bulunan bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar içerisinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışma içerisinde bana ait olmayan her türlü bilgi ve ifade için eksiksiz bir şekilde kaynağına atıf yapıldığını bildiririm.

Burak TÜFEKÇİ

POLİ(DİETİLAMİNO ETİL METAKRİLAT-KO-ETİL METAKRİLAT)/POLİİNDOL KOMPOZİTLERİN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Burak TÜFEKÇİ

UŞAK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2025

ÖZET

Mevcut çalışmada; İlk aşamada, hidrofilik monomer 2-dietilamino etilmetakrilat (DEAEMA) ve hidrofobik monomer etil metakrilattan (EMA) serbest radikal polimerizasyonu kullanılarak amfifilik poli(DEAEMA-ko-EMA) kopolimerleri sentezlendi. İkinci aşamada, poli(DEAEMA-ko-EMA) kopolimerinde in situ oksidatif polimerizasyon tekniği kullanılarak demir(III) klorür ($FeCl_3$) varlığında indol iletken monomer kullanılarak farklı konsantrasyonlarda beş seri kompozit hazırlandı. Polimer kompozitlerin (PC'ler) yapıları FTIR, TGA, SEM, AFM karakterizasyon teknikleri kullanılarak aydınlatıldı. PC'ler, test tüpü yöntemi (TM) ile Streptococcus mutans kullanılarak test edilen bakteriyel biyofilm yapışması konusunda önemli performans sergiledi. Bu çalışmada, PC1'in 0,006 mg/ml konsantrasyonu Streptococcus mutans'ın biyofilm oluşumunu %83,199 oranında azaltmıştır. PC'lerdeki poli(indol) konsantrasyonu ve miktarı arttıkça % antibiyofilm etkisi de artmaktadır. Hazırlanan poli(DEAEMA-co-EMA)/PIN kompozitlerinin Escherichia coli ve Staphylococcus aureus'a karşı antibakteriyel aktivitesi değerlendirildi ve sonuçlar kompozitin antibakteriyel aktiviteye sahip olduğunu gösterdi. Bunun yanı sıra, kompozitlerin antioksidan çalışmaları da yapıldı. Sonuçlar poli(DEAEMA-co-EMA)/PIN(%90) kompozitinin biyoaktivitesinin arttığını gösterdi. Ayrıca antioksidan çalışmalarının bulguları, PIN'in diğer tüm numuneler arasında en yüksek canlılık değerini sergilediğini gösterdi. Ayrıca, kompozit ince filmlerin dielektrik özellikleri; dielektrik kayıp ve tanjant değerleri baz alınarak frekansa bağlı olarak değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler : İletken Polimerler, Dietilamino Etilmetakrilat, Biyolojik Özellik, Dielektrik Özellik.

Sayfa Adedi : 126

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cengiz SOYKAN

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF POLY(DIETHYLAMINO
ETHYL METHACRYLATE-CO-ETHYL METHACRYLATE)/POLYINDOLE
COMPOSITES**

(M.Sc. Thesis)

Burak TÜFEKÇİ

UNIVERSITY OF UŞAK

GRADUATE EDUCATION INSTITUTE

Department of Material Science and Nanotechnology Engineering

May 2025

ABSTRACT

In the current study; In the first stage, amphiphilic poly(DEAEMA-co-EMA) copolymers were synthesized from the hydrophilic monomer 2-diethylamino ethylmethacrylate (DEAEMA) and the hydrophobic monomer ethyl methacrylate (EMA) using free radical polymerization. In the second stage, five series composites were prepared at different concentrations using indole conductive monomer in the presence of iron(III) chloride (FeCl₃) using the in situ oxidative polymerization technique in poly(DEAEMA-co-EMA) copolymer. The structures of the polymer composites (PCs) were elucidated using FTIR, TGA, SEM, AFM characterization techniques. PCs exhibited significant performance on bacterial biofilm adhesion tested using the Streptococcus mutans by the test tube method (TM). In this study, the 0.006 mg/ml concentration of PC1 reduced the biofilm formation of Streptococcus mutans by 83.199%. As the concentration and amount of poly(indole) in the PCs increases, the % antibiofilm effect also increases. Antibacterial activity of the prepared poly(DEAEMA-co-EMA)/PIN composites Escherichia coli and Staphylococcus aureus evaluated against and the results showed that the composite had antibacterial activity. Moreover, Antioxidant studies of composites was carried out. The results showed that the enhanced bioactivity of poly(DEAEMA-co-EMA)/PIN(90%) composite. Further, the antioxidant studies findings indicated that PIN exhibited the highest viability value throughout all the other samples. Also, dielectric properties of composite this films were evaluated depending on frequency based on the values of dielectric loss and tangent.

Keywords : Conductive Polymers, Diethylamino Ethylmethacrylate, Biological Property, Dielectric Property.

Number of Pages : 126

Supervisor : Prof. Dr. Cengiz SOYKAN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında katkısı büyük olan, engin bilgi birikimin ve tecrübelerini yüksek lisans öğrenimim ve laboratuvar çalışmalarım boyunca benden esirgemeyen, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Cengiz SOYKAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda biyolojik aktivite çalışmalarında yardımcı olan Prof. Dr. Safiye Elif KORCAN ve Şah İsmail ÇİVİ'ye, dielektrik ölçümlerinin yapılmasında yardımcı olan Prof. Dr. Orhan YALÇIN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her türlü maddi ve manevi desteği benden esirgemeyen babam Mecit TÜFEKÇİ'ye, amcam Ömer TÜFEKÇİ'ye en derin sevgi ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER.....	vii
ÇİZELGELER	ix
RESİMLER.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1.İLETKEN POLİMERLER.....	1
1.1.1. İletken polimerlerin kullanım alanları.....	2
1.1.2. Bant kuramı.....	4
1.1.3. Katkılama (Doplama).....	6
1.1.4. Atlama (Hopping).....	7
1.2. POLİİNDOL	8
1.2.1. PIN Sentezi.....	8
1.2.2. PIN'in polimerleşme mekanizması.....	11
1.2.3. Polimerleşme yöntemleri	16
1.3.POLİİNDOL VE TÜREVLERİNİN SENTEZİ	18
1.3.1. Kimyasal polimerizasyon.....	18
1.3.2. Elektrokimyasal polimerizasyon	19
1.4. DİELEKTRİK MALZEMELER	21
1.5. KOMPOZİT MALZEMELER	27
1.5.1. Polimer matriksli kompozitler	28

1.5.2. Polimerik nanokompozitler	28
1.5.3. İletken polimerik kompozitler	30
1.6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	32
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	54
2.1. DENEYLERDE KULLANILAN KİMYASAL MADDELER İLE ARAÇ VE GEREÇLER	54
2.1.1. Kullanılan kimyasallar	54
2.1.2. Kullanılan cihazlar, araç ve gereçler	55
2.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	58
2.2.1. Dietilaminoetilmetakrilat-etilmetakrilat kopolimeriasyonu	58
2.2.2. Poli(Dietilaminoetilmetakrilat-ko-Etilmetakrilat)/ Poliindol kompozitlerin sentezi	60
2.3. YAPILAN ANALİZLER.....	63
2.4. HAZIRLANAN POLİMER VE KOMPOZİTLERİN ANTİMİKROBİYAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	64
2.4.1. Antimikrobiyal aktivite çalışması için kullanılan mikroorganizmalar.....	64
2.4.2. Mueller Hinten Agar (MHA) (Merck, 105437)	64
2.4.3. Nutrient Broth (NB) (Merck, 105443)	65
2.5. ANTİMİKROBİYAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİNDE KULLANILAN CİHAZLAR.....	65
2.6. ANTİMİKROBİYAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİNDE KULLANILAN METOTLAR	65
2.6.1. Antimikrobiyal aktivitenin Ager Well difüzyon yöntemi ile belirlenmesi ...	65
2.6.2. Antimikrobiyal aktivitenin kantitatif analizi.....	66
2.6.3. Mantar Misel gelişimi üzerindeki etkinin belirlenmesi	66
2.6.4. Toplam oksidan (TAS) ve toplam oksidan durumunun (TOS) belirlenmesi.	66

2.6.5. Antibiofilm etkinin saptanması.....	67
3. DENEYSEL SONUÇLAR	69
3.1. FTIR ANALİZİ.....	69
3.2. MORFOLOJİ ANALİZİ	70
3.3. KOPOLİMER VE KOMPOZİTLERİN TERMOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ....	75
3.4. ANTİMİKROBİYAL ETKİ.....	76
3.5. ANTİOKSİDAN AKTİVİTE TESTİ.....	83
3.6. ANTİBİYOFİLM ETKİSİNİN TESPİTİ.....	85
3.7. POLİ(DEAEMA-ko-EMA) VE KOMPOZİTLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ.....	89
3.7.1. Dielektrik spektroskopik analizi	89
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	96
5. GELECEK ÇALIŞMALARA ÖNERİLER.....	96
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Konjuge çift bağ	1
Şekil 1.2. Konjuge yapıya sahip iletken polimerler.....	2
Şekil 1.3. Elektrik iletkenlik seviyeleri.....	4
Şekil 1.4. Moleküler orbital diyagramı.....	5
Şekil 1.5. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddelerde bant aralığı.....	5
Şekil 1.6. Polimer zinciri boyunca ve zincirler arası yük atlaması.....	7
Şekil 1.7. PIN'in olası polimerleşme yapıları	11
Şekil 1.8. PIN'in polimerleşme yollar: a)radikal-nötral monomer büyümesi ile b)radikal-radikal monomer büyümesi.....	13
Şekil 1.9. PIN'in 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-radikal monomer yoluyla polimerizasyon şematığı	14
Şekil 1.10. PIN'in 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-radikal monomer yolu ile polimerleşme mekanizması	16
Şekil 1.11. a)indol ve 1,3 yapısında polimerleşmiş PIN, b)PIN için 1,3 polimerleşme mekanizması	21
Şekil 1.12. Elektrostatik indüksiyon.....	23
Şekil 1.13. İki metal plaka arasındaki dielektrik malzeme	23
Şekil 1.14. Dielektrik geçirgenlik spektrumunu	24
Şekil 1.15. Dielektrik malzeme dielektrik relaksasyonu	25
Şekil 1.16. Nanokompozit malzeme yapı hiyerarşisi	29
Şekil 2.1. Poli(DEAEMA-ko-EMA) sentezine ait şema	58
Şekil 2.2. Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerin sentezine ait şema	61
Şekil 3.1. Poli(DEAEMA-ko-EMA), PIN poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlere ait FTIR görüntüleri	69
Şekil 3.2. Poli(DEAEMA-ko-EMA), PIN poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlere ait SEM görüntüleri	71
Şekil 3.3. PIN'ın EDX saha analizi.....	71

Şekil 3.4. Poli(DEAEMA-ko-EMA)'nın EDX saha analizi.....	72
Şekil 3.5. PC2'nin EDX analizi.....	72
Şekil 3.6. PC4'ün EDX saha analizi	73
Şekil 3.7. (a)2D AFM görüntüsü (b)3D AFM görüntüsü (c)Pürüzlülük analizi (d)PC4 kaplı camın kesit analizi (Tarama boyutu 5mm x 5 mm' dir)....	74
Şekil 3.8. Poli(DEAEMA-ko-EMA), PIN ve poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerin TGA eğrileri.....	75
Şekil 3.9. Standart antibiyoriğin Mueller Hinton agar üzerindeki antimikrobiyal etkisi.....	77
Şekil 3.10. Polimer kompozitlerin Mueller Hinton agar üzerindeki antimikrobiyal etkisi.....	77
Şekil 3.11. Polimer kompozitlerin Mueller Hinton agar üzerindeki antimikrobiyal etkisi.....	78
Şekil 3.12 Polimer kompozitlerin ve polimerlerin MİK görüntüleri.....	80
Şekil 3.13. TAS ve TOS Mikroplakları.....	84
Şekil 3.14. Bazı Streptococcus mutans izolatlarının geliştirdiği, test tüpü yöntemiyle belirlenen biyofilmlerinin farklı boyama sürecini gösteren Kristal Menekşe Rengi.....	87
Şekil 3.15. Kompleks dielektrik sabitinin gerçek kısmının (a), hayali kısmının (b) ve dielektrik kayıp tanjantının (c) frekans gelişimi.....	90
Şekil 3.16. Kapasitansın frekans gelişimi.....	92
Şekil 3.17. $\ln \sigma \omega$ (ω)'nın açısal frekans gelişimi.....	93
Şekil 3.18. Karmaşık empedansın mutlak değerinin frekans gelişimi.....	94
Şekil 3.19. Empedans düzlemi grafikleri.....	94
Şekil 3.20. Tüm numuneler için Smith şeması.....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Bazı iletken polimerlerin karşılaştırmalı özellikleri	3
Çizelge 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasal maddeler.....	54
Çizelge 2.2. Kompozitlerin poli(DEAEMA-ko-EMA), İndol ve Demir(III) klorür içeriği	60
Çizelge 2.3. Mueller Hilton agar bileşimi	64
Çizelge 2.4. Nutrient broth bileşimi	65
Çizelge 3.1. İncelenen bileşiklerin termal analiz sonuçları	76
Çizelge 3.2. Polimer kompozitler ve polimerlerin oluşturduğu zon çapları(mm)...	78
Çizelge 3.3. Polimer kompozitlerin ve polimerlerin MİK değerleri	81
Çizelge 3.4. Polimer kompozitlerin ve polimerlerin mantar misel inhibisyonu(%).	82
Çizelge 3.5. Polimer kompozitler ve polimerlerin TAS-TOS ve OSI değerleri.....	83
Çizelge 3.6. Biyofilm oluşumunun inhibisyonu (%).	88

RESİMLER DİZİNİ

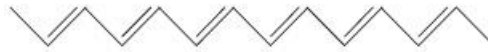
Resim 1.1. Yüzeyler arası polimerizasyonuyla elde edilen PIN polimerizasyonunun şematik gösterimi.....	10
Resim 1.2. Yüzeyler arası polimerizasyonuyla elde edilen PIN liflerin SEM fotoğrafları	10
Resim 2.1. Etüv.....	56
Resim 2.2. Su banyosu.....	57
Resim 2.3. Manyetik karıştırıcı - ısıtıcı	57
Resim 2.4. Dietilaminoetilmetakrilat-Etilmetakrilat'ın su banyosunda kopolimerizasyonu.....	59
Resim 2.5. Poli(DEAEMA-ko-EMA)'nın çöktürme işlemi	59
Resim 2.6. Poli(DEAEMA-ko-EMA)	60
Resim 2.7. a)İndol eklenmesi b) Yıkamanın ilk aşaması c) Yıkamanın son aşaması d) Yıkanmış kompozit	63
Resim 3.1. Bakteriyel yapışması kontrol eden bileşimlerinin şematik gösterimi...86	

1. GİRİŞ

1.1. İletken Polimerler

Birçok organik polimer elektriksel özelliği bakımından yalıtkandır. Poliasetilen iyot işleminin yalıtkan poliasetileni 10^4 S/cm'den daha fazla iletkenlik değerine sahip iletken bir malzemeye dönüştürdüğü 1977'den beri birçok iletken polimer geliştirilmiştir. π -konjuge polimer zincirleri olan polimerler, sentetik metaller olarak da bilinen iletken polimerlerdir (Shirakawa, 2001; MacDiarmid 2001). İletken polimerler, metaller gibi elektrik yüklerini aktarma özelliğine sahiptir. Metalik iletkenlikleri veya yarı iletkenlikleri ve diğer etkileyici özellikleri nedeniyle iletken polimerler, özellikle endüstriyel uygulamalarda hızla vazgeçilmez hale gelmiştir. Ancak birçok uygulamada metal benzeri iletkenlik sağlamasının yanı sıra, elektrik iletkenliğinin esneklik ve hafiflik gibi polimer özellikleriyle birleşimi birçok ticari uygulama için yeterlidir (Skotheim ve Reynolds, 2007). İletken polimerler, π -bağlı makromoleküllerin fizikini ve temel kimyasını anlamak ve geliştirmek için yeni ufuklar açmış; yeni nesil polimerlerin ve/veya malzemelerin üretimi konusun da öncülük yapmıştır (Heeger, 2001).

Polimerler genellikle yalıtkanlardır veya düşük elektrik iletkenlik özelliğine sahiptirler. Konjuge yapıya sahip polimerlerde, polimerler konjugasyon etkisinden dolayı iletken özellikleri elde eder. İletken polimer terimi, kafeslerindeki elektronlar aracılığıyla yeterli miktarda elektrik iletkenliğini sağlayan polimerler için kullanılır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Konjuge çift bağ

Polimerlerin elektronik iletkenliğe sahip olması için, polimer kafesinde elektronların zincir boyunca taşınımına izin veren uygun bölgelerin bulunması gerekir. Bu şartı sağlayan, ana zincir molekülünde konjuge çift bağlar olan polimerler yerine getirir (Şekil 1.2.). Diğer polimerlerden iletken polimerler arasında farklılık söz

konusudur. Bunun en temel özelliği ise sırasıyla değişen tek ve çift bağlardan meydana gelen bir zincir yapısına (konjugasyon) sahip olmalarıdır (Feast ve ark., 1996).

Literatürde bilindik birtakım iletken polimerler ve bunların kimyasal yapıları Şekil 1.2.'de gösterilmiştir. En önemli iletken polimerler polipirol, polikarbazol, politiyofen, polianilin ve bunlara ek olarak türevleri mevcuttur.

İletken Polimer	Yapı	İletken Polimer	Yapı
Polipirol		Polikarbazol	
Polianilin		Poli(parafenilen)sulfür	
Politiyofen		Poli(parafenilen)	
Pedot		Poliasetilen	

Şekil 1.2. Konjuge yapıya sahip iletken polimerler (Wallace ve ark., 2009)

1.1.1. İletken polimerlerin kullanım alanları

Çok fazla iletkenlik özelliğine sahip olduğu için iletken polimerler elektro-optik, moleküler ve nanoelektronik aletlerden elektromanyetik dalga absorbe edici ve korozyona karşı koruyucu olan uygulamalara kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır:

- › Antistatik kaplamalar
- › Biyosensörler
- › Enerji depolama, süperkapasitörler, lityum-iyon piller
- › Elektromanyetik kalkanlama

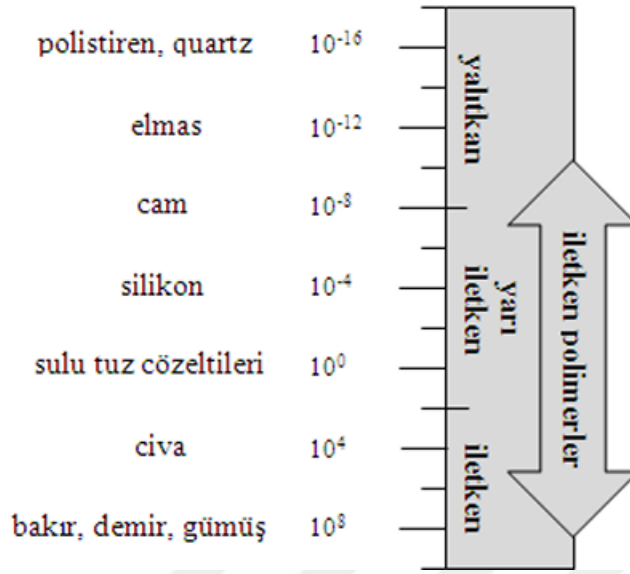
- › Elektrostatik boşalma
- › Elektrokromik aletler
- › İletken tekstiller
- › İletken yapıştırıcı ve mürekkepler
- › Gaz ayırıcı membranlar
- › Korozyon önleyici kaplamalar (Miller, 1993; Gençtürk, 2007).

Bir takım iletken polimerlerin proses edebilme ve kararlılık özellikleri Çizelge 1.1' de gösterilmiştir. Özellikle polipirrol ve politiyofenin; hem iletkenlik özelliğinin fazla olması hem de kararlılıklarının iyi durumda ve kusursuza yakın olması en önemli farklılıklarından birisidir.

Çizelge 1.1. Bazı iletken polimerlerin karşılaştırmalı özellikleri

Polimer	İletkenlik ($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)	Kararlılık	Proses Yeteneği
Poliasetilen	10^3-10^5	Zayıf	sınırlı
Polifenilen	1000	Zayıf	sınırlı
Polifenilensülfür	100	Zayıf	mükemmel
Polipirrol	100	İyi	iyi
Politiyofen	100	İyi	mükemmel
Polianilin	10	İyi	iyi

İletken polimerlerin iletkenlik değerleri $1,0 \times 10^{-7}$ ile $1,0 \times 10^2$ S/cm arasında değişmektedir. Şekil 1.3'te gösterilen iletken polimerlerin iletkenlik özellikleri metaller, yarı iletkenler ve yalıtkanlarla karşılaştırılmıştır.

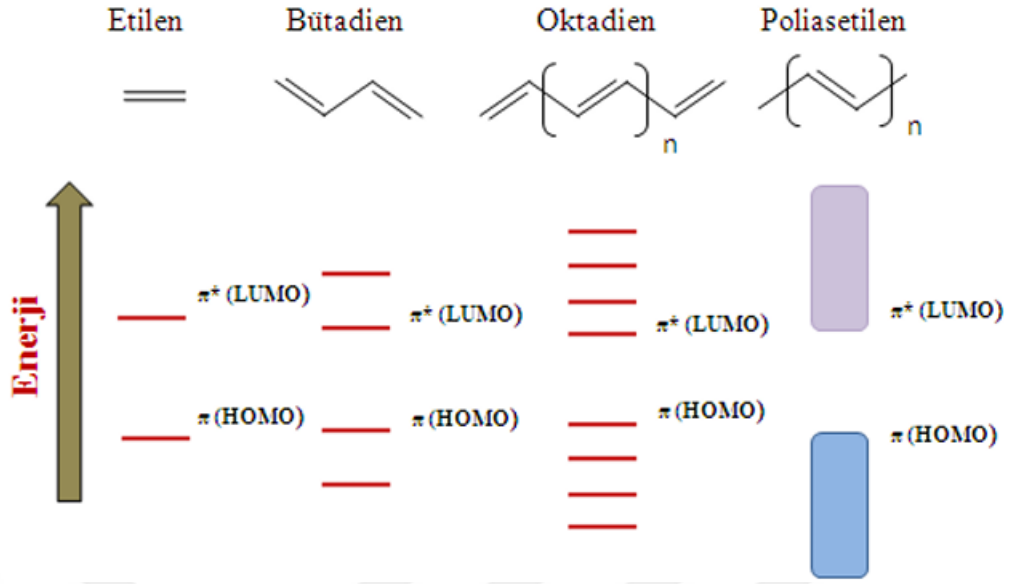


Şekil 1.3. Elektrik iletkenlik seviyeleri (Tabari, 2007)

1.1.2. Bant kuramı

Bant teorisine göre organik malzemeler, yüksek enerjili elektronlar ile iletkenlik bandı arasında büyük bir enerji boşluğuna sahip delokalize elektronlar vardır ayrıca bu sebeble yalıtkandır. Elektrik iletiminin gerçekleşebilmesi için elektronların serbestçe hareket ediyor olmalıdır. Bu, dolu ve boş bantların yan yana olduğunda başarılabilir. Bir maddenin enerji bantlarından biri tümüyle elektronlarla doluyorsa ve bir sonraki boş enerji bandı ile arasındaki enerji farkı büyükse, madde yalıtkandır. Metallerde bu enerji bandı bulunmadığından elektronlar rahatça hareket edebilir ve böylelikle iletim sağlanır. Bu nedenle bazı polimerler, metallerle yalıtkanlıklar arasında bir iletkenliğine sahiptir. Bu polimerlere de iletken polimerler denir (Saçak, 2008).

Bağ oluşurken iki yeni enerji seviyesi ortaya çıkar; bunların ilki iki elektronunda olduğu bağ enerji seviyesi ve/veya bağ orbitali (HOMO; en yüksek dolu moleküler orbital) ve boş olan anti bağ enerji seviyesi ve/veya anti bağ orbitalidir (LUMO; en düşük boş moleküler orbital). Bu olay Şekil 1.4'te ifade edilmiştir.



Şekil 1.4. Moleküler orbital diyagramı (Gençtürk, 2007)

Orbitallerin enerji seviyeleri arasındaki fark azalırken molekülün boyutu arttıkça da bağ orbitallerinin sayısı artmaktadır. Belirli bir alana gelindiğinde karşılıklı olarak ayrılan enerji seviyeleri yerine sürekli görünümünde bir bağ(=valens) enerji bandı meydana gelir. Elektronlar, rahatlıkla yer değiştirebilmesi valens bandı içerisinde hareket etmesinden kaynaklanır.



Şekil 1.5. Yalıtkan, yarı iletken ve iletken maddelerde bant aralığı (Saçak, 2008)

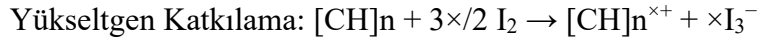
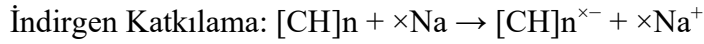
Bir başka enerji bandı olan iletim bandı oluşması için valens bandının oluşumuna yakın bir şekilde sayıları sonsuza doğru yaklaşan antibağ orbitalleri olması gerekir. İletkenlik ve valans bantları arasındaki mesafeye bant eşiği, bant eşiğini geçmek için gereken enerjiye ise bant eşik enerjisi denir (Şekil 1.5).

Bağ bandı enerji seviyeleri bütünüyle elektronlarla dolu ise elektronların bir yöne akımını elde etmek zordur. Böyle bir sistemde ısı veya ışık uyarımı yoluyla serbest elektronlar üretebiliriz. Bağ bandının en yukarı seviyesindeki elektronlar yeterli enerjiye ulaştıktan sonra bant eşiğini geçerek iletim bandının en alt seviyesindeki bir enerji seviyesine yerleşirler. Yalıtkanlarda bant aralığı bu geçişe izin vermeyecek kadar geniştir. Çoğu polimer yalıtıcıdır çünkü benzer davranış sergilerler (Jones, 1997; (Rupprecht, 1999). Yarı iletkenlerin band eşik enerjisi, yalıtkanlara göre daha düşüktür ayrıca iletkenlikleri de 10^{-8} - 10^{-2} S/cm arasında değişmektedir. Bu seviyedeki elektriksel iletkenlik düşük olarak görünse de, yeterince elektrik akımını sağlayacak kadar büyüklüktedir. Ana zinciri üstünde ardışık tek ve çift bağ bağları kapsayan konjuge polimerler yarı iletken özelliğini gösterir.

1.1.3. Katkılama (Doplama)

Polimer içerisinde ve polimer zinciri boyunca hareket edememe sebebi, elektronların polimer zinciri boyunca birbirinden farklı bağ uzunları ve yük taşıyıcılarının etkinliğinden kaynaklanıyor. Saf konjuge polimerlerin geniş bant aralıkları olduğu için, normal sıcaklıklarda taşıyıcı konsantrasyonu çok düşüktür. Bu sebepten dolayı konjuge polimerlerin zincir yapıları iletkenliğe uygun olsa da taşıyıcı konsantrasyonunun düşük olması sebebiyle iletkenlikleri düşüktür. Bu polimerleri elektriksel olarak iletken hale getirmek için, konjuge π bağlarına sahip polimerin uygun bir reaktifte indirgenmesi veya yükseltgenmesi gerekir. Bu işleme de katkılama (doplama) denmektedir. Katkılayıcı (dopant) adı verilen yükseltgen ve/veya indirgen kimyasal maddeler katkılama amacıyla kullanılır. Bunlar; kolaylıkla iyon oluşturabilen inorganik tuzlar veya bileşikler, nötr moleküller, organik ve polimerik maddeler olabilir (Rupprecht, 1999; Malinauskas ve Mazeikiene, 1997). Poliasetilen ilk katkılanmış iletken polimerdir. Katkılanmamış bir şekilde olan poliasetilen 10^{-9} S/cm iletkenliğine sahip olurken; iyotla yükseltgen katkılama sonucuysa 38 S/cm değerine erişmiştir (Shirakawa ve ark., 1977).

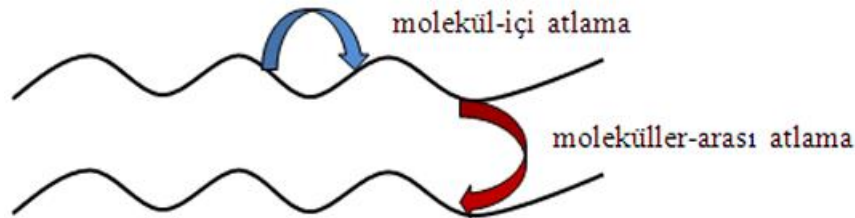
Poliasetilenin indirgen ve yükseltgen doplama reaksiyonları aşağıda gösterilmiştir:



Halojenlerle yapılan yükseltgen doplama işlemi p-katkılama (Doplama) olarak adlandırılır. Alkali metallarla yapılan indirgen doplama işlemi de n-katkılama (Doplama) olarak adlandırılır. İletken polimerler, katkılayıcı malzemesinin türüne ve katkılama derecesine bağımlı bir şekilde yalıtkan, yarı iletken veya iletkenlik derecelerinde olabilir. İletken polimerlerin elektriksel iletkenliği, katkı maddeleri ve/veya kimyasal-elektrokimyasal redoks reaksiyonları ile önemli ölçüde arttırabilir.

1.1.4. Atlama (Hopping)

Zincirler arasında da iletim gerçekleştirebilen bir polimer elektriksel iletkenliğini gösterir. Farklı polimer zincirleri arasındaki elektron transferi bir atlama mekanizmasıyla açıklanmaktadır (Şekil 1.6.).



Şekil 1.6. Polimer zinciri boyunca ve zincirler arası yük atlaması

İletken polimerlerdeki yük taşıyıcılarının olan hareketliliği iki bileşene bağlıdır:

Molekül-içi hareketlilik genel olarak polimerin zinciri boyunca yük aktarımını ifade ederken; moleküler-arası hareketlilik, bir zincirden komşu zincirlere doğru yük aktarımı anlamına gelir.

Elektrik alanı uygulanan bir iletken PPy, yük taşıyıcıları (polaron ve bipolaron) mecburi bir şekilde PPy'nin zinciri boyunca hareket etmeye başlar. Zincir boyunca

oluşan yük hareketlerinden daha çok miktarda enerji gereken hareket polimer zincirleri arasındaki yük hareketidir. Herhangi bir hata noktasına ulaşana yük taşıyıcıları zincirde, yüklerin taşınması için karşı zincirlere geçmek durumundadır. Bu nedenle, PPy'nin genel iletkenliği, zincir taşıma ve zincirler arası atlama bileşenlerinin bir kombinasyonu ile belirlenir (Mitchell ve ark., 1988). Polimer zinciri boyunca hareketlilik, PPy zincir yapısındaki konformasyonel ve kimyasal kusurlar nedeniyle sınırlıdır. Polimerizasyon sırasında birçok konformasyonel ve yapısal hata, PPy'nin zincirleri yapısı sebebiyle düzlemsel ve doğrusal olmasına karşın oluşabilir. Bu kusurlar, PPy'nin zincir doğrusallığını ve düzlemselliğini bozmaktadır. PPy'ye benzeyen iletken polimerlerdeki yüklerin zincirler arasındaki hareketlilikleri mühim bir şekilde yapısal düzenle ilişkilidir (Nogami ve ark., 1994).

1.2 Poliindol

Poliindon (PIN) elektroaktif bir polimerdir ve indol monomerinin kimyasal veya anodik oksidasyonu ile elde edilir. Çinko katalizörüyle damıtılmasıyla indol monomeri oluşur. Poliindollerin iyi termal kararlılık, yüksek redoks aktivitesi ve kimyasal kararlılık benzeri birtakım avantajları sebebiyle iletken polimerler içerisinde çok ilgi çekmektedir (Nie ve ark., 2007). PIN yalıtkan özellik gösterdiği durumda rengi bakırken yükseltgendiğinde koyu yeşil rengine döner.

Polipirolun (PPy) birtakım avantajları vardır. Bunlar; çevresel kararlılık, kolay yüzey filmi oluşturma ve iyi elektrik iletkenliğidir. Öte yandan poli(para-fenilen) (PPP) iyi bir termal kararlılığı da vardır. İndol hem pirol hem de benzen halkalarına sahiptir. Bu sebeple PIN hem PPy'nin hem de PPP'nin özellikleri vardır (Xu ve ark., 2005).

1.2.1. PIN sentezi

PIN ve PIN'in türevleri sentezi ve yapısal karakterizasyonu üzerine yapılan araştırmalar, bunların kimyasal (Billaud ve ark., 1994; Ryu ve ark., 2003). Ve esas olarak elektrokimyasal yöntemlerle sentezlendiğini (Billaud ve ark., 1994; Talbi ve Billaud, 1998). ortaya koyulmaktadır. Bugünlerde yapılan araştırmalar PIN'in emülsiyon ve yüzeyler arası polimerizasyonu yoluyla sentezlendiği bir sistem bildirmektedir (Koiry ve ark., 2007; An ve ark., 2008).

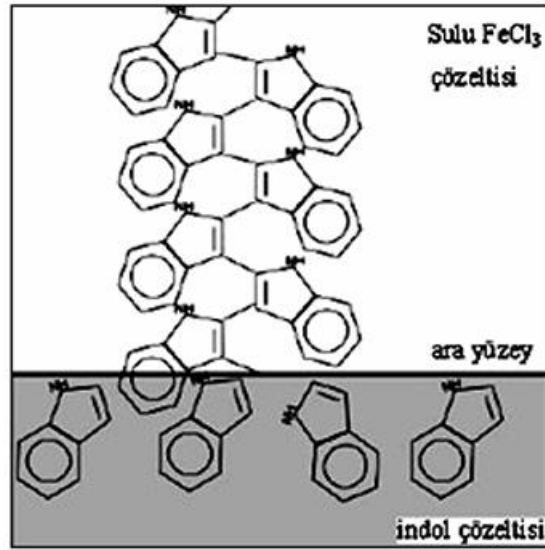
Literatürde kimyasal yöntemle PIN sentezi hakkında yapılan araştırmalar pek fazla yoktur. Bir çalışmada ise PIN kullanılan farklı tuzlar ve birden fazla çözeltiler ele alınarak kimyasal yöntemle azot atmosferinde sentezlenmiştir [20]. Tuz olarak FeCl_3 ve CuCl_2 tuzları; çözücü olarak da CH_3CN , CH_2Cl_2 , CH_3NO_2 , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ve CH_3OH kullanılmıştır. Oda sıcaklığında ölçülen sentezlenmiş polimerlerin ve farklı deneysel koşulların altında sentezlenen polimerlerin iletkenlikleri değiştiği sonucuna varılmıştır. FeCl_3 ile sentezlendiğinde PIN'in iletkenlik seviyesi 10^{-3} Scm^{-1} görülürken, CuCl_2 ile hazırlanan PIN'in iletkenliği 10^{-2} Scm^{-1} olarak gözlenmiştir.

Başka bir çalışmada FeCl_3 tuzu ve kloroform çözücüsü karışımında PIN sentezlenmiştir (Ryu ve ark., 2003). Oluşturulan PIN' tiyol ile 1:1 oranında kompozit hazırlanmıştır ayrıca elektrokimyasal özellikleri de gözlemlenmiştir. Sonuç olarak hazırlanan kompozitin iletkenliği oda sıcaklığında $7,0 \text{ Scm}^{-1}$ 'e yükselmiştir.

PIN'in elektrokimyasal polimerizasyon yoluyla sentezi hakkında kimyasal yöntemle göre çok daha fazla araştırma yapılmıştır. Bir çalışmada PIN, susuz ortamda LiClO_4 ve LiBF_4 çözeltileri kullanılarak

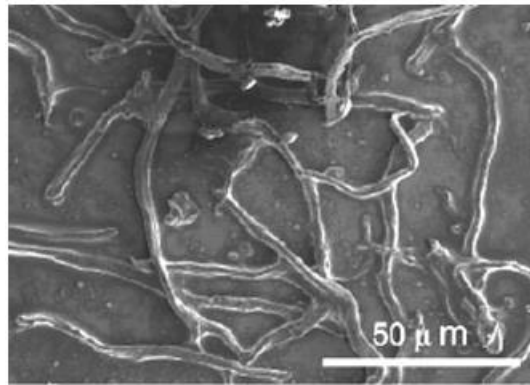
Elektrokimyasal yöntemle sentezlenmiştir (Billaud ve ark., 1994). Sentezlenen PIN'in elektrokromik özelliklere sahip stabil ve iletken bir polimer olduğu gözlenmiştir. PIN ve poli(5-siyanoindol)'ün elektrokimyasal özelliklerinin araştırıldığı bir diğer çalışmada ise sentez LiClO_4 ve asetonitril kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Talbi ve Billaud, 1998). Bu çalışmada polimerizasyonun aynı elektrokimyasal özelliklere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Koiry ve ark. (2007), yüzeyler arası polimerizasyonu (interfacial) yoluyla PIN lifleri oluşmuştur (Koiry ve ark., 2007). Bunu yapmak için FeCl_3 'ün su içinde çözülmesiyle elde edilen sarı rengindeki çözeltiyi diklorometan içinde çözünen indole eklenmiş ve karışmayan iki çözeltinin arayüzünde yeşil renk tonunda PIN oluşumu sonucuna varılmıştır (Şekil 1.7.).



Resim 1.1. Yüzeyler arası polimerizasyonuyla elde edilen PIN polimerizasyonunun şematik gösterimi (An ve ark., 2008)

Elde edilen polimerlerin 200-1000 μm uzunluğunda ve 5-25 μm çapında liflerden meydana geldiği SEM fotoğraflarından (Resim 1.1.) görülmüştür. Süre ile bu liflerin çapı ve uzunlukları kontrol altına alınabilir. Liflerin yumuşak olma özelliğinden rahat bir şekilde eğilip bükülmektedir. Kütle polimerizasyonuyla sentezlenen PIN polimerleri lifli bir yapı olmakta fakat tanecikli yapı meydana gelmektedir.



Resim 1.2. Yüzeyler arası polimerizasyonuyla elde edilen PIN liflerinin SEM fotoğrafı (Koiry ve ark., 2007)

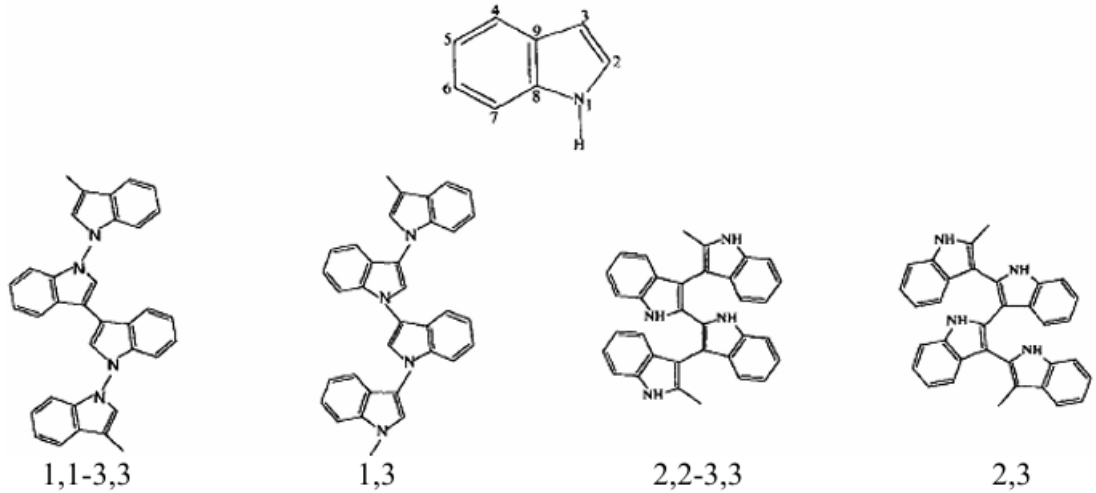
Yüzeyler arası polimerizasyonunda; ara yüzeydeki protonlanmış indol monomerleri elektrostatik olarak yüklenir, polimerizasyonun gerçekleştiği 2,3 karbon

atomu kendiliğinden konumlanır ve böylece uzun lifler elde edilir (Liu ve ark., 1999). Kütle (bulk) polimerizasyonunda bu tür kendi kendine düzenlenmenin olmamayışından lif oluşumu engellenmektedir.

1.2.2. PIN'in polimerleşme mekanizması

PIN; polimerizasyon verimi ve iletkenliği bilinen diğer N içeren iletken polimerlere göre daha düşük olduğundan diğer iletken polimerler kadar ilgi görmemiştir. Bu davranışın bir nedeni, polimerizasyon şekilleri geniş aralığı olmasındandır. Çoğu eşleşme dallanma ve düzlemsellik sapmalarına neden olmaktadır. Bu dallanmalar ve sapmalar, standart spektroskopik tekniklerle analiz edilmesi zor olan karmaşık yapılar oluşturmaktadır. Eşleşme modelleri arttıkça konjugasyon uzunluğu kısalır ve iletkenlik azalır (Yurtsever ve Yurtsever, 2002).

PIN'in polimerizasyon mekanizması hakkında birçok fikir vardır. Şekil 1.8., PIN'in olası polimerizasyon yapılarını göstermektedir:



Şekil 1.7. PIN'in olası polimerleşme yapıları (Talbi ve ark., 1997)

Tourillon ve Garnier (1982), indolün elektrooksidasyonunun iletken bir polimer oluşturmaması ve katkılanmış PIN'in IR sonuçlarında N-H bandının görünmemesi nedeniyle monomerlerin 1,1 pozisyonunda birbirine uyduğunu öne sürmüştürler (Tourillon ve Garnier, 1982). Ancak ikinci bir polimerizasyon aşamasını içermiyordu.

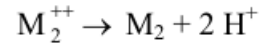
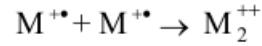
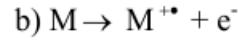
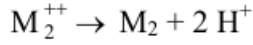
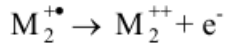
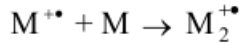
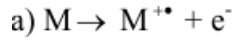
Waltman ve ark. (1984), indolün polimerizasyonunu ve spin yoğunluğu hesaplamalarını kullanarak 5-pozisyonuna eklenen elektron çeken-verici sübstitüentlerin etkisini araştırmış ve polimerizasyonun esas olarak 1,3-pozisyonunda meydana geldiğini ileri sürmüldür (Waltman ve Diaz, 1984).

Zotti ve ark. (1994), biindol çiftleri üzerinde çalışmış ve bağlanmanın 2.2-3.3 pozisyonunda görüldüğü bildirilmiştir (Zotti ve ark., 1994).

Talbi ve ark. (1996), IR ve XPS çalışmalarından 1.1-3.3'e eşdeğer bir değer önermiştir (Talbi ve ark., 1996). FTIR, Raman ve EEL (elektron energy loss) spektroskopisini kullanarak katkılı ve katkılı indollerin özelliklerini araştırdıkları başka bir çalışmada, bağlanmanın 2,3-karbonda gerçekleştiğini ve monomerlerin sıralamasının oluşabileceğini ve düzenli olarak istatistiksel veya rastgele olabileceğini göstermiştir (Talbi ve ark., 1997).

PIN 1,3 konumu ile bağlandığında ana zincir $(-N-CH=CH-)_n$ 'dir; 2,3 konumundan bağlandığında $(-CH=CH-)_n$ 'dir. Bu sebeple N-H bağının FTIR çalışmaları ile bulunan polimerizasyon mekanizmasının belirlenmesine yol göstermektedir (Dhanalakshmi ve Saraswathi, 2001). FTIR, polimerde içinde kalan nemden etkilendiğinden, N-H bağlarını tespit etmek için ^1H NMR çalışmaları da kullanılır. Xu ve diğerleri. (2006) elektrokimyasal yöntemle sentezledikleri PIN'i ayrıntılı bir ^1H NMR çalışmasıyla irdelemiş ve indolün 2,3 konumundan polimerize olduğunu göstermişlerdir (Xu ve ark., 2006). Polimerizasyon sırasında yüksek enerji içeriğine sahip olduğu tespit edilen C-N ve N-N bağlarını içeren yapılar oluşur. FTIR araştırmalarının beraberinde termodinamik ve kinetik çalışmalar da polimerizasyon sırasında monomerler arasındaki bağların azot atomu içermediğini göstermiştir. Kinetik çalışmalar C2-C3 bağının uygun olduğunu önerisinde bulunulmuştur (Talbi ve ark., 1999).

Araştırmacılar teorik çalışmalar sonucunda PIN'in polimerizasyon mekanizması için iki ana mekanizma bildirmişlerdir. Bu mekanizmalardan ilki polimerizasyonun radikal (M^+) -nötral monomer (M) büyümesiyle gerçekleşmesi, ikincisi ise radikal-radikal monomer büyümesidir. Her iki mekanizma da Şekil 1.9'da gösterilmektedir:

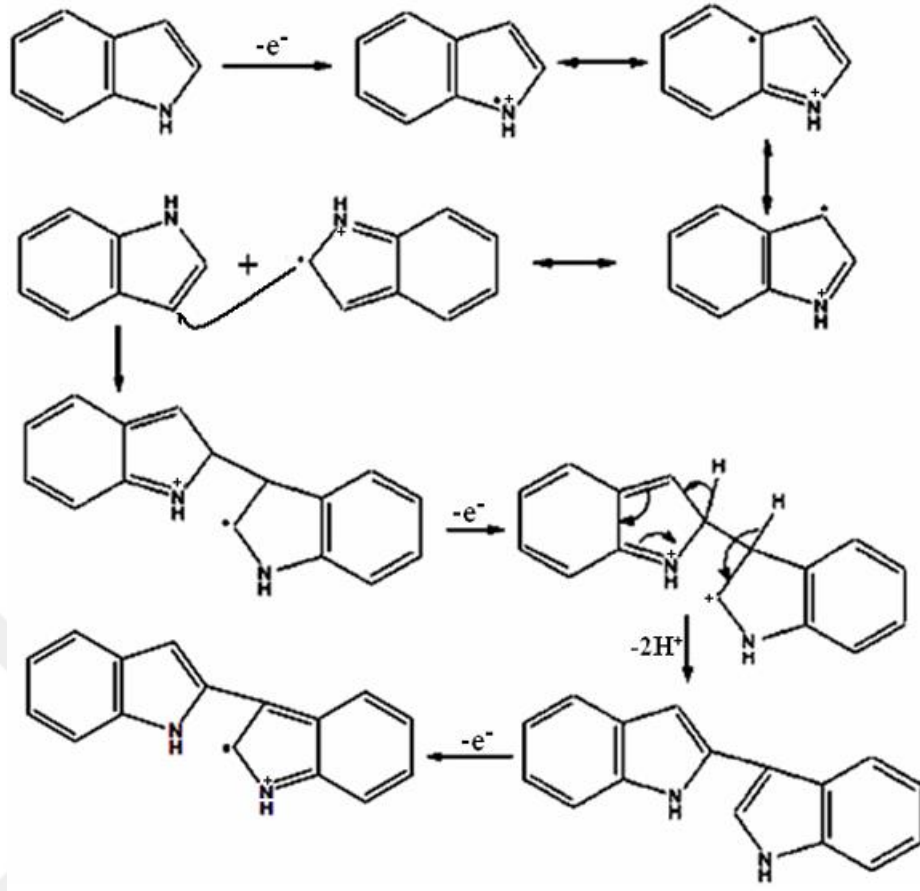


Şekil 1.8. PIN'in polimerleşme yolları: a) radikal-nötral monomer büyümesi ile, b) radikal-radikal monomer büyümesi

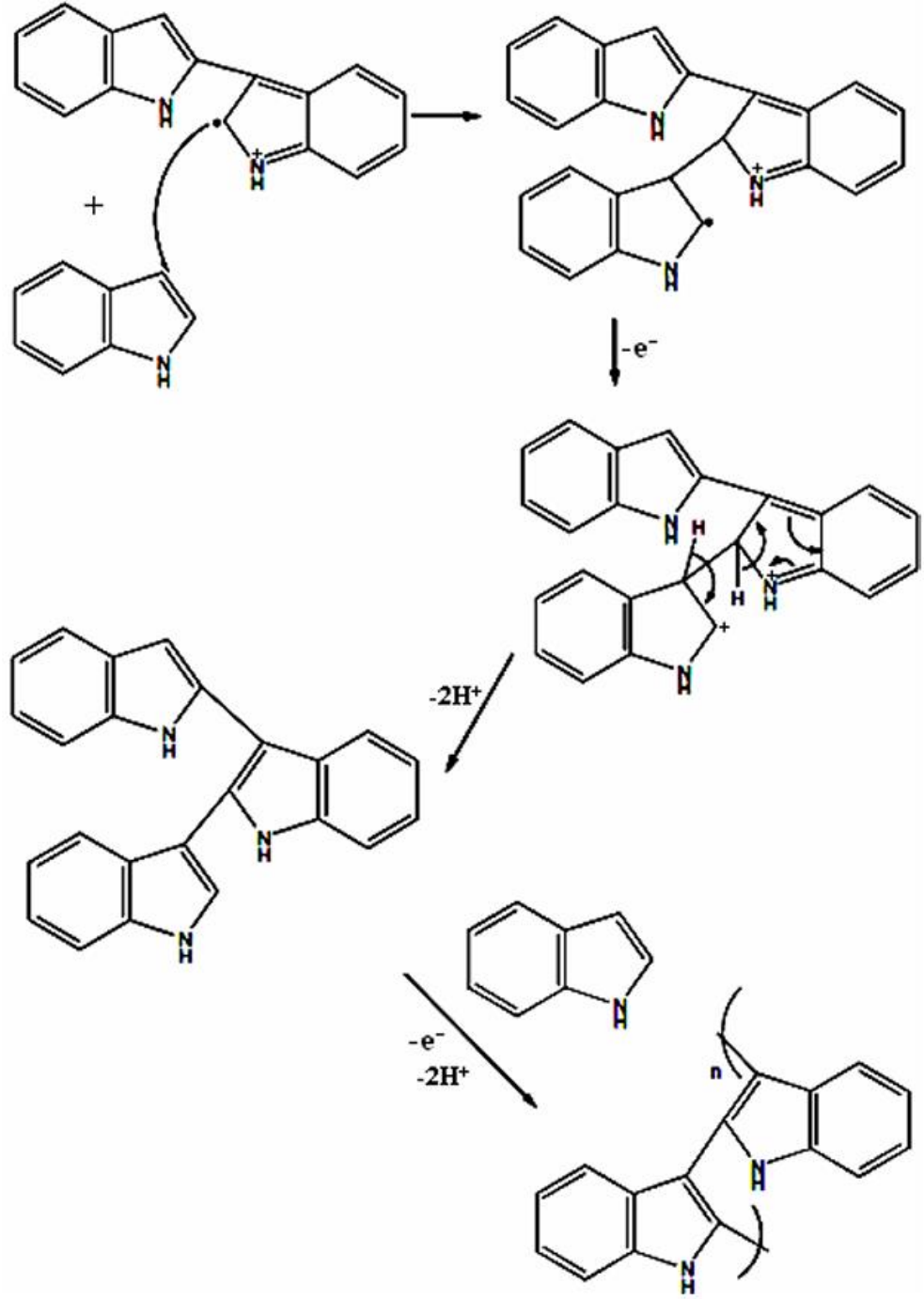
Yurtsever ve ark. (2002), indolün polimerizasyon mekanizması üstünde yaptıkları araştırmada polimerizasyonun 2,3 mekanizması ve radikal-radikal katılması yoluyla gerçekleştiğini ileri sürmüşlerdir (Yurtsever ve Yurtsever, 2002). Buna temel olarak, bir radikal bir monomere saldırdığında reaksiyonun ekzotermik olduğunu ve bir radikal bir radikale saldırdığında reaksiyonun endotermik olduğunu gösterilmiştir.

Talbi ve ark. (1998, 1999) çalışmalarında radikal katyonlar ile nötral monomerler arasında bir büyüme reaksiyonu meydana geldiğinde polimer zincirinin monomer bağlarının kontrol edilebileceğini ve daha düzenli yapıların oluşabileceğini öne sürmüşlerdir (Talbi ve ark., 1998; Talbi ve ark., 1999). Buna dayanarak polimerizasyonun radikal nötral bir monomer ile ilerlediğini öne sürülmüştür. Aynı çalışmalarda aktif merkezlerin birleşmesi ve sönümlenmesi ile polimerizasyonun sona erdiğini göstermişlerdir.

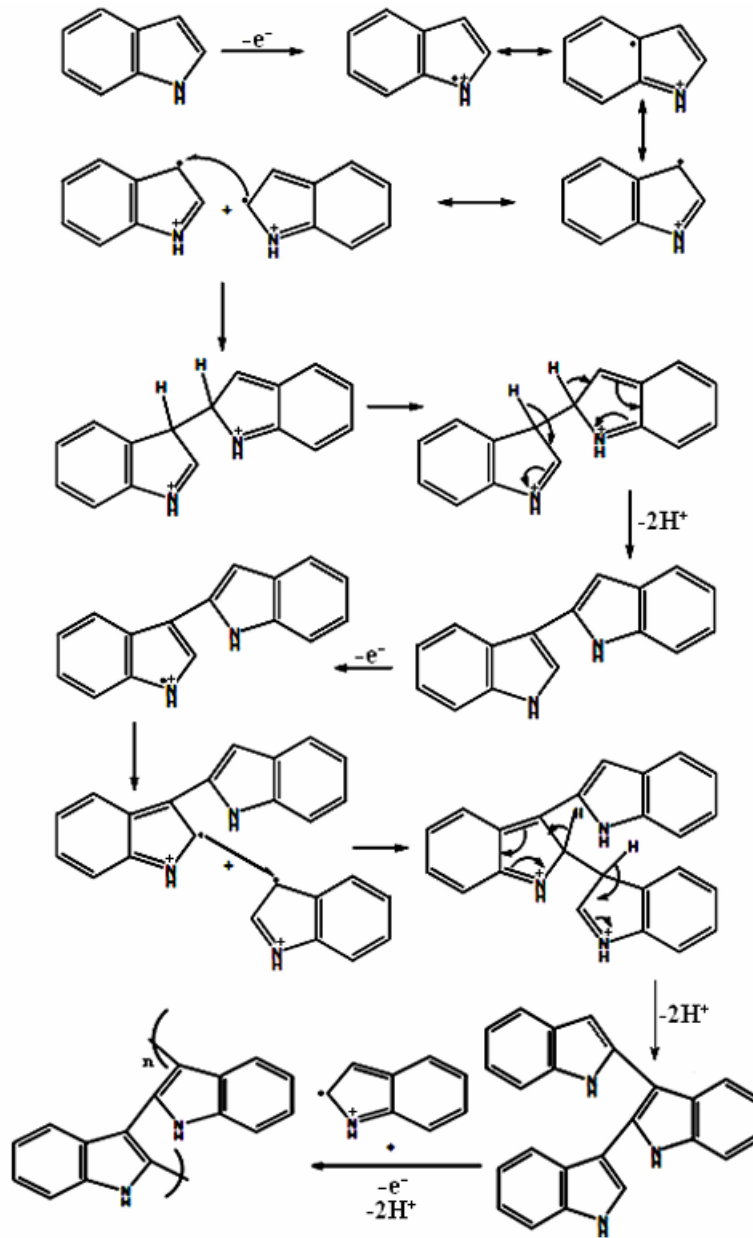
Yapılan araştırmalar gösteriyorki PIN polimerizasyonunun 2,3 mekanizmasıyla gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. 2,3 mekanizması iki farklı biçimde ortaya çıkabilir. Birincisi, Şekil 1.10'da gösterildiği gibi nötral bir moleküle saldıran bir radikal olarak ortaya çıkar ve ikincisi, Şekil 1.11'de olduğu gibi bir radikalın bir radikalle birleşmesiyle gerçekleşir.



Şekil 1.9. PIN'in 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-nötral monomer yoluyla polimerizasyon şematığı (Saraç ve Özkara, 2004)



Şekil 1.9(Devamı). PIN'in 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-nötral monomer yolu ile polimerleşme mekanizması (Saraç ve Özkara, 2004)



Şekil 1.10. PIN'in 2. ve 3. karbon atomları üzerinden radikal-radikal monomer yolu ile polimerleşme mekanizması (Saraç ve Özkara, 2004)

1.2.3. Polimerleşme yöntemleri

İletken polimerlerin sentezlenmesinde farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan biri gaz fazı yöntemidir. Bu yöntemde monomer, bir yükseltgen madde ve yalıtkan bir polimer matriksi karışımına belli bir sıcaklığa maruz kalmasıyla buhar fazında polimerize

olup çökmekte ve böylelikle iletken polimerler veya kompozitler oluşturulmaktadır (Ojio ve Miyata, 1986).

Fotobaşlatıcılarla başlatılan fotokimyasal polimerleşme, UV lambası veya güneş ışığı ortamlarında meydana gelmektedir. Örnek olarak rutenyum (II) kompleksleri fotobaşlatıcı göreviyle tiyofenin fotokimyasal polimerleşmesinde kullanılmıştır (Kaneto ve ark., 1982). Fotoışınlama ile rutenyum(II), rutenyum(III)'e yükseltgenir ve elektron transferi ile polimerizasyon başlamaktadır. Başka bir araştırma anilinin fotokimyasal polimerizasyonu, CCl₄ ve tetrabutylamonyum bromür kullanılarak asetonitril içerisinde gerçekleştirildi (Syed ve Dinesan, 1991).

Metatez (çifte bozunma) polimerizasyon yöntemi, monomerdeki tüm çift bağlarının polimerde kalmasıyla diğer polimerizasyon yöntemlerinden farklılık gösterir. Kullanılan katalizörler Ziegler-Natta polimerizasyonunda kullanılanlara benzer veya hatta aynı olabilir; geçiş metallerinin organometalik alkillenmiş bileşikleridir.

Uzun aromatik yapılar oluşabilmesi adına heteropolimerlerin ısıtma işlemiyle heteroatomun uzaklaşması polimer sentezlerindeki işlem piroliz yöntemidir. Polimer hidroliz ürünleri de piroliz koşullarına bağlı olarak kararlı polimerin yapısına ve şekline bağlı olarak toz şeklinde veya film şeklinde olabilir.

Çok ince düzgün katmanların (50-100Å) hazırlanması için plazma polimerizasyon tekniği kullanılır. Saf polimerin oda sıcaklığında, yüksek manyetik alanda ve istenilen kalınlıkta sentezlenmesinde kullanılır ve düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi nedeniyle soğuk plazma polimerizasyonu olarak da adlandırılır. Araştırmada plazma polimerizasyon tekniği kullanılarak cam, alüminyum ve NaCl kristalleri gibi farklı yüzeyler üzerine tiyofen filmleri hazırlandı (Bhat ve Wavhal, 1998).

Bir diğer yöntem, iki farklı sistemin ara yüzeyinde iletken polimer sentezidir. Bu yöntemde; tuzlu su çözeltisi ve asit çözeltisi karışımıyla oluşan polar faz ile monomer ve benzen, toluen gibi çözücülerin karışımıyla olan apolar fazın arasındaki ara yüzeyde iletken polimer sentezlenmektedir (Genies ve ark., 1990).

Emülsiyon polimerizasyon yönteminde monomer, eş zamanlı olarak polar olmayan veya hafif polar bir solvent ve dodesilbenzensülfonik asit (DBSA) gibi bir asidik tuz yüzey aktif madde ile karıştırılarak bir emülsiyon oluşturulur ve belirli bir sıcaklık ve

sıcaklıktan sonra viskoz bir emülsiyon oluşturulur. Bu emülsiyon, iletken bir polimer elde etmek için çöktürülür ve saflaştırılır (Osterhalm ve ark., 1994).

1.3. Poliindol ve Türevlerinin Sentezi

Son zamanlarda heteroatomik iletken polimerler üzerine yapılan araştırmaların artmasının nedeni kimyasal stabiliteleri ile polaronik ve dipolar iletkenlik mekanizmalarının dikkat çekmesidir (Tüken ve ark., 2004). Literatürde poliindol ve türevlerinin kapalı yapısının polipirrol ve polianilininkine benzer olmasına rağmen iletkenliğinin daha düşük ancak termal kararlılığının daha iyi olduğu bildirilmektedir (Saraji ve Bagheri, 1998). Üstelik poliindolün kararlılığıyla yüksek redoks aktivesi, yavaş bozunma hızı ve hava şartlarında kararlılığı (air stability) üstün yanlarıdır (Xu ve ark., 2005). Ancak toz halindeki poliindolün fiziksel özellikleri iyi değildir.

Poliindol filmlerin hazırlanması ve yapısal karakterizasyonu üzerine çok az çalışma yapılmıştır (Saraji ve Bagheri, 1998). Araştırmalara bakıldığında indol ve türevlerinin kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerle sentezlendiği görülmektedir.

1.3.1. Kimyasal polimerizasyon

PIN'in kimyasal yöntemle sentezi üzerine çok fazla çalışma yoktur. Bir çalışmada poliindol, azot havası altında üç farklı tuz ve farklı çözeltiler kullanılarak kimyasal olarak sentezmiştir (Maarouf ve ark., 1994). Tuz olarak demir (III) klorür (FeCl_3) ve bakır (II) klorür (CuCl_2) tuzları, çözücü olarak ise CH_3CN , CH_2Cl_2 , CH_3NO_2 , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ve CH_3OH kullanılmıştır. Sentezlenen polimerlerin iletkenlikleri oda sıcaklığında ölçülmüş ve sentezlenen polimerlerin iletkenliklerinin farklı test koşulları altında değiştiği gözlemlenmiştir. FeCl_3 ile sentezlenen PIN'in iletkenliği $10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$, CuCl_2 ile hazırlanan PIN'in iletkenliği ise $10^{-2} \text{ S cm}^{-1}$ görülmüştür.

Başka bir çalışmada PIN, FeCl_3 tuzu kullanılarak kloroform ve su karışımında sentezlenmiştir (Ryu ve ark., 2003). Elde edilen bu PIN'in tiyol ile 1:1 karışımı hazırlanarak elektrokimyasal özellikleri araştırıldı. Sonuç olarak hazırlanan kompozitin iletkenliği oda sıcaklığında $7,0 \text{ S cm}^{-1}$ 'e yükselmiştir.

Rajasudha ve ark. (2005), PIN ile PVA, PVAc ve sodyum dodesil sülfat kullanarak çeşitli karışımlar sentezlemiş ve sentezlenen karışımları kolloidal boyutta incelemişlerdir (Rajasudha ve ark., 2005). Sulu ve susuz ortamda sentezledikleri PIN'leri

farklı tuz/monomer oranları kullanarak karakterizasyonunu yapmışlardır. Yükseltgen olarak demir (III) klorür (FeCl_3) ve amonyum persülfat ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) tuzlarını kullanmışlardır. Yapmış oldukları kompozitlerin parçacık boyutunu ölçmüşler ve sodyum dodesil sülfattan yapılan bileşiğin en küçük parçacık boyutuna sahip olduğunu bulmuşlardır.

1.3.2 Elektrokimyasal polimerizasyon

PIN'in elektrokimyasal polimerizasyon yoluyla sentezi üzerine kimyasal yöntemden daha fazla çalışma yapılmıştır.

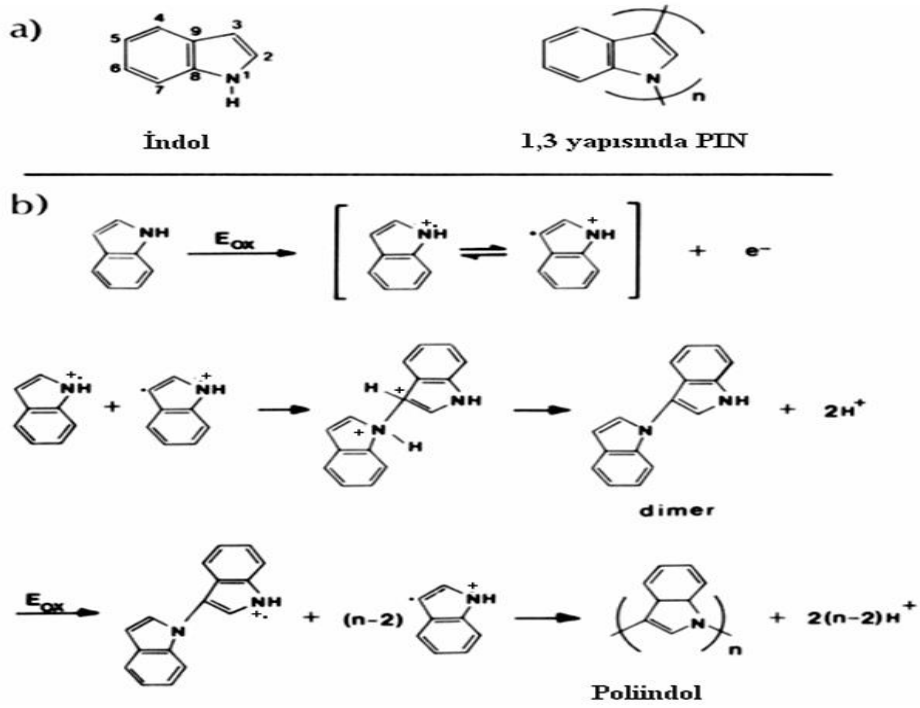
Bu araştırmada (Billaud ve ark., 1994).; PIN, susuz ortamda LiClO_4 ve LiBF_4 çözeltileri kullanılarak elektrokimyasal yöntemle sentezlenmiştir. Sentezlenen PIN'in elektrokromik özelliklere sahip, kararlı ve iletken bir polimer olduğu gözlenmiştir. PIN'in oda sıcaklığında iletkenliğinin 5×10^{-3} ile $8 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$ arasında olduğu belirlenmiştir.

Waltman ve ark. (1984) bir araştırmada (Waltman ve ark., 1984)., PIN ve bazı türevlerini elektrokimyasal yöntemle sentezlenmiştir. Bu araştırmada referans elektrot olarak NaCl ile doyurulmuş kalomel elektrot, karşı elektrot olarak altın ve çalışma elektrotu olarak Pt kullanılmıştır. İndol türevleri olarak 1-metilindol ile 7-metilindol, indol-2-karboksilik asit, 3-siyanoindol, 5-aminoindol gibi monomerler kullanılarak ve elde edilen polimerlerin filmlere dönüştürülüp dönüştürülemeyeceği konusunda kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Ayrıyeten indol monomerlerinin polimerizasyon sonucunda olası yapıları incelenmiştir. Sonuçlar poli(1,5-indol), poli(2,6-indol) ve poli(1,3-indol) üzerine odaklanmıştır. Sonuç olarak bu araştırmada poliindolün olası yapısının poli(1,3-indol) olduğu kabul görmüştür. Ancak indol polimerizasyonunun genelde 2,3 mekanizması yoluyla gerçekleştiği kabul görülmektedir (Talbi ve ark., 1999).

PIN filmlerinin elektrokimyasal çöktürme yoluyla elde edildiği bir çalışmada, 0,03 M indol içeren bor triflorür, dietil eterde (BFEE) sentezlenmiştir (Xu ve ark., 2005). Elde edilen PIN filminin iletkenliğinin 10^{-1} Scm^{-1} olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada FTIR ve ^1H NMR verilerine dayanarak polimerizasyon mekanizmasında 2 ve 3 numaralı karbon atomlarının yer aldığı ve polimerizasyonun 2, 3 mekanizması yoluyla gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

PIN ve poli(5-siyanoindol)'ün elektrokimyasal özelliklerini araştıran bir çalışmada, LiClO₄ ve asetonitril kullanılarak sentezlenmiştir (Talbi ve Billaud, 1998). Bu araştırmada, sentezlenen polimerlerin aynı elektrokimyasal özelliklere sahip olduğunu gösterilmiştir.

Bir araştırmada optik özellikleri incelenen pirol bazlı heterohalkalı konjuge polimerler, elektrokimyasal polimerizasyon yoluyla poliindol türevlerini elde edilmiştir (Abe ve ark., 2003). Çalışma sonucunda polimerlerin kloroformdaki sıvı fazda maviden mavi-yeşile geçiş gösterdiği görülmüştür. İndolün polimerizasyonu ile modifikasyonu ve fenilen ile kopolimerleşmesiyle polimerin fotoluminesans özelliklerinin arttırıldığı görülmüştür. Elektrokimyasal yöntemle üretilen poliindol tetrafloroboratın polimerizasyon mekanizması ve fizikokimyasal özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada, 0,7 V seviyesinde film halinde poliindol tetrafloroborat ((PIN)BF₄) elde edilmiş ve FTIR ve TGA gibi karakterizasyon çalışmalarıyla PIN'in yüksek sıcaklıklarda kararlı olduğu sonucuna varılmıştır (Talbi ve ark., 1999). PIN için çıkarılan polimerizasyon mekanizması genellikle 2,3'lük bir mekanizma olmasına rağmen, bu çalışmada 1,3'lük bir mekanizma önerilmiştir (Şekil 1.12.).



Şekil 1.11. a) İndol ve 1,3 yapısında polimerleşmiş PIN, b) PIN için 1,3 polimerleşme mekanizması (Cho ve ark., 1992)

Polimerler elektrokimyasal olarak elde edilse de dopant ile birlikte polimerizasyon oluşur. Bir araştırmada, polimer elde edilmesi ardından elektrokimyasal yolla çok fazla yükseltgenmeye maruz bırakılmıştır (Xu ve ark., 2005). PIN'in çok fazla yükseltgenmeyle bozunduğu ve elektroaktif özelliklerini kaybettiği gözlemlenmiştir. Ek olarak bu araştırmada, sulu ortamda elde edilen PIN filminin kalınlığını kontrol etmenin, susuz bölgede elde edilen filmin kalınlığını kontrol etmekten daha zor olduğunu gözlemlenmiştir.

1.4. Dielektrik Malzemeler

Genellikle, dielektrik; bir elektrik alanı tarafından polarize edilebilen bir ortama dielektrik denir. Bir elektrik alanının etkisi altında elektronlar ve atomlar yer değiştirir. Bunun sonucunda elektrik yük merkezleri değişir ve elektrik polarizasyonu meydana gelir. Ortaya çıkan elektrik dipolleri, dielektrik malzemenin yüzeyinde elektrik yükünün birikmesini sağlar. Polarizasyon, bir maddenin moleküllerinin elektrik dipol momentlerinin, bir elektrik alanındaki elektrik alanıyla aynı yönde yönlendirilmesini

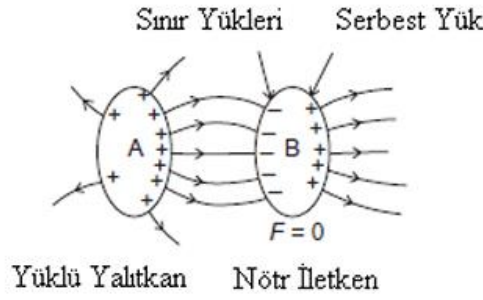
ifade eder. Bir elektrik dipolü birbirine çok yakın iki zıt yükten (veya eşdeğer olarak içinden bir akımın aktığı çok küçük bir doğrusal iletken) meydana gelir. Bir elektrik dipolü, üzerinden bir akımın aktığı bir iletken başka bir şey değildir (Fernandes ve ark., 2017).

Elektrik dipol momenti (μ) ise;

$$\mu = Qd \quad (1.5.1)$$

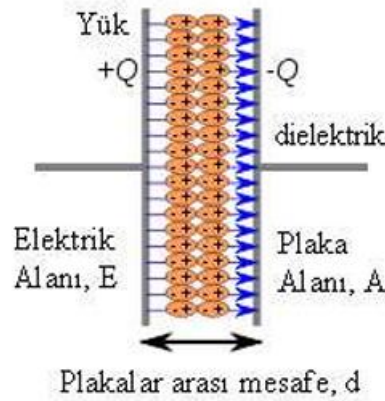
Formülü ile belirtilir. d , iki zıt yük arasındaki mesafedir. Elektrik dipol momenti (μ), negatif yükten pozitif yüke alınan vektör miktarıdır ve birimi coulomb-metre'dir. Bir birim dipol momenti 1 Debye = $3,33 \times 10^{-30}$ Coulomb-metredir (Raju, 2003). Maddeyi oluşturan moleküller, dipol momentleri olsun veya olmasın bir elektrik alanına yerleştirildiğinde, geçici olarak ortaya çıkıp alana en azından kısmen paralel hale gelebilirler. Bu sebeple, aralıklı paralel plaka bir kondansatörün plakaları arasındaki potansiyel farkı, plakalar arasına bir dielektrik malzeme yerleştirildiğinde azalır.

İletken bir malzeme, metaller gibi birçok hareketli bağımsız yük taşıyıcısından oluşur. Bunun gibi iletken malzemelerde elektrostatik indüksiyon olayı hakimdir. Şekil 1.13.'te ifade edildiği gibi, yüksüz iletken B malzemesi, pozitif yüklü A yalıtkanının yanına yerleştirildiğinde; A malzemesinin oluşturduğu elektrik alanı B malzemesindeki serbest elektronların A yakınındaki yüzeye doğru yönlendirilmesine neden olur. Böylelikle buradaki elektrik alanı, A malzemesi yakınındaki B malzemesinin yüzeyinde negatif, diğer tarafında ise pozitif yük oluşmasına sebep olur. Elektrostatik indüksiyon olarak tanımlanan bu olay. Yarı iletkenlerde ve dielektrik malzemelerde hareketli yük taşıyıcıların sayısı atom sayısından azdır. Elektrik alanı, hareketli yük taşıyıcılarının hareketi sırasında elektrostatik indüksiyona benzer şekilde yükün ortalama polarizasyonuna sebep olur (Kao, 2004).



Şekil 1.12. Elektrostatik indüksiyon (Kao, 2004)

Elektrik polarizasyon olarak ifade edilen olgu bir atom veya molekül üzerindeki pozitif ve negatif yüklerin değişimini ve dipollerin elektrik alanı yönünde yönlendirilmesidir. Elektrik polarizasyonu, harici bir elektrik alanının neden olduğu bir malzemedeki yüklerin yeniden dağıtılması olarak da ifade edilebilir Gauss yasası, elektrik polarizasyonundan kaynaklanan bazı dielektrik olaylarını ifade etmek için kullanılır. Gauss yasasına göre belirtilmiş hacimdeki elektrik akışı, içindeki toplam net yüke eşittir.



Şekil 1.13. İki metal plaka arasındaki dielektrik malzeme (Thoms ve ark., 2017)

Şekil 1.14'te gösterildiği gibi, alanı A olan iki paralel metal plaka ve aralarında mesafe bulunan bir sistem varsayılırsa, sol plaka pozitif yük (+Q) ve sağ plaka negatif yük ile yüklenir (-Q); plakalardaki bu yükler, plakalar arasında yük (Q) ile orantılı bir potansiyel fark (V) yaratır. Bu durumda:

$$V \propto Q \quad (1.5.2)$$

$$V = Q/C \text{ veya } Q = CV \quad (1.5.3)$$

C, genellikle kapasitans olarak adlandırılan bir orantı sabitidir.

Plakaların yüzey yük yoğunluğu σ_s ile gösterilirse, yük (Q) şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q=C(F.d)=\sigma_s A \quad (1.5.4)$$

Burada F elektrik alan şiddetidir ve $F=V/d$ 'dir.

(2.4) denklemi kullanılarak kapasitans aşağıdaki gibi yazılabilir:

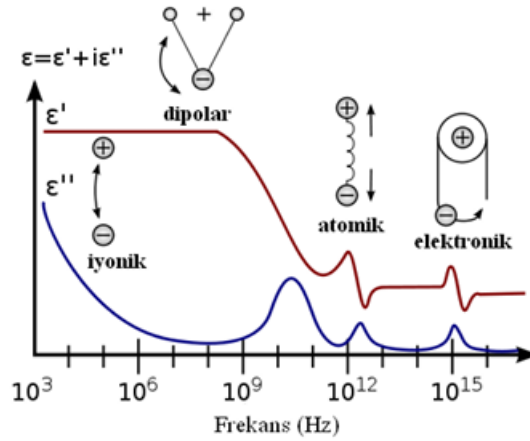
$$C=Q/V=[(\sigma_s A)/(F.d)]=\epsilon(A/d) \quad (1.5.5)$$

Buradan

$$\epsilon=\sigma_s/F \quad (1.5.6)$$

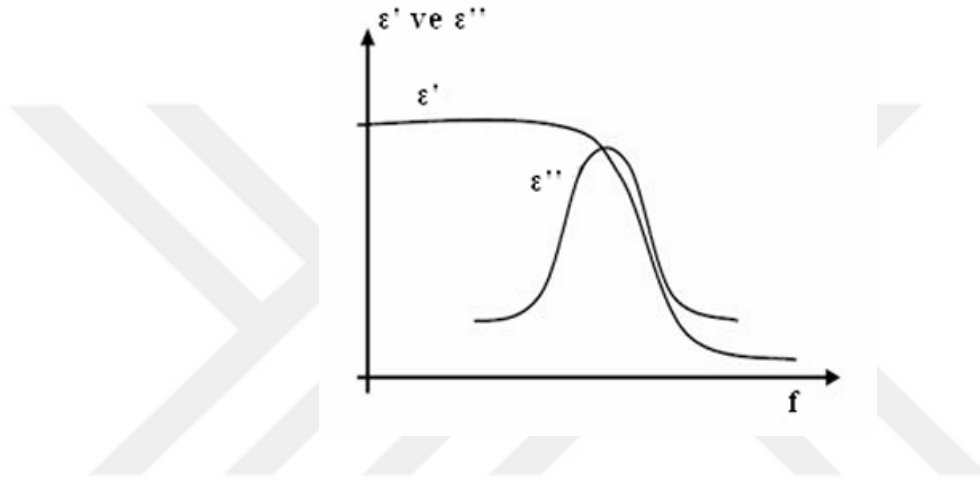
elde edilir. ϵ iki plaka arasındaki malzemenin geçirgenliğidir.

Dielektrik malzemelerin önemli elektriksel özelliklerinden biri geçirgenlik (veya genellikle dielektrik sabiti olarak adlandırılan göreceli geçirgenlik) kavramıdır. Dielektrik sabiti, alternatif elektrik alanının frekansına ve zamanla değişen alanın değişim hızına güçlü bir şekilde bağlıdır (Kao, 2004). Ayrıca dielektrik sabiti sıcaklık ve basınç gibi fiziksel parametrelerin yanı sıra kimyasal yapıya da bağlıdır. Geçirgenlik olarak da adlandırılan malzemenin elektrik dipol momentleri ile dış elektrik alanı arasındaki etkileşime dayanmaktadır (Volkov ve Prokhorov, 2003).



Şekil 1.14. Dielektrik geçirgenlik spektrumu (Volkov ve Prokhorov, 2003)

Şekil 1.15 geniş bir frekans aralığında meydana gelen farklı dielektrik relaksasyon süreçlerini göstermektedir. Dielektrik tepkinin yapısı, statik bir elektrik alan tepkisi veya zamanla değişen bir dielektrik tepki olabilir. Doğrudan polarizasyon olayıyla ilişkili olan ve genelde dielektrik sabiti olarak adlandırılan geçirgenlik, dielektrik malzemelerin önemli bir dielektrik özelliğidir. Frekansa bağlı dielektrik ölçümleri, dielektrik geçirgenliğin gerçek ve sanal kısımları arasında farklı davranışlarla sonuçlanır. Birçok dielektrik mekanizmanın olduğu sonucuna varılabilir. Her dielektrik mekanizma, sürecin karakteristik bir zamanında karakteristik bir frekans etrafında dağıtılmıştır.



Şekil 1.15. Dielektrik malzeme dielektrik relaksasyonu (Urban ve ark., 1999)

Dielektrik relaksasyon, bir dielektrik malzemenin moleküllerinin iç yapılarına veya moleküler düzenlemelerine bağlı olarak yönelim polarizasyonunu ifade eder. Relaksasyon süresi aynı zamanda bir dielektrik içindeki moleküllerin hareketinin bir ölçüsü olarak veya bir dipolün yöneliminden zamanla değişen bir elektrik alanının bir sonucu olarak da tanımlanabilir. Malzemelerin rezonans frekanslarına karşılık gelen relaksasyon frekansı, elektrik alanının frekans relaksasyon frekansından düşükse polarizasyon kolaylıkla üretilir ve elektrik alanını takip eder. Bu hususta dielektrik kayıpları ihmal edilebilir düzeydedir. Frekans artıp relaksasyon bölgesine ulaştıkça polarizasyon alanının gözlemlenmesi zorlaşır ve faz farkı artar. Bu durumda kayıplar da en büyük olur. Frekans artmaya devam ettikçe polarizasyon olmaz ve dielektrik sabiti hızla azalır. Polarizasyon yoksa dielektrik kaybı da yoktur (Şekil 1.16).

Bir dielektrik malzeme, beş ana elektriksel polarizasyondan bir veya daha fazlasına sahip olan atomlardan veya moleküllerden oluşur:

Elektronik polarizasyon: Nötr bir atomda, pozitif yükler çekirdektedir ve negatif yüklü elektronlar çekirdeğin etrafına dağılmıştır. Çekirdeğe alan yönünde bir kuvvet uygulandığında elektronlar ters yönde itilmesi dış elektrik alanının kullanılması sonucudur. Elektronik polarizasyon, aynı atomdaki negatif elektronların ve pozitif çekirdeklerin zıt yer değiştirmesinden kaynaklanır. Çekirdek ve elektronların bir elektrik alanında zıt yönlerde hareket etmesi ve iki yük merkezinin birbirini çekmesi ve ardından dengeye ulaşmasıyla oluşan indüklenen torka elektron polarizasyonu denir. Bu tür polarizasyon çok kısa bir gevşeme süresine sahiptir ve elektromanyetik spektrumun görünür dalgasında veya ultraviyole frekansında bulunur. Elektronik polarizasyonun çok kısa bir dielektrik kaybı vardır.

Dielektrik malzemedeki pozitif ve negatif iyonların birbirine karşı zıt yönde hareket etmesi sonucu atomik veya iyonik polarizasyon oluşur.

Karmaşık iyonların veya moleküllerin sürekli dipollerden meydana gelen dipolar polarizasyondur.

Bu tip polarizasyon, dış elektrik alanının yokluğunda bile gözlemlenmesi kendiliğinde oluşan polarizasyondur.

Hareketli yüklerle ilgili olan ara yüzey polarizasyonudur.

Polarizasyon polimerik malzemelerin bir özelliğidir ve yapılarından meydana gelir. Elektrik alanının etkisi altındaki herhangi bir polimer belirli bir dereceye kadar polarize olur. Dielektrik sabiti malzemenin polarizasyon derecesini gösterir. Polarizasyon derecesi, malzemede oluşan ve harici bir elektrik alanının etkisi altında yönlendirilen dipollerin yoğunluğuna ve boyutuna göre değişim göstermektedir. Bir elektrik alanının etkisi altında sınırlı bir mesafe boyunca dipollerin konumunu ve yönünü değiştirmeye dielektrik polarizasyon denir. Dielektrik kayıpları polarizasyon tipine bağlıdır. Yüzey yükü polarizasyonuna bağlı dielektrik kayıplar yaklaşık 10^4 Hz'de, dipolarizasyona bağlı dielektrik kayıplar yaklaşık 10^8 Hz'de, atomik polarizasyona bağlı dielektrik kayıplar yaklaşık 10^{12} Hz'de ve elektronik polarizasyona bağlı dielektrik kayıplar yaklaşık 10^{16}

Hz'de meydana gelir] (Raju, 2003; Urban ve ark., 1999). Malzemelerin dielektrik özellikleri, kompleks dielektrik geçirgenlik [ϵ^* veya $\epsilon^*(\omega)$] ile karakterize edilir:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1.5.7)$$

ϵ' : Kompleks elektriksel geçirgenliğin gerçek kısmı veya dielektrik sabiti

ϵ'' : Kompleks elektriksel geçirgenliğin sanal kısmı veya dielektrik kaybı

Karmaşık elektriksel geçirgenliğin gerçek kısmı olan dielektrik sabiti (ϵ'), karakteristik bir adımda artan frekansla azalır. Ayrıca yalıtkanda depolanan enerji miktarını ölçmek için uygulanan bir elektrik alanının etkisi ile de tanımlanır. Sanal kısım, dielektrik kayıp (ϵ''), frekans (veya sıcaklığa karşı sıcaklık) çizimlerinde bir tepe noktası gösterebilir ve uygulanan bir elektrik alanı nedeniyle bir yalıtkanda kaybedilen enerji (kayıp) miktarı olarak adlandırılır. (Kremer ve Schönhals, 2003; Paulauskas ve White, 2004).

1.5. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme; aynı veya farklı olmak üzere iki veya daha fazla malzemenin makro, mikro ve nano boyutta bir araya getirilerek en uygun özelliklerinin tek bir malzemede oluşması veya yeni bir özellik oluşturmak amacıyla oluşturulan malzemelere denir. Kompozit malzeme bir birleşik malzemedir ve kendisini oluşturan malzemelerle aynı özellikte olmaz, farklı bir özelliktedir. Kompozit malzemelerin bileşenlerin en iyi özellikleri bir araya gelir ve bu en avantajlı durum olarak görülür (Acar, 2008).

Kompozit malzemelerin yapılmasının amacı aşağıda yazılan özelliklerin bir veya bir den fazlasını daha iyi bir seviyeye çıkarmaktır. Bu özellikler:

- › Mukavemet (Yorulmaya, Aşınmaya ve Korozyona karşı)
- › Elektriksel ve Isıl İletkenlik
- › Kırılma Tokluğu
- › Kolay Şekillendirilebilme
- › Yüksek Sıcaklığa Dayanım
- › Maliyet

1.5.1 Polimer matrisli kompozitler

Son zamanlarda tek bir malzemenin eksikliklerini gidermek amacıyla iki veya daha fazla bileşenin karıştırılmasıyla elde edilen polimer matrisli kompozitlere olan ilgide önemli bir artış yaşanmaktadır. Örnek olarak, polimerleri farklı iletkenliğe sahip dolgu maddeleri ile birleştirmek, kapasitörler gibi elektronik endüstrisinde kullanılabilecek daha iyi fiziksel özelliklerde olan polimer matrisli kompozitler üretebilir.

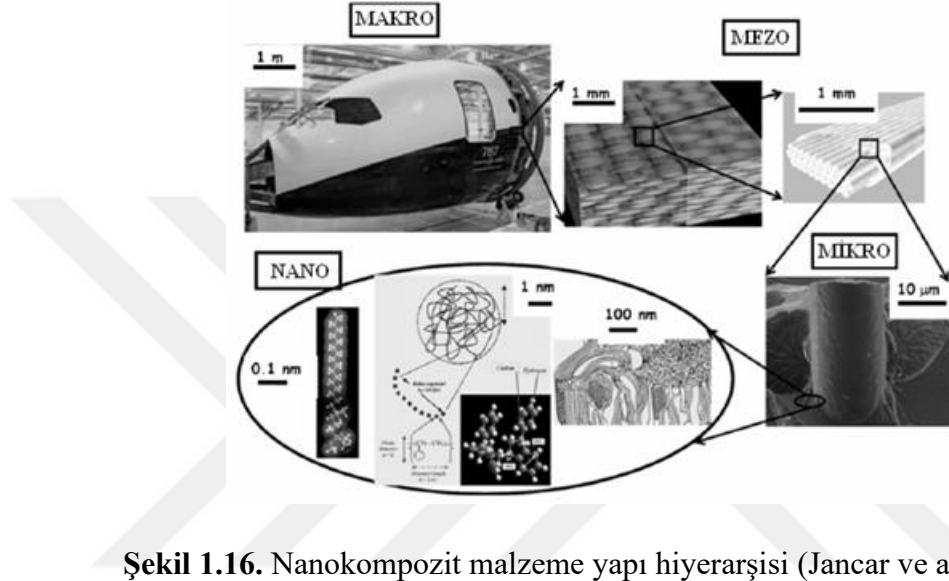
Matris, polimer matrisli kompozit malzemelerin özelliklerini belirler. Polimer kompozit matriks malzemesini görevi ise kompozit malzemeye şekil verir ve onu bir arada tutmasını sağlar. İlaveten kompozit malzemeyi çevresel faktörlerden kaynaklanan kimyasal ve fiziksel hasarlara karşı korur. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül dayanım (mukavemet/özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Örnek olarak grafit/epoksi kompozitler çelikten daha hafiftir ancak yaklaşık beş kat daha güçlüdür. Öte yandan karbon fiberlerin spesifik elastikiyet modülü alüminyumun beş katıdır. Bu avantajlar, havacılık endüstrisinde polimer kompozitleri alüminyum alaşımlarından üstün kılmaktadır. Başlıca gelen avantajları düşük maliyet, yüksek mukavemet ve kolay üretim prensipleri olmalarıdır.

Kompozit malzemelerde kullanım yerine bağlı olarak mukavemet, hafiflik, esneklik, çevre şartlarına (nem, güneş ışığı vb.) dayanıklılık ve darbe dayanımı vb. özelliklerin yanı sıra ısı genleşme katsayıları, yorulma, çatlama ve kırılma, çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti vb. değerlerinin uygun olup olunmadığı istenir. Polimer kompozit malzemelerin gelişmesiyle birlikte tüm bu özelliklerin tek çatı altında birleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Polimer kompozit malzemeler; Havacılık, otomotiv, enerji, inşaat, denizcilik, enerji, ulaştırma vb. birçok endüstride çeşitli amaçlarla kullanımı giderek artmaktadır. Polimer ve sentetik elyaf teknolojisinin gelişmesinin yanı sıra polimer kompozit malzemeler tekstil endüstrisinde birçok farklı amaç için uygulanabilmektedir (Dang ve ark., 2003; Dang ve ark., 2004).

1.5.2 Polimerik nanokompozitler

Nano boyuta mikro boyuttan transferi, fiziksel özelliklerde olağanüstü değişikliklere yol açmaktadır. Nano boyutlu malzemeler belirli bir hacimde geniş

bir yüzey alanına sahiptir (Hussain ve Hojjati, 2006). Nanokompozitler iki veya daha fazla nanopartikülün veya nano boyutta malzemenin çeşitli elverişli olan teknikler kullanılarak birleştirilmesiyle oluşan özel bir kompozit malzeme türüdür. Bu tür malzemeler mükemmel fiziksel özelliklere sahiptir. Ayrıca birçok kullanım alanına sahiptir. Nanokompozitler olurken oluşan yeni özellikleri; ana bileşenlerin karakteristik özelliklerinin tek bir malzemede başarıyla birleştirilmesiyle sonuçlanır.



Şekil 1.16. Nanokompozit malzeme yapı hiyerarşisi (Jancar ve ark., 2010)

Şekil 1.16'da Boeing 787 Dreamliner'ın gövdesinin belirli bir bölümünü örnek olarak nanokompozit malzemenin hiyerarşik yapısını göstermektedir. Polimer nanokompozitler, polimer matrisinde çok az miktarda nanopartikül dağıldığında modül, tokluk, optik özellikler, elektriksel iletkenlik, gaz ve solvent taşınması vb. gibi malzeme özelliklerinde önemli bir gelişme gösterir (Jancar ve ark., 2010). Örnek olarak çok küçük miktarlarda nano dolgu maddeleri içeren polimer nano kompozitler, mikro boyutlu parçacıklarla doldurulmuş geleneksel plastiklerle karşılaştırıldığında önemli ölçüde gelişmiş sertlik, termal direnç ve sınır özellikleri gösterir.

Nanopartiküllerin polimer matriks içindeki dağılımı, polimer malzemelerin özellikleri üzerinde büyük intibaya sahiptir ve bu homojen dağılımın polimer matrikslerde elde edilmesi çok zordur. Ayrıca nanopartiküllerin geometrisi de (örnek

olarak nanotüp, çok katmanlı nanopartiküller vb.) özelliklerin değişmesinde büyük rol üstlenmektedir (LeBaron ve ark., 1999; Odegard ve ark., 2005). Mekanik ve reolojik özelliklere ek olarak, karbon nanotüplerin ve grafit katkılı nanokompozitlerin geliştirilmesi, bu malzemelerin elektriksel özelliklerinin değiştirilmesinde önemli ölçüde role sahiptir (Ahm ve ark., 2006; Sumin ve ark., 2010).

Son zamanlarda, nanopartiküllerin polimer matrikslere dahil edilmesine yönelik tekniklerin geliştirilmesi adına pek çok incelemeler yapılmıştır. Tipik olarak bu kombinasyonlar, bir polimer çözeltisi veya sıvı formdaki bileşenlerin karıştırma veya karışım yoluyla eklenmesini gerektirir. Genel olarak nanomalzemeler, çok yüksek en boy oranlarından dolayı verimliliği artırır. Bir nanokompozitin özellikleri, bileşenlerinin boyutundan ve bu iki bileşenin karışma derecesinden oldukça çok etkilenir. Nanokompozitlerin özelliklerinde farklılık göstermesi, kullanılan bileşenlere ve hazırlama yöntemlerine göre değişiklikler göstermiştir (Gangopadhyay ve De, 2000; Park ve ark., 2001).

1.5.3 İletken polimerik kompozitler

Mikro ve nano yapıları fonksiyonel iletken polimer yapıların kullanım alanları genişleyip çok popüler hale gelmiştir. Bu uygulamalar bu tür özelliklerden kaynaklanmaktadır; mükemmel elektriksel, elektrokimyasal optik ve manyetik özelliklerinden dolayıdır.

Son zamanlarda konjuge çift bağ iletken polimerler büyük önem kazanmıştır. Buna neden olan belli başlı özellikleri vardır; yarı iletkenleri ve/veya metalik iletkenlikleri ve diğer etkileyici özellikleri bu önemi katmıştır. Ayrıca endüstriyel uygulamalarda paha biçilmez bir göreve sahiptir (Wang ve ark., 2001; Iroh ve Levine, 2003). Polipirol gelecekte ticari uygulamalar adına için umut veren iletken polimerdir. Çünkü yüksek elektrik iletkenlikleri, iyi çevresel kararlılığı ve iyi redoks tersinikliği gibi özellikleri sebebiyle umut veriyor. Ancak PPy; hassas yapısı, çözünmezliği ve zayıf işlenebilirliği nedeniyle uygulamaları kısıtlıdır. Bu kısıtlamalar aşılabılır ancak tekstil yapılarının konjuge polimerlerle birleştirilmesiyle kompozit oluşmasıyla aşılr (Zhang ve ark., 2001; Sahoo ve ark., 2007). Kompozit malzemelerin önemi özellikle yüksek performanslı ürünlerde giderek artmıştır. Termal stabilitenin artırılması birçok uygulamada kompozit malzemeler için çok faydalıdır. İletken polimer matriksinde

kompozit yapı formunda iletken bir polimer içeren; Elektriksel iletkenliği polimerlerin istenen fiziksel özellikleriyle birleştirmeye yönelik bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, tekstil yapılarının mekanik özellikleri ile iletken polimerlerin elektriksel özelliklerinin birleştirilmesiyle oluşturulan iletken kompozitlerin tasarımında sayısız imkanlar sunmaktadır. Tekstil yapılarının/ yüzeylerinin yeni uygulamalar ve özelliklerle geliştirilmesi son zamanlarda oldukça önem kazanmıştır. Bu önemli özelliklerden biri de tekstil yapılarının elektriksel iletkenliğidir. Elektriksel olarak iletken özelliklere sahip tekstil yüzeyleri şunlardır:

- › elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip kumaşlar
- › antistatik giysiler ve malzemeler
- › askeri uygulamalar (radar önleyici kumaşlar)
- › sensör özellikli giysiler
- › anti bakteriyel kumaşlar
- › güç tutuşur tekstiller
- › zemin döşemeleri vb endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır (Kuhn ve ark., 1995; Lekpittaya ve ark., 2004; Micusik ve ark., 2007; Molina ve ark., 2008; Kaynak ve Hakansson, 2008).

İletken polimer kompozit malzemeler, polimerlerin mekanik özelliklerini iletken polimerlerin elektriksel özellikleriyle birleştiren ve özellikle elektromanyetik koruma uygulamalarında faydalı olan yeni bir malzeme türüdür. Bu tür kompozitler göreceli yüksek iletkenliğe ve dielektrik sabiti değerlerine sahiptir. İletken polimer kompozitler, kimyasal olarak konjuge monomerlerin yalıtkan polimer matrislerinde polimerizasyonu (matris polimerizasyonu) yoluyla elde edilebilir (Murugendrappa ve ark., 2005). İletken polimer kompozitler metallere göre hafif ve esnektir. Elektromanyetik dalgaları yalnızca yansıtmakla kalmaz aynı zamanda emerler (Koul ve ark., 2000; Wojkiewicz ve ark., 2001). Elektromanyetik parazitliği azaltmak için yüksek dielektrik sabitine sahip iletken polimer kompozitler geliştirilmiştir (Panwar ve ark., 2009).

1.6. Literatür Araştırması

Alaa Ibrahim Elaibi, Saad H. Ammar, Israa Sh. Mohammed ve Zaid H. Jabbar'ların 2023 yılında yapmış oldukları çalışma:

Organik boyalar ve bakteri ile kirlenmiş atıksu işlemi göz önüne alındığında, yüksek performanslı, çevre dostu ve maliyet etkin fotokatalitik malzemelerin üretilmesi esastır. Bu bağlamda, manyetik grafitten elde edilen yeni bir ayrılabilir ve verimli tungstofosforik asit (TPA) ile iletken poliindol (PID) tarafından sabitlenmiş organik–inorganik hibrid kompozit, görünür LED aydınlatmasıyla metil turuncu (MO) ve gram-negatif bakteri (*P. aeruginosa*) için fotokatalitik bozunma için sentezlenmiş ve kullanılmıştır. Elde edilen g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID-TPA fotokatalizörü XRD, VSM, FESEM, EDX, TEM, BET yüzey alanı, DRS, PL ve FTIR yöntemleri ile karakterize edilmiştir. g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID-TPA katalizörü (0.1 g/l katalizör dozu), 70 dakika içinde MO için yüksek bir yok etme aktivitesi (97.5%) ortaya koymuştur. Kontrollü elektronik yapıya sahip g-C₃N₄, iletken PID polimeri ve TPA heteropoliasidinin yüksek redoks özellikleri sayesinde, g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID-TPA heteroyapısı ile artırılmış bir bozunma aktivitesine ulaşılmıştır. Ayrıca manyetik g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID-TPA katalizörleri, fotokatalitik performanslarında azalma olmadan beş kez geri dönüştürülebilir. g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID-TPA katalizörü, düşük g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID-TPA dozunda *P. aeruginosa*'ya karşı olağanüstü antibakteriyel aktivite göstermektedir (94.49%). Ayrıca, antibakteriyel mekanizma, g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID ve TPA arasındaki sinerjik performansın hücre zarlarına zarar verdiğini, oksidatif stres seviyelerini artırdığını ve nihayetinde *P. aeruginosa*'nın ölümüne neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, g-C₃N₄/Fe₃O₄@PID-TPA katalizörünün in vitro sitotoksik etkisi, bir MTT testi ile değerlendirilmiştir (kolorektal karsinoma HCT116 hücre viabilitelerinde %25 ila %29 azalma elde edilmiştir). Bu çalışma, özellikle çevresel uygulamalar için çoklu fonksiyonlar sunan heteropoliasitlere dayalı fotokatalizörler olarak organik–inorganik kompozitler geliştirme konusunda yeni bir bakış açısı sunmaktadır (Alaa ve ark., 2023).

Hareesh Pradeep, Bindu m., Shwetha Suresh, Anjitha Thadathil ve Pradeepan Periyat'ların 2022 yılında yapmış oldukları çalışma:

Potansiyel antimikrobiyal ajanlar olarak poliindol bazlı nanokompozitlerdeki son eğilimler ve ilerlemeler: Çoklu ilaca dirençli mikropların neden olduğu enfeksiyonlar, tıp alanında büyük bir zorluk oluşturmakta ve bu patojenlere karşı potansiyel adaylar olarak hareket edebilecek yeni biyomedikal ajanlara olan ihtiyacı gerekli kılmaktadır. Birçok poliindol tabanlı nanokompozit, reaktif oksijen türleri (ROS) salma yeteneği sergilediği için mükemmel antimikrobiyal özelliklere sahip bulunmuştur. Poliindolün özellikleri, onları antibiyotikler ve antifungal ilaçlara alternatif olabilecek potansiyel adaylar haline getirmek için hassas bir şekilde ayarlanabilir. Bu derleme, biyomedikal uygulamalar için şimdiye kadar rapor edilen poliindol tabanlı nanokompozitlerin antimikrobiyal özelliklerini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu derleme, poliindol tabanlı nanokompozitlerin biyomedikal uygulamaları üzerine gelecekteki araştırmalar için kapsam ve olanaklar hakkında açık bir anlayış sunacaktır (Hareesh ve ark., 2022).

Mohd Shoeb, Mohammad Mobin, Mohd. Ahmar Rauf, Mohammad Owais, ve Alim H. Naqvi'lerinin 2018 yılında yapmış olduğu çalışma:

Günümüzde metisilin dirençli *Staphylococcus aureus* (MRSA) tarafından neden olan enfeksiyonlar ve sayısız farklı bakteriyel enfeksiyon, dünya genelinde milyonlarca insanın ölümüne neden olmaktadır. Bu nedenle, daha iyi ve etkili antimikrobiyal ajanların geliştirilmesi için birkaç strateji keşfedilmiştir; bunlardan biri, iki boyutlu karbon tabanlı nanokompozitlerdir. Bu bağlamda, grafen-poliindol (Gr@PIn) nanokompozitin ve poliindol (PIn) sentezini gösteriyoruz ve bu, çoğu antibiyotiğe dirençli olan MRSA suşlarına karşı etkinliği önemli ölçüde arttırmaktadır. Sentezlenen Gr@PIn ve PIn çeşitli biyofiziksel tekniklerle karakterize edilmiştir, özellikle X-ışını difraksiyonu (XRD), elektron mikroskopisi [taramalı elektron mikroskopi (SEM) ve iletim elektron mikroskopisi (TEM)], Fourier dönüşümü kızıl ötesi, Raman, UV-vis spektroskopisi ve termogravimetrik analiz. Elektron mikroskopik incelemeler, Gr@PIn ile etkileşim sonucunda bakteriyel hücre duvarının parçalanmasını ortaya koymuştur. Önemli bir şekilde, Gr@PIn'in çoğu antibiyotiğe dirençli MRSA suşlarını ortadan kaldırmada çok etkili olduğu ve memeli hücrelere minimal toksisite gösterdiği belirlenmiştir. Antibakteriyel mekanizmanın değerlendirilmesi, Gr@PIn'in bakteriyel yüzeye yapıştığını, bakterinin zar yapısını geri dönüşü olmayacak şekilde bozduğunu, nihayetinde hücrelere nüfuz ettiğini ve protein aktivitesini etkili bir şekilde engellediğini, bunun doğal olarak bakteriyel apoptoza dönüştüğünü ortaya koymuştur. Ayrıca, son

olarak, sentezlenen Gr@PIn BALB/c farelerinde S. aureus aracılığıyla indüklenmiş deneysel deri enfeksiyonunu etkili bir şekilde tedavi etmiştir. Bu çalışma, metal olmayan grafen tabanlı PIn nanokompozitin antibakteriyel mekanizmasını anlamamızı genişletiyor ve aktivite öngörüsüne destek sağlıyor (Mohd ve ark., 2018).

Saja Abdulrahman Althobaiti, Raed Hamed Althomali, Ahmed Hussien Radie Alawad, AliKamil Kareem, Ebraheem Abdu Musad Saleh, Adeeb Abdulally Abdulhussien Alazbjee ve Rosario Mireya Romero-Parra'ların 2023 yılında yapmış oldukları çalışma:

Bu araştırmada, poliindol kaplı manyetik gözenekli karbon (MPC@PIN) nanosorbent sentezlenmiş ve çeşitli gerçek su örneklerinden toksik aromatik aminlerin çıkarılmasında kullanılmıştır. MPC, MIL-53(Fe) metal–organik çerçeve (MOÇ) kaynağı olarak MOÇ'nin inert bir ortamda kalsinasyonu ile elde edilmiştir. Daha sonra, MPC yüzeyinde indol polimerizasyonu ile işlevlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sentezlenen nanosorbent (MPC@PIN), Fourier dönüşüm kızıl ötesi spektroskopisi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD), iletim elektron mikroskopisi (TEM), taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve titreşimli örnek manyetometresi (VSM) gibi çeşitli yöntemlerle karakterize edilmiştir. Hedef analitlerin ayırma ve belirlenmesi HPLC-fotodiyot dizisi (PDA) dedektör sistemi ile gerçekleştirilmiştir. MIL-53(Fe), MPC ve MPC@PIN'in hedef analitlere yönelik çıkarım performansları karşılaştırılmış ve sonuçlar, MPC@PIN için en iyi çıkarım verimini sergilemektedir. Etkileyen parametrelerin optimize edilmesi sonrasında LOD'lar ve lineer aralıklar sırasıyla 0.05–0.2 µg/L ve 0.15–400 µg/L olmuştur. Yöntemin güvenilirliği (n = 3) intra-gün RSD ve inter-gün RSD değerleri sırasıyla %3.5–8.2 ve %5.8–12.3 aralığında elde edilmiştir. Son olarak, yöntemin çeşitli su örnekleri üzerinde başarılı bir şekilde uygulanabilirliği doğrulanmıştır. Damıtılmış su örnekleri hazırlamak için AAs standart çözeltisinin küçük bir miktarı her örneğe eklenmiş ve ardından örnek MSPE işlemine tabi tutulmuştur (Althobaiti ve ark., 2023).

Rajinder Singh, Ram Bilash Choudhary ve Rohit Kandulna'ların 2019 yılında yapmış oldukları çalışma:

Farklı iletken polimerlerle Sensitizasyon yapılan Poli (metil metakrilat)-Çinko Oksit (PMMA-ZnO) kompozitlerin optik, elektrik ve termal özelliklerindeki gelişmeyi karşılaştırmak ve gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yüzey morfolojisi, farklı

iletken polimerlerin PMMA-ZnO kompozit yüzeyi üzerine dağılımını gösterir ve bu, küresel morfolojiyi kaplar. X-ışını difraktogramlarından elde edilen kristalografik bilgiler, kompozitin sentezini ve PMMA, ZNO ve polianilin (PANI), polipirrol (PPY) ve poliindol (PIN) gibi farklı iletken polimerler için karakteristik pikleri açığa çıkararak sensitizasyonu doğrulamıştır. Poliindol (PIN) ile duyarlı hale getirilen PMMA-ZnO kompoziti, spektrumun görünür dalga boyunu etkin bir şekilde emen ve optik band boşluğu değeri 1.32 eV olan bir yapı göstermiştir. Uygulanan voltaj için akım yanıtı, PIN/PMMA-ZnO için artmış ve bu da onu hibrid güneş hücresi uygulamasında kullanılmak üzere uygun hale getirmiştir (Singh ve ark., 2019).

Ruirui Yue, Qiang Zhang, Caiqin Wang, Yukou Du, Ping Yang ve Jingkun Xu'ların 2013 yılında yapmış oldukları çalışma:

5-Aminoindol (AIn), 0.5 M H₂SO₄ sulu çözelti içinde, 0.01 M AIn içeren grafen (GE) modifiye cam karbon (GC) elektrodu üzerinde elektropolimerize edildi. GE'nin katalitik etkisi nedeniyle, AIn'nin polimerleşme verimliliği ve oluşturulan poli(5-aminoindol) (PAIn) elektrokimyasal aktivitesi, çıplak GC elektroduna kıyasla GE/GC elektrodu üzerinde önemli ölçüde arttı. Hazırlanan PAIn/GE/GC elektrodu, Pt parçacık elektrolizi için alt taban olarak kullanıldı. SEM, EDX ve Raman spektrumu, hazırlanan elektrotları karakterize etmek için kullanıldı. Elektrokatalitik deneyler, Pt/PAIn/GE/GC elektrodunun alkalın ortamda metanol elektooksidasyonuna karşı yüksek katalitik aktiviteye sahip olduğunu gösterdi; bu durum, Pt parçacıklarının PAIn/GE/GC üzerine iyi dağılımı ve metal parçacıkları ile polimer matrisler arasındaki elektronik etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, PAIn, doğrudan alkol yakıt hücrelerinde polimer katalizör destekleme için umut vadeden bir alternatif olabilir (Yue ve ark., 2013).

Mohammad Hadi Parvin, Mahsa Pirni ve Jalal Arjomandi'ların 2013 yılında yapmış oldukları çalışma:

Elektrokimyasal sentez, iletken poliindol (PIn), poliindol-TiO₂ (PIn-TiO₂) ve poliindol-ZnO (PIn-ZnO) nanokompozitlerinin in-situ spektroeletrokimyasal özellikleri araştırılmıştır. PIn ve polimer nanokompozitleri, şarj edilebilir piller için elektrokimyasal olarak test edilmiştir. Filmler, CV'ler, in situ UV-görünür, FT-IR spektroskopileri, in situ direnç ölçümleri, enerji dağılımlı X-ışını (EDX), taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve iletim elektron mikroskopisi (TEM) aracılığıyla karakterize edilmiştir. Kapasitesi

yaklaşık 90 Ah Kg-1 olan Zn/1 M ZnSO₄/PIn hücresinin şarj-deşarj davranışı ve yaklaşık 1.45V açık devre potansiyali, Zn/1 M ZnSO₄/PIn-nanokompozit ile karşılaştırılmıştır. Nanokompozit filmlerin redoks çiftlerinin potansiyel farkları (DE), çok iyi reversibilite göstermektedir. Polimer nanokompozitleri için redoks taraması sırasında pozitif bir potansiyel kayması gözlemlenmiştir. PIn ve polimer nanokompozitlerinin in situ iletkenliği için önemli bir değişkenlik gözlemlenmiştir. In situ UV-görünür ve FT-IR ölçümleri sırasında PIn ve polimer nanokompozitleri için ara spektroskopik davranış ve dalga boylarında pozitif kaymalar gözlemlenmiştir. Nanokompozit filmlerin SEM, TEM ve EDX analizleri, PIn'de nano partikül varlığını göstermektedir (Parvin ve ark., 2015).

Zhijiang Cai, Jie Guo, Haizheng Yang ve Yi Xu'ların 2014 yılında yapmış oldukları çalışma:

Bu çalışma, sulu çinko/elektrospun poli(5-siyanoindol) lifler ikincil pil sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Anot aktif malzemeleri olarak Zn folyo ve ZnCl₂, sırasıyla kullanılmıştır. Kimyasal oksidasyon ile sentezlenen poli(5-siyanoindol) elektrospun yöntemiyle liflere dönüştürülmüş ve katot aktif malzeme olarak kullanılmıştır. Poli(5-siyanoindol)ün kimyasal yapısını incelemek için FTIR ve NMR testleri gerçekleştirilmiştir. Elektrospun poli(5-siyanoindol) liflerinin yüzey özellikleri SEM, TEM ve BET ile incelenmiştir. Çinko/elektrospun poli(5-siyanoindol) lifleri pil sisteminin elektriksel iletkenlik, siklik voltamogram, elektrokimyasal empedans spektroskopisi,deşarj kapasitesi ve dayanıklılık testi açısından performansı değerlendirilmiştir. Hücre, 0.2C-10C oranında yaklaşık 107e61 Ah Kg1deşarj kapasitesi ile 2.0 V elektromotif kuvvet sağlar. 800. devrede,deşarj kapasitesi 0.2C-2C oranında hala 80e57 Ah Kg1 olarak kalmaktadır, bu da maksimumdeşarj kapasitesinin yaklaşık %75e63'üdür. Bu sonuçlar, hücrenin çok iyi siklik özelliklere sahip olduğunu ve hızlı şarj/deşarj özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Elektrospun poli(5-siyanoindol) liflerinin, çinko/poli(mer) pilinde katot malzemesi olarak poliindol tozundan daha iyi bir aday olduğu kanıtlanmıştır (Cai ve ark., 2015).

Moslem Mansour Lakourj, Rafieh-Sadat Norouzian, Mohsen Esfandiyar ve Shahram Ghasemi mir'ların 2020 yılında yapmış oldukları çalışma:

Elektronik kullanımı ve tıbbi uygulamalarda hızla ilerleyen kullanım için iletken polimerlerin geliştirilmesi, ayrıntılı bir sentetik yaklaşımın yanı sıra ince bir

mühendislik prosedürü gerektirir. Bu polimerler, elektron transfer cihazlarında ve hayati sinyal cihazlarında kullanılabilmelerini sağlayan sağlam ancak işlenebilir özellikler sunabilmelidir. Fonksiyonelleştirilmiş CNT katkı maddeleri ile güçlendirilmiş ısıya dayanıklı çözünür iletken ko-polimerlerden oluşan nanokompozitler, yüksek iletkenlik ve istenen biyolojik uyumlulukla hızlı oksidasyon tepkimesi gösteren umut verici bir adaydır. Bu makale, bu hedeflenen ürünü elde etmek için iki aşamadan oluşmaktadır; ilk aşama, ideal bir pirol/indol ko-polimeri (PPy-co-PIn) için sentetik bir prosedür geliştirmeye çalışırken ikinci aşama, karboksilik asit modifiye edilmiş CNT ile (PPy-co-PIn@CNT) nanokompozit hazırlığını göstermektedir. Aslında, çeşitli çözüm oranlarıyla emülsiyon polimerizasyonu ve çözelti polimerizasyonunu kullanarak PPy-co-PIn sentezi için çeşitli yöntemler ve amonyum persülfat (APS), anhidroz demir (III) klorür (FeCl_3) ve benzil peroksit (BPO) gibi üç farklı oksitleyici başlatıcı incelendi ve yapıları daha sonra FTIR, NMR, EDX, UV-Vis, XRD ve SEM teknikleri ile incelendi. Dahası, polimerin işlenebilirlik, ısı özelliği, iletkenlik ve korozyon önleyici özellikleri üzerinde herhangi bir sentetik stratejinin etkisi en iyi ko-polimer tanınana kadar ölçüldü. Sonrasında bu ko-polimerden, korozyon direncini artırmak ve ilgili elektrik özelliklerini geliştirmek için seçilen ko-polimere %0,025, %0,050 ve %0,075 oranlarında modifiye edilmiş CNT eklenerek PPy-co-PIn@CNT nanokompozitleri sentezlendi. Nanokompozitin antioksidan yeteneği, antibakteriyel özelliği ve termal direnci daha ileri incelendi. Ön çalışmalar, iyi termal özelliklere ve nispeten iyi antibakteriyel inhibisyon bölgesine sahip, antioksidan aktivitesinin %95'e kadar ulaştığı iletken nanokompozit üretimini ortaya koymuştur (Lakourj ve ark., 2020).

Weiqliang Zhou, Xiumei Ma, Fengxing Jiang, Danhua Zhu, Jingkun Xu ve Baoyang Lu, Congcong Liu'ların 2014 yılında yapmış oldukları çalışma:

İki adımlı elektrokimyasal yöntemle gözenekli ağ yapılı MnO_2 -poli(5-siyanoindol) kompozit (MnO_2/PCIn) hazırlandı. SEM ile doğrulanan gözenekli ağ yapılı PCIn filmi, 3D-rastgele bir matris olarak işlev gördü. PCIn filmi, MnO_2 nanopartiküllerini dağıtmak için bir ortam sağladı ve MnO_2 nanopartiküllerinin bir araya gelmesini önledi. Süperkondansatör için aktif elektrot materyali olarak, $\text{MnO}_2/\text{PCIn}/\text{GC}$ 'nin özgül kapasitansı 8.3 A g^{-1} 'de 322.5 F g^{-1} 'e ulaştı; bu değer, çıplak camyumsu karbon elektrot üzerine elektrolit ile indirgenmiş MnO_2 (247 F g^{-1})'nin kapasitansından daha yüksekti. $\text{MnO}_2/\text{PCIn}/\text{GC}$ 'nin enerji yoğunluğu, 12.5 kWkg^{-1} yüksek güç yoğunluğunda 36.1 Wh

cm^{-2} (veya 878.6 F g^{-1})'e ulaşabilir. $\text{WO}_{3-x}@\text{TiO}_{2-x}/\text{P6ICA}$ nanokompozitlerine dayalı asimetrik bir süperkondansatör cihazı başarıyla oluşturulmuş olup, aynı zamanda $22,0 \text{ mFcm}^{-2}$ (veya 317.9 F g^{-1}) yüksek enerji depolama seviyesi göstermektedir. İyi döngü stabilitesine sahip süperkondansatörler, bir LED'i sürekli olarak 90 saniye boyunca aydınlatmaya yetecek kadar enerji depolamaktadır. Bu sonuçlara dayanarak, hazırlanan $\text{WO}_{3-x}@\text{TiO}_{2-x}/\text{P6ICA}$ üçlü kompozitlerin süperkondansatörlerde potansiyel uygulamaları olabileceği düşünülmektedir (Guo ve ark., 2022).

S. Eşsiz ve B. Sarı'ların 2015 yılında yapmış oldukları çalışma:

Poliinidol (PIN) ve polistiren/poliinidol (PS/PIN) kompozitleri, oksitleyici ajan olarak FeCl_3 kullanılarak kimyasal polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiştir. PIN ve kompozitlerin iletkenlikleri dört uçlu prob tekniğiyle ölçülmüştür. PIN'in iletkenliği $5,1 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ olarak belirlenirken, PS/PIN kompozitlerinin iletkenlikleri sırasıyla $3,5 \times 10^{-4}$ ve $2,4 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir.

Gouy skalası manyetik duyarlılık ölçümleri, PIN ve kompozitlerin polaronik yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Kompozitlerin elektriksel iletim mekanizmasını anlamak amacıyla, Hall etkisi ölçümleri 170–350 K sıcaklık aralığında ve 0,4 Tesla (T) manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir. Hall etkisi çalışmaları, iletken polimer kompozitlerdeki yük taşıyıcılarının doğasını, tipini ve yoğunluğunu incelemek için kullanılmıştır. Taşıma özellikleri, Hall hareketliliği ve taşıyıcı yoğunluğu olmak üzere iki fiziksel büyüklükle ilişkilendirilmiştir.

İncelenen kompozitlerin hareketlilikleri artan sıcaklıkla azalmış, buna karşılık iletkenlik, taşıyıcı yoğunluğunun kademeli olarak artmasıyla yükselmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) analizi, PIN ve kompozitlerinin amorf yapıda olduğunu ortaya koymuştur. Örneklerin termal özellikleri, termogravimetrik analiz (TGA) ile incelenmiş ve iyi termal kararlılığa sahip oldukları belirlenmiştir. Polimerlerin ve kompozitlerin morfolojik özellikleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile araştırılmıştır (Eşsiz ve Sarı, 2016).

M. T. Ramesan'ın 2013 yılında yapmış olduğu çalışma:

Manyetoelektrik polimer nanokompozit, iletken poliinidol ve nano boyutlu manyetit (Fe_3O_4) partiküllerinin *in situ* polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiştir.

Nanopartikül içeriğinin poliinidol matrisi üzerindeki etkisi; Fourier dönüşüm infrared (FTIR) ve ultraviyole (UV) spektroskopisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve doğru akım (DC) iletkenlik ölçümleri ile incelenmiştir.

FTIR ve UV spektrumları, polimer ile manyetit nanopartiküller arasındaki *intermoleküler* etkileşimi göstermektedir. Morfolojik gözlemler ve kristal yapı çalışmaları, nanopartiküllerin polimer içinde düzgün bir şekilde dağıldığını ve iyi şekillendirilmiş küresel yapılara sahip olduklarını, ortalama boyutlarının nano ölçeğinde olduğunu ortaya koymuştur.

DSC çalışmaları, Fe_3O_4 içeriğinin artmasıyla cam geçiş sıcaklığında (T_g) bir artış olduğunu ve saf poliinidole kıyasla nanokompozit içerisinde polimer zincirlerinin daha düzenli bir yerleşime sahip olduğunu göstermektedir. Nanokompozitlerin DC iletkenliği, nanopartikül içeriğinin artmasıyla artmakta olup, nanokompozitin iletkenliği saf poliinidolden daha yüksek bulunmuştur.

Nanokompozitlerin manyetizasyonunun uygulanan manyetik alana bağımlılığı, titreşimli numune manyetometresi (VSM) tekniği ile incelenmiştir. Fe_3O_4 içeriğinin artmasıyla, nanokompozitin doygun manyetizmasının doğrusal olarak arttığı belirlenmiştir (Rmesan, 2013).

Bushra Begum, Saba Ijaz, Rozina Khattak, Raina Aman Qazi, Muhammad Sufaid Khan ve Khaled H. Mahmoud'lerin 2021 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Yeni bir aktif karbon içeren poliinidol (AC@PIN) kompozitinin sentezlenmesi ve bu kompozitin sulu çözeltilerden Malakit Yeşili (MG) boyasının adsorptif olarak uzaklaştırılmasındaki etkinliğinin araştırılmasını amaçlamaktadır. AC@PIN hibrit malzemesi, *in situ* kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemiyle hazırlanmıştır.

AC@PIN kompozitinin fizikokimyasal özellikleri; Fourier dönüşüm infrared spektrometresi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), ultraviyole-görünür (UV-vis) spektroskopisi ve sıfır yük noktası (pHPZC) tayini ile değerlendirilmiştir.

Kompozitin boyar madde adsorpsiyon davranışını incelemek için pH, temas süresi, başlangıç boyar madde konsantrasyonu, AC@PIN dozajı ve sıcaklık gibi işletim

parametrelerinin etkisini değerlendiren bir dizi adsorpsiyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Maksimum boya giderim yüzdesi (%97,3), pH 10, 6.0 mg AC@PIN dozajı, 150 mg/L başlangıç boyar madde konsantrasyonu ve 20  C sıcaklık koşullarında elde edilmiştir.

Kinetik alışmalar, MG'nin AC@PIN zerindeki adsorpsiyonunun *pseudo-second-order* (yalancı ikinci dereceden) kinetik modele uyduğunu göstermiştir ($R^2 = 0.99$). Adsorpsiyon sürecini en iyi tanımlayan izoterm modeli ise Langmuir izoterm modeli olarak bulunmuştur.

Son olarak, geri dönüşüm testleri, kompozitin beş döngü sonrasında iyi bir geri kazanım verimliliği sergilediğini ve kararlılığını koruduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, AC@PIN kompozitinin atık sulardan Malakit Yeşili (MG) boyasının uzaklaştırılmasında potansiyel bir aday olabileceğini göstermektedir (Begum ve ark., 2021).

S. Anandhi, M. Leo Edward ve V. Jaisankar'ların 2020 yılında yapmış oldukları alışma:

İletken polimerik nanokompozitler, son yıllarda farklı alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Poliinidol (PIn), malzeme araştırmalarının gereksinimlerini karşılayabilecek fizikokimyasal özelliklere sahip umut vadeden polimerik malzemelerden biridir. Poliinidoln  zellikleri, metal, metal oksit ve diğer malzemelerle karıştırılarak istenen özelliklere göre ayarlanabilir.

Bu çalışmada, poliinidol (PIn), nano zirkonya ($n\text{ZrO}_2$) ve PIn/ ZrO_2 nanokompozitinin sentezi ve karakterizasyonu rapor edilmiştir. Poliinidol, ferrik klorür ve tartarik asit kullanılarak kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Nano zirkonyum oksit (ZrO_2) nanopartikülleri, zirkonyum oksiklorür çözeltisine amonyaklı sulu çözelti eklenerek oda sıcaklığında sentezlenmiştir. PIn/ ZrO_2 nanokompoziti, çözelti karıştırma yöntemiyle hazırlanmıştır.

ZrO_2 nanopartiküllerinin, poliinidoln ve nanokompozitin morfolojisi, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelenmiştir. ZrO_2 nanopartiküllerinin, PIn'in ve nanokompozitin kimyasal yapısı, FTIR, UV-görünür ve NMR spektroskopisi ile karakterize edilmiştir. Elementel analiz ve kimyasal karakterizasyon, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) tekniği ile gerçekleştirilmiştir.

Kristallite büyüklükleri ve kristallik derecesi, X-ışını kırınımı (XRD) tekniği ile belirlenmiştir. Termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) sonuçları, polimerin ve nanokompozitlerin yüksek sıcaklıklarda kararlı olduğunu göstermiştir. Hazırlanan polimer kompozitlerin antimikrobiyal özellikleri de incelenmiş ve yorumlanmıştır (Anandhi ve ark., 2021).

D. J. Bhagat ve G. R. Dhokane 2014 yılında yapmış oldukları çalışma:

Poliinidol (PIN), kimyasal polimerizasyon tekniği kullanılarak poli(vinil asetat) (PVAc) varlığında sentezlenmiştir. İndol monomeri, oksitleyici ajan olarak ferrik klorür kullanılarak polimerize edilmiştir. Elektriksel iletkenlik ölçümleri iki uçlu prob tekniği ile gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan kompozitler, X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşüm infrared spektroskopisi (FTIR), alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDAX) ve ultraviyole-görünür (UV-VIS) spektroskopisi ile analiz edilmiştir.

Doğru akım (DC) iletkenliği, 383 K'de $4,46 \times 10^{-6}$ S/cm olarak bulunmuştur. PIN/PVAc kompozit filmlerinin elektro-optik özelliklerini araştırmak amacıyla bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir (Bhagat ve Dhokane, 2015).

D. J. Bhagat ve G. R. Dhokane 2016 yılında yapmış oldukları çalışma:

Bu makalede, bakır (Cu) katkılı poliinidol (PIN) kompozitlerinin, poli(vinil asetat) (PVAc) varlığında frekansa bağlı iletkenlik ve dielektrik davranışına ilişkin elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Sentezlenen kompozitler, X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşüm infrared (FTIR) spektroskopisi, dielektrik davranış ve alternatif akım (AC) iletkenlik ölçümleri ile analiz edilmiştir.

X-ışını kırınımı analizi, Cu katkılı PIN/PVAc kompozitlerinin yarı kristal yapıya sahip olduğunu doğrulamıştır. Hazırlanan kompozitlerin dielektrik davranışı, frekans arttıkça dielektrik sabitlerinin ve dielektrik kaybın azaldığını göstermiştir.

Kompozitlerin en yüksek AC iletkenlik değeri, 1 MHz frekansta $2,97 \times 10^{-5}$ S/cm olarak tahmin edilmiştir (Bhagat ve Dhokane 2016).

Mohammad Mehdi Khodaei ve Mohsen Karegar 2020 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Bakır nanopartikülleri, bakır sülfatın (CuSO_4) sulu çözeltide, polivinilpirolidon (PVP) ve setiltrimetilamonyum bromür (CTAB) gibi çift kaplama ajanları varlığında, inert gaz kullanımı olmaksızın kimyasal indirgeme yöntemiyle hazırlanmıştır. Ortalama partikül boyutu 61nm olan bakır nanopartikülleri, polivinilpirolidon konsantrasyonu değiştirilerek elde edilmiştir.

Bakır nanopartiküller/poliinidol kompoziti, basit bir *in situ* polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiştir. Bakır nanopartikülleri ve bakır nanopartiküller/poliinidol kompozitinin morfolojisi, yapısı ve termal kararlılığı çeşitli tekniklerle incelenmiştir.

Kompozitlerdeki bakır ağırlık yüzdesinin iletkenlik üzerindeki etkisi araştırılmış ve elde edilen veriler, bakır nanopartiküllerin ağırlıkça %25'inin poliinidol iletkenliğini en fazla artıran oran olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bakır nanopartiküllerin poliinidol iletkenliğindeki değişime etkisi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile incelenmiştir (Khodaei ve Karegar, 2021).

D.J. Bhagat ve G.R. Dhokane 2014 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Yeni bir tek adımlı (one-pot) sentez yöntemi kullanılarak poliinidol/poli(vinil asetat) (PIIn/PVAc) kompozit filmleri kimyasal olarak hazırlanmıştır. İndol monomeri, oksitleyici ajan olarak bakır klorür (CuCl_2) kullanılarak polimerize edilmiştir.

Sentezlenen kompozitler; X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşüm infrared (FTIR) spektroskopisi ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisine (EDX) sahip alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile analiz edilmiştir.

Doğru akım (DC) iletkenlik ölçümleri iki prob tekniği ile gerçekleştirilmiş ve 383 K sıcaklıkta DC iletkenlik değeri $8,648 \times 10^{-6}$ S/cm olarak bulunmuştur.

Taşıyım sayısı (transference number) ölçümleri, iyonik iletkenliğin elektronik iletkenliğe göre baskın olduğunu göstermiştir (Bhagat ve Dhokane, 2015).

P. Jayakrishnan ve M. T. Ramesan 2016 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Bu makale, magnetit (Fe_3O_4) nanopartikülleri içeren poliinidol (PIN)/poli(vinil alkol) (PVA) karışım nanokompozitlerinin sentezi, karakterizasyonu, elektriksel iletkenlik, termal ve manyetik özelliklerini in situ polimerizasyon yöntemiyle sunmaktadır. Karışım kompozitleri karakterize etmek için UV-Görünür, FTIR, XRD, SEM, DSC, TGA ve VSM analizleri kullanılmıştır.

Dielektrik özellikler, AC ve DC iletkenlik, PIN/PVA içindeki Fe_3O_4 partiküllerinin farklı içeriklerine bağlı olarak incelenmiştir. UV ve FTIR spektrumları, nanopartiküller ile karışım matrisinin arayüzleri arasındaki güçlü etkileşimi göstermektedir. XRD desenleri, nanokompozitin kristalin yapısını doğrulamıştır. SEM görüntüleri, nanopartiküllerin polimere iyi bir şekilde dağılmış ve düzgün şekilli bir ağ yapısına sahip olduğunu göstermiştir.

Kompozitlerin cam geçişi (T_g) ve erime sıcaklıkları, ana karışım polimerinden daha yüksek bulunmuş ve termal geçişler nanopartiküllerin konsantrasyonu ile artmıştır. TGA sonuçları, nanokompozitlerin termal stabilitesinin PIN/PVA'dan çok daha yüksek olduğunu ve nanopartiküllerin konsantrasyonu arttıkça termal stabilitenin arttığını göstermektedir.

Hem AC hem de DC iletkenliği, karışım kompozitlerinin blenden çok daha büyük olduğunu ve en yüksek elektriksel iletkenliğin %10 nanokompozit içeriği ile gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Dielektrik sabit ve kayıp tanjantının, frekans arttıkça azaldığı, ancak nanopartiküllerin konsantrasyonu ile bu özelliklerin arttığı bulunmuştur.

Manyetik histerezis eğrileri, kompozitlerin süperparamanyetik doğasını göstermektedir. Nanokompozitlerin doymuş manyetizasyonu ve geri dönüşüm değerleri, magnetit nanopartiküllerinin içeriği arttıkça artmıştır (Jayakrishnan ve Ramesan, 2017).

M. Baibarac, I. Baltog, M. Scocioreanu, S. Lefrant ve J.Y. Mevellec 2009 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

İndolün $\text{LiClO}_4/\text{CH}_3\text{CN}$ çözeltisinde elektro-kimyasal polimerizasyonu, tek duvarlı karbon nanotüpler (SWNT'ler) filmleri üzerinde, siklik voltametri, Raman yayılması ve FTIR spektroskopisi ile incelenmiştir. Bir boş Pt elektrodu üzerinde kaydedilen siklik voltamogramlar ile karbon nanotüp filmleri daha önce Pt elektrodu

üzerine yerleştirilmiş durumda kaydedilenler karşılaştırıldığında, ikinci durumda indol redüksiyon pik potansiyelinde bir kayma gözlemlenmiştir.

Raman spektroskopisi çalışmaları, poliindol (PIN)'ün SWNT filmi üzerine elektro-kimyasal depo edilmesinin, SWNT kümelerinin bireysel tüplere ayrılmasına yol açtığını göstermektedir. FTIR spektroskopisi, doplanmış durumda SWNT'lerin PIN ile kovalent fonksiyonelleşmesini göstermekte olup, 1045 cm^{-1} 'deki absorpsiyon bandının yoğunluğundaki artışı ortaya koymaktadır. Ayrıca, elektro-kimyasal olarak hazırlanmış örnekler üzerinde yapılan Raman ve FTIR çalışmaları, NH_4OH çözeltisiyle sonrasında kimyasal olarak reaksiyona giren örneklerde, PIN'in bağlayıcı ajan olarak bireysel tüpleri ip haline getirme sürecini ve güçlü stereik engelleme etkisini göstermektedir (Baibarac ve ark., 2009).

Samaneh Mozaffari, Javad Behdani ve Seyed Mohammad Bagher Ghorashi 2021 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Bu araştırmada, anilin-indol kopolimer nanoparçacıkları farklı molar oranlarla başarıyla kimyasal oksidatif polimerizasyon yöntemiyle sentezlenmiştir; oksitleyici ajan olarak ferrik klorür (FeCl_3) ve çözücü olarak sodyum dodesilsülfat (SDS) mikeller çözeltisi kullanılmıştır. Karşılaştırma yapmak için, saf poliindol ve polianilin nanoparçacıkları da aynı koşullarda hazırlanmıştır. Sentezlenen polimer tozları, X-ışını kırınımı (XRD), UV-Vis absorpsiyon, termogravimetrik analiz (TGA) ve alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile karakterize edilmiştir. XRD ve FE-SEM sonuçları, polimerlerin ve kopolimerlerin yarı kristalin yapıya sahip olduğunu ve sub-nanoparçacık boyutlarına ($< 100\text{ nm}$) ve neredeyse aynı morfolojiye sahip olduğunu göstermektedir.

Karakterizasyondan sonra, tozlar (poliindol, polianilin ve kopolimerleri) distile suda süspanse edilmiş, ardından florla doplanmış kalay oksit (FTO) üzerine spin kaplama tekniği ile yerleştirilmiştir. Bu ürünler, boya-duyarlı güneş hücresi (DSSC) için karşı elektrot (CE) olarak kullanılmıştır. Simüle edilmiş AM 1.5 G güneş ışığı altında (100 mW/cm^2), saf poliindol CE ile yapılan hücre, düşük enerji dönüşüm verimliliği (%0.79) göstermiştir. Anilin monomerinin kopolimerlere daha fazla eklenmesi, hücre verimliliğini yavaşça artırmış, bu sayede saf polianilin CE bazlı DSSC için verimlilik %5.60'a ulaşmıştır. Ayrıca, siklik voltametri (CV), elektrokimyasal empedans spektroskopisi

(EIS) ve Tafel ölçümleri sonuçları, polianilin CE'nin diğer CE'lere kıyasla üstün katalitik performansını doğrulamıştır. Çalışma, kopolimer CE'lerin, düşük sıcaklıklarda esnek ve ucuz DSSC'ler üretmek için iyi katalitik malzemeler olabileceğini ortaya koymaktadır (Mozaffari ve ark., 2021).

M. T. Ramesan 2012 yılında yapmış olduğu bu çalışma:

Poliindol (PIN)/bakır sülfür (CuS) ile iletken polimer nanokompozitleri, farklı konsantrasyonlardaki CuS nanoparçacıkları ile indolün in situ polimerizasyonu ile hazırlanmıştır. Bu kompozitler, X-ışını kırınımı (XRD), Fourier dönüşüm infrared spektrometresi (FTIR), tarama elektron mikroskobu (SEM), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetrik analiz (TGA) ve elektriksel çalışmalarla incelenmiştir. XRD analizleri, kompozitin CuS nanoparçacıkları eklenmesiyle kristalleşmeye başladığını doğrulamıştır. IR spektrumu, PIN ve CuS arasındaki moleküller arası etkileşimi göstermektedir. SEM görüntüleri, nanoparçacıkların tüm alt tabakaya eşit şekilde dağılmış olduğunu ortaya koymuştur. Cam geçiş sıcaklığı, nanoparçacık konsantrasyonunun artmasıyla artmış ve bu, örneklerin düzenli bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. TGA sonuçları, üretilen PIN/CuS kompozitinin, saf PIN'e kıyasla daha iyi termal kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. DC iletkenliği, CuS nanoparçacıkları içeriği arttıkça önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca, AC elektriksel iletkenlik ve dielektrik özelliklerin de CuS nanoparçacıkları molar konsantrasyonu arttıkça iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu özelliklerdeki iyileşmeler, üretilen PIN/CuS nanokompozitinin, nanoteknoloji alanında potansiyel uygulamalara sahip olduğunu göstermektedir (Ramesan, 2012).

S. Sankar, Adarsh A. Naik, T. Anilkumar ve M.T. Ramesan 2017 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Poliindol (PIN) ve bakır-alümina (Cu-Al₂O₃) nanokompozitlerinin iletken polimer kompozitleri, farklı içeriklerde Cu-Al₂O₃ nanoparçacıkları ile indolün in situ polimerizasyonu ile sentezlenmiştir. Polimer nanokompozitleri, Fourier dönüşüm infrared (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD), tarama elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını (EDX), geçiş elektron mikroskobu (TEM), diferansiyel taramalı kalorimetri, termogravimetrik analiz ve amonyak gazı algılama performansı gibi çeşitli tekniklerle karakterize edilmiştir. FTIR ve XRD çalışmaları, Cu-Al₂O₃'ün PIN moleküler

zincirine bağlandığını ortaya koymuştur. SEM ve TEM görüntüleri, farklı nanoparçacık yükleme miktarlarında parlak trapezoid kanalların ve morfolojideki değişikliklerin varlığını doğrulamıştır. Cu-Al₂O₃ nanoparçacıklarının PIN matrisi ile birleşimi EDX spektroskopisiyle doğrulanmıştır. Cam geçiş sıcaklığı ve termal kararlılık, Cu-Al₂O₃ yüklemesiyle büyük ölçüde artmıştır. Alternatif akım iletkenliği, dielektrik sabiti ve hazırlanan kompozitin akım-gerilim özelliklerindeki iyileşme, nanoparçacık yüklemesiyle birlikte sistemin yarı iletken doğasını göstermiştir. Ayrıca, nanokompozit, amonyak gazına karşı mükemmel duyarlılık ve hızlı tepki göstermektedir. Bu çalışmanın değerlendirdiği sonuçlar, Cu-Al₂O₃ takviyeli PIN hibritinin, elektrokimyasal cihazlar üretimi için iyi bir aday olduğunu göstermektedir (Sankar ve ark., 2019).

Özlem Erol, H. İbrahim Unal, Bekir Sari 2010 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

İlk olarak poliindol (PIN), FeCl₃ oksitleyici ajanı kullanılarak sentezlenmiştir. Ardından, organo-montmorillonit (O-MMT), cetiltrimetilamonyum bromür (CTAB) kuaterner amonyum tuzu ile virgin montmorillonit (MMT) kullanılarak hazırlanmıştır. Daha sonra, %18 O-MMT içeriğine sahip PIN/O-MMT iletken nanokompozit hazırlanmıştır. PIN, MMT, O-MMT ve PIN/O-MMT nanokompozit örnekleri, FTIR spektroskopisi, termogravimetrik analiz (TGA), X-ışını kırınımı (XRD), element analizi, iletkenlik, manyetik duyarlılık, yoğunluk, parçacık boyutu ölçümleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemleriyle karakterize edilmiştir. Karakterizasyon sonuçları, her iki yapıya sahip (interkale ve eksfolie olmuş) başarılı bir şekilde hazırlanmış PIN/O-MMT nanokompoziti göstermektedir. Yukarıda belirtilen malzemelerden 5-25% (ağırlıkça) arası konsantrasyonlar silikon yağı (SO) içinde hazırlanmış ve sedimentasyon stabiliteleri belirlenmiştir. Süspansiyonlar, dış bir elektrik alanı uygulanarak elektrorheolojik (ER) aktivite gözlemlenmiştir. Dağılmış parçacık konsantrasyonu, kesme hızı, dış elektrik alanı gücü, frekans ve sıcaklığın bu süspansiyonların ER aktiviteleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dört süspansiyona da sürünme testleri uygulanmış ve geri kazanılabilir viskoelastik deformasyonlar gözlemlenmiştir (Erol ve ark., 2010).

Chandra Jeet Verma, Rajiv K. Pandey ve Rajiv Prakash 2017 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Elektronik ve elektro kimyasal uygulamalar için Fe(II)-oktaetilporfirin/poliindol (Fe-OEP/PIn) hibrit malzemenin sentezi için kolay ve yeni bir metodoloji sunulmuştur. Çalışmanın yeniliği, demirin OEP boşluğunda koordinasyonu ve indol monomerinin tek bir adımda oda sıcaklığında polimerizasyonudur. Polimerizasyon için oksitleyici ajan olarak kullanılan ferrik klorür, Fe(II) iyonlarının indolün polimerizasyonunu sağlarken, Fe(II) durumunun porfirinik boşluğa karşı güçlü bir çekim oluşturması nedeniyle OEP boşluğunda yer almasına olanak tanır. Sentetik hibrit malzemeler karakterize edilmiş ve daha sonra Al/Fe-OEP-PIn/ITO sandviç yapısı kullanılarak Schottky diyotunun imalatında uygulanmıştır. Bu diyot, $0.21 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ mobilite, 2.1 ideallik faktörü ve 0.60 eV bariyer yüksekliği göstermektedir. Elektronik ve elektro kimyasal özelliklerdeki iyileşme, çeşitli karakterizasyonların sonuçları göz önünde bulundurularak tartışılmaktadır. Çalışmamız, Fe-OEP/PIn hibrit malzemenin kolay ve yeni sentezini ve bunun elektro kimyasal ve organik cihaz uygulamalarını göstermektedir (Verma ve ark., 2018).

Jalal Arjomandi, Hossein Soleimani, Mohammad Hadi Parvin ve Elmira Azizi 2017 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Li-ion şarj edilebilir bataryalar için katot malzemesi olarak $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanokompozitleri ile doplanmış iki yeni iletken poliindol (PIn) tabanlı nanokompozit, in situ elektropolimerizasyon yöntemiyle üretilmiştir ($\text{Au/PIn/ClO}_4@\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{Au/PIn/ClO}_4@\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). PIn ve polimer nanokompozitleri FT-IR, SEM, TEM, EDX ve TGA yöntemleriyle karakterize edilmiştir. PIn ve polimer nanokompozitlerinin elektro kimyasal özellikleri, döngüsel voltametri (CV), in situ iletkenlik ölçümleri, elektro kimyasal empedans spektroskopisi ve şarj-deşarj testi ile incelenmiştir. Örneklerin optik özellikleri de in situ UV-Vis spektroskopisiyle araştırılmıştır. CV sonuçları, polimer nanokompozitlerin PIn'e kıyasla daha iyi tersinirliğe sahip olduğunu göstermektedir. Nanoparçacıklar ile PIn arasındaki moleküler etkileşim FT-IR ile doğrulanmıştır. Polimer nanokompozitlerinin TEM görüntüleri, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ parçacıklarının PIn matrisine gömüldüğünü göstermektedir. Polimer nanokompozitlerinin termal stabilitesi, PIn'e kıyasla artmıştır. Polimer nanokompozitlerinin in situ iletkenliği, PIn'e kıyasla yaklaşık olarak 0.20 büyüklük sırasına kadar artmıştır. Malzemelerin elektro kimyasal özellikleri ve şarj-deşarj davranışları, $\text{Li/LiClO}_4+\text{ACN/Au-PIn}$, $\text{Li/LiClO}_4+\text{ACN/Au-PIn-}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{Li/LiClO}_4+\text{ACN/Au-PIn-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ hücreleriyle 0.5 mA/cm^2 sabit akım ile ölçülmüştür.

Polimer nanokompozit hücreleri için elde edilen sonuçlar, PIn hücrelerine kıyasla 116–124 mAh/g arasında daha iyi deşarj özellikleri ve çok iyi döngüsel özellikler göstermiştir. Deşarj kapasitesi, 30–40 döngüden sonra en iyi değeri elde etmiş ve 20.000 kez döngüden sonra %36'lık bir azalma göstermiştir (Arjomandi ve ark., 2017).

Liming Xu, Danhua Zhu, Weiqiang Zhou, Fengxing Jiang, Yanli Wu, Yue Cai, Huan Kang ve Jingkun Xu 2021 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Nano-sferik poli(5-hidroksiindol) (5-PHI/GN) ile fonksiyonelleştirilmiş N-doplanmış grafen, basit bir tek adımlı hidrotermal yöntemle hazırlanmıştır. Bu yöntemde, amonyum persülfat oksidan olarak kullanılarak 5-hidroksiindolün grafen yüzeyinde in-situ polimerizasyonunu başlatır ve aynı zamanda grafen üzerinde N doping işlemi gerçekleştiren bir N kaynağı olarak görev yapar. 5-PHI ile grafen oranı ayarlanarak, en iyi sinerjik etkiyi gösteren 5-PHI/GN = 1:1 nanokompoziti elde edilmiştir. Elektro kimyasal değerlendirme, 5-PHI/GN = 1:1 elektrotunun 2 A g^{-1} akım yoğunluğunda 627,2 F g^{-1} 'lik maksimum özgül kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, iki simetrik 5-PHI/GN = 1:1 çalışma elektrotundan oluşan basit bir süperkapasitör, 425 W kg^{-1} güç yoğunluğunda $35,5 \text{ Wh kg}^{-1}$ enerji yoğunluğu elde edebilmekte ve mükemmel uzun süreli döngüsel stabiliteye sahiptir (100.000 döngüden sonra ilk özgül kapasitenin %102,7'si korunmuştur). Bu olağanüstü performanslar, 5-PHI/GN = 1:1'in süperkapasitör elektrot malzemeleri için umut verici bir aday olduğunu göstermektedir (Xu ve ark. 2021).

Huixue Zou, Xukun Deng, Lu Zheng, Qingfu Guo ve Guangming Nie 2022 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Poli(1H-benzindol)/tungsten trioksit (PBI_n/WO₃) nanokompozitleri, basit hidrotermal sentez ve elektrokimyasal polimerizasyon yöntemleriyle başarıyla hazırlanmıştır. PBI_n ve WO₃ arasında sinerjik bir etki bulunmaktadır, bu da elektrokimyasal performansı artırabilir ve her birinin performans avantajlarını kullanarak diğerinin eksikliklerini telafi edebilir. Ayrıca, iyi bir enerji seviyesinin uyumlu olması, yük transferi için uygun bir itici güç sağlayabilir. Dahası, PBI_n'in iyi elektriksel iletkenliği ve yük depolama kapasitesi sayesinde, kompozit malzemenin kapasitif performansı ve elektron göç hızları artırılmıştır. Bu nedenle, PBI_n/WO₃ nanokompozitleri $535,5 \text{ F g}^{-1}$

gibi yüksek bir özgül kapasiteye ve artırılmış yük transfer hızına sahiptir. PBI_n/WO₃ nanokompozitleri ve poli(3,4-etilen dioksitiyofen) (PEDOT) bazlı asimetrik süperkapasitör cihazları başarıyla inşa edilmiş ve iyi bir özgül kapasite (122,25 F g⁻¹) ve döngüsel stabilite (3000 döngü sonrası %81,6 koruma) göstermektedir. Cihaz, 38,2 Wh kg⁻¹ maksimum enerji yoğunluğu ve 966,7 W kg⁻¹ maksimum güç yoğunluğu sergilemektedir. Bu çalışmada hazırlanan PBI_n/WO₃ nanokompozitlerinin, enerji depolama alanında geniş uygulama potansiyeline sahip olabileceği öngörülmektedir (Zhou ve ark., 2022).

J. Lorca-Ponce, Jonathan Cisterna, Linda Cattin, Jean-Christian Bernede, G. Louarn ve A. M.R. Ramírezf 2023 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Bir poliinol-6-karboksilik asit (6-PICA) nanolif kompoziti, β -MnO₂ nanorodları (6-PICA/ β -MnO₂-NRs) ile elektrokimyasal yöntem ve hidrotermal yöntemle hazırlanmıştır. β -MnO₂-NR'lerinin entegrasyonu ve 6-PICA nanoliflerinin oluşumu, SEM, TEM, Raman, toz XRD ve XPS ile doğrulanmıştır. Nanolifler, elektrokimyasal aktif bir malzeme olarak işlev görür ve aynı zamanda β -MnO₂ nanorodlarının farklı konsantrasyonlarda dağılmasını sağlayan bir ortam olarak görev yapar. Süperkapasitör malzemesi olarak yapılan inceleme, 6-PICA/ β -MnO₂-NRs'in özgül kapasitesinin 61.35 mFcm² olduğunu ve ITO ile kaplanmış 6-PICA'nın (43.01 mFcm²) değerinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, saf faz β -MnO₂'nin nanoyapı formunda varlığının, 6-PICA'nın yük-boşaltma sürecinde özgül kapasiteyi ve iyon difüzyonunu artırdığını, yüksek akım yoğunluklarında önemli bir stabilite kaybı olmadan 1000 döngü sonrasında bile stabiliteyi koruduğunu göstermektedir (Ponce ve ark., 2023).

Qingfu Guo, Xiaoqian Zhao, Zhiyuan Li, Debao Wang ve Guangming Nie 2019 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Yeni üretilen bal peteği yapısına sahip poröz poly(5-formilindol) (P5FI_n)/WO₃ nanokompozitleri, hidrotermal sentez ve elektrokimyasal polimerizasyon yöntemlerinin birleştirilmesiyle başarıyla hazırlanmıştır. Hazırlanan P5FI_n/WO₃ nanokompozitlerinin morfolojisi ve yapısı SEM, TEM, FTIR, Raman spektrumu, XRD ve XPS ile karakterize edilmiştir. P5FI_n ve WO₃ arasındaki sinerjik etki sayesinde, hazırlanan nanokompozitler mükemmel elektrokimyasal, elektrokromik, süperkapasitif özellikler ve döngüsel stabilite sergilemektedir. Nanokompozitlerin alan bazında özgül kapasitesi 34.1

mFcm⁻²'dir. 5000 döngü şarj ve deşarj sonrasında, nanokompozitler başlangıçtaki kapasite değerinin %93'ünü koruyabilmektedir. Nanokompozitler, koyu yeşil, sarı ve sarı yeşil arasında geri dönüşümlü olarak geçiş yaparken yüksek renklenme verimliliği (137 cm²C⁻¹) göstermektedir. P5FIn/WO₃ ve poly(3,4-etilendioxytiofen) (PEDOT) bazlı üretilen elektrokromik süperkapasitör, yüksek özgül kapasite (10.38 mFcm⁻²), yüksek renklenme verimliliği (627 cm²C⁻¹) ve 5000 şarj/deşarj döngüsüne kadar stabil döngüsel stabilite göstermektedir. Şarj ve deşarj sürecindeki renk değişimi ve iletkenlik değişimi ile süperkapasitörün enerji depolama durumu akıllı görsel izleme sağlanmaktadır. Şarj olduktan sonra, süperkapasitör bir LED'i yakacak şekilde enerji sağlamakta, bu da pratik uygulama yeteneğini göstermektedir. Üretilen elektrokromik süperkapasitör, yüksek enerji depolama kapasitesi ve döngüsel stabilitesi sayesinde elektronik alanlarda pratik uygulama potansiyeline sahip olabilir (Guo ve ark., 2020).

Mike Tebyetekerwa, Zhen Xu, Weili Li, Xingping Wang, Ifra Marriam, Shengjie Peng, Seeram Ramkrishna, Shengyuan Yang ve Meifang Zhu 2017 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Tekstil iplikleri, enerji depolama, sensörler ve diğer akıllı uygulamalar gibi çeşitli alanlarda kullanılmak üzere modifiye edilmektedir. İplik süperkapasitörleri ve pillerindeki enerji depolama uygulamaları için en yaygın kullanılan iplik modifikasyon tekniklerinden biri, iletken aktif malzemelerin tekstil ipliklerine kaplanmasıdır. Kaplama işlemi, buhar fazı polimerizasyonu, daldırma kaplama, katman katman montaj yöntemiyle ince film kaplama, atomik katmanlı kaplamalar ve elektrokimyasal kaplamalar gibi yöntemlerle yapılabilir. Ancak bu yöntemler karmaşık, kontrolsüz ve ölçeklenebilirliği zordur. Bunun yanı sıra, bu yöntemler genellikle kırılman kaplamalar oluşturur ve kaplanmış iplikler, geleneksel tekstillere entegre edildiğinde veya dokuma/örme ve dikiş işlemleri sırasında kolayca çatlar. Bu çalışmada, bu zorlukları aşmak için iplik üzerine modifiye edilmiş elektrospinning (elektrospinning) işlemiyle nanolif kaplama yapılması için kolay bir konsept önerilmektedir. Bu yöntem, tekstil ipliklerinin etrafına kaplanmış nanoliflerin elektroaktif ve gözenekli yapısı sayesinde mükemmel elektrokimyasal performans, olağanüstü dayanıklılık ve esneklik ile tüm tekstil süper esnek nanolif kaplanmış iplikler elde etme kapasitesine sahiptir. Bu yöntem, tek nozullu üretkenlik ile saatte 1.2 m'ye kadar akıllı ipliklerin üretimi için yeni bir ölçeklenebilir strateji sunmaktadır (Tebyetekerwa ve ark., 2018).

Guo Ye, Xiumei Ma, Yun He, Xuemin Duan, Weiqiang Zhou ve Jingkun Xu 2017 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Füze halka ailesine ait olan poliiindoller, benzersiz fiziksel ve elektrokimyasal özellikleri nedeniyle umut verici malzemeler olarak geniş bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmada, poli(7-formilindol) (PFI_n) filmi, 7-formilindolün, 0.1 M LiClO₄ içeren asetonitril çözeltisinde doğrudan anodic oksidasyonu ile karbon fiberler üzerine elektrokimyasal olarak sentezlenmiştir. FT-IR spektroskopisi, monomerin polimerizasyon noktasının indol halkasının C₂ ve C₃ pozisyonlarında gerçekleştiğini göstermiştir. PFI_n filminin karbon fiberler üzerindeki morfolojisi, SEM gözlemleriyle incelenmiş ve PFI_n filminin karbon fiberleri sıkı bir şekilde sardığı gözlemlenmiştir (PFI_n/CF). Elektrokimyasal sonuçlar, PFI_n/CF elektrodunun 20 A g⁻¹'de 637 F g⁻¹ gibi dikkate değer bir özgül kapasitans gösterdiğini ortaya koymuştur. Enerji yoğunluğu, 21 kW kg⁻¹ gibi yüksek bir güç yoğunluğunda yaklaşık 42 Wh kg⁻¹'ye ulaşmıştır. Ayrıca, PFI_n/CF, 1000 döngü sonrasında başlangıçtaki özgül kapasitansın yaklaşık %74.1'ini ve %100 coulomb verimliliğini korumuştur. Bu sonuçlar, PFI_n/CF'nin esnek süperkapasitör uygulamaları için umut verici bir elektrot malzemesi olduğunu göstermektedir (Ye ve ark., 2017).

Leela Joshi, Bhavana Gupta ve Rajiv Prakash 2010 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Karboksil fonksiyonlu iletken polimer, poli(5-karboksindiol) ve bunun karboksil fonksiyonlu çok duvarlı karbon nanotüpü (c-MWNT) üzerindeki düzgün kaplaması, yerinde kimyasal sentez kullanılarak rapor edilmiştir. c-MWNT, monomerle birlikte etanolda düzgün bir şekilde dağılmış ve monomerlerin c-MWNT yüzeylerine adsorpsiyonu, asit-baz etkileşimleriyle gerçekleştirilmiştir (monomer ve c-MWNT). Polimerin oluşumu Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) ile doğrulanmış ve c-MWNT'lerle etkileşimi Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) ve termal analizle araştırılmıştır. X-Işını Difraksiyonu ve Tarama Elektron Mikroskopu (SEM) çalışmaları, nanotüp kaplanmış uniform polimer yapısında tübüler nanokompozitlerin oluşumunu göstermektedir. Elektrokimyasal çalışma, saf polimere kıyasla iletkenlik ve kapasitansda belirgin bir artış ve büyük bir yük transferi direnci azalması göstermektedir (Joshi ve ark., 2010).

D.J. Bhagatn ve G.R. Dhokane 2014 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Yeni bir pot sentezlenen poliindol/poli(vinil asetat) (PIN/PVAc) kompozit filmlerinin UV–VIS spektroskopik incelemelerini rapor etmektedir. Hazırlanan örneğin yüzey morfolojisi, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile analiz edilmiştir ve bu, düzensiz, porsuz bir yapı ve süngerimsi amorf morfoloji göstermektedir. UV–VIS spektroskopisi, PIN/PVAc kompozit filmlerinin optik parametrelerini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Bu polimer kompozit filmler, 250 nm'nin altında güçlü bir absorpsiyon sergileyerek yaklaşık 225 nm civarında iyi tanımlanmış bir absorpsiyon zirvesi göstermektedir. Hazırlanan örneklerin optik bant aralığı enerjisi değerleri 3.924–5.146 eV arasında değişmektedir. Bununla birlikte, PIN/PVAc kompozit filminin maksimum optik iletkenliği 350 nm'de $2.92 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ olarak bulunmuştur (Bhagat ve Dhokane, 2014).

Göknur Ürkmez, Bekir Sarı, Halil ve İbrahim Ünal 2010 yılında yapmış oldukları bu çalışma:

Bir dizi poliindol (PIN) ve poli(dimetilsiloksan) (PDMS) kompoziti, anhidrot ortamda FeCl_3 oksitleyici ajanı kullanarak kimyasal olarak sentezlendi. Kompozitler, FTIR ve UV-görünür spektroskopileri, termogravimetrik analiz (TGA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), elementel analiz, indüktif bağlı plazma-optik emisyon spektroskopisi (ICP-OES), manyetik eğilim, gerilme–gerinme deneyleri ve iletkenlik ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda PIN'in iletkenlikleri de ölçülmüş ve iletkenliklerinin sıcaklık arttıkça hafifçe arttığı görülmüştür. Ayrıca, PDMS/PIN kompozitlerinin serbest duran filmleri, cam Petri tabakalarına dökülerek gerilme–gerinme özelliklerini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Termogravimetrik analiz sonuçlarından, PDMS/PIN kompozitlerinin PIN'e göre daha termal olarak stabil olduğu bulunmuştur. PDMS/PIN kompozitlerinin termal stabiliteleri, PIN içeriği arttıkça artmıştır. Ayrıca, PDMS/PIN kompozitlerinin iletkenliklerinin, kompozitlerdeki indol içeriğine bağlı olduğu tespit edilmiştir (Ürkmez ve ark., 2010).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Deneylerde Kullanılan Kimyasal Maddeler ile Araç ve Gereçler

2.1.1. Kullanılan kimyasallar

Deneyisel çalışmalar için kullanılan kimyasal malzemelerin listesi Çizelge 2.1' de sunulmuştur.

Çizelge 2. 1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan kimyasal maddeler

Kimyasal Madde	Formül	Molekül Kütlesi (g/mol)	Kullanım Amacı	Üretici Firma
Etilmetakrilat (EMA)	$C_6H_{10}O_2$	114,14 g/mol	Polimer sentezi ve Kompozit sentezi	Sigma-Aldrich
Dietilaminoetilmetakrilat (DEAEMA)	$C_{10}H_{15}NO_2$	185,21 g/mol	Polimer sentezi ve Kompozit sentezi	Sigma-Aldrich
Demir (III) Klorür	$FeCl_3$	162,2 g/mol	Kompozit sentezinde oksidant olarak	Carlo Erba
İndol	C_8H_7N	117,151 g/mol	Kompozit yapımında iletken polimer olarak	Merck
Kloroform	$CHCl_3$	119,38 g/mol	Başlatıcı çözücü ve kompozit yıkama aşamasında	Merck

Benzen	C ₆ H ₆	78,11 g/mol	Çözücü	Merck
1,4 Dioksan	C ₄ H ₈ O ₂	88,11 g/mol	Çözücü	Merck
Metanol	CH ₃ OH	32,04 g/mol	Polistiren çöktürücü	Merck
Benzolperoksit	C ₁₄ H ₁₀ O ₄	242,23 g/mol	Başlatıcı	Merck
Amonyumpersülfat	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	228.21 g/mol	Başlatıcı	Merck

2.1.2. Kullanılan cihazlar, araç ve gereçler

Hazırlanan maddelerin Fourier dönüşümü kızılötesi (FTIR) spektrası, 400–4000 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında Perkin Elmer Spectrum Two (UATR) IR Spektrometresi ile kaydedildi. Kütle ölçümleri için analitik terazi kullanılmıştır. TGA analizleri Hitachi 7000 TGA/DTA model termogravimetrik analiz cihazı ile oda sıcaklığında – 1000 °C, nitrojen atmosferi altında, 10 °C/dakika ısıtma hızında gerçekleştirildi. Polimer kompozitlerin yüzey morfolojisini incelemek için Zeis EVO LS10 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve VEECO Multimode 8 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanıldı. AFM analizlerinde mikroskop temas modunda kullanılmış ve konsolun tipik kuvvet sabiti 0,15 N m⁻¹ olarak ayarlanmıştır. Tarama hızı 1 Hz idi. Kompozit malzemeler için gerçek/sanal kısmının frekans gelişimi karmaşık dielektrik sabiti, dielektrik kayıp tanjantı, gerçek/sanal kısım elektrik modülü ölçümleri ve hesaplamaları oda sıcaklığında empedans ve kapasitans değerleri 10¹ ila 10⁷ Hz frekans aralığında LCR Metre kullanılarak analiz edildi.

- Süzgeç kağıdı süzme işlemlerinde, parafilm kapatma işlemlerinde, etiket ise isimlerin etiketlendirilmesinde kullanılmıştır.
- Damıtma hunisi ve reaksiyon balonu kompozit sentezi ve ayırma işlemlerinde, cam pipet, farklı hacimlere sahip beher, cam huni, cam baget, cam şişe, tıpalı numune şişesi ise kompozitlerin saflaştırılması ve depolanması işlemlerinde kullanılmıştır.
- Buzdolabı kimyasal maddelerin +4 °C’de depolanmasında kullanılmıştır.

- Metal kap, metal laboratuvar standı, metal çeneli kısıkaç, metal spatül süzme ve ayırma işlemlerinde, steril jilet kesim işlemlerinde kullanılmıştır.
- Agat havan öğütme işlemlerinde kullanılmıştır.

Vakum Etüvü

Sentezlenen polimer ve kompozitleri kurutmak için Memmert UN55 model etüv kullanılmıştır. Kullanılan etüv Resim 2.1’ de görülmektedir.



Resim 2.1. Etüv

Su Banyosu

Kopolimerlerin sentezi için JeioTech BW-10H model su banyosu kullanılmıştır. Su banyosu Resim 2.2’ de görülmektedir.



Resim 2.2. Su banyosu

Manyetik Karıştırıcı ve Isıtıcı

Polimerlerin ve kompozitlerin hazırlanmasında IKA RH basic 2 model manyetik karıştırıcı ve ısıtıcı kullanılmıştır. Manyetik karıştırıcı – ısıtıcı Resim 2.3’ de gösterilmektedir.

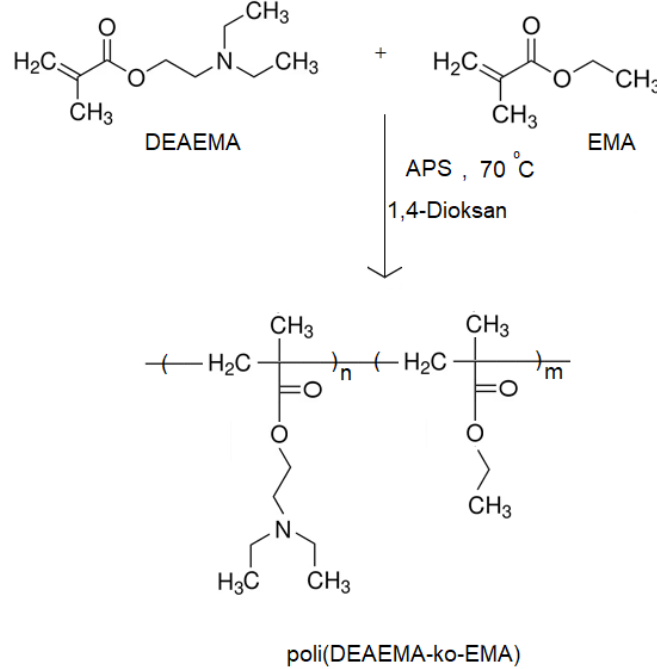


Resim 2.3. Manyetik karıştırıcı - ısıtıcı

2.2. Deneysel Çalışmalar

2.2.1. Dietilaminoetilmetakrilat-etilmetakrilat kopolimerizasyonu

20 ml dietilaminoetilmetakrilat (DEAEMA) ile Etilmetakrilat (EMA) monomerleri, monomer miktarının %5 oranında amonyumpersülfat (APS) başlatıcısı ve 60 ml, 1,4-dioksan çözücüsü cam balon içerisine konuldu, cam balon içerisindeki karışım 5 dakika süreyle azot gazı ile degaz edildi ve balonun ağzı tıpa ile kapatıldı. Polimerizasyonun gerçekleşmesi için cam balon 70 °C sabit sıcaklıkta bulunan su banyosuna konuldu ve 24 saat süreyle bekletildi (Resim 2.4). Suyun buharlaşmasından kaynaklı su azalması göz önüne alınarak su banyosuna belirli aralıklar ile 70 °C sıcaklıkta bulunan su ilave edildi. 24 saat bekleme sonucu polimer cam balondan çıkarıldı ve hiçbir çöktürme işlemine tabi tutulmadan kuruması için süzgeç kâğıdına alınarak 40 °C’ de bulunan etüve konuldu (Resim 3.6a). Kuruyan polimer spatül kullanılarak ezildi ve daha sonra kompozit sentezinde kullanılmak üzere küçük parçalar haline getirildi ve cam bir şişede depolandı. Poli(DEAEMA-ko-EMA) sentezine ait reaksiyon aşağıdaki gibidir:



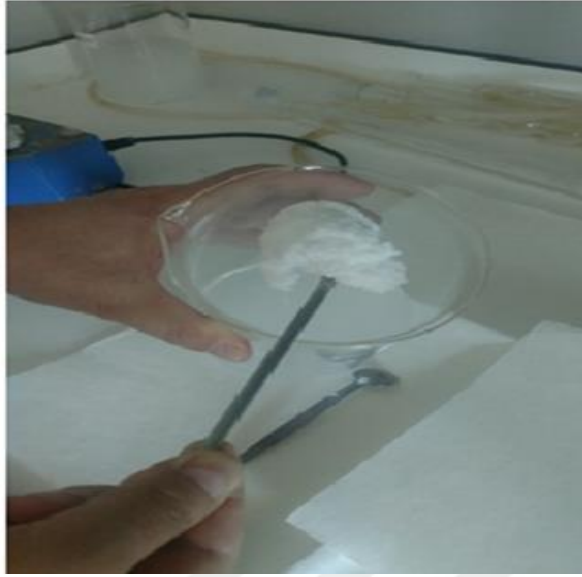
Şekil 2.1. Poli(DEAEMA-ko-EMA) sentezine ait şema



Resim 2.4. Dietilaminoetilmetakrilat-Etilmetakrilat 'ın su banyosunda kopolimerizasyonu



Resim 2.5. Poli(DEAEMA-ko-EMA)'nın çöktürme işlemi



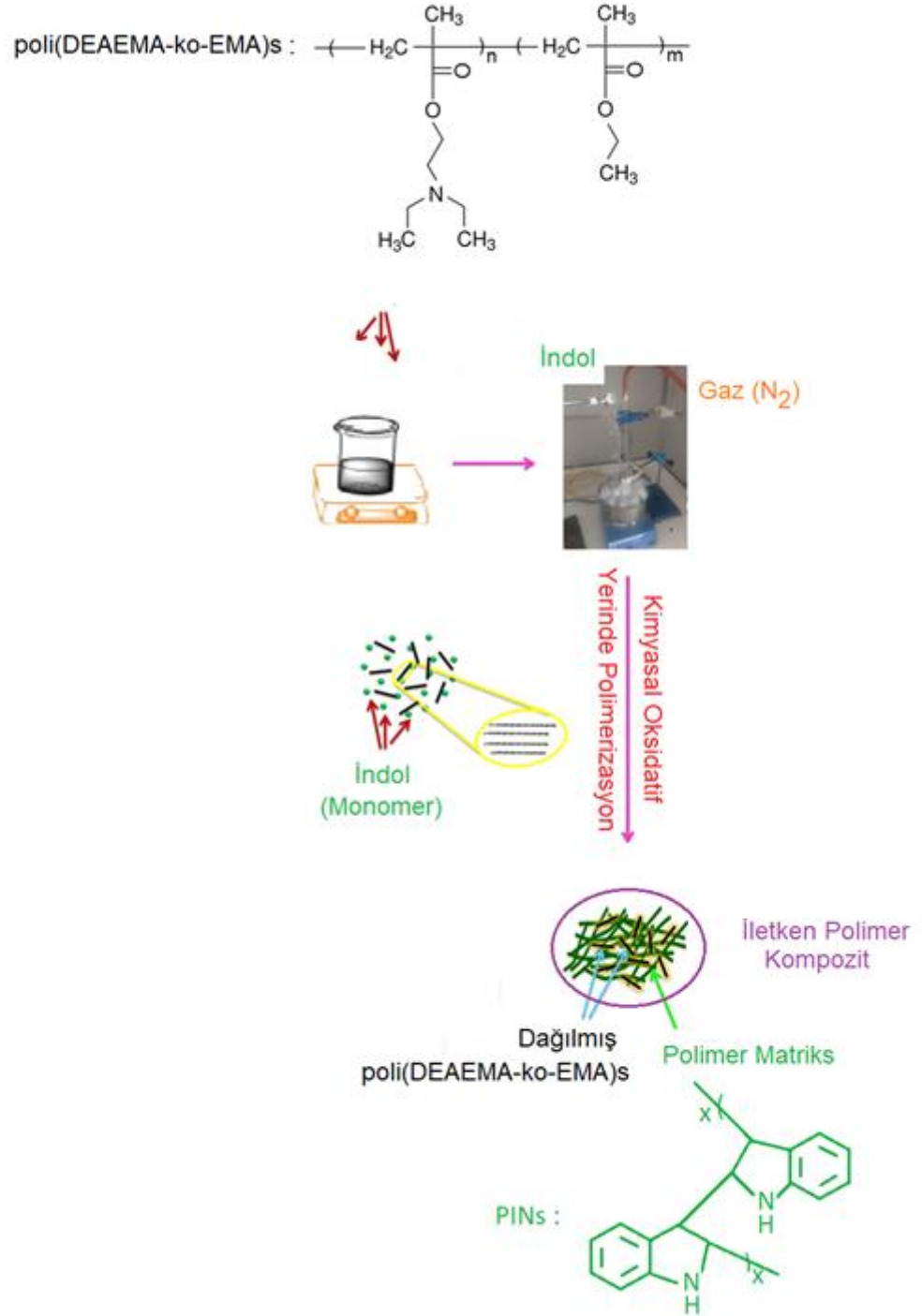
Resim 2.6. Poli(DEAEMA-ko-EMA)

2.2.2. Poli(Dietilaminoetilmetakrilat-ko-Etilmetakrilat)/Poliindol kompozitlerin sentezi

Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerin sentezinde yükseltgen olarak FeCl_3 , çözücü olarak ise kloroform kullanıldı. Ağırlıkça % 10, 30, 50, 70, 90 PIN içeren kompozitlerin sentezi sırasında kullanılan poli(DEAEMA-ko-EMA), İndol, ve FeCl_3 miktarları Çizelge 2.2’de verilmiştir. Kompozitler PC1, PC2, PC3, PC4 ve PC5 olarak kodlanmışlardır. Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerin sentezine ait şema Şekil 2.2’ de gösterilmiştir.

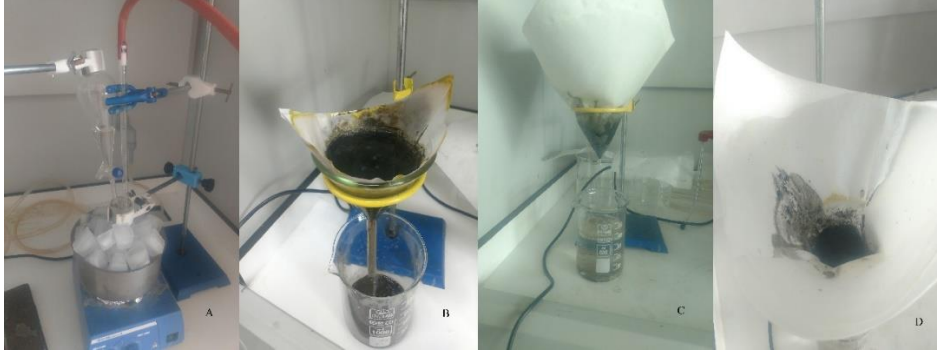
Çizelge 2.2. Kompozitlerin poli(DEAEMA-ko-EMA), İndol ve Demir(III) Klorür içeriği

Kompozitin İndol içeriği (%, m/m)	Kullanılan poli(DEAEMA-ko-EMA) miktarı (g)	Kullanılan FeCl_3 miktarı		Kullanılan indol miktarı		Kompozit’in Kodu
		(g)	(mol x 10^2)	(g)	(mol x 10^2)	
10	3,6	1,45	0,90	0,53	0,45	PC1
30	2,8	4,37	2,70	1,58	1,35	PC2
50	2,0	7,25	4,48	2,62	2,24	PC3
70	1,20	10,20	6,30	3,68	3,15	PC4
90	0,40	13,05	8,06	4,72	4,03	PC5



Şekil 2.2. Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerin sentezine ait şema

Kompozitlerin sentezinde daha önce depolanan poli(DEAEMA-ko-EMA)'dan Çizelge 2.2'de belirtilen miktarlarda hassas terazide tartılarak cam bir balon içerisine konuldu. Balon içerisine 40 ml kloroform eklenerek polimerlerin çözünmesi beklendi. Analitik terazide Çizelge 2.2'de belirtilen miktarda FeCl_3 tartılarak kopolimer çözeltisine eklendi. Manyetik karıştırma işlemi için karıştırıcı üzerine manyetik alanı etkilemeyecek metal bir kap yerleştirildi ve balon çeneli kısıkaç yardımı ile bu metal kabın içerisine tabanı kaba degecek şekilde yerleştirildi. Balon içerisine bir adet manyetik balık atıldı ve balonun ağzı kapatılarak karıştırıldı. İndol'ün polimerizasyonu esnasında ortaya çıkan ısıyı 0-5 °C' de tutabilmek adına balonun etrafına kap dolacak şekilde buz konuldu (Şekil 2.2). Çizelge 2.2'de belirtilen miktarlarda indol analitik terazide tartılarak 50 ml hacimdeki bir beherde 20 ml kloroformda çözülmüştür. Reaksiyon ortamını inert etmek için sistemden Azot gazı geçirilmiştir. Bu esnada çözülmüş olan indol bir damlatma hunisi ile reaksiyon ortamına damlatılmış ve sistem karıştırılmaya devam edilmiştir. Damlatma hunisindeki indol çözeltisi bittikten sonra huni sistemden sökülmüş ve sisteme 30 dakika daha Azot gazı verilmiş, sürenin sonunda ise Azot gazı geçirilmesi sonlandırılmış, balonun ağzı kapatılarak 1 saat daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Bu esnada sistemin karıştırma hızı sürekli kontrol edilmiş ve metal kap içerisinde bulunan buz miktarı azaldıkça kap içerisine buz eklemesi yapılmıştır. Reaksiyon sunucunda elde edilen kompozit malzeme 500 ml hacme sahip bir behere alınarak dinlenmeye bırakılmıştır. 70 °C'de bir beher içerisinde 900 ml saf su ısıtıldı. Filtre kağıdı takılı cam süzme hunisinde sentezlenen kompozit ilk önce kloroform ile daha sonra ise 70 °C sıcaklığındaki su ile filtre kâğıdından akan süzüntü renksiz ve berrak olana kadar yıkandı (Şekil 2.2.). Süzme işleminden elde edilen kompozit filtre kâğıdı üzerine numarası yazılarak 40 °C' de bulunan etüv içerisine konularak kuruması beklendi. Kuruyan kompozit bir agat havan içerisinde ezildi. Kompozit analizleri yapılmak üzere bir şişede depolandı. Bu işlemler her bir kompozit için tekrar edildi.



Resim 2.7. a)İndol eklenmesi b) Yıkamanın ilk aşaması c) Yıkamanın son aşaması d) Yıkanmış kompozit

2.3. Yapılan Analizler

Termogravimetrik Analiz (TGA)

Uşak Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Hitachi 7000 TGA/DTA cihazı sentezlenen örneklerin ısıl bozulmaları ve kütle kayıplarını belirlemede kullanılmıştır. Analizler $N_{2(g)}$ atmosferinde, $10\text{ }^{\circ}\text{C/dk}$ ısıtma hızında, oda sıcaklığı – $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir.

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

FTIR ölçümleri Uşak Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Perkin Elmer Spectrum Two model cihaz ile yapılmıştır.

Taramalı Elektron Mikroskopu ve Enerji Yayımlı X-Işını Analizi (SEM – EDX)

Örneklere ait SEM – EDX analizleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERÜ-TAUM)/KAYSERİ bünyesindeki laboratuvarında bulunan ZEIS EVO LS10 cihaz ile yapılmıştır.

Atomik Güç Mikroskopu Analizi (AFM)

Örneklere ait SEM – EDX analizleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERÜ-TAUM)/KAYSERİ bünyesindeki laboratuvarında bulunan ZEIS EVO LS10 cihaz ile yapılmıştır.

Dielektrik-İletkenlik Ölçümü

Örneklere ait İletkenlik Ölçümleri Ömer Halisdemir Üniversitesi bünyesinde bulunan LCR Metre karakterizasyon cihazı ile yapılmıştır.

2.4. Hazırlanan Polimer ve Kompozitlerin Antimikrobiyal Özelliklerinin İncelenmesi

2.4.1. Antimikrobiyal aktivite çalışması için kullanılan mikroorganizmalar:

1.*S. aureus* ATCC 25923,

2.*S. mutans*,

3.*E. coli* ATCC 25922,

4.*P. aeruginosa* ATCC 27853,

5.*C. albicans*,

6.*Listeria monocytogenes*

Uşak Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu kültür koleksiyonundan temin edilmiştir.

2.4.2. Mueller Hinton Agar (MHA) (Merck, 105437)

Mueller Hilton Agar bileşimi Çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Mueller Hilton agar bileşimi

Bileşim	Miktar
Et İnfüzyonu	1,0 g / L
Kazein Hidrolizatı	8,75 g / L
Nişasta	0,75 g / L
Agar	6,5 g / L

Otoklavda 121 °C’de 15 dakika süreyle steril edildikten sonra disk difüzyon testi ile antimikrobiyal aktivite analizi için kullanıldı.

2.4.3. Nutrient Broth (NB) (Merck 105443)

Nutrient Broth bileşimi Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Nutrient broth bileşimi

Bileşim	Miktar
Pepton	2,5 g / L
Et İnfüzyonu	1,5 g / L

Otoklavda 121 °C’de 15 dakika steril edildikten sonra MİK analizi için kullanıldı.

2.5. Antimikrobiyal Özelliklerinin İncelenmesinde Kullanılan Cihazlar

Shimadzu (UV-1800 240 V) spektrofotometre

Mettler Toledo (ME203) analitik terazi

Hettich Zentrifugen (EBA 20) santrifüj

Binder (230 V ~ /10A) etüv

Termostat inkübatör

2.6. Antimikrobiyal Özelliklerinin İncelenmesinde Kullanılan Metotlar

2.6.1. Antimikrobiyal aktivitenin Agar Well difüzyon yöntemi ile belirlenmesi.

Agar kuyusu difüzyon yöntemi için Mueller Hinton Agar (MHA) (Et İnfüzyonu 1,0 g/L, Kazein Hidrolizat 8,75 g/L, Nişasta 0,75 g/L, Agar 6,5 g/L) kullanıldı (Baloiri ve ark., 2016). 0,5 McFarland bakteri solüsyonu, taze bakteri kültürü gece boyunca inkübe edildi. 0,5 McFarland bakteri süspansiyonu, bir spektrofotometre (Shimadzu UV-1800 240 V) (EUCAST, 2020, <https://www.eucast.org/>) kullanılarak 625 nm dalga boyunda 0,08 ila 0,13 arasındaki absorbans ölçülerek kontrol edildi ve smear aşılması yapıldı. Bir swab ile agar plakaları üzerinde gerçekleştirildi. Agarda istenilen çapta

delikler oluşturmak için sterilize edilmiş bir agar delici kullanıldı. 200 µl DMSO içerisinde çözündürülmüş test maddesi kuyucuklara yüklendi ve ortamın emilmesi için 30 dakika beklendi. İnhibisyon zon çapları 37°C'de 16-18 saatlik inkübasyonun ardından ölçüldü.

2.6.2. Antimikrobiyal aktivitenin kantitatif analizi

Minimum İnhibitör Konsantrasyonunu (MİK) belirlemek için Mikrodilüzyon Yöntemi kullanıldı. Kısaca; test materyali DMSO içerisinde çözöldükten sonra 600'den 0,596 µg/ml'ye kadar Nutrient Broth (NB) ortamında (Peptone 2,5 g/L, Et İnfüzyonu 1,5 g/L) seyreltildi ve mikropłaka kuyucuklarına dağıtıldı. Mikroorganizmalar NB'de 0,5 McFarland standardına ulaşınca kadar (625 nm kullanılarak absorbans 0,08-0,10 olacaktır) 37°C'de inkübe edildikten sonra her kuyucuğa 50µL inoküle edildi. Mikroplak 24 saat 37°C'de inkübe edildi. Süre sonunda bulanıklığın oluşmadığı ilk konsantrasyon, büyümeyi tamamen inhibe eden maddenin MİK'i olarak belirlendi (Hasselmann, 2003).

2.6.3. Mantar Misel gelişimi üzerindeki etkinin belirlenmesi

İçinde Patates Dekstroz Agar (PDA) (Merck 1.10130) bulunan petri kutularının ortasından 1 cm'lik agar diski çıkarıldı. Kontrol olarak 20 mL DMSO ve test materyali numuneleri bu kuyucuklara aktarıldı. Test edilen mantarlar, mantar türlerinin kolonilerinin dış kenarlarından bir öze ile alınarak, merkezi kuyucuğa eşit mesafede PDA plakalarına aşılandı. Plakalar karanlıkta 27°C'de 7 gün süreyle inkübe edildi. Mantar hiphasının merkezi kuyucuktan uzaklığı milimetre cinsinden ölçüldü. Misel büyümesinin yüzde inhibisyonu, kontrol ile karşılaştırılarak hesaplandı.

2.6.4. Toplam oksidan (TAS) ve toplam oksidan durumunun (TOS) belirlenmesi

Oksidan ve antioksidan moleküllerin belirlenmesinde kullanılan toplam antioksidan durum (TAS) ve toplam oksidan durum (TOS) analizleri, uzun ömürlü reaktifler kullanılarak kolay, otomatik ve ucuz bir yöntemle güvenilir ve hassas sonuçlar elde etmemize olanak sağlar.

Test materyallerinin toplam antioksidan durumu (TAS) düzeyi Rel Assay marka ticari kit (Rel Assay Kit Diagnostics, Türkiye) kullanılarak ölçüldü. Sonuçlar mmol Trolox eşdeğeri/lit olarak ifade edildi. Bu yöntem, daha stabil bir 2,2'-azino-bis(3-

etilbenztiyazolin-6-sülfonik asit) (ABTS) radikal katyonunun antioksidanlar tarafından karakteristik renginin ağartılmasına dayanmaktadır (Erel, 2004).

Toplam oksidan durum (TOS) düzeyi Rel Assay marka ticari kit (Rel Assay Kit Diagnostics, Türkiye) kullanılarak ölçüldü. Bu yöntem, asidik ortamda çeşitli oksidatif türlerin varlığında demir iyonunun ksilenol turuncusu tarafından oksidasyonu yoluyla ferrik iyonun ölçülmesine dayanmaktadır (Erel 2004). Ferrik iyon, asidik ortamda Xylenol Orange ile renkli bir bileşik oluşturur. Bu renk değişimi spektrofotometrik olarak ölçülebilen toplam oksidan molekül miktarını belirler (Erel 2004).

Tüm deneyler üreticinin prosedürüne göre yapıldı. Sonuçlar $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ eşdeğeri/lit olarak ifade edildi (Erel 2005). TOS seviyelerinin TAS seviyelerine oranının yüzdesi olarak ifade edilen oksidatif stres indeksi (OSI) hesaplandı. Sonuçlar “keyfi birimler” (OSI) olarak ifade edildi (Feng ve ark., 2012).

$$A_2 - A_1 = \Delta Abs \quad (2.6.1)$$

$$TAS = [\Delta Abs \text{ H}_2\text{O}_2 - \Delta Abs \text{ örnek}] / [\Delta Abs \text{ H}_2\text{O}_2 - \Delta Abs \text{ Standart}] \quad (2.6.2)$$

$$TOS = \Delta Abs \text{ örnek} / \Delta Abs \text{ Standart} \times 10^{\text{Concentration of standart}} \quad (2.6.3)$$

$$OSI (\text{Arbitrary Unit}) = TOS (\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{Eq/L}) / TAS (\text{mmol Eq/L}) \times 10 \quad (2.6.4)$$

2.6.5. Antibiofilm etkinin saptanması

Patojenler Nutrient Broth besiyerine ekim yapılarak 37 °C’de 24 saat inkübe edilmiştir. İnkübasyondan sonra kültürler 0.5 McFarland bulanıklığına göre (10^6 CFU mL^{-1}) ayarlanmıştır. Önceden hazırlanmış 60 ve 30 μg konsantrasyonlarda test materyali içeren Nutrient Broth besiyerine 200 μg S. mutans inoküle edilmiştir (0.5 McFarland) ilave edilerek Tüpler 37 °C’de 24 saat inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyondan sonra sıvı besiyeri dökülerek, tüpler distile suyla 3 kez yıkandı. Kuruyan tüplere önce etanol: asetik asit (95:5) eklenip 10 dk fiksasyon yapıldı ve süre sonunda tüpler boşaltılıp kurumaya bırakıldı. Daha sonra kuruyan tüplere %0.1’lik kristal viyole eklenerek boyama işlemi yapıldı. Boyama işlemi sonrasında tüplerdeki kristal viyole boşaltılıp 2-3 defa distile su ile yıkandı ve sonrasında kurutuldu. Kuruyan tüplerde boyanmış tutunan bakterilerin kaldırılması için kuyucuklara etanol: asetik asit (95:5) ilave edilip 10 dk. Süre ile bekletilerek boyanın çözünmesi sağlanmıştır. Süre sonunda mikropolanın OD değeri

spektrofotometre de 600 nm de ölçüldü ve pozitif kontrole göre biyofilm yüzdeleri hesaplandı (Sandberg ve ark., 2008; Korcan ve ark., 2021).

$$\% \text{ İnhibisyon} = (A_{\text{kontrol}} - A_{\text{örnek}} / A_{\text{kontrol}}) \times 100 \quad (2.6.5)$$

A_{kontrol} : Sadece bakteri suşunu içeren absorbans değeri

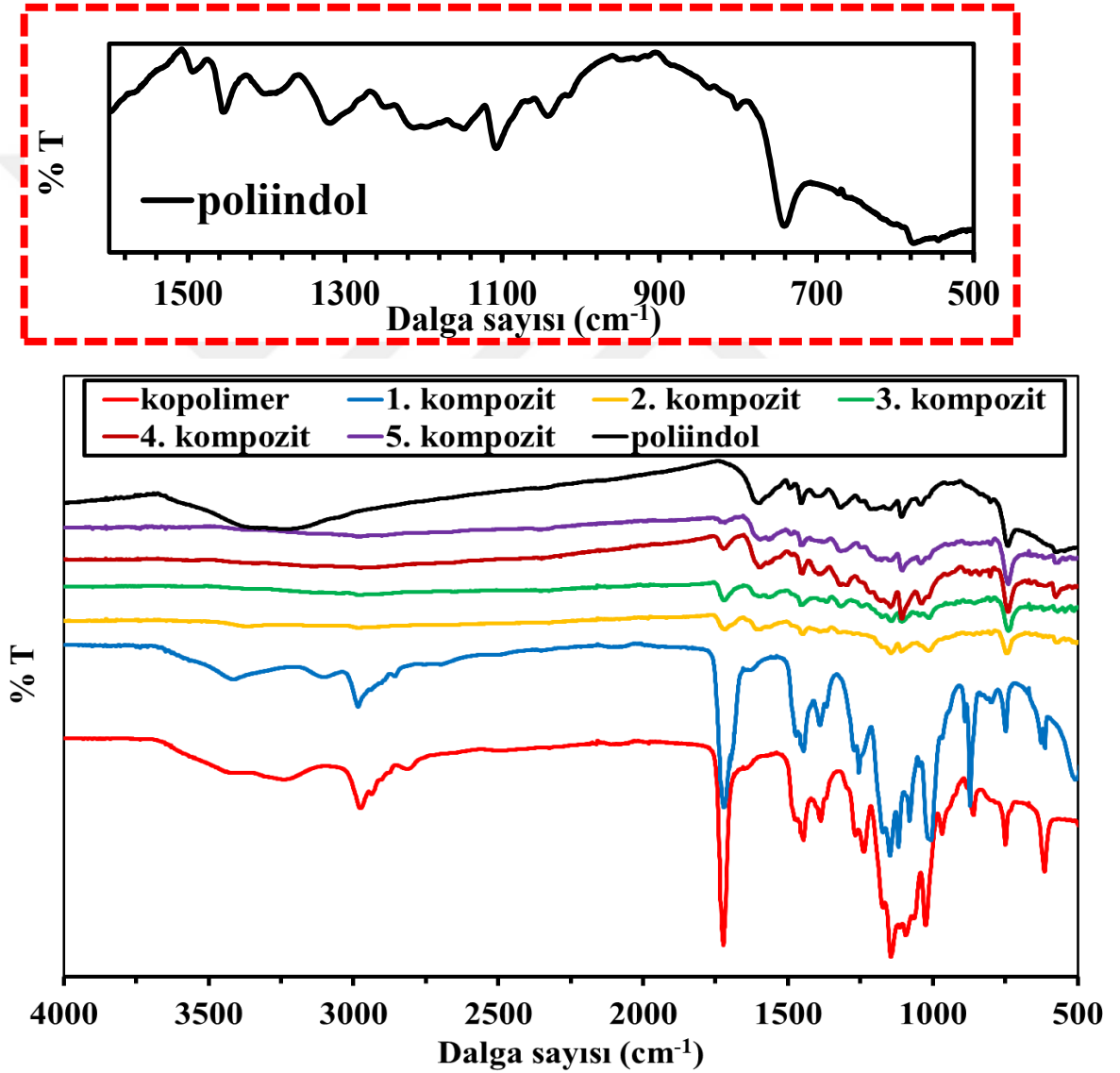
$A_{\text{örnek}}$: Test materyali eklenmiş absorbans değeri



3. DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. FTIR Analizi

Poli(DEAEMA-ko-EMA), PIN ve kompozitlerine ait FTIR spektrumları Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

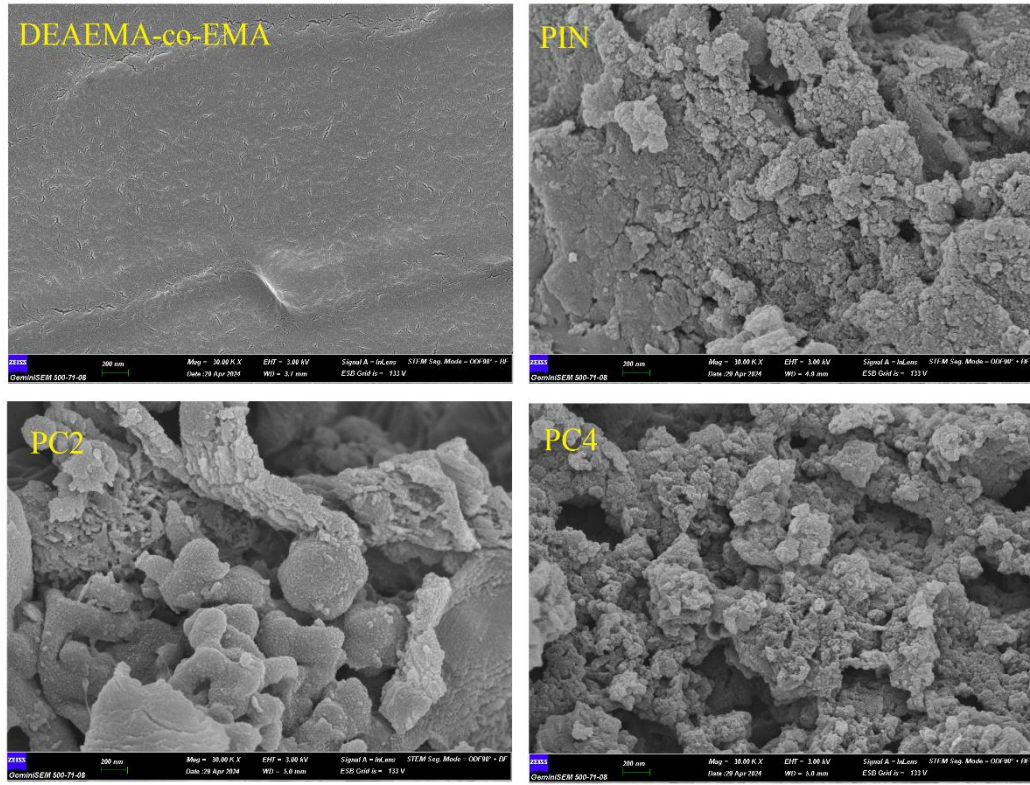


Şekil 3.1. poli(DEAEMA-ko-EMA), PIN ve poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerine ait FTIR spektrumları

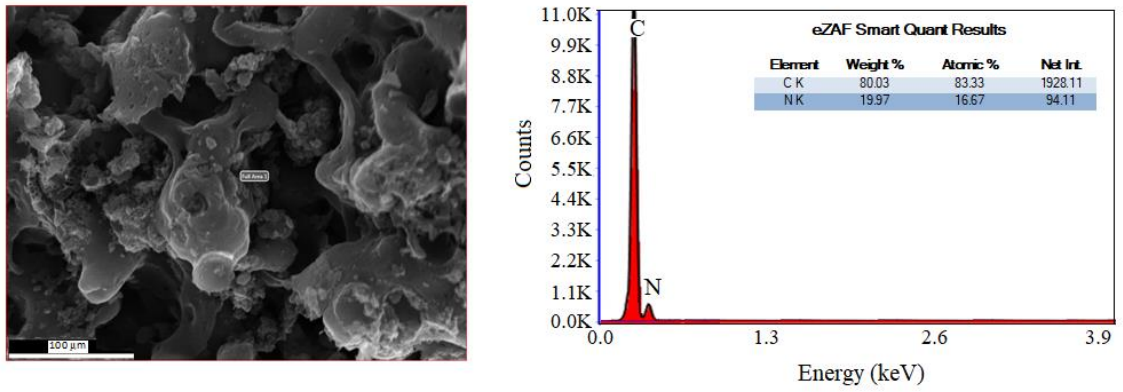
Poli(DEAEMA-ko-EMA)'nın FTIR spektrumunda $-\text{CH}_2-$ ve $-\text{CH}_3$ gruplarının gerilme titreşimlerinden dolayı 2997 cm^{-1} 'de absorpsiyon bantları görülmektedir. Spektrumda 1730 cm^{-1} deki absorpsiyon bandında DEAEMA ve EMA'daki esterin $\text{C}=\text{O}$ grubunun gerilme titreşimi sergilenmiştir. 2842 cm^{-1} 'deki bant, $\text{N}(\text{CH}_3)_2$ kısımlarının $\text{C}-\text{H}$ gerilme titreşimine atfedilmiştir. Her iki akrilat grubundaki $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ fonksiyonel gruba ait gerilme titreşimi $1150-1250\text{ cm}^{-1}$ 'de görülmektedir. Her bir spektrumda 1020 cm^{-1} bandındaki $\text{C}-\text{N}$ gerilme titreşimi tersiyer amin grubunun varlığını dolayısıyla kompozitlerde DEAEMA segmentinin varlığını doğrulamaktadır. Kompozitlere ait FTIR spektrumlarında 3390 , 1500 ve 1405 cm^{-1} 'deki bantlar PIN biriminde $\text{N}-\text{H}$ geriliminin varlığını göstermektedir. 1580 cm^{-1} 'de görülen bant ise indollere özgü $\text{C}=\text{C}$ aromatik bağlarının titreşimine işaret etmektedir. 745 cm^{-1} 'de görülen tek bant PIN 'e ait $\text{C}-\text{H}$ titreşimlerini göstermektedir. Bu bant, zincir sonunda bir hidrojen bağının varlığını göstermektedir. Ayrıca, 1500 cm^{-1} bandı $\text{N}-\text{H}$ gerilmesi ve $\text{C}=\text{C}$ deformasyonu ile ilişkili olabilir. 1455 ve 1205 cm^{-1} bantları benzen ve PIN molekül yapısında yer alan aromatik halkaları işaret etmektedir. PC1-PC5 kompozitlerinde poli(DEAEMA-ko-EMA) oranı azalırken $\text{C}-\text{N}$ grubunun bant yoğunluğunda azaldığı görülmektedir. Öte yandan, PC1-PC5'te poli(DEAEMA-ko-EMA) oranının artması dolayısıyla 1730 cm^{-1} 'deki sinyal yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Şekil deki spektrumlarda $-\text{CH}_2$ grubunun bükülme titreşiminden dolayı 1450 cm^{-1} 'de sinyaller ortaya çıkmıştır. DEAEMA hidrofilik yapıdadır ve spektrumlarda $3000-3500\text{ cm}^{-1}$ deki band maddelerin nemi emdiğini göstermektedir. Tüm kompozitler $1150-1250\text{ cm}^{-1}$ 'de $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ için karakteristik bir bant göstermiştir ve DEAEMA yapısı tarafından nem emilimi nedeniyle $-\text{OH}$ grubuna bağlı olarak $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ 'de geniş bir bant açıkça gözlenmiştir. PC5'te, çok düşük poli(DMAEMA-ko-EMA) oranı ve daha yüksek PIN içeriği nedeniyle $-\text{OH}$ bandı kaybolmuştur.

3.2. Morfoloji Analizi

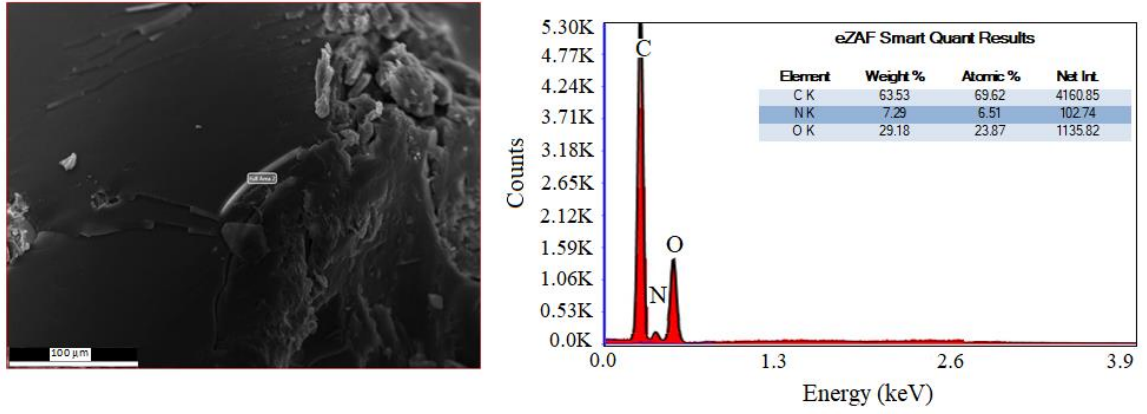
Bilindiği üzere morfolojik yapı bütünlükleri ile malzemelerin özellikleri arasında büyük bir ilişki bulunmaktadır. Bileşenlerin dağılımı kompozit malzemeler için oldukça önemlidir. Poli(DMAEMA-ko-EMA), PIN, PC2 ve PC4'ün FESEM görüntüleri Şekil 3.2'de görülmektedir.



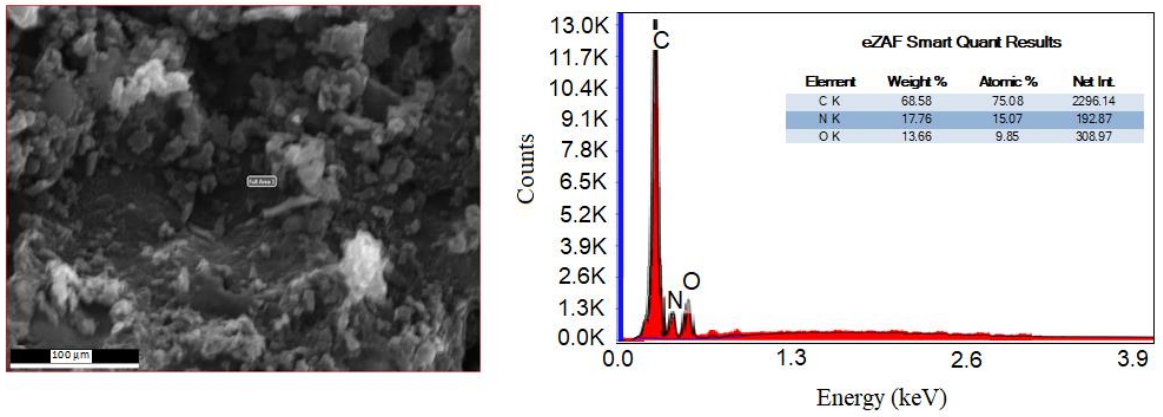
Şekil 3.2. Poli(DEAEEMA-ko-EMA), PIN ve poli(DEAEEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlere ait SEM görüntüleri



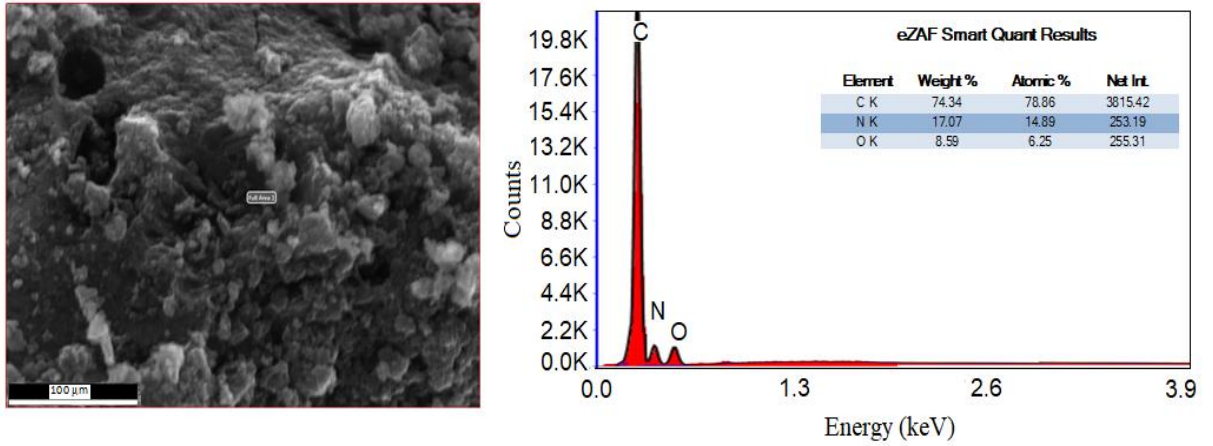
Şekil 3.3. PIN'ın EDX saha analizi



Şekil 3.4. Poli(DEAEMA-ko-EMA)'nın EDX saha analizi



Şekil 3.5. PC2'nin EDX saha analizi



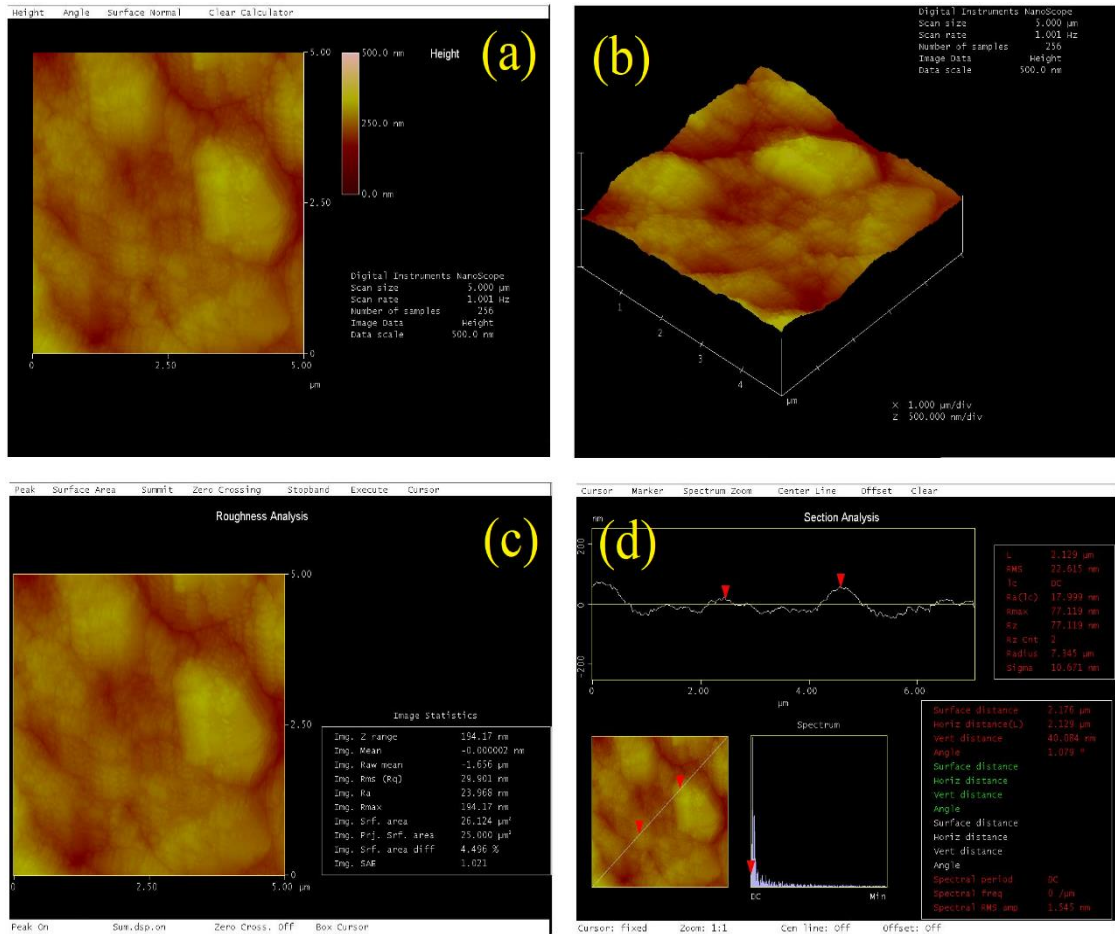
Şekil 3.6. PC4'ün EDX saha analizi

PIN'e ait FESEM görüntüsü literatürde de bahsedildiği gibi süngerimsi, gözenekli ve granül yapısındadır (Taylan ve ark., 2010). Poli(DEAEMA-ko-EMA)'nın SEM görüntüsü ise görüldüğü üzere bölünmez, katmanlı ve damarlı bir yapı olarak gözükmemektedir. FESEM görüntüsünde görüldüğü gibi PC'lerin tekdüze, homojen olmayan ve süngerimsi bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. SEM görüntülerinden, kompozitlerdeki PIN içeriğinin artması ile beraber kompozitlere ait yüzey özelliklerinin de PIN'e benzer bir morfoloji sergilediği söylenebilir. Şarj taşıyıcılarına (elektronlar) ve hareket kabiliyetine bağlı olan elektriksel iletkenliğin polimer veya kompozitlerin kimyasal kompozisyonu ve morfolojisi ile ilişkili olduğu bilinmektedir (Nie ve ark., 2007).

SEM mikrograflarında da görüldüğü gibi poli(DEAEMA-ko-EMA) bölünmez, katmanlı ve damarlı bir morfolojiye sahip iken PIN sıradan granüler bir yapıda görülmektedir. Bu nedenle polimer veya kompozitin yüzey morfolojisi malzemenin iletkenliğini etkilemektedir (Sarı ve Talu, 1998; Gök ve ark., 2003).

PC4'ün FESEM görüntüleri Şekil 3.2.'de görülmektedir. FESEM görüntüsünde görüldüğü gibi PC4'ün tekdüze, homojen olmayan ve süngerimsi bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. PC4'te FESEM EDX alan spektrumları ve EDX analizi yapılan yüzeyler Şekil 3.6'da görülmektedir. C, N ve O elementlerinin zirveleri sırasıyla 0,274 0,410 ve 0,523 keV olarak olarak görülmektedir.

Aynı zamanda PC4'ün yüzey incelemesi AFM kullanılarak incelenmiştir. İnceleme, mikroskobun temas modu kullanılarak gerçekleştirildi. Çalışmada konsolun tipik kuvvet sabiti $0,15 \text{ Nm}^{-1}$ 'de sabit tutuldu. PC4'ün yüzey morfolojisi incelemesi 1.001 Hz tarama hızında gerçekleştirildi.



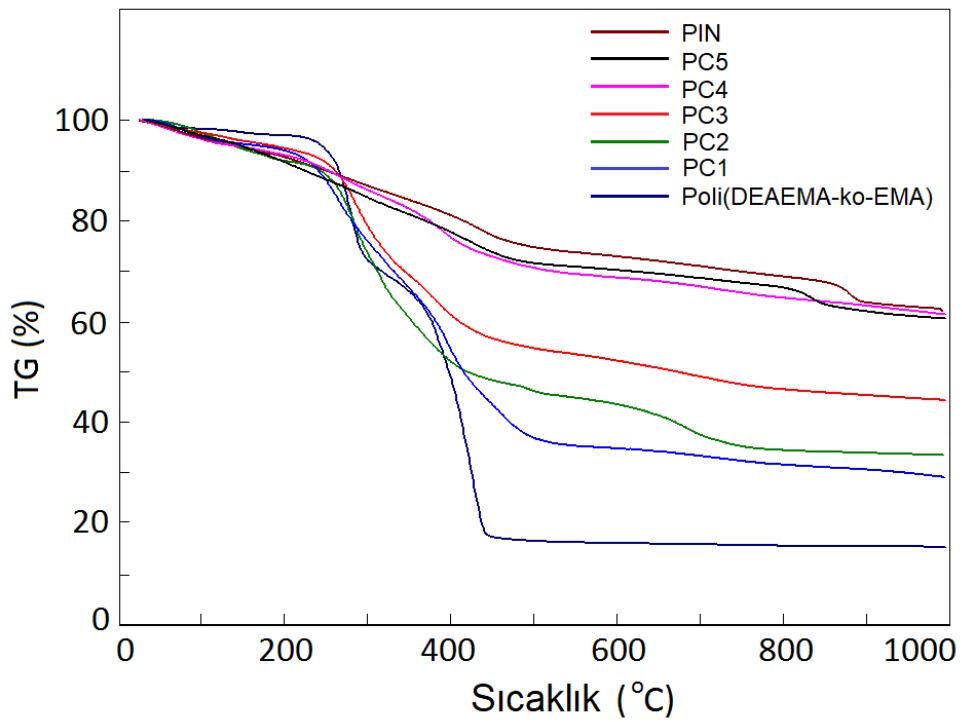
Şekil 3.7. (a) 2D AFM görüntüsü (b) 3D AFM görüntüsü (c) Pürüzlülük analizi (d) PC4 kaplı camın kesit analizi. (Tarama boyutu $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 'dir)

PC4'ün AFM görüntülerinde derinliklerde koyu renkler, yüksekliklerde ise açık renkler görülmektedir [Şekil 3.7(a)'da]. PC4'ün AFM'deki tipik üç boyutlu (3D) görüntüsü Şekil 3.7(b)'de gösterilmektedir. AFM görüntüsünde PC4'ün bulutlu bir forma sahip olduğu görülmektedir. Profil olarak yatay bir bölüm seçilerek 2D AFM görüntüsü ($5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$) ve PC4'ün kesiti elde edildi. Şekil 3.7(d)'de PC4'ün RMS değeri 22.615

nm, yüzey mesafesi değeri: 2.176 μm , yatay mesafe: 2.129 μm ve dikey mesafe: 40.084 nm olarak görülmektedir. Bu verilerden; PC4'ün çıplak cam yüzeyinde düzgün, sıkı bir şekilde paketlenmiş ve homojen olmayan bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz.

3.3. Kopolimer ve Kompozitlerin Termofiziksel Özellikleri

Poli(DEAEMA-ko-EMA) ve farklı oranlarda PIN içeren poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerin termal kararlılıklarını içeren TGA sonuçları Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8. Poli(DEAEMA-ko-EMA), PIN ve poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerin TGA eğrileri

Bu eğrilerden farklı bozunma sıcaklarında % ağırlık kaybı ve 1000 °C'de % kalıntı olarak yapılan hesaplamalar Çizelge 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi PIN üç aşamalı bir termal bozunma eğrisi, poli(DEAEMA-ko-EMA) ise iki aşamalı bir termal bozunma eğrisi göstermiştir. Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitler ise bu polimerlerin termal davranışına benzer bir şekilde üç aşamalı bir ağırlık kaybı yaşamıştır. İlk aşamadaki ağırlık kaybı nem uzaklaşması, karbon monoksit ve katkı maddesi

çıkışından kaynaklanmaktadır. İkinci aşama ise polimerin tamamen bozunması ve ayrışması olarak nitelendirilebilir (Palaniappan ve Narayana, 1994; Amano ve ark., 1994). Poli(DEAEMA-ko-EMA) oranı yüksek olan PC'lerin 400 °C civarında %40 kütle kaybına uğradığı ve daha kararlı davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. PIN oranı arttıkça PC'lerin daha yüksek sıcaklıklarda (700-1000 °C) stabil olduğu ve %40-47 oranlarında kalıntı bıraktığı görülmektedir. Bunun PIN'deki 6'lı ve 5'li gruplardan kaynaklandığı söylenebilir.

TGA eğrilerinden de görüldüğü üzere 90% PIN içeren poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozit en yüksek bozunma sıcaklığına sahiptir. Elde edilen sonuçlara göre kompozitlerin termal kararlılıkları PIN içeriği arttıkça artmaktadır.

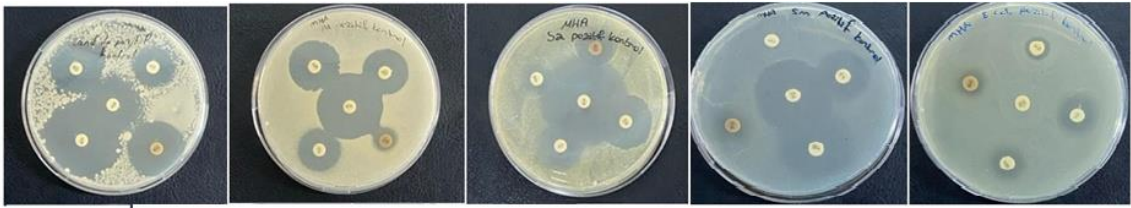
Çizelge 3.1. İncelenen bileşiklerin termal analiz sonuçları

Örnek Adı	Maksimum bozunma sıcaklığı (°C)	%40 ağırlık kaybı sıcaklığı (°C)	400 °C'deki % Ağırlık kaybı	700 °C'deki % Ağırlık kaybı	1000 °C'deki % Artık
Poli(DEAEM A-ko-EMA)	430	416	51	90	9
PC1	468	420	44	71	24
PC2					
PC3	642	394	48	64	32
PC4					
PC5	805	872	23	30	65
Poli(İndol)	830	908	16	27	67

3.4. Antimikrobiyal Etki

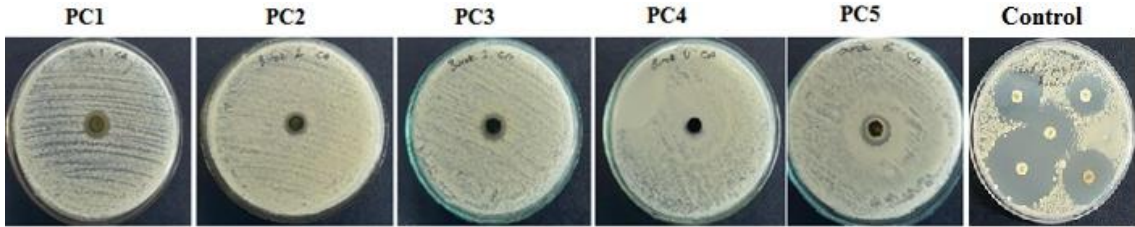
Disk difüzyon tekniği kullanılarak, 12 µg poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitleri PIN ve poli(DEAEMA), test malzemesinin (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10)

antimikrobiyal aktiviteye sahip olup olmadığını belirlemek için in vitro olarak niteliksel olarak değerlendirildi (Çizelge 3.2.). Gram pozitif bakteriler arasında PC5 ve PC2, *Staphylococcus aureus* ve *Streptococcus mutans*'a karşı en yüksek antimikrobiyal etkiyi gösterdi. PC5 (26 mm), pozitif kontrol grubu da dahil olmak üzere *Staphylococcus aureus*'a karşı en etkili antimikrobiyal etkiyi gösterdi ve onu 23 mm ile PC2 izledi. *Streptococcus mutans*'a karşı en yüksek (23mm) antibakteriyel etkiyi PC2 ve PC5'in gösterdiği belirlendi. *Streptococcus mutans*'a karşı test edilen tüm kompozit ve polimerler antimikrobiyal etki gösterirken, 12 µg poli(DEAEMA)'nın *Staphylococcus aureus*'a karşı etkili olmadığı belirlendi (Şekil 3.11).

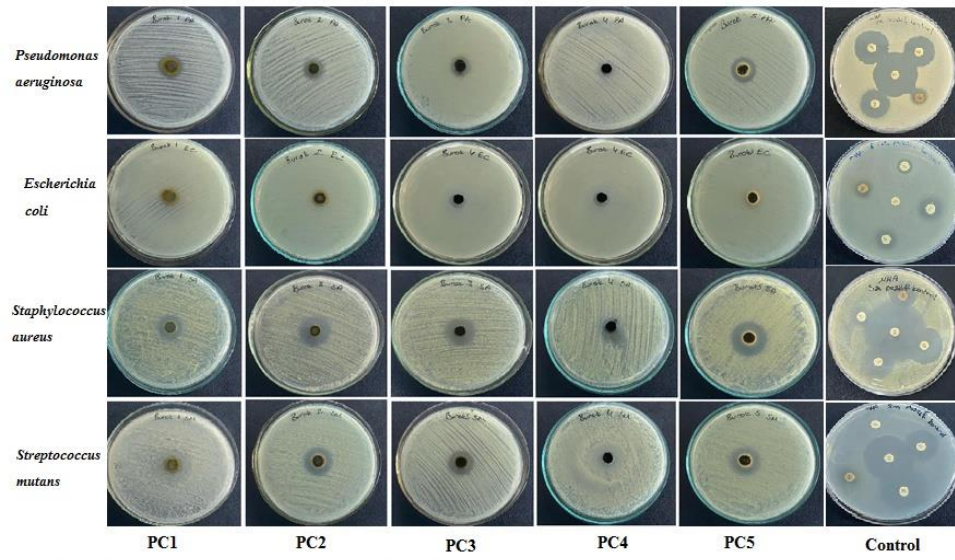


VA30: Vancomycin, S10: Streptomycin, E15: Erythromycin, TE30: Tetracycline, P10: Penicillin G

Şekil 3.9. Standart antibiyotiğin Mueller Hinton agar üzerindeki antimikrobiyal etkisi



Şekil 3.10. Polimer kompozitlerin Mueller Hinton agar üzerindeki antikandidal etkisi



Şekil 3.11. Polimer kompozit'lerin Mueller Hinton agar üzerindeki antimikrobiyal etkisi

Çizelge 3.2. Polimer kompozitler ve polimerlerin oluşturduğu zon çapları (mm)

Mikroorganizmalar	Büyüme zonları (mm)													
	Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitleri ve polimerleri(12 µg/20µl)								Pozitif kontrol				Negatif kontrol	
	PIN	Poli(DEAEMA)	Poli(DEAEMA-ko-EMA)	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	VA30	S10	E15	TE30	P10	DMSO
<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922	-	13	-	-	-	-	13	-	7	13	9	9	10	-
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853	10	11	-	16	14	14	-	18	21	21	25	12	32	-
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	18	-	18	18	23	21	12	26	12	19	12	19	42	-

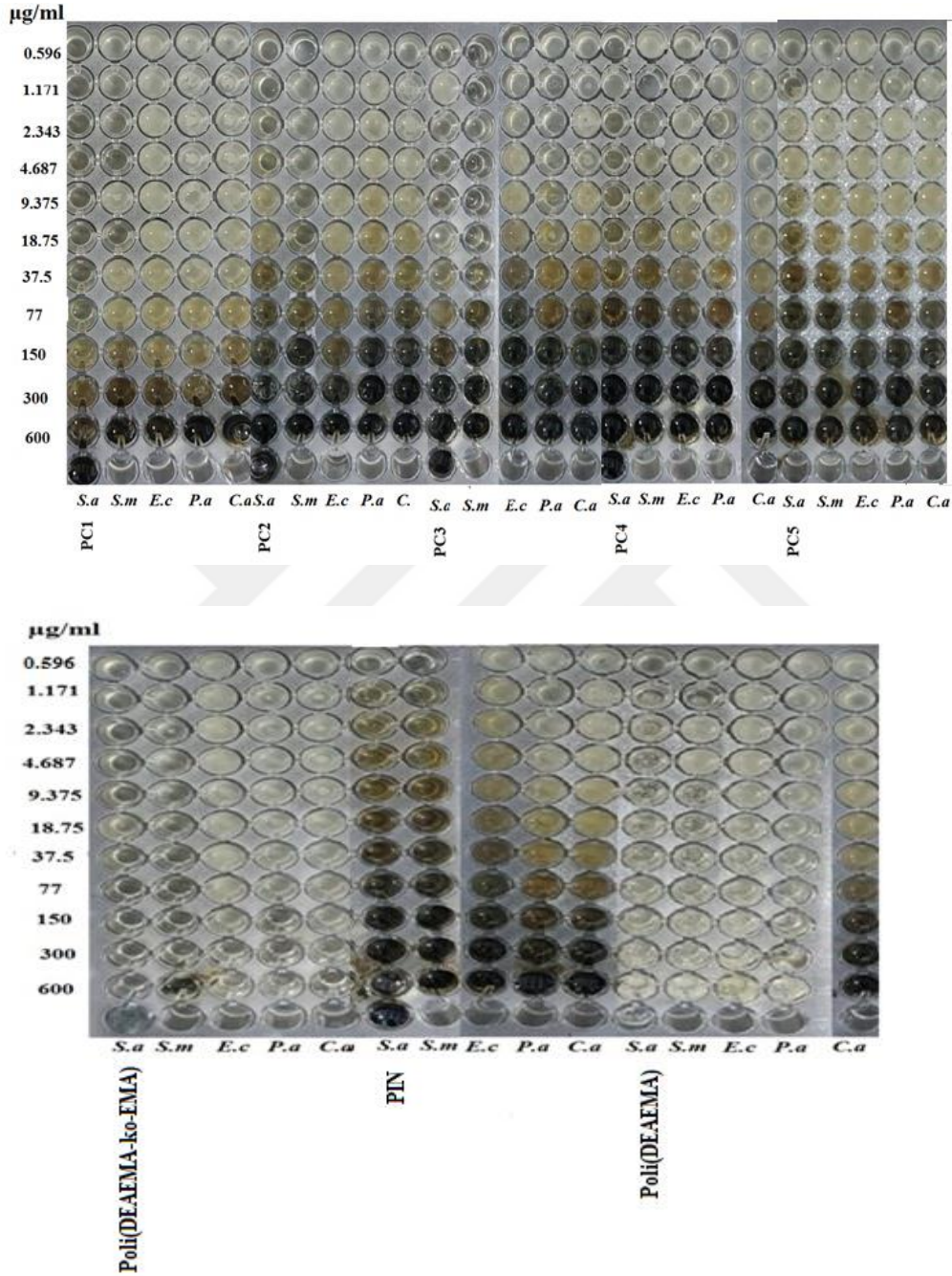
<i>Streptococcus mutans</i>	20	12	12	14	23	19	16	23	33	7	20	8	22	-
<i>Candida albicans</i>	-	14	13	14	13	14	-	15	29	20	25	26	38	-

PIN, poli(DEAEMA), poli(DEAEMA-co-EMA) ve PC'ler ayrıca gram negatif bakterilere karşı antimikrobiyal aktivite gösterdi. PC5, *Pseudomonas aeruginosa*'ya karşı en güçlü antimikrobiyal aktiviteyi gösteren kompozit iken, test edilen konsantrasyonda *Escherichia coli*'ye karşı antimikrobiyal aktivite göstermedi (Şekil 3.11). Ayrıca PIN'in *Streptococcus mutans*, *Staphylococcus aureus* ve *Pseudomonas aeruginosa*'ya karşı antimikrobiyal aktivite gösterdiği belirlendi. En güçlü aktivite *Streptococcus mutans*'a (20mm) karşı belirlendi (Şekil 3.11).

Günümüzde indol, metisiline dirençli *Staphylococcus aureus* (MRSA) gibi dirençli bakterilere karşı yeni antimikrobiyal ilaçların geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca indol, Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) onaylı bir ilaç iskelesidir ve bu da onu ilaç tasarımı ve geliştirme açısından çekici kılmaktadır. Çalışmalar, indolün, antibiyotik direnci geliştiren bakterilerde mevcut antibiyotik tedavilerinin etkinliğini artırmak için direnç değiştirici bir ajan olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Nieto ve Lupton, 2021). İndolün oksidatif polimerizasyonu sırasında, poliindolün polimerik zincirinde sabit bir pozitif yük oluşur. aralık. PIN'in antibakteriyel aktivitesinin ana nedeni bu katyonik yapıdır. Çünkü bakteri hücre duvarı negatif yüklüdür ve poliindol zincirleri pozitif yük ile elektrostatik olarak etkileşime girer. Bu etkileşim, bakterinin zar yapısını geri dönülemez biçimde bozarak hayati bileşenlerin hücre dışına sızmasına neden olur (Shoeb ve ark., 2018; Pradeep ve ark., 2022).

Poli(DMAEMA), hem gram-pozitif hem de gram-negatif bakterilerin sitoplazmik zarını geçirgenleştirir. Ek olarak polimer, bakterilerin hücre büyüme döngüsüne müdahale eder. Bu nedenle katyonik biyositlerin tipik özelliği olan bakterileri öldürmekle kalmaz, aynı zamanda büyümelerini de yavaşlatır. Poli(DMAEMA) gram-negatif bakterilerin dış zarını parçalama yeteneğinden dolayı, bu bakterilere karşı daha az etkili olan diğer antimikrobiyal ajanların aktivitesini artırma potansiyeline sahiptir (Rawlinson ve ark., 2010).

Bu çalışmada poli(DEAEMA) ile hücre zarından geçirgenliği artırılmış PC'lerin iyi bakterisidal aktiviteye sahip olduğu gösterilmiştir. PIN konsantrasyonuyla doğru orantılı olarak antibakteriyel etkinin arttığı belirlendi.



Şekil 3.12. Polimer kompozitlerin ve polimerlerin MİK görüntüleri

Çizelge 3.3. Polimer kompozitlerin ve polimerlerin MİK değerleri

MİK(µg/ml)								
Test mikroorganizmaları								
	PIN	Poli(DEAMEA)	Poli(DEAEMA-ko-EMA)	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
<i>Escherichia coli</i> ATCC 25922	75,00	18,75	300,0	150,0	300,0	37,50	18,75	75,00
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> ATCC 27853	18,75	18,75	150,0	150,0	75,00	37,50	150,0	18,75
<i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	2,343	4,687	18,75	1,171	4,687	9,375	9,375	4,687
<i>Streptococcus mutans</i> ATCC 27853	1,171	9,375	18,75	4,687	9,375	4,687	37,50	18,75
<i>Candida albicans</i>	150,0	18,75	18,75	150	75,00	75,00	75,00	18,75

PC4 ve poli(DEAMEA)'da *Escherichia coli* için MİK değeri 18,75 µg/ml olarak belirlendi. *Staphylococcus aureus* PC1 için MİK değeri 1,171 µg/ml idi. PIN, poli(DEAMEA) ve PC5'in MIC'si 18.75 µg/ml, *Pseudomonas aeruginosa*'nın büyümesini inhibe etti. 1,171 µg/ml'lik PIN konsantrasyonu, *Streptococcus mutans*'ın büyümesini engelleyen en düşük konsantrasyondur. *Candida albicans* için poli(DEAMEA), Poli(DEAEMA-ko-EMA) ve PC5'te MİK 18,75 µg/ml olarak belirlendi (Şekil 3.12. ve Çizelge 3.3). Genel olarak PC5'in en iyi antimikrobiyal etkiye sahip olduğu görüldü. Bunun nedeni PIN konsantrasyonlarının diğer kompozitlere göre daha yüksek olması olabilir.

Çizelge 3.4. Polimer kompozitlerin ve polimerlerin mantar misel inhibisyonu (%)

	<i>Penicillium citrinum</i>	<i>Aspergillus flavus</i>	<i>Fusarium solani</i>	<i>Aspergillus niger</i>
PIN	36,36	33,33	50,00	25,00
Poli(DEAEMA)	54,54	44,44	68,75	12,50
Poli(DEAEMA-ko-EMA)	-	-	68,75	43,75
PC1	-	50,00	6,250	25,00
PC 2	18,18	55,55	37,50	6,250
PC 3	18,18	72,22	25,00	6,250
PC 4	-	50,00	25,00	18,75
PC 5	54,54	72,22	18,75	-

Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitleri ve tüm polimerler *Fusarium solani*'nin misel gelişimini inhibe etti. PC'ler arasında en yüksek inhibisyon yüzdesi PC3'te 72,22 olarak gözlemlendi ve *Aspergillus flavus* poli(DEAEMA-ko-EMA)'ya karşı PC5, *Aspergillus niger*'in misel gelişimini %43,75 oranında inhibe ederek en etkili antifungal ajan oldu. Sonuçlar, PC'lerin *Aspergillus flavus*'a karşı PIN, poli(DEAEMA) ve poli(DEAEMA-ko-EMA)'dan daha fazla antifungal aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir (Çizelge 3.4.).

Mantar enfeksiyonları küresel sağlık açısından büyük önem taşımaya rağmen, günümüzde kullanılan antifungal ticari ilaçların (amfoterisin B gibi polienler, flukonazol gibi azoller, kaspofungin gibi ekinokandinler ve flusitozin gibi pirimidin analogları) sayısı oldukça azdır. Bu konuyla ilgili çalışmalar antimikrobiyal çalışmaların sadece %1'ini oluşturmaktadır. Son yıllarda *Aspergillus* ve *Candida* sp. başta olmak üzere fungal patojenlerin çoklu ilaç direnci gösterdiği ve bazı klinik suşların günümüzde kullanılan dört sınıf antifungalın hepsine de dirençli olduğu belirlenmiştir (Sun ve ark., 2020).

Poliheksametilen biguanid (PHMB), polioktametilen guanidin hidroklorür (POGH), polikuartyum-1 (PQ-1) veya polidronyum klorür, polietileniminler (PEI) gibi polimerler, yüksek bağlanma sağlayan katyonik yükleri nedeniyle hem mayalar hem de filamentli mantarlar üzerinde öldürücü etkiye sahiptir. Negatif yüklü mikrobiyal membran yüzeyine afinite (Ntow-Boahene ve ark., 2021). Polimerin hidrofobikliği,

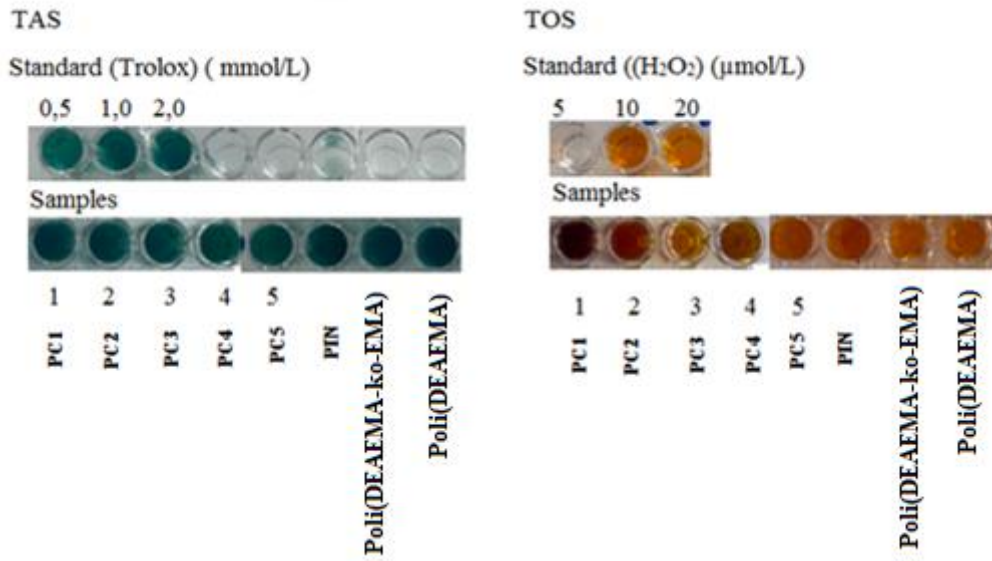
karboksilin yönelimi ile ilgilidir. grup. Başka bir deyişle COOH daha düşük bir hidrofobiklik oluşturur (Ramirez ve ark., 2022). Bu çalışmada poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozit ve polimerlerinin antifungal etkisi belirlendi. Şekil 3.1'deki FTIR analizi sonuçlarında görüldüğü gibi poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitleri ve polimerleri DEAME birimlerinin tersiyer amin gruplarını içerir. Bize göre negatif yüklü mantar zarı, pozitif yüklü kompozit moleküllerle elektrostatik olarak reaksiyona girer. Sonuç olarak, poliindol zincirinin hidrofobikliği, onun mantar hücre zarının lipofilik çekirdeğine nüfuz etmesine izin verir. Bunun sonucunda mantar zarının akışkanlığı artar ve hücre zarının bütünlüğü bozulur.

3.5. Antioksidan Aktivite Testi

Polimer kompozitlerin ve polimerlerin OSI değerleri 1,3513 ila 0,1183 arasında değişmektedir (Çizelge 3.5.)

Çizelge 3.5. Polimer kompozitler ve polimerlerin TAS-TOS ve OSI değerleri

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PIN	Poli(DEAEMA-ko-EMA)	Poli(DEAEMA)
TAS (mmol Trolox Equiv/L)	1.2380	1.2800	1.1500	1.1210	0.9600	2.2780	1.2570	1.2800
TOS ($\mu\text{mol H}_2\text{O}_2$ Equiv/L)	1.4650	2,7260	3.1660	15.148	7.9800	12.840	4.1150	1.8910
OSI (Arbitrary Unit)	0,1183	0.2129	0.2753	1.3513	0.8313	0.5636	0.3274	0.1477



Şekil 3.13. TAS ve TOS Mikroplakaları

Fagositler, inflamatuvar süreçler sırasında reaktif oksijen (ROS) ve reaktif nitrojen (RNS) üretir. İndol, terapötik aktiviteye sahip birçok doğal ve sentetik ürünün iskeletini oluşturur. İndol halkaları içeren (indometasin, etodolak ve asemetasin gibi) steroid olmayan antiinflamatuvar ilaçların ROS ve RNS temizleme aktiviteleri daha önce rapor edilmiştir (Fernandes ve ark., 2004; Costa ve ark., 2005; Estevao ve ark., 2010).

Güçlü antioksidan ve antimikrobiyal potansiyele sahip yeni indol türevlerinin keşfedilmesi, klinik ortamda oluşabilecek advers reaksiyonların engellenmesi açısından önemli olabilir. Antioksidan aktivite açısından test edilen indol bileşiklerinin, ROS ve RNS'nin etkili temizleyicileri olduğu rapor edilmiştir. Bu etkinin derecesi, radikal stabilizasyonun indolik kısmı üzerindeki süstitüentlerin tipi ve göreceli konumlarıyla ilgilidir (Estevao ve ark., 2010). Güçlü serbest radikal temizleme kapasitesi, yüksek rezonans stabilitesine sahip, elektronca zengin indol gruplarına dayanmaktadır. Shah ve arkadaşları (2024) indol kompozitlerinde aromatik tarafta yer alan halojenler ve nitro grupları gibi süstitüentlerin elektron çekici etkisinin antioksidan aktiviteyi arttırdığını bildirmiştir (Shah ve ark., 2024). Bu çalışmada PCS en yüksek antioksidan aktiviteyi göstermiştir (Tablo 5, Şekil 13). FTIR analiz sonuçları PC'lerde C = O, -C=C-, -CH₂-, -CH₃, N(CH₃)₂, C-H, C-O-C, C-N ve N-H gruplarının varlığını göstermektedir. PC'lerdeki

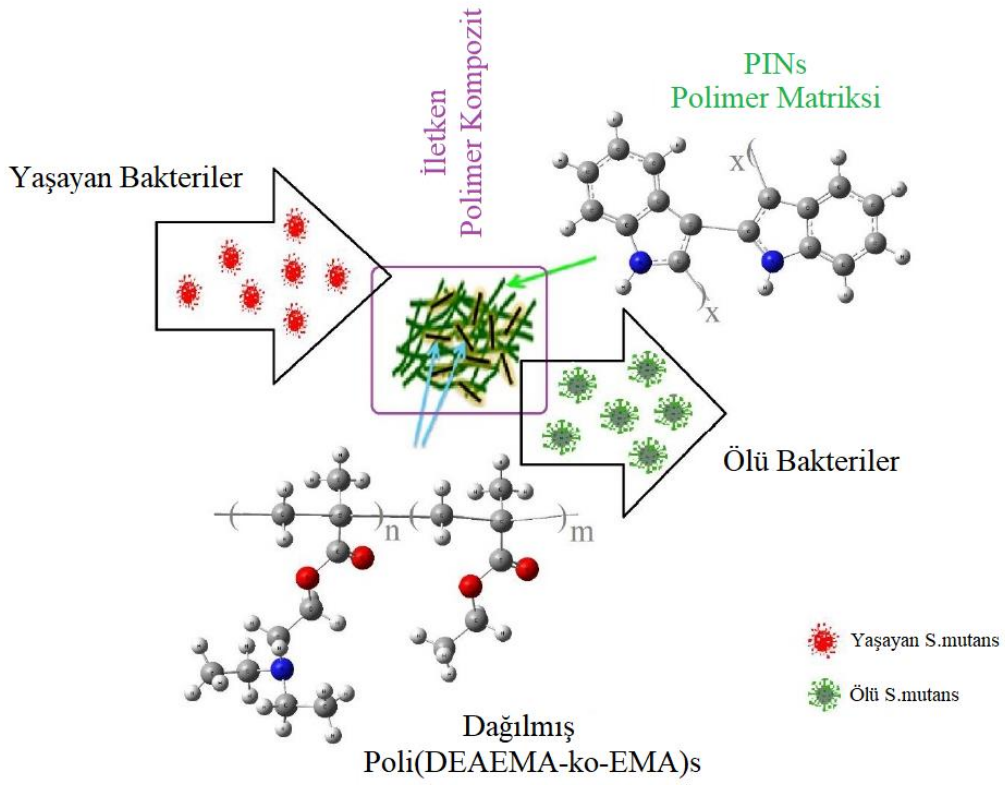
indol grubu $N(CH_3)_2$ gibi elektron çekici etkiye sahip gruplar antioksidan aktiviteden sorumludur.

Diş çürüklerinde en önemli etiyolojik ajan *S. mutans*'tır. Bu bakteri aynı zamanda kalp kapakçıklarının iltihabı olan subakut bakteriyel endokardite de neden olur. Diş plağı ortamındaki mikrobiyota, toksik ROS oluşumuna yol açmaktadır (Lemos ve ark., 2019). Çalışmalar, diş macunlarındaki antimikrobiyal katkı maddelerinin diş eti fibroblast hücre hatları üzerinde sitotoksik etkileri olduğunu göstermiştir (Aydın ve ark., 2024). Bu nedenle son yıllarda antimikrobiyal içeren yeni ürünlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Florür gibi sıklıkla kullanılan ürünlere alternatif olarak etkileri vardır (Lemos ve ark., 2019; El-Enshasy ve ark., 2024; Imam ve ark., 2024). Yeni sentezlenen indol türevlerinin, florür gibi gelişmeler açısından güven verici bir öneme sahip olduğu açıktır. Sonuç olarak PC'ler, özellikle antibakteriyel diş dolgu malzemeleri ve ağız bakım ürünlerinin geliştirilmesinde alternatif yeni bir ürün olarak önerilebilir.

3.6. Antibiyofilm Etkisinin Tespiti

Polimer/poliindol iletken polimer kompozitler, biyomedikal ve antibakteriyel kaplamalar dahil olmak üzere çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Kompozitin yüzey özellikleri bakteriyel yapışmanın ve sonrasında biyofilm oluşumunun önlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Kompozitte poliindolün varlığı yüzey enerjisini ve topografyayı değiştirerek bakteri tutunması için daha az uygun hale getirebilir. İletken bir polimer olan poliindol, elektrokimyasal aktivite sergileyebilir. Bu, elektrik alanı gibi harici bir uyarının uygulanması üzerine reaktif oksijen türlerinin (ROS) oluşmasına yol açabilir. ROS'un antimikrobiyal özelliklere sahip olduğu ve bakteriyel hücre zarlarını parçalayabildiği, biyofilm oluşumunu engelleyebildiği ve hatta bakterileri öldürebildiği bilinmektedir. Kompozit, antimikrobiyal ajanları veya ilaçları matrisine dahil edecek şekilde tasarlanabilir. Dietilamino gruplarına sahip bir polimer olan poli(dietilaminoetilmetakrilat-ko-etilmetakrilat), bu maddelerin kontrollü salınımı için bir matris görevi görebilir. Bu sürekli salınım bakteri üremesini ve biyofilm oluşumunu engeller. DEAEMA'nın antifouling özelliğinden dolayı mikroorganizmaları uzaklaştırma ve yok etme özelliği vardır, EMA ise antibakteriyel özelliğe sahiptir (Shehla ve diğerleri, 2021) (Shehla ve ark., 2021). Kompozitte poliindolün varlığı, bakteriyel metabolik yollara müdahale edebilecek elektron transfer süreçlerini kolaylaştırabilir. Hücresel

süreçlerin bu şekilde bozulması, bakterilerin yüzeylere yapışmasını ve biyofilm oluşturmalarını engelleyebilir. Poliindol, pH'taki değişikliklere yanıt olarak şişme veya büzülme gibi pH'a duyarlı davranışlar sergileyebilir. Bu özellik, bakteriyel kolonizasyona yanıt olarak yapısal değişikliklere uğrayan ve biyofilm oluşumunu engelleyen yüzeyler oluşturmak için kullanılabilir. Bakteriyel yapışmayı kontrol eden bileşimlerin şematik gösterimi Resim 3.1'de verilmiştir.

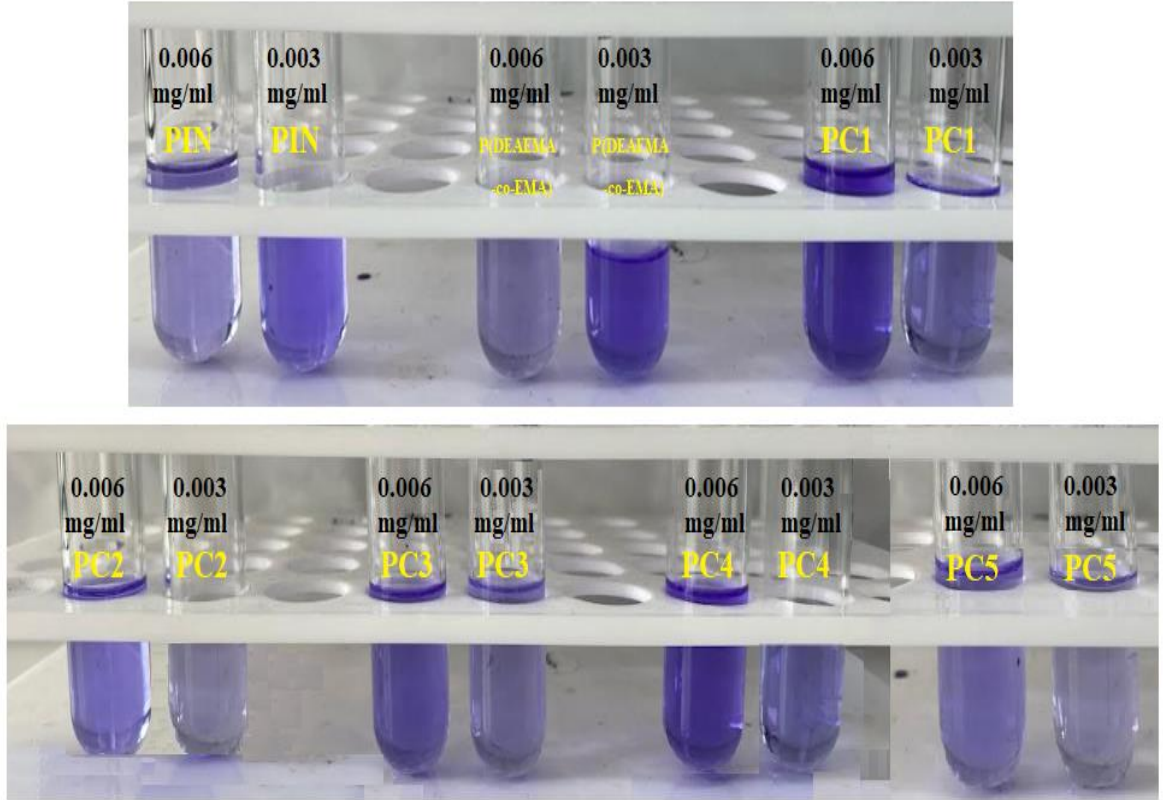


Resim 3.1. Bakteriyel yapışmayı kontrol eden bileşimlerin şematik gösterimi

Bu çalışmada, patojenler Nutrient Broth ortamına ekildi ve 37 °C'de 24 saat inkübe edildi. İnkübasyondan sonra kültürler 0,5 McFarland bulanıklığına (10^6 CFU mL⁻¹) ayarlandı. 200 µg Streptococcus mutans, 30 ve 60 µg konsantrasyonlarda test materyali içeren önceden hazırlanmış Nutrient Broth ortamına aşılandı. Bu tüplere 0,5 McFarland eklenerek 37°C'de 24 saat inkübe edildi. İnkübasyondan sonra sıvı besiyeri boşaltıldı ve

tüpler 3 kez distile su ile yıkandı. Kurutulan tüplere öncelikle etanol:asetik asit (95:5) eklenerek 10 dakika fıkse edildi ve süre sonunda tüpler boşaltılarak kurumaya bırakıldı. Daha sonra kurutulan tüplere %0,1 oranında kristal viyole eklenerek boyama işlemi gerçekleştirildi.

Sonuçlar Şekil 3.14'da görülmektedir.



Şekil 3.14. Bazı Streptococcus mutans izolatlarının geliştirdiği, test tüpü yöntemiyle belirlenen biyofilmlerinin farklı boyama sürecini gösteren Kristal Menekşe rengi

Boyama işleminin ardından tüplerin içindeki kristal viyole boşaltılarak 2-3 kez distile su ile yıkanıp kurutuldu. Kurutma tüplerindeki lekeli ve tutunmuş bakterilerin uzaklaştırılması için kuyucuklara etanol:asetik asit (95:5) ilave edildi ve 10 dakika inkübe edildi. Bir süre beklenerek boyanın çözünmesi sağlandı. Süre sonunda mikropolanın optik yoğunluk değeri spektrofotometrede 570 nm'de ölçüldü ve pozitif kontrole göre

biyofilm yüzdeleri hesaplandı [133, 134]. Biyofilm oluşumunun inhibisyonu (%) Çizelge 3.6'da verilmiştir.

$$\text{İnhibisyon (\%)} = (A_{\text{kontrol}} - A_{\text{numune}} / A_{\text{kontrol}}) \times 100 \quad (3.8.1)$$

Burada;

A kontrol: Yalnızca bakteri suşunu içeren absorbands değeri

A örnek: Eklenen test materyali ile absorbands değeri

Çizelge 3.6 Biyofilm oluşumunun inhibisyonu (%)

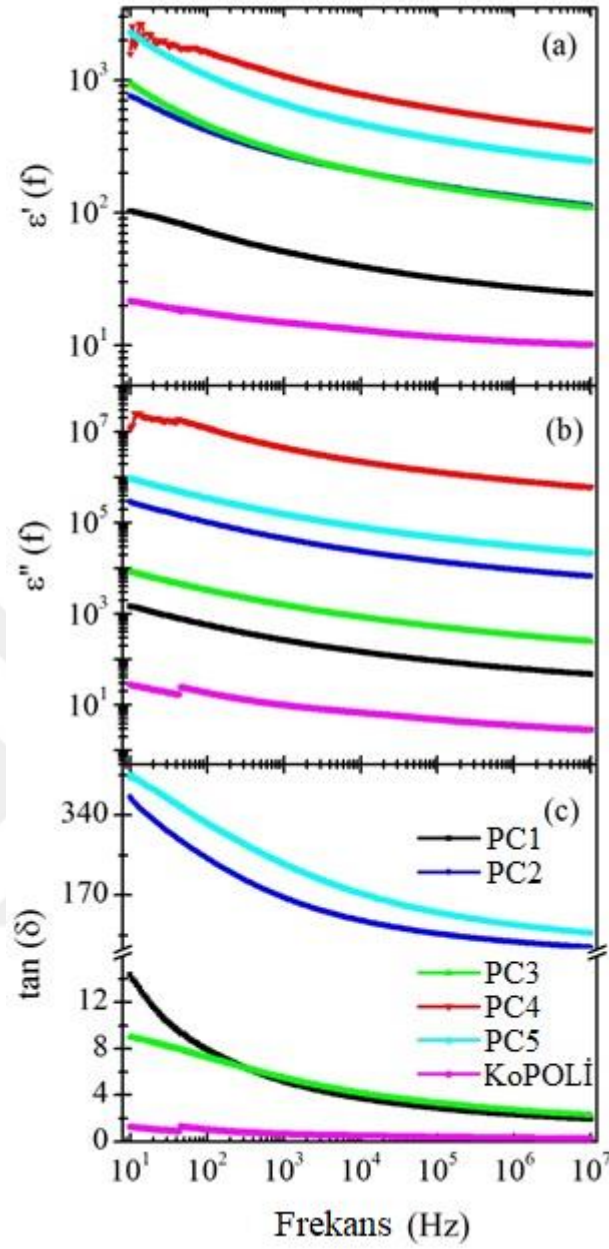
Test edilen polimer ve kompozitler	Konsantrasyon (30 mg/ml)	Konsantrasyon (60 mg/ml)
Poli(İndol)	73,695	90,495
Poli(DEAEMA-co-EMA)	42,838	81,058
PC1	47,055	83,199
PC2	63,253	85,743
PC3	68,139	86,078
PC4	68,495	86,546
PC5	71,285	89,218

3.7. Poli(DEAEMA-ko-EMA) ve Kompozitlerin Dielektrik Özellikleri

3.7.1. Dielektrik spektroskopik analiz

Poli(DEAEMA-ko-EMA) ve Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozit ince filmlerin dielektrik davranışları, frekansa bağlı olarak dielektrik kayıp (ϵ'') ve tanjant delta ($\tan \delta$) değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bir malzemenin dielektrik geçirgenliği frekansa bağlı olarak karmaşık bir büyüklük olup, reel kısmı dielektrik sabiti (ϵ') olarak adlandırılır ve genellikle frekans arttıkça azalır. Sanal bileşen olan dielektrik kaybı (ϵ''), çoğu durumda frekans ya da sıcaklık eksenine göre bir maksimum (pik) değere ulaşır [(Kremer ve Schönhals, 2021; Dakin, 2006; Vishnuvardhan ve ark., 2006). Polimer kompozitlerin dielektrik sabiti, yapılarında elektronik, atomik ve dipolar polarizasyon gösterebilen grupların varlığına bağlı olarak frekans arttıkça azalan bir eğilim sergiler. Bu azalma, interfasiyel (ara yüzey) polarizasyon kaynaklı bir relaksasyon mekanizması ile ilişkilendirilir (Ho ve ark., 2008; Hamciuc ve ark., 2008).

PIN katkı oranı %10–30 arasında olan kompozit filmler, zayıf polar veya apolar özellik göstermiştir. Bu durumda dielektrik sabiti geniş bir frekans aralığında sabit kalmıştır. Ancak PIN oranı %50 ve üzerine çıktığında, dielektrik sabiti belirgin biçimde artmış ve kompozit yapı daha polar karakter sergilemiştir (Şekil 3.15.a). Benzer şekilde, dielektrik kaybı değerleri de %50 ve üzeri PIN içeriğine sahip kompozitlerde önemli ölçüde yükselmiştir (Şekil 3.15.b). Bu artış, kompozitlerin elektriksel iletkenliğindeki artışı yansıtmaktadır. PIN oranındaki artış, iletken polimer ve kopolimer matriks arasındaki ara yüzey sayısının artmasına neden olmuş, bu durum yüksek frekanslarda interfasiyel polarizasyonun etkisini artırarak iletkenlikte iyileşme sağlamıştır. Düşük frekanslarda yüksek dielektrik sabiti gözlemlenmesi, bu polarizasyon mekanizmasına bağlanmaktadır. İletken PIN bölgelerinin yalıtkan poli(DEAEMA-ko-EMA) matriksi içerisinde dağılması bu polarizasyonun temel nedenidir (Saafan ve ark., 2006).



Şekil 3.15. Kompleks dielektrik sabitinin gerçek kısmının (a), hayali kısmının (b) ve dielektrik kayıp tanjantının (c) frekans gelişimi

Kompozit filmler, elektrik alan uygulanmadığında rastgele oryantasyona sahip polar moleküller içerir. Ancak elektrik alan uygulandığında, bu moleküller dipol moment oluşturarak yönlendirilir ve malzeme polarize olur.

Elektriksel ölçümlerle birlikte FTIR-ATR analizleri sonucunda elde edilen fonksiyonel grupların absorbands değerleri arasında anlamlı korelasyonlar saptanmıştır. Kısa konjugasyon uzunluklarına ve amorf yapıya sahip olan iletken kompozitlerde, elektrik iletimi çoğunlukla polimer zincirleri arasında gerçekleşen yük atlamaları ile sağlanmaktadır (Kaynak, 1998).

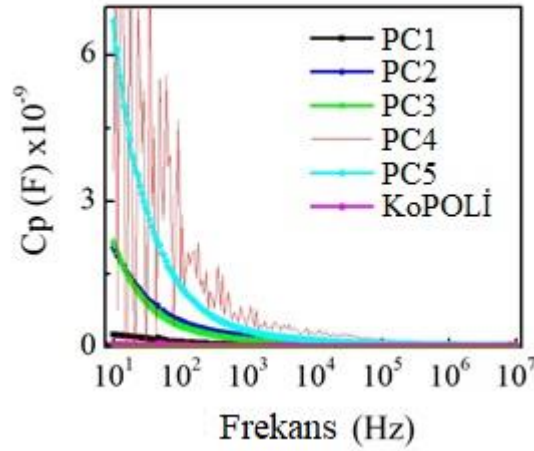
10^1 – 10^7 Hz frekans aralığında, tüm kompozit filmlerde iletkenliğin frekansa bağlı değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, yük taşıyıcılarının atlama mekanizmasıyla rastgele difüzyonuna dayalı frekans-bağımlı iletkenlik davranışını işaret etmektedir (Saafan ve ark., 2006).

Poli(DEAEMA-ko-EMA)/PIN kompozitlerinde tan delta ($= \epsilon''/\epsilon'$) değerlerinin frekans ile değişimi Şekil 3.15.c’de sunulmuştur. Tan delta, dielektrik özelliklerin yorumlanmasında kullanılan önemli bir parametredir.

Şekil 3.15.a–c’de, kompozitlerin oda sıcaklığında frekansa bağlı olarak gösterdiği dielektrik sabiti ve kaybı değişimleri sunulmaktadır. ϵ' değeri, özellikle 10^1 Hz frekansında, PIN içeriği arttıkça yükselmiştir. Şekil 3.15.b, PIN içeriğine bağlı olarak dielektrik kaybın nasıl etkilendiğini göstermektedir; burada ϵ'' değeri, %50 ve üzeri PIN oranlarında yaklaşık yedi kat artmıştır. Frekans artışı ile ϵ' değerindeki azalma ve ϵ'' grafiğinde ortaya çıkan maksimum pik, Maxwell-Wagner tipi bir relaksasyon mekanizmasına işaret etmektedir.

Poli(DEAEMA) zincirindeki tersiyer amin gruplarına ek olarak, Poli(DEAEMA-ko-EMA) yapısındaki karbonil (C=O) gruplarının kısmi negatif yükleri, PIN’in matriks içinde daha homojen dağılmasına katkı sağlamış ve bu durum iletkenlik üzerinde olumlu etki göstermiştir. Bu bağlamda, C=O gruplarının varlığı, amin gruplarıyla birlikte kompozitin iletkenliğini artırmakta ve bu özellik, PAN kompozitlerine kıyasla daha yüksek iletkenlik değerleri elde edilmesini sağlamaktadır (Xia ve Lu, 2009).

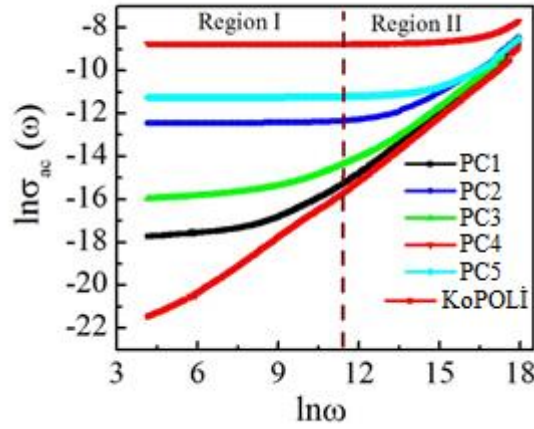
Şekil 3.16’te frekansa bağlı kapasitans değişimi verilmiştir.



Şekil 3.16. Kapasitansın frekans gelişimi

Tüm kompozitlerde, kapasitans değerlerinin 10^1 – 10^3 rad/s arasında yavaş azaldığı; 10^5 – 10^4 rad/s aralığında ise keskin bir düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, numunelerde belirgin ara yüzey etkileşimleri ve büyük yapısal boyutlar bulunduğunu düşündürmektedir. Düşük frekanstaki yüksek kapasitans değerleri ise yüzey yükleri ve sınır tabaka yüklerine atfedilebilir.

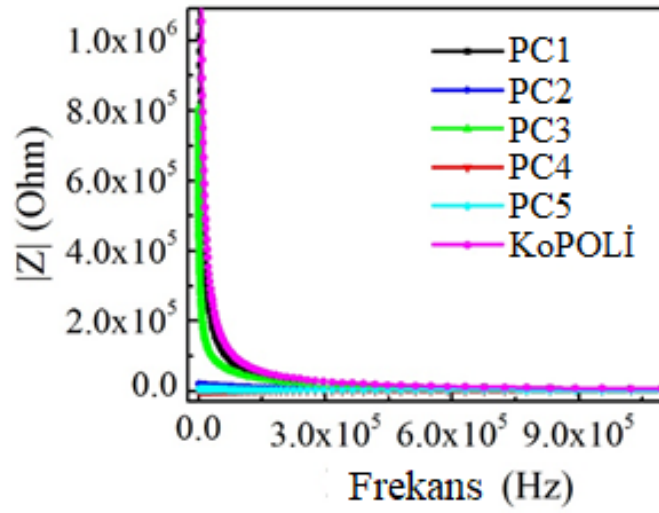
Şekil 3.17’te, $\ln\sigma_{ac}(\omega)$ ’nın 3–18 rad/s frekans aralığında açısal frekansla değişimi sunulmaktadır. Artan frekansla birlikte polimer kompozitlerin farklı özelliklere sahip üç bölgeden oluştuğu gözlemlenmiştir: düşük frekans bölgesi, orta frekansta dağılım gösteren bölge ve yüksek frekansta sabit kalan plato bölgesi (Coşkun ve ark., 2017). Bu özellikler, yüksek sıcaklıklardaki σ_{dc} iletkenliğine bağlanmaktadır.



Şekil 3.17. $\ln\sigma_{ac}(\omega)$ 'nın açısal frekans gelişimi

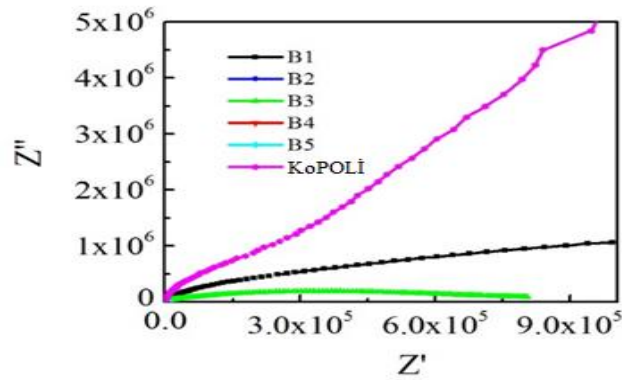
İkinci bölgedeki frekans bağımlılığı, birinci bölgeye göre daha belirgin olup; $\ln\sigma_{ac}(\omega)$ değeri her iki bölgede artan açısal frekansla birlikte doğrusal artış göstermektedir. Bu gözlem, Jonscher yasasına uygun olarak ikinci bölgede daha güçlü bir frekans bağımlılığını doğrulamaktadır (Jonscher, 1977).

Polimer kompozit malzemelere ait $0.0-9 \times 10^5$ rad/s frekans aralığındaki mutlak empedans değeri ($|Z|$), karmaşık empedansın reel (Z') ve sanal (Z'') bileşenleri sırasıyla Şekil 3.18 ve 3.19'de sunulmuştur. $|Z|$ değeri, 2×10^5 rad/s'ye kadar doğrusal azalma göstermiş, ardından frekansla birlikte sabitlenmiş ve 3×10^5 rad/s sonrası durağan hale geçmiştir.



Şekil 3.18. Karmaşık empedansın mutlak değerinin frekans gelişimi

Kompozit malzemeler için karmaşık empedansın mutlak değerinin ($|Z|$) artan frekansla doğrusal olarak azaldığı, önce yaklaşık 2×10^5 rad/s'ye kadar, ardından frekansta dalgalanmalar yaşandığı 2×10^5 ila 3×10^5 rad/s aralığında sabitlenmeye başladığı ve en sonunda 3×10^5 rad/s'den sonra sabit bir değerde kaldığı görülmektedir.

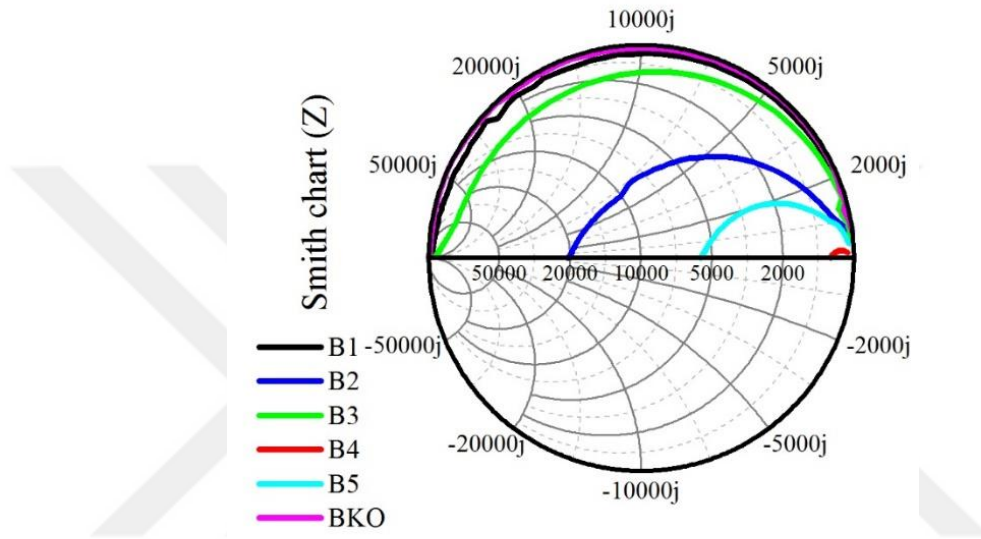


Şekil 3.19. Empedans düzlemi grafikleri

Şekil 3.19'ye göre, tüm numunelerin Z' bileşenleri 3×10^5 – 9×10^5 rad/s frekans aralığında frekans arttıkça azalmış, 3×10^5 – 0.0 rad/s aralığında ise sabit kalmıştır. Benzer

şekilde, Z'' bileşenleri $5 \times 10^6 - 2 \times 10^6$ rad/s arasında azalmış ve sonrasında bu azalma yavaşlamıştır.

Elde edilen veriler Smith şemasıyla analiz edilmiş ve Şekil 3.20’de sunulmuştur. Bulgular, malzemenin ideal bir Debye davranışı sergileyerek tam dairesel bir empedans eğrisi çizme eğiliminde olduğunu ve bu yönüyle optoelektronik uygulamalar için potansiyel taşıdığını göstermektedir.



Şekil 3.20. Tüm numuneler için Smith şeması

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada farklı PIN içeriğine sahip DEAEMA-ko-EMA/PIN iletken kompozitler kimyasal polimerizasyon yöntemi kullanılarak başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. Bu sentezlenen kompozitlerin spektroskopik, termal, morfolojik, mikrobiyolojik ve dielektrik özellikleri incelenmiştir.

DEAEMA-ko-EMA/PIN kompozitlerin dielektrik özellikleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlarda PIN içeriğinin ve sıcaklık parametrelerinin etkili olduğu gözlemlendi. Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde sıcaklık artışı ile dielektrik özelliğin de arttığı görüldü.

SEM ve AFM sonuçlarından DEAEMA-ko-EMA/PIN kompozitlerin yapılarında amorf bölgelerin olduğu görülmüştür. Yapılan incelemelerde PIN içeriği arttıkça amorf yapının arttığı buna bağlı olarak da mikrobiyolojik ve dielektrik özelliklerin arttığı görülmüştür.

DEAEMA-ko-EMA/PIN kompozitleri özellikle 400-800 °C aralığında DEAEMA-ko-EMA ile kıyaslandığında daha ileri seviyede bir termal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür.

Gelecek Çalışmalara Öneriler

Yapılan bu çalışmada elde edilen veriler göz önüne alındığında, DEAEMA-ko-EMA/PIN kompozitlerin mikrobiyolojik ve dielektrik özellik davranışını gösterdiği görülmüştür. Bu özellikler göz önüne alındığında DEAEMA-ko-EMA/PIN kompozitler ışık yayan diyotlar (LED), alan etkili transistör (FET) malzemeler ve antistatik malzemeler gibi alanlarda kullanılabilirler. Yüksek sıcaklık altında kullanımları deneysel metotlar ile incelenebilir. Sonuç olarak PC'ler, özellikle antibakteriyel diş dolgu malzemeleri ve ağız bakım ürünlerinin geliştirilmesinde alternatif yeni bir ürün olarak önerilebilir. Yüksek sıcaklık altında kullanımları deneysel metotlar ile incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abe, S., Nagasaki, Y., Kijima M. (2003). Luminescent properties of pyrrolebased heterocyclic conjugated polymers, *Synthetic Metals.*, 135-136: 123124.
- Acar, H. (2008). Potasum persülfat yükseltgeni kullanılarak iletkenpolipirol/polakrilonitril kompozit lif hazırlanması ve karakterizasyonu, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Ankara, Türkiye.
- Ahm, K. Y., Takuaya, H., Morinobu, E., Yasuo, G., Noriaki, W., and Junji, S. (2006). Fabrication of aligned carbon nanotube-filled rubber composite, *Scripta Materialia.*, 54, 31-35.
- Alaa, I. E., Saad, H. A., Israa, S. M., Zaid, H. J. (2023). Construction of heteropolyacid-anchored magnetic g-C₃N₄/Fe₃O₄@polyindole hybrids for efficient photocatalytic destruction of methyl orange and bacteria, *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry.*, 444 (2023) 114923.
- Althobaiti, S. A., Althomali, R. H., Alawadi, A. H. R., Kareem, A. K., Saleh, E. A. M., Alazbjee, A.A.A., Parra, R. M. R. (2023). Synthesis, characterization and application of a polyindole coated magnetic porous carbon nanoadsorbent for extraction and determination of toxic aromatic amines, *Microchemical Journal.*, 109012.
- Amano, K., Ishikawa, H., Kobayashi, A., Satoh, M., Hasegawa, E. (1994). Thermal Stability of Chemically Synthesized Polyaniline, *Synthetic Metals.*, 62(3), 229-232.
- An, S., Abdiryim, T., Ding, Y., Nurulla, I., (2008). A comparative study of the microemulsion and interfacial polymerization for polyindole, *Materials Letters.*, 62: 935-938.
- Anandhi, S., Edward, M. L., Jaisankar, V. (2021). Synthesis, characterization and antimicrobial activity of polyindole/ZrO₂ nanocomposites, *Materials Today: Proceedings.*, 1(40) 93-101.
- Arjomandi, J., Soleimani, H., Parvin, M. H., Azizi, E. (2017). Synthesis and Characterization of Novel Polyindole/ Metal Oxide Nanocomposites and Its Evaluation for Lithium Ion Rechargeable Battery Applications, *Polymer Composites.*, 2(40), 496-505.

- Aydın, N., Süloğlu, A.K., İdil, N., Öztürk, S., Karaoğlu, S. (2024). Examination of cytotoxic and antimicrobial effect of whitening toothpastes: an in vitro study. *Acta Odontol Scand.* 83: 327–333.
- Baibarac, M., Baltog, I., Scocioreanu, M., Lefrant, S., Mevellec, J. Y. (2009). Vibrational properties of the electrochemically synthesized polyindole/single-walled carbon nanotubes composite, *Synthetic Metals.*, 159, 2550-2555.
- Balouiri, M., Sadiki, M., Ibsouda, S.K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity, A review. *J Pharm Anal.*, 6(2): 71–79.
- Begum, B., Ijaz, S., Khattak, R., Qazi, R. A., Khan, M. S., Mahmoud, K. (2021). Preparation and Characterization of a Novel Activated Carbon@Polyindole Composite for the Effective Removal of Ionic Dye from Water, *Polymers.*, 1(14).
- Bhagat, D. J., Dhokane, G. R. (2014). UV–VIS spectroscopic studies of one pot chemically synthesized polyindole/poly(vinyl acetate) composite films, *Materials Letters.*, 136, 251-253.
- Bhagat, D. J., Dhokane, G. R. (2015). Electro-Optical Properties of One Pot Synthesized Polyindole in the Presence of Poly(vinyl acetate), *Electron Matter.*, 3(11) 346-351.
- Bhagat, D. J., Dhokane, G. R. (2016). Frequency Dependent Conductivity and Dielectric Behavior Studies of Cu Doped Polyindole in Presence of Poly(Vinyl Acetate), *J Inorg Organomet Polym.*, 27, 46-52.
- Bhagat, D.J., Dhokane, G.R. (2015) Novel synthesis and DC electrical studies of polyindole/poly(vinyl acetate) composite films, *Chemical Physics Letters.*, 619-27-31.
- Bhat, N.V., Wavhal, D.S. (1998). Preparation and characterization of plasma polymerized thiophene films, *Journal of Applied Polymer Science.*, 70: 203-209.
- Billaud, D., Maarouf, B., Hannecart, E. (1994). Electrochemical polymerization of indole, *Polymer.*, 35:9.
- Billaud, D., Maarouf, E.B., Hannecart, E. (1994). An investigation of electrochemically and chemically polymerized indole, *Materials Research Bulletin.*, 29 (12): 1239-1246.

- Cai, Z., Guo, J., Yang, H., Xu, Y. (2015). Electrochemical properties of electrospun poly(5-cyanoindole) submicron-fibrous electrode for zinc/polymer secondary battery, *Journal of Power Sources.*, 114-122.
- Choi, K.M., Kim, C.Y., Kim, K.H. (1992) Polymerization mechanism and physicochemical properties of electrochemically prepared polyindole tetrafluoroborate, *Journal of Physical Chemistry.*, 96 (9): 3782-3788.
- Costa, D., Gomes, A., Reis, S., Lima, J.L., Fernandes, E. (2005). Hydrogen peroxide scavenging activity by non-steroidal anti-inflammatory drugs. *Life Sci.*, 76(24): 2841-2848.
- Coşkun, R., O. Yalçın, M. Okutan, M. (2017). Oztürk, Impedance properties and comparison effects of different dose safranin doped hydrogels, *Journal of Non-Crystalline Solids.*, 460,153–160.
- Dakin, T. W. (2006). Conduction and polarization mechanisms and trends in dielectrics, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 22, 11-28.
- Dang, Z. M., Lin, Y. H., Nan, C. W. (2003). Novel Ferroelectric Polymer Composites with High Dielectric Constants, *Advanced Materials.*, 15, 1625-1629.
- Dang, Z. M., Zhang, Y. H., Tjong, S. C. (2004). Dependence of dielectric behavior on the physical property of fillers in the polymer-matrix composites, *Synthetic Metals.*, 146, 79–84.
- Dhanalakshmi, K., Saraswathi, R. (2001). Electrochemical preparation and characterization of conducting copolymers: poly(pyrrole-co-indole), *Journal of Materials Science.*, 36: 4107.
- El-Enshasy, H., Niazy, M.A., Kamh, R., Hock, L. (2024). Recent development in oral hygiene products: From product development to market. *In book: Natural Conservative Dentistry: An Alternative Approach to Solve Restorative Problems.*, 239-253.
- Erel O. (2004). A novel automated method to measure total antioxidant response against potent free radical reactions. *Clin Biochem.*, 37(2):112-9.
- Erel O. (2005). A new automated colorimetric method for measuring total oxidant status. *Clin Biochem.*, 38(12):1103-11.
- Erel O. (2004). A novel automated direct measurement method for total antioxidant capacity using a new generation, more stable ABTS radical cation. *Clin Biochem.*, 37(4):277-85.

- Erol, Ö., Ünal, H. İ., Sarı, B. (2010). Synthesis, Electrorheology, and Creep Behaviors of In Situ Intercalated Polyindole/Organo-Montmorillonite Conducting Nanocomposite, *Polymer Composites.*, 3(31), 471-481.
- Eşsiz, S., Sarı, B. (2016). Synthesis, Characterization and Hall Effect Studies of Polystyrene/Polyindole Composites¹, *Chemical Physics of Polymer Materials.*, 10(4), 679-686.
- Estevão, M.S., Carvalho, L.C., Ribeiro, D., Couto, D., Freitas, M., Gomes, A., Marques, M.M.B. (2010). Antioxidant activity of unexplored indole derivatives: Synthesis and screening. *Eur J Med Chem.*, 45(11): 4869-4878.
- Feast, W. J., Tsibouklis, J., Pouwer, K. L., Groneendaal, L., Meijer, E. W.(1996). Synthesis, processing and material properties of conjugated polymers, *Polymer.*, 37, 5017-5047.
- Feng, J. F., Lu L, Zeng, P., Yang, Y. H., Luo, J., Yang, Y.W., Wang, D. (2012). Serum total oxidant/antioxidant status and trace element levels in breast cancer patients. *Int J Clin Oncol.*, 17: 575-583.
- Fernandes, E., Costa D, Toste SA, Lima JL, Reis S. (2004). In vitro scavenging activity for reactive oxygen and nitrogen species by nonsteroidal anti-inflammatory indole, pyrrole, and oxazole derivative drugs. *Free Radic Biol Med.*, 37(11): 1895-1905.
- Fernandes, P.R.G., da Silva, K.A., Mukai, H., Muniz, E.C. (2017). Optical, morphological and dielectric characterization of MBBA liquid crystal-doped hydrogels. *J. Mol. Liq.* 229, 319–329.
- Gangopadhyay, R., and De, A. (2000). Conducting Polymer Nanocomposites: A Brief Overview, *Chemical Materials.*, 12, 608-622.
- Gençtürk, A. (2007). Electropolymerization and characterization of 1-4 Methylphenyl-1H-Pyrrole and 2,2-Dimethylpropylenedioxy Thiophene, *MSc Thesis*, ITU, İstanbul, Turkey.
- Genies, E.M., Boyle, A., Lopkowski, M., Tsintavis, C. (1990). Polyaniline: A historical survey, *Synthetic Metals*, 36: 139-182.
- Gök A, Sarı B, Talu M. (2003). Chemical Preparation of Conducting Polyfuran/Poly(2-Chloroaniline) Composites and Their Properties: A Comparison of Their Components, Polyfuran and Poly(2-Chloroaniline), *Journal of Applied Polymer Science.*, 88(13), 2924-2931.

- Guo, Q., Li, Q., Zheng, L., Xu, X., Nie, G. (2022). Facile Preparation of Oxygen Vacancy $\text{WO}_{3-x}/\text{TiO}_{2-x}/\text{Poly}(\text{indole-6-carboxylic acid})$ Ternary Composites with Enhanced Energy Storage Capacity and Their Supercapacitor Application, *Energy Materials.*, 5, 8443-5451.
- Guo, Q., Zhao, X., Li, Z., Wang, D., Nie, G. (2020). A novel solid-state electrochromic supercapacitor with high energy storage capacity and cycle stability based on poly(5-formylindole)/ WO_3 honeycombed porous nanocomposites, *Chemical Engineering Journal.*, 384, 123370.
- Hamciuc, C., Hamciuc, E., Ipate, A. M., Okrasa, L. (2008). Copoly(1,3,4-oxadiazole-ether)s containing phthalide groups and thin films made therefrom, *Polymer*, 49, 681-690.
- Hareesh, P., Bindu M., Shwetha S., Anjitha, T. (2022). Recent trends and advances in polyindole-based nanocomposites as potential antimicrobial agents: a mini review, *Royal Society of Chemistry.*, 12, 8211–8227.
- Hasselmann C. (2003). Determination of minimum inhibitory concentrations (MICs) of antibacterial agents by broth dilution. *Clin Microbiol Infect.*, 9(8):1-7.
- Heeger, A. J. (2001). Nobel Lecture: Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials, *Reviews of Modern Physics.*, 73, 681 700.
- Ho, C. H., Liu, C. D., Hsieh, C. H., Hsieh, K. H., Lee, S. N. (2008). High dielectric constant polyaniline/poly(acrylic acid) composites prepared by in situ polymerization, *Synthetic Metals.*, 158, 630-637.
- Hussain, F., Hojjati, M. (2006). Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview, *Journal of Composite Materials.*, 40, 1511-1575.
- Imam U. A., Zahrau A., Obeagu E. I. (2024). The Antibacterial effect of some selected chewing sticks on bacteria isolated from decayed tooth. *Elite Journal of Health Science.*, 2(3): 1-10.
- Iroh, J. O., Levine, K. (2003). Capacitance of the polypyrrole/polyimide composite by electrochemical impedance spectroscopy, *Journal of Power Sources.*, 117, 267-272.
- Jancar, J., Douglas, J. F., Starr, F. W., Kumar, S. K., Cassagnau, P., Lesser, A. J. Sternstein, S. S., Buehler, M. J. (2010). Current issues in research on structure-property relationships nanocomposites, *Polymer.*, 51, 3321-3343.

- Jayakrishnan, P., Ramesan, M.T. (2017). Synthesis, Characterization, Electrical Conductivity and Material Properties of Magnetite/Polyindole/Poly(vinyl alcohol) Blend Nanocomposites, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials.*, 27, 323-333.
- Jones, W. (1997). Organic molecular solids: properties and applications, *CRC Press*, 464, Boca Raton, USA.
- Jonscher, A.K. (1977). The universal dielectric response, *Nature.*, 267, 673–679.
- Joshi, L., Gupta, B., Prakash, R. (2010). Chemical synthesis of poly(5-carboxyindole) and poly(5-carboxyindole)/carboxylated multiwall carbon nanotube nanocomposite, *Thin Solid Films.*, 519, 218-222
- Kaneto, K., Yoshino, K., Yoshio I. (1982). Electrical properties of conducting polymer, polythiophene, prepared by electrochemical polymerization, *Japanese Journal of Applied Physics.*, 21 (9): L567-L568.
- Kao, K. C. (2004). Dielectric Phenomena in Solids, *Elsevier.*, CA, USA.
- Kaynak, A. (1998). DC Conduction in electrochemically synthesized polypyrrole films. *Turkish Journal of Chemistry*, 22, 81-85.
- Kaynak, A., and Hakansson, E. (2008). Short-term heating tests on doped polypyrrole-coated polyester fabrics, *Synthetic Metals.*, 158, 350-354.
- Khodaei, M., Karegar, M. (2021). Synthesis and characterization of copper nanoparticles stabilized with polyvinyl pyrrolidone and its performance on the conductivity and stability of polyindole, *Journal of the Iranian Chemical Society.*, 18, 863-873.
- Kocaarslan, A., Kaya, K., Jockusch, S.t, Yagci, Y. (2022). Phenacyl Bromide as a Single-Component Photoinitiator: Photoinduced Step-Growth Polymerization of N-Methylpyrrole and N-Methylindole, *Angewandte Chemie.*, 61, e202208845.
- Koiry, S.P., Saxena, V., Sutar, D., Bhattacharya, S., Aswal, D.K., Gupta, S.K., Yakhmi, J.V. (2007). Interfacial synthesis of long polyindole fibers, *Journal of Applied Polymer Science.*, 103: 595-599.
- Koul, S., Chandra, R, and Dhawan, S. K. (2000). Conducting polyaniline composite for ESD and EMI at 101 GHz, *Polymer.*, 41, 9305-9310.

- Kremer, F., and Schönhals, A. (2003). Broadband Dielectric Spectroscopy, *Springer-Verlag*, Berlin., 729, Heidelberg, Germany.
- Kremer, F., Schönhals, A. (2003). Broadband Dielectric Spectroscopy, *Springer-Verlag.*, 729, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Kuhn, H. H., Child, A. D., Kimbrell, W. C. (1995). Toward real applications of conductive polymers, *Synthetic Metals.*, 71, 2139-2142.
- Lakourj, M. M., Norouzian, R. S., Esfandiyar, M., Mir, S. G. (2020). Conducting nanocomposites of polypyrrole-co-polyindole doped with carboxylated CNT: Synthesis approach and anticorrosion/antibacterial/antioxidation property, *Materials Science & Engineering B.*, 114673.
- LeBaron, P. C., Wang, Z., Pinnavaia, T.J. (1999). Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview, *Applied Clay Science.*, 15, 1129.
- Lekpittaya, P., Yanumet, N., Grady, B. P., O'Rear, E. A. (2004). Resistivity of Conductive Polymer-Coated Fabric, *Journal of Applied Polymer Science.*, 92, 2629-263.
- Lemos J.A., Palmer S.R., Zeng L., Wen Z.T., Kajfasz J.K., Freires I.A, Abranches J, Brady L.J. (2019). The Biology of *Streptococcus mutans*. *Microbiol Spectr.*, 7(1): 10.1128.
- Liu, W., Cholli, A.L., Nagrajan, R. (1999). The role of template in the enzymatic synthesis of conducting polyaniline, *Journal of the American Chemical Society.*, 121: 1134.
- Luo, J. J., Daniel, I. M. (2003). Characterization and Modeling of Mechanical Behavior of Polymer/Clay Nanocomposites, *Composites Science and Technology.*, 63, 1607-1616.
- Maarouf, E. B., Billaud, D., Hannecart, E. (1994). Electrochemical cycling and electrochromic properties of polyindole, *Materials Research Bulletin.*, 29 (6): 637-643.
- MacDiarmid, A. G. (2001). Synthetic metals: a novel role for organic polymers, *Angewandte Chemie International Edition.*, 40, 2581-2590.
- Malinauskas, A., Mazeikiene, R. (1997). Potentiometric response of polyaniline electrode to dissolved nitrate, *Synthetic Metals.*, 89, 77-79.

- Micusik, M., Nedelcev, T., Omastova, M., Krupa, I., Olejnikova, K., Fedorko, P., and Chehimi, M. M. (2007). Conductive polymer-coated textiles: The role of fabric treatment by pyrrole-functionalized triethoxysilane, *Synthetic Metals.*, 157, 914-923.
- Miller, J.S. (1993). Molecular materials 7.B. conducting polymers-materials of commerce, *Advanced Materials.*, 5, 671-676.
- Mitchell, G. R., Davis, F. J., and Legge, C. H. (1988). The effect of dopant molecules on the molecular order of electrically-conducting films of polypyrrole, *Synthetic Metals.*, 26, 247-257.
- Mohd, S., Mohammed, M., Mohd, A. R., Mohammad, O., Alim, H. N. (2018). In Vitro and in Vivo Antimicrobial Evaluation of Graphene–Polyindole (Gr@PIn) Nanocomposite against Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Pathogen, *Acs Omega.*, 3, 9431-9440.
- Molina, J., Del Río, A. I., Bonastre, J., and Cases, F. (2008). Chemical and electrochemical polymerisation of pyrrole on polyester textiles in presence of phosphotungstic acid, *European Polymer Journal.*, 44, 2087-2098.
- Mozaffari, S., Behdani, J., Ghorashi, S.M.B. (2021). Synthesis of polyindole nanoparticles and its copolymers via emulsion polymerization for the application as counter electrode for dye-sensitized solar cells, *Polymer Bulletin.*, 79, 6777-6796.
- Murugendrappa, M. V., Khasim, S., Prasad, M. V. N. A. (2005). Synthesis, characterization and conductivity studies of polypyrrole/fly ash composites, *Bulletin of Materials Science.*, 28, 565-569.
- Nie, G., Han, X., Zhang, S., Xu, J., Cai, T. (2007). Electrochemical Copolymerization of Indole and 3-Methylthiophene, *Journal of Applied Polymer Science.*, 104(5), 3129-3136.
- Nie, G., Han, X., Hou, J., Zhang, S. (2007). Low-potential electrochemical polymerization of 5-fluoroindole and characterization of its polymers, *Journal of Electroanalytical Chemistry.*, 604: 125-132.
- Nieto MJ, Lupton H.K. (2021). Indole and indoline scaffolds in antimicrobials: Overview, synthesis and recent advances in antimicrobial research. *Current Medicinal Chemistry.*, 28(24): 4828–4844.

- Nogami, Y., Pouget, J., Ishiguro, T. (1994). Structure of highly conducting PF6--doped polypyrrole, *Synthetic Metals.*, 62, 257-263.
- Ntow-Boahene W, Cook D, Good L. (2021). Antifungal polymeric materials and nanocomposites. *Front Bioeng Biotechnol Sec Biomaterials.*, 9: 780328.
- Odegard, G. M., Clancy, T. C., Gates, T.S. (2005). Modeling of the mechanical properties of nanoparticle/polymer composites, *Polymer.*, 46, 553-562.
- Ojio, T., Miyata S. (1986). Highly transparent and conducting poly pyrrolepoly (vinyl alcohol) composite films prepared by gas state polymerization, *Polymer Journal.*, 18 (1): 95-98.
- Osterhalm, J.E., Cao, Y., Klavetter, F. and Smith, P. (1994). Emulsion polymerization of aniline, *Polymer.*, 35 (13): 2902-2906.
- Palaniappan S. Narayana BH. (1994). Temperature Effect on Conducting Polyaniline Salts: Thermal and Spectral Studies, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry.*, 32(13), 2431-2436.
- Panwar, V., Kang, B., Park, J. O., Park, S, and Mehra, R. M. (2009). Study of dielectric properties of styrene-acrylonitrile graphite sheets composites in low and high frequency region, *European Polymer Journal.*, 45, 1777-1784.
- Park, C., Park, O., Lim, J., and Kim, H. (2001). The Fabrication of Syndiotactic Polystyrene/Organophilic Clay Nanocomposites and Their Properties, *Polymer.*, 42, 7465–7475.
- Parvin, M. P., Pirnia, M., Arjomandi, J. (2015). Electrochemical synthesis, in situ spectroelectrochemistry of conducting indole-titanium dioxide and zinc oxide polymernanocomposites for rechargeable batteries, *Electrochimica Acta.*, 276–287.
- Paulauskas F. L., White, T. L. (2004). Temperature Dependent Dielectric Measurements of Polyacrylonitrile Fibers during Air Oxidation, 49th International SAMPE Symposium., 11, Long Beach, USA.
- Ponce, J. L., Cisterna, J., Cattin, L., Bernede, J. C., Louarn, G., M.R. Ramirez, A. (2023). Electrochemical fabrication of nanowires poly (Indole-6-carboxylic acid) adorned with nanorod MnO₂ for evaluation of its capacitive properties, *Electrochimica Acta.*, 46, 142937.

- Pradeep H, Bindu M, Suresh S, Thadathil A, Periyat P. (2022). Recent trends and advances in polyindole-based nanocomposites as potential antimicrobial agents: a mini review. *RSC advances.*, 12(13): 8211-8227.
- Rajasudha, G., Rjeswari, D., Lavanya, B., Saraswathi, R., Annapoorni, S. and Mehra, N. C. (2005). Colloidal dispersions of polyindole, *Colloid Polymer Science.*, 283: 575-582.
- Raju, G. G. (2003). Dielectrics in Electric Fields, *CRC Press.*, 592, New York, USA.
- Ramesan, M. T. (2013). Synthesis and Characterization of Magnetoelectric Nanomaterial Composed of Fe₃O₄ and Polyindole, *Advances in Polymer Technology.*, 32(3):928-934.
- Ramesan, M.T. (2012). Fabrication and Characterization of Conducting Nanomaterials Composed of Copper Sulfide and Polyindole, *Polymer Composites.*, 12(33), 2169-2176.
- Ramírez AMR, Mieres F, Pineda F, Grez P, Heyser C. (2022). Electrosynthesis of polyindole-carboxylic acids on stainless steel and their corrosion protection at different temperatures in acidic solution. *Prog Org Coat.*, 172: 107075.
- Rawlinson LAB, Ryan SM, Mantovani G, Syrett JA, Haddleton DM, Brayden DJ. (2010). Antibacterial effects of poly (2-(dimethylamino ethyl) methacrylate) against selected gram-positive and gram-negative bacteria. *Biomacromolecules.*, 11(2): 443-453.
- Ruprrect, L. (1999). Conductive Polymers and Plastics, *RTP Company Press*, USA.
- Ryu, K.S., Park, N.G., Kim, K.M., Lee, Y.G., Park, Y.J., Lee, S.J., Jeong, C.K., Joo, J., Chang, S.H. (2003). The physicochemical properties of polyindole/thiol composites, *Synthetic Metals.*, 135-136: 397-398.
- Ryu, K.S., Park, N.G., Kim, K.M., Lee, Y.G., Park, Y.J., Lee, S.J., Jeong, C.K., Joo, J., Chang S.H. (2003). The physicochemical properties of polyindole/thiol composites, *Synthetic Metals.*, 135-136: 397-398.
- Korcan, S. E., Kahraman, T., Acikbas, Y., Liman, R., Cigerci, H., Konuk, M., Ocak, I. (2021). Cyto-genotoxicity, antibacterial, and antibiofilm properties of green synthesized silver nanoparticles using *Penicillium toxicarium*, *Microscopy Research Technique.*, 84(11), pp.2530-2543.

- Saafan, S. A., El-Nimr, M. K., and El-Ghazzawy, E. H., (2006). Study of Dielectric Properties of Polypyrrole Prepared using Two Different Oxidizing Agents, *Journal of Applied Polymer Science.*, 99, 3370-3379.
- Saçak, M. (2008). Polimer Kimyası, 4. Baskı, Gazi Kitabevi, 568, Ankara, Türkiye.
- Sahoo, N. G., Jung, Y. C., So, H. H., and Cho, J. W. (2007). Polypyrrole coated carbon nanotubes: Synthesis, characterization, and enhanced electrical properties, *Synthetic Metals.*, 157, 374-379.
- Sandberg, M., Maattanen, A., Peltonen, J., Vuorela, P.M. and Fallarero, A. (2008). Automating a 96-well microtitre plate model for Staphylococcus aureus biofilms: an approach to screening of natural antimicrobial compounds, *International Journal of Antimicrobial Agents*, 32: 233-240.
- Sankar, S., Naik, A. A., Anilkumar, T., Ramesan, M. T. (2019). Characterization, conductivity studies, dielectric properties, and gas sensing performance of in situ polymerized polyindole/copper alumina nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science.*, 38(137).
- Saraç, A.S., Özkara, Ş. (2004). In-situ spectroelectrochemical investigation of indole polymerization, *International Journal of Polymeric Materials.*, 53: 587-599.
- Saraji, M. and Bagheri A. (1998). Electropolymerization of indole and study of electrochemical behavior of the polymer in aqueous solutions, *Synthetic Metals.*, 98: 57-63.
- Sarı B, Talu M. (1998). Electrochemical Copolymerization of Pyrrole and Aniline, *Synthetic Metals.*, 94(2), 221-227.
- Shah AP, Kher MN, Beladiya JV, Khedkar VM, Kapadiya KM. (2024). Dibenzyl amine as an ammonia surrogate in the Ugi tetrazoles: Design, synthesis and impactful antioxidant activity. *Results Chem.*, 7: 101272.
- Shehla M, Nasir M. A, Azhar M. Mudassir I. (2021). Antibacterial amphiphilic copolymers of dimethylamino ethyl methacrylate and methyl methacrylate to control biofilm adhesion for antifouling applications, *Polymers.*, 13, 216.
- Shirakawa, H. (2001). The discovery of polyacetylene film: the dawn- ing of an era of conducting polymers, *Angewandte Chemie International Edition.*, 40, 2575-2580.

- Shirakawa, H., MacDiarmid, A. G., and Heeger, A. J. (1977). Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, $(CH)_x$, Journal of the Chemical Society, *Chemical Communications.*, 16, 578-580.
- Shoeb M, Mobin M, Rauf MA, Owais M, Naqvi AH. (2018). In vitro and in vivo antimicrobial evaluation of graphene–polyindole (gr@ pin) nanocomposite against methicillin-resistant staphylococcus aureus pathogen. *ACS omega.*, 3(8): 9431-9440.
- Singh, R., Choudhary, R. B., Kandulna, R. (2019). Optical band gap tuning and thermal properties of PMMA-ZnO sensitized polymers for efficient exciton generation in solar cell application, *Materials Science in Semiconductor Processing.*, 104623.
- Skotheim, T. A., Reynolds, J. R. (2007). Handbook of Conducting Polymers-Conjugated Polymers: Theory, Synthesis, Properties, and Characterization, 3rd Edition, *CRC Press*, 1680, New York, USA.
- Sumin, K., Jungki, S., and Drzal, L. T. (2010). Improvement of electric conductivity of LLDPE based nanocomposite by paraffin coating on exfoliated graphite nanoplatelets, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.*, 41, 581-587.
- Sun S, Hoy MJ, Heitman J. (2020). Fungal pathogens. *Current Biology.*, 30(19): R1163-R1169.
- Syed, A.A. and Dinesan, M.K. (1991). Review: Polythiophene a novel polymeric material, *Talanta.*, 38 (8): 815-837.
- Tabari, Z. S. (2007). Conductive Polymers-A Route dor Sustainability, *Master's Thesis.*, 62, University College of Boras, Boras, Sweden.
- Talbi, H. and Billaud, D. (1998). Electrochemical properties of polyindole and poly(5-cyanoindole) in $LiClO_4$ -acetonitrile and in HCl and $HClO_4$ Solutions, *Synthetic Metals*, 93: 105-110.
- Talbi, H., Billaud, D. (1998). Electrochemical properties of polyindole and poly(5cyanoindole) in $LiClO_4$ -acetonitrile and in HCl and $HClO_4$ solutions, *Synthetic Metals.*, 93: 105-110.
- Talbi, H., Ghanbaja, J., Billaud, D., Humbert, B. (1997). Vibrational properties and structural studies of doped and dedoped polyindole by FT-IR, raman and EEL spectroscopies, *Polymer.*, 38: 2099-2106.

- Talbi, H., Maarouf, E.B., Humbert, B., Alnot, M., Ehrhardt, J.J., Ghanbaja, J., Billaud, D. (1996). Spectroscopic studies of electrochemically doped polyindole, *Journal of Physics and Chemistry of Solids.*, 57: 1145.
- Talbi, H., Monard, G., Loos, M. and Billaud, D. (1999). Theoretical investigation of the monomer reactivity in polyindole derivatives, *Synthetic Metals.*, 101: 115-116.
- Talbi, H., Monard, G., Loos, M., Billaud, D. (1998). Theoretical study of indole polymerization, *Journal of Molecular Structure (Theochem).*, 434: 129-134.
- Talbi, H., Monard, G., Loos, M., Billaud, D. (1999). Theoretical investigation of the monomer reactivity in polyindole derivatives, *Synthetic Metals.*, 101: 115-116.
- Taylan NB, Sarı B, Unal HI. (2010). Preparation of Conducting Poly(Vinyl Chloride)/Polyindole Composites and Freestanding Films via Chemical Polymerization, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics.*, 48(12), 1290-1298.
- Tebyetekerwa, M., Xu, Z., Li, W., Wang, X., Mariam, I., Peng, S., Ramkrishna, S., Yang, S., Zhu, M. (2018). Surface Self-Assembly of Functional Electroactive Nanofibers on Textile Yarns as a Facile Approach toward Super Flexible Energy Storage, *ACS Energy Materials.*, 1, 377-386.
- Thoms, E., Sippel, P., Reuter, D., Weib, M., Loidl, A., Krohns, S. (2017). Dielectric study on mixtures of ionic liquids, *Scientific Reports.*, 7, 7463.
- Tourillon, G., Garnier, F. (1982). New electrochemically generated organic conducting polymers, *Journal of Electroanalytical Chemistry.*, 135: 173.
- Tüken, T., Düdükçü, M., Yazıcı, B. and Erbil, M. (2004). The use of polyindole for mild steel protection, *Progress in Organic Coatings.*, 50: 273-282.
- Urban, S., Würfinger, A., Gestblom, B. (1999). On the derivation of the nematic order parameter from the dielectric relaxation times. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 1, 2787–2791.
- Ürkmez, G., Sarı, B., Ünal, H. İ. (2010). Synthesis and Characterization of Novel Poly(dimethylsiloxane)/Polyindole Composites, *Journal of Applied Polymer Science.*, 3(121), 1600-1609.

- Verma, C. J., Pandey, R. K., Prakash, R. (2018). In situ one step synthesis of Fe inserted octaethylporphyrin/polyindole: A multifunctional hybrid material with improved electrochemical and electrical properties, *Materials Science and Engineering B.*, 27, 80-88.
- Vishnuvardhan, T. K., Kulkarni, V. R., Basavaraja, C., and Raghavendra, S. C. (2006). Synthesis, characterization and a.c. conductivity of polypyrrole/Y2O3 Composites, *Bulletin of Materials Science.*, 29, 77- 83.
- Volkov, A. A., Prokhorov, A. S. (2003). Broadband Dielectric Spectroscopy of Solids, Radiophysics and Quantum Electronics., 46, 657-665.
- Wallace, G. G., Spinks, G. M., Kane-Maguire, L. A. P., Teasdale, P. R. (2008). Conductive Electroactive Polymers-Intelligent Polymer Systems. Third Edition, *CRC Press.*, 263, FL, USA.
- Waltman, R.C., Diaz, A.F. (1984). Bargon, J., Substituent effects in the electropolymerization of aromatic heterocyclic compounds, *The Journal of Physical Chemistry.*, 88: 4343-4346.
- Waltman, R.C., Diaz, A.F., Bargon, J. (1984). Substituent effects in the electropolymerization of aromatic heterocyclic compounds, *The Journal of Physical Chemistry.*, 88: 4343-4346.
- Wang, L. X., Li, X. G., and Yang, Y. L. (2001). Preparation, properties and applications of polypyrroles, *Reactive & Functional Polymers.*, 47, 125–139
- Wojkiewicz, J. L., Fauveaux, S., Miane, J. L. (2001). Dielectric behavior and shielding properties of polyaniline composites, *IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics*, 46-49, Eindhoven, Netherlands.
- Xia, Y., Lu, Y. (2009). Conductive Polymers/Polyacrylonitrile Composite Fibers: Fabrication and Properties, *Polymer Composites.*, 31, 340-346.
- Xu, J., Hou, J., Zhou, W., Nie, G., Pu, S., Zhang, S. (2006). ¹H NMR spectral studies on the polymerization mechanism of indole and its derivatives, *Spectrochimica Acta Part A.*, 63: 723-728.
- Xu, J., Nie, G., Zhang, S., Han, X., Hou, J. and Pu, S. (2005). Electrosyntheses of freestanding polyindole films in polyindole films in boron trifluoride diethyl etherate, *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry.*, 43: 1444-1453.

- Xu, J., Nie, G., Zhang, S., Han, X., Hou, J., Pu, S. (2005). Electrosyntheses of freestanding polyindole films in boron trifluoride diethyl etherate, *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*, 43: 1444-1453.
- Xu, J., Zhou, W., Hou, J., Pu, S., Yan, L., Wang, J. (2005). Electrosyntheses of high quality poly(5-nitroindole) films, *Materials Letters*, 5962-5968.
- Xu, L., Zhu, D., Zhou, W., Jiang, F., Wu, Y., Cai, Y., Kang, H., Xu, J. (2021). One-step hydrothermal synthesis of N-doped graphene/poly5-hydroxyindole composite materials for supercapacitor with ultra-long cycle stability and ultra-high energy storage performance, *Journal of Energy Storage*, (43), 103303.
- Ye, G., Ma, X., Duan, X., Zhou, W., Xu, J. (2017). Preparation of Poly(7-formylindole)/carbon Fibers Nanocomposites and Their High Capacitance Behaviors, *International Journal of Electrochemical Science*, 12, 8467-8476.
- Yue, R., Zhang, Q., Wang, C., Du, Y., Yang, P., Xu, J. (2013). Graphene–poly(5-aminoindole) composite film as Pt catalyst support for methanol electrooxidation in alkaline medium, *Electrochimica Acta*, 292-300.
- Yurtsever, M., Yurtsever, E. (2002). A DFT study of polymerization mechanisms of indole, *Polymer*, 43: 6019-6025.
- Zhang, Z., Roy, R., Dugre, F. J., Tessier, D., and Dao, L. H. (2001). In vitro Biocompatibility Study of Electrically Conductive Polypyrrole-coated Polyester Fabrics, *Journal of Biomedical Materials Research*, 57, 6371.
- Zhou, W., Ma, X., Jiang, F., Zhu, D., Xu, J., Lu, B., Liu, C. (2014). Electrochemical fabrication of a porous network MnO₂/poly(5-cyanoindole) composite and its capacitance performance, *Electrochimica Acta*, 270-277.
- Zotti, G., Zecchin, S., Schiavon, G., Seraglia, R., Berlin, A., Canavesi, A. (1994). Structure of polyindoles from anodic coupling of indoles: an electrochemical approach, *Chemistry of Materials*, 6: 1742.
- Zou, H., Deng, X., Zheng, L., Guo, Q., Nie, G. (2022). Facile synthesis of novel poly(1H-benzoindole)/WO₃ nanocomposites with enhanced energy storage capability and its application in high-performance supercapacitor, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 923, 116812.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Soyadı, adı :TÜFEKÇİ, Burak

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Uşak Üniversitesi/ Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği	2020
Lise	Rize Anadolu Lisesi	2015

İş Deneyimi

Yıl	Çalışma Yeri	Görev
2024-2024	Uşak Seramik A.Ş	Vardiya Amiri

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-