

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**NEODİMYUM VE İTRİYUM KATKILANDIRILMIŞ YENİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN SENTEZİ VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ebru ÇETİNKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
STRATEJİK HAMMADDELER VE İLERİ TEKNOLOJİ UYGULAMALARI
ANABİLİM DALI

I. DANIŞMAN
Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Gülben TORĞUT

TUNCELİ – 2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NEODİMYUM VE İTRİYUM KATKILANDIRILMIŞ YENİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN SENTEZİ VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ebru ÇETİNKAYA
(210090008)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
STRATEJİK HAMMADDELER VE İLERİ TEKNOLOJİ UYGULAMALARI
ANABİLİM DALI

I. DANIŞMAN
Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN

II. DANIŞMAN
Doç. Dr. Gülben TORĞUT

TUNCELİ - 2024

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NEODİMYUM VE İTRİYUM KATKILANDIRILMIŞ YENİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN SENTEZİ VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ebru ÇETİNKAYA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
STRATEJİK HAMMADDELER VE İLERİ TEKNOLOJİ UYGULAMALARI
ANABİLİM DALI

Bu tez 29/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza	İmza	İmza
Doç. Dr. Mustafa Ersin PEKDEMİR (Fırat Üniversitesi)	Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN (Munzur Üniversitesi)	Doç. Dr. Yeliz İPEK (Munzur Üniversitesi)
BAŞKAN	DANIŞMAN	ÜYE

Bu tez, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Stratejik Hammaddeler ve İleri Teknoloji Uygulamaları Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Prof. Dr. Altuğ KAZAR
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: YLMUB022-18

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

İmza
Ebru ÇETİNKAYA

Danışman
Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN
II. Danışman
Doç. Dr. Gülben TORĞUT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında beni destekleyen, yönlendiren, büyük ilgi, anlayış ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanım Sayın Hocam Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN'a ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Gülben TORĞUT'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Seda ŞEKER'e ve Sadiye KARATAŞ'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana her zaman destek olan ailemin tüm bireylerine ve eşime sonsuz teşekkürler ederim.

Bu tez çalışmasını YLMUB022-18 numaralı tez projesi ile maddi olarak destekleyen Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Ebru ÇETİNKAYA
TUNCELİ-2024

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLOLAR LİSTESİ	V
SEMBOLLER LİSTESİ	VI
KISALTMALAR LİSTESİ	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Nadir Toprak Elementleri.....	2
1.1.1. Neodimyum (Nd).....	3
1.1.2. İtiryum (Y).....	3
1.2. Polimerler.....	4
1.3. Kompozitler.....	5
1.3.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler.....	5
1.4. Dielektrik.....	7
1.4.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Dielektrik Özellikleri.....	7
1.5. N-İzopropilakrilamid (NIPA).....	8
1.6. Stiren (St).....	9
1.7. Literatürde Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler İle İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar.....	9
2. MATERYAL ve METOT	14
2.1. Kullanılan Cihazlar ve Malzemeler.....	14
2.2. Poli(N-İzopropilakrilamid-Kopolimer-Stiren) Sentezi.....	14
2.3. Poli(N-İzopropilakrilamid-Kopolimer-Stiren)-Neodimyum ve Poli(N-İzopropilakrilamid-Kopolimer-Stiren)-İtiryum Kompozit Malzemelerin Eldesi.....	14
2.4. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu.....	15
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	16
3.1. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin FTIR Analizleri.....	16
3.2. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin SEM-EDX Analizleri.....	18
3.3. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin XRD Analizleri.....	22
3.4. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin Elektriksel Özellikleri.....	24
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	33
5. KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	41

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. N-izopropilakrilamid monomeri (a) ve poli(N-izopropilakrilamid) polimerinin (b) molekül yapıları.....	9
Şekil 1.2. Stiren monomeri (a) ve polistiren polimerinin (b) molekül yapıları	9
Şekil 3.1. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a) poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine (c) ait FTIR spektrumları.	17
Şekil 3.2. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a) poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine (c) ait FTIR spektrumları.....	18
Şekil 3.3. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a) poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine (c) ait SEM görüntüleri ve EDS spektrumları.....	19
Şekil 3.4. Poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine ait EDS eşleme görüntüleri.....	20
Şekil 3.5. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a), poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine (c) ait SEM görüntüleri ve EDS spektrumları.....	21
Şekil 3.6. Poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine ait EDS eşleme görüntüleri.....	22
Şekil 3.7. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a), poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine (c) ait XRD analizleri.....	23
Şekil 3.8. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a), poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine (c) ait XRD analizleri.....	24
Şekil 3.9. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitinin dielektrik sabitinin frekansa bağımlılığı	26
Şekil 3.10. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitinin dielektrik kaybının frekansa bağımlılığı.....	27
Şekil 3.11. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitinin elektriksel iletkenliğinin frekansa bağımlılığı.....	27
Şekil 3.12. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin dielektrik sabitinin frekansa bağımlılığı.....	29
Şekil 3.13. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin dielektrik kaybının frekansa bağımlılığı.....	30
Şekil 3.14. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin elektriksel iletkenliğinin frekansa bağımlılığı.....	31

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10 Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitlerinin oda sıcaklığında elektriksel özellikleri.....	28
Tablo 3.2. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10 Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitlerinin oda sıcaklığında elektriksel özellikleri.....	32



SEMBOLLER LİSTESİ

ϵ	: Dielektrik sabiti
ϵ''	: Dielektrik kayıp
σ_{ac}	: Elektriksel iletkenlik
ϵ_0	: Vakumun geçirgenliği
C_p	: Kapasitans
D	: Numunenin kalınlığı
A	: Numunenin etkin alanı
G	: İletkenlik



KISALTMALAR LİSTESİ

NTE	:Nadir Toprak Elementleri
Nd	:Neodimyum
Y	:İtriyum
NIPA	:N-İzopropilakrilamid
St	:Stiren
Poli(NIPA-ko-St)	:Poli(N-izopropilakrilamid-kopolimer-Stiren)
Poli(NIPA-ko-St)-Nd	:Poli(N-izopropilakrilamid-kopolimer-Stiren)-Neodimyum
Poli(NIPA-ko-St)-Y	:Poli(N-izopropilakrilamid-kopolimer-Stiren)-İtriyum
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
SEM-EDS	: Taramalı Elektron Mikroskobu Ve Enerji Dağılımlı Spektroskopi
XRD	: X-Işını Difraktometresi



ÖZET

Polimerler düşük dielektrik sabitine sahip olmaları nedeniyle polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde tercih edilir. Polimerlerin içerisine gömülü iletken dolgu maddeleri içeren kompozitler son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Tez çalışması kapsamında serbest radikalik polimerizasyon metoduyla N-izopropilakrilamid (NIPA) ve stiren (St) monomerleri ile poli(NIPA-ko-St) kopolimeri sentezlendi. Bu kopolimere nadir toprak elementlerinden neodimyum (Nd) ve itriyum (Y) ağırlıkça farklı oranlarda (%10 ve %20) katkılандırıldı ve yeni kompozit malzemeler elde edildi. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10 Nd, poli(NIPA-ko-St)-%20 Nd, poli(NIPA-ko-St)-%10 Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20 Y kompozit malzemelerin yapısal ve morfolojik karakterizasyonları gerçekleştirildi. Kopolimer ve kompozit malzemelerin elektriksel özellikleri dielektrik sabiti, dielektrik kayıp ve elektriksel iletkenlik özelliklerinin frekansa bağımlılıkları dikkate alınarak değerlendirildi. Poli(NIPA-ko-St) kopolimere eklenen Nd ve Y katkı miktarının artmasıyla saf polimerin dielektrik sabiti (ϵ') değerlerinin arttığı tespit edildi. Benzer şekilde kopolimere Nd ve Y katkı miktarının artmasıyla saf polimerin dielektrik kayıp (ϵ'') değerlerinin arttığı belirlendi. İletkenlik değerleri poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için 2.41×10^{-9} S/cm, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti için 1.86×10^{-8} S/cm, poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompoziti için 4.78×10^{-8} S/cm, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti için 1.92×10^{-8} S/cm, poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompoziti için 3.70×10^{-8} S/cm olarak hesaplandı. Elde edilen elektriksel özellik sonuçlarına göre Nd ve Y elementlerinin poli(NIPA-ko-St) kopolimerine katkılандırılmasıyla elektriksel özelliklerde iyileşme olduğu söylenebilir. Elde edilen kompozit malzemeler elektriksel iletkenlik gerektiren elektronik parça, sensörler, iletken kaplamalar, kapasitörler gibi farklı birçok alanda kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Neodimyum, itriyum, elektriksel özellik, kopolimer, kompozit malzeme

ABSTRACT

Synthesis and Examination of Electrical Properties of New Composite Materials Doped with Neodymium and Yttrium

Polymers are preferred in the production of polymer matrix composite materials due to their low dielectric constant. Composites containing conductive fillers embedded in polymers have attracted great attention in recent years. Within the scope of the thesis study, poly(NIPA-co-St) copolymer of N-isopropylacrylamide (NIPA) and styrene (St) monomers was synthesized by the free radical polymerization method. The rare earth elements neodymium (Nd) and yttrium (Y) were added to this copolymer in different weight ratios (10% and 20%) and new composite materials were obtained. Structural and morphological characterizations of poly(NIPA-co-St) copolymer, poly(NIPA-co-St)-10% Nd, poly(NIPA-co-St)-20% Nd, poly(NIPA-co-St)-10% Y and poly(NIPA-co-St)-20% Y composite materials were carried out. The electrical properties of copolymer and composite materials were evaluated by taking into account the frequency dependence of dielectric constant, dielectric loss and electrical conductivity properties. It was determined that the dielectric constant (ϵ') values of the pure polymer increased as the amount of Nd and Y additives added to the poly(NIPA-co-St) copolymer. Similarly, it was determined that the dielectric loss (ϵ'') values of the pure polymer increased by adding Nd and Y to the copolymer. The conductivity values was calculated as 2.41×10^{-9} S/cm for poly(NIPA-co-St) copolymer, 1.86×10^{-8} S/cm for poly(NIPA-co-St)-10%Nd composite, 4.78×10^{-8} S/cm for poly(NIPA-co-St)-20%Nd composite, 1.92×10^{-8} S/cm for poly(NIPA-co-St)-10%Y composite, 3.70×10^{-8} S/cm for poly(NIPA-co-St)-20%Y composite. According to the electrical property results obtained, it can be said that there is an improvement in the electrical properties by adding Nd and Y elements to the poly(NIPA-co-St) copolymer. The resulting composite materials can be used in many different areas such as electronic parts, sensors, conductive coatings, capacitors that require electrical conductivity.

Keywords: Neodymium, yttrium, electrical property, copolymer, composite material

1. GİRİŞ

Nadir toprak elementleri (NTE) periyodik cetvelde geçiş metallerinin bir alt serisini oluşturan lantanit grubunda yer almaktadır. Atom numarası 57 olan lantan ile 71 olan lutesyum arasındadır. Skandiyum (Sc) ve itriyum (Y) geçiş metalleri lantanitlerle benzer kimyasal özellik göstermelerinden dolayı bu element grubuna dâhil edilmektedir. Uçak motorları, rüzgar türbinleri, bilgisayar, yüklenebilir piller, tıbbi görüntüleme cihazları, cep telefonları, hibrid araçlar, petrol arıtma gibi birçok farklı alanda bu elementler kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2022; Dev ve ark., 2020; Liu ve Chen, 2021; Yıldız, 2016). Nadir toprak elementleri polimer kompozit malzemelere katkılanarak malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu amaçla polimer metal kompozitler üretilmekte ve bu malzemelerin akıllı ve hafif malzemeler olduğu, organik ve inorganik birim özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Polimer matriksine herhangi bir türde fonksiyonel veya yapısal birim, farklı bağlanma teknikleriyle (fiziksel, kimyasal bağlama gibi) dâhil edilebilmektedir. Metal tuzlarının zayıf dielektrik özelliğine sahip polimerlere eklenmesiyle elektrik iletkenlik önemli ölçüde değişebilmektedir (Rodrigues ve ark., 2000). Metal katkılanarak dielektrik özelliği değişen kompozit malzemelerin elektrik ve elektronik alanda kullanımı tercih edilir. Düşük dielektrik geçirgenliğe sahip olan kompozit malzemelere iletken dolgu maddesinin eklenmesi polimerin dielektrik geçirgenliğini önemli ölçüde artmaktadır (Ahmad ve ark., 2019). Bu amaçla farklı yüzey doldurucuları (EuCl_3 , kil, grafen, grafit gibi) kullanılmakta ve ara yüzeyin güçlenmesine katkıda bulunulur (Li ve ark., 2019). Bu malzemeler gelişmiş elektrik uygulamaları için yüksek dielektrik sabiti, düşük dielektrik kayıp, iyi mekanik esneklik, kimyasal dirence sahip olması ve ayrıca düşük maliyetli, kolay işlenebilen ve mekanik esnekliğe sahip olması nedeniyle taşınabilir elektronik uygulamalar için tercih edilir (Peng ve ark., 2016; Wang ve ark.; 2010, Shen ve ark., 2015; Pıhtılı ve ark., 2020; Zhu ve ark., 2017).

Bu çalışmada poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin sentezlenmesi ve bu kopolimere neodimyum (Nd) ve itriyum (Y) elementlerinin ağırlıkça farklı oranlarda katkılanması ile yeni kompozit malzemelerin eldesi ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle, sentezlenen kopolimer ve nadir toprak elementleri katkılanmış kompozit malzemelerin yapısal ve morfolojik yapıları Fourier transform kızılötesi spektrofotometre cihazı (FTIR), elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı spektroskopisi (SEM-EDS), X-ışını difraktometresi (XRD) cihazları ile karakterize edilmiş

ve değerlendirilmiştir. Daha sonra kopolimer ve yeni kompozit malzemelerin elektriksel özellikleri dielektrik sabiti, dielektrik kayıp ve iletkenlik özelliklerinin frekansa bağımlılıkları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

1.1. Nadir Toprak Elementleri

Periyodik cetvelde lantanitler olarak bilinen atom numarası 57 ile 71 arasında yer alan elementler nadir toprak elementi (NTE) olarak adlandırılırlar. Nadir toprak elementleri; samaryum (Sm), lantan (La), praseodimyum (Pr), disprosyum (Dy), neodimyum (Nd), gadolinyum (Gd), erbiyum (Er), evropiyum (Eu), seryum (Ce), terbiyum (Tb), holmiyum (Ho), tulyum (Tm), iterbiyum (Yb), lutesyum (Lu) ve prometyum (Pm) elementlerinden oluşmaktadır. Bu elementlere lantanidlere benzer kimyasal özellik göstermesi nedeniyle skandiyum (Sc) ve itriyum (Y) elementleri de dâhil edilmiştir (Yıldız, 2016).

Nadir toprak elementleri periyodik cetvelin f bloğunda yer alır ve i geçiş elementleri olarak bilinirler. NTE'lerin elektron dizilimi $5s^25p^66s^2$ şeklinde olup elektron geçişleri 4f orbitalindedir. Son elektronları 4f orbitalinde yer alan nadir toprak elementlerinin bazıları yarı dolu (rneğin Eu, Gd) bazıları ise tam dolu (rneğin Yb, Lu) orbitale sahiptir. Nadir toprak elementleri paramanyetik özelliklerinden dolayı soğurma ve yayınlama spektrumu verebilirler, evropiyum hariç bu elementlerin spektrumları keskin çizgiler halindedir ve kuvvetli indirgeyici elementlerdir (elik, 2014). Periyodik tablodaki elementlerin iyonik yarıçapı genellikle artan atom numarası ile artarken, NTE'lerin iyonik yarıapıları artan atom numarası ile azalma göstermekte olup bu durum lantanit daralması olarak bilinir. Lantanit serisinde ilerlerken artan çekirdek yüküyle (artan atom numarasına bağlı olarak) bu elementlerin elektron kabuklarının atomun çekirdeğine daha yakın çekilmesiyle açıklanabilmektedir. İyonik yarıçaplardaki benzerlikler, NTE'lerin çoğu mineralde birbirinin yerine geçebileceği ve dolayısıyla ayrılmalarının çok zor olduğu anlamına gelmektedir (Jordens, 2013).

Nadir toprak elementleri 160'dan fazla mineralde bulunur ve yer kabuğunda düşük konsantrasyonlarda geniş bir alana yayılmıştır. Ancak ekonomik anlamda işlenebilir mineral sayısı 13 olup Dünya nadir toprak elementi üretiminin %95'i bastnasit, monazit ve ksenotim gibi minerallerden sağlandığı bilinmektedir (Teixeira ve ark., 2020). Bu minerallerden basnazit florokarbonat mineralidir, %72 oranında nadir toprak oksiti içerir.

Hafif ve ağır NTE'leri içeren bu mineral damarlar halinde ve kompleks karbonat silikat kayalarla dissemine olmuş şekilde bulunurlar. Kaliforniya ve Çin'de en büyük bastnasit yatakları bulunur. Bir diğer mineral olan monazit %60-70 oranında nadir toprak metalleri zirkon, manyetit, rutil, ilmenit ve ağır mineraller ile birlikte bulunur ve %20 oranlarında ThO₂ içerir. Güney Afrika, Hindistan, Avustralya, ABD, Rusya, Çin ve Brezilya'da en büyük monazit yatakları bulunur. Ksenotim ise %53-65 oranında nadir toprak metalleri içeren bir itriyum fosfat mineralidir. Tayland, Malezya, Avustralya, Çin ve Endonezya'da en büyük ksenotim yatakları bulunur. Çin, Dünyadaki nadir toprak elementleri üretiminin, kullanımı, ihracatı ve teknolojisi sahip ülke olup rezervlerin yaklaşık 1/3'üne sahiptir. Ülkemizde ise bu elementlerin üretilmesi, zenginleştirilmesi, sanayisinin kurulması, nadir toprak elementi hammadde gereksiniminin kaynaklarımızdan karşılanması önemlidir (Yıldız, 2016).

1.1.1. Neodimyum (Nd)

Neodimyum, kalıcı mıknatısların üretiminde kullanılan bir elementtir ve en güçlü kalıcı mıknatıs türlerinden biri NdFeB'dur (Gök, 2014). Bu element birçok farklı alanda kullanılmakta olup camlar, optik filtreler ve elektronik ve lazer sistemlerde kullanımları dikkat çekmektedir. Neodimyum elementinin atom numarası 60, molekül ağırlığı 144.24 g/mol, özkütle 7.1 g/cm³, elektronegatiflik 1.14, erime noktası 1021 °C, kaynama noktası 3100 °C ve elektron dizilimi [Xe] 6s²4f⁴ şeklindedir (URL-1, 2022).

1.1.2. İtriyum (Y)

Yüksek oksidasyon ve korozyon özelliğine sahip olan itriyum metal yüzeylerde termal kaplama olarak, mücevher sektöründe, jet motorlarında kullanılmaktadır (Yıldız, 2016). İtriyum elementinin atom numarası 39, molekül ağırlığı 88.91 g/mol, özkütle 6.9 g/cm³, elektronegatiflik 1.22, erime noktası 1526 °C, kaynama noktası 3345 °C ve elektron dizilimi [Xe] 5s²4d¹ şeklindedir (URL-1, 2022).

1.2. Polimerler

Küçük moleküllerin (monomerlerin) birbirine eklenmesi ile oluşturulan uzun zincirli moleküller polimerler olarak adlandırılır. Uygun koşullarda polimerizasyon tepkimesi ile oluşan polimerler, birbirlerine kimyasal bağ ile bağlanırlar. Otomotiv, inşaat, medikal, giyim, oyuncak, enerji gibi birçok farklı alanda polimerler kullanılır (İncesu, 2023). Polimerler; doğada bulunup bulunmamalarına, ısıya karşı gösterdikleri davranışa, fiziksel yapılarına, bağ yapılarına, kimyasal bileşimlerine, sentezlenme şekillerine, zincir yapısına, molekül ağırlıklarına göre sınıflandırılırlar (Kalkan, 2022; İncesu, 2023). Farklı şekillerde sınıflandırılan polimerlerin düşük maliyetli olması, kolay işlenebilmeleri, hafif olmaları ve korozyon ile kimyasal etkenlere karşı dirençli olmalarından dolayı son yıllarda üretimi giderek artmaktadır. Yapılan araştırmalara göre dünyada yıllık 300-400 ton arası polimer üretilmektedir (URL-2, 2022).

Doğada bulunup bulunmamalarına göre polimerler; doğal ve yapay polimerler olarak ayrılırlar. Nişasta, selüloz, proteinler, nükleik asitler ve enzimler doğal polimerlere örnek verilebilir.

Isıya karşı gösterdikleri davranışa göre polimerler; kauçuğa benzer elastik özellikli katı formda elastomerler, kristalin formda güçlü mekanik özelliğe sahip fiberler, ısıyla yumuşayan ve soğuma ile sertleşebilen termoplastik polimerler, termoplastik ve elastomer özelliklere sahip termoplastik elastomer polimerler, yüksek sıcaklıklarda ısıtılması ile bozulan geri dönüşümü olmayan termoset polimerlerden oluşur.

Fiziksel yapılarına göre polimerler; üç farklı yapıdadır. Amorf polimerler; mukavemeti yüksek olan bu polimerlerde moleküller rastgele bağlanmış olup çapraz bağlar ve kristalleşme yoktur. Kristalin polimerler; molekül zincirinin şekline ve moleküller arasındaki bağlara bağlı olarak belli bir düzene girmiş veya kristalleşmiş halde bulunan polimerlerdir. Kısmi kristalin polimerler; polimerik yapı kristalin ve amorf yapıdan oluşmaktadır.

Bağ yapılarına göre polimerler; karbon karbon bağı çizgisi düz halde bulunan düz zincirli yapıda polimerler, polimerin temel zincirine polimerin kimyasal yapısına benzer dal şeklinde baş zincirlerin kovalent bağlarla bağlanması ile oluşan dallanmış yapıda polimerler, üç boyutlu matriks formu için uzun polimer zincirlerin birbirine bağlanması ile oluşan çapraz bağlı yapıda polimerlerden oluşur.

Kimyasal bileşimlerine göre polimerler; yapılarında C, H, O, N ve halojen atomu (F, Cl, Br, I) bulunduran toksik olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen organik polimerler ve temel zincirinde periyodik tablodaki Si, P, S başta olmak üzere 4. ve 6. Grup elementleri yapısında barındıran inorganik polimerlerden oluşur.

Sentezlenme şekillerine göre polimerler; kondenzasyon polimerleri (-OH, -COOH ve -NH₂ gibi fonksiyonel gruplar içeren iki tane monomerin reaksiyona girmesiyle) ve katılma polimerleri (bir çift bağın açılması ve monomerlerin birbirine zincirin halkaları gibi katılmasıyla) olarak oluşur.

Zincir yapısına göre polimerler; tek bir monerin birbirine tekrarlamasıyla oluşan homopolimerler ve iki farklı monomerin birleşmesiyle oluşan kopolimerden oluşmaktadır.

Molekül ağırlıklarına göre polimerler; en az iki monomer ve en fazla on monomerin birleşmesiyle oluşan polimerler olup bu polimerler oligomerler olarak adlandırılmaktadır.

1.3. Kompozitler

İki ya da daha fazla sayıdaki malzemelerin özelliklerini tek bir malzemede toplamak için bileşenlerini koruyacak şekilde makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan yapay malzemeler ile kompozit malzemeler oluşturur. Kompozit malzemelerde matris ana fazdır. Ana faza takviyelerin eklenmesi ile kompozit malzemeler oluşur. Polimer matrisli kompozitler de polimerler ana fazdır. Kompozit malzemeler genel olarak düşük dayanıma sahip bir ana matristen ve ana matrisi güçlendirecek takviye malzemelerden oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin dayanımını artırmak ya da istenilen özellikleri eklemek için takviyelerden yararlanılır. Kompozit malzemelerde ana matrisin genel olarak özelliği; takviyeleri dış etkenlere karşı korumak ve tüm kompozit yapıyı bir arada tutmaktır (URL-2, 2022).

1.3.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli kompozit malzemeler günümüzde kara ve deniz araçlarının parçalarında, boya, inşaat, ambalaj, elektrik-elektronik gibi endüstrilerde kullanılmaktadır. Bu endüstrilerde üretim yapılırken en önemli basamağı oluşturan polimerizasyon işlemidir. Bu aşamada uygun matrisin seçimi, ilave malzemelerin seçimi ve malzemelerin doğru

şekilde yapılandırılması oldukça önemlidir. Farklı endüstrilerde üretim aşamasında farklı yöntemler kullanılır. Genellikle kullanılan yöntemler;

- ✓ Otoklavda kalıplama yöntemi
- ✓ Püskürtme yöntemi
- ✓ Pres kalıplama yöntemi
- ✓ Matris enjeksiyon yöntemi
- ✓ Transfer kalıplama yöntemi
- ✓ El yatırma yöntemi
- ✓ Soğuk kalıplama yöntemi
- ✓ Filament sarma yöntemi
- ✓ Vakumla kalıplama yöntemidir.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin farklı endüstrilerde tercih edilme nedenleri dayanıklılık, darbe dayanımı, esneklik, hafiflik, sağlamlık özellikleridir. Polimer matrisli kompozitler sürekli elyaf kompozitler ve parçacık dolgulu kompozitler olmak üzere ikiye ayrılır. Genellikle yüksek performans istenilen alanlarda sürekli elyaf içeren kompozit malzemeler kullanılmaktadır (URL-2, 2022).

Polimer matrisli kompozitlerin yapısında termoset ve termoplastikler kullanılabilir ve ayrıca cam fiber, karbon fiberler, alümina fiberler, aramid fiberler ve bor fiberler kullanılır. Termoset polimerlerden ilk polimer matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Termoset polimerleri içeren kompozit malzemelerde vinil esterler, poliesterler, epoksiler, fenolikler, poliüretanlar, silikonlar ve amino reçineler kullanılır. Bu polimerlerin termoplastik polimerlere göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu bilinir (URL-2, 2022). Termoplastik polimerler, plastik malzemeler içerisinde yaklaşık %80 oranında kullanılmaktadır. Termoplastik polimerler geri dönüştürülebilmeleri, çevresel şartlara, petrol türevlerine ve kimyasallarla karşı daha dayanıklı olması nedeniyle gün geçtikçe daha fazla kullanılmaktadır. Ayrıca, termoplastik polimerleri içeren kompozit malzemeler soğuduğunda sertleşmesi ve bu sayede maliyeti azaltması nedeniyle de tercih edilmektedir. Genellikle polimer temelli kompozit malzemelerde termoplastik polimer olarak polivinil klorür, polietilen, polikarbonat, poliamid, poliasetal ve polipropilen kullanılır (URL-2, 2022).

1.4. Dielektrik

Dielektrik, bir elektrik akımı taşıyabilecek serbest elektronları olmayan, bir elektrik alanıyla kutuplanma özelliği taşıyan, elektrik iletkenliği sıfır veya çok zayıf olan cisim veya maddeler olarak tanımlanır (URL-3, 2024). Dielektrik özellikli malzemeler elektrik yüklerini depolayabilir, elektrik alanlara karşı direnç gösterebilir ve genellikle uygulanan elektrik alan ile polarize olabilirler. Polarizasyon sonucunda dielektrik özellikli malzeme içerisindeki pozitif ve negatif yük merkezleri elektrostatik kuvvet etkisinde zıt yönlerde ayrılırlar ve dipol momentleri oluşur. Elektrik alan etkisi kaldırıldığında yük merkezleri ilk konumlarına döner ve dipol moment sıfır olur (Karakaya, 2024; Yerişkin ve Asar, 2020). Dielektrik özellikli malzemelerin elektrik alan altındaki yer değiştirme davranışları dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Yalıtkan sabiti olarak ta bilinen dielektrik sabiti elektromanyetizmada bir malzemenin üzerinde yük depolayabilme yeteneğini ölçmeye yarayan katsayı olarak ifade edilir. Dielektrik özellikli malzemelerin dielektrik sabiti etkileştiği elektriksel alan şiddetinden bağımsız olup frekans ve sıcaklığa bağlıdır (Karakaya, 2024; Yerişkin ve Asar, 2020; İncesu, 2023). Yüksek dielektrik ve elektriksel özelliklere sahip polimer matrisli kompozit malzemeler işlenmesi kolay, hafif ve ekonomik olmasından dolayı yapay kaslarda, hafıza cihazlarında, sensörlerde, süper kapasitörler gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır (Ünsal ve ark., 2020). Dielektrik kayıp ise, elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürülme oranı olarak ifade edilir.

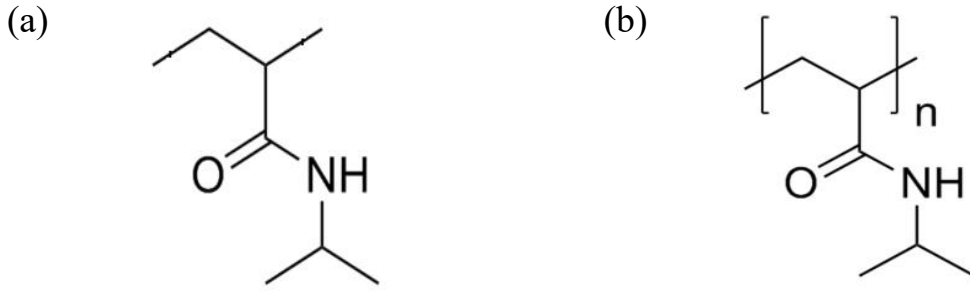
1.4.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Dielektrik Özellikleri

Polimerler düşük dielektrik sabitine sahip olmaları nedeniyle polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde tercih edilir. Genel olarak taşınabilir elektronik uygulamalarda polimer seçilirken polimerin mekanik esnekliği, kolay işlenebilmesi ve düşük maliyetli olması göz önünde bulundurulur (Shen ve ark., 2015; Peng ve ark., 2016; Pıhtılı ve ark., 2020; Wang ve ark., 2010; Zhu ve ark., 2017). Polimerlerin içerisine gömülü iletken dolgu maddeleri içeren kompozitler son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Bu kompozitler, dolgu ağırlığının istenen elektriksel iletkenliği ile kolay işlenebilirlik ve mekanik esneklik gibi polimerlerin doğal avantajlarını birleştirdiklerinden teknolojik olarak faydalıdır (Dang ve ark., 2003; Ameli ve ark., 2014; Xu ve ark., 2016).

Son yıllarda yapılan çalışmalarda polimer matrisli kompozit malzemelerin devrelerde, göstergelerde, sensörlerde, enerji depolamada ve kapasitörlerde kullanımları dikkat çekmektedir (Ghanipour ve Dorranean, 2013). İletken parçacıklarla hazırlanan polimer kompozitlerin (örneğin grafen, gümüş, karbon nanotüpler ve bakır) dielektrik sabitinde önemli bir artış olduğunu ortaya koyan birçok çalışma vardır (Xu ve ark., 2016; Huang ve ark., 2009; da Silva ve ark., 2014; Rahman ve Chung, 2013). Polimer-metal kompozitler, elektrikli ve optik cihazlar, sensörler, manyetik ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda kullanılan endüstriyel malzemelerdir (Bhavitha ve ark., 2018). Pozitif etkilerinden dolayı polimerlere iletken özelliğe sahip olan grafen, gümüş, bakır ve son zamanlarda da nadir toprak elementleri katkılandırılarak elde edilen polimer kompozit malzemelerin elektriksel özelliklerindeki değişimlerin izlenmesi ile ilgili çalışmalara devam edilmektedir (Torgut ve ark., 2023).

1.5. N-İzopropilakrilamid (NIPA)

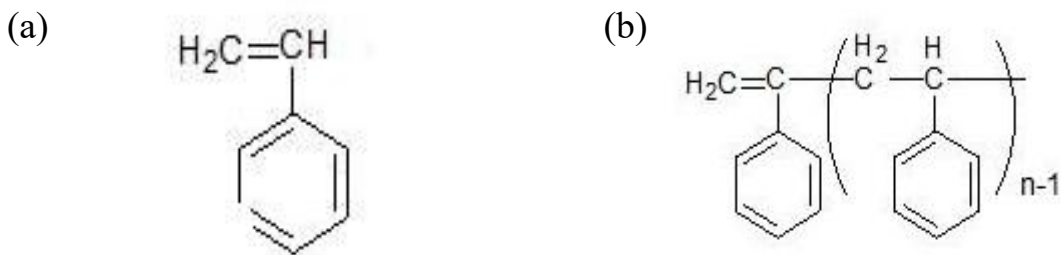
Oda sıcaklığında suda çözünür bir monomer olan N-izopropilakrilamidin molekül formülü $C_6H_{11}NO$ ve mol kütlesi 113.16 g/mol olup molekül yapısı Şekil 1.1 (a)'da verilmiştir. 1950 yılında sıcaklığa duyarlı poli(N-izopropilakrilamid) polimeri sentezlenmiş ve PNIPA, PNIPAM, PNIPAAm, NIPA, PNIPAA veya PNIPAM olmak üzere farklı şekillerde kısaltılır (URL-4, 2024). Poli (N-izopropilakrilamid)'in yapısında hidrofilik amid grupları ve hidrofobik izopropil grupları bulunmaktadır. Bu sayede çapraz bağlı hidrojeller elde edilebilir. Elde edilen hidrojeller kritik çözelti sıcaklığının altında şişerken, kritik çözelti sıcaklığının üzerindeki sıcaklıkta ise hidrojeller büzülür. Serbest radikal polimerizasyonu ile sentezlenebilen sıcaklığa duyarlı P-NIPA hidrojelleri enzim immobilizasyonu, ilaç uygulamalarında, ayırma işlemleri, doku mühendisliği gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (Akın, 2010). Molekül formülü $(C_6H_{11}NO)_n$ olan PNIPA'nın molekül yapısı Şekil 1.1 (b)'de verilmiştir (URL-4, 2024).



Şekil 1.1. N-izopropilakrilamid monomeri (a) ve poli(N-izopropilakrilamid) polimerinin (b) molekül yapıları

1.6. Stiren (St)

Benzen türevi, renksiz, yağlı, kolayca buharlaşabilen ve tatlı bir kokuya sahip olan stirenin molekül formülü C_8H_8 'dir stiren ve polistirenin molekül yapıları Şekil 1.2'de sunulmuştur. Yaklaşık %80'ni etilbenzenin dehidrojenasyonu ile üretilen stiren, toluen ve metanolde de üretilebilir (URL-5, 2024). Çeşitli plastik hammaddelerin üretiminde ve cam elyafı, kauçuk, lateks yapmak amacıyla stiren kullanılmaktadır. Stiren, UV ışınlarına karşı dayanıklı ve yüksek yüzey sertliğine sahiptir. Ayrıca, çizilme direncine karşı dayanıklı olmaları nedeniyle kozmetik alanında da stiren kullanılır. Serbest radikal mekanizması ile stiren monomerlerinin polimerleşmesi sağlanır (İncesu, 2023).



Şekil 1.2. Stiren monomeri (a) ve polistiren polimerinin (b) molekül yapıları

1.7. Literatürde Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler İle İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar

Ali ve ark. (2018), polivinil alkol (PVA) ağırlıkça %4, %12 ve %20 Lantan (La) ilave etmişler saf PVA ve La katkılanırılmış PVA filmlerin yapısal ve optik özelliklerini

incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre lantan:PVA kompozitinin absorpsiyon katsayısı ve küme boyutunun artan tuz konsantrasyonu ile arttığı bulunmuştur. Ayrıca, optik enerji aralığının hafif bir azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir (Ali ve ark., 2018).

Qureshi ve ark. (2008), Al ve Cu metal tozlarıyla doldurulmuş polivinil klorür (PVC) ve polimetil metakrilat (PMMA) bazlı elektriksel olarak iletken kompozit sistemleri ve PVC ve PMMA/dolgu maddelerinin dielektrik ve iletkenlik özelliklerinin bağımlılığı, metal dolgu maddelerinin geniş bir frekans ve hacim oranı aralığında incelemişlerdir. Kompozitlerin dielektrik sabiti değerleri, PVC kompozitlerin Al veya Cu için hacim fraksiyonunda 0.30'luk bir eşiğe sahip olmasına rağmen, Al ve Cu içeren PMMA kompozitlerinin hacim fraksiyonunda 0.10'luk keskin bir artışa sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Al dolgulu kompozitlerin dielektrik sabitlerinin Cu dolgulu kompozitlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Qureshi ve ark., 2008).

Torgut ve ark. (2023), nadir toprak elementlerinden lantanı (La) poli(ϵ -kaprolakton-kopolimer-etilen oksit) poli(ϵ -CL-co-EO) kompozitine farklı ağırlık oranlarında katkılandırmışlardır. Kompozitlerin dielektrik özellikleri ve A.C iletkenlik ölçümleri oda sıcaklığında frekans aralığında (100 Hz-20 kHz) empedans analizörü kullanılarak incelenmiş ve (ϵ -CL-co-EO)/La kompozitlerinin elektriksel özellik sonuçları, artan La içeriği ile dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), tan delta ($\tan \delta$) ve A.C elektrik iletkenliğinin (σ_{ac}) arttığı belirlenmiştir (Torgut ve ark., 2023).

Munawar ve ark. (2022) neodimyum oksit bazlı Nd_2CeMO_3 ($M = Er, Sm, V$) nanoyapıları, süper kapasitör uygulamaları için sentezlemiş ve katkılandırılan metallerin karakterizasyon çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada Nd_2O_3 'ün elektriksel iletkenliği de ortak katkılama ile iyileştirilmiştir. Tüm elektrotlar arasında, Er-Ce ortak katkılı Nd_2O_3 elektrotu, diğer tüm elektrotlardan daha yüksek özgül kapasitansa, enerji yoğunluğuna ve güç yoğunluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, Nd_2CeErO_3 elektrodu bininci döngüye kadar mükemmel döngü kararlılığı sergilediği ve %96 kapasitansı koruduğu belirlenmiştir. Nd_2CeErO_3 elektrotunda plaka benzeri morfolojinin oluşumu, bu elektrotun güçlendirilmiş süper kapasitif davranışına atfedilen iyon taşınması, daha yüksek iletkenlik, hızlı yük transferi ve yüksek elektrokimyasal aktif yüzey alanı için daha geniş bir yüzey alanı sağladığını ifade etmişlerdir (Munawar ve ark., 2022).

Zois ve ark. (2003), disperse demir parçacıkları ile doldurulmuş polimer kompozitlerin dielektrik özellikleri ve morfolojik yapısını incelemişlerdir. Bu kapsamda

poliamid (PA), polietilen (PE), polioksimetilen (POM) veya PE/POM karışımından oluşan polimer matriks bazlı dolgulu malzemeleri araştırmışlardır. PE-Fe, PA-Fe ve POM-Fe kompozitlerinde dolgu parçacıkları polimer matris içinde rastgele dağıtılırken, PE/POM-Fe sisteminde dolgu maddesinin uzaysal dağılımı düzenli olduğu tespit edilmiştir. Dielektrik karakteristikleri konsantrasyon ve frekansa bağımlılığı süzülme teorisi açısından açıklanmış ve süzme eşiği PC değerleri polimer matrisine bağlı olup PE/POM, PE, POM, PA sırasına göre arttığı bildirilmiştir (Zois ve ark., 2003).

Batra ve ark. (2020) çinko oksite (ZnO) nadir toprak elementlerinin katkılандırılmış ve elektriksel özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Bu amaçla nadir toprak elementlerinden terbiyum (Tb) elementini katkılандırılmışlar, saf ve Tb katkılı ZnO nanoparçacıkların yapısal, morfolojik ve elektriksel özelliklerini değerlendirmişlerdir. Tb katkılamanın bir sonucu olarak, altıgen şekilli ZnO nanoçubuklar konik benzeri nanopartiküllere dönüştüğünü, Tb-ZnO nanoparçacıkları, saf ZnO nanoparçacıklarına kıyasla yüksek Curie sıcaklığı (T_c -225 °C) ve gelişmiş dielektrik özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Elektrik iletimi çalışmaları, Tb-doping'in bir sonucu olarak kaçak akımda önemli bir azalma olduğunu göstermiştir. Sentezlenmiş nanoparçacıklara dayalı piezoelektrik nanojeneratörler imal edilmiş ve Tb katkılı ZnO tabanlı nanojeneratörün piezoelektrik çıkış voltajının, saf ZnO tabanlı nanojeneratöre kıyasla dikkate değer bir şekilde (-4 kata kadar) arttığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre esnek substratlar üzerindeki Tb-ZnO:PDMS kompozit filmlerin enerji toplama uygulaması için umut verici olduğunu ifade etmişlerdir (Batra ve ark., 2020).

Lebedev ve ark. (2010), mikro-altı boyutlu nikel tozu ile modifiye edilmiş poliviniliden florür (PVDF) bazlı metal-polimer kompozitlerin dielektrik özellikleri, termal kararlılığı ve alt moleküler yapısını incelemişlerdir. PVDF'nin nikel parçacıkları ile modifikasyonunun, modifiye edilmemiş ile karşılaştırıldığında optimal nikel içeriğine sahip kompozit için hem hacim direncinde artış hem de erime ve ayrışma sıcaklığında artışa yol açtığı belirlenmiştir (Lebedev ve ark., 2010).

Yuehui ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada PS/Ni kompozit mikroküreler hazırlamak için akımsız nikel kaplama (ENP) banyosuna La ilave etmiş PS/Ni kompozitlerinin morfolojisi, yapıları ve elektriksel özellikleri karakterize edildi. Elde edilen sonuçlara göre PS mikrokürelerin yüzeyinde yoğun, kararlı ve düzgün bir Ni-P-La nanokabuğun oluştuğu belirlenmiştir (Yuehui ve ark., 2012).

Faiza ve ark. (2022), farklı konsatrasyonlarda karbon nanotüpler (CNT) ve NiO, CuO gibi metal oksitler (MO) katkılandırılarak güçlendirilmiş polimer kompozitlerin dielektrik özelliklerini incelemişlerdir. Bu amaçla katkılandırılmış polimerik kompozit ince filmler elde edilmiş ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Karbon nanotüp ilavesi kompozitin mekanik mukavemetini arttırırken, metal oksitler ise iletkenliğinin artmasını sağlamıştır. Metal oksit ilavesi ile malzemenin dielektrik davranışını iyileştirilmiştir (Faiza ve ark., 2022).

Yang ve ark. (2016), yüksek manyetik ve dielektrik geçirgenliğe sahip çekirdek/kabuk demir/metal oksit parçacıklarına sahip düşük kayıplı polimer kompozitler elde etmek için basit bir yöntem geliştirmiştir. Sol-jel yöntemi kullanılarak SiO₂ veya TiO₂ tabakasıyla kaplanmış manyetik FeO nanoparçacıklarını elde etmişlerdir. Koruyucu kabuklar sayesinde enerji kaybı azaltılmış ve Fe-O oksidasyonundan dolayı manyetik geçirgenliğin azalma olasılığını önleyen elektriksel tahribat katmanları sağlanmıştır. Böylece, 1 MHz'den 1 GHz'e kadar değişen frekansların geliştirildiği manyeto-dielektrik özelliklere sahip, düşük kayıplı, çekirdek-kabuk Fe@MO₂ parçacık polimer kompozitlerin eldesinin gerçekleştirildiği bildirilmiştir (Yang ve ark., 2016).

Chacko ve ark. (2022), Ho³⁺ ile modifiye edilmiş poliviniliden florür ko-heksafloropropilenin (PVDF-HFP) bağımsız, kendiliğinden polarize filmleri, basit ve uygun bir solvent döküm yöntemi kullanılarak hazırlamışlardır. Nadir toprak hidratlı tuzunun PVDF-HFP'nin elektroaktif çekirdeklenmesi üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak yapılan çalışmada Ho³⁺ içeren kompozit filmlerde dielektrik sabiti değerlerinde mükemmel bir artış gözlemlenmiştir. Nadir toprak hidratlı tuzunun PVDF-HFP kompozit filmlerin optik özellikleri üzerindeki etkisi, hibrit filmlerin doğrudan ve dolaylı bant boşlukları analiz edilerek de incelenmiştir. Ayrıca hazırlanan kompozitlerin ferroelektrik özellikleri de P-E ölçümleri ile analiz edilmiş ve kompozit filmler polarizasyonda dikkate değer bir iyileşme gösterdiği bildirilmiştir (Chacko ve ark., 2022).

Zhai ve ark. (2012), nadir toprak oksitler (NTO = Gd₂O₃, Dy₂O₃, Tm₂O₃) ve akrilik asit (AA), HNBR/çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT)/NTO/AA kompozitleri hazırlamak için hidrojene akrilonitril-bütadien kauçuk (HNBR) kullanmışlar ve HNBR/MWCNT/NTO/AA kompozitlerinin, HNBR/MWCNT kompozitinden daha yüksek geçirgenliğe ve dielektrik kaybına sahip olduğu belirlenmiştir. Dielektrik geçirgenlik analizleri ile HNBR/MWCNT/NTO/AA kompozitlerinin HNBR/MWCNT kompozitinden

daha uzun dielektrik gevşeme süresine ve daha yüksek iletkenliğe sahip olduğunu bildirmişlerdir (Zhai ve ark., 2012).

Yang ve ark. (2020), dopamin (PDA) kaplamalı ve kaplamasız Nd katkılı BaTiO₃ (NBT) fiberleri üretimini ve poli(viniliden florür) (PVDF) matrisine yerleşimini gerçekleştirmiş ve dielektrik sabitini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre enerji yoğunluklarında büyük bir iyileşme olduğu tespit edilmiştir. Dopamin kaplamanın dolgu maddeleri ve matrisin iyi uyumunu ve aynı zamanda elektrik alanının düzgün dağılımını kolaylaştırdığını deneysel sonuçlar ve simülasyon sonuçları ile desteklenmiştir. PVDF/NBT@PDA NF kompozitlerinin daha küçük inorganik dolgu içeriği ile büyük esnekliğini korunduğu, daha iyi kırılma mukavemeti ve boşaltılan enerji yoğunluğunun olduğu ifade edilmiştir (Yang ve ark., 2020).

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Kullanılan Cihazlar ve Malzemeler

Bu çalışmada kopolimer ve Nd ve Y katkılanırılmış kompozit malzemelerin eldesinde N-izopropilakrilamid (NIPA, Ambeed) ve stiren (St, Sigma-Aldrich) monomerleri, 1,4 dioksan (Sigma-Aldrich), 2,2-bis izobütironitril (AIBN, Sigma-Aldrich), aseton (Sigma-Aldrich), hegzan (LiChrosolv), neodimyum nitrat hegzahidrat ($\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ABCR), itriyum nitrat hegzahidrat ($\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Alfa Aesar) kimyasalları kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmalarda kullanılan diğer yardımcı gereçler; ultra saf su cihazı (Millipore, Direct-Q), elektronik terazi (Denver), manyetik karıştırıcı (Velp), etüv (Nüve), değişik büyüklükte mikro pipet, beher, mezür vb. cam malzemelerdir.

2.2. Poli(N-İzopropilakrilamid-Kopolimer-Stiren) Sentezi

N-izopropilakrilamid (NIPA) ve stiren (St) monomerleri kullanılarak poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin sentezi için, 1 g NIPA 2 mL asetonda çözöldü ve üzerine 2 mL 1,4-dioksan eklendi, karıştırıldı. Daha sonra üzerine 1 g St ilave edildi, karıştırıldı ve reaksiyon başlatıcısı olarak 0.02 g AIBN eklendi, karıştırıldı ve çözünme tamamlandıktan sonra oksijenin uzaklaştırılması için 10 dk boyunca çözeltiden argon gazı geçirildi. Polimerizasyon işlemi kapaklı deney tüpünde ve reaksiyon yaklaşık 70 °C sıcaklığa ayarlanan yağ banyosunda gerçekleştirildi. Polimerizasyon reaksiyonuna 24 saat süreyle devam edildi ve kıvamlaşan polimer hegzanda çöktüröldü ve süzöldü. Oda sıcaklığında bir süre bekletilen polimer 24 saat süreyle 40 °C'de etüvde kurutuldu ve poli(NIPA-ko-St) kopolimeri elde edildi.

2.3. Poli(N-İzopropilakrilamid-Kopolimer-Stiren)-Neodimyum ve Poli(N-İzopropilakrilamid-Kopolimer-Stiren)-İtriyum Kompozit Malzemelerin Eldesi

Çözelti karıştırma tekniğı ile poli(NIPA-ko-St)-Nd ve poli(NIPA-ko-St)-Y kompozitleri sentezlendi. 0.5'er g poli(NIPA-ko-St) kopolimerleri ayrı ayrı 20 mL diklorometan içerisinde çözöldü. Çözünme işlemi tamamlandıktan sonra ağırlıkça %10

ve %20 oranlarında Nd ve Y kopolimer çözeltilerine eklendi ve ultrasonik su banyosunda yaklaşık 30 dk süreyle homojen şekilde dağılmaları sağlandı. Elde edilen çözeltiler hegzanda çöktürüldü, oda sıcaklığında bir süre bekletildikten sonra 40°C'de etüvde 24 saat süreyle kurutuldu ve böylece poli(NIPA-ko-St)-%10Nd, poli(NIPA-ko-St)-%20Nd, poli(NIPA-ko-St)-%10 Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitleri elde edildi.

2.4. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu

Saf poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarda Nd ve Y katkılanmış kompozit malzemelerin karakterizasyonu için fourier transform kızılötesi spektrofotometre cihazı (FTIR, JASCO 6700, Japonya), X-ışını difraktometresi (XRD, Rigaku miniflex-600), boncukların morfolojik yapısı ve element dağılımları taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı spektroskopisi (SEM-EDS, Hitachi S-3500, Japonya) ile gerçekleştirildi. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve Nd ve Y katkılanmış polimer matrisli kompozitlerin 100 Hz-20 kHz frekans aralığındaki dielektrik özellikleri dielektrik spektroskopisi ile analiz edildi. Dielektrik ölçümler Novocontrol Technologies (Alpha-AN) empedans analizörü kullanılarak oda sıcaklığında (25 °C) ölçüldü. Kompozitlerin gerçek kısmı (geçirgenlik) ϵ' , sanal kısmı (dielektrik kayıp) ϵ'' ve elektriksel iletkenliği (σ) sırasıyla aşağıdaki denklemlerle tanımlandı.

$$\epsilon' = \frac{C_p d}{\epsilon_0 A}$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \times DF$$

$$\sigma = \frac{Gd}{A}$$

C_p : Kapasitans

D : Numunenin kalınlığı

A : Numunenin etkin alanı

ϵ_0 : Vakumun geçirgenliği (8.854×10^{-12} F/m)

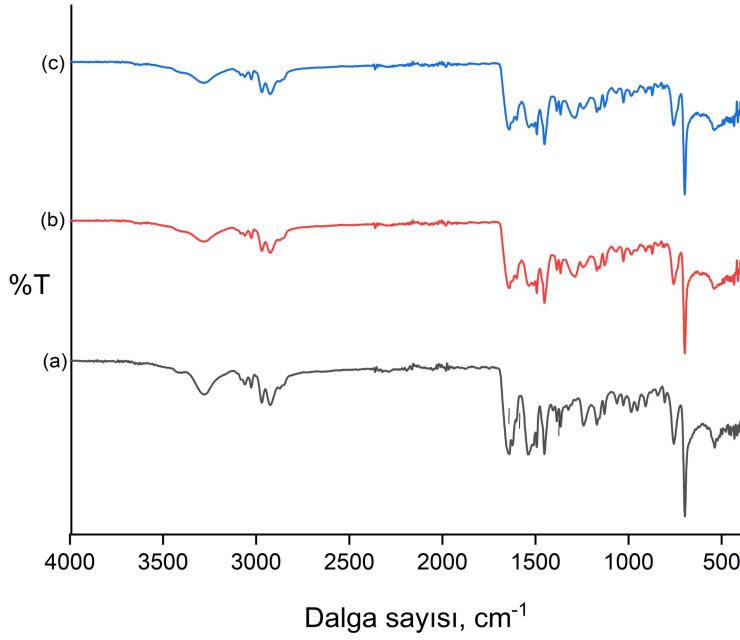
G : İletkenlik

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada poli(NIPA-ko-St) kopolimerin sentezlenmesi ve sentezlenen kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarda Nd ve Y katkılandırılarak elde edilen yeni kompozit malzemelerin eldesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda saf kopolimer ve yeni kompozit malzemelerin FTIR, SEM-EDS ve XRD cihazları ile karakterizasyon ve yapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve ayrıca kopolimer ve kompozit malzemelerin dielektrik spektroskopisi cihazı kullanılarak elektriksel özellikleri değerlendirilmiştir.

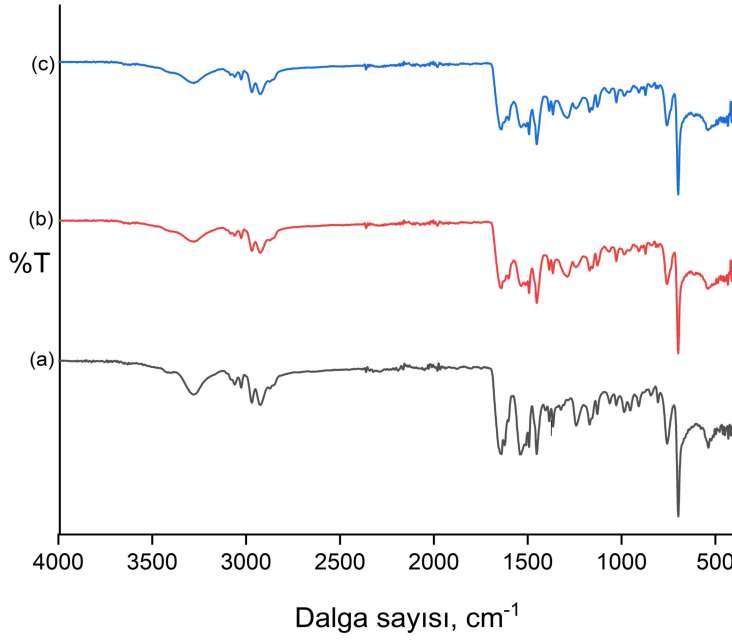
3.1. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin FTIR Analizleri

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Nd katkılandırılarak elde edilen kompozitlerin FTIR ile yapı analizleri gerçekleştirilmiş ve ölçümler $400-4000\text{ cm}^{-1}$ arasında kaydedilmiştir. Şekil 3.1, poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitlerinin FTIR eğrilerini göstermektedir. FTIR spektrumunda $2979-2861\text{ cm}^{-1}$ izopropil grubundaki CH bantları gösterir. 1681 cm^{-1} 'deki pik NIPA'daki amid gruplarının karbonil grubuyla ilişkilidir (Torgut, 2019). Spektrumda $3080-3020\text{ cm}^{-1}$ 'de stiren birimlerine ait aromatik =C-H gerilme titreşimlerini, 1600 cm^{-1} 'deki band aromatik C=C gerilme titreşimini göstermektedir. 1500 cm^{-1} ve 1450 cm^{-1} 'de halka gerilmesine ait bandlardır. 760 cm^{-1} ve 700 cm^{-1} 'deki iki tane band aromatik halkadaki =C-H düzlem dışı eğilme titreşimlerine ait karakteristik piklerdir. 2922 cm^{-1} civarındaki pikler stiren ana zincirdeki alifatik C-H gerilme titreşimlerine aittir. Spektrumlarda görüldüğü gibi, poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ile Nd katkılandırılmış kompozitlerin FTIR spektrumları temel olarak aynıdır. Bu durum polimer ile Nd arasında fiziksel etkileşim olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.1. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a) poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine (c) ait FTIR spektrumları

Benzer şekilde poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Y katkılandırılarak elde edilen kompozitlerin FTIR ile yapı analizleri gerçekleştirilmiş ve ölçümler 400-4000 cm⁻¹ arasında kaydedilmiştir. Şekil 3.2 poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitlerinin FTIR eğrilerini göstermektedir. Neodimyum katkılandırılmış kompozit malzemelerde olduğu gibi benzer spektrumlar elde edilmiştir. Spektrumlarda görüldüğü gibi, poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ile Y katkılandırılmış kompozitlerin FTIR spektrumları temel olarak aynıdır. Bu durum polimer ile Y arasında fiziksel etkileşim olduğunu göstermektedir.

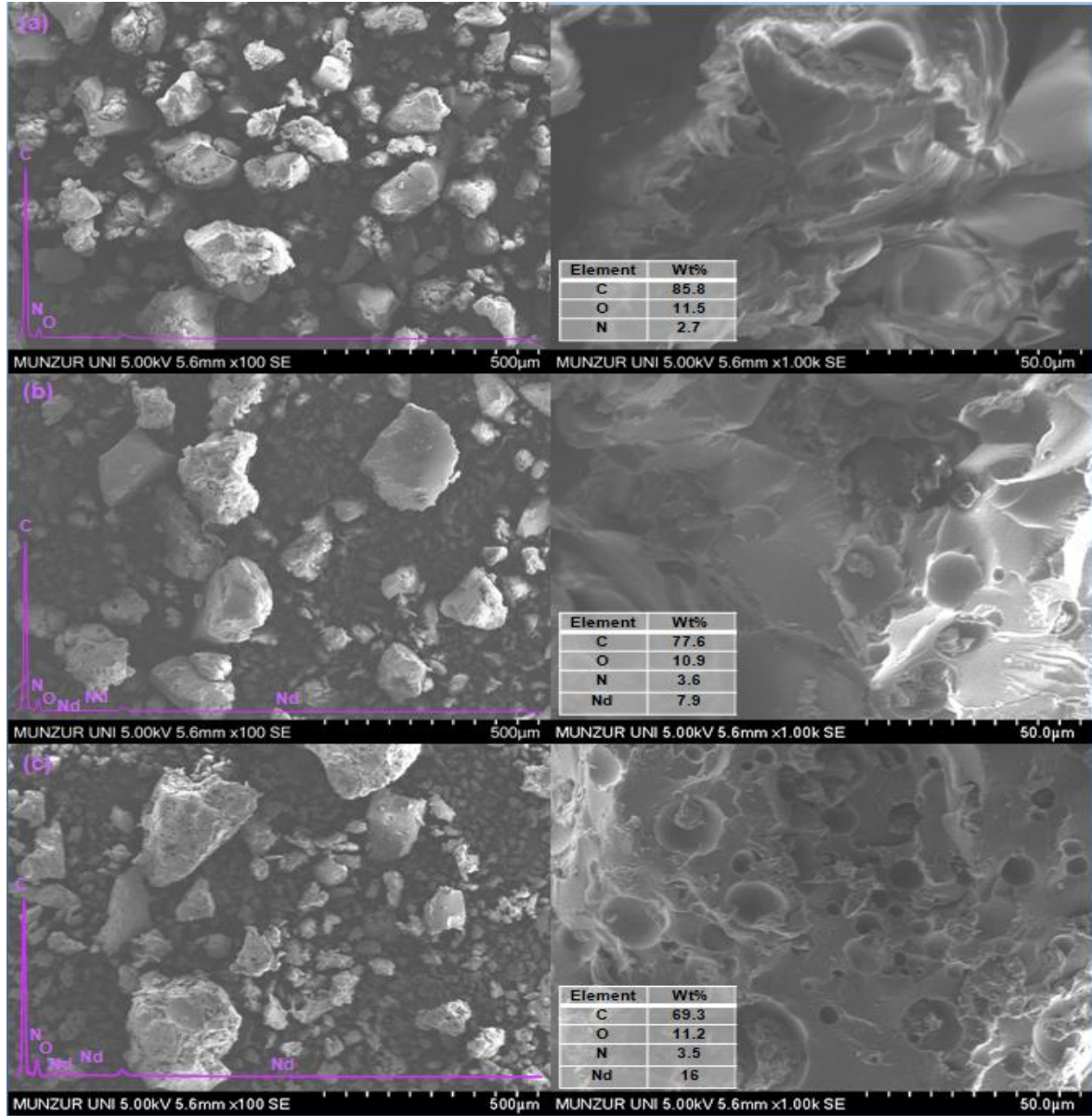


Şekil 3.2. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a) poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine (c) ait FTIR spektrumları

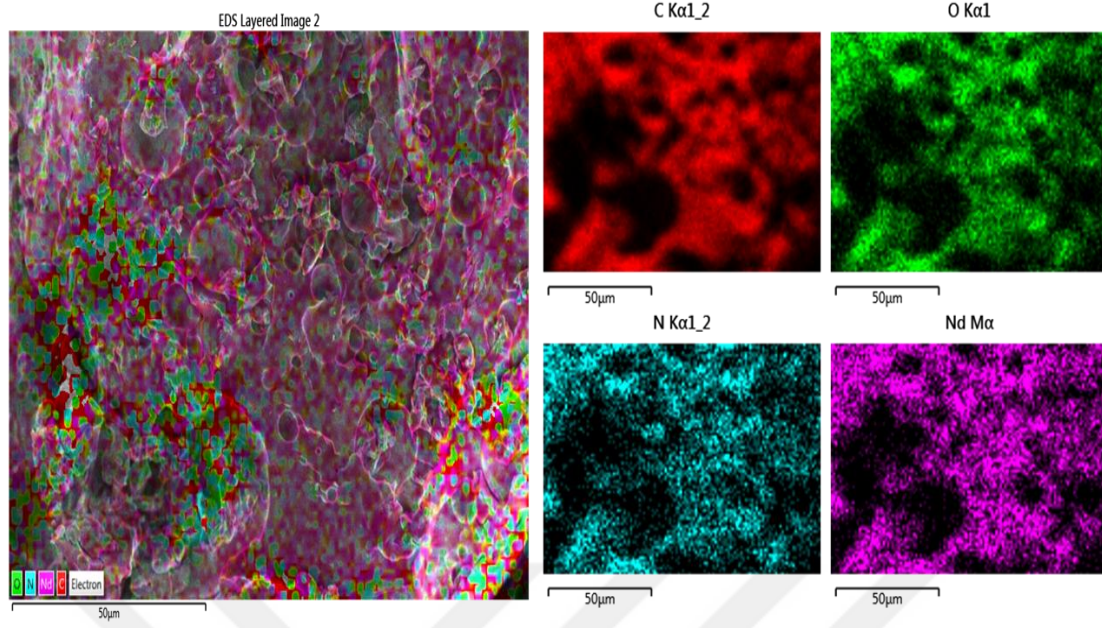
3.2. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin SEM-EDX Analizleri

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Nd katkılanarak elde edilen kompozitlerin SEM cihazı ile farklı büyüklüklerde yüzey morfolojileri görüntülendi ve bu görüntüler Şekil 3.3'te sunuldu. SEM görüntülerine göre poli(NIPA-ko-St) kopolimerine artan oranda Nd ilavesiyle yüzeyde artan oranda Nd biriktiği, homojen dağılım olduğu ve ayrıca, kompozit malzemelerin yüzeylerinin saf kopolimere göre pürüzlendikleri gözlemlenmiştir. Şekil 3.3 (a)'da sunulan EDS analiz sonuçlarına göre saf poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin element ağırlıkça (wt) oranları C için %85.8, O için %11.5 ve N için %2.7 olarak belirlenmiştir. Poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompozit malzemenin element ağırlıkça oranları C için %77.6, O için %10.9, N için %3.6, Nd için %7.9 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.3 (b)). Poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozit malzemenin element ağırlıkça oranları C için %69.3, O için %11.2, N için %3.5, Nd için %16 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.3 (c)). EDX analiz sonuçlarına göre Nd miktarının artmasıyla beraber kompozit malzemelerin yüzeyinde Nd miktarı da orantılı olarak

artmıştır. Poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitinin EDS eşleşme görüntülerine göre Nd'un poli(NIPA-ko-St) kopolimerine başarıyla bağlandığı doğrulanmıştır (Şekil 3.4).

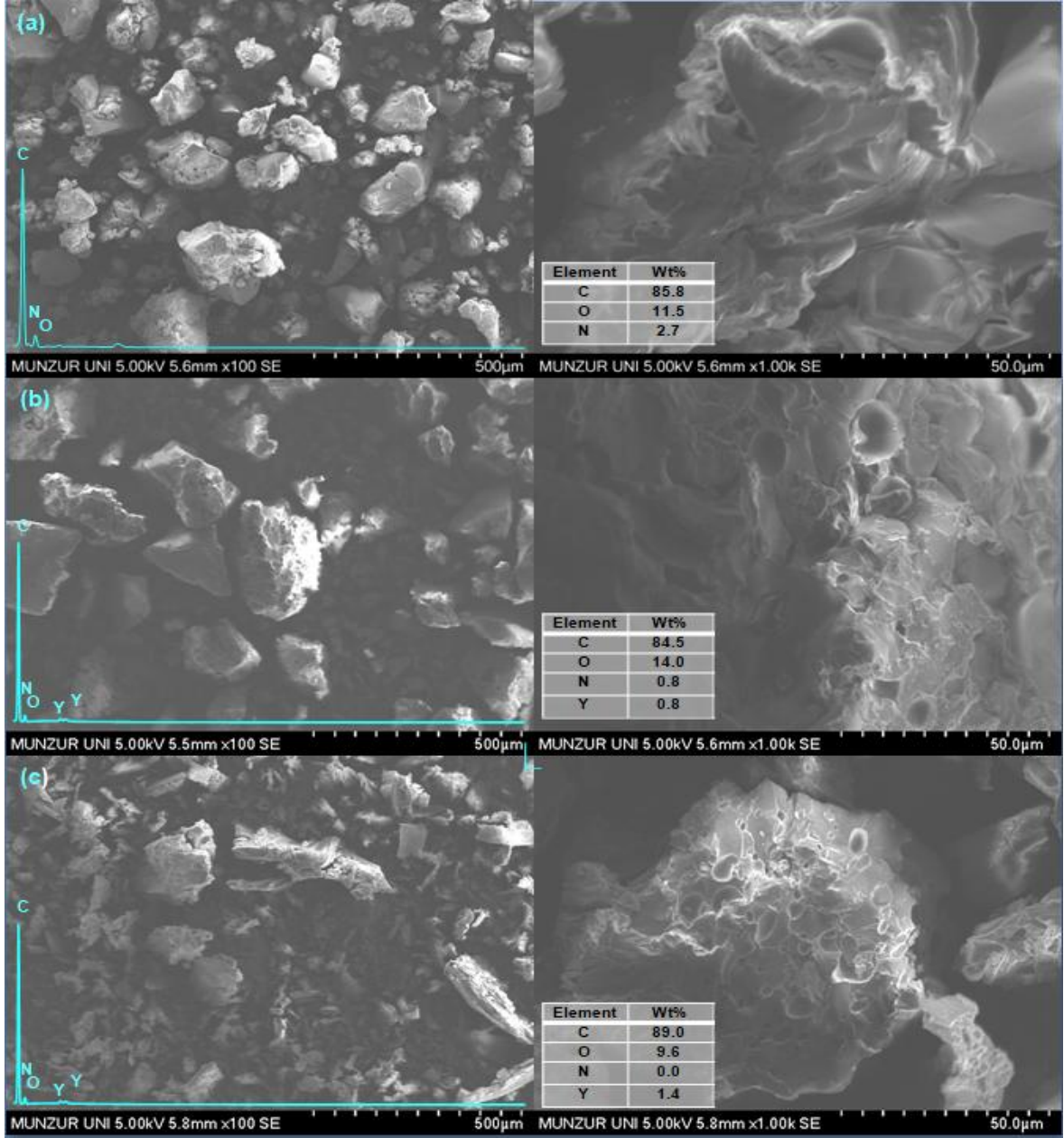


Şekil 3.3. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a) poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine (c) ait SEM görüntüleri ve EDS spektrumları

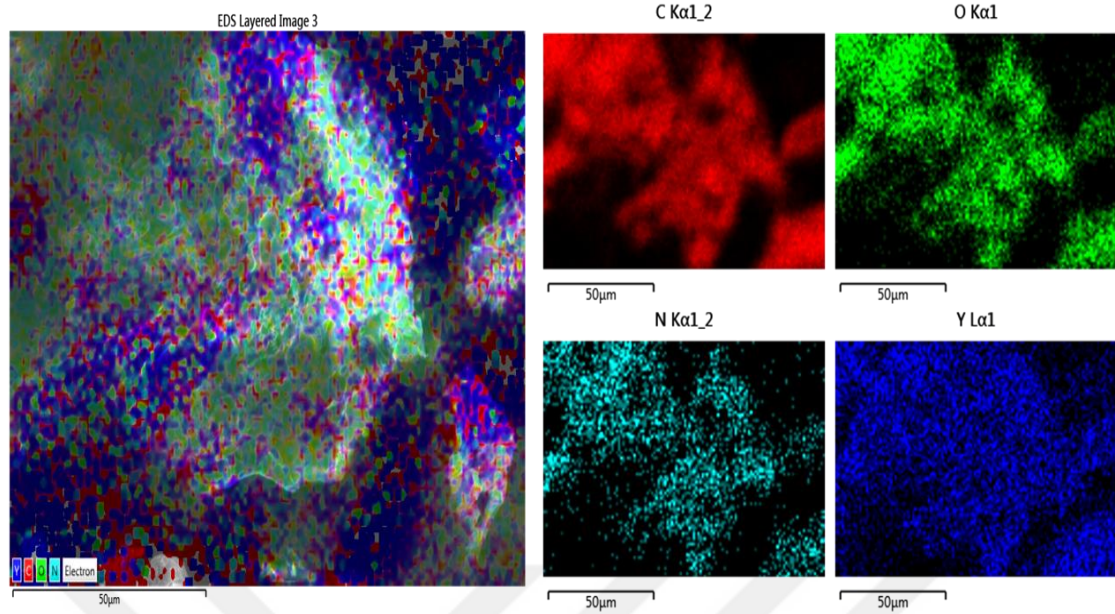


Şekil 3.4. Poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine ait EDS eşleme görüntüleri

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Y katkılandırılarak elde edilen kompozitlerin SEM cihazı ile farklı büyüklüklerde yüzey morfolojileri görüntülendi ve bu görüntüler Şekil 3.5'te sunuldu. SEM görüntülerine göre poli(NIPA-ko-St) kopolimerine artan oranda Y ilavesiyle yüzeyde artan oranda Y biriktiği, homojen dağılım olduğu ve ayrıca, kompozit malzemelerin yüzeylerinin saf kopolimere göre pürüzlendikleri gözlemlenmiştir. Şekil 3.5 (a)'da sunulan EDS analiz sonuçlarına göre saf poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin element ağırlıkça (wt) oranları C için %85.8, O için %11.5 ve N için %2.7 olarak belirlenmiştir. Poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompozit malzemenin element ağırlıkça oranları C için %84.5, O için %14.0, N için %0.8, Y için %0.8 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.5 (b)). %20 Y katkılandırılarak elde edilen poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozit malzemenin element ağırlıkça oranları C için %89.0, O için %9.8, N için %0.0, Y için %1.4 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.5 (c)). EDX analiz sonuçlarına göre Y miktarının artmasıyla beraber kompozit malzemelerin yüzeyinde Y miktarı da orantılı olarak artmıştır. Poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin EDS eşleşme görüntülerine göre Y'un poli(NIPA-ko-St) kopolimerine başarıyla bağlandığı doğrulanmıştır (Şekil 3.6).



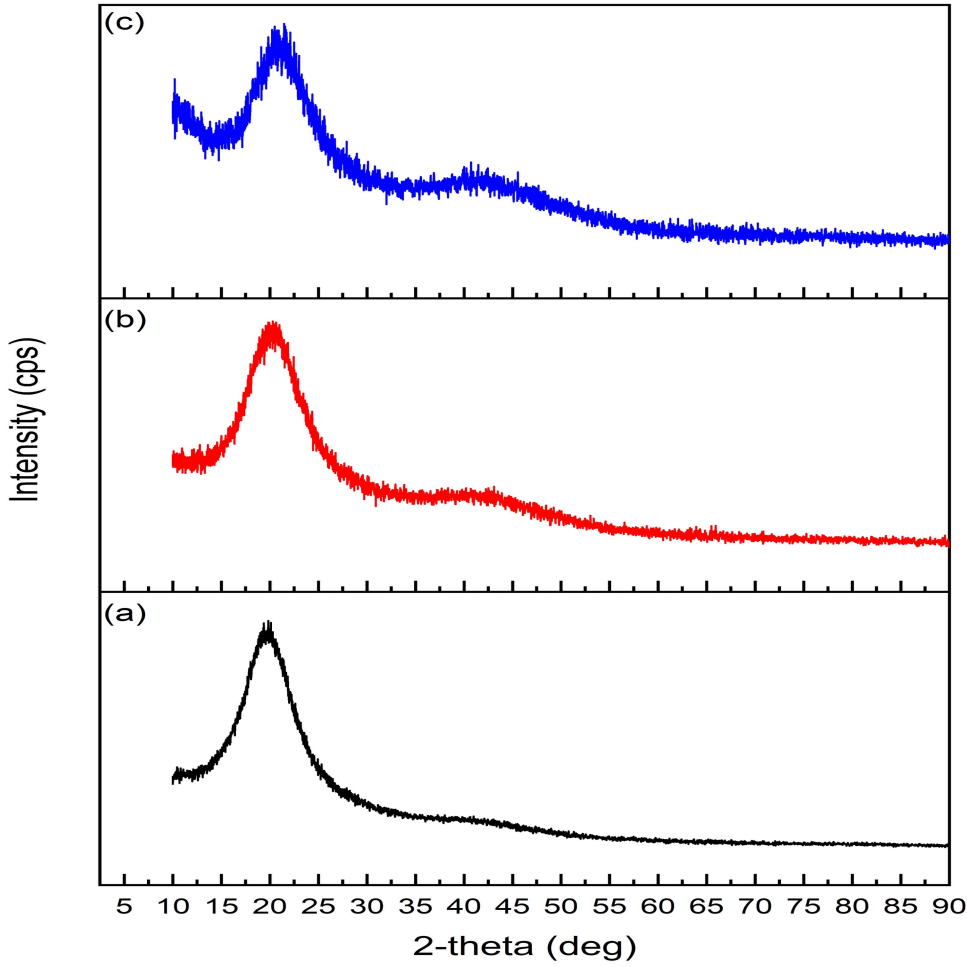
Şekil 3.5. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a), poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine (c) ait SEM görüntüleri ve EDS spektrumları



Şekil 3.6. Poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine ait EDS eşleme görüntüleri

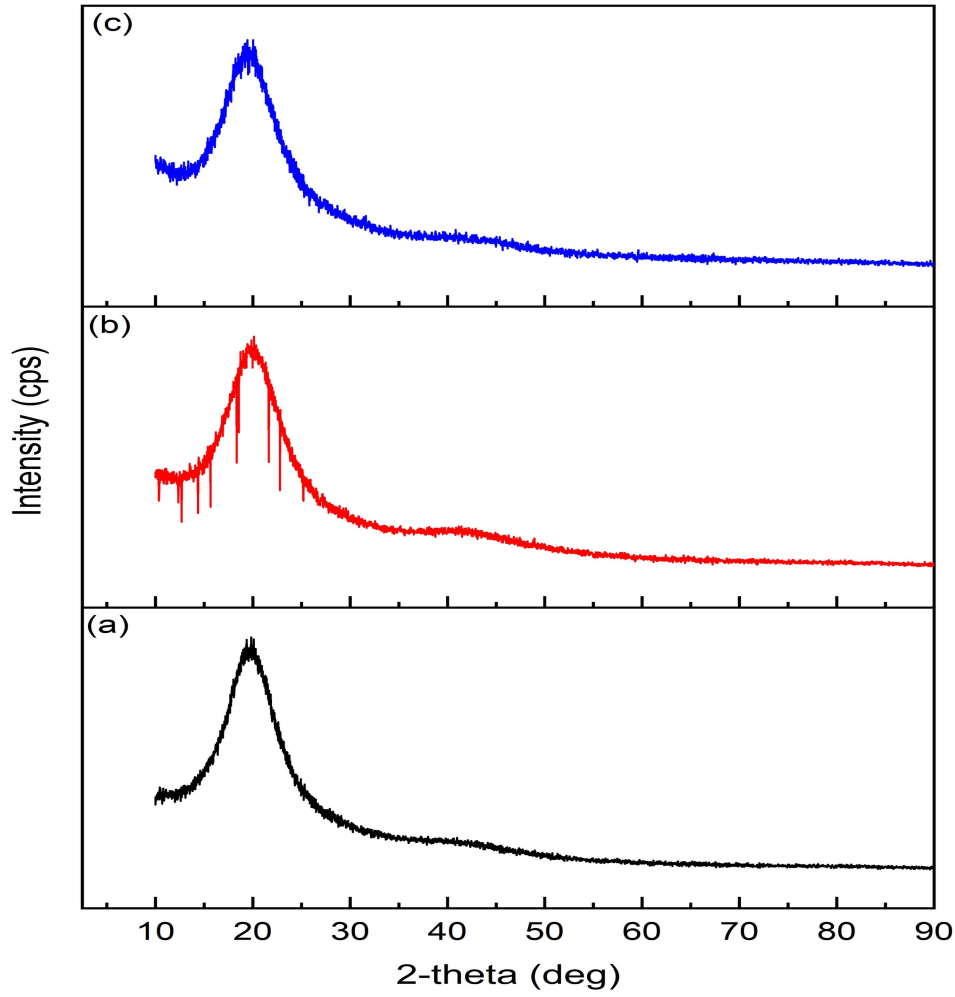
3.3. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin XRD Analizleri

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Nd katkılanarak elde edilen kompozitlerin kristallik özellikleri XRD cihazı ile ölçüldü ve bu görüntüler Şekil 3.7’de sunuldu. Poli(NIPA-ko-St) kopolimerine farklı oranlarda Nd ilave edilmesiyle elde edilen poli(NIPA-ko-St)-%10Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitlerinin XRD grafiğinde 43.5° civarında yeni bir pik oluşumu gözlemlenmiştir. Poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin pik şiddeti yüksek iken Nd miktarının artmasıyla birlikte pik şiddetlerinde azalma gözlemlenmiş ve poli(NIPA-ko-St) kopolimerine Nd’un başarılı şekilde katkılanırıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, amorf poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin 43.5° civarında FWHM değeri 13.2, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti için FWHM değeri 11.9° , poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompoziti için FWHM değeri 8.4° ’dir. Neodimyum ilavesiyle FWHM değerinin azalmaya başladığı söylenebilir, bu da kristallikte hafif bir artışa işaret etmektedir.



Şekil 3.7. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a), poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitine (c) ait XRD analizleri

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Y katkılandırılarak elde edilen kompozitlerin kristallik özellikleri XRD cihazı ile ölçüldü ve bu görüntüler Şekil 3.8’de sunuldu. Amorf poli(NIPA-ko-St) kopolimerine farklı oranlarda Y ilave edilmesiyle elde edilen poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitlerinin XRD grafiğinde belirgin pik değişimi gözlemlenmemiştir. Ancak poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin pik şiddeti yüksek iken Y miktarının artmasıyla birlikte pik şiddetlerinde azalma gözlemlenmiş ve böylece poli(NIPA-ko-St) kopolimerine Y’un başarılı şekilde katkılandırıldığı ifade edilebilir ve kristallığı küçüktür.



Şekil 3.8. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri (a), poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti (b) ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitine (c) ait XRD analizleri

3.4. Poli(NIPA-ko-St) Kopolimeri, Poli(NIPA-ko-St)-Nd ve Poli(NIPA-ko-St)-Y Kompozit Malzemelerin Elektriksel Özellikleri

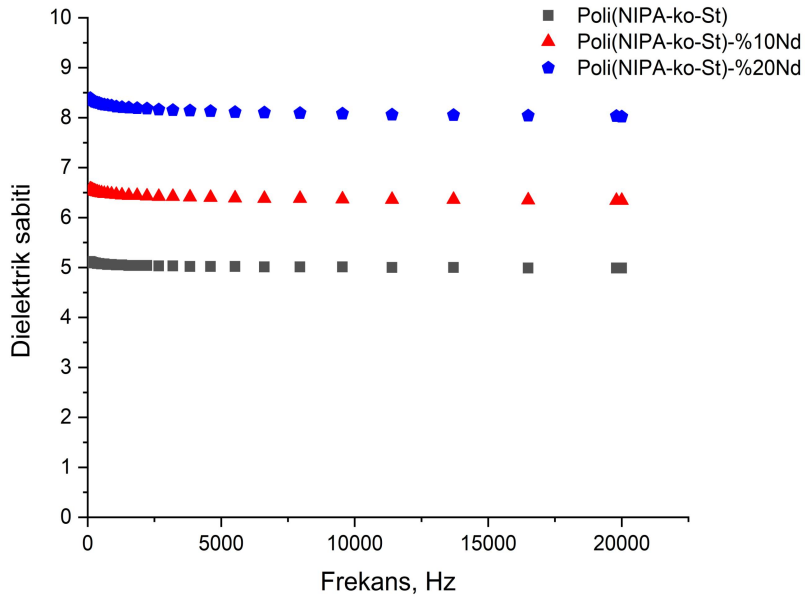
Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Nd katkılandırılarak elde edilen kompozitlerin frekansa bağlı dielektrik sabiti (ϵ') grafiği Şekil 3.9'da verilmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi poli(NIPA-ko-St) kopolimer ve Nd katkılı kompozitlerin ϵ' değerleri frekansın 100 Hz'den 10 kHz'e artmasıyla azalmış, daha yüksek frekanslarda ise sabit kalmıştır. Düzenli olarak değişen bir elektrik alanında oluşan polarizasyon polimerlerin dielektrik sabitinin değişmesine neden olur. ϵ' değerleri, düşük frekanslarda elektronik, atomik, iyonik ve ara yüzey polarizasyonundan dolayı daha

yüksek olup, frekans arttıkça azalmıştır (Heidari ve ark., 2017). Yüksek frekanslarda, yalnızca elektriksel polarizasyon meydana gelir, bu nedenle dipol sayısı daha azdır ve ϵ' küçüktür (Torgut, 2019). Saf poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için dielektrik sabiti, 100 Hz'de 5.12 iken 10 kHz'de ve 20 kHz'de sırasıyla 5.05 ve 4.99'dur. Aynı zamanda Şekil 3.9 incelendiğinde Nd katkı miktarının artmasıyla saf polimerin ϵ' değerinin arttığı görülmektedir. Ağırlıkça %20 Nd yüklemesi, sabit bir frekansta Nd içermeyen saf poli(NIPA-ko-St) kopolimere göre ϵ' değerlerini yaklaşık 1.7 kat arttırmıştır. ϵ' 'daki bu artış, Nd parçacıkları ile polimer molekülleri arasındaki ara yüzde meydana gelen ara yüzey polarizasyonuna bağlanabilir (Kratky ve ark., 2012; Sahal ve ark., 2022). Polimer içinde iyi dağılmış dolgu maddesi daha yüksek ϵ' değerleri sağlamaktadır.

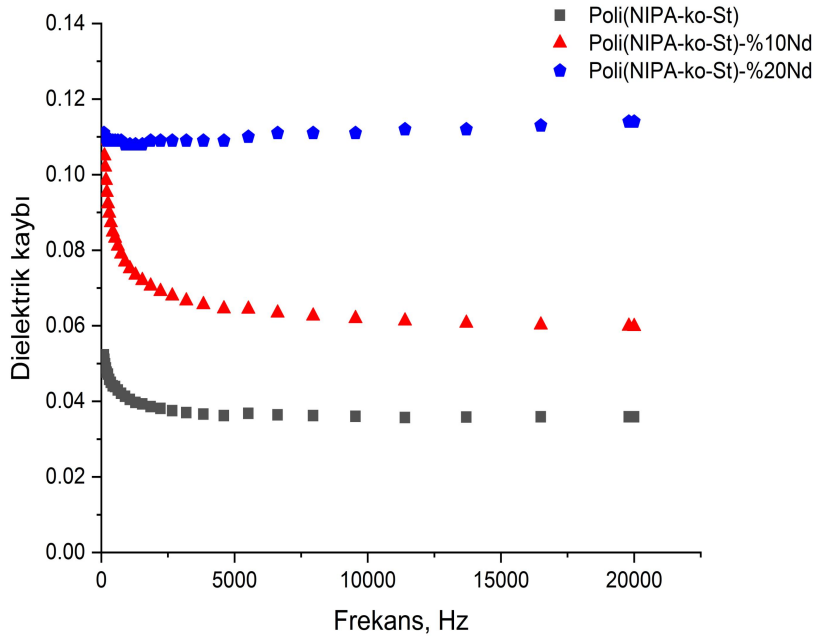
Şekil 3.10'da poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Nd katkılanarak elde edilen kompozitler için dielektrik kayıp faktörünün frekansla değişim grafiği görülmektedir. Şekil 3.10 incelendiğinde, saf poli(NIPA-ko-St) ve Nd ile hazırlanan kompozitleri için dielektrik kayıp değerlerinin artan frekansla azaldığı açıktır. Bu durum düşük frekanslarda malzemeler içindeki serbest yük hareketine bağlanabilir. Yüksek frekanslarda ise ϵ'' değerlerinin sabit kaldığı görülmektedir. Saf poli(NIPA-ko-St) için dielektrik kayıp, 100 Hz'de 0.05 iken 10 kHz'de 0.04'dür. Dielektrik sabitine benzer şekilde Nd katkısı ϵ'' değerlerini de arttırmıştır.

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Nd katkılanarak elde edilen kompozitlerin elektriksel iletkenliği frekansa bağlı olarak incelenmiş ve Şekil 3.11'de verilmiştir. Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde elektriksel iletkenliğin saf poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve poli(NIPA-ko-St)-%10Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitleri için artan frekansla artmıştır. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için, 100 Hz ve 10 kHz'de iletkenlik değerleri sırasıyla 2.29×10^{-10} S/cm ve 2.41×10^{-9} S/cm olarak bulunmuştur. İletkenlikteki bu artış, yük taşıyıcılarının düşük ve yüksek frekanslardaki farklı davranışlarından kaynaklanıyor olabilir. Düşük frekanslarda birden fazla yük taşıyıcının bir segmentten diğerine geçişi tünelleme yoluyla sağlanır ve az miktarda elektrik sağlanır. Daha yüksek frekanslarda, daha fazla miktarda yük taşıyıcının tünellenmesi nedeniyle daha fazla iletkenlik vardır (Gurler ve Torgut, 2021). Polimer içerisinde iyi dağılmış Nd molekülleri polimere daha yüksek bir iletkenlik kazandırmıştır. Poli(NIPA-ko-St)-Nd kompozitlerinin iletkenliğinin ağırlıkça daha yüksek Nd içerenlerde daha yüksek olduğu bulunmuştur. Oda sıcaklığında 1000 Hz'de poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için iletkenlik değeri 2.41×10^{-9} S/cm iken,

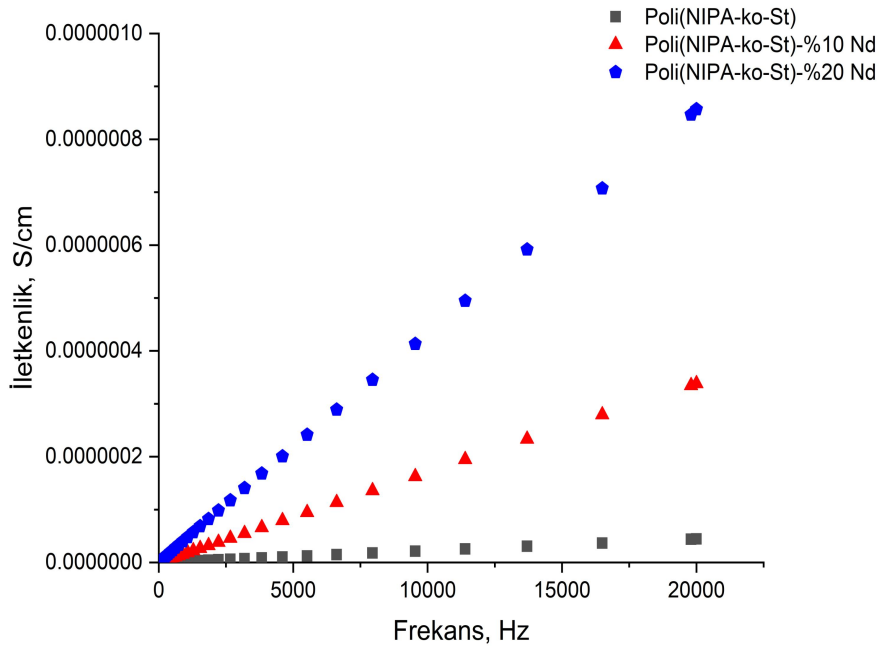
poli(NIPA-ko-St)-%10Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd katkılı kompozitler için sırasıyla, 1.86×10^{-8} S/cm ve 4.78×10^{-8} S/cm olarak bulunmuştur. Bu artışa sebep olarak poli(NIPA-ko-St) ve Nd molekülleri arasındaki elektronik ve dipol polarizasyonunu artıran iyi arayüz polarizasyonu gösterilebilir (Torgut ve Gurler, 2021).



Şekil 3.9. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitinin dielektrik sabitinin frekansa bağımlılığı



Şekil 3.10. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitinin dielektrik kaybının frekansa bağımlılığı



Şekil 3.11. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitinin elektriksel iletkenliğinin frekansa bağımlılığı

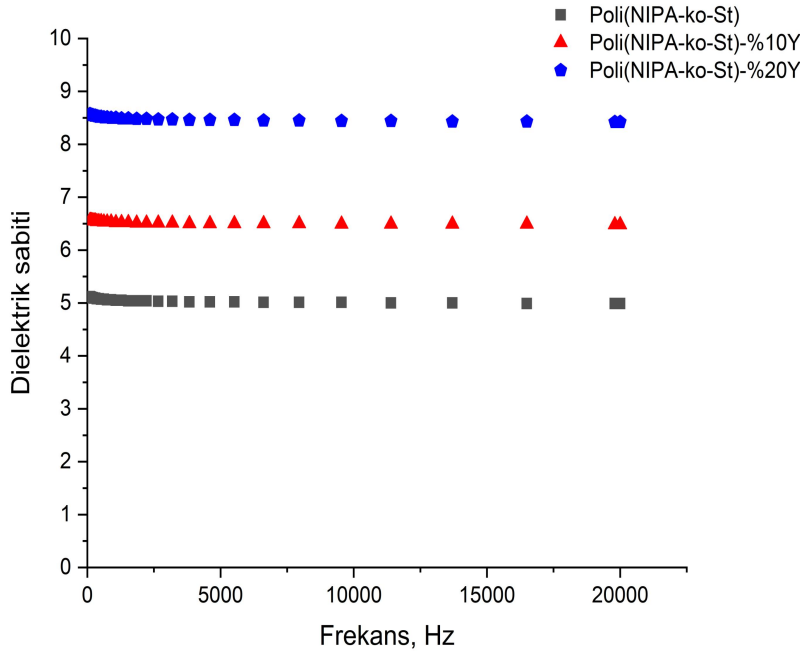
Tablo 3.1’de poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10 Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitlerinin oda sıcaklığında elektriksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10 Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitlerinin oda sıcaklığında elektriksel özellikleri

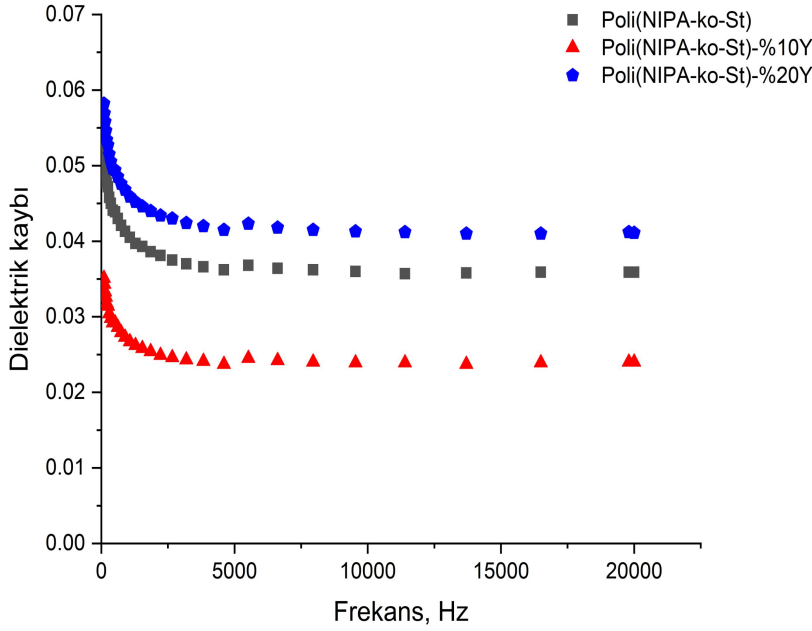
Kopolimer ve Kompozitler	Dielektrik sabiti (ϵ') 100Hz	Dielektrik sabiti (ϵ') 10 kHz	Dielektrik kayıp (ϵ'') 100 Hz	Dielektrik kayıp (ϵ'') 10 kHz	İletkenlik (σ_{ac}) 100 Hz	İletkenlik (σ_{ac}) 10 kHz
Poli(NIPA-ko-St)	5.12	5.05	0.05	0.04	2.29×10^{-10}	2.41×10^{-9}
Poli(NIPA-ko-St)-%10Nd	6.57	6.46	0.10	0.07	1.79×10^{-9}	1.86×10^{-8}
Poli(NIPA-ko-St)-%20Nd	8.39	8.22	0.15	0.11	4.62×10^{-9}	4.78×10^{-8}

Şekil 3.12, oda sıcaklığında saf poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Y katkılandırılarak elde edilen kompozitlerin dielektrik sabitinin (ϵ') frekansa bağımlılığını göstermektedir. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi her numune için dielektrik sabiti artan frekansla birlikte kademeli olarak azalmıştır. Bu olgu, elektrik alanı uygulandığında numunelerdeki farklı polarizasyon mekanizmalarının frekansa bağımlılığıyla açıklanabilir (Xu ve ark., 2016; Wang ve ark., 2015). Tüm numuneler için dielektrik sabiti, dipol yönelimi ve ara yüzey polarizasyonunun etkisinden kaynaklanmaktadır (Torgut ve Gürler, 2021). Yüksek frekanslarda, uygulanan elektrik alanın frekansı gevşeme frekansını aştığı için dipol hareketliliği kısıtlanır. Ayrıca ara yüzey polarizasyonu zayıflayarak dielektrik sabitinin azalmasına neden olur. Şekil 3.12’de dielektrik sabitinin 5 kHz’den sonra sabit kaldığı da gözlenmiştir. Çünkü bu frekanslarda serbest taşıyıcıların hareketinin polimer boyunca sabit olduğu varsayılır. Ayrıca kompozitlerde Y içeriğiyle birlikte ϵ' değerinde kademeli bir artış gözlenmiştir. Poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin dielektrik sabiti 100 Hz’de 8.50’e ulaşmıştır. Bu değer, poli(NIPA-ko-St) saf kopolimerinin ϵ' değerinden yaklaşık 1.7 kat daha yüksektir. Görüldüğü gibi dolgu maddelerinin polimer içerisindeki ağırlık oranları düşük olsa bile yüksek dielektrik sabitlerine ulaşmak mümkün olmuştur. 10 kHz’de, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompozitinin ϵ' ’si 6.52 iken poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin ϵ' ’si 8.50’dir. Düşük dolgu maddesi içeriğinin avantajı, polimerin pratik uygulamalar için esnekliğini koruyabilmesidir.

Şekil 3.13, saf poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Y katkılandırılarak elde edilen kompozitlerinin dielektrik kaybını (ϵ'') frekansla değişimini göstermektedir. Şekil 3.13’de görüldüğü gibi, örneklerin ϵ'' değerleri frekansın 6 kHz’e kadar artmasıyla azalırken ve incelenen tüm kompozitler için yüksek frekanslarda tam olarak frekansa bağımlı olmadığı görülmüştür. Düşük frekansta daha yüksek ϵ'' , polimer içindeki serbest yük hareketinden kaynaklanmaktadır (Algethami ve ark., 2022). Ayrıca, düşük frekanslardaki yüksek ϵ'' değerleri, dipollerin değişmeden önce uygulanan elektrik alanlarıyla etkileşime girmesi için yeterli zamanın varlığına bağlıdır. Daha yüksek frekanslarda, kendilerine sunulan sürenin kısa olması nedeniyle ϵ'' azalır (Rajeh ve ark., 2020). Ayrıca heterojen bir sistemdeki ara yüzey polarizasyon mekanizmalarına atfedilen kompozit içerisinde dolgu maddesi miktarındaki artışla ϵ'' artmıştır. 1000 Hz frekansta, saf poli(NIPA-ko-St) polimeri için dielektrik kayıp 0.040 iken, poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20 Y kompozitlerinin ϵ'' değerleri sırasıyla 0.042 ve 0.045 olarak bulunmuştur. Bu değerler Y katkısının kompozitlerin dielektrik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



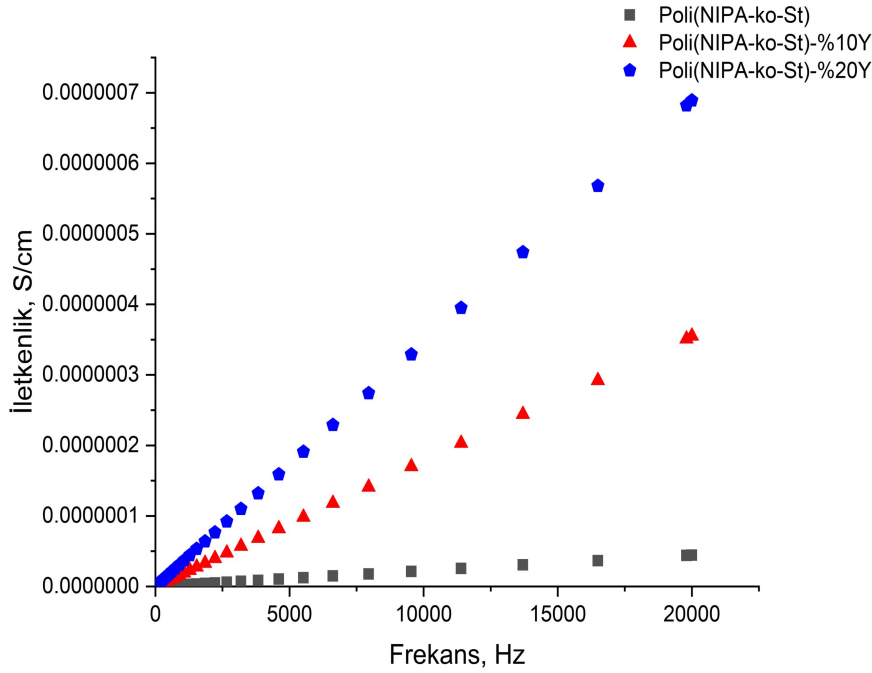
Şekil 3.12. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin dielektrik sabitinin frekansa bağımlılığı



Şekil 3.13. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin dielektrik kaybının frekansa bağımlılığı

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve bu kopolimere ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında Y katkılanarak elde edilen kompozitlerinin iletkenliklerinin frekansla değişim grafiği Şekil 3.14’de verilmiştir. Frekansın artmasıyla tüm örnekler için elektriksel iletkenliğin (σ_{ac}) doğrusal olarak arttığı görülmüştür. İletkenlik değeri 100 Hz, 1000 Hz ve 20 kHz’de saf polimer için sırasıyla 2.29×10^{-10} S/cm’den 2.41×10^{-9} S/cm ve 4.44×10^{-8} S/cm’ye yükselmiştir. Daha düşük frekanslarda, ara yüzey empedansı veya uzay yükünün polarizasyonu nedeniyle iletkenlik daha düşüktür. Ayrıca şekilde kompozit içerisinde artan Y parçacıkları kompozitlerin iletkenliğini arttırmıştır. 100 Hz frekansında, Y miktarı %10’dan %20’ye çıkarıldığında poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitlerin elektriksel iletkenliği 1.81×10^{-9} S/cm’den 3.47×10^{-9} S/cm’ye yükselmiştir. Düşük Y miktarlarında bile iletkenlikteki bu artış gelişmiş ara yüzey polarizasyonuna veya Maxwell-Wagner-Sillars etkisine atfedilir (Deepa ve ark., 2013; Singh ve ark., 2003). Bu etki, ara yüzeylerde yük birikmesi nedeniyle farklı iletkenliğe sahip fazlardan oluşan heterojen yüzeylerde meydana gelir. İtiryum içeriği düşük olduğunda metal parçacıkları aralarında hiçbir etkileşim olmadan iyi bir şekilde ayrılır. İtiryum parçacıkları iyi bir şekilde ayrıldığı için uygulanan elektrik alanı altında aralarında

bir bağ oluşmaz ve dolayısıyla elektronların komşu taneciklere sıçrama olasılığı çok düşük olacaktır (Deepa ve ark., 2013). İtiryum içeriği arttıkça birim hacim başına parçacık sayısı ve ara yüzey alanı artarken parçacıklar arası mesafe (IPD) azalır. Bu, parçacıklarla ilişkili ortalama polarizasyonu ve bitişik taneler arasındaki bağlantıyı artırır ve kompozitlerin iletkenliğine daha fazla katkıda bulunur (Deepa ve ark., 2013; Deepa ve ark., 2007).



Şekil 3.14. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitinin elektriksel iletkenliğinin frekansa bağımlılığı

Tablo 3.2’de poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10 Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitlerinin oda sıcaklığında elektriksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri, poli(NIPA-ko-St)-%10 Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitlerinin oda sıcaklığında elektriksel özellikleri

Kopolimer ve Kompozitler	Dielektrik sabiti (ϵ') 100Hz	Dielektrik sabiti (ϵ') 10 kHz	Dielektrik kayıp (ϵ'') 100 Hz	Dielektrik kayıp (ϵ'') 10 kHz	İletkenlik (σ_{ac}) 100 Hz	İletkenlik (σ_{ac}) 10 kHz
Poli(NIPA-ko-St)	5.12	5.05	0.052	0.040	2.29×10^{-10}	2.41×10^{-9}
Poli(NIPA-ko-St)-%10Y	6.56	6.52	0.053	0.042	1.81×10^{-9}	1.92×10^{-8}
Poli(NIPA-ko-St)-%20Y	8.57	8.50	0.058	0.045	3.47×10^{-9}	3.70×10^{-8}



4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, poli(NIPA-ko-St) kopolimerinin sentezlenmesi ve bu kopolimere neodimyum (Nd) ve itriyum (Y) elementleri ağırlıkça farklı oranlarda katkılandırılması ile yeni kompozit malzemelerin eldesi ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, ilk olarak poli(NIPA-ko-St) kopolimeri serbest radikalik polimerizasyon metoduyla sentezlendi. Önceki yapılan çalışmalar dikkate alınarak dielektrik özelliklerin değişimini daha net görmek için kopolimeri ağırlıkça %10 ve %20 oranlarında nadir toprak elementlerinden Nd ve Y elementleri katkılandırıldı (Torgut ve ark., 2023). Poli(NIPA-ko-St)-%10Nd, poli(NIPA-ko-St)-%20Nd, poli(NIPA-ko-St)-%10Y, poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozit malzemeleri elde edildi. Sentezlenen kopolimer ve Nd ve Y katkılı kompozit malzemelerin yapısal ve morfolojik yapıları FTIR, SEM-EDS, XRD cihazları ile karakterize edildi ve değerlendirildi. Elde edilen karakterizasyon sonuçlarına göre başarılı şekilde kopolimer ve Nd ve Y katkılı kompozit malzemeler elde edilmiştir.

Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve poli(NIPA-ko-St)-%10Nd, poli(NIPA-ko-St)-%20Nd, poli(NIPA-ko-St)-%10Y, poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozit malzemelerin elektriksel özellikleri dielektrik sabiti, dielektrik kayıp ve elektriksel iletkenlik özelliklerinin frekansa bağımlılıkları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Saf poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için dielektrik sabiti, 100 Hz’de 5.12 iken 10 kHz’de 5.05 bulunmuştur. Poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik sabiti 6.57 ve 6.46, poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik sabiti 8.39 ve 8.22’dir. Poli(NIPA-ko-St) kopolimere eklenen Nd katkı miktarının artmasıyla saf polimerin ϵ' değerinin arttığı tespit edilmiştir. Saf poli(NIPA-ko-St) için dielektrik kayıp, 100 Hz’de 0.05 iken 10 kHz’de 0.04’dür. Poli(NIPA-ko-St)-%10Nd kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik kayıp 0.10 ve 0.07, poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik kayıp 0.15 ve 0.11’dir. Dielektrik sabitine benzer şekilde poli(NIPA-ko-St) kopolimerine eklenen Nd katkısı ϵ'' değerlerini de arttırmıştır. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve poli(NIPA-ko-St)-%10Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd kompozitleri için artan frekansla iletkenlik artmıştır. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için, 100 Hz ve 10 kHz iletkenlik değerleri 2.29×10^{-10} S/cm ve 2.41×10^{-9} S/cm olarak bulunmuştur. Poli(NIPA-ko-St)-Nd kompozitlerinin iletkenliğinin ağırlıkça daha yüksek Nd içerenlerde daha yüksek olduğu

bulunmuştur. Oda sıcaklığında 1000 Hz’de poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için iletkenlik değeri 2.41×10^{-9} S/cm iken, poli(NIPA-ko-St)-%10Nd ve poli(NIPA-ko-St)-%20Nd katkıli kompozitler için sırasıyla, 1.86×10^{-8} S/cm ve 4.78×10^{-8} S/cm olarak bulunmuştur. Saf poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için dielektrik sabiti, 100 Hz’de 5.12 iken 10 kHz’de 5.05 bulunmuştur. Poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik sabiti 6.56 ve 6.52, poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik sabiti 8.57 ve 8.50’dir. Poli(NIPA-ko-St) kopolimere eklenen Y katkı miktarının artmasıyla ϵ' değerinde kademeli bir artış gözlenmiştir. Saf poli(NIPA-ko-St) için dielektrik kayıp, 100 Hz’de 0.052 iken 10 kHz’de 0.040’dir. Poli(NIPA-ko-St)-%10Y kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik kayıp 0.053 ve 0.042, poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompoziti için 100Hz ve 10 kHz’de dielektrik kayıp 0.058 ve 0.045’dir. 1000 Hz frekansta, saf poli(NIPA-ko-St) polimeri için dielektrik kayıp 0.040 iken, poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20 Y kompozitlerinin ϵ'' değerleri sırasıyla 0.042 ve 0.045 olarak bulunmuştur. poli(NIPA-ko-St) kopolimerine eklenen Y katkısı ϵ'' değerlerini arttırmıştır. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri ve poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitleri için artan frekansla iletkenlik artmıştır. Poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için, 100 Hz, 10 kHz ve 20 kHz’de iletkenlik değerleri sırasıyla 2.29×10^{-10} S/cm, 2.41×10^{-9} S/cm ve 4.44×10^{-8} S/cm’ye yükselmiştir. 100 Hz frekansında, Y miktarı %10’dan %20’ye çıkarıldığında poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozitlerin elektriksel iletkenliği 1.81×10^{-9} S/cm’den 3.47×10^{-9} S/cm’ye yükselmiştir. Oda sıcaklığında 1000 Hz’de poli(NIPA-ko-St) kopolimeri için iletkenlik değeri 2.41×10^{-9} S/cm iken, poli(NIPA-ko-St)-%10Y ve poli(NIPA-ko-St)-%20Y katkıli kompozitler için sırasıyla, 1.92×10^{-8} S/cm ve 3.70×10^{-8} S/cm olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak nadir toprak elementlerinden Nd ve Y elementlerinin poli(NIPA-ko-St) kopolimerine katkılanmasıyla elektriksel özelliklerde iyileşme olduğu söylenebilir. Poli(NIPA-ko-St)-%10Nd, poli(NIPA-ko-St)-%20Nd, poli(NIPA-ko-St)-%10Y, poli(NIPA-ko-St)-%20Y kompozit malzemelerin dielektrik sabitleri, dielektrik kayıpları ve elektriksel iletkenlikleri değişen frekanslarda poli(NIPA-ko-St) kopolimerine göre daha yüksek bulunmuştur.

Elde edilen kompozit malzemeler elektriksel iletkenlik gerektiren elektronik parça, sensörler, iletken kaplamalar, kapasitörler gibi farklı birçok alanda kullanılabilir. Ayrıca, Nd ve Y gibi elektriksel iletkenliğe katkısı olabilecek nadir toprak elementleri ve diğer elementlerde bu polimere katkılanarak oluşacak kompozit malzemenin elektriksel

özellikleri incelenebilir. Ayrıca, farklı polimerlerin sentezi sağlanarak bu elementlerin diğer polimerik malzemelerde elektriksel özelliklerinin değişimleri de izlenebilir.



5. KAYNAKLAR

- Ahmad, M.W., Dey, B., Sarkhel, G., Bag, D.S., Choudhury, A., 2019. Exfoliated graphene reinforced polybenzimidazole nanocomposites with high dielectric permittivity at low percolation threshold. *Journal of Molecular Structure*, 1177:491-498.
- Akın, A., 2010. Poli(vinil alkol)-kalsiyum aljinat, poli(n-izopropilakrilamit)-kalsiyum aljinat hidrojel kürelerine lakkaz immobilizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 130s.
- Algethami, N., Rajeh, A., Ragab, H.M., Tarabiah, A.E., Gami, F., 2022. Characterization, optical, and electrical properties of chitosan/polyacrylamide blend doped silver nanoparticles. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 33:10645-10656.
- Ali, F.M., Maiz, F., 2018. Structural, optical and AFM characterization of PVA:La³⁺ polymer films. *Physica B-Condensed Matter*, 530:19-23.
- Ameli, A., Nofar, M., Park, C.B., Potschke, P., Rizvi, G., 2014. Polypropylene/carbon nanotube nano/microcellular structures with high dielectric permittivity, low dielectric loss, and low percolation threshold. *Carbon*, 71:206-217.
- Batra, K., Sinha, N., Kumar, B., 2020. Tb-doped ZnO:PDMS based flexible nanogenerator with enhanced piezoelectric output performance by optimizing nanofiller concentration. *Ceramics International*, 46:24120-24128.
- Bhavitha, K.B., Nair, A.K., Mariya, H., Jose, J., Mayeen, A., Kala, M.S., Saha, A., Thomas, S., Oluwafemi, O.S., Kalarikkal, N., 2018. In situ dose dependent gamma ray irradiated synthesis of PMMA-Ag nanocomposite films for multifunctional applications. *New Journal of Chemistry*, 42:15750-15761.
- Chacko, S.K., Rahul, M.T., Raneesh, B., Vinodan, K., Jose, J.K., Kalarikkal, N., 2022. Enhanced electroactive phase, dielectric properties and tuning of bandgap in Ho³⁺ modified PVDF-HFP composite films. *Journal of Polymer Research*, 29:493.
- Chen, Z.Y., Li, Z., Chen, J., Kallem, P., Banat, F., Qiu, H.D., 2022. Recent advances in selective separation technologies of rare earth elements: A review. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 10:107104.
- Çelik, İ., 2014. Dispersif sıvı-sıvı mikroekstraksiyon yöntemi ile nadir toprak elementlerinin önderştirilmesi ve ICP- MS ile tayini. *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 101s.
- Dang, Z.M., Lin, Y.H., Nan, C.W., 2003. Novel ferroelectric polymer composites with high dielectric constants. *Advanced Materials*, 15:1625-1629.
- Da Silva, A.B., Arjmand, M., Sundararaj, U., Bretas, R.E.S., 2014. Novel composites of Copper nanowire/PVDF with superior dielectric properties. *Polymer*, 55:226-234.

- Deepa, K.S., Gopika, M.S., James, J., 2013.** Influence of matrix conductivity and Coulomb blockade effect on the percolation threshold of insulator-conductor composites. *Composites Science and Technology*, 78:18-23.
- Deepa, K.S., Sebastian, M.T., James, J., 2007.** Effect of interparticle distance and interfacial area on the properties of insulator-conductor composites. *Applied Physics Letters*, 91:202904.
- Dev, S., Sachan, A., Dehghani, F., Ghosh, T., Briggs, B.R., Aggarwal, S., 2020.** Mechanisms of biological recovery of rare-earth elements from industrial and electronic wastes: A review. *Chemical Engineering Journal*, 397:124596.
- Faiza, Qammar, M., Butt, S.U., Malik, Z., Alahamadi, A.A., Khattak, A., 2022.** A sequenced study of improved dielectric properties of carbon nanotubes and metal oxide-reinforced polymer composites. *Materials*, 15:4592.
- Ghanipour, M., Dorrnian, D., 2013.** Effect of Ag-nanoparticles doped in polyvinyl alcohol on the structural and optical properties of PVA films. *Journal of Nanomaterials*, 2013:897043.
- Gurler, N., Torgut, G., 2021.** Graphene-reinforced potato starch composite films: Improvement of mechanical, barrier and electrical properties. *Polymer Composites*, 42:173-180.
- Heidari, M., Bahrami, H., Ranjbar-Mohammadi, M., 2017.** Fabrication, optimization and characterization of electrospun poly(caprolactone)/gelatin/graphene nanofibrous mats. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications*, 78:218-229.
- Huang, X.Y., Jiang, P.K., Xie, L.Y., 2009.** Ferroelectric polymer/silver nanocomposites with high dielectric constant and high thermal conductivity. *Applied Physics Letters*, 95:242901.
- İncesu, R., 2023.** Nadir toprak elementi katkılı polimer kompozit sentezi ve elektriksel özelliklerinin cevap yüzey yöntemi ile optimizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Munzur Üniversitesi, Tunceli, 76s.
- Jordens, A., Cheng, Y.P., Waters, K.E., 2013.** A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41:97-114.
- Kalkan, A., 2022.** Yeni fotoaktif bir zincir transfer ajanının sentezi ve RAFT/MADIX polimerizasyonunda kullanımı. *Yüksek Lisans Tezi*, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 62s.
- Karakaya, G., 2024.** Borik asit katkılı Ni-Ferit/kitosan kompozitlerinin hazırlanması, dielektrik ve elektroeolojik özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Mersin Üniversitesi, Mersin, 57s.

- Kratky, M., Vinsova, J., Volkova, M., Buchta, V., Trejtnar, F., Stolarikova, J., 2012.** Antimicrobial activity of sulfonamides containing 5-chloro-2-hydroxybenzaldehyde and 5-chloro-2-hydroxybenzoic acid scaffold. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 50:433-440.
- Lebedev, S.M., Gefle, O.S., Tkachenko, S.N., 2010.** Metal-polymer PVDF/nickel composites and evaluation of their dielectric and thermal properties. *Journal of Electrostatics*, 68:122-127.
- Li, W., Song, Z., Qian, J., Tan, Z., Chu, H., Wu, X., Nie, W., Ran, X., 2019.** Enhancing conjugation degree and interfacial interactions to enhance dielectric properties of noncovalent functionalized graphene/poly (vinylidene fluoride) composites. *Carbon*, 141:728-738.
- Liu, T.C., Chen, J., 2021.** Extraction and separation of heavy rare earth elements: A review. *Separation and Purification Technology*, 276:119263.
- Munawar, T., Nadeem, M.S., Mukhtar, F., Manzoor, S., Ashiq, M.N., Riaz, M., Hussain, A., Iqbal, F., 2022.** Superior electrochemical performance of neodymium oxide-based Nd_2CeMO_3 (M=Er, Sm, V) nanostructures for supercapacitor application. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 920:116614
- Peng, X.W., Xu, W.H., Chen, L.L., Ding, Y.C., Xiong, T.R., Chen, S.L., Hou, H.Q., 2016.** Development of high dielectric polyimides containing bipyridine units for polymer film capacitor. *React Function Components*, 106:93-98.
- Pıhtılı, G., Torgut, G., Biryant, F., 2020.** Electrical properties of two armed poly (ϵ -CL-co-BMA) composites filled with bentonite. *Journal of Polymer Research*, 27:156.
- Qureshi, A., Mergen, A., Eroglu, M.S., Singh, N.L., Güllüoğlu, A., 2008.** Dielectric properties of polymer composites filled with different metals. *Journal of Macromolecular Science Part A-Pure and Applied Chemistry*, 45:462-469.
- Rahman, M.A., Chung, G.S., 2013.** Synthesis of PVDF-graphene nanocomposites and their properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 581:724-730.
- Rajeh, A., Ragab, H.M., Abutalib, M.M., 2020.** Co doped ZnO reinforced PEMA/PMMA composite: Structural, thermal, dielectric and electrical properties for electrochemical applications, *Journal of Molecular Structure*, 1217:128447.
- Rodrigues, J.R.S., Gonçalves, D., Mangrich, A.S., Soldi, V., Bertolino, J.R., Pires, A.T.N., 2000.** Thermal behavior and electrical conductivity of poly (vinyl pyridine)/copper complexes. *Advances in Polymer Technology*, 19:113-119.
- Sahal, H., Torgut, G., Canpolat, E., 2022.** Optimization of electrical conductivity of SA-graphene nanocomposites using response surface methodology. *Chemical Research in Chinese Universities*, 38:596-602.

- Shen, Y.L., Chen, L.L., Jiang, S.H., Ding, Y.C., Xu, W.H., Hou, H.Q., 2015.** Electrospun nanofiber reinforced all-organic pvdf/pi tough composites and their dielectric permittivity. *Materials Letters*, 160:515-517.
- Singh, V., Kulkarni, A.R., Mohan, T.R.R., 2003.** Dielectric properties of aluminum-epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 90:3602-3608.
- Teixeira, L.A.V., Silva, R.G., Majuste, D., Ciminelli, V.S.T., 2020.** Stability of lanthanum in sulfate and phosphate systems and implications for selective rare earths extraction. *Minerals Engineering*, 155:106440.
- Torgut, G., 2019.** Fabrication, characterization of poly(MA-co-NIPA)-graphene composites and optimization the dielectric properties using the response surface method (RSM). *Polymer Testing*, 76:312-319.
- Torgut, G., Ayhan, N.K., Acikses, A., 2023.** Improving dielectric properties, electrical conductivity, and thermal properties of biodegradable polymer composites prepared with lanthanum. *Polymer Composites*, 44:757-766.
- Torgut, G., Gurler N., 2021.** Nanofiller reinforced biodegradable PHA/PLA composites: physico-chemical, thermal and dielectric properties. *Journal of Polymer Research*, 28:452.
- URL-1, 2022.** www.ptable.com
- URL-2, 2022.** <https://www.turkchem.net/polimer-matrisli-kompozitler.html>
- URL-3, 2024.** <https://tr.wikipedia.org/wiki/Dielektrik>
- URL-4, 2024.** [https://en.wikipedia.org/wiki/Poly\(N-isopropylacrylamide\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Poly(N-isopropylacrylamide))
- URL-5, 2024.** <https://tr.wikipedia.org/wiki/Stiren>
- Ünsal, Ö.F, Altın, Y., Bedeloğlu, A., 2020.** Dielectric properties of polyaniline-functionalized carbon nanotube/PDMS nanocomposites. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25:861-874.
- Wang, G.Y., Huang, X.Y., Jiang, P.K., 2015.** Tailoring dielectric properties and energy density of ferroelectric polymer nanocomposites by high-k nanowires. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7:18017-18027.
- Wang, Y., Zhou, X., Chen, Q., Chu, B.J., Zhang, Q.M., 2010.** Recent development of high energy density polymers for dielectric capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17:1036-1042.
- Xu, N.X., Xiao, X.R., Yang, H., Yu, E.J., Zhang, Q.L., 2016.** Enhanced dielectric constant and suppressed dielectric loss of ternary composites based on Ag-P(VDF-HFP) matrix and TiO₂ nanowires. *Ceramic International*, 42:12475-12481.

- Yang, T.I., Chuang, C.Y., Yang, S.C., Kempel, L.C., Kofinas, P., 2016.** Core/shell iron/oxide nanoparticles for improving the magneto-dielectric properties of polymer composites. *Advanced Engineering Materials*, 18:121-126.
- Yang, Z., Wang, J., Hu, Y.L., Deng, C.Y., Zhu, K.J., Qiu, J.H., 2020.** Simultaneously improved dielectric constant and breakdown strength of PVDF/Nd-BaTiO₃ fiber composite films via the surface modification and subtle filler content modulation. *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, 128:105675.
- Yerişkin, S.A., Asar, Y.Ş., 2020.** Grafen katkılı PVA ara yüzey tabakalı metal/yarı iletken yapıların hazırlanması ve dielektrik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, 1:144-153.
- Yıldız, N., 2016.** Nadir Toprak Elementleri, Ankara.
- Yuehui, M., Zhang, O., Li, Y., 2012.** Role of La in PS/Ni composite microspheres prepared by electroless plating. *Journal of The Electrochemical Society*, 159:119.
- Zhai, Y.H., Wu, W.J., Zhang, Y., Ren, W.T., 2012.** Enhanced microwave absorbing performance of hydrogenated acrylonitrile-butadiene rubber/multi-walled carbon nanotube composites by in situ prepared rare earth acrylates. *Composites Science and Technology, Composites Science and Technology*, 72:696-701.
- Zhu, J.M., Ji, X.Y., Yin, M., Guo, S.Y., Shen, J.B., 2017.** Poly (vinylidene fluoride) based percolative dielectrics with tunable coating of polydopamine on carbon nanotubes: toward high permittivity and low dielectric loss. *Composites Science and Technology*, 144:79-88.
- Zois, H., Apekis, L., Mamunya, Y.P., 2003.** Dielectric properties and morphology of polymer composites filled with dispersed iron. *Journal of Applied Polymer Science*, 88:3013-3020.