



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PİEZOELEKTRİK AEROJEL
MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE ENERJİ
HASADINDA VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI

Ümmügölsüm SATIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ümmügölsüm SATIR tarafından hazırlanan “Piezoelektrik Aerojel Malzemelerin Üretimi Ve Enerji Hasadında Verimliliğın Artırılması” adlı tez çalışması 12/06/2025 tarihinde aşğıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda UYGULAMA PROJESİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ziya Erdem KOÇ

Danışman

Prof. Dr. İlkey ÖZAYTEKİN

Üye

Doç. Dr. Fatma BAYRAM

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ümmügölsüm SATIR

Tarih:12/06/2025

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****PIEZOELEKTRİK AEROJEL MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE ENERJİ
HASADINDA VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI****Ümmügülsüm SATIR****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. İlkey Özaytekin****2025, 68 Sayfa****Jüri****Prof. Dr. Ziya Erdem KOÇ
Prof. Dr. İlkey ÖZAYTEKİN
Doç. Dr. Fatma BAYRAM**

Bu çalışmada, piezoelektrik özelliklere sahip aerjel kompozit malzemelerin sentezi gerçekleştirilmiş ve bu malzemelerin enerji hasadı uygulamalarındaki performansları detaylı bir şekilde incelendi. Araştırma kapsamında, polivinil alkol (PVA)temelli olmak üzere orta iletken ve termal dayanımlı polibenzimidazol (PBI) ve piezoseramik malzeme(baryum kalsiyum titanat zirkonat (BCZT) ve çinko oksit (ZnO)) katkılı kompozit aerjeller hazırlandı. Elde edilen piezoaerjel, kritik karbondioksit kurutma yöntemi ile 50 bar ve 120 °C’de kurutularak ve üç boyutlu makro gözenekli yapıların korunması sağlandı. Kompozit aerjellerin yüzey morfolojik özellikleri ve makro gözeneklilik dağılım grafiği FESEM ile analiz edilmiştir. Elde edilen piezoaerjel örneklerine 60 °C’de presleme işlemi uygulanarak enerji hasadı artırılmıştır. Aerjellerin yapısal özelliklerinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen FTIR ve TGA analizleri sonucunda, PBI katkısının termal dayanımı artırdığı ve her üç aerjelin de yaklaşık 480 °C sıcaklıkta tamamen bozunduğu belirlendi. Malzemeye uygulanan mekanik darbeler sonucunda oluşan çıkış gerilimleri osiloskop aracılığıyla kaydedilmiş ve analiz edilmiştir.Çalışma sonuçlarına göre, BCZT ve ZnO katkılarının %1–%3 aralığının dakullanılmasıyla piezoelektrik performansta anlamlı bir artış gözlemlendi. 2 cm² yüzey alanına sahip numunelerde, parmak basıncıyla uygulanan kuvvet sonucunda maksimum 19.0 V çıkış gerilimi elde edildi. Ayrıca, Two-prob yöntemiyle yapılan ölçümlerle piezoaerjelin ürettiği çıkış güç yoğunluğu ve akım değeri belirlendi. Maksimum çıkış gücü 0.95 mm kalınlıktaki piezoaerjel malzeme için 1,280x10⁻³ W olarak ölçülmüştür. En yüksek çıkış gücünün%3 BCZT katkılı numuneye ait olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik malzemeler, aerjel, enerji hasadı, BCZT, ZnO, PVA, PBI, kompozit

ABSTRACT**Ümmügülsüm SATIR****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies****Advisor:****2025,68 Pages****Jury****Prof. Dr. Ziya Erdem KOÇ
Prof. Dr. İlkey ÖZAYTEKİN
Doç. Dr. Fatma BAYRAM**

In this study, aerogel composite materials with piezoelectric properties were synthesised and their performances in energy harvesting applications were investigated in detail. Within the scope of the research, polyvinyl alcohol (PVA)-based, medium conductive and thermally resistant polybenzimidazole (PBI) and piezoceramic material (barium calcium titanate zirconate (BCZT) and zinc oxide (ZnO)) doped composite aerogels were prepared. The obtained piezoaerogel was dried at 50 bar and 120 °C by critical carbon dioxide drying method and three-dimensional macroporous structures were preserved. Surface morphological properties and macroporosity distribution graph of composite aerogels were analysed by FESEM. Energy harvesting was increased by pressing the obtained piezoaerogel samples at 60 °C. As a result of FTIR and TGA analyses performed to investigate the structural properties of aerogels, it was determined that PBI doping increased the thermal resistance and all three aerogels were completely degraded at a temperature of approximately 480 °C. The output voltages generated as a result of mechanical impacts applied to the material were recorded and analysed by oscilloscope. According to the results of the study, a significant increase in piezoelectric performance was observed by using BCZT and ZnO dopants in the range of 1%-3%. In samples with 2 cm² surface area, a maximum output voltage of 19.0 V was obtained as a result of the force applied by finger pressure. In addition, the output power density and current value produced by the piezoaerogel were determined by measurements made by the two-probe method. The maximum output power was measured as 1,280x10⁻³ W for 0.95 mm thick piezoaerogel material. 3% BCZT doped sample was found to have the highest output power.

Keywords: Piezoelectric materials, aerogel, energy harvesting, BCZT, ZnO, PVA, PBI, composite

ÖNSÖZ

"Piezoelektrik Aerojel Malzemelerin Üretimi ve Enerji Hasadında Verimliliğin Artırılması" başlıklı bu çalışma, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. İlkey ÖZAYTEKİN danışmanlığında yürütülmüş ve Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunulmuştur.

Tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle yol gösterici olan, akademik gelişimime sunduğu katkılar ve her aşamada gösterdiği desteği için değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. İlkey ÖZAYTEKİN'e

Çalışmanın uygulama kısmında, verdiği teknik destekten dolayı Sayın Prof. Dr. Mehmet Emin ARGUN'A, sağladığı katkılar için Sayın Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER'e ve Doç. Dr. Gülnihal KARA'ya

Bu süreçte maddi ve manevi olarak daima yanımda olan, her koşulda desteğini esirgemeyen kıymetli babam Ramazan SATIR ve sevgili annem Ayten SATIR'a

Son olarak her zaman yanımda olan ve manevi destekleriyle güç veren canım kardeşlerim İlayda SATIR, Senanur SATIR ve Bengisu SATIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının, piezoaerojel malzemeler ve enerji hasadı alanında yapılacak bilimsel çalışmalara katkı sağlaması en büyük temennimdir.

Ümmügülsüm SATIR
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
1. GİRİŞ	1
1.1. Piezoelektrik	2
1.2. Piezoelektrik Polimerler	3
1.2.1. Piezoelektrik uygulamalarda polivinil alkol	4
1.2.2. Piezoelektrik uygulamalarda polibenzimidazol	4
1.3. Piezoelektrik Kompozitler	5
1.4. Aerojel	6
1.4.1. Aerojel yapılarında polivinil alkol	7
1.4.2. Aerojel uygulamalarında polibenzimidazol	8
1.5. Piezoelektrik Özellikli Aerojeller	9
1.6. Piezoelektrik Özellikli Kompozit Aerojeller	9
1.7. Piezoelektrik Özellik Kazandırılmış Polivinil Alkol Aerojeller	10
1.7.1. BCZT ($\text{Ba}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}$)($\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1}$) O_3 içeren aerojel kompozitler	11
1.7.2. Çinko oksitiçeren aerojel kompozitler	12
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Kullanılan Cihazlar	26
3.1.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi	26
3.1.2. Osiloskop	26
3.1.3. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (Fe-Sem)	26
3.1.4. Two-Probe	26
3.1.5. Termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetre analiz cihazı	27
3.1.6. Süperkritik Karbondioksit (CO_2) Kurutma Sistemi	27
3.1.7. Avometre	27
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	29
5. SONUÇLAR	47
6. ÖNERİLER	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C	: Kapasite (Farad)
d	: Örnek/Aerojel Kalınlığı
d_{31}	: Piezoelektrik Yük Sabiti
ϵ_0	: Vakum Dielektrik Sabiti (8.854×10^{-12} F/m)
ϵ'	: Dielektrik Sabiti
i	: Akım
I _{sc}	: Devre Akımı
I–V	: Akım-Gerilim İlişkisi
J	: Akım Yoğunluğu
Ph	: Potansiyel Hidrojen
R ²	: Belirleme Katsayısı
RH	: Bağıl Nem
σ	: Elektriksel İletkenlik
TC	: Kritik Sıcaklık
T _g	: Cam Geçiş Sıcaklığı
ν (nu)	: Titreşim Frekansı
V	: Volt – Uygulanan Potansiyel
V _{oc}	: Devre Gerilimi
-OH	: Hidroksil Grubu
-NH	: Amin Grubu
A	: Amper
Ca	: Kalsiyum
Ba	: Baryum
Cu ²⁺	: Bakır (II) İyonu
F	: Farad
g	: Gram
Kg	: Kilogram
kPa	: Kilopascal
MPa	: Megapascal
mK	: Milikelvin
mF	: Milifarad
mA	: Miliamper
μ A	: Mikroamper
μ W	: Mikrowatt
nW	: Nanowatt
mW	: Milliwatt
MV	: Megavolt
m ²	: Metrekare
cm ³	: Santimetreküp

Mg	: Miligram
MΩ	: Megaohm
N	: Newton
O	: Oksijen
Si	: Silisyum
pC	: Pikokulon
W	: Watt
Wh	: Watt-saat
%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
~	: Yaklaşık olarak
/	: Birim başına ölçüm
Dk	: Dakika

Kısaltmalar

BaTiO ₃	: Baryum Titanat
BF	: β-Laktoglobulin Fibrilleri
BCZT	: Baryum Kalsiyum Zirkonat Titanat
BNNT	: Bor Nitrür Nanotüp
CMC	: Karboksimetil Selüloz
CNF	: Selüloz Nanofibril
CO ₂	: Karbondioksit
COC	: Siklo Olefin Polimer
Cu NW	: Bakır Nanotel
CS	:: Kitosan
CNT	: Karbon Nanotüp
DMF	: Dimetilformamid
DMSO	: Dimetil Sülfoksit
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DTG	: Türetilmiş Termogravimetrik Analiz
EBSD	: Elektron Geri Saçılma Kırınımı
EDX	: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
EtOH	: Mutlak Etanol
Fe-SEM	: Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
FEP	: Floro Etilen Propilen
FT-IR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GCD	: Galvanostatik Şarj-Deşarj Döngüsü
GO	: Grafen Oksit
HCl	: Hidroklorik Asit
IOT	: Nesnelerin İnterneti

KNN	: Potasyum Sodyum Niyobat
LC-MS	: Sıvı Kromatografisi-Kütle Spektrometrisi
MoS ₂	: Molibden Disülfid
MS@PVA	: Mikroyapılı Polivinil Alkol
NaOH	: Sodyum Hidroksit
NG	: Nanogeneratör
PA	: Poliamid
PBM	: Bakteriyel Selüloz/Mxene
PBI	: Polibenzimidazol
PETP	: Polietilen Tereftalat
PIXcel3D	: Yüksek Çözünürlüklü Piksel Tabanlı Dedektör
PP	: Polipropilen
Ppy	: Polipirol
Ppy@PBM	: Polipirol/Bakteriyel Selüloz/Mxene Kompoziti
PTFE	: Poli Tetra Floro Etilen
PVDF	: Poliviniliden Florür
PVF	: Polivinil Florür
PVA	: Polivinil Alkol
PZT	: Kurşun Zirkonat Titanat
SE	: Sekonder Elektron
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
STEM	: Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TOCN	: TEMPO-Oksitlenmiş Selüloz Nanofibriller
XRD	: X-Işınları Difraksiyon Cihazı
¹ H-NMR	: Proton Nükleer Manyetik Rezonans Spektroskopisi
IUPAC	: Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji talebi giderek artmakta ve bu durum, fosil yakıtların sınırlı rezervleri ile çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda, yenilikçi enerji üretim yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar, çevre dostu teknolojilerin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yöntemlerden biri olan piezoelektrik enerji hasadı, çevresel titreşimlerden ve mekanik hareketlerden elektrik enerjisi üretmeyi mümkün kılmakta, böylece fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmayı hedeflemektedir (Kim ve diğ., 2009).

Piezoelektrik malzemeler, uygulanan mekanik gerilmeye yanıt olarak elektrik yükü üretebilen özellikleri sayesinde sensörlerden enerji üreteçlerine kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Sodano ve diğ., 2004). Ancak bu teknolojinin yaygınlaşabilmesi için dönüşüm verimliliğinin artırılması ve malzeme dayanımının iyileştirilmesi gerekmektedir.

Aerojeller, yüksek porozite, düşük yoğunluk, geniş yüzey alanı ve esnek yapıları sayesinde son yıllarda ileri fonksiyonel malzemeler arasında öne çıkmaktadır. Bu tasarımlar, esnek elektronikler, ısı yalıtımı ve enerji depolama gibi alanlarda olduğu gibi, enerji hasadı teknolojilerinde de etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Sun diğ., 2021). Aerojel tabanlı piezoelektrik sistemler, geleneksel sert yapıli sistemlere kıyasla daha esnek, hafif ve verimli çözümler sunmaktadır (Zong ve diğ., 2023). Hem çevre dostu hem de düşük maliyetli çözümler, enerji dönüşüm etkinliğini artırmak için oluşturulan yeni nesil piezoelektrik malzemeler ve aerojellerin bir kombinasyonu ile sunulmaktadır. Aerojellerin esnekliği, uzun süreli mekanik yüklemelerde yapının bozulmadan enerji üretmeye devam etmesini sağlayarak, bu teknolojinin sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır (Pan ve diğ., 2020).

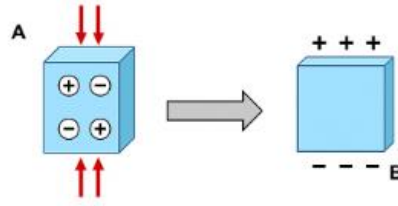
Piezoelektrik enerji sistemlerinde kullanılan malzemelerin dayanıklılığı ve işlevselliği büyük önem taşır. Bu kapsamda öne çıkan malzemelerden biri de polibenzimidazol'dur. PBI, olağanüstü termal ve kimyasal kararlılığı, yüksek mekanik mukavemeti ve piezoelektrik uyumluluğu ile dikkat çeken bir polimerdir (Wang ve diğ., 2015). Aerojel yapılarla birlikte kullanıldığında, piezoelektrik enerji dönüşüm verimini artırabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, PBI'nın moleküler düzeyde modifikasyonu ile elastikiyet ve piezoelektrik yanıt gibi özelliklerin optimize edilmesi mümkündür (Alwin ve Sahaya Shajan, 2020).

Polivinil alkol (PVA), biyouyumluluğu, mekanik dayanımı ve esnek yapısıyla piezoelektrik enerji hasadı uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir diğer polimerdir. Su tutma kapasitesi ve termal kararlılığı gibi özellikleri sayesinde, çevresel etkilere dayanıklı kompozitlerin elde edilmesine katkı sağlar (Liang ve diğ., 2024). PVA'nın aerjel yapılarla entegre edilmesi, mekanik dayanım ve piezoelektrik duyarlılık açısından olumlu sonuçlar doğurmaktadır.

Bu çalışma, piezoelektrik enerji hasadında aerjel destekli malzeme sistemlerinin performansını artırmak amacıyla yapılan araştırmaları kapsamaktadır. Aerjellerin mikro yapısal özellikleri ile katkı malzemelerinin etkileşimi detaylı biçimde ele alınmakta ve yenilikçi malzeme tasarımı yaklaşımları sunulmaktadır. Özellikle PBI ve PVA gibi polimerlerin aerjel yapılarla entegre edilmesi sayesinde, hem enerji verimliliği artırılabilir hem de çevresel sürdürülebilirlik sağlanabilir.

1.1. Piezoelektrik

Piezoelektrik etki, 1880 yılında Pierre Curie ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Yaptıkları çalışmalarda, kuvars ve turmalin gibi kristal yapıya sahip bazı malzemelere belirli yönlerden mekanik basınç uygulandığında, bu basınca bağlı olarak yüzeylerde zıt elektrik yüklerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu duruma ilk olarak "kutupelektrik" adını vermişlerdir. Curie kardeşler, daha önce kristal yapıların simetri özelliklerinden yola çıkarak, sıcaklık değişimleriyle elektrik sinyali üretebildiğini fark etmiş ve bu bilgiler doğrultusunda piezoelektrik etkiyi tanımlamışlardır. Şekil 1.1' de piezoelektrik etki gösterilmiştir. Piezoelektrik özellik gösteren tüm malzemeler aynı zamanda piroelektrik olabilir; çünkü piroelektrik malzemeler, piezoelektrik grubu içerisinde yer alır. Yunanca kökenli olan "piezo" kelimesi basınç, "piro" ise ateş anlamına gelir. Piezoelektrik terimi ilk kez Alman fizikçi Wilhelm G. Hankel tarafından, "basınç uygulamak" anlamındaki "piezein" kelimesinden türetilerek kullanılmıştır. Bir yıl sonra, 1881'de Gabriel Lippmann, bir malzemeye elektrik alan uygulandığında onun fiziksel boyutlarında değişim meydana geldiğini, yani ters yönde çalışan piezoelektrik etkiyi (dolaylı piezoelektrik etki) ortaya koymuştur. Curie kardeşler de, Lippmann'ın öngördüğü bu ters etkinin, kendi deneysel çalışmalarıyla doğrulandığını göstermişlerdir (Tichý ve diğ., 2010).



Şekil 1.1. Piezoelektrik etki

1.2. Piezoelektrik Polimerler

Polimerlerin piezoelektrik özelliği polimerin kristalin alan miktarına bağlıdır (Gusarov, 2015). Seramik malzemelerin üretimi polimerlere göre daha zor ve kırılğan olduğu için polimerlerin önemi artmıştır. Büyük ve kompleks şekillerdeki uygulamalar için polimerler daha uygundur. Piezoelektrik özellik gösteren polimer bir malzemeye voltaj uygulandığında malzeme, uygulanan voltajın miktarıyla orantılı olarak inceler, uzar veya genişler. Piezoelektrik özellik gösteren polimer bir malzemeye sıkıştırma, esnetme veya germe gibi mekanik bir kuvvet uygulandığında kuvvetin büyüklüğüne göre voltaj üretir. İlk keşfedilen piezoelektrik özellikli polimer PVD'dir. PVD'nin piezoelektrik özelliği keşfedildikten sonra araştırmacılar diğer polimerlerin piezoelektrik özellikleri hakkında çalışmalar yapmıştır. Piezoelektrik özellik kazandırılabilen diğer polimerlerden bazıları; polivinil florid (PVF), polipropilen (PP), poliamid (PA), floro etilen epropilen (FEP), poli tetra floro etilen (PTFE), siklo olefinler (COC), polietilen tereftalat (PETP), poliparaksilen, poli bisklorometil oksetan polistiren, polimetil, polimetakrilat, polivinil, asetat ve naylonlar piezoelektrik özellik sergileyen polimer malzemelerdir. Polimerlerden floropolimerler, poliüreler, poliamidler, polipeptidler, polisakkaritler ve polyesterler piezoelektrik özellik gösterebilen polimer ailelerine örnektir. Bu polimer ailelerinden en sık piezoelektrik özelliği ile kullanılanı floropolimerler olup en yaygın örneği de poliviniliden florür ve kopolimerleridir (Smith ve Kar-Narayan, 2022).

Piezoelektrik polimerlerde temel olarak piezoelektrik özelliği malzeme içindeki elektronegatif elementlerden dolayı oluşan polarizasyondan kaynaklanmakta olduğu düşünülebilir. Fakat bu elektronegatif elementlere ve doğru simetriye sahip olup piezoelektrik özellik göstermeyen polimerler de mevcuttur. Piezoelektrik polimerlerde piezoelektrik etki ile kristallenme derecesi arasında ilişkisi bulunmaktadır (Aguilar ve San Román, 2014).

1.2.1. Piezoelektrik uygulamalarda polivinil alkol

Polivinil alkol (PVA), piezoelektrik malzemelerde genellikle bağlayıcı, matris oluşturuca ya da esneklik ve dayanıklılığı artırıcı bir polimer olarak kullanılır. PVA'nın piezoelektrik uygulamalarında tercih edilmesinin nedenlerinden bazıları yüksek esneklik ve mekanik dayanıklılık, piezoelektrik malzemelere mekanik esneklik kazandırır. Özellikle katı seramik bazlı piezoelektrik malzemeler kırılmandır; PVA eklenmesiyle bu malzemelerin dayanıklılığı ve elastikiyeti artırılabilir. Bu özellik, esnek elektronikler ve giyilebilir cihazlar gibi uygulamalarda önemlidir. Polimer matris olarak kullanımı, piezoelektrik nanopartiküller (örneğin, BaTiO₃, ZnO, veya PZT) için bir matris olarak kullanılabilir (Onay, 2011). Bu nanopartiküller, PVA'nın içinde homojen bir şekilde dağılır ve bu sayede piezoelektrik performans artar. PVA'nın çözünürlüğü ve kolay işlenebilirliği, piezoelektrik kompozitlerin üretimini kolaylaştırır. PVA'nın hidrofilik yapısı, polarizasyon işlemlerinde fayda sağlar. Bu polarizasyon, piezoelektrik malzeme içinde dipol momentlerinin hizalanmasını kolaylaştırabilir ve piezoelektrik özelliklerin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. PVA, iyonik ve elektroaktif malzemelerle uyum içinde çalışabilir. İyonik piezoelektrik sistemlerde veya elektroaktif polimerlerde, PVA'nın katkı malzemesi olarak kullanılması hem mekanik hem de elektriksel özellikleri optimize edebilir. PVA, ince ve esnek filmler oluşturmak için kullanılabilir. Bu özellik, piezoelektrik sensörler, aktüatörler ve enerji hasat cihazları gibi uygulamalarda önemlidir. PVA bazlı filmler genellikle düşük maliyetli ve çevre dostudur (Mergen ve diğ., 2021). PVA, belirli piezoelektrik malzemelerle uyumlu bir termal ve kimyasal stabilite sergiler. Bu, özellikle piezoelektrik kompozitlerde uzun vadeli dayanıklılık gerektiren uygulamalarda avantaj sağlar. PVA, çapraz bağlanma veya kimyasal modifikasyonlarla piezoelektrik özellikleri daha da iyileştirilebilir.

1.2.2. Piezoelektrik uygulamalarda polibenzimidazol

Polibenzimidazol (PBI), yüksek performanslı polimerler arasında yer almakta olup, özellikle piezoelektrik kompozitlerin geliştirilmesinde dikkat çeken bir malzemedir. PBI doğrudan piezoelektrik özellik göstermese de, termal, mekanik ve kimyasal kararlılığı sayesinde piezoelektrik özellik taşıyan seramik ve polimerlerle birlikte kullanıldığında kompozitin genel performansını artırıcı bir rol üstlenmektedir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yapısal bütünlüğünü koruyabilen PBI, bu özelliğiyle piezoelektrik cihazların yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımına olanak tanır (Tsang ve diğ., 2025). Piezoelektrik malzemeler genellikle seramik esaslı olduğundan

kırılgan bir yapı gösterir. PBI'nin elastik ve dayanıklı yapısı, bu malzemelerle birlikte kullanıldığında mekanik stabilite sağlar ve kompozitlerin çatlama veya deformasyona karşı daha dirençli olmasına katkı sunar (Zhang ve diğ., 2010). Bu durum, özellikle titreşim tabanlı enerji hasadı gibi sürekli mekanik strese maruz kalan uygulamalarda cihazın ömrünü uzatmaktadır. Ayrıca PBI, asit, baz ve oksitleyici ajanlara karşı üstün kimyasal direnç gösterir. Bu özelliği sayesinde, kimyasal olarak agresif ortamlarda çalışacak piezoelektrik sistemlerin dış etkenlere karşı korunmasında önemli bir rol oynar (Zhou ve diğ., 2021). Böylece, piezoelektrik aktif malzemenin bozulması veya işlev kaybı gibi riskler en aza indirgenmiş olur. PBI' nin işlenebilirliği ve çözünebilirliği, nanokompozit üretim süreçlerinde büyük bir avantaj sunar. ZnO, BCZT gibi piezoelektrik nanopartiküllerle homojen şekilde karıştırılarak kompozit yapı oluşturulabilir. Bu da malzeme içerisinde etkin yük transferini sağlayarak piezoelektrik yanıtın optimize edilmesini mümkün kılar (Zhang ve diğ., 2022). Giyilebilir elektronik cihazlar, esnek sensörler ve hafif enerji hasat sistemlerinde, PBI'nin düşük yoğunluğu ve esnek yapısı önemli avantajlar sağlar. PBI'nin bu yönü, taşınabilir sistemlerin geliştirilmesine katkıda bulunurken aynı zamanda enerji hasat verimliliğini artıran stabil bir ortam sunar (Kausar, 2019). Son olarak, PBI'nin yüksek dielektrik dayanımı ve elektriksel stabilitesi, piezoelektrik kompozitlerin polarizasyon süreçlerini optimize ederek piezoelektrik cevabın iyileştirilmesini sağlar. Bu durum, özellikle yüksek performanslı ve uzun ömürlü piezoelektrik cihazların tasarımında kritik öneme sahiptir (Polansky ve diğ., 2019).

1.3. Piezoelektrik Kompozitler

Seramik ve polimer esaslı piezoelektrik malzemelerin verimliliği iyi olan özellikleri kullanılarak daha iyi kompozit malzeme geliştirilebilir. Yani kimyasal, fiziksel, mekaniksel ve diğer özellikler yönünden daha üstün bir malzeme üretmektir. Seramikler veya seramik ve polimerlerden oluşan kompozitler ile ilgili çalışma yer almaktadır. Örnek olarak kauçuklar, akrilikler, epoksiler verilebilir. Bunun yanı sıra kompozitlerin kutuplanma özellikleri daha iyidir (Baur ve diğ., 2014).

Tek kristal piezoelektrik malzemeler yüksek mekanik kalite faktörüne sahiptir ancak maliyetleri çok yüksektir. Benzer şekilde, seramik piezoelektrik malzemeler yüksek piezoelektrik sabite ve bağlantı faktörüne sahiptir fakat doğal yapıları gereği kırılgandırlar (kırılgan piezoelektrik malzemeler belirli uygulamalarda kullanıma uygun değildir). Polimer bazlı piezoelektrik malzemeler ise yüksek esnekliğe (seramik bazlı

piezoelektrik malzemelerin aksine esnekliğin gerekli olduğu yerlerde esnek piezoelektrik malzemeler kullanılabilir) sahiptir. Ancak düşük piezoelektrik sabiti, birleştirme faktörü ve dielektrik sabitine sahiptirler. Seramik ve polimer bazlı piezoelektrik malzemelerdeki bu dezavantajları çözmek için kompozit bazlı piezoelektrik malzemeler popüler hale gelmiştir. Kompozit piezoelektrik malzemelerin en önemli problemi ise, bazı malzemelerin işlenmesinin zor olmasıdır (Hansen, 2004).

1.4. Aerojel

Aerojeller, son çeyrek asırdan beri hem bilimsel hem de ticari uygulamalarda yaygın olarak incelenen bir malzeme olmuştur. Bu malzemelerin geniş kapsamlı doğası, tek bir tanımın belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Araştırmacılar arasında, aerojellerin kesin tanımı konusunda süregelen bir tartışma mevcuttur. Aerojel, Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından, "dağılmış fazın bir gaz olduğu mikro poroz bir katıdan oluşan bir jel" olarak tanımlanmaktadır. Aerojellerin tanımlanmasında önemli özellik, katı fazda olmaları ve yüksek gözenekliliğe sahip olmalarıdır. Ancak, belirli gözenek boyutları ve yüzde (%) gözeneklilik için spesifik değerler halen tartışılmaktadır. Aerojellerin üretim süreci ve elde edilen ürün arasındaki ilişki de tartışmalıdır. Bu malzemelerin temel özellikleri, nano yapıya sahip katı bir faz ve birbirine bağlı nanometre ölçekli gözenekli bir ağ yapısıdır. Aerojellerin terminolojisi, araştırmacılar arasında bazı belirsizliklere neden olmaktadır. Örneğin, "jel" teriminden türetilen terimlerin kullanımı karışıklığa yol açabilir. Aerojellerin çeşitli uygulamalardaki benzersiz özellikleri, bu malzemelerin önemini arttırmaktadır. Aerojeller, geniş bir yelpazede incelenen ve çeşitli uygulamalarda kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler, yüksek gözeneklilik, düşük kütle yoğunluğu, yüksek yüzey alanı ve düşük termal iletkenlik gibi özelliklere sahip oldukları için endüstriyel alanlarda değerli hale gelmektedirler. Aerojellerin nanoyapısı, özellikle termal yalıtım özelliklerinin geliştirilmesinde büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu özellikler, aerojellerin gelecekteki uygulamalarının ve endüstriyel kullanım alanlarının çeşitlenmesine imkân tanımaktadır. Sonuç olarak, aerojellerin araştırma ve geliştirme alanındaki aşamaları, bu malzemelerin çeşitliliğini ve potansiyelini vurgulamaktadır. Araştırmacılar, bu alandaki gelişmelere paralel olarak yeni zorluklar ve fırsatlarla karşılaşmaktadır ve geleneksel mezoporoz aerojelleri tamamlayan yeni malzeme mimarileri üzerinde çalışmalarını sürdürülmektedir (Aegerter ve diğ., 2023).

Samuel Kistler'in süperkritik kurutma konusundaki araştırmaları 1920'li yıllara kadar uzanmaktadır. Kistler, yüksek lisans tezinde, süperkritik akışkanlar altında amino asitlerin kristallenmesi üzerinde çalışmıştır. Ancak, 1931 yılındaki aerojellerle ilgili dokuz yayını, daha geniş bir tanınırlık kazanmıştır. Bu çalışmada özetle, atmosferik basınç altında gerçekleşen kurutma işlemi sırasında yüksek kapiler kuvvetin ortaya çıkması, jel yapısını korumada zorluklara ve yapı deformasyonlarına neden olmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek amacıyla süperkritik kurutma yöntemi uygulandı ve jel başarılı bir şekilde kurutuldu. Kistler, "aerjel" terimini kullanarak bu terimin kendisine atfedildiği ve bu teknolojinin, çözücü esaslı malzemelerin jel ağ yapısına etki etmeden jel yapılarının yapısını incelemenin yeni bir yöntemini sunduğu ifade edilmektedir (Kistler, 1931). Kistler ekonomik sebeplerden dolayı çalışmalarının büyük bir bölümünü silika aerojellere ayırmıştır. Ayrıca, çeşitli malzemelerden oksit tabanlı ürünlerle de çalışmıştır. Literatürdeki birkaç malzeme haricinde, genellikle jelleri başarıyla süperkritik ortamda kurutmuştur. Ancak, üretim maliyeti ve tekniğin karmaşıklığı nedeniyle yaygınlaşamadı. 1970 yılında Fransız Hükümeti, havacılık ve uzay çalışmalarındaki potansiyelin fark edilmesi ve teşvik edilmesiyle bu alanda çalışmalara yeniden başlamıştır. Ancak, Kistler' in jel sentezi metodunun karmaşık ve zaman alıcı olması bir engel teşkil etmekteydi. Bu nedenle, Ga Nicolaoan'ın sol-jel yöntemini kullanarak üretim süresini aylardan günler düzeyine önemli ölçüde azaltması, bu teknolojinin yeniden kullanımını mümkün kılmıştır. Sol-jel yöntemi, aerjel üretim sürelerini önemli ölçüde azaltarak araştırmalara hız kazandırmıştır (Bheekhun ve Talib, 2018). Aerjel alanındaki önemli bir gelişme ise, süperkritik alkol yerine süperkritik karbondioksitin (CO₂) kullanılmasıdır. Bu yaklaşım, üretim süreçlerini daha verimli hale getirerek aerjel araştırmalarına yeni bir boyut kazandırmaktadır. Son 20 yılda, aerojellere olan ilgi hem akademik hem de ticari çevrelerde büyük bir ivme kazanmıştır. Bu artan ilgi, aerjel teknolojisinin potansiyelini keşfetme, geliştirme ve uygulama alanlarını genişletme konusundaki hızlı gelişmelere dayanmaktadır (Aegerter ve diğ., 2023).

1.4.1. Aerjel yapılarda polivinil alkol

Polivinil alkol (PVA), suda çözünebilir sentetik bir polimer olup, yüksek hidrofiliklik, biyoyumluluk ve film oluşturma yeteneği gibi özellikleri sayesinde çeşitli ileri malzeme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aerjel üretiminde PVA'nın kullanımı, hem yapısal özellikleri iyileştirmek hem de üretim sürecini kontrol

etmek açısından oldukça avantajlıdır (Yang ve diğ., 2020). PVA, bol miktarda hidroksil grubu içeren hidrofilik yapısı sayesinde, aerogel sistemlerinde bağlayıcı olarak işlev görür. Bu hidroksil grupları, hidrojen bağları aracılığıyla diğer polimerik veya inorganik bileşenlerle güçlü etkileşimler kurarak homojen ve kararlı bir matris oluşturulmasını sağlar. Böylece aerogelin mekanik stabilitesi artırılırken, mikro yapıdaki tutarlılık da korunur (Javadi ve diğ., 2013). Ayrıca, PVA'nın esnek yapısı, kırılğan yapıya sahip aerogel matrislerine mekanik dayanıklılık ve elastikiyet kazandırabilir. Bu durum, özellikle biyomedikal uygulamalar, yapı malzemeleri ve enerji cihazları gibi mekanik yüklemeye maruz kalabilecek alanlarda büyük önem taşımaktadır (Lv diğ., 2023). PVA, çapraz bağlayıcı ajanlar (örneğin, glutaraldehit, borat) ile işlenerek, gözeneklilik ve ağ yapısı açısından optimize edilmiş, dayanıklı ve kontrollü gözenek boyutuna sahip aerogellerin üretimine olanak tanır (Han ve diğ., 2013; Pakolpakçıl, 2022). PVA'nın su ve diğer polar çözücülerde kolay çözünmesi, jelleşme süreçlerinde önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu özellik, çevre dostu ve düşük maliyetli su bazlı üretim süreçlerinin geliştirilmesini mümkün kılar. Ayrıca PVA, düşük toksisite ve biyobozunabilirlik gibi özellikleri nedeniyle sürdürülebilir malzeme geliştirme çalışmalarında ön plana çıkmaktadır (Gajra ve diğ., 2011).

1.4.2. Aerogel uygulamalarında polibenzimidazol

Polibenzimidazol (PBI), yüksek termal, kimyasal ve mekanik kararlılığı ile öne çıkan, ileri teknoloji uygulamaları için geliştirilen yüksek performanslı bir aromatik polimerdir. Aerogel üretiminde PBI'nin kullanımı, hem yapısal kararlılık hem de işlevsel dayanıklılık açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle ekstrem koşullarda çalışması gereken sistemlerde PBI bazlı aerogeller, konvansiyonel malzemelere kıyasla üstün performans sergilemektedir. PBI'nin en dikkat çekici özelliklerinden biri, 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dahi termal kararlılığını koruyabilmesidir. Bu durum, PBI aerogellerin uzay-havacılık sistemleri, yüksek sıcaklık yalıtımı ve enerji santralleri gibi zorlu uygulamalarda kullanılmasına olanak tanır (Liu ve diğ., 2022). Diğer polimer bazlı aerogel malzemeleri bu tür sıcaklıklarda yapısal bozulma gösterebilirken, PBI bu sınırları aşan stabilitesiyle dikkat çeker. Kimyasal dayanıklılık açısından da PBI oldukça üstün bir malzemedir. Kuvvetli asitler, bazlar ve oksitleyici ajanlarla temas ettiğinde dahi yapısal bütünlüğünü korur (Sroog, 1976; Vogel ve Marvel, 1961). PBI aerogeller, darbe dayanımı gerektiren yapısal uygulamalarda kullanılabilmekte; ayrıca hafiflikleri sayesinde taşınabilir yalıtım çözümlerinde de tercih edilmektedir (Liu ve diğ., 2022).

1.5. Piezoelektrik Özellikli Aerojeller

Piezoelektrik arojeller, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahip olan piezoelektrik malzemeler ile yüksek gözenekliliğe ve düşük yoğunluğa sahip olan arojel yapılarının birleşiminden oluşan, yeni nesil fonksiyonel malzemelerdir. Bu hibrit yapı, özellikle enerji hasadı, esnek elektronikler, biyosensörler ve çevresel uygulamalar gibi alanlarda oldukça büyük bir potansiyel sunmaktadır (Song ve diğ., 2022; Zheng ve diğ., 2023). Piezoelektrik arojeller, piezoelektrik özellik gösteren nano/mikro parçacıkların (örneğin ZnO, BaTiO₃, MoS₂) veya polimerlerin (örneğin PVA, PVDF, TOCN) arojel matrisine entegre edilmesiyle elde edilir. Bu yapı hem mekanik esneklik hem de elektrik üretim kapasitesi açısından oldukça verimli bir sistem oluşturur. Piezoelektrik parçacıklar, arojelin gözenekli yapısı içerisinde dağılmış durumda olup; mekanik zorlanma altında hava boşluklarıyla birlikte ek bir polarizasyon etkisi yaratabilir (Quan ve diğ., 2024). Gözenekli yapı sayesinde, arojelin elastik deformasyonu sırasında sadece doğrudan piezoelektrik katkılar değil, aynı zamanda havanın polarizasyonu da elektrik üretimini destekler. Bu durum, piezoelektrik arojellerin geleneksel kompozitlerden çok daha yüksek açık devre voltajı ve kısa devre akımı üretmesini sağlar (Song ve diğ., 2022).

1.6. Piezoelektrik Özellikli Kompozit Aerojeller

Piezoelektrik kompozit arojeller, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen piezoelektrik malzemeler ile, yüksek gözenekli, düşük yoğunluklu ve esnek yapıdaki arojel matrislerin birleştirilmesiyle oluşturulan hibrit, çok fazlı fonksiyonel malzemelerdir. Bu malzemeler, günümüzde özellikle yenilenebilir enerji üretimi, giyilebilir elektronikler, biyosensörler ve akıllı yapı sistemleri gibi alanlarda büyük bir potansiyel taşımaktadır (Quan ve diğ., 2024; Song ve diğ., 2022). Piezoelektrik kompozit arojeller üç temel bileşen etrafında şekillenir: Arojel matris, genellikle sol-jel yöntemiyle elde edilen jellerin süperkritik kurutma, dondurarak kurutma (freeze-drying) ya da atmosferik kurutma yöntemleriyle kurutulması sonucu oluşan oldukça hafif ve gözenekli malzemelerdir. Arojel yapı, %90'ın üzerinde gözenekliliğe ve 500–1200 m²/g yüzey alanına sahip olabilir. Bu yapı, kompozit malzemeye hafiflik, esneklik ve geniş iç yüzey sağlar (Brinker ve Scherer, 1990). Piezoelektrik katkı fazı, piezoelektrik özellik gösteren katkı malzemeleri genellikle şunlardır: Seramik katkılar, ZnO (çinko oksit), BaTiO₃ (baryum titanat), PZT (kurşun zirkonat titanat). Polimer katkılar, PVDF (poliviniliden florür), PVA (polivinil alkol),

TOCN (Tempo oksitlenmiş selüloz nanofibrilleri). 2D nano yapılar, MoS₂ (Molibden disülfid), MXene. Bu katkılar, matrisin gözenekli yapısı içerisine homojen şekilde dağıtılır ve aerogelin deformasyonu sırasında elektriksel polarizasyon oluşturarak enerji üretimini mümkün kılar (Song ve diğ., 2022). Ara Bağlayıcı ve Takviye Polimerler, Yüksek esneklik, dayanıklılık ve dağılım sağlamak için PVA, selüloz türevleri, β -laktoglobulin gibi biyopolimerler aerogel yapısında bağlayıcı olarak kullanılır. Bu tür katkılar, hem malzemenin işlenebilirliğini hem de çevresel sürdürülebilirliğini artırır. Bu sistemlerin temel çalışma prensibi, piezoelektrik etkiye dayanır. Mekanik kuvvet uygulandığında, piezoelektrik katkı malzemeleri elektriksel yük üretir (Quan ve diğ., 2024). Çizelge 1.1’ de piezoelektrik özellik kazandırılmış kompozit aerojellerin avantajları verilmiştir. Aerogelin gözenekli ve esnek yapısı, bu deformasyonu daha verimli hale getirir. Ayrıca aerogeldeki hava boşlukları, elektret etkisi ile havanın da polarize olmasını sağlar, böylece elde edilen çıkış voltajı ciddi oranda artabilir (Song diğ., 2022). Benzer şekilde, ZnO–PVA tabanlı sistemler, adım kuvveti altında kendi kendine şarj olabilen süperkapasitörler haline gelebilmektedir (Verma ve diğ., 2023).

Çizelge 1.1. Piezoelektrik kompozit aerojellerin avantajları

Yüksek Esneklik	Polimer bazlı aerogel sayesinde klasik seramiklere kıyasla çok daha esnektir.
Hafiflik	Yoğunluğu düşük olan aerogel yapılar ultra hafif cihazlar için uygundur.
Yüksek Yüzey Alanı	Geniş iç yüzey yük aktarımını kolaylaştırır, enerji dönüşümünü artırır.
Çevre Dostu Olma	Selüloz, PVA, TOCN gibi biyobozunur polimerlerle sürdürülebilirlik sunar.
İşlevsellik	Aynı anda enerji üretimi + sensör + depolama özelliği bir arada olabilir.

1.7. Piezoelektrik Özellik Kazandırılmış Polivinil Alkol Aerojeller

Polivinil alkol (PVA), biyobozunur, biyouyumlu ve hidrofilik özellikleri sayesinde birçok uygulama alanında tercih edilen bir polimerdir. Aerogel formuna dönüştürüldüğünde, yüksek porozite, düşük yoğunluk ve geniş yüzey alanı gibi avantajlı özellikler sergiler. Ancak, saf PVA piezoelektrik özellik göstermediği için, bu özellikleri kazanabilmesi amacıyla içerisine piezoelektrik nanoparçacıklar entegre edilmektedir. Özellikle baryum titanat (BaTiO₃), çinko oksit (ZnO) ve poliviniliden florür (PVDF) gibi piezoelektrik malzemeler, PVA matrisine eklendiğinde yapının mekanik deformasyonlar karşısında elektriksel tepki üretmesi sağlanmaktadır (Du ve

diğ., 2023). Bu tür kompozit aerojellerin üretiminde, yönlendirilmiş gözenek yapısı elde etmek amacıyla dondurarak kurutma gibi teknikler kullanılmakta ve böylece piezoelektrik cevabın artırılması hedeflenmektedir. Ayrıca, elektrostatik alan altında uygulanan polarizasyon işlemleri de malzemenin piezoelektrik performansını optimize etmektedir (Kim ve diğ., 2015). Piezoelektrik özellik kazandırılmış PVA aerojeller, enerji hasadı, giyilebilir elektronikler ve sensör sistemleri gibi alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir. Tüm bu özellikler, söz konusu aerojelleri çevre dostu, esnek ve işlevsel piezoelektrik malzemeler arasında öne çıkarmaktadır.

1.7.1. BCZT ($\text{Ba}_{0,85}\text{Ca}_{0,15}$)($\text{Ti}_{0,9}\text{Zr}_{0,1}$) O_3 içeren aerjel kompozitler

Kurşun içermeyen piezoelektrik seramikler arasında öne çıkan Baryum Kalsiyum Zirkonat Titanyum (BCZT), yüksek piezoelektrik katsayısı, çevre dostu yapısı ve iyi elektriksel özellikleri sayesinde piezoelektrik enerji hasadı uygulamalarında dikkat çeken bir malzemedir. Geleneksel olarak kullanılan PZT sistemlerine alternatif olarak geliştirilen BCZT, toksik kurşun içermemesi ve biyouyumluluğu ile sürdürülebilir enerji teknolojilerine daha uygun bir seçenek sunmaktadır (Liu ve diğ., 2018). Aerojel formuna entegre edildiğinde ise, BCZT katkılı yapılar hem düşük yoğunluklu hem de yüksek yüzey alanlı piezoelektrik sistemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Aerojel matris olarak genellikle bakteriyel selüloz, polivinil alkol (PVA) veya TOCN gibi polimerik yapılar tercih edilmekte, BCZT nanoparçacıkları bu matris içerisinde homojen olarak dağıtılmaktadır. BCZT katkılı aerjeller, gözenekli yapıları sayesinde hem mekanik deformasyona duyarlıdır hem de yüksek yüzey polarizasyonu sağlayarak elektriksel yanıtı artırabilmektedir. Gözenekli yapı içerisindeki hava boşlukları, elektret etkisi ile katkı malzemelerinin elektriksel alan üretimini destekleyici bir rol oynar. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, BCZT'nin yönlendirilmiş dondurarak kurutulmuş selüloz veya PVA tabanlı aerjellere entegre edilmesiyle, 30–60 V açık devre gerilimi ve 1–2 μA düzeyinde kısa devre akımı elde edilebildiği bildirilmiştir (Song ve diğ., 2022). Bu değerler, esnek piezoelektrik jeneratörlerin insan hareketi, basınç ya da titreşim gibi mekanik uyaranlardan anlamlı enerji üretmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, bazı çalışmalarda BCZT katkılı aerjellerin jest tanıma gibi yapay zekâ destekli sensör sistemlerine entegre edildiği ve %100'e varan tanıma doğruluğu sağladığı rapor edilmiştir (Quan ve diğ., 2024). BCZT'nin kristal yapısındaki Ca/Ba ve Zr/Ti oranları, piezoelektrik performans üzerinde doğrudan etkilidir. Bu oranlardaki değişim, faz geçiş sıcaklıklarını, kristal

simetrisindeki polar yönelimleri ve dolayısıyla piezoelektrik katsayıları belirlemektedir (Yan ve diğ., 2019). Aerojel formda bu etkilerin daha stabil ve yönlendirilebilir olduğu, literatürde belirtilen bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, BCZT'nin biyouyumlu olması nedeniyle, özellikle giyilebilir teknolojiler ve biyosensör uygulamalarında daha güvenli kullanım imkânı sunmaktadır. Özetle, BCZT katkılı aerogeller, yüksek performanslı, kurşunsuz ve esnek enerji hasadı sistemlerinin geliştirilmesi açısından son derece umut verici bir malzeme sınıfını temsil etmektedir.

1.7.2. Çinko oksit içeren aerogel kompozitler

Çinko oksit (ZnO), yüksek piezoelektrik katsayısı, kimyasal stabilitesi, biyouyumluluğu ve bol bulunabilirliği sayesinde enerji hasadı uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir yarı iletken malzemedir. ZnO, wurtzit tipi kristal yapısında iyonik bağlara sahip olması nedeniyle piezoelektrik etki göstermekte ve bu özelliği ile esnek enerji üretim sistemlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Aerojel yapısına entegre edildiğinde, ZnO nanoparçacıkları gözenekli ve hafif matris içerisinde mekanik deformasyona yüksek duyarlılıkla tepki verebilmekte ve elektriksel yanıt üretmektedir. Özellikle polivinil alkol (PVA), selüloz nanofibrilleri (CNF) ve diğer biyopolimerlerle oluşturulan ZnO aerogel kompozitleri, piezoelektrik performansları ile dikkat çekmektedir. ZnO katkılı aerogellerin üretiminde genellikle dondurarak kurutma (freeze-drying) yöntemi kullanılarak hiyerarşik gözenekli yapılar oluşturulmakta ve böylece mekanik esneklik ile elektriksel yanıt birlikte optimize edilmektedir (Chen ve diğ., 2024). ZnO'nun aerogel yapı içerisinde homojen dağılımı, sadece mekanik enerjiden elektrik üretimini değil; aynı zamanda sensör, süperkapasitör ve nem dedektörü gibi çok işlevli sistemlerde de kullanılmasını mümkün kılar. Son çalışmalar, ZnO-PVA-CNF tabanlı aerogel filmlerin, titreşimli ortamlarda enerji üretimi sağlayabildiğini göstermiştir. BaTiO₃ gibi ikinci bir piezoelektrik katkı eklendiğinde ise enerji üretimi artmaktadır (Chen ve diğ., 2024). Ayrıca, ZnO'nun ayırıcı olarak da görev yaptığı bazı hibrit sistemlerde, cihazın kendini mekanik kuvvetle şarj edebildiği, yani "self-charging" özelliğe sahip süperkapasitör yapılarının elde edildiği bildirilmiştir (Verma ve diğ., 2023). Bu yapıların avantajı, aynı anda enerji üretimi ve depolama sağlayabilmeleridir. ZnO'nun iyonik yapısı, aerogel içinde iyon taşınımını kolaylaştırmakta ve elektroaktif bölgelerin sayısını artırarak piezoelektrik performansı iyileştirmektedir (Bhadwal ve diğ., 2023).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Aerojellerin piezoelektrik enerji hasadı alanındaki kullanımı, son yıllarda büyük ilgi gören yenilikçi bir araştırma konusudur. Yüksek gözeneklilik, düşük yoğunluk ve olağanüstü mekanik ve termal özellikler sunan aerojeller, piezoelektrik malzemelerle birleştirildiğinde enerji dönüşüm verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir (Gurav ve diğ., 2010; Pierre ve Pajonk, 2002). Küresel ölçekte artan enerji ihtiyacı ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim, piezoelektrik enerji hasadı teknolojilerini daha da stratejik hale getirmiştir (Safari ve diğ., 2006). Piezoelektrik enerji hasadı, mekanik titreşimleri ve çevresel hareketleri doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sürdürülebilir bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır (Dagdeviren ve diğ., 2014). Geleneksel piezoelektrik malzemeler, enerji toplama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, esnek ve hafif yapılarla entegrasyonlarında önemli kısıtlamalar mevcuttur (Kim ve diğ., 2011). Bu nedenle, aerojel gibi ultra hafif malzemelerin piezoelektrik sistemlerle entegre edilmesi, hem enerji dönüşüm etkinliğini artırmak hem de mekanik esnekliği ve çevresel dayanımı iyileştirmek için umut vaat etmektedir (Han & Ko, 2021). Bununla birlikte, aerojel yapıların yüksek gözenekliliği, piezoelektrik katkı malzemeleri ile bütünleştirme süreçlerinde mekanik stabilite ve etkin yük transferi gibi teknik zorluklar da doğurmaktadır (Long ve diğ., 2021).

Mevcut literatürde aerojel bazlı piezoelektrik sistemlerin enerji hasadı potansiyeline dair önemli çalışmalar bulunmasına rağmen, özellikle katkı partiküllerinin dağılımı, ara yüzey etkileşimleri ve presleme gibi yöntemlerle malzeme özelliklerinin optimize edilmesi konusunda araştırmalar devam etmektedir (Lv ve diğ., 2023). Bu tez kapsamında, PVA/PBI bazlı piezoaerojel yapılar içine ZnO ve BCZT gibi metal oksit katkıların entegre edilmesi ve presleme işlemi ile piezoelektrik performansın artırılması hedeflenmektedir. Bu bölümde, literatürde yapılan çalışmalar detaylı şekilde incelenecek, mevcut bilimsel bilgiler özetlenecek ve araştırma boşlukları tartışılarak gelecekteki çalışmalar için temel oluşturulacaktır.

Geleneksel silika aerojellerin kırılgenlik sorununu aşarak mekanik özellikleri iyileştirilmiş ve yüksek şeffaflık sağlayan yeni bir PVA aerojel geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, yenilikçi bir tek aşamalı durma yöntemi kullanılarak aerojel üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, geleneksel dondurma-çözme (freeze-thaw) metoduna kıyasla daha kısa jelleşme süresi sunar ve soğutucu ekipmana ihtiyaç duymaz, böylece enerji tasarrufu sağlar ve çevre dostu bir üretim süreci sunar. PVA aerojelin Young modülü 4.2596 MPa olarak ölçülmüş olup, bu değer silika, bakır

nanotel (Cu NW) ve grafen aerojellerden yüksektir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, süperkritik kurutma ile üretilen PVA aerojelin hiyerarşik gözenekli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Bu yapı, büyük gözeneklerin içinde daha küçük gözenekler içererek mekanik dayanımı artırırken hafifliği ve esnekliği korur. Beer-Lambert yasası ile hesaplanan geçirgenlik analizine göre, tek aşamalı durma yöntemiyle üretilen PVA aerojel yüksek ışık geçirgenliği sergilemektedir. Parçacık boyutu, Rayleigh saçılımı mekanizmasına uygun olacak şekilde optimize edilmiştir, bu da malzemeye hafif mavi bir görünüm kazandırmaktadır. Termogravimetrik analiz sonuçları, PVA aerojelin geleneksel PVA filmlere ve peletlere kıyasla daha iyi ısı direncine sahip olduğunu göstermiştir. Isıtma sonrası yapılan analizlerde, aerojelin ısıl bozunma sıcaklığının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Elde edilen aerojel, gelişmiş ısı yalıtımı, ışık geçirgenliği ve esneklik özellikleri sayesinde ilaç salınımı, fototermal uygulamalar ve hafif yapısal malzemeler gibi çeşitli alanlarda potansiyel kullanım sunmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen PVA bazlı aerojel, geleneksel silika aerojellere kıyasla daha dayanıklı, esnek ve şeffaf bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Özellikle fototermal enerji dönüşüm sistemlerinde ve biyomedikal uygulamalarda umut vadeden bir malzeme olarak değerlendirilmektedir (Li ve diğ., 2024).

Geri dönüştürülebilir ve yüksek performanslı metal koordinasyon bağlarıyla çapraz bağlı poli-benzimidazol (PBI) aerojellerin geliştirilmesini ele almaktadır. Bu aerojeller, alev geciktirici, ısı yalıtımı sağlayıcı ve boya adsorpsiyon özellikleriyle öne çıkmaktadır. Elde edilen PBI aerojeller, yüksek gözenekliliğe (%93.75 - %96.55), düşük yoğunluğa (44.88 - 80.10 mg/cm³) ve geniş yüzey alanına (443.48 - 660.23 m²/g) sahiptir. Mekanik olarak dayanıklıdır ve sıkıştırma testlerinde yüksek modül değerleri göstermiştir (2922.16 kPa). Aerojeller, 600°C'nin üzerinde ayrışma sıcaklığına sahiptir ve düşük termal iletkenlikleri (0.0292 W/mK) ile yüksek sıcaklık uygulamalarında ısı yalıtımı için uygundur. Alev geciktirici özellikleri sayesinde yanmaz ve alevi söndürebilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca ahşap gibi yanıcı malzemeler için koruyucu kaplama olarak kullanılabilir. Aerojeller, EDTA çözeltisi ile parçalanarak geri kazanılabilir ve yeniden üretilebilir. Geri dönüştürülen aerojellerin mekanik, termal ve adsorpsiyon özellikleri ilk üretimle büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. Hidrofobik ve hidrofilik boyaların giderilmesinde etkili bir adsorban olarak çalışmaktadır. Geniş yüzey alanı ve kimyasal dayanıklılığı sayesinde su arıtımı gibi çevresel uygulamalar için uygun bir malzemedir. Beş kez tekrar kullanılabilir ve yeniden üretildiğinde orijinal adsorpsiyon kapasitesine ulaşabilir. Bu çalışma, yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik

dayanıklılık ve geri dönüştürülebilirlik özelliklerini bir araya getirerek sürdürülebilir aerojel malzemeleri geliştirme konusunda önemli bir adım sunmaktadır (Liu ve diğ., 2022).

Piezoelektrik etki, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için en umut verici elektromekanik mekanizmalardan biridir. Ancak, doğal polimer bazlı piezoelektrik malzemeler genellikle düşük piezoelektrik performansa sahiptir. Bu çalışmada, TEMPO oksitlenmiş selüloz nanofibrilleri (TOCN) ve MoS₂ nano yaprakçıkları kullanılarak esnek, gözenekli piezoelektrik aerojel filmler geliştirilmiştir. Elde edilen aerojel filmler, geniş özgül yüzey alanlarına ve bol miktarda mezogözeneklere sahip olup, MoS₂ nano yaprakçıkları ve gözeneklerdeki hava 20 MV/m'lik bir elektrik alan altında polarize edildiğinde çok iyi piezoelektrik özellikler sergilemiştir. Bu filmler, piezoelektrik nanogeneratörlere (PENG) monte edildiğinde 42 V açık devre voltajı, 1.1 μ A kısa devre akımı ve 1.29 μ W/cm² maksimum yüzey güç yoğunluğu üretmiştir. Bu özellikler, bu malzemeleri enerji hasadı için ümit verici piezoelektrik malzemeler haline getirmiştir. Enerji toplama teknolojilerine duyulan ihtiyaç arttıkça, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen malzemeler büyük ilgi görmektedir. Piezoelektrik malzemeler, bu alanda yaygın olarak kullanılan ve geliştirilen sistemlerden biridir. Piezoelektrik etki ilk olarak Curie kardeşler tarafından 1880 yılında keşfedilmiş olup, çinko oksit (ZnO), kurşun zirkonat titanat (PZT), baryum titanat (BaTiO₃) ve poliviniliden florür (PVDF) gibi piezoelektrik seramikler ve polimerler üzerinde geniş çapta araştırılmıştır. Ancak, geleneksel piezoelektrik malzemelerin çoğu toksik ağır metaller içermekte ve üretim maliyetleri yüksek olmaktadır. Bu nedenle, doğal polimer bazlı piezoelektrik malzemeler (örneğin selüloz, kemikler ve kollajen fibrilleri) sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Selüloz, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir ve çevre dostu olması nedeniyle özellikle dikkat çekmektedir. Ancak, saf selülozun piezoelektrik özelliği oldukça düşüktür ve güç çıktısı yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, MoS₂ nanosheets içeren piezoelektrik TOCN aerojel filmleri geliştirilmiş ve yüksek piezoelektrik aktivite sağlanmıştır. Gözenekli yapı, elektret etkisi sayesinde hava kabarcıklarının da polarizasyonunu mümkün kılmış ve böylece piezoelektrik performans önemli ölçüde artmıştır (Zong ve diğ., 2023).

Bu literatürde, gözenekli selüloz nanofibril (CNF) ve poli(dimetilsiloksan) (PDMS) aerojel filmleri kullanılarak esnek ve yüksek performanslı piezoelektrik nanogeneratörler (NGs) geliştirilmiştir. Çevre dostu bir dondurarak kurutma yöntemi ile

üretileen gözenekli CNF aeröjel filmleri, sıkıştırılarak mekanik dayanımı artırılmış ve yüzeylerine PDMS kaplanarak piezoelektrik özellikleri iyileştirilmiştir. Elde edilen piezoelektrik nanöjeneratörler, 60.2 V açık devre voltajı, 10.1 μ A kısa devre akımı ve 6.3 mW/cm³ güç yoğunluğu üretmiştir. Bu enerji, 19 adet mavi LED'i doğrudan çalıştırabilmiş ve bir kapasitörü 3.7 V'a kadar şarj edebilmiştir. Geliştirilen nanöjeneratörler, yüksek esneklik, dayanıklılık ve büyük ölçekli üretime uygunluk gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikleriyle, esnek ve kendinden enerji sağlayan elektronik cihazlar için umut vadeden bir teknoloji sunmaktadır. Fosil yakıtların azalması ve çevresel kaygılar, alternatif yenilenebilir enerji teknolojilerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Piezoelektrik nanöjeneratörler (NGs), mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek mekanik titreşimler, ısı, akustik dalgalar ve insan hareketleri gibi çevresel enerji kaynaklarından elektrik üretebilmektedir. Daha önce çinko oksit (ZnO) nanotel bazlı NG'ler geliştirilmiş ve düşük güçlü elektronik cihazları çalıştırabilecek seviyeye ulaşmıştır. Ancak, bu malzemelerin üretim süreçleri karmaşık ve maliyetlidir. Perovskit malzemeler (BaTiO₃, Pb(Zr, Ti)O₃, KNN) gibi yüksek piezoelektrik katsayısına sahip bileşikler kullanılarak NG performansı artırılmaya çalışılmıştır. Ancak bu malzemeler genellikle kırılımandır ve esneklik gerektiren uygulamalar için uygun değildir. Selüloz, bol bulunan, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilen bir doğal polimerdir. Selüloz bazlı piezoelektrik malzemeler, sürdürülebilir enerji üretimi ve biyoyumlu uygulamalar için büyük bir potansiyel taşımaktadır. Ancak, saf selülozun piezoelektrik katsayısı düşüktür ve enerji dönüşüm verimliliği yetersizdir. Bu nedenle, gözenekli selüloz aeröjel yapıları ile piezoelektrik özellikleri artırılmış CNF/PDMS bazlı nanöjeneratörler geliştirilmiştir (Zheng ve diğ., 2016).

Bu literatür, ligninin sürdürülebilir bir biyopolimer olarak kullanılarak poliüretan aeröjellerin sentezlenmesini incelemektedir. Çalışmada üç farklı lignin türü Organosolv, Aquasolv ve Soda lignin karşılaştırılmış ve Organosolv ligninin en uygun aday olduğu belirlenmiştir. Kullanılan çözücünün, aeröjellerin mikro yapısı ve tekstürel özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Organosolv lignin, yüksek saflık oranı (%89,5 Klason lignin içeriği) ve yüksek hidroksil grubu içeriği sayesinde poliüretan sentezi için en uygun lignin olarak belirlenmiştir. Dimetil sülfoksit (DMSO) ve Piridin, ligninle yüksek afinite gösterdiği için yoğun ve düşük yüzey alanlı aeröjeller üretmiştir. Aseton, düşük afinite göstererek büyük ve makroporöz yapılar oluşturmuştur. DMSO/Aseton ve Piridin/Aseton Karışımları, Mikro gözenekli ve homojen aeröjellerin oluşmasını sağlamıştır. Özellikle %75 DMSO/Aseton karışımı, düşük yoğunluklu (0.49 g/cm³) ve

geniş spesifik yüzey alanına ($\sim 300 \text{ m}^2/\text{g}$) sahip aerogeller üretmiştir. Esneklik ve dayanıklılık testleri, çözücü seçiminin aerogellerin mekanik performansı üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, ligninin poliüretan aerogellerin üretiminde biyopoliol olarak kullanılmasının mümkün olduğunu ve çözücü seçiminin aerogellerin nihai özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Lignin bazlı poliüretan aerogeller, sürdürülebilir ve yüksek performanslı malzemeler üretmek için önemli bir fırsat sunmaktadır (Altarabeen ve diğ., 2024).

Bu çalışmada nanoselüloz aerogeller, özellikle piezoelektrik nanogeneratörler için kullanılmıştır. TEMPO-oksitlenmiş nanoselüloz (TOCN) ve MoS_2 (Molibden Disülfid) nanosheetleri ile takviye edilmiş nanoselüloz aerogeller, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmıştır. Bu aerogeller, esnek ve hafif yapıları sayesinde ayakkabı tabanına yerleştirilerek yürüyüş sırasında enerji üretmek amacıyla test edilmiştir. Aerogel yapısındaki gözenekler, mekanik baskıya maruz kaldığında elektrik yüklerinin yönlü hareketini sağlayarak piezoelektrik performansı artırmıştır. Bu sayede nanoselüloz bazlı aerogeller, yenilenebilir enerji üretimi ve esnek piezoelektrik cihazlar için umut verici malzemeler arasında gösterilmektedir. Nanoselüloz biyokompozitlerinin elektriksel ve piezoelektrik özelliklerini inceleyen kapsamlı bir derlemedir. Son yıllarda, hafif, çevre dostu ve çok işlevli malzemelere olan talebin artmasıyla birlikte nanoselüloz, elektronik uygulamalar için önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Ancak, nanoteknoloji alanındaki gelişmelere rağmen, nanoselüloz tek başına iletken bir malzeme değildir. Bu sorunu aşmak için iletken malzemelerle birleştirme veya kimyasal modifikasyon gibi çeşitli yöntemler araştırılmıştır. Nanoselüloz bazlı kompozitler, yenilikçi, çevre dostu ve esnek elektronik uygulamalar için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu malzemelerin piezoelektrik ve elektriksel özellikleri sayesinde sensörlerden enerji üretimine kadar birçok alanda kullanımı artmaktadır. Gelecekte, nanoselüloz tabanlı iletken malzemelerin ticari uygulamalarının genişletilmesi, sürdürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir elektroniklerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır (Habib ve diğ., 2024).

Çevredeki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen esnek nanogeneratörlerin (NG) geliştirilmesine odaklanmaktadır. Geleneksel piezoelektrik ve triboelektrik nanogeneratörler genellikle yüksek maliyet, düşük esneklik ve karmaşık üretim süreçleri gibi sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bu çalışmada, gözenekli aerogel filmler kullanılarak hava boşluğu (airgap) gerektirmeyen yeni bir kompakt triboelektrik nanogeneratör sınıfı geliştirilmiştir. Karboksimetil selüloz (CMC) bazlı gözenekli

aerojel filmler, mekanik zorlanma altında elektriksel çıkış üretme yeteneği sergilemektedir. Çalışmada, CMC aerojelleri polidimetilsiloksan (PDMS) ile kaplanarak esnek, kompakt bir triboelektrik nanojeneratör oluşturulmuştur. Elde edilen nanojeneratör, 30 V açık devre gerilimi (Voc) ve 4.5 μ A kısa devre akımı (Isc) üreterek 1.1 W/m² güç yoğunluğu sağlamaktadır. Bu elektriksel çıktının temel mekanizması olarak mekanoradikal temelli triboelektrik etki önerilmiştir. Gözenekli PDMS kaplamanın mekanik stres altında Si–O–Si bağlarını kırarak geçici dipol momentler oluşturduğu ve bu sayede elektrik üretimini sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca, bu mekanizma serbest radikal süpürücülerin eklenmesiyle test edilmiş ve serbest radikallerin elektrik üretimine katkıda bulunduğu doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, yüksek performanslı, düşük maliyetli ve esnek enerji üretim cihazlarının geliştirilmesine yönelik yeni bir yaklaşım sunmaktadır. PVA, farklı aerojel filmlerle karşılaştırma yapmak amacıyla test edilmiştir. Gözenekli PVA/PDMS aerojel filmi kullanılarak bir nanojeneratör üretilmiş ve bu cihazın elektriksel çıktıları ölçülmüştür. PVA/PDMS aerojel bazlı nanojeneratör, 26 V açık devre gerilimi (Voc) ve 3.6 μ A kısa devre akımı (Isc) üretmiştir. Gözenekli CMC/PDMS aerojel bazlı nanojeneratör ile karşılaştırıldığında biraz daha düşük elektrik üretmiştir. Bu durum, PVA'nın mekanik özellikleri ve gözenekliliğiyle ilgili olabilir. Bu çalışma, aerojel bazlı malzemelerin enerji hasadı uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koyarak, kendinden güç alan sensörler ve esnek elektronikler gibi alanlarda yenilikçi çözümler sunmaktadır (Tang ve diğ., 2017).

Polivinil alkol (PVA) aerojel tabanlı triboelektrik nanojeneratörlerin (TENG) şişme direnci ve mekanik kırılma gibi temel sınırlamalarını aşmak amacıyla β -laktoglobulin fibrilleri (BF) ile güçlendirilmiş bir yapı geliştirilmiştir. BF'nin PVA matrisine dahil edilmesiyle, malzemenin kırılma dayanımı sekiz kat, esnekliği ise dört kat artırılmış; şişme direnci ve biyouyumluluk özellikleri korunmuştur. Ayrıca, elektriksel çıkış performansı yaklaşık beş kat iyileştirilmiştir. Elde edilen BF-PVA esaslı biyobozunur TENG, kas aktivitesinin gerçek zamanlı izlenmesini sağlayarak, özellikle sinir hasarının iyileşme sürecini değerlendirme açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu sonuçlar, BF-PVA tabanlı TENG'lerin, biyointegrasyon gerektiren sürdürülebilir ve geçici elektronik sistemlerde geniş uygulama alanlarına sahip olabileceğini göstermektedir. Saf PVA malzemesi ile karşılaştırıldığında, β -laktoglobulin fibrilleri (BF) ile takviye edilen PVA film, triboelektrik çıkış gerilimini yaklaşık beş kat artırmıştır (45 V $\rightarrow$ 203 V). Bi-TENG'in güç çıkışı, yaklaşık 352.9 μ W

değerine ulaşmıştır (yaklaşık 300 M Ω yük direncinde). Cihaz, yaklaşık 25.000 temas-ayırılma döngüsü boyunca kararlı şekilde çalışmış, bu da uzun vadeli kullanım için uygun olduğunu göstermektedir. Olunum ve kas hareketlerini izleyen kendinden enerjili biyosensörlerde başarıyla kullanılmıştır. Kas kasılması gibi fizyolojik hareketlerle üretilen elektriksel sinyaller, gerçek zamanlı olarak algılanmıştır. Yani evet, cihaz yalnızca enerji üretmekle kalmamış, aynı zamanda bu enerjiyi pratik ve tıbbi izleme uygulamalarında da kullanabilecek şekilde verimli bir şekilde değerlendirmiştir (Quan ve diğ., 2024).

Bu literatürde, yönlendirilmiş dondurma yöntemiyle hazırlanan ve polipirol (PPy) ile kaplanan PVA/bakteriyel selüloz/MXene (PPy@PBM) kompozit aerojellerin, yüksek performanslı süperkapasitör elektrotları ve basınç sensörleri olarak kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır. PPy@PBM-2 numunesi, 0.47 mA cm⁻² akım yoğunluğunda 3948 mF cm⁻²'lik yüksek bir alan özgül kapasitansı ve 951 μ W cm⁻² güç yoğunluğunda 178 μ Wh cm⁻² enerji yoğunluğu ile dikkat çekici elektro-kimyasal performans göstermiştir. Ayrıca, 10.000 şarj-deşarj döngüsü sonrasında %120 kapasitans koruma oranı ile mükemmel çevrim kararlılığı elde edilmiştir. Bu bulgular, PPy@PBM aerojellerin etkin enerji depolama kapasitesine sahip olduğunu ve dolayısıyla elektriksel enerji üretimi gerçekleştirebildiğini açıkça göstermektedir (Zheng ve diğ., 2023).

Çinko oksit (ZnO) nanoparçacıkları ile zenginleştirilmiş, esnek PVAZnO-KOH piezoelektrik matrisi kullanılarak kendi kendine şarj olabilen, nanotel tabanlı katı hal asimetrik süperkapasitör tasarlanmıştır. Mg-Co ve Ni nanotel elektrotları sırasıyla katot ve anot olarak görev yapmakta, ZnO ise hem ayırıcı hem de piezoelektrik enerji toplayıcı olarak işlev görmektedir. Cihaz, redoks reaksiyonlarını destekleyen yüksek özgül kapasitans (Mg-Co için 317.5 F/g, Ni için 114.28 F/g) ve olağanüstü döngüsel kararlılık (10.000 GCD döngüsünden sonra sırasıyla %100 ve %96.5 kapasite korunumu) sergilemiştir. Geliştirilen süperkapasitör, 1.5 A/g akım yoğunluğunda 70 F/g özgül kapasitansa ulaşmış, 5.46 Wh/kg enerji yoğunluğu ve 0.56 kW/kg güç yoğunluğu elde etmiştir. Thumb press (başparmakla basma) gibi basit mekanik kuvvetlerle yaklaşık -99 mV açık devre voltajı üretilenmiştir. Piezoelektrik etki sayesinde oluşan potansiyel fark, elektrotlar arası iyon hareketini tetiklemiş ve bu sayede cihaz kendi kendine şarj olabilen (self-charging) bir sistem haline gelmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma ZnO tabanlı piezoelektrik ayırıcı entegre edilerek geliştirilen asimetrik süperkapasitörün; Bu

sistem, gelecekte tümleşik enerji toplama ve depolama cihazları için umut vaat eden bir yaklaşım sunmaktadır (Verma ve diğ., 2023).

Çevresel mekanik enerjiyi verimli bir şekilde elektriğe dönüştürebilen, esnek ve yüksek performanslı bir piezoelektrik nanojeneratörün geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, elektrospinleme yöntemiyle sentezlenen CNF@ZnO/PVDF kompozit nanofiber yapılar kullanılmıştır. Selüloz nanofiber (CNF) ile ZnO nanoparçacıkları, poliviniliden florür (PVDF) matrisi içerisinde homojen şekilde dağıtılarak yüksek β -faz kristallenmesi sağlanmış ve bu sayede piezoelektrik özellikler iyileştirilmiştir. Geliştirilen nanojeneratör, 13.10 V açık devre gerilimi ve 464.3 nA kısa devre akımı üretebilmiş; $2.33 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ güç yoğunluğu ile enerji hasadı uygulamalarında umut vadeden bir performans sergilemiştir. CNF'nin yüksek yönlenebilirliği ile ZnO'nun piezoelektrik katkısı sinerjik etki oluşturarak, cihazın elektriksel çıktısını anlamlı ölçüde artırmıştır. Ayrıca geliştirilen sistem, hafifliği, esnekliği ve biyouyumlu yapısıyla giyilebilir elektronikler ve sürdürülebilir enerji sistemleri için potansiyel bir aday olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, çalışma hem malzeme mühendisliği hem de enerji teknolojileri açısından yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır (Zhu ve diğ., 2024) .

Metal koordinasyon bağlarıyla çapraz bağlanmış poli-benzimidazol (OPBI) esaslı aerojellerin geri dönüştürülebilirlik, alev geciktiricilik, termal yalıtım ve boya adsorpsiyonu gibi çok işlevli uygulamaları araştırılmıştır. Araştırmada, Cu^{2+} iyonları ile imidazol grupları arasında kurulan koordinasyon bağları sayesinde yüksek mekanik dayanım, düşük yoğunluk ($44.88\text{--}80.10 \text{ mg}/\text{cm}^3$), yüksek gözeneklilik ($\%93.75\text{--}96.55$) ve geniş yüzey alanı ($443.48\text{--}660.23 \text{ m}^2/\text{g}$) elde edilmiştir. Geliştirilen aerojeller, 600°C 'nin üzerindeki ayrışma sıcaklığı ve $0.0292 \text{ W}/\text{mK}$ düşük termal iletkenliği ile yüksek sıcaklık yalıtımında etkili olmuş; aynı zamanda alev geciktirici özellik göstermiştir. OPBI/ Cu^{2+} aerojelleri, çok çeşitli boya türlerini yüksek verimlilikle adsorbe edebilmekte ve EDTA ile yeniden işlenerek tekrar kullanılabilir. Geri dönüştürülen aerojeller, mekanik, termal ve adsorpsiyon performansı açısından orijinal halleriyle büyük ölçüde örtüşmektedir. Bu bulgular, OPBI bazlı aerojellerin sürdürülebilirlik odaklı ileri malzeme uygulamalarında umut vaat ettiğini göstermektedir (Liu ve diğ., 2022).

Çevresel ve endüstriyel uygulamalarda artan nem izleme ihtiyacına yönelik olarak, dış enerji kaynağına ihtiyaç duymadan çalışabilen, kendinden enerjili bir nem sensörü geliştirilmiştir. Sensör sisteminde, biyouyumlu ve çevre dostu malzemeler olan kitosan (CS) ve polivinil alkol (PVA) karışımı nem algılama filmi olarak kullanılmış,

güç kaynağı olarak ise CS ile zenginleştirilmiş poliviniliden florür (PVDF) kompozit filmine dayalı bir piezoelektrik jeneratör tasarlanmıştır. Piezoelektrik jeneratör, 10 N’lik bir mekanik kuvvet altında maksimum 16.2 V’luk çıkış üretmiş ve bu çıkışla nem sensörünü başarıyla çalıştırmıştır. Nem sensörü, bağıl nem (RH) değişimlerine bağlı olarak direnç değişimine neden olan şişme davranışı sergilemiş ve bu direnç değişimi, piezoelektrik potansiyelde gerilim değişimi olarak algılanmıştır. CS-PVA oranı %70/30 olan kompozit film en yüksek duyarlılığı (0.23 V/%RH) ve doğrusal yanıt katsayısını ($R^2 = 0.981$) göstermiştir. Cihaz, 21–89% RH aralığında geniş algılama yeteneği sunmuştur. Piezoelektrik jeneratör, 10 N’lik kuvvet uygulandığında maksimum 16.2 volt üretmiş ve dış güç kaynağına gerek kalmadan nem sensörünü çalıştırabilmiştir. Bu bağlamda cihaz, gerçek anlamda kendi kendine yetebilen bir sensör sistemidir. Çalışma, dış enerji kaynağı gerektirmeyen, biyouyumlu ve sürdürülebilir malzemelerden yapılmış, duyarlı ve doğrusal tepkiler gösteren bir kendinden enerjili nem sensörü geliştirilmesini başarılı şekilde gerçekleştirmiştir. Önerilen sensör; IoT tabanlı sistemler, uzaktan izleme, çevresel gözlem ve yeşil teknoloji uygulamaları için umut vadeden bir aday olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, dış güç kaynağına ihtiyaç duymadan çalışabilen, piezoelektrik enerji ile beslenen bir nem sensörü tasarlanmış ve üretilmiştir. Nem algılayıcı film, biyobozunur ve çevre dostu malzemeler olan kitosan (CS) ve polivinil alkol (PVA) karışımından elde edilmiştir. Piezoelektrik jeneratör olarak, CS ile zenginleştirilmiş PVDF kompozit film kullanılmıştır. Uygulanan 10 N mekanik kuvvet altında piezoelektrik jeneratör maksimum 16.2 V üretmiş ve bu enerji doğrudan nem sensörünü beslemiştir. CS-PVA oranı %70/30 olan sensör, 21–89% bağıl nem aralığında yüksek doğrusal yanıt ($R^2 = 0.981$) ve iyi duyarlılık (0.23 V/%RH) göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin kendi kendine yeten, çevre dostu ve düşük maliyetli sensör uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir (Zeeshan ve diğ., 2022).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

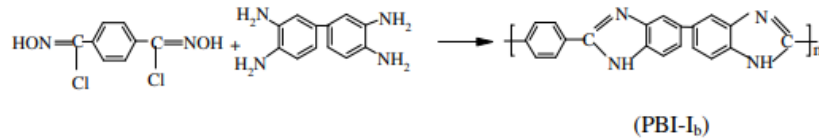
Bu çalışmada PVA ve PBI ile hazırlanan aerogeller, piezoelektrik ve enerji hasadı uygulamalarında dikkat çeken malzemelerdir. Bu malzemeler, PVA'nın esneklik ve piezoelektrik özellikleri ile PBI'nin termal ve kimyasal dayanıklılığı gibi avantajlarının birleşimiyle yüksek performanslı enerji hasadı sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Çalışmada kullanılan polimerlerden biri olan Polivinil Alkol (PVA), %98–99 oranında hidrolize, yaklaşık 89.000–98.000 g/mol moleküler ağırlığa sahip olup Sigma-Aldrich firmasından temin edildi. Bunun yanı sıra, Özaytekin ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada sentezlenen Polibenzimidazol (PBI) kullanıldı (Şekil 3.1). Bağlayıcı ajan olarak glutaraldehit tercih edildi. Çözücü sistemde ise Dimetil Sülfoksit (DMSO, %99.9 saflık, Tekkim) ve mutlak etanol (EtOH, %99.8 saflık, Sigma-Aldrich) kullanıldı. BCZT seramiğinin sentezinde; Baryum Karbonat (BaCO_3 , %99, Sigma-Aldrich), Kalsiyum Karbonat (CaCO_3 , %98.5–100.5, Sigma-Aldrich), Zirkonyum Oksit (ZrO_2 , %99, Sigma-Aldrich) ve Titanyum Dioksit (TiO_2 , %99–105.5, Sigma-Aldrich) kullanıldı. Ayrıca, Baryum Zirkonat (BZ) tohum içeriği %0.0 ila %7.5 mol aralığında değiştirildi; bu oranlar deneysel gruplar için sırasıyla %0.0, %2.5, %5.0 ve %7.5 mol olarak belirlendi. Kullanılan tüm çözücüler ve kimyasal maddeler analitik saflık derecesinde olup, doğrudan deneysel çalışmalarda kullanıldı. pH ayarlamaları için ise Hidroklorik Asit (HCl) çözeltisi kullanıldı.

PBI Sentezi

Literatürde PBI sentezi için özgün bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, aromatik hidroksamoil klorürlerin simetrik amin bileşikleriyle reaksiyonuna dayanmaktadır. Sentez süreci, dialdehitlerin oksim türevlerine dönüştürülmesi, ardından bu oksimlerin klor gazı ile reaksiyona sokularak hidroksamoil klorürlerin elde edilmesi ve son olarak bu bileşiklerin aromatik aminlerle polimerleştirilmesini içermektedir. Bu özgün sentez yöntemiyle elde edilen PBI polimerleri, yüksek termal stabilite ve kimyasal direnç gibi üstün özellikler sergilemektedir. Bu özellikler, PBI'nin özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları ve zorlu kimyasal ortamlarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Şekil 3.1' de PBI sentezinde kullanılan monomerlerin polimerleşme reaksiyonunu gösterilmiştir. Sentezlenen polimerlerin karakterizasyonu için çeşitli analiz teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler arasında FT-IR, ^1H -NMR, LC-MS, TGA/DTG ve logaritmik viskozite ölçümleri bulunmaktadır. Ayrıca, polimerlerin iletkenlik özellikleri dört prob yöntemiyle değerlendirilmiş ve bipolara iletim

mekanizmasına sahip oldukları belirlenmiştir. Korozyon direnci ve yapışma özellikleri de incelenerek, PBI'nin potansiyel uygulama alanları hakkında kapsamlı bilgiler elde edilmiştir. Bu sentez yöntemi, literatürdeki mevcut yöntemlere alternatif olarak, daha kontrollü ve özelleştirilebilir PBI üretimi sağlamaktadır. Bu da, PBI'nin çeşitli endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda daha geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmasına olanak tanımaktadır (Özaytekin, 2007).



Şekil 3.1. PBI-I_b (Özaytekin, 2007)

BCZT sentezi

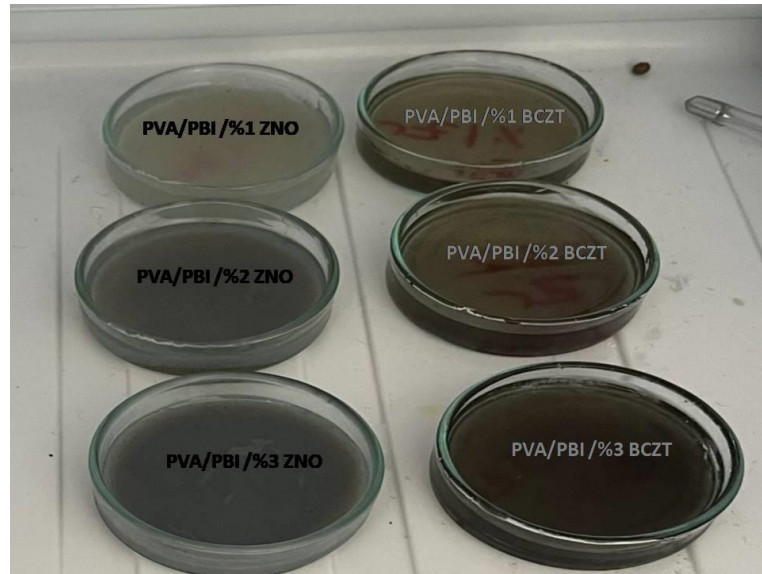
Ba_{0,85}Ca_(0,15)Zr_{0,1}Ti_{0,9}O₃ (BCZT) seramikleri tohum-indükleme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Tohumlar, başlangıç malzemesi olarak BaCO₃ ve ZrO₂ oksitler kullanılarak erimiş tuz yöntemiyle hazırlanmıştır. Başlangıç malzemeleri 24 saat boyunca bilyalı değirmende öğütülerek karıştırılmış ve 30 dakika boyunca KCl - NaCl tuzu (1:1) ile karıştırılmış ve ardından 2 saat boyunca 1100° C'de ısıtılmıştır. Bundan sonra, anyon izi bulunmayana kadar birkaç kez sıcak deiyonize su ile yıkanmış ve ardından 120° C'de bir fırında kurutulmuştur. BZ tohum tozu daha sonra BaCO₃, CaCO₃, ZrO ve TiO₂ tozu ile karıştırılmıştır. Karışık toz, zirkonya öğütme ortamı ile etanol içinde 24 saat boyunca bilyalı öğütülmüş ve ardından kurutulmuştur. Tüm seramik tozları 1100° C'de 2 saat boyunca kalsine edilmiştir. Daha sonra, kalsine edilmiş toz sırasıyla yaklaşık 2.0 mm ve 10 mm kalınlık ve çapta bir disk şeklinde preslenmiş ve ardından 1100° C'de 4 saat boyunca sinterlenmiştir (Parjansri ve diğ., 2016).

PVA, saf su içerisinde manyetik karıştırıcı yardımıyla 60 °C'de tamamen çözünene kadar karıştırılmıştır. Kütlece %1 oranında hazırlanan PBI çözeltisi ise, DMSO içerisinde 60 °C'de çözülerek viskoz bir yapı elde edilmiştir. Her iki çözelti, homojen bir sistem oluşturacak şekilde birleştirilmiş ve oda sıcaklığında, yaklaşık 4000 rpm hızla çalışan bir homojenizatör yardımıyla 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu karıştırma süreci ve ekipmanı Şekil 3.2'de detaylı olarak gösterilmektedir. Bu karışıma glutaraldehit ilave edilerek çapraz bağlanma sağlanmıştır. Gerçekleşen bu fiziksel jelleşme süreci, elde edilen aerogelin gözenekli yapısının oluşmasında ve nihai ürünün mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.2.Çözeltiyi homojenizatörde karıştırma işlemi

Hazırlanan jel, öncelikle belirli bir kalıba yerleştirildi ve 80 °C’de 12 saat boyunca sızdırmaz bir koşulda bekletildi. Bu aşamada kullanılan düzenek Şekil 3.3’te gösterilmektedir. Bu işlem, jelin yaşlandırılmasını sağlayarak, polimer yapısının istenen özellikleri kazanmasına olanak tanımaktadır. Yaşlandırma işleminin ardından, jel kalıptan çıkarılmış ve DMSO çözeltisi kademeli olarak mutlak alkol ile değiştirildi. Bu değişim süreci, jel matrisinin çözücü yapısının aşamalı bir şekilde değiştirilmesini sağlamak amacıyla gerçekleştirildi. Çözücü değişimi, sırasıyla 75/25, 50/50, 25/75 ve 0/100 hacim oranlarında DMSO ve alkol karışımına yerleştirilen jeller ile yapılmış olup, her bir çözücü değişim işlemi yaklaşık 24 saat sürdü.



Şekil 3.3. Kalıba yerleştirilen jeller

Son olarak, alkolle doyurulmuş jeller, 50 °C sıcaklıkta, 60 dakika boyunca ve 120 bar basınç altında süperkritik karbondioksit (CO₂) ortamında kurutulmuştur. Bu yöntem, jelin gözenekli yapısının korunmasına olanak sağlarken, sistemdeki sıvı çözücünün yüzey gerilimi oluşturmaksızın tamamen uzaklaştırılmasına imkân tanır. Bu işleme ilişkin deneysel düzenek ve koşullar Şekil 3.4'te ayrıntılı olarak sunulmuştur. Süperkritik CO₂ ile gerçekleştirilen kurutma işlemi, geleneksel ısı veya vakumla kurutma yöntemlerine kıyasla daha kontrollü bir süreç sunar. Bu sayede, gözeneklerin çökmesi engellenir ve aerogelin yüksek poroziteye sahip, hafif ve yapısal olarak stabil formu elde edilir. Sürecin bu özellikleri, üretilen aerogelin istenen fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olmasında belirleyici bir rol oynar.



Şekil 3.4. Süperkritik CO₂ kurutma sistemi

PVA ve PBI ile hazırlanan aerojeller, piezoelektrik ve enerji hasadı alanlarında yüksek verimlilik ve sürdürülebilirlik sağlamak için umut verici bir malzeme sınıfı sunmaktadır. Bu malzemelerin performansını daha da artırmak için nano yapılar veya farklı ko-polimer kombinasyonları gibi modifikasyonlar üzerinde çalışmalar yapılabilir. Bu tür geliştirmeler, aerojellerin piezoelektrik özelliklerini güçlendirerek, enerji hasadı sistemlerinin daha etkin ve verimli hale gelmesine katkıda bulunacaktır.

3.1. Kullanılan Cihazlar

3.1.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizi

Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi kızılötesi ışığın, madde tarafından soğurulması ve emisyon kızılötesi spektrumunun elde edilmesi esasına dayanan bir spektroskopik yöntemidir. Moleküllerin yapısında bulunan bağların titreşim frekanslarının ölçümünü yaparak yapıda bulunan fonksiyonel grupların tanınmasını sağlandı. Thermo Scientific / Nicolet IS20 Gelişmiş LightDrive optik motor teknolojisine sahip olan cihaz, yüksek spektral çözünürlük ($0,25 \text{ cm}^{-1}$) ve tek gürültü oranı (50.000:1) ile ortamda bulunan kirleticileri tanımlamakta veya az miktarlarda bulunan hataları karakterize etmektedir. Piezoaerojel malzemelerin kristal fazların oluşumunu belirlemek için kullanıldı.

3.1.2. Osiloskop

Osiloskop cihazı, elektrik voltajını zamanın bir fonksiyonu olarak sinyalleri iki boyutlu bir çizim halinde grafiksel olarak gösteren bir tür elektronik test cihazıdır. Çalışmada piezoaerojel malzemelerin tepeden tepeye çıkış voltajı, AATech ADS-3102B marka ve modelde bir dijital osiloskop kullanılarak belirlendi.

3.1.3. Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (Fe-Sem)

Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) yüzey morfolojisi ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi amacıyla kullanılır. Bu çalışmada, süper kritik CO₂ yöntemi ile elde edilen piezoaerojellerin yapıları, çapdağılımları incelenmiştir. Analizler, yüksek çözünürlük kabiliyetine sahip GeminiSEM500 (ZEISS) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3.1.4. Two-Probe

Bu çalışmada, hazırlanan aerojel örneklerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla two-probe yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler, MBRAUN MB 20G LMF cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, numunenin iki ucuna iletken probalar temas ettirilerek belirli bir gerilim uygulanmış ve numuneden geçen akım ölçülmüştür. Elde edilen akım-gerilim (I-V) verileri doğrultusunda, Ohm kanunu ($V = IR$) temel alınarak örneklerin elektriksel direnci hesaplanmıştır. Two-probe yöntemi, ölçüm sistemine dahil olan temas direnci ve kablo direncini de içerdiği için özellikle yüksek dirençli veya yarı iletken özellik gösteren örnekler için uygun bir ölçüm tekniğidir.

Aerojel örneklerinin düşük yoğunluklu ve gözenekli yapısı göz önünde bulundurularak, bu yöntem ile genel elektriksel davranışın değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

3.1.5. Termogravimetrik ve diferansiyel taramalı kalorimetre analiz cihazı (TGA)

Bu çalışmada, aerojel örneklerinin termal stabilitesi, bozunma davranışı ve ısı geçiş özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Termogravimetrik Analiz (TGA) analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz, METTLER TOLEDO TGA/DSC 2 Star System cihazı kullanılarak yapılmıştır. TGA yöntemi ile örneklerin sıcaklığa bağlı olarak kütle değişimleri izlenmiş, böylece malzemenin bozunma sıcaklıkları ve termal kararlılığı hakkında bilgi elde edilmiştir. Analiz azot atmosferi altında, belirli bir ısıtma hızı 10 °C/dk ile oda sıcaklığından 900 °C'ye kadar gerçekleştirilmiştir. Bu termal analizler, aerojelin yapısal bütünlüğünü koruyabildiği sıcaklık aralığını ve piezoelektrik uygulamalarda karşılaşılabileceği ısı koşullara karşı dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla yapılmıştır.

3.1.6. Süperkritik Karbondioksit (CO₂) Kurutma Sistemi

Bu çalışmada, hazırlanan jel yapılarının gözenekli yapısını koruyarak aerojel formuna dönüştürülmesi amacıyla süperkritik karbondioksit (CO₂) kurutma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, önceden alkolle doygunlaştırılan jel örnekleri, belirli sıcaklık (50 °C), süre (60 dakika) ve basınç (120 bar) koşulları altında süperkritik CO₂ ortamında kurutulmuştur. Süperkritik koşullar altında çözücünün yüzey gerilimi ortadan kalktığı için, gözenek çökmesi yaşanmadan çözücü ortamdan uzaklaştırılabilmekte ve böylece hafif, yüksek poroziteli, yapısal olarak stabil aerojeller elde edilmektedir. Süperkritik CO₂ kurutma yöntemi, geleneksel vakum ya da ısı kurutma tekniklerine kıyasla, gözenekli yapının korunmasında çok daha etkili olup, özellikle piezoelektrik özelliklerin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

3.1.7. Avometre

Avometre, aynı anda gerilim (voltaj), akım ve direnç gibi elektriksel büyüklükleri ölçebilen çok işlevli bir ölçüm cihazıdır. Piezoelektrik ve dielektrik malzemelerin karakterizasyonunda, özellikle malzemenin yük altında oluşturduğu elektriksel yanıtların (gerilim ve akım) ölçülmesinde kullanılır. Bu çalışmada avometre, numunelere uygulanan mekanik stres sonrası oluşan gerilim çıkışlarını doğrudan ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Dolaylı olarak, bu ölçümler malzemenin dielektrik

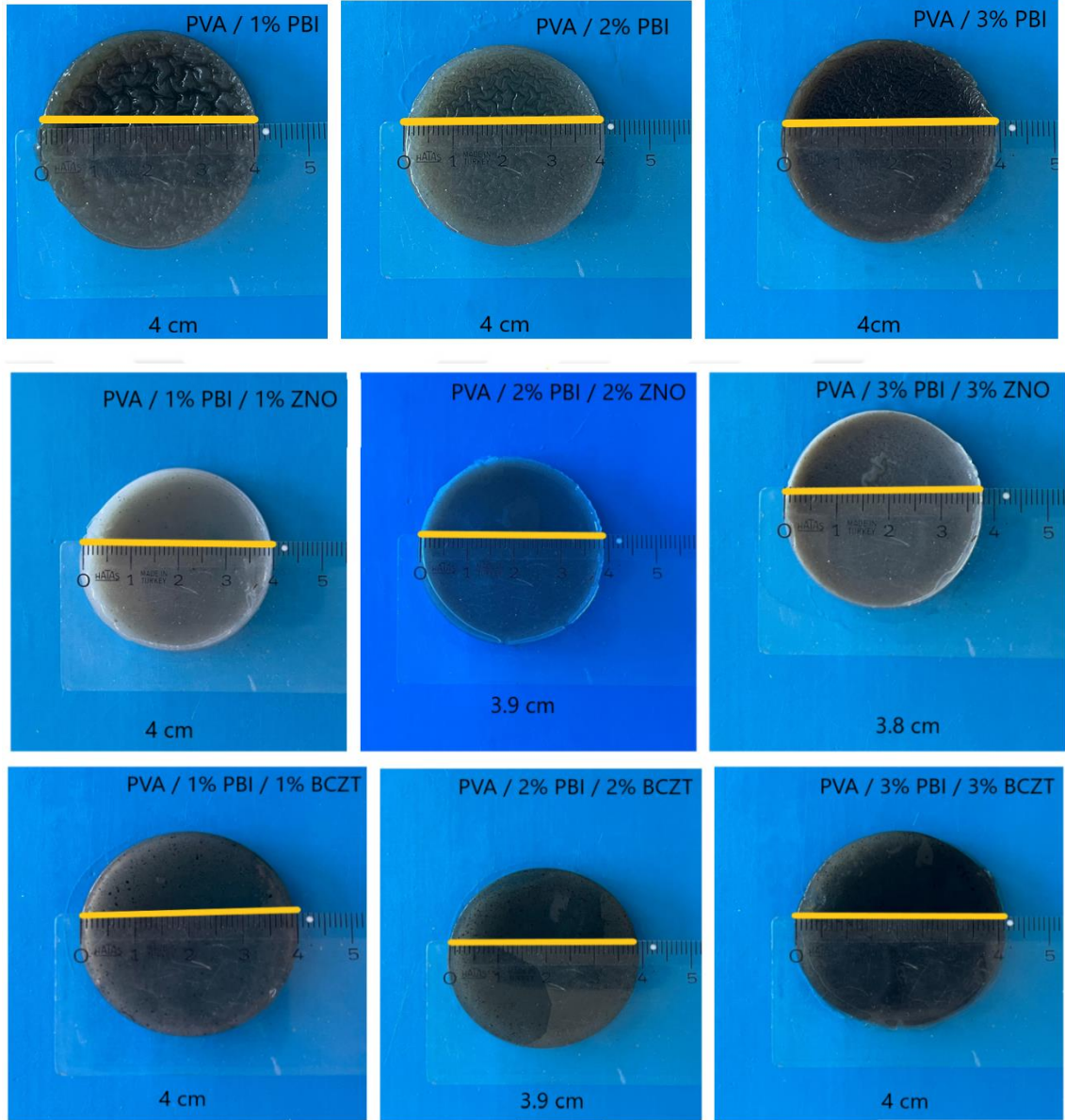
tepki potansiyelinin ve enerji dönüşüm verimliliğinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle düşük voltaj ve mikroamper düzeyindeki sinyallerin güvenilir biçimde tespiti için, hassasiyet değeri yüksek, dijital ekranlı bir avometre tercih edilmiştir. Bu bağlamda cihaz, dielektrik performansa bağlı olarak oluşan elektriksel karakteristiklerin ölçümünde kullanılmıştır.



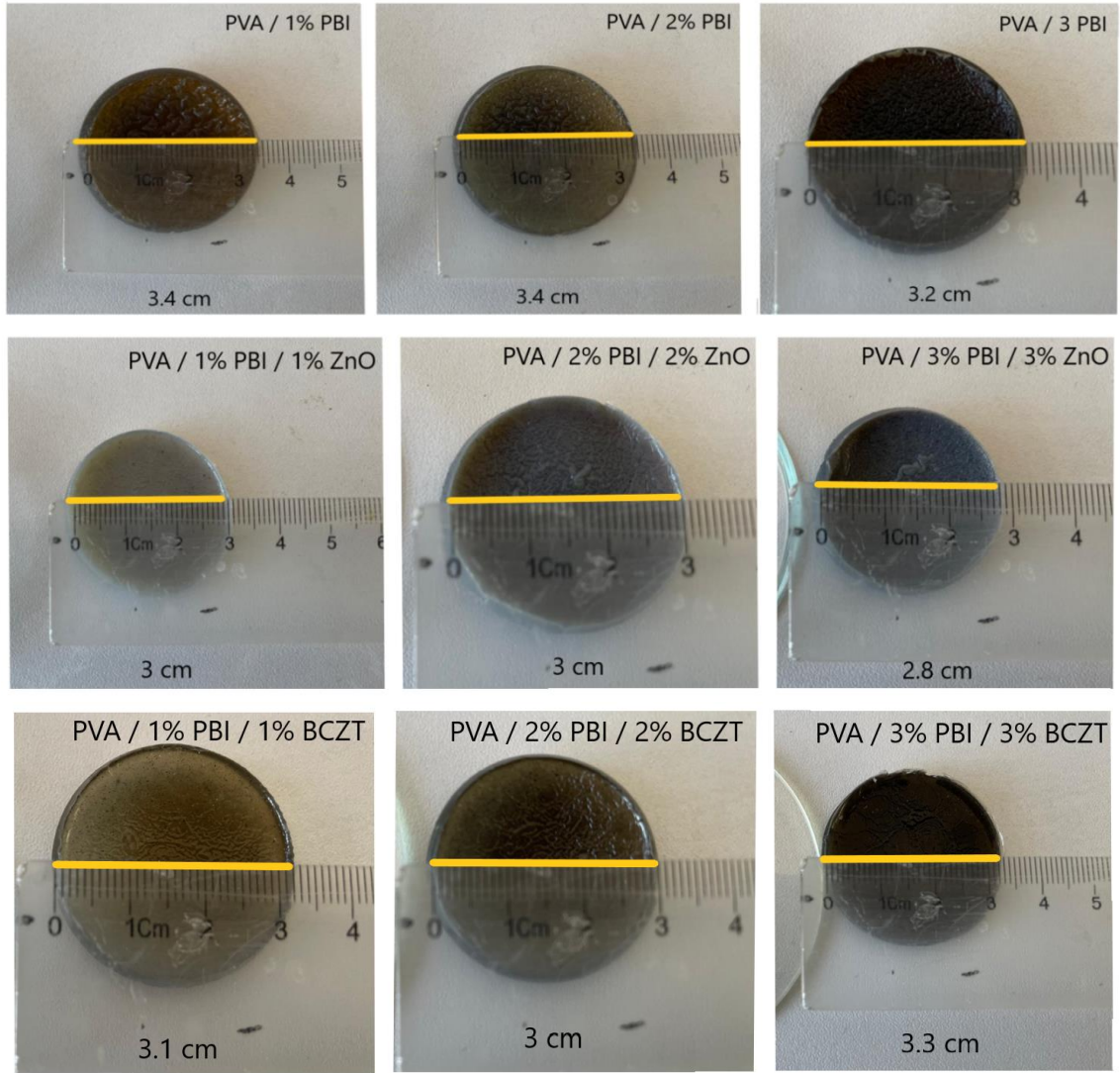
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Literatürde mevcut ilk aerojeller, %90'ın üzerinde gözenekliliğe sahip olan silikon bazlı aerojellerdi. Bu aerojeller yaygın olarak düşük yoğunluklu "katı hava" olarak isimlendirilmiştir (Pierre ve Pajonk, 2002). Aerojeller için farklı bir kavram, Kistler ile süperkritik kurutma olarak tanıtıldı. Gaz ve sıvı fazlarının , süperkritik faz olarak bilinen ve kritik sıcaklık (TC) ve basınç (PC) ile karakterize edilen karışık bir faz vardır (Şahin ve diğ., 2017). Sistemin sıcaklığı ve basıncı sırasıyla TC ve PC'yi aştığında, süperkritik faza yani basitçe gaz ve sıvı fazların bir karışımı olarak anlaşılabilir, burada artık ikisi arasında belirgin bir sınır yoktur, bunun yerine kusursuz bir bütünleşme vardır. Aerojeller, sol-jel geleneksel yöntemi ile elde edilen ıslak jellerin kurutulmasından elde edilir. Silika Aerojeller en genel ve yaygın aerojellerdendir ancak zayıf mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak ticarileştirilmemiştir. Silika aerojel iskeletinin birbirine zayıf olarak bağlı silika parçacıklarından oluştuğunu ve bu nedenle çok kırılgan olduğu bilinmektedir. Bu soruna, uzun zincirli yapılara sahip polimerler kullanılarak aerojelin mekanik mukavemet, yüksek şeffaflık, alev geciktiricilik veya termal yalıtım gibi birçok benzersiz özelliğe sahip olması sağlanabildi (Hou ve diğ., 2021; H. Liu ve diğ., 2021). PVA, iyi mekanik özellikler, suda çözünürlük, biyouyumluluk ve mükemmel optik performans sergiler (Li, Zhang, ve diğ., 2024). PVA filminin yüksek şeffaflığı, onu bu iş için oldukça uygulanabilir bir malzeme haline getirir. Bu çalışmada da, aerojel için ham madde olarak PVA seçildi. Çalışmadaki amacımız tamamen piezoelektrik özelliği olmayan PVA' ya elektriksel iletkenlik ve termal kararlılık özelliği kazandırıp enerji hasadı uygulamaları için uygun bir aerojel elde etmektir. One step standing method ile hazırlanan aerojelin üç boyutlu gözenekli yapının tutulmasını en üst düzeye çıkarmak için kurutma yöntemi olarak süperkritik kurutma seçildi. Bu çalışmada PBI katkılı PVA ıslak jeli klasik sol-jel yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Islak jelin içindeki sıvı daha sonra süperkritik kurutma yoluyla uzaklaştırılır ve geriye sadece üç boyutlu bir PVA/PBI iskeletinden oluşan PVA/PBI aerojeli kalır. Öte yandan çalışmamızda süperkritik karbondioksit kurutma, sıcaklığı ve basıncı maddenin kritik sıcaklığının ve basıncının ötesine yükselterek, sıvı ve gazın bir karışımı olan süperkritik bir faza ulaşır. Bu süperkritik fazdan gaz fazına geçişte aerojelde istenmeyen yapısal çöküşü önler. Bu nedenle, bu çalışmada süperkritik karbondioksit kurutma seçilmiştir ve aynı zamanda özellikle %1'lik PBI katkılı aerojellerde belirgin olarak şeffaflığın korunduğu gözlenmiştir. Süperkritik kurutma öncesi aerojellerin çap uzunlukları 3.8-4 cm aralığındayken süperkritik kurutma ile

aerojelde ϕ boyunda azalma gözlemlendi. Bu büzülme, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de kurutma öncesi ve sonrası ölçümlerle karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. En yüksek büzülme ZnO katkılı PVA/PBI aerojelde gözlemlendi. Metal oksit katkısı ile PVA/PBI aerogellere göre daha fazla büzülme gerçekleşti.



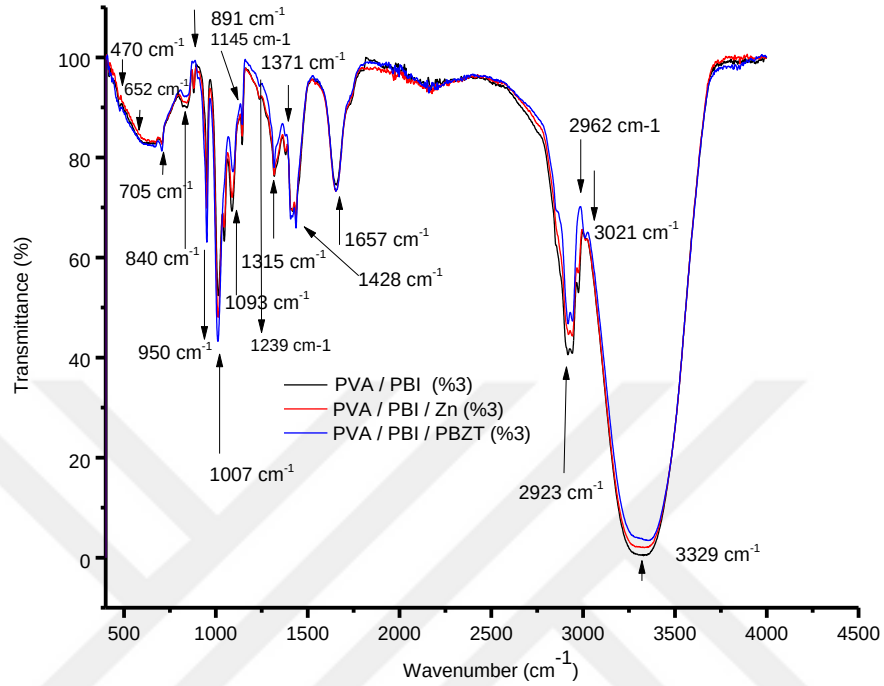
Şekil 4.1. Kurutma öncesi aerojel ϕ lar



Şekil 4.2. Kurutma sonrası aerjel çapları

Saf PVA'nın FTIR spektrumları, $\nu = 3329 \text{ cm}^{-1}$ 'de yoğun ve geniş bir germe bandı ve $\nu = 1657 \text{ cm}^{-1}$ 'de hidroksil grubuna atanabilen başka bir bükülme titreşimi ortaya koydu. Şekil 4.3 incelendiğinde, hibrit PVA/PBI-ZnO ve PVA/PBI-BCZT aerjellerin bu pik yoğunluğunda, metal oksit iyonlarıyla etkileşime atfedilen belirgin bir azalma vardır. Ayrıca, $\nu = 2962$ ve 1428 cm^{-1} 'deki emilim bantları sırasıyla PVA'nın (CH) ve (CH₂) gruplarının gerilme ve bükülme titreşimlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. 2962 deki bu pik özellikle BCZT katkısı ile gözlenmemiştir. $\nu = 1093 \text{ cm}^{-1}$ 'deki geniş emilim tepe noktası, C–O gerilme titreşimini gösterir. Bu pik ZnO ile az miktarda BCZT katkısıyla ise daha fazla pik şiddetinde azalma olarak kendini gösterdi. Ayrıca $3200\text{-}3400 \text{ cm}^{-1}$ 'de görülen geniş tepe bölgesi polibenzimidazol için N–H gerilmesine karşılık gelir ve imidazol halkasının varlığını doğrular. 2923 cm^{-1} 'de görülen tepeler sırasıyla PBI N-H gerilmesinden kaynaklanır. Bu pik en belirgin olarak BCZT katkısı ile elde edilen aerjelde azalmaktadır.

Ayrıca, 1315 cm^{-1} 'deki tepe, imidazol halkasına karşılık gelmektedir ve şiddetinin BCZT katkısıyla azaldığı gözlemlendi. Son olarak, tüm bantlardaki kayma ve yoğunluk azalması, PVA ve metal oksit arasındaki etkileşimin sonucu olarak bilinmektedir.

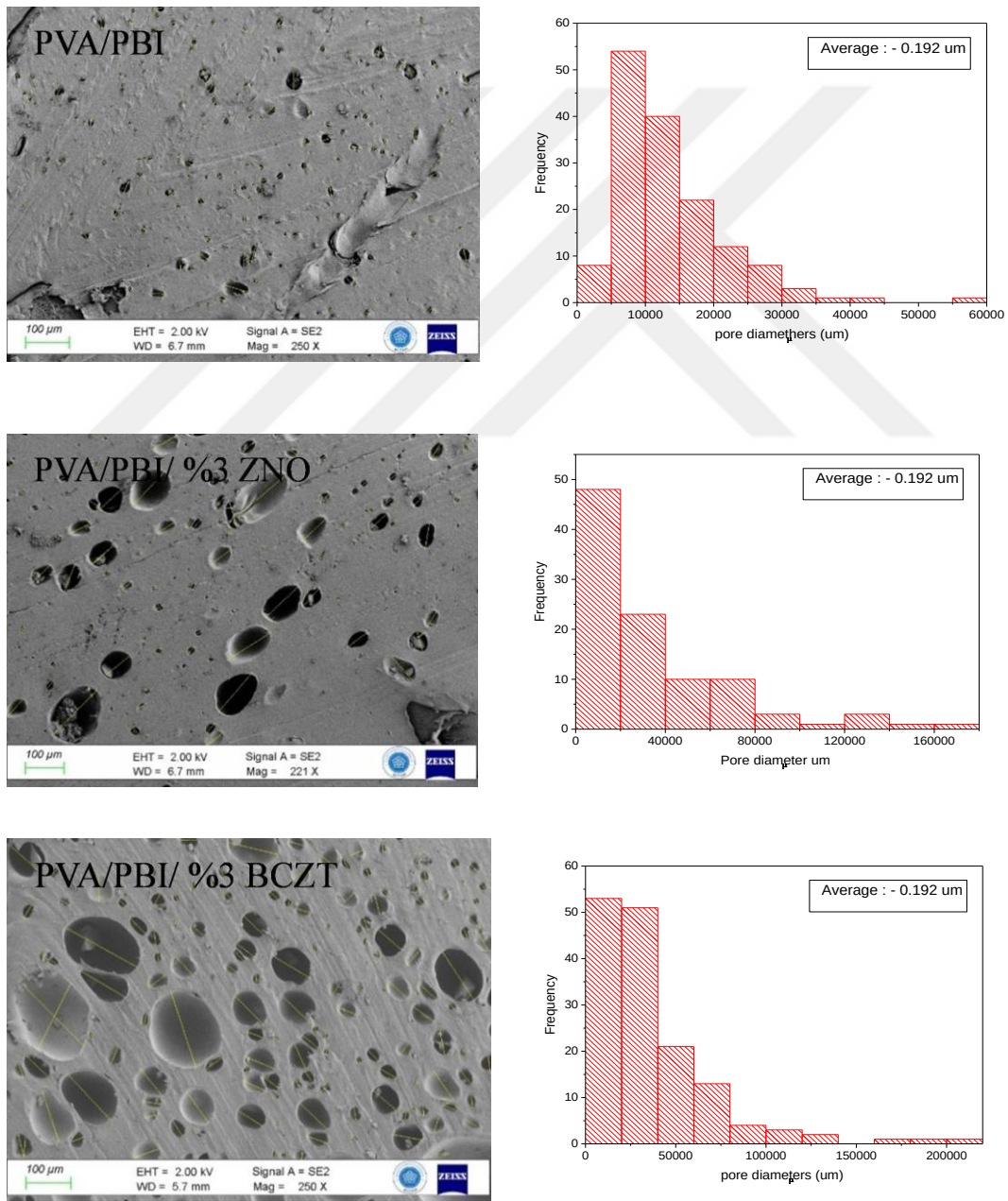


Şekil 4.3.%3 katkılı PVA piezoaerojel örneklerin FTIR grafiği

DMSO kullanılarak Jellerdeki çözücü mutlak alkol ile yer değiştirdikten sonra süperkritik kurutma ile kurutuldu. DMSO'nun kullanıma sebeplerinden en başta geleni PBI yüksek çözünürlüğü ve güçlü hidrojen bağı oluşturmastandır.

Bu areojellerin FESEM görüntüleri incelendiğinde PVA/PBI, PVA/PBI/%3 ZnO ve PVA/PBI/%3 BCZT aerojelleri için DMSO kullanımı hızlı jelleşme süresi (10 dakika) sonuçlanırken, DMSO kullanımı daha yüksek büzümeye ve genel olarak daha sert ve daha az gözenekli malzeme oluşumuna yol açtı. Şekil 4.4'de piezoaerojel örneklerin EDX-FESEM-Fiber çap dağılımları görülmektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) görüntüleri DMSO'nun makro gözeneklerin oluşumunu kolaylaştırdığı literatürde de desteklenmektedir. Bu çalışmada da DMSO' dan kaynaklı bir büzülme literatürde belirtilen %80'lik miktar büzüşme PVA/PBI/ZnO aerojelde gözlenmekle birlikte diğer aerojellerde %50-%60 aralığında hacimsel büzülme gözlemlendi (Altarabeen ve diğ., 2024). Bu büzülmenin büyük olasılıkla DMSO'nun PBI ve PVA olan güçlü etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Süperkritik CO₂ kurutma sırasında

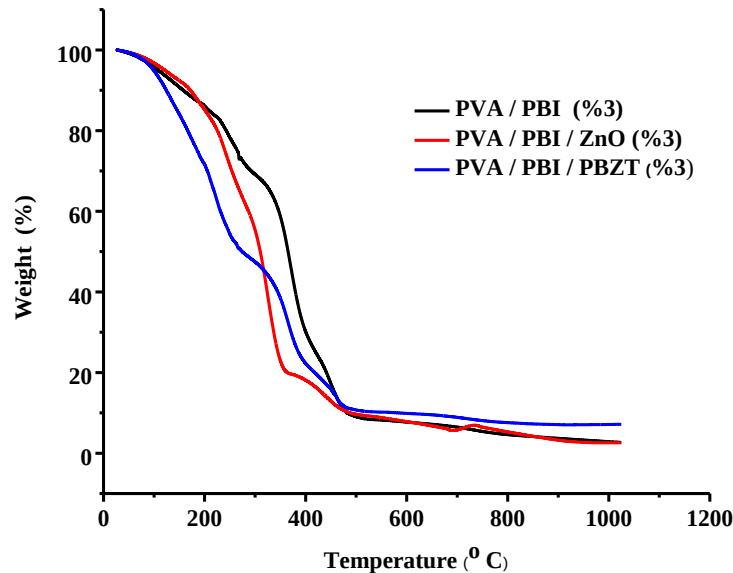
DMSO gözeneklerden ve kısmen iç PBI duvarlarından ayrılarak katı matrisin kurutma sırasında çökmesine neden olur ve bu da önemli bir büzülme ve nihai malzemenin hacimsel veriminin azalmasına neden olur (Pitsevich ve diğ., 2024). Bu çalışmada da homojen ve çözünmüş PBI ile hızlı oluşan jel oluşturan DMSO gibi çözücülerin kolaylıkla mutlak alkol ile çözücü değişimini kolay bir şekilde yapıldı. Tek olumsuzluk DMSO için, süperkritik CO₂ kurutma sırasında büzülme göstermesidir. PVA/PBI, PVA/PBI/%3 ZnO ve PVA/PBI/%3 BCZT aerogellerinin FESEM görüntüsünde maksimum gözenek boyutu 50 nm'den büyük olup makro gözenek boyutu gözlenmiştir. En büyük ve yoğun gözeneklilik PVA/PBI/%3 BCZT aerogelinde gözlemlendi.



Şekil 4.4.%3 katkılı PVA piezoaerogel örneklerin EDX-FESEM-Fiber çap dağılımları

PVA'ya ZnO, BCZT katkısı ile piezo özellikli, PBI katkısı daha termal dayanımı ve elektriksel iletkenliği yüksek aerjel eldesi elde edildi.

N₂ atmosferinde PVA kompozit aerjellerde TG eğrileri temel bozunma aşamasında (yaklaşık 200–375 °C'de) metal oksit ve BCZT katkısı ile birlikte PVA/PBI aerjele göre daha düşük termal kararlılık gösterdiği belirlendi. Literatürde oksit katkısı ile polimerin termal kararlılığında bir azalma olduğu belirtilmiş ve tez çalışmamızda da bu durum doğrulanmıştır (Fernandes ve diğ., 2011). Samanta ve arkadaşları tarafından 2025 yılında yürütülen çalışmada, saf glutaraldehit çapraz bağlayıcısı kullanılarak sentezlenen PVA aerjelinin termal bozunma davranışı incelenmiş; Şekil 4.5' te görüldüğü üzere, malzemenin 230 °C'ye ulaşmadan tamamen bozunduğu rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasında ise, farklı katkı maddeleriyle hazırlanan üç farklı aerjel numunesinin termal stabiliteleri incelenmiş ve Şekil 4.6' da görüldüğü üzere, tüm numunelerde tam bozunmanın yaklaşık 480 °C sıcaklıkta gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Genel olarak hem PBI hem de diğer katkı malzemelerinin termal dayanımı artırdığını literatürde verilen saf PVA aerjele göre söyleyebiliriz. Üç aerjel içinde termal dayanımı kıyasladığımızda ise 400 °C baz alındığında PBI hibrit aerjelinin bozunma yüzdesi %70, çinko oksit katkılı aerjelin bozunma yüzdesi %80 ve BCZT katkılı aerjelin ise %75 olduğu gözlemlendi. Bu değerler dikkate alındığında PVA/PBI hibrit aerjelinin 400 °C' de daha az bozunma gösterdiğini ama katkı malzemeleri ile bozunma yüzdesinin arttığını söyleyebiliriz (Samanta ve diğ., 2025).



Şekil 4.5. PVA/PBI (%3), PVA/PBI/ZNO (%3), PVA/PBI/PBZT (%3) aerjellerin termogravimetrik analizi

Tez çalışmasında üretilen aerojel, süperkritik CO₂ kurutma sonrası sıcak pres yapılmadan önce oda sıcaklığında parmak baskısı ile osiloskopta malzemelerin elektrik üretim kapasiteleri incelenmiştir. Two-prob ölçüm verileri ile akım ve güç hesaplanmıştır. Piezoaerojel malzemelerin ürettiği maksimum gerilim, akım ve güç değerleri Çizelge 4.1' de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Piezoaerojel malzemelerin preslenmeden önce gerilim ve güç değerleri

Piezoaerojel	Numune kalınlığı	Numune alanı	Voltage VOLT	Current A	Power W
%1 PBI	2,11 mm	2,00 cm ²	1.12 V	0,017	5.002x10 ⁻⁴
%2 PBI	2,19 mm	2,00 cm ²	1.28 V	0,020	7.102x10 ⁻⁴
%3 PBI	1,70 mm	2,00 cm ²	1.40 V	0,027	7.783x10 ⁻⁴
%1 ZnO	2,00 mm	2,00 cm ²	1.20 V	0,024	5.673 x10 ⁻⁴
%2 ZnO	2,31 mm	2,00 cm ²	1.60 V	0,029	7.791x10 ⁻⁴
%3 ZnO	2,09 mm	2,00 cm ²	2.60 V	0,036	8.589x10 ⁻⁴
%1 BCZT	1,84 mm	2,00 cm ²	1.44 V	0,038	1.054x10 ⁻³
%2 BCZT	2,06 mm	2,00 cm ²	1.84 V	0,049	1.072x10 ⁻³
%3 BCZT	1,11 mm	2,00 cm ²	2.80 V	0,099	1.111x10 ⁻³

İlk olarak, preslemeden önce yapılan ölçümlerde BCZT katkılı aerogellerin, hem gerilim hem de güç çıktısı açısından en yüksek performansı sergilediği görülmüştür. %3 BCZT katkılı numune, 2.80 V gerilim ve 1.411×10^{-3} W güç üretimi ile diğer tüm numunelerin önüne geçmiştir. Bu durum, BCZT' nin yüksek piezoelektrik katsayısına sahip olmasına ve polimer matris içinde etkin bir yük transferi sağlamasına bağlanabilir. BCZT nanoparçacıkları, yüksek yüzey alanına sahip olduğundan, yük tuzaklama ve yeniden yönlendirme etkileri yoluyla triboelektrik çıkışı artırır. Elektrik yükü birikimi, polimer-seramik ara yüzünde daha etkin gerçekleşir. BCZT parçacıkları, nanofiber matris içinde homojen dağıldığında, mekanik stresin etkin bir şekilde iletilmesini sağlar. Bu, daha güçlü bir elektrik sinyali oluşmasına neden olur. BCZT katkısının kompozitlerde piezoelektrik yanıtı anlamlı ölçüde artırdığı kanıtlanmıştır (Zhao ve diğ., 2024). BCZT' nin düşük Curie sıcaklığına (90– 120 °C) sahip olması nedeniyle polimer yapılarla uyumlu çalışarak mekanik deformasyonlar altında yüksek çıkış sağlamaktadır. BCZT'nin düşük Curie sıcaklığı sayesinde faz stabilitesi bozulmadan kalır, yani deformasyon sırasında ferropiezoelektrik özellikleri korunur yüksek çıkış alınır (Mureddu ve diğ., 2025).

ZnO katkılı numunelerde ise, özellikle %3 ZnO katkısı ile 2.60 V' luk bir gerilim çıktısı gözlenmiştir. Bu değer, ZnO'nun piezoelektrik performans açısından BCZT' ye göre bir miktar düşük kaldığını göstermektedir. ZnO katkılarında elde edilen güç değerlerinin BCZT' ye göre daha düşük kalması, ZnO'nun seramik katkılara kıyasla daha düşük piezoelektrik sabitine (ZnO: ~ 12 pC/N, BCZT: $\sim 500\text{--}700$ pC/N) sahip olması ile açıklanabilir. ZnO' nun saf polimer PVA aerojele göre piezoelektrik alan oluşturma yeteneği mevcuttur (Bhadwal ve diğ., 2023; Zidani ve diğ., 2025). ZnO nanoparçacıklarının düşük oranlarda bile polimer kompozitlerin elektriksel çıktısını artırabildiği görülmüştür. ZnO, yük taşıyıcılarının hareketini kolaylaştırarak kompozitin iletkenliğini artırır (Abdullah ve diğ., 2021). PBI katkılı aerojellerin, ZnO ve BCZT katkılı aerojellere kıyasla daha düşük gerilim ve güç çıktıları ürettiği gözlemlenmiştir. Bu durum, PBI'nın piezoelektrik cevabının görece sınırlı olmasına bağlanabilir. PBI bazlı malzemelerin piezoelektrik potansiyeli, ZnO ve BCZT gibi yüksek piezoelektrik katsayısına sahip metal oksit katkılarına kıyasla düşüktür (Zhao ve diğ., 2004).

Ayrıca, PBI katkı oranının artırılması durumunda bile elde edilen enerji çıktısının ZnO ve BCZT katkılı kompozitlerle karşılaştırıldığında anlamlı bir iyileşme göstermediği tespit edilmiştir. Bu bulgular, PBI'nın piezoelektrik enerji üretimindeki sınırlamalarını ortaya koymakta ve metal oksit katkılarının performans açısından daha avantajlı olduğunu desteklemektedir.

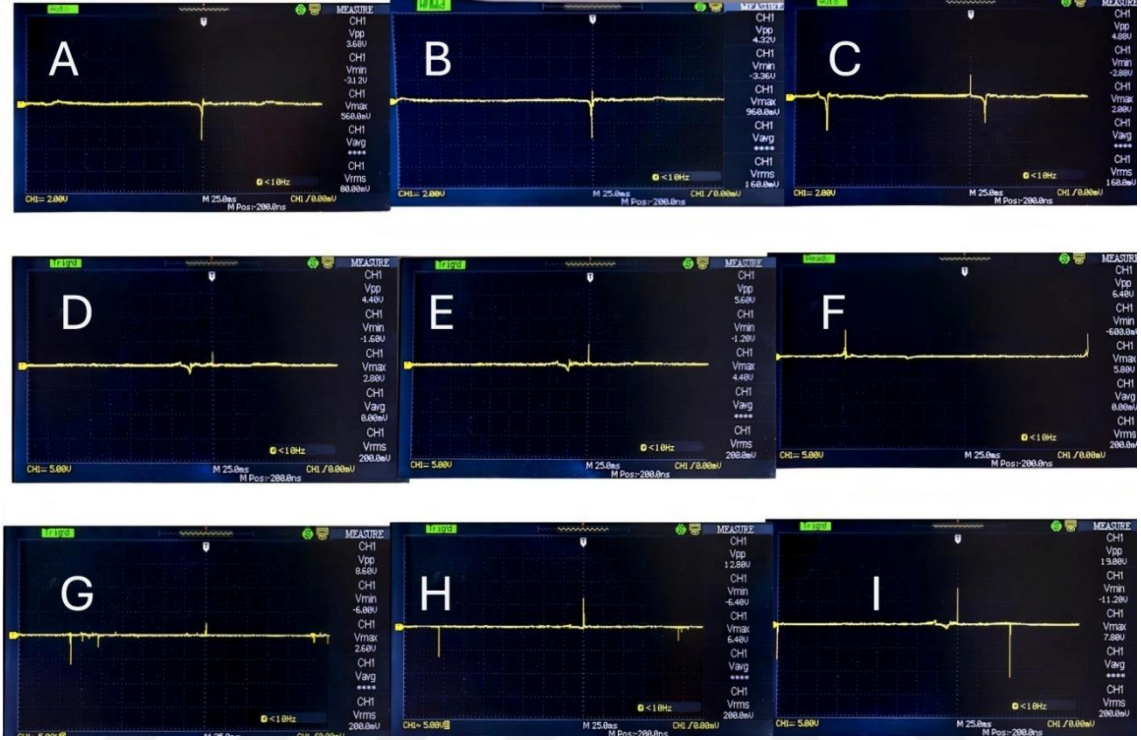
Üretilen aerogel süperkritik CO₂ kurutma sonrası sıcak pres yapıldıktan sonra parmak baskısı ile osiloskopta malzemelerin elektrik üretme kapasiteleri incelenmiştir. Two-probe ölçüm verileri ile akım ve güç hesaplanmıştır. Piezoaerogel malzemelerin ürettiği maksimum gerilim, akım ve güç değerleri Çizelge 4.2' de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Piezoaerojel malzemelerinpreslendikten sonra gerilim ve güç değerleri

Piezoaerojel	Numune kalınlığı	Numune alanı	Voltage VOLT	Current A	Power W
%1 PBI	1,30 mm	2,00 cm ²	3,68 V	0,064	5,292x10 ⁻⁴
%2 PBI	1,34 mm	2,00 cm ²	4,32 V	0,073	7,931x10 ⁻⁴
%3 PBI	0,79 mm	2,00 cm ²	4,88 V	0,089	8,278x10 ⁻⁴
%1 ZnO	1,26 mm	2,00 cm ²	4,40 V	0,080	6,140x10 ⁻⁴
%2 ZnO	1,14 mm	2,00 cm ²	5,60 V	0,125	7,991x10 ⁻⁴
%3 ZnO	0,88 mm	2,00 cm ²	6,40 V	0,147	9,225x10 ⁻⁴
%1 BCZT	0,96 mm	2,00 cm ²	8,60 V	0,233	1,085x10 ⁻³
%2 BCZT	1,47 mm	2,00 cm ²	12,80 V	0,363	1,135x10 ⁻³
%3 BCZT	0,95 mm	2,00 cm ²	19,00 V	0,612	1,280x10 ⁻³

Sıcak presleme işlemi sonrasında tüm numunelerde belirgin bir performans artışı gözlemlendi. Özellikle %3 BCZT katkılı numune, 19,00 V'lık yüksek bir gerilim üretmiş ve $1,280 \times 10^{-3}$ W güç değeri elde edilmiştir. Presleme işleminin polimer BCZT ve ZnO seramik ara yüzeyinde daha iyi yük transferi sağladığı ve böylece piezoelektrik etkinliği artırdığı belirlendi (Tuan ve diğ., 2015). Preslenmiş polimer/seramik kompozitlerin piezoelektrik yanıtının, preslenmemiş yapılara göre fazla olduğu belirtilmektedir (Choi ve diğ., 2013). ZnO katkılı aerojellerde de presleme sonrası gerilim ve güç çıktılarında belirgin artışlar kaydedilmiştir. %3 ZnO katkılı presli numune, 6,40 V gerilim üretmiştir. Bu performans artışı, ZnO parçacıklarının polimer matris içinde homojen bir elektrik alan oluşturmamasından kaynaklandı (Zhang ve diğ., 2021). Presleme sonrası BCZT katkılı numunelerdeki yüksek performans artışı, özellikle uygun sinterleme sıcaklığı ve presleme işlemi kombinasyonu, malzemenin piezoelektrik performansını artırmak için etkili bir yöntemdir. Sıkıştırılmış gözenekli yapılarda, mekanik deformasyon sırasında oluşan lokal elektrik alanlarının yoğunluğu artmakta ve bu da elektrik üretimini maksimize etmektedir (Mureddu ve diğ., 2023). PVA kompozit aerojellerin sıkıştırılması sonucu elde edilen voltaj, sıkıştırma sırasında artış göstermiştir (Abdolazizi ve diğ., 2024). İletken malzeme olarak PBI, ZnO ve BCZT seramik malzeme katkısı hibrit aerojellerde parmak baskısı sırasında iletken nokta sayısını arttırmakta ve sıkıştırma gerilmesinin artmasıyla piezorezistifidesinin arttığı gözlemlendi. Preslenen BCZT piezoaerojellerde güç çıkışı 6-12 kat artmıştır. Sıkıştırma altında, iletken temas noktalarının sayısının artması, özellikleri geliştirmektedir (Costa

ve diğ., 2018). Şekil 4.7’de piezoaerojel örneklerin preslendikten sonra osiloskop görüntüleri verilmiştir. Bu sonuçlar, gelecekte düşük yoğunluklu, yüksek performanslı piezoelektrik enerji hasadı malzemelerinin geliştirilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır.



Şekil 4.6. Piezoaerojel örneklerin preslendikten sonra osiloskop görüntüleri A) %1 PBI, B) %2 PBI, C) %3 PBI, D) %1 ZNO, E) %2 ZNO, F) %1-3 ZNO, G) %1 BCZT, H) %2 BCZT, I) %3 BCZT

Çizelge 4.3. Piezoaerojel malzemelerin preslendikten sonra elektriksel iletkenlikleri

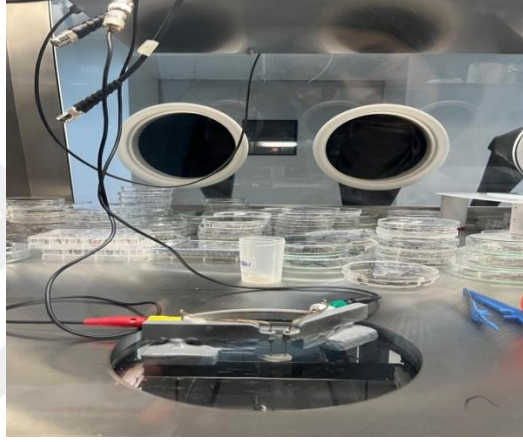
Piezoaerojel	Elektriksel iletkenlikleri
%1 PBI	$1.289 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%2 PBI	$1.386 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%3 PBI	$5.226 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%1 ZNO	$4.500 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%2 ZNO	$5,048 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%3 ZNO	$6.860 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%1 BCZT	$4.850 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%2 BCZT	$5.521 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$
%3 BCZT	$7,621 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$

Aerojel örneklerinin kalınlıkları dijital kumpas ile ölçülmüş, elektriksel iletkenlik ölçümleri ise 1–10 V aralığında uygulanan doğru akım (DC) gerilimi altında, iki nokta prob (two-point probe) tekniği ile çalışan bir elektrometre kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8.). Ölçümler sırasında elde edilen akım (I) ve gerilim (V) değerleri kullanılarak, Ohm yasası ($R = V/I$) doğrultusunda örneklerin dirençleri hesaplanmıştır. Daha sonra, numunenin kesit alanı (A) ve kalınlığı (T) dikkate alınarak öz direnç (ρ) değeri, $\rho = R \cdot A/T$ formülüyle belirlenmiş; bu değer tersi alınarak elektriksel iletkenlik (σ) hesaplanmıştır ($\sigma = 1/\rho$). Doğru akım altında yapılan iletkenlik ölçümlerinde, sadece malzemenin içerisinde geçen net yük taşıyıcıları değerlendirilir. Bu yöntemde, iki elektrot arasına belirli bir potansiyel farkı uygulanırken, diğer iki elektrot üzerinden geçen akım ölçülür. Ayrıca, alternatif olarak güç değeri (P), $P = (V_{rms})^2 / R$ ifadesiyle hesaplanabilir. Osiloskoptan alınan gerilim değerine (V) ve iki nokta problu cihazdan ölçülen direnç değerine (R) bağlı olarak akım değeri $I = V/R$ formülü ile belirlenmektedir.

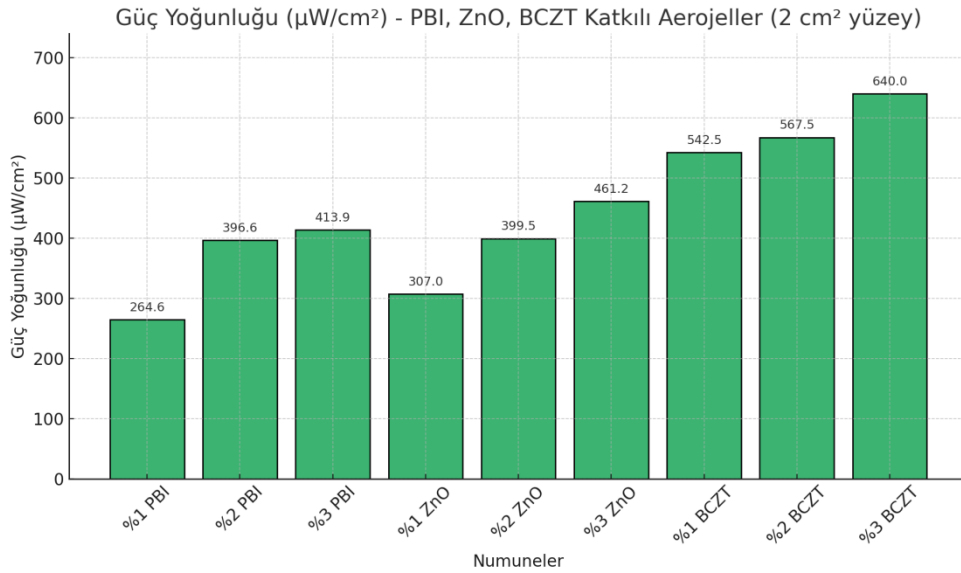
Aerojellerin 2 cm²'lik yüzey alanında yapılan iletkenlik ölçümleri değerlendirildiğinde, iletkenlik değerlerinin $7,621 \times 10^{-3}$ S/cm ile $1,289 \times 10^{-3}$ S/cm arasında değiştiği belirlenmiştir. Bu aerojellerin iletkenlikleri karşılaştırıldığında, iletkenlik değerlerinin katkı maddesi ve katkı oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Çizelge 4.3 incelendiğinde iletkenlik sıralaması şu şekildedir: %3 BCZT > %2 BCZT > %1 BCZT > %3 ZnO > %2 ZnO > %1 ZnO > %3 PBI > %2 PBI > %1 PBI. Aerojellerin iletkenlik değerleri Çizelge 4.2'de incelendiğinde, en yüksek iletkenlik değerinin %3 BCZT katkılı aerojelde $7,621 \times 10^{-3}$ S/cm olarak elde edildiği görülmektedir. Saf PVA'nın elektriksel iletkenliği ise yalnızca 1.25×10^{-13} S/cm olup, bu değer katkı maddeleriyle önemli ölçüde artırılabilir (Heidarshenas ve diğ., 2019).

Bu çalışmada kullanılan BCZT katkısı da iletkenliği artırmada önemli bir rol oynamaktadır. BCZT seramik esaslı bir ferroelektrik malzeme olup yüksek dielektrik sabiti ve düşük elektriksel kayıp özellikleri ile bilinir (Wang ve diğ., 2016; T. Zhang ve diğ., 2020). Kristal yapısındaki iyon yer değiştirmeleri ve polarlanabilirlik özellikleri, malzeme içerisinde yük taşıyıcılarının daha kolay hareket etmesine olanak tanır (Fayaz ve diğ., 2024). Ayrıca, BCZT'nin piezoelektrik doğası da, elektrik alan altında mekanik deformasyon ve buna bağlı olarak yük taşıması kapasitesini artırmaktadır (Zhang ve diğ., 2020). ZnO katkısı da iletkenliğin artırılmasında etkili olmuştur. ZnO, geniş bant aralığına sahip bir n-tipi yarı iletken olup, yüksek elektron mobilitesi sayesinde yük

taşıyıcılarını kolayca iletebilir (Buckley ve diğ., 2024). ZnO parçacıkları, PVA matrisi içinde mikro-iletken yollar oluşturarak yük geçişine aracılık etmekte ve bu da makroskobik iletkenliği artırmaktadır (Choudhary, 2017). Ayrıca ZnO'nun yüzeyinde bulunan oksijen boşlukları, serbest elektronların sayısını artırarak malzemenin elektriksel iletkenliğini olumlu yönde etkilemektedir (L. Liu ve diğ., 2016). Bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, hem BCZT hem de ZnO katkılarının PVA matrisli aerojellerin elektriksel iletkenliğini artırdığı ve katkı oranı yükseldikçe iletkenlik değerlerinin belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu durum, katkı maddelerinin iletken ağ oluşumuna katkı sağladığını ve malzeme içinde yük taşıyıcılarının geçişini kolaylaştırdığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7. Piezoaerogel numunenin two-prob ölçümü



Şekil 4.8. Piezoaerogel numunelerin güç yoğunluğu

Güç yoğunluğu, " $\text{Güç (W)} \times 10^6 / \text{Yüzey Alanı (cm}^2\text{)}$ " formülü ile hesaplanmakta olup, bu parametre piezoelektrik malzemelerin enerji dönüşüm kapasitesini değerlendirmede temel bir gösterge olarak kabul edilmektedir. Şekil 4.9

incelendiğinde, en yüksek yüzey güç yoğunluğunun %3 oranında BCZT katkısı içeren numunede elde edildiği ve bu numunenin $640.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ güç yoğunluğu sergilediği görülmektedir. Bu sonuç, BCZT katkısının piezoelektrik performans üzerindeki olumlu etkisini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Öte yandan, %3 ZnO katkılı numunenin $461.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ güç yoğunluğu değerine sahip olduğu belirlenmiştir. ZnO katkısı da yapı içerisinde enerji dönüşüm kapasitesini artırmakla birlikte, BCZT'ye kıyasla daha düşük piezoelektrik katsayıya sahip olması nedeniyle elde edilen güç yoğunluğu daha sınırlı kalmıştır.

ZnO ve BCZT' nin PVA matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılması, yapının elektriksel iletkenliğini iyileştirmekte ve bu da genel güç yoğunluğunun artışına katkı sağlamaktadır. Ancak her iki katkı malzemesi de piezoelektrik özelliklerin geliştirilmesinde etkili olmakla birlikte, BCZT'nin yüksek piezoelektrik sabiti, yapısal uyumluluğu ve PVA matrisiyle olan sinerjik etkileşimi sayesinde daha üstün bir enerji dönüşüm performansı sağladığı anlaşılmaktadır (Nayak ve diğ., 2024; Shah ve diğ., 2024). Buna karşın, ZnO katkısı daha düşük maliyeti ve çevre dostu yapısı ile dikkat çekmekte, ancak enerji verimliliği açısından BCZT katkısının gerisinde kalmaktadır. (Ünal, 2024). Polipirol ile kaplanan PVA/bakteriyel selüloz aerojellerde $951 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ güç yoğunluğu bildirilmiş olup, bu artış PPy'nin yüksek elektriksel iletkenliği ve BC'nin gözenekli yapısının sinerjik etkisine bağlanmaktadır. Polipirol katkısı, BCZT gibi yapının elektrik iletkenliğini önemli ölçüde artırarak cihazın genel enerji dönüşüm verimliliğini iyileştirmiştir (Zheng ve diğ., 2023). ZnO–CuO–AgO katkılı PVA kompozit membranlarda ise $726.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ güç yoğunluğuna ulaşılmıştır. Güç yoğunluğu performansı ZCA nanoparçacıklarının sinerjik etkisiyle triboelektrik yük transferinin artmasına bağlanmaktadır (Yempally ve diğ., 2024). Bu bağlamda, mevcut çalışmada elde edilen $640.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ değerinin, karbon nanotüp veya iletken polimer içermemesine rağmen, BCZT katkısının piezoelektrik katsayısı yüksekliği ve PVA matrisinde homojen dağılımı sayesinde yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağladığı sonucuna varılabilir. İlgili karşılaştırmalı değerlendirme Çizelge 4.4' te sunulmuştur.

Çizelge 4.4.Literatür güç yoğunluğu karşılaştırması

Numune Türü	Kompozit Materyal	Güç Yoğunluğu	Açıklama	Kaynak
Bu Çalışma	PVA / 3% BCZT Aerojel	640.0 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Homojen BCZT dağılımı ile güç yoğunluğu artışı	Bu çalışma
Literatür 1	PVA / Bakteriyel Selüloz / PPy	951 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	İletken polipirol kaplaması ile performans artışı	Zheng ve diğ., 2023
Literatür 2	PVA / ZnO / CuO / AgO	726.3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	ZnO–CuO–AgO nanoparçacık katkılı aerojel yapı	Yempally ve diğ., 2024

Literatürde saf PVA'nın diğer polimerlere oranla 1,74 değerinde düşük bir dielektrik sabite, farklı bir yapıda saf PBI'nin 3,2 dielektrik sabite, saf ZnO'nun yaklaşık 8,17 değerinde orta düzeyde bir dielektrik sabite ve saf BCZT seramik malzemenin ise $T_c = 97,1\text{ }^\circ\text{C}$ 'de yaklaşık 13.925 gibi oldukça yüksek bir dielektrik sabite sahip olduğu belirtilmiştir (Duan ve diğ., 2023; Gulomov ve diğ., 2023; Mahendia ve diğ., 2010; Zhong ve diğ., 2022). Bu değerler, katkı maddelerinin polimer matrisine entegre edilmesinin dielektrik özellikleri artırma potansiyelini açıkça ortaya koymaktadır. Bu çalışmada PVA/PBI hibrit aerogeline ZnO ve BCZT katkısı sağlandıktan sonra homojen dağılım sağlanarak dielektrik sabitinin artışı gözlemlendi. Aerojelin dielektrik özelliklerine; katkı malzemesinin homojen dağılımının yanı sıra katkı maddelerinin boyutunun, şeklinin, konsantrasyonunun, aerojel porozitesinin ve katkı malzemesinin aerogele fiziksel veya kimyasal bağlanabilirliği gibi faktörler etki etmektedir. Bu çalışmada 2 cm^2 'lik alan ve 0,95- 1,47 mm aralığında kalınlığa sahip aerojel malzemeler kısa devre yapmayacak şekilde alüminyum folyo arasına yerleştirildi. Kapasitans değerleri 100 kHz frekansında, oda sıcaklığında ve 86,6-142,3 pF aralığında avometre kullanılarak ölçüldü. Aerojellerin dielektrik özellikleri, eşitlik 1.1 kullanılarak belirlendi.

$$\epsilon_r = (C \times d) / (A \times \epsilon_0)$$

Eşitlik 1.1

ϵ_0 : boş alan dielektrik sabitini (8.854 10-12 F/m)

A: aerojelin yüzey alanını

d: aerojel kalınlığını

C: aerojelin ölçtüğümüz kapasitesi.

Çizelge 4.5. Piezoaerogel malzemelerin dielektrik sabiti

Piezoaerogel	Dielektrik sabiti
%1 PBI	$5,004 \times 10^{-3}$
%2 PBI	$4,949 \times 10^{-3}$
%3 PBI	$3,444 \times 10^{-3}$
%1 ZNO	$6,634 \times 10^{-3}$
%2 ZNO	$5,015 \times 10^{-3}$
%3 ZNO	$4,634 \times 10^{-3}$
%1 BCZT	$9,621 \times 10^{-3}$
%2 BCZT	$7,795 \times 10^{-3}$
%3 BCZT	$7,714 \times 10^{-3}$

PVA, yüksek poroziteye sahip esnek bir polimerdir ve aerogel yapılarında düşük dielektrik sabitleri ($\sim 1.1-2.0$) sunar. Ancak ZnO, BCZT gibi katkılarla birlikte dielektrik sabiti yükseltilebilir (Ponnamma, 2015; Maleki ve diğ., 2008). Tablo 4.5 incelendiğinde katkı malzemeleri ZnO ve BCZT için dielektrik sabiti değerleri kıyaslandığında en yüksek dielektrik sabiti $9,621 \times 10^{-3}$ olarak %1 BCZT katkılı numunede elde edildi. BCZT'nin kendisinin çok yüksek bir dielektrik sabiti ($\sim 1500-4000$ civarı) olduğu ve yüksek permittivite (ϵ_r) değerinin, polimer matris malzemesinin zayıf dielektrik cevabını güçlendirdiği söylenebilir. PVA/PBI hibrit aerogelde düşük dielektrik değeri BCZT katkısı ile güçlendirildi (T. Liu ve diğ., 2022; Qiu ve diğ., 2020). Ayrıca diğer katkı maddesi olan ZnO içinse %1'lik katkı ile hazırlanan aerogelde dielektrik sabiti maksimum $6,634 \times 10^{-3}$ olarak hesaplandı. Çizelge 4.5' te sunulmuştur. PVA/PBI hibrit aerogele oranla bu artış, ZnO nanoparçacıklarının homojen dağılımı, ZnO'nun yüksek permittivitesi ve ara yüzey yük birikimi ile ilişkilidir. ZnO'nun homojen dağılımı, arayüzey polarizasyonunu artırarak dielektrik sabitini yükseltebilir (Maxwell-Wagner-Sillars etkisi) (Ambrosio ve diğ., 2018). Sonuç olarak PVA/PBI hibrit aerogel için hem ZnO hem de BCZT katkısı, PVA matrisinde iletken yollar oluşturarak dielektrik sabitini artırmaktadır (Menshutina ve diğ., 2022; Pierre ve Pajonk, 2002). Ancak katkı maddelerinin dielektrik sabiti değerleri kendi gruplarında değerlendirildiğinde katkı miktarı artışının dielektrik sabiti değeri ile ters orantılı olarak değiştiği gözlemlendi. Yani %1, %2 ve %3'lük katkı miktarlarından en iyi dielektrik sabit değeri %1'lik katkılarda en yüksek ve %3'lük katkılarda en düşük olarak belirlendi. Yüksek miktardaki katkılarda dielektrik sabiti değerinin düşmesini iki

şekilde açıklayabiliriz. Birincisi; en yüksek katkı olarak baz aldığımız %3'lük ZnO veya BCZT nano boyuttaki katkıların polimer matris içinde kristal çekirdeklenmesini kolaylaştırması ve katkı miktarının artmasıyla birlikte aerojelde artan nano kristal yüzdesinin PVA'nın düzenli bölgelerinde kolayca hareket edememesi olarak açıklanabilir (Gong ve diğ., 2014). Yüksek miktardaki katkılarda dielektrik sabiti değerinin düşmesini ikinci sebebi ise porozitenin artması olarak belirtebiliriz. Çalışmada en yüksek katkı olarak baz aldığımız %3'lük ZnO veya BCZT nano boyuttaki katkıların nanoparçacıkların homojen dağılımının zorlaşması ya da aşırı kristallik nedeniyle yük taşınımının sınırlanamaması sonucunda yüksek porozite sergiledikleri gözlenmiştir. Yüksek porozite, malzeme içerisinde daha fazla hava boşluğu oluşturduğundan, dielektrik sabitinin düşmesine neden olur (Kim ve Jeon, 2011; Venugopal ve diğ., 2014).

Çizelge 4.6. Piezoaerojel malzemelerin yoğunluk ve porozitesi

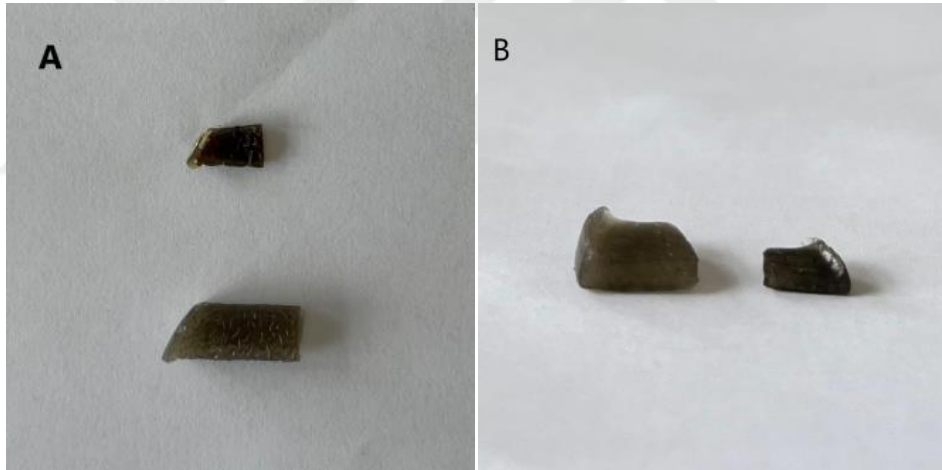
Piezoaerojel	Yoğunluk	Porozite
%1 PBI	1,30	%54
%2 PBI	1,20	%55
%3 PBI	1,18	%58
%1 ZNO	1,09	%65
%2 ZNO	1,05	%70
%3 ZNO	1,04	%75
%1 BCZT	1,04	%72
%2 BCZT	1,03	%76
%3 BCZT	1,01	%80

PVA temelli aerogeller, yüksek porozite, düşük yoğunluk ve üstün mekanik özellikleri sayesinde enerji hasatlama, termal yalıtım ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda dikkat çeken fonksiyonel malzemeler arasında yer almaktadır. Bu aerogellerin üç boyutlu gözenekli yapısı, geniş yüzey alanı ve düşük ısı iletkenliği gibi avantajlar sunarak çeşitli uygulamalarda etkinliklerini artırmaktadır (Zhang, ve diğ., 2024). Çalışmada elde edilen bulgular PBI katkısının porozite üzerindeki etkisi en düşük olmakla birlikte, seramik katkı oranı arttıkça özellikle porozite özelliğinde belirgin değişimler olduğunu ortaya koymuştur. Aerogellerin yoğunluğu ve porozite eşitlik 4.2 ve eşitlik 4.3' e göre hesaplanmıştır.

$$\text{Aerojelin yoğunluğu} = \text{Aerojel kütlesi} / (\text{Son su hacmi} - \text{İlk su hacmi}) \quad \text{Eşitlik 4.2}$$

$$\text{Aerojelin porozitesi} = 1 - (\text{Aerojel yoğunluğu} / \text{Katı fazın yoğunluğu}) \quad \text{Eşitlik 4.3}$$

Çizelge 4.6 incelendiğinde PVA/PBI hibrit aerogelde, BCZT > ZnO sıralamasıyla, katkı malzemelerinin porozite üzerindeki etkisi artmaktadır. BCZT katkısı, hem düşük yoğunluk hem de yüksek porozite hedeflenen piezoaerogel uygulamaları için en uygun katkı malzemesi olarak öne çıkmaktadır, Saf PVA aerogelin porozitesi yaklaşık 62.06 ± 7.02 iken, BCZT, ZNO katkısı sonrası bu oran %75 - %80'e yükselmiştir. Bu artış, gözenekli yapının gelişmesini sağlamış, hem mekanik esneklik hem de triboelektrik performansta belirgin iyileşmelere katkıda bulunmuştur (Tang ve diğ., 2017). Şekil 4.10' da %3 ZNO ve %3 BCZT aerojellerin porozite öncesi ve sonrası görülmektedir. Kistler silika bazlı aerojellerin porozitesinin %84 ila %93 arasında olduğunu rapor etmiştir. Bu değerler, günümüzde de birçok aerogel türü için referans olarak kabul edilmektedir (Chen ve diğ., 2013; Kistler, 1931; Verma ve diğ., 2023).



Şekil 4.9. A; PVA/PBI/ %3 ZNO, B;PVA/PBI/ %3 BCZT l numunelerinin porozite ölçüm öncesi ve sonrası

ZnO sol-jel çözeltilerinden elde edilen aerojeller, süperkritik kurutma yöntemi sonrasında yüksek porozite göstermiştir ve bu özellik fotokatalitik performansla ilişkilendirilmiştir. ZnO katkılı sistemlerde elde edilen yüksek porozite değerleri, çalışmanın süperkritik kurutma yöntemiyle yürütülmüş olmasının etkisiyle desteklenmiş ve literatürle uyumlu şekilde sonuçlanmıştır. ZnO aerogel monolitlerinin süperkritik kurutma ile kurutulmasının ardından %93 poroziteye ulaştığını belirtmiştir. Ayrıca, ZnO içeriğinin %5 arttıkça porozitenin yükseldiği, ancak mekanik esnekliğin azaldığı tespit edilmiştir (Chen ve diğ., 2013). Yüksek porozite, piezoelektrik çıkışı iyileştiren bir

faktör olarak belirlenmiştir. PVA-ZnO aerogellerinin freeze drying yöntemiyle kurutulması sonucu elde edilen sonuçlar, porozitenin iyon difüzyonu ve elektriksel iletkenlik ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur (Verma ve diğ., 2023). BCZT katkılı örneklerde ise, ZnO'ya benzer şekilde porozite artışı gözlemlenmiş olup, %80'e kadar ulaşan porozite değeri ile dikkat çekici sonuçlar elde edilmiştir. Bu örneklerde, yüksek dielektrik sabiti ve piezoelektrik katsayısı ile oldukça iyi bir performans sergilenmiştir (Ji ve diğ., 2023). Özellikle %3 BCZT katkılı örnek, düşük yoğunluk ve yüksek porozite kombinasyonu ile öne çıkmıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen kompozit aerogeller özellikle enerji hasadı, sensör teknolojileri ve esnek elektronik uygulamaları açısından umut verici özellikler taşımaktadır. Bu aerogellerden en ilgi çekici olanı BCZT katkılı kompozit yapılar olup, düşük yoğunluk ve yüksek poroziteye sahip yapıların, çevresel titreşimlerden maksimum düzeyde elektrik üretimi sağlayabileceği öngörülmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın literatüre katkısı yalnızca mevcut verilerle sınırlı kalmayıp, BCZT katkısının piezoaerogel sistemlerinde kullanım potansiyelini açısından da önem arz etmektedir. BCZT, ZnO katkılı sistemlerde elde edilen makro gözenek değerleri, çalışmanın süperkritik kurutma yöntemiyle yürütülmüş olmasının etkisiyle desteklenmiş ve literatürle uyumlu şekilde sonuçlanmıştır.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, enerji hasadı uygulamaları için potansiyel taşıyan piezoelektrik özellikli PVA/PBI bazlı kompozit aerojellerin, ZnO ve BCZT katkılarıyla geliştirilmesi ve performanslarının sistematik olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Aerojel üretiminde süperkritik CO₂ kurutma yöntemi ve one-step standing metodu birlikte kullanılarak, yüksek gözeneklilik ve düşük yoğunluğa sahip, esnek ve fonksiyonel piezoaerojeller elde edilmiştir.

PVA/PBI bazlı sistemlere ZnO ve BCZT katkısı ilavesiyle aerjel matrislerinde belirgin bir morfolojik değişim gözlemlenmiştir. FESEM analizleri, %3 BCZT katkılı numunelerde 50 nm üzerinde makro gözenek oluşumu ve yüksek gözeneklilik (porozite %80) ile birlikte yapısal bütünlüğün korunduğunu göstermiştir. Büzülme gözlenmiş ve bu durum, çözücü değişiminde PBI-DMSO etkileşiminin kurutma sürecindeki etkisiyle ilişkilendirilmiştir.

TGA analizlerine göre, literatürde bu çalışmadaki yöntem ve çapraz bağlayıcı ile elde edilen saf PVA aerjelin 230 °C civarında tamamen bozunduğu belirtailirken, bu çalışmada üretilen PVA/PBI tabanlı aerjellerin bozunma sıcaklıkları 480 °C'ye kadar çıkmıştır. Bu durum, katkı maddelerinin termal kararlılığı artırdığını açıkça ortaya koymuştur. %3 PBI katkılı numunede 400 °C'de %70 bozunma gözlenirken; ZnO ve BCZT katkılı numunelerde bu oran sırasıyla %80 ve %75 olarak gerçekleşmiştir. Bu bulgular literatürlerle uyumlu olmakla birlikte, metal oksitlerin PVA/PBI aerjelinin termal dayanımını düşürdüğünü göstermiştir.

Presleme öncesi ve sonrası yapılan ölçümler, katkı türü ve oranının elektriksel performans üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Sıcak presleme sonrası, %3 BCZT katkılı aerjel 19,00 V gerilim ve $1,280 \times 10^{-3}$ W güç üretimiyle en yüksek piezoelektrik performansa ulaşmıştır. Bu değer, preslenmemiş haliyle kıyaslandığında 6-12 katlık bir güç artışını ifade etmektedir. Benzer şekilde %3 ZnO katkılı numune 6,40 V gerilim üretmiş, ancak BCZT katkısına göre daha düşük güç yoğunluğu ($461,2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) sergilemiştir. Bu farklılık, BCZT'nin piezoelektrik katsayısının ($d_{33} \approx 500\text{--}700$ pC/N) ZnO'ya ($d_{33} \approx 12$ pC/N) göre çok daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

İki uçlu (two-probe) yöntemle yapılan iletkenlik ölçümleri sonucunda, katkı miktarı arttıkça iletkenlik değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. En yüksek elektriksel iletkenlik %3 BCZT katkılı aerjelde $7,621 \times 10^{-3}$ S/cm olarak ölçülmüş, bu değer saf PVA'nın ($\sim 10^{-13}$ S/cm) iletkenliğine artış göstermiştir. Dielektrik sabit ölçümleri ise katkı miktarının artmasına rağmen %1 katkılı BCZT ve ZnO

aerogellerinde en yüksek değerlere ulaşmıştır (sırasıyla $9,621 \times 10^{-3}$ ve $6,634 \times 10^{-3}$). Bu düşüş, yüksek katkı oranlarında kristallik artışı ve porozite kaynaklı yük taşınımı azalması ile ilişkilendirilmiştir.

Katkı malzemeleriyle elde edilen tüm aerogeller, yüksek porozite ($>70\%$) ve düşük yoğunluk ($<1.10 \text{ g/cm}^3$) özellikleri göstermiştir. En yüksek porozite, %3 BCZT katkılı numunede %80 olarak kaydedilmiştir. Bu yapı, piezoelektrik verimliliği desteklemenin yanı sıra sensör ve esnek elektronik uygulamaları için ideal bir ortam sağlamaktadır.

Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, BCZT katkısı PVA/PBI aerogel sistemlerinde piezoelektrik, dielektrik ve elektriksel iletkenlik açısından en yüksek performansı sağlamıştır. ZnO katkısı ise daha düşük maliyetli ve çevre dostu olmasıyla avantaj sağlamasının yanında BCZT' den sonra en yüksek performansı göstermiştir. PBI katkısı, piezoelektrik çıktıya sınırlı katkı sağlamasına rağmen termal kararlılık ve iletkenlik açısından önemli rol oynamıştır. Bu bağlamda, BCZT katkılı piezoaerogel malzemeler; düşük yoğunluk, yüksek porozite, üstün elektriksel performans ve yüksek termal dayanıklılık gibi özellikleriyle enerji hasadı sensör teknolojileri, giyilebilir elektronikler ve düşük güçlü mikroeletromekanik sistemler gibi ileri teknoloji uygulamaları gibi alanlarda güçlü birer aday olarak değerlendirilmektedir.

6. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular, piezoelektrik özellikli PVA/PBI bazlı aerojellerin ZnO ve BCZT katkılarıyla enerji hasadı uygulamaları açısından önemli potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Aşağıda, hem malzeme geliştirme hem de uygulama yönünden dikkate alınması önerilen başlıca hususlar sunulmaktadır:

- ✓ Piezoelektrik cevabı artırmak amacıyla, mevcut aerjel matrislere farklı piezoelektrik nanoparçacıklar entegre edilerek çok fazlı hibrit sistemler oluşturulabilir. Bu yaklaşım, elektriksel performansı artırırken malzemenin mekanik dayanımını da iyileştirebilir.
- ✓ Freeze-drying (dondurarak kurutma) gibi tekniklerle yönlendirilmiş gözenek mimarileri elde edilerek piezoelektrik cevabın belirli doğrultularda artırılması mümkündür.
- ✓ Presleme işlemi piezoelektrik performansı anlamlı ölçüde artırsa da, presleme sıcaklığı ve basıncı gibi parametrelerin sistematik olarak optimize edilmesi, yapı-mekanik özellik dengelerini iyileştirebilir.
- ✓ Bu çalışmada yalnızca piezoelektrik etki değerlendirilmiştir, triboelektrik, termoelektrikvefotovoltaik sistemlerle birlikte hibrit enerji hasadı platformları oluşturmak mümkündür. Örneğin, BCZT katkılı piezoaerjeller, triboelektrik nanogenerator (TENG) yapılarıyla birleştirildiğinde çok daha yüksek çıkış gücü elde edilebilir. Bu yönde yapılan çalışmalar hem literatürde hem de endüstriyel alanda önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak; Bu tez çalışması, piezoelektrik performansı artırılmış, iletkenliği orta, termal olarak kararlı ve makrogözenekli yapıya sahip aerjel sistemlerinin geliştirilmesi açısından önemli bir başlangıç noktası sunmuştur. Ancak bu malzemelerin ileri teknoloji uygulamalarında yer bulabilmesi için yukarıda önerilen çok yönlü araştırma alanlarına yönelinmesi, bilimsel derinliği ve endüstriyel uygulanabilirliği önemli ölçüde artıracaktır.

KAYNAKLAR

- Abdolazizi, A., Wijesinghe, I., Marriam, I., Chathuranga, H., Golberg, D., & Yan, C. (2024). Development of Light, Strong, and Water-Resistant PVA Composite Aerogels. *Nanomaterials*, 14(9).
- Abdullah, O. G., Salman, Y. A. K., Tahir, D. A., Jamal, G. M., Ahmed, H. T., Mohamad, A. H., Azawy, A. K., Abdullah, C. :, Salman, O. G. :, Tahir, Y. A. K. :, Jamal, D. A. :, Ahmed, G. M. :, Mohamad, H. T. :, Azawy, A. H., (2021). Effect of ZnO Nanoparticle Content on the Structural and Ionic Transport Parameters of Polyvinyl Alcohol Based Proton-Conducting Polymer Electrolyte Membranes. *Membranes* 2021, Vol. 11, Page 163, 11(3),
- Aegerter, M. A., Leventis, N., Koebel, M., & Steiner III, S. A. (Eds.). (2023). *Springer Handbook of Aerogels*.
- Aguilar, M. R., & San Román, J. (2019). Introduction to Smart Polymers and Their Applications. *Smart Polymers and Their Applications*, 1–11.
- Altarabeen, R., Rusakov, D., Manke, E., Gibowsky, L., Schroeter, B., Liebner, F., & Smirnova, I. (2024). Lignin Polyurethane Aerogels: Influence of Solvent on Textural Properties. *Gels*, 10(12), 827.
- Alwin, S., & Sahaya Shajan, X. (2020). Aerogels: promising nanostructured materials for energy conversion and storage applications. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 9(2).
- Ambrosio, R., Carrillo, A., Mota, M. L., de la Torre, K., Torrealba, R., Moreno, M., Vazquez, H., Flores, J., & Vivaldo, I. (2018). Polymeric Nanocomposites Membranes with High Permittivity Based on PVA-ZnO Nanoparticles for Potential Applications in Flexible Electronics. *Polymers* 2018, Vol. 10, Page 1370, 10(12), 1370.
- Bahadır Mergen, Ö., Eylül Üniversitesi, D., Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, S., & Görüntüleme Teknikleri Programı, T. (2021). CS/PVA/PVP/GO Hibrit Kompozitlerin Hazırlanması ve Optik Bant Boşluğu Enerjilerinin Belirlenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(1), 46–55.
- Baur, C., Apo, D. J., Maurya, D., Priya, S., & Voit, W. (2014). Advances in piezoelectric polymer composites for vibrational energy harvesting. *ACS Symposium Series*, 1161, 46.
- Bheekhun, N., Talib, A. R. A., & Hassan, M. R. (2018). Feasibility study of a novel aerogel-based thermally sprayed coating. *Journal of Engineering Science and Technology*, 13(1), 1–8.
- Bhadwal, N., Ben Mrad, R., & Behdinin, K. (2023). Review of Zinc Oxide Piezoelectric Nanogenerators: Piezoelectric Properties, Composite Structures and Power Output. *Sensors*, 23(8).
- Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). Aging of Gels. *Sol-Gel Science*, 356–405.
- Buckley, D., Lonergan, A., & O'Dwyer, C. (2024). ZnO-based Semiconductors and Structures for Transistors, Optoelectronic Devices and Sustainable Electronics.
- Chen, B., Chen, G., Zeng, T., Liu, T., Mei, Y., Bi, Y., Luo, X., & Zhang, L. (2013). Monolithic zinc oxide aerogel with the building block of nanoscale crystalline particle. *Journal of Porous Materials*, 20(5), 1051–1057.
- Chen, X., Zhu, Q., Jiang, B., Li, D., Song, X., Huang, L., Zhang, Y., Chen, J., & Yuan, Q. (2024). Research progress of wood and lignocellulose in sustainable piezoelectric systems. *Nano Energy*, 126, 109650.

- Choi, Y. J., Yoo, M. J., Kang, H. W., Lee, H. G., Han, S. H., & Nahm, S. (2013). Dielectric and piezoelectric properties of ceramic-polymer composites with 0-3 connectivity type. *Journal of Electroceramics*, 30(1–2), 30–35.
- Choudhary, S. (2017). Dielectric dispersion and relaxations in (PVA-PEO)-ZnO polymer nanocomposites. *Physica B: Condensed Matter*, 522, 48–56.
- Costa, P., Oliveira, J., Horta-Romaris, L., Abad, M. J., Moreira, J. A., Zapirain, I., Aguado, M., Galván, S., & Lanceros-Mendez, S. (2018). Piezoresistive polymer blends for electromechanical sensor applications. *Composites Science and Technology*, 168, 353–362.
- Dagdeviren, C., Yang, B. D., Su, Y., Tran, P. L., Joe, P., Anderson, E., Xia, J., Doraiswamy, V., Dehdashti, B., Feng, X., Lu, B., Poston, R., Khalpey, Z., Ghaffari, R., Huang, Y., Slepian, M. J., & Rogers, J. A. (2014). Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(5), 1927–1932.
- Du, Y., Jian, G., Zhang, C., & Wang, F. (2023). Coral-like BaTiO₃-Filled Polymeric Composites as Piezoelectric Nanogenerators for Movement Sensing. *Polymers*, 15(15).
- Duan, X., Wang, J., He, Y., & Ma, P. (2023). High dielectric properties and phase structure of the new kind lead-free Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃–(Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Zr_{0.10}Ti_{0.90})O₃ ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(14), 1–7.
- Fayaz, M. U., Wang, Q., Liang, S., Bai, H., Pan, F., & Song, C. (2024). Electric Field Induced Ion Migration and Property Tuning in Functional Oxides. *Accounts of Materials Research*, 5(5), 648–660.
- Fernandes, D. M., Hechenleitner, A. A. W., Lima, S. M., Andrade, L. H. C., Caires, A. R. L., & Pineda, E. A. G. (2011). Preparation, characterization, and photoluminescence study of PVA/ZnO nanocomposite films. *Materials Chemistry and Physics*, 128(3), 371–376.
- Gajra, B., Pandya, S. S., Vidyasagar, G., Rabari, H., Dedania, R. R., & Rao, S. (2012). Poly vinyl alcohol hydrogel and its pharmaceutical and biomedical applications: A review. *International Journal of Pharmaceutical Research*, 4(2), 20–26.
- Gong, X., Tang, C. Y., Pan, L., Hao, Z., & Tsui, C. P. (2014). Characterization of poly(vinyl alcohol) (PVA)/ZnO nanocomposites prepared by a one-pot method. *Composites Part B: Engineering*, 60, 144–149.
- Gulomov, J., Accouche, O., Aliev, R., Ghandour, R., & Gulomova, I. (2023). Investigation of n-ZnO/p-Si and n-TiO₂/p-Si Heterojunction Solar Cells: TCAD + DFT. *IEEE Access*, 11, 38970–38981.
- Gurav, J. L., Jung, I. K., Park, H. H., Kang, E. S., & Nadargi, D. Y. (2010). Silica Aerogel: Synthesis and Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2010(1), 409310.
- Gusarov, B. (2025). PVDF piezoelectric polymers : characterization and application to thermal energy harvesting. Retrieved May 13, 2025, from
- Habib, A., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., & Atiqah, A. (2024). A review of electrical and piezoelectric properties of nanocellulose biocomposites. *Physical Sciences Reviews*, 9(12), 3579–3600.
- Han, H., & Ko, J. (2021). Power-Generation Optimization Based on Piezoelectric Ceramic Deformation for Energy Harvesting Application with Renewable Energy. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2171, 14(8), 2171.

- Han, J., Lei, T., & Wu, Q. (2013). Facile preparation of mouldable polyvinyl alcohol-borax hydrogels reinforced by well-dispersed cellulose nanoparticles: Physical, viscoelastic and mechanical properties. *Cellulose*, 20(6), 2947–2958.
- Hansen, N. (2004). Hall-petch relation and boundary strengthening. *Scripta Materialia*, 51(8 SPEC. ISS.), 801–806.
- Heidarshenas, M., Kokabi, M., & Hosseini, H. (2019). Shape memory conductive electrospun PVA/MWCNT nanocomposite aerogels. *Polymer Journal*, 51(6), 579–590.
- Hou, X., Mao, Y., Zhang, R., & Fang, D. (2021). Super-flexible polyimide nanofiber cross-linked polyimide aerogel membranes for high efficient flexible thermal protection. *Chemical Engineering Journal*, 417.
- Javadi, A., Zheng, Q., Payen, F., Javadi, A., Altin, Y., Cai, Z., Sabo, R., & Gong, S. (2013). Polyvinyl alcohol-cellulose nanofibrils-graphene oxide hybrid organic aerogels. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 5(13), 5969–5975.
- Ji, X., Peng, Q., Wang, C., & Shi, J. (2023). Structure and sintering characteristics of rapid synthesizing BCZT powders by microwave assisted sol-gel-hydrothermal method at low temperature. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(28), 1–10.
- Kausar, A. (2019). Polybenzimidazole-based nanocomposite: current status and emerging developments. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 58(18), 1979–1992.
- Kim, E. S., & Jeon, C. J. (2011). Dependence of Dielectric Properties on the Crystallinity of Ceramic/Polymer Composites. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 58(9), 1939–1946.
- Kim, H., Tadesse, Y., & Priya, S. (2009). Piezoelectric Energy Harvesting. *Energy Harvesting Technologies*, 3–39.
- Kim, S. B., Park, J. H., Kim, S. H., Ahn, H., Wickle, H. C., & Kim, D. J. (2011). Fabrication and analytical modeling of transverse mode piezoelectric energy harvesters. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 1397(1), 84–89.
- Kim, Y. S., Xie, Y., Wen, X., Wang, S., Kim, S. J., Song, H. K., & Wang, Z. L. (2015). Highly porous piezoelectric PVDF membrane as effective lithium ion transfer channels for enhanced self-charging power cell. *Nano Energy*, 14, 77–86.
- Kistler, S. S. (1931). Coherent expanded aerogels and jellies [5]. *Nature*, 127(3211), 741.
- Li, X., Sun, X., Zhang, X., Zheng, Y., & Minus, M. L. (2024). Ease-of-manufacture highly transparent thin polyvinyl alcohol aerogel. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1–10.
- Li, X., Zhang, X., Zhang, H., Sun, X., Mu, Y., Barrett, T., Doyle, C., Minus, M. L., & Zheng, Y. (2024b). Transparent and Flexible Hierarchical Porous Structure of Polyvinyl Alcohol Aerogel: A Microstructure Study. *Materials*, 17(21), 5312. <https://doi.org/10.3390/MA17215312/S1>
- Liang, X., Zhong, H. J., Ding, H., Yu, B., Ma, X., Liu, X., Chong, C. M., & He, J. (2024). Polyvinyl Alcohol (PVA)-Based Hydrogels: Recent Progress in Fabrication, Properties, and Multifunctional Applications. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 2755, 16(19), 2755.
- Liu, D., Hu, G., Huang, T., Yu, B., Yu, H., & Zhu, M. (2022). Elastic polybenzimidazole nanofiber aerogel for thermal insulation and high-temperature oil adsorption. *Journal of Materials Science*, 57(25), 12125–12137.

- Liu, H., Chen, X., Zheng, Y., Zhang, D., Zhao, Y., Wang, C., Pan, C., Liu, C., & Shen, C. (2021). Lightweight, Superelastic, and Hydrophobic Polyimide Nanofiber/MXene Composite Aerogel for Wearable Piezoresistive Sensor and Oil/Water Separation Applications. *Advanced Functional Materials*, 31(13).
- Liu, L., Mei, Z., Tang, A., Azarov, A., Kuznetsov, A., Xue, Q. K., & Du, X. (2016). Oxygen vacancies: The origin of n-type conductivity in ZnO. *Physical Review B*, 93(23).
- Liu, Q., Zhang, Y., Gao, J., Zhou, Z., Wang, H., Wang, K., Zhang, X., Li, L., & Li, J. F. (2018). High-performance lead-free piezoelectrics with local structural heterogeneity. *Energy & Environmental Science*, 11(12), 3531–3539.
- Liu, T., Wang, Y., Yu, J., & Hu, Z. (2022). Recyclable and high-performance metal coordination bonds cross-linked polybenzimidazole aerogels for flame retardancy, thermal insulation and dyes adsorption applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 163, 107253.
- Long, X., Wei, X., Qiu, Y., Jiang, M., Chen, Z., Song, Y., Bi, L., Wang, J., Wang, S., & Liao, J. (2021). Lead zirconate titanate aerogel piezoelectric composite designed with a biomimetic shell structure for underwater acoustic transducers. *Chemical Communications*, 57(76), 9764–9767.
- Lu, X., Deng, W., Wei, J., Wan, Y., Zhang, J., Zhang, L., Jin, L., & Cheng, Z. Y. (2021). Crystallization behaviors and related dielectric properties of semicrystalline matrix in polymer-ceramic nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109195.
- Lv, F., Hong, Z., Ahmad, Z., Li, H., Wu, Y., & Huang, Y. (2023). Design of Flexible Piezoelectric Nanocomposite for Energy Harvesters: A Review. *Energy Material Advances*, 4.
- Lv, Q., Yang, J., Sun, X., Tang, H., & Wang, L. (2023). Preparation of highly efficient thermal insulating halloysite nanotubes/polyvinyl alcohol composite aerogel based on a simple freeze-drying strategy. *Polymer Composites*, 44(3), 1648–1657.
- M., & Tarihçesi, M. (2024). Alkali Metal Katkılı ZnO Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(3), 1230–1241.
- Mahendia, S., Tomar, A. K., & Kumar, S. (2010). Electrical conductivity and dielectric spectroscopic studies of PVA–Ag nanocomposite films. *Journal of Alloys and Compounds*, 508(2), 406–411.
- Maleki, A., HashemiNejad Ashrafi, M., & Raei, H. (2008). Dielectric properties of polyvinyl alcohol, poly (methyl methacrylate), polyvinyl butyral resin and polyimide at low temperatures. *Academia Green Energy*.
- Menshutina, N., Tsygankov, P., Khudeev, I., & Lebedev, A. (2022). Intensification methods of supercritical drying for aerogels production. *Drying Technology*, 40(7), 1278–1291.
- Mureddu, M., Bartolomé, J. F., Lopez-Esteban, S., Dore, M., Enzo, S., García, Á., Garroni, S., & Pardo, L. (2023). Solid State Processing of BCZT Piezoceramics Using Ultra Low Synthesis and Sintering Temperatures. *Materials*, 16(3).
- Mureddu, M., Reyes-Montero, A., Lopez-Esteban, S., Bartolome, J. F., Enzo, S., Pardo, L., & Garroni, S. (2025). Hallmarks of BCZT-based piezoceramics: From chemical fundamental to processing route and biomedical applications. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.

- Nayak, B., Anwar, S., Kumar, A., & Anwar, S. (2024). Modulating Energy Harvesting Behavior of PVDF Piezo-Polymer by Incorporation of BCZT Ceramic Filler. *ACS Applied Electronic Materials*, 6(2), 1189–1203.
- Onay, M. (2011). Sensör ve aktuatör uygulamaları için polimer/PZT kompozitlerin geliştirilmesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Özaytekin, İ. (2007). Poli(benzazol) türevlerinin sentezi ve bazı fizikomekanik özelliklerinin incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Pakolpakçıl, A. (2022). Effect of Glutaraldehyde Crosslinking Parameters on Mechanical and Wetting Properties of PVA/NaAlg Electrospun Mat. *Sakarya University Journal of Science*, 26(5), 990–999.
- Pan, M., Yuan, C., Liang, X., Zou, J., Zhang, Y., & Bowen, C. (2020). Triboelectric and Piezoelectric Nanogenerators for Future Soft Robots and Machines. *IScience*, 23(11), 101682.
- Pang, Z., Sun, H., Guo, Y., Du, J., Li, L., Li, Q., Yang, J., Zhang, J., Wu, W., & Yang, S. (2023). Research Advances of Porous Polyimide—Based Composites with Low Dielectric Constant. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 3341, 15(16), 3341.
- Parjansri, P., Kamnony, M., Intatha, U., Eitssayeam, S., & Tunkasiri, T. (2016). The electrical properties of BCZT lead-free ceramics induced by BaZrO₃ seeds. *Key Engineering Materials*, 690, 114–119.
- Pierre, A. C., & Pajonk, G. M. (2002). Chemistry of aerogels and their applications. *Chemical Reviews*, 102(11), 4243–4265.
- Pitsevich, G. A., Shundalau, M., Ksenofontov, M. A., & Umreiko, D. S. (2011). Vibrational analysis of 4,4'-methylene diphenyl diisocyanate. *Global Journal of Analytical Chemistry*, 2(3), 114–118.
- Polansky, R., Prosr, P., Pihera, J., Chvoika, J., & Kyselak, T. (2019). Improving dielectric properties and suppression of partial discharges in fiber/thermoset-matrix composites by polymeric nanofibers. *2019 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC 2019*, 5–8.
- Ponnamma, D. (2015). Graphene-Based Polymer Nanocomposites in Electronics *Springer*, 2015. Retrieved May 13, 2025, from
- Qiu, C., Wang, B., Zhang, N., Zhang, S., Liu, J., Walker, D., Wang, Y., Tian, H., ShROUT, T. R., Xu, Z., Chen, L. Q., & Li, F. (2020). Transparent ferroelectric crystals with ultrahigh piezoelectricity. *Nature* 2020 577:7790, 577(7790), 350
- Quan, Y., Wang, E., Ouyang, H., Xu, L., Jiang, L., Teng, L., Li, J., Luo, L., Wu, X., Zeng, Z., Li, Z., & Zheng, Q. (2024). Biodegradable and Implantable Triboelectric Nanogenerator Improved by β -Lactoglobulin Fibrils-Assisted Flexible PVA Porous Film. *Advanced Science*, 2409914.
- Sadhu, S. P. P., Siddabattuni, S., Muthukumar, V. S., & Varma, K. B. R. (2018). Enhanced dielectric properties and energy storage density of surface engineered BCZT/PVDF- HFP nanodielectrics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(8), 6174–6182.
- Safari, A., Allahverdi, M., & Akdogan, E. K. (2006). Solid freeform fabrication of piezoelectric sensors and actuators. *Journal of Materials Science*, 41(1), 177–198.
- Samanta, A., Ghosh, S., & Das, P. (2025). Extraction of silica and biochar from biomass waste for the synthesis of aerogel and its application for the removal of dye. *Biomass Conversion and Biorefinery*.

- Shah, S. A., Ali, H., Inayat, M. I., E. Mahmoud, E., AL Garalleh, H., & Ahmad, B. (2024). Effect of carbon nanotubes and zinc oxide on electrical and mechanical properties of polyvinyl alcohol matrix composite by electrospinning method. *Scientific Reports*, 14(1), 28107.
- Smith, M., & Kar-Narayan, S. (2022). Piezoelectric polymers: theory, challenges and opportunities. *International Materials Reviews*, 67(1), 65–88.
- Sodano, H. A., Inman, D. J., & Park, G. (2004). A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. *Shock and Vibration Digest*, 36(3), 197–205.
- Song, Y., Wu, T., Bao, J., Xu, M., Yang, Q., Zhu, L., Shi, Z., Hu, G. H., & Xiong, C. (2022). Porous cellulose composite aerogel films with super piezoelectric properties for energy harvesting. *Carbohydrate Polymers*, 288, 119407.
- Sroog, C. E. (1976). POLYIMIDES. *J Polym Sci Macromol Rev*, 11, 161–208.
- Sun, J., An, B., Zhang, K., Xu, M., Wu, Z., Ma, C., Li, W., & Liu, S. (2021). Moisture-indicating cellulose aerogels for multiple atmospheric water harvesting cycles driven by solar energy. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(43), 24650–24660.
- Şahin, İ., Özbakır, Y., İnönü, Z., Ulker, Z., & Erkey, C. (2017). Kinetics of Supercritical Drying of Gels. *Gels* 2018, Vol. 4, Page 3, 4(1), 3.
- Sik, H. (2025). Poly (2, 5- benzimidazole) based polymer electrolyte membranes for high temperature fuel cell applications. *Academia Mental Health and Well-Being*, 2(2).
- Tang, Y., Zheng, Q., Chen, B., Ma, Z., & Gong, S. (2017). A new class of flexible nanogenerators consisting of porous aerogel films driven by mechanoradicals. *Nano Energy*, 38, 401–411.
- Tichý*, J., Erhart, J., Kittinger*, E., & Přívratská, J. (2010). Piezoelectric Materials. *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics*, 119–185.
- Tuan, D. A., Tung, V. T., Chuong, T. V., & Hong, L. V. (2015). Properties of lead-free BZT-BCT ceramics synthesized using nanostructured ZnO as a sintering aid. *International Journal of Modern Physics B*, 29(32), 1550231.
- Venugopal, A., Agrawal, A., & Prabhu, S. V. (2014). Performance evaluation of piezoelectric and differential pressure sensor for vortex flowmeters. Measurement: *Journal of the International Measurement Confederation*, 50(1), 10–18.
- Verma, S., Mahajan, P., Padha, B., Ahmed, A., & Arya, S. (2023). Nanowires based solid-state asymmetric self-charging supercapacitor driven by PVA–ZnO–KOH flexible piezoelectric matrix. *Electrochimica Acta*, 465, 142933.
- Vogel, H., & Marvel, C. S. (1961). Polybenzimidazoles, new thermally stable polymers. *Journal of Polymer Science*, 50(154), 511–539.
- Wang, Y., Yang, T. X., Fishel, K., Benicewicz, B. C., & Chung, T.-S. (2015). Polybenzimidazoles. In O. Olabisi & K. A. Adewale (Eds.), *Handbook of thermoplastics* (2nd ed., pp. 617–667).
- Wang, Z., Wang, J., Chao, X., Wei, L., Yang, B., Wang, D., & Yang, Z. (2016). Synthesis, structure, dielectric, piezoelectric, and energy storage performance of (Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Ti_{0.9}Zr_{0.1})O₃ ceramics prepared by different methods. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(5), 5047–5058. <https://doi.org/10.1007/S10854-016-4392-X>
- L., Fu, Q., Zhou, D., Wang, M., Zheng, Z., Luo, W., & Wang, G. (2019). Enhanced electrical properties of BaTiO₃-based thermosensitive ceramics for multilayer chip thermistors applications by addition of (Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO₃. *Ceramics International*, 45(15), 19113–19119.

- Yang, L., Yang, J., Tang, L. S., Feng, C. P., Bai, L., Bao, R. Y., Liu, Z. Y., Yang, M. B., & Yang, W. (2020). Hierarchically Porous PVA Aerogel for Leakage-Proof Phase Change Materials with Superior Energy Storage Capacity. *Energy and Fuels*, 34(2), 2471–2479.
- Yempally, S., Bonthula, S., & Ponnammma, D. (2024). Triboelectric power generation performance of polyvinyl alcohol using ZnO–CuO–AgO trimetallic nanoparticles. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 13(2), 265–277.
- Zeeshan, Soomro, A. M., & Cho, S. (2022). Design and Fabrication of a Robust Chitosan/Polyvinyl Alcohol-Based Humidity Sensor energized by a Piezoelectric Generator. *Energies*, 15(20), 7609.
- Zhang, D., Zhang, X., Li, X., Wang, H., Sang, X., Zhu, G., & Yeung, Y. (2022). Enhanced piezoelectric performance of PVDF/BiCl₃/ZnO nanofiber-based piezoelectric nanogenerator. *European Polymer Journal*, 166.
- Zhang, L., Ni, Q. Q., Shiga, A., Fu, Y., & Natsuki, T. (2010). Synthesis and mechanical properties of polybenzimidazole nanocomposites reinforced by vapor grown carbon nanofibers. *Polymer Composites*, 31(3), 491–496.
- Zhang, T., Hu, C., & Yang, S. (2020). Ion Migration: A “Double-Edged Sword” for Halide- Perovskite-Based Electronic Devices. *Small Methods*, 4(5).
- Zhang, X., Villafuerte, J., Consonni, V., Capsal, J. F., Cottinet, P. J., Petit, L., & Le, M. Q. (2021). Characterizing and optimizing piezoelectric response of zno nanowire/pmma composite-based sensor. *Nanomaterials*, 11(7).
- Zhao, B., Liu, Q., Tang, G., & Wang, D. (2024). Microstructure and Biocompatibility of Graphene Oxide/BCZT Composite Ceramics via Fast Hot-Pressed Sintering. *Coatings 2024*, Vol. 14, Page 689, 14(6), 689.
- Zhao, M.-H., Wang, Z.-L., & Mao, S. X. (2004). Piezoelectric characterization of individual zinc oxide nanobelt probed by piezoresponse force microscope. *Nano Letters*, 4(4), 587–590.
- Zheng, Q., Zhang, H., Mi, H., Cai, Z., Ma, Z., & Gong, S. (2016). High-performance flexible piezoelectric nanogenerators consisting of porous cellulose nanofibril (CNF)/poly(dimethylsiloxane) (PDMS) aerogel films. *Nano Energy*, 26, 504–512.
- Zheng, W., Yang, Y., Fan, L., Ye, D., Xu, W., & Xu, J. (2023). Ultralight PPy@PVA/BC/MXene composite aerogels for high-performance supercapacitor electrodes and pressure sensors. *Applied Surface Science*, 624, 157138.
- Zhong, X., Nag, A., Zhou, J., Takada, K., Yusof, F. A. A., Mitsumata, T., Oqmhula, K., Hongo, K., Maezono, R., & Kaneko, T. (2022). Stepwise copolymerization of polybenzimidazole for a low dielectric constant and ultrahigh heat resistance. *RSC Advances*, 12(19), 11885–11895.
- Zhou, Z., Zholobko, O., Wu, X. F., Aulich, T., Thakare, J., & Hurley, J. (2021). Polybenzimidazole-based polymer electrolyte membranes for high-temperature fuel cells: Current status and prospects. *Energies*, 14(1).
- Zhu, Q., Song, X., Chen, X., Li, D., Tang, X., Chen, J., & Yuan, Q. (2024). A high performance nanocellulose-PVDF based piezoelectric nanogenerator based on the highly active CNF@ZnO via electrospinning technology. *Nano Energy*, 127, 109741.
- Zidani, J., Tajounte, L., Benzaouak, A., Touach, N., Duong, A., Zannen, M., & Lahmar, A. (2025). Advances in Lead-Free Flexible Piezoelectric Materials for Energy and Evolving Applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*.

Zong, Y., Wang, R., Xu, S., Zhang, R., & Zhang, Z. (2023). Flexible Piezoelectric Nanogenerator Based on Cellulose Nanofibril/MXene Composite Aerogels for Low- Frequency Energy Harvesting. *ACS Applied Nano Materials*, 6(10), 9021–9031.



EK-1

Şekil 1.1. Piezoelektrik etki

Şekil 3.1. PBI-I_b (Özaytekin, 2007)

Şekil 3.2. Homojenizatörde karıştırma işlemi

Şekil 3.3. Kalıba yerleştirilen jeller

Şekil 3.4. Süperkritik CO₂ ekstraksiyon sistemi

Şekil 4.1. Kurutma öncesi aerjel çapları

Şekil 4.2. Kurutma sonrası aerjel çapları

Şekil 4.3. Piezoaerjel örneklerin FTIR grafiği

Şekil 4.4. Piezoaerjel örneklerin EDX-FESEM-Fiber Çap Dağılımları

Şekil 4.5. PVA/PBI (%3), PVA/PBI/ZNO (%3), PVA/PBI/PBZT (%3) aerjellerin termogravimetrik analizi

Şekil 4.6. Piezoaerjel örneklerin preslendikten sonra osiloskop görüntüleri A) %1 PBI, B) %2 PBI, C) %3 PBI, D) %1 ZNO, E) %2 ZNO, F) %1-3 ZNO, G) %1 BCZT, H) %2 BCZT, I) %3 BCZT

Şekil 4.7. Piezoaerjel numunenin two-probdaölçümü

Şekil 4.8. Piezoaerjel numunelerin güç yoğunluğu

Şekil 4.9. A; PVA/PBI/ %3 ZNO, B;PVA/PBI/ %3 BCZT l numunelerinin porozite ölçüm öncesi ve sonrası

EK-2

Çizelge 1.1. Piezoelektrik Kompozit Aerjellerin Avantajları

Çizelge 4.1. Piezoaerjel malzemelerin preslenmeden önce gerilim ve güç değerleri

Çizelge 4.2. Piezoaerjel malzemelerin preslendikten sonra gerilim ve güç değerleri

Çizelge 4.3. Piezoaerjel malzemelerin preslendikten sonra elektriksel iletkenlikleri

Çizelge 4.4. Literatür güç yoğunluğu karşılaştırması

Çizelge 4.5. Piezoaerjel malzemelerin dielektrik sabiti

Çizelge 4.6. Piezoaerjel malzemelerin yoğunluk ve porozitesi