

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

POLİSTİRENE GÖMÜLÜ BOR DİPİROMETAN
HİBRİT NANOFİBERLERİN HAZIRLANMASI,
KARAKTERİZASYONU VE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

ZEHRA YAMAK KAHVECİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİSTİRENE GÖMÜLÜ BOR
DİPİROMETAN HİBRİT NANOFİBERLERİN
HAZIRLANMASI, KARAKTERİZASYONU
VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**ZEHRA YAMAK KAHVECİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA ANABİLİM DALI**

**DANIŞMANI
Prof. Dr. Bünyemin ÇOŞUT**

**GEBZE
2023**

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**PREPARATION, CHARACTERIZATION,
AND INVESTIGATION OF PROPERTIES OF
POLYSTYRENE-EMBEDDED BORON
DIPYRROMETHENE HYBRID
NANOFIBERS**

ZEHRA YAMAK KAHVECİ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE DEPARTMENT OF
CHEMISTRY**

THESIS SUPERVISOR
Prof. Dr. Bünyemin ÇOŞUT

GEBZE
2023



YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 06/07/2023 tarih ve 2023/37 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 3170772023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Zehra YAMAK KAHVECİ'nin tez çalışması Kimya Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. BÜNYEMİN ÇOŞUT

ÜYE

: Doç .Dr. İBRAHİM FAZIL ŞENGÜL

ÜYE

: Prof. Dr. ESRA TANRIVERDİ EÇİK

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Elektro eğirme nanofiberlerin elde edilmesinde basit, yaygın ve çok yönlü bir tekniktir. Bu işlem, polimer çözeltisini besleme ünitesine konulup, metal iğne ucu ile toplayıcı yüzey arasında bir elektriksel alan oluşturulması temeline dayanarak Taylor konisi üzerindeki yüzey gerilimini aşır bir polimer jet oluşturmaktadır. Jetin toplayıcı yüzeyine iletimi esnasında uygulanan dış elektrostatik çekim alanı ile jet içerisindeki yüzey yüklerinin itici kuvvetleri arasında meydana gelen etkileşimler jet içindeki polimer zincirlerinin gerilmelerini sağlayarak nanofiber olarak adlandırılan çok küçük çaplara sahip fiberlerin oluşturulmasını sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında, polistirene gömülü bor dipirometan hibrit nanofiberleri elektro eğirme tekniğiyle hazırlanarak, karakterizasyonu, antibakteriyel ve fotokatalitik özelliklerinin incelenmesi amaçlandı. Bu kapsamda, nanofiberlerin üretimi için toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilen ve ticari olarak satın alınan bir polimer olan Polistiren (PS) ile basit ve çok yönlü bir teknik olan elektro eğirme tekniği kullanıldı. İlk olarak, homojen PS nanofiber üretmek için elektro eğirme parametreleri optimize edildi.

Üretilen nanofiberler FT-IR, SEM, EDX ve TGA yöntemleriyle karakterize edildi. Daha sonra nanofiberlere katılacak C2 ve C6 pozisyonlarında iyot atomu içeren BODIPY (2) türevi sentezlendi. Sentezlenen bileşiğin yapısı FT-IR, Kütle, ¹H-NMR, ¹³C-NMR ve UV-Vis spektrometreleri ile aydınlatıldıktan sonra, elektro eğirme prosesi öncesi ve elektro eğirme prosesi sonrasında olmak üzere iki farklı teknikle birleştirilerek hibrit PS nanofiberler hazırlandı. Hazırlanan tüm ürünlerin yapıları FTIR, TGA, EDX ve SEM yöntemleri ile karakterize edildi.

Bu çalışmada ayrıca katılandırılmamış PS nanofiberin ve 2 bileşiği ile katılandırılan hibrit nanofiberlerin Rhodamine B (Rh B) bozunma sürecindeki fotokatalitik aktiviteleri ve farklı bakterilerinde oluşturduğu büyüme inhibisyonu *S. aureus* ve *E. coli* suşları kullanılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: BODIPY, Elektro eğirme, Polistiren Nanofiber, Hibrit Nanofiber.

SUMMARY

Electrospinning is a prevalent technique for creating nanofibers. It involves the application of an electric field to a polymer solution, forming a polymer jet. The interaction between the electrostatic attraction and surface charges inside the jet stretches the polymer chains, resulting in nanofibers—ultra-thin fibers with minuscule diameters.

Within this thesis, it was aimed to prepare and characterize polystyrene embedded boron dipyrromethane hybrid nanofibers via electrospinning technique, and investigate their antibacterial and photocatalytic properties. In this context, Polystyrene (PS), a non-toxic, biodegradable, and commercially available polymer was used for producing nanofibers using the straightforward and multifaceted technique of electrospinning. Initially, the electrospinning parameters were optimized to produce homogenous PS nanofibers.

The produced nanofibers were characterized by FT-IR, SEM, EDX, and TGA methods. Afterwards, a BODIPY (2) derivative containing an iodine atom at C2 and C6 positions to be added to the nanofibers was synthesized. After the structure of the synthesized compound was elucidated with FT-IR, Mass, ¹H-NMR, ¹³C-NMR, and UV-Vis spectrometers, hybrid PS nanofibers were prepared by combining two different techniques before and after the electrospinning process. The structures of all prepared products were characterized with FTIR, TGA, EDX, and SEM methods.

This study also investigated the photocatalytic activities in Rhodamine B (Rh B) degradation process and growth inhibition caused in different bacteria of unmodified PS nanofiber and hybrid nanofibers modified with 2 compounds using *S. aureus* and *E. coli* strains.

Keywords: BODIPY, Electrospinning, Polystyrene Nanofiber, Hybrid, Nanofiber.

TEŞEKKÜR

Başta, bu çalışmanın oluşumunun yolunu açan, engin bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden değerli danışmanım Prof. Dr. Bünyemin ÇOŞUT'a

Laboratuvar çalışmalarım sırasında her konuda yardımcı oldukları için tüm Çoşut Araştırma Laboratuvarı üyelerine; Araştırma Görevlisi Burcu TOPALOĞLU AKSOY'a, Emrah ÖZCAN'a, Azam SEİFİ NADERGOLİ'ye ve değerli arkadaşım Öğretim Görevlisi Ayşen Orhan ERKOVAN'a,

Antibakteriyel aktivite testleri konusunda destek veren Prof. Dr. Nuri ÖZTÜRK'e,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Esra Nur KAYA'ya, Dr Aişe ÜNLÜ'ye, Dr. Nazmiye KILIÇ'a ve arkadaşım Kamile Esin ÖZKÖK'e,

Hayatımın her anında benden desteklerini esirgemeyen annem ve babama, çalışmam boyunca sonsuz anlayış, desteği ve büyük sabrı için sevgili eşim Kadir KAHVECİ'ye, çocuklarım Mazhar Ali ve Masal Alin'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER	2
2.1. Nanofiber	2
2.2. Nanofiber Üretim Yöntemleri	2
2.3. Elektro Eğirme ve Çalışma Prensibi	2
2.4. Morfolojik Özellikler	4
2.5. Elektro Eğirme Yöntemine Etki Eden Parametreler	5
2.5.1. Çözücü Seçimi	6
2.5.2. Çözelti Konsantrasyonu	6
2.5.3. Çözeltinin iletkenliği	7
2.5.4. Akış Hızı	7
2.5.5. Voltaj	7
2.5.6. Toplayıcı ile İğnenin Birbirine Olan Uzaklığı	7
2.5.7. Ortam Koşulları	8
2.6. Elektro Eğirme ile Üretilen Nanofiberlerin Kullanım Alanları	8
2.7. Elektro Eğirme ile Üretilen Nanofiberlerin Katkılandırılması	11
2.8. Elektro Eğirme Yönteminde Kullanılan Polimerler	12
2.8.1. Polistiren	13
2.9. BODIPY Bileşikleri	13
3. DENEYSEL BÖLÜM	15
3.1. BODIPY Bileşiğinin (1) Sentezi	16
3.2. 2 ve 6 Pozisyonlarından İyot ile Katkılandırılmış BODIPY Bileşiğinin (2) Sentezi	17
3.3. PS Nanofiberlerinin Hazırlanması ve Optimizasyon Denemeleri	18

3.4. PS/BODIPY Nanofiberlerin Hazırlanması ve Optimizasyon Denemeleri	22
3.4.1. Elektro Eğirme Öncesi BODIPY ile Katkılandırma	22
3.4.2. Elektro Eğirme Sonrası BODIPY ile Katkılandırma	24
4. DENEYSEL BULGULAR	25
4.1. Polistiren Nanofiberlerin Karakterizasyonu	25
4.2. BODIPY Bileşiminin (1) Karakterizasyonu	27
4.3. 2 ve 6 Pozisyonlarından İyot ile Katkılandırılmış İyotlu BODIPY Bileşiminin (2) Karakterizasyonu	29
4.4. PS/ BODIPY Nanofiberlerin Karakterizasyonu	32
4.5. PS+B-1 Nanofiberlerin Karakterizasyonu	34
5. UYGULAMA DENEMELERİ	37
5.1. Antibakteriyel Aktivite Testi	37
5.2. Rodamin B'nin Fotokatalitik Giderimi	38
6. SONUÇ	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve :</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
BF ₃ .OEt ₂	Bortrifloroetileterat
BODIPY :	Bor Dipirometen
(C ₂ H ₅) ₃ N :	Trietilamin
Na ₂ S ₂ O ₃ :	Sodyum tiyo sülfat
DDQ :	2,3-Dikloro-5,6-disiyano-1,4-benzokinon
°C :	Santigrad derece
% :	Yüzde
δ :	Kimyasal kayma değeri (ppm)
ϵ :	Molar absorplama katsayısı
CFU/mL :	(Colony forming unit)1 ml 'deki koloni oluşturan bakteri sayısı
cm :	Santimetre
DCM :	Diklorometan
DMF :	Dimetilformamit
EDX :	Enerji Dağılım X-Işını Spektrometresi
E. Coli :	Escherichia coli
FT-IR :	Fourier Dönüşümlü Infrared Spektroskopisi
kV :	Kilovolt
LB :	(Lysogeny broth) Bakteri büyümesi için kullanılan besiyeri
MALDI :	Matriks Destekli Lazer Desorpsiyon İyonlaşma
MH :	(Mueller-Hinton) Antibiyotik duyarlılık test besiyeri
mg :	Miligram
mL :	Mililitre
mL/h :	Mililitre / saat
mmol :	Milimol
mm :	Milimetre
nm :	Nanometre
NMR :	Nükleer Magnetik Resonans

SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
S. aureus	:	Staphylococcus aureus
sn	:	Saniye
TGA	:	Termogravimetrik Analiz Cihazı
TFA	:	Trifloro asetik asit
TLC	:	İnce tabaka kromatografisi (thin layer chromatography)
OD600	:	600 nm dalga boyunda ölçülen numunenin optik yoğunluğu
PS	:	Polistiren
Rh B	:	Rhodamine B
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
S. aureus	:	Staphylococcus aureus
sn	:	Saniye
TGA	:	Termogravimetrik Analiz Cihazı
TFA	:	Trifloro asetik asit
TLC	:	İnce tabaka kromatografisi (thin layer chromatography)
UV-Vis	:	Ultraviyole-Visible
wt. %	:	Yüzde ağırlık
w/w	:	Kütle/Kütle
μ L	:	Mikro litre

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Elektro eğirme düzeneği.	3
2.2: SEM fiber yapı görüntüsü.	4
2.3: SEM boncuklu yapı görünümü.	4
2.4: Farklı polimer konsantrasyon çözeltilerinden elde edilen nanoliflerin SEM fotoğrafları.	6
2.5: En çok kullanılan polimerlerden üretilen nanofiberlerin sem görüntüleri.	12
2.6: Polistrenin yapısı.	13
2.7: BODIPY Çekirdeğinin Yapısı.	14
3.1: 1 numaralı Bileşiğinin Sentezi.	17
3.2: 2 Bileşiğinin Sentezi.	17
3.3: DMF ile hazırlanan PS nanofiberlerinin üretimi.	18
3.4: Çalışma laboratuvarında bulunan elektro eğirme cihazı.	19
3.5: DMF ile hazırlanmış PS nanofiberlerin SEM görüntüsü.	19
3.6: DMF ve THF ile hazırlanmış PS nanofiberlerin SEM görüntüsü.	20
3.7: DMF ve THF ile hazırlanan PS nanofiberlerin SEM görüntüsü.	20
3.8: PS/BODIPY Nanofiberlerinin Hazırlanması.	22
3.9: Elektro Eğirme Sonrası BODIPY ile Katkılandırma.	24
4.1: Saf PS ve PS nanofiberin FT-IR spektrumları.	25
4.2: a) Ps-12, b) Ps-13 nanofiberleri için SEM görüntüleri, ortalama çap dağılımı ve fotoğrafları.	26
4.3: PS nanofiberin EDX spektrumu.	26
4.4: PS ve PS nanofiberin TGA termogramı.	27
4.5:1 Bileşiğin Kütle spektrumu.	27
4.6: 1 bileşiğin ¹ H-NMR Spektrumu.	28
4.7: 1 bileşiğin ¹³ C-NMR Spektrumu.	29
4.8: 1 numaralı bileşiğin Diklorometan İçerisindeki UV-Vis Spektrumu.	29
4.9: 2 numaralı Bileşiğin Kütle spektrumu.	30
4.10: 2 Bileşiğinin ¹ H-NMR Spektrumu.	30
4.11: 2 Bileşiğinin ¹³ C-NMR Spektrumu.	31
4.12: 2 bileşiğinin Diklorometan İçerisindeki UV-Vis Spektrumu.	31

4.11: PS/ BODIPY Nanofiberlerin FT-IR spektrumu.	32
4.12: a) Psb-10 b) Psb-15 nanofiberleri için SEM görüntüleri, ortalama çap dağılımı ve fotoğrafları.	32
4.13: PS/BODIPY nanofiberin EDX spektrumu.	33
4.14: BODIPY Bileşiği, PS ve PS/BODIPY (PSB-15) nanofiberlerin termogramı.	34
4.15: PS+B-1 nanofiberi için SEM görüntüsü, ortalama çap dağılımı ve fotoğrafı.	34
4.16: PS+B-1 nanofiberin EDX spektrumu	35
4.17: PS+B-1 nanofiberi için FT-IR spektrumu.	35
4.18: BODIPY bileşiği, PS ve PS+B-1 ' in nanofiberlerin termogramı.	36
5.1: PS+B-1 Nanofiberi ile Hazırlanan çözeltilere yerleştirilen a) <i>S. Aureus</i> b) <i>E. coli</i> antibiyogram diskler.	37
5.2: PB-15 Nanofiber ile hazırlanan çözeltilere yerleştirilen antibiyogram diskler.	38
5.3: Fotokatalitik çalışmaların yapıldığı deney düzeneği.	39
5.4: PS nanofiber için farklı Ph değerlerinde (a) 8 ve (b) 11 için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.	40
5.5: PSB-10 ve PSB-15 nanofiberler için (a) 10 mg ve (b) 15 mg için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.	40
5.6: Farklı Nanofiber miktarlarında (a) 20 mg ve (b) 30 mg için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.	41
5.7: PSB-15 nanofiber farklı Ph değerlerinde a) 8 ve b) 11 için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.	41
5.8: PSB-10 ve PSB-15 nanofiberler için Ph 4'te ve nanofiber miktarı (20 mg) sabit tutulup, (a) 10 mg ve (b) 15 mg için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.	42
5.9: Farklı Ph değerlerinde a) 8 ve b) 11 için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.	42

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Elektro Eğirmenin Parametreleri ve Bu Parametrelerin Nanofiberler Üzerindeki Etkileri.	5
3.1: Kimyasal Maddeler.	15
3.2: Cihazlar.	16
3.3: Ps nanofiberlerin üretim parametreleri	21
3.4: Ps/BOIPY Nanofiberlerin Üretim Parametreleri.	23
5.1: Bakteri Sayısı.	38

1. GİRİŞ

Elektro eğirme yöntemi, polimerler veya diğer malzemelerden nanofiber üretmek için kullanımının kolay, çözeltinin minimum miktarda tüketimi, kontrol edilebilir lif çapı, maliyetinin diğer üretim tekniklerine göre daha ekonomik olması, gibi avantajları nedeniyle diğer yöntemlere kıyasla tercih edilen bir yöntemdir[1]. Bu yöntem, bir elektrik alanı kullanarak malzemelerin eriyik veya çözelti halindeki halini çekerek, ince ve uzun lifler oluşturur. Elektro eğirme parametrelerinin değiştirilmesiyle farklı morfolojilerde nanofiberler üretilmektedir [2]. Yüksek yüzey alanı, kontrol edilebilir gözenek boyutu, birbirine bağlı gözenek yapısı, kolay işlevsellik, yüzey modifikasyonu, yeterli mekanik dayanım, iyi kristal yapı, üstün kinetik özellik, hafiflik, esneklik ve küçük gözenek boyutları gibi önemli özelliklere sahiptir. Elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, katalizörler, filtreler, sensörler, membranlar, piller, koruyucu giysiler, yara pansumanı, doku mühendisliği, biyomedikal uygulamalar, antibakteriyel uygulamalar, ilaç salınımı ve boya adsorpsiyonu gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır[1]. Ayrıca nanofiberlerin özelliklerini iyileştirmek, performanslarını artırmak ve belli uygulamalara uyum sağlamak için nanofiberlere katkı maddeleri eklemek yaygın bir uygulamadır.

Bu tez çalışması kapsamında, geniş kullanım alanı bulunan Polistiren (PS) polimeri ile fotokatalitik ve antibakteriyel özelliklere sahip 2,6-diiyodo-BODIPY'nin uygun oranlarda birleşiminden elde edilen hibrit nanofiberlerin hazırlanması amaçlanmıştır. Daha sonra hazırlanan ve karakterize edilen nanofiberler farklı bakteri suşlarına karşı antibakteriyel aktiviteleri ile boya gideriminde fotokatalitik özellikleri incelenmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen hibrit nanofiberler, istenen mekanik özelliklere ve yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip olmalarının yanı sıra antibakteriyel aktivite gösterdikleri anlaşılmıştır. Bu durum, antibakteriyel özelliklere sahip yeni malzemelerin geliştirilmesine, aynı zamanda biyomedikal mühendislik, doku mühendisliği ve antimikrobiyal kaplamalar gibi alanlarda uygulama potansiyeline sahip olmasını ve bilimsel alanda yeni fırsatlar sunmasını sağlamaktadır.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Nanofiber

Nanofiber, çapı 1000 nm'den daha ince olan liflerdir. Yüksek yüzey alanı, kontrol edilebilir gözenek boyutu, birbirine bağlı gözenek yapısı, kolay işlevsellik, yüzey modifikasyonu, dayanıma ilaveten iyi kristal yapı, üstün kinetik özellik, hafiflik, esneklik ve küçük gözenek boyutları gibi önemli özelliklere sahiptir. Sahip olduğu bu üstün özelliklerden dolayı nanofiberler oldukça geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptirler.

2.2. Nanofiber Üretim Yöntemleri

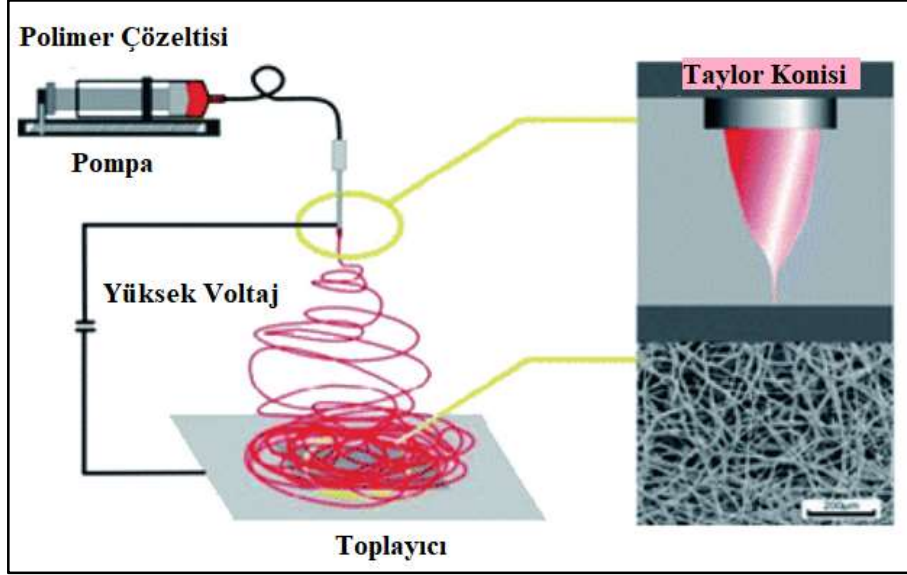
Nanofiber üretimi için çeşitli yöntemler vardır. Şekil 2.1 şematik nanofiber üretim tekniklerini göstermektedir. Bunlardan en çok kullanılanları; çekme metodu, şablon sentez metodu, faz ayrımı metodu, kendiliğinden tutunma metodu, basitlik, yüksek verimlilik, düşük maliyet ve yüksek tekrarlanabilirlik değerlerine sahiptir. Elektro eğirme yöntemi, nanofiberlerin üretimi için en sık kullanılan tekniktir [3].

2.3. Elektro Eğirme ve Çalışma Prensibi

Elektro eğirme, yüksek elektrik alanda yüklenmiş polimer çözeltisinin topraklanmış bir toplayıcı levhada biriktirilmesi olarak tanımlanır. Bu yöntem, elektrostatik kuvvetleri kullanarak sıvı polimer çözeltiden lif üretmeyi sağlar. Elektro eğirme yönteminin çok yönlülüğü ve verimliliği nanofiber üretimi için farklı yapıda malzemelerin elde edilmesi ve uygulama kolaylığı nedeniyle tercih edilen bir metottur [4].

Polimerik çözeltiler, elektro eğirme yöntemiyle kullanılan en basit malzemelerdir ve 200'den fazla polimer, elektro eğirme yöntemiyle üretilmektedir [2]. Nanofiberlerin oluşturulmasında kullanılan polimerler sentetik ve doğal polimer olabilirler. Bu kapsamda kullanılan polimerler, yüksek moleküler ağırlığa, az ve küçük yan zincirlere ve belirli çözücüler ve koşullarda kolayca çözünmeye sahip olmalıdırlar. Seramikler, karbon bazlı malzemeler, metaller [5], yarıiletken ve kompozit

malzemeler[6] elektro eğirme tekniğiyle nanofiberlerin üretiminde kullanılan malzemelerdir [7]. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi elektro eğirme sistemi en basit anlamda yüksek voltajlı bir güç kaynağı (genellikle kV aralığında), metalik iğneli bir şırınga ve topraklanmış bir toplayıcıdan oluşur [8].



Şekil 2.1: Elektro eğirme düzeneği.

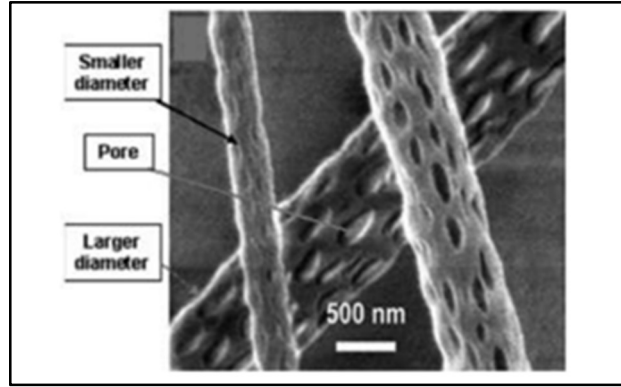
Elektro eğirme işleminde ilk önce istenilen polimerin uygun bir çözücü içinde çözülerek polimer çözeltisi elde edilir. Bu çözeltilere elektrostatik kuvvet uygulandığında nanometreden mikrometre ölçeğine kadar değişen çaplarda lifler üretilir. Tipik bir elektro çekim işleminde, çözeltilere veya eriyiklere yüksek voltaj uygulanır. Daha sonra, bir asılı damlacık oluşur. Elektrostatik itme sıvının yüzey geriliminin üstesinden gelmeye başladığında, sarkan damlacık deforme olarak iğnenin ucundaki Taylor konisi olarak bilinen konik bir damlacığa dönüşür. Elektrostatik kuvvet konik damlacığın yüzey gerilimini yendiğinde, iğnenin ucundan ince, yüklü bir polimer çözeltisi püskürtülür [9].

Elektrik alanı ile sıvının yüzey gerilimi arasındaki etkileşim, jet akımını gerer ve çözücünün buharlaşmasına yol açan bir kamçılama hareketine maruz kalmasını sağlar.

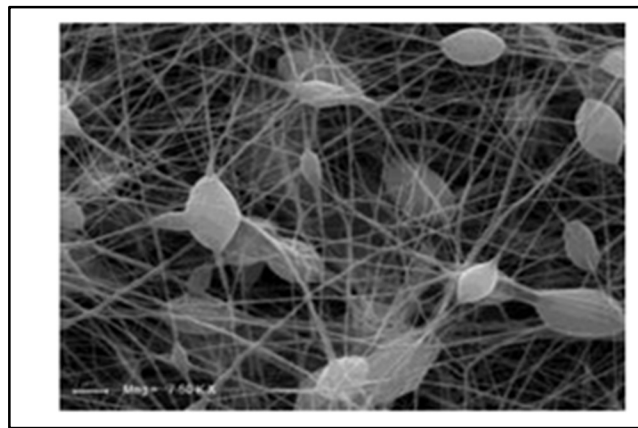
Sonuç olarak, elektro eğirme yöntemi, polimer çözeltisinden nanofiber elde etmek için elektrostatik kuvvetleri kullanır ve bu sayede farklı yapıda nanolifler üretmek mümkün olur. Bu yöntem, nanoteknoloji, tekstil, biyomedikal ve enerji gibi birçok alanda uygulama potansiyeline sahiptir [4].

2.4. Morfolojik Özellikler

Elektro eğirme yöntemiyle elde edilen nanofiberlerin toplayıcı üzerinde düzgün, tek tip olacak şekilde dağılmış ve ayarlanabilir çapta olması istenir. Fiber çapı genellikle SEM cihazında numune üzerine elektronların gönderilmesi ve yansımalarına göre görüntü alınır (Şekil 2.2) [10]. Daha sonra uygun analiz programıyla fiber çapı ölçülerek ortalama çap dağılımı hesaplanır. Elektro eğirme yönteminde parametrelerin doğru olarak ayarlanmaması halinde istenmeyen bir durum olan boncuk oluşumu meydana gelmektedir. Boncuklar, toplayıcı plaka üzerinde buharlaşmadan kalan polimer çözeltisi olarak adlandırılırlar. Elektron mikroskoplarıyla (Şekil 2.3) bu istenmeyen durumlar tespit edilmektedir [11].



Şekil 2.2: SEM fiber yapı görüntüsü.



Şekil:2.3: SEM boncuklu yapı görünümü.

Elektro eğirme ile nanofiberler üretme işleminde ideal hedefler şunlardır:

- Fiber çapları tutarlı ve kontrol edilebilir olmalıdır.
- Fiber yüzeyi hata içermemeli veya hata kontrol edilebilir olmalıdır.
- Nanofiberler sürekli toplanabilir olmalıdır.

Fiber çapı, elektro eğirme sürecinde en önemli niceliklerden biridir. [12]. İstenen fiber çapları ve morfolojilerinin elde edilmesi elektro eğirme işlemindeki parametrelerin kontrolüyle daha kolay ve mümkündür.

2.5. Elektro Eğirme Yöntemine Etki Eden Parametreler

Düzgün, homojen, istenilen morfoloji ve özelliklere sahip nanofiberler parametrelerin optimize edilmesiyle üretilebilir. Bu süreç, elektro eğirme tekniğinin zor ve vakit alan kısmıdır. Tablo 1.1, elektro eğirmenin parametrelerini ve bu parametrelerin nanofiberler üzerindeki etkisini göstermektedir [2].

Tablo 2.1: Elektro Eğirmenin Parametreleri ve Bu Parametrelerin Nanofiberler Üzerindeki Etkileri.

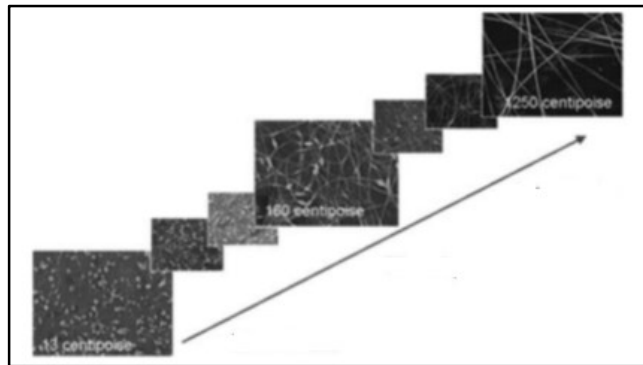
Parametre	Fiber Morfolojisine Etkisi
Uygulanan Voltaj ↑	Fiber çapı başlangıçta ↓ sonra ↑
Akış Hızı ↑	Fiber Çapı ↑ (Çok Fazla Akış Hızı Varsa Boncuk Oluşumu Gözlenir)
Kapiler ve Toplayıcı Arası Uzaklık ↑	Fiber Çapı ↓ (Mesafe Çok Kısa İse Boncuk Oluşumu Gözlenir)
Polimer Konsantrasyonu ↑	Fiber Çapı ↑ (Belli Bir Aralıkta)
Çözelti İletkenliği ↑	Fiber Çapı ↓ Geniş Çap Dağılımı
Çözücü Uçuculuğu ↑	Yüzeyde Gözenekler Oluşur ve Yüzey Alanı Genişler

2.5.1. Çözücü Seçimi

Çözücü seçimi yapılırken en önemli faktör polimerin tamamen çözünmesidir. Ayrıca çözücünün çok yüksek olmayan bir kaynama noktası olmalıdır. Bu kaynama noktası çözücünün uçuculuğu hakkında bilgi verir [13]. Düşük kaynama noktalı çözücüler kullanıldığında çözücü kolayca buharlaştığından iğne ucunda polimerin kurumasına sebep olabilir. Bunun yanında yüksek kaynama noktası olan çözücüler seçildiğinde, nanofiber jetin uçuşu esnasında buharlaşamayacağı için ve çözücü içeren nanofiberler toplayıcı üzerinde boncuklu nanofiber oluşumuna neden olur [14].

2.5.2. Çözelti Konsantrasyonu

Elektro eğirme tekniği elektriksel anlamda yüklenen polimer jetinde gerilme oluşması esasına dayanır. Jetin gerilmesinde en önemli parametrelerden biri de konsantrasyondur. Bu yüzden çözelti konsantrasyonu lif oluşturabilirliği üzerinde etkilidir, aynı zamanda nanofiberlerdeki lif boyutu ve boncuk oluşumunu da etkiler [1]. Sonuç olarak polimer çözeltisinin konsantrasyonunun artması ile viskozite artar ve polimer zincirleri arasındaki etkileşim artmış olur. Bu etkileşimin artmasıyla boncuksuz nanofiberler üretilir. Konsantrasyonun fazla olması durumunda polimer çözeltisi iğne ucundan geçemez ve bunun sonucu olarak iğne ucunda tıkanmalar meydana gelir [15]. Ayrıca yüksek polimer konsantrasyonunun daha kalın fiber oluşumuna neden olduğu ve düşük polimer konsantrasyonunun da daha ince fiber oluşumuna neden olduğu rapor edilmiştir [16]. Şekil 2.4'te farklı polimer konsantrasyonlarla oluşturulmuş nanofiberlerin SEM görüntüleri yer almaktadır [17].



Şekil 2.4:Farklı polimer konsantrasyon çözeltilerinden elde edilen nanofiberlerin SEM fotoğrafları.

2.5.3. Çözeltinin iletkenliği

Uygulanan elektrik alanından kaynaklanan yüklerin itici gücü nedeniyle çözelti iletken olmalıdır. Çözeltinin iletkenliğini artıran çözücüler ve tuzlar gibi katkı maddeleri daha ince fiber oluşumuna neden olmaktadır [18].

2.5.4. Akış Hızı

Polimerik çözelti için besleme akışı, nanofiberlerin morfolojik yapısını belirler. Boncuksuz elektro eğrilmiş nanofiberler, farklı polimer çözeltileri için optimize edilmiş jet akış hızı ile de hazırlanabilir. Bu kritik akış hızı değeri her polimer çözeltilisine göre değişmektedir. Kritik akış hızının altında olan değerler çözücünün hızlıca buharlaşmasına ve iğne ucunun tıkanmasına neden olur. Kritik seviyenin üzerinde olan akış hızı değerleri ise hem gözenek boyutunda hem de lif çapında artış ile birlikte boncuk oluşumuna da neden olmaktadır [19].

2.5.5. Voltaj

Kontrol edilebilir parametrelerin içinde en çok çalışılan parametrelerden biri de voltajın etkisidir. Kritik voltaj değeri polimer çözeltilisine göre değişmektedir. [20]. Kritik voltaj değeri üstünde bir voltaj değeri uygulandığında jetin hızı artar, oluşan Taylor konisi küçülür ve bunun sonucunda da boncuklu lifler ya da sadece boncuk oluşur. Kritik voltaj değerinin altındaki değerlerde ise polimer jet yeterince uzayıp kısalamaz ve nanofiber oluşamaz [8].

2.5.6. Toplayıcı ile İğnenin Birbirine Olan Uzaklığı

Nanofiberlerin morfolojisi, polimer çözeltilisinin bulunduğu şırıngada takılı olan iğnenin ucu ve toplayıcı plaka arasındaki mesafe ile de değişebilir. Elektro eğirme işleminde, lifler toplayıcıya ulaşmadan önce çözücünün buharlaşmasına yetecek zamanı sağlayan minimum bir mesafe gereklidir. Çözücünün kolayca buharlaşması daha ince nanofiberlerin oluşumuna neden olmaktadır [21]. Ancak mesafenin gerekli olandan çok uzak veya çok yakın olması boncuk oluşumuna neden olabilir [3]. Genellikle bu mesafe 15- 25 cm arasındaki değerlerde olmaktadır.

2.5.7. Ortam Koşulları

Sıcaklık ve nem gibi ortam koşulları, oluşan nanofiberlerin morfolojisi üzerinde etkili olan diğer parametrelerdir [22]. Düşük ortam neminde çözücülerin daha kolay buharlaşması daha ince nanofiber oluşumuna neden olmaktadır. Yüksek nem ortamında ise nem nanofiber üzerinde yoğuşabilir ve bu da nanofiberde gözeneklerin oluşmasına neden olur. Sıcaklık, çözeltinin viskozitesini etkiler. Yüksek sıcaklıkta, çözeltinin viskozitesi azalır ve bu da daha ince nanofiber oluşumuna yol açar [23].

2.6. Elektro Eğirme ile Üretilen Nanofiberlerin Kullanım Alanları

Elektro eğirme tekniği ile hazırlanmış nanofiberler, bilimsel alanda çok fazla kullanıldığı gibi gündelik hayatta da birçok kullanım alanı vardır. Elektro eğirme yönteminde hem doğal hem sentetik polimerler kullanılabilirdiği için kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Nanofiberler çok büyük bir yüzey alanı hacim oranına, yüzey fonksiyonlarında esnekliğe ve üstün mekanik performansa sahip olmaları nedeniyle biyoteknoloji, ilaç salınımı yara iyileşmesi, doku mühendisliği, mikroelektronik, çevre koruma, enerji toplama ve depolama gibi çeşitli uygulamalar için umut vaat etmektedirler [24].

2.6.1. Doku mühendisliği

Elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, yapay doku ve organların oluşturulmasında kullanılırlar. Hücre büyümesini teşvik edebilir ve doku onarımını destekleyebilirler.

Başarılı doku mühendisliği, yapay iskeletlerin doğal karşılıklarına benzer kimyasal bileşimlere, morfolojilere ve yüzey fonksiyonel gruplarına sahip olmasını gerektirir. Doku büyümesi için doğal iskeletler çeşitli proteinlerden oluşan nanometre boyutlu liflerin üç boyutlu ağlarıdır. Elektro eğirme ile üretilmiş nanofiberlerin dokusuz dokumaları, gözenekli yapıları ve büyük yüzey alanları ile tanınır, bu da dokuya mühendislik için gereken doğal hücre dışı matriksi taklit etmek için ideal malzemeler sınıfını oluştururlar.

2.6.2. İlaç Taşıma Sistemleri

Nanofiberler, ilaçların kontrollü salınımını sağlayabilir ve hedeflenen bölgelere doğrudan teslim edilebilirler. Elektro eğirme nanofiberlerle ilaç taşıma, ilaç ve ilgili taşıyıcı maddenin yüzey alanının artmasıyla ilaç salınım hızının arttığı prensibine dayanır [25].

2.6.3. Yara iyileşmesi

Elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, insan cildinde meydana gelen yara veya yanıkların tedavisinde kullanılmaktadır. Yüksek gözeneklilik, gaz alışverişine izin verirken lifli yapısı yaraları enfeksiyondan ve kurumadan korur. Yara örtüsü için kullanılan elektro eğirme yöntemiyle üretilen dokusuz nanofiber membranlar genellikle 500 ila 1.000 nm aralığında gözenek boyutlarına sahiptir ve yaranın bakteriyel etkiden korunmasını sağlayacak kadar küçüktür. Nanofiberlerin yüksek yüzey alanı, sıvı emilimi ve dermal uygulama için son derece uygundur.

2.6.4. Tekstil ve Giyim

Elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, koruyucu giysiler ve diğer işlevsel kumaş malzemeleri olarak tekstil uygulamalarında kullanılabilirler. Elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiber membranlar, yüksek yüzey alanı ve çok küçük gözenek boyutlarından dolayı havanın ve su buharının giysilerin geçirgenliğine engel olmadan kimyasal maddelerin nötralizasyonunu yapabilmelerini sağlamaktadır. Yapılan çalışmalar, nanofiberlerin geleneksel tekstillere kıyasla nem buharı difüzyonuna minimal engel oluşturduğunu ve aerosol partiküllerini tutma konusunda son derece etkili olduklarını göstermiştir [15].

2.6.5. Enerji

Son yıllarda, elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, süperkapasitörler, lityum hücreler, yakıt hücreleri, güneş pilleri ve transistörler gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar. Ayrıca, elektriksel ve elektro-optik aktivitelere sahip nanofiberler,

nanometre ölçeğinde elektronik cihazların üretiminde potansiyel uygulamalara sahip olmaları nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir.

Ayrıca yakıt hücrelerinde kullanılan elektrot malzemeleri için yüksek performanslı katalizörler sağlayabilirler.

İletken elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler membranlar, yüksek performanslı pillerin geliştirilmesinde gözenekli elektrot olarak kullanılmak için uygundur[26].

2.6.6. Elektronik

Elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, yüksek yüzey alanı ve gözenekli membran yapısından kaynaklı hassas ve hızlı algılama için uygundur. Gaz sensörleri, kimyasal sensörler, optik sensörler ve biyosensörler gibi uygulamalar için geleneksel malzemelere kıyasla geliştirilmiş duyarlılıklar göstermişlerdir [27].

2.6.7. Çevre

Elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, yüksek özel yüzey alanına sahip oldukları için fiziksel engelleme veya kimyasal adsorpsiyon yoluyla kirleticileri toplamak için kullanılabilirler. Bu nedenle, çevremizi korumak için bir çözüm olabilme potansiyeline sahiptirler. Su arıtma işlemlerinde kullanılarak suyun kalitesini iyileştirebilirler. Elektro eğirme nanofiber filtreler, hava kirliliğinden kaynaklanan partiküllerin temizlenmesinde etkili olarak filtreleme yeteneklerinde önemli artışlar sağlarlar [28].

2.6.8. Diğer Kullanım Alanları

Bir katalizörün aktivitesi, aktif yüzey alanına bağlıdır ve katalizör, aktif yüzey alanını artırmak için nanofiber gibi yüksek yüzey alanlı bir malzeme üzerine kaplanabilir, bu da katalitik aktiviteyi artırır [11]. Elektro eğirme yöntemi ile üretilmiş nanofiberler, büyük bir yüzey alanına sahip olmaları ve yüksek katalizör yüklemesi için uygun olmaları nedeniyle enzimler ve geleneksel katalizörler için çekici bir katı destek sınıfı sunar. Ayrıca, nanofiber katalizörler, herhangi bir geometriye uyarlanabilme, sıvı ve gaz akışına karşı düşük direnç gibi diğer avantajlar sunarlar.

Katalizörlerin geri kazanımını düşünüldüğünde, nanofiber katalizörler kolayca geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilirler. Ayrıca elektro eğirme yöntemiyle üretilen nanofiberlerin kompozit güçlendirme uygulamalarındaki kullanımı, nanofiberlerin yüksek yüzey alanı ve yüksek mekanik dayanıklılığından kaynaklanmaktadır. Nanofiberler, kompozit malzemelerin mukavemetini ve aşınma direncini artırabildiği gibi çatlak oluşumunu da önleyebilirler. Nanofiberlerin hafif ve güçlü yapısı, daha hafif ve daha güçlü yapıların oluşturulmasına olanak sağlarlar. Nanofiberlerin kompozit güçlendirme alanındaki uygulamaları, malzeme bilimi ve mühendislik alanında büyük bir potansiyele sahiptir. Nanofiberler, birçok farklı uygulama alanında kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirebilir ve yeni malzeme tasarımlarının geliştirilmesine katkıda bulunabilirler [29].

2.7. Elektro Eğirme ile Üretilen Nanofiberlerin Katkılandırılması

Nanofiberlerin işlevlerini artırmak için diğer fonksiyonel malzemelerin veya özel yüzey yapılarının eklenmesi yaygın bir yaklaşımdır. Nanofiberlerin yüzeyine farklı malzemeler veya yapılar katılarak, çeşitli özellikler ve işlevler elde edilebilir, uygulama alanını genişletilebilir. Bu yöntem, çeşitli endüstrilerde, özellikle tıp, tekstil, enerji ve elektronik gibi alanlarda kullanılan nanofiber tabanlı malzemelerin geliştirilmesinde büyük öneme sahiptir.

Örneğin, antimikrobiyal özelliklere sahip bir katkı maddesi ekleyerek üretilen nanofiberler, enfeksiyon riskini azaltabilir. Diğer taraftan, iletken bir malzeme ile kaplanan nanofiberler, elektriksel iletkenlik özelliği kazanabilir.

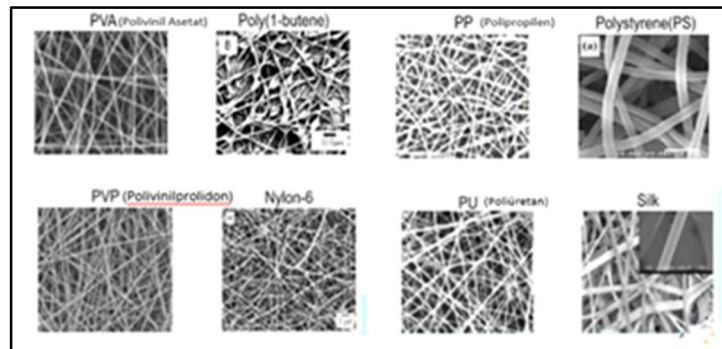
Elektro eğirme ile üretilmiş nanofiberlere dayalı katalizörlerin hazırlanması genel olarak, iki kategoriye ayrılır:

- Elektro eğirme süreciyle kapsülleme, nanofiberli katalizörlerin üretilmesi için en basit yöntemdir. Katalizörleri veya katalizör öncüllerini polimerlerle homojen ve viskoz bir çözelti oluşturacak şekilde karıştırıp elektro eğirme ile üretilen nanofiberler katkılandırılır.
- Elektro eğirme sonrası katkılandırma yöntemiyle, etkin katalizatörlere sahip olmayan nanofiberler elektro eğirme yoluyla hazırlanır. Ardından katalizatörler veya katalizator öncülleri, fiziksel bağlanma, adsorpsiyon, biriktirme ve

kimyasal reaksiyon gibi çeşitli yöntemlerle önceden oluşturulmuş nanoliflere biriktirilir. Bu katkı maddeleri veya malzemeler lif yapısına tutunarak liflerin yüzeyini kaplar veya içine yerleşir. Böylece katkılandırma ile özelliklerin iyileştirilmesi veya yeni özelliklerin kazandırılması mümkün olur. Örneğin, katkı maddeleri sıvı formunda veya partikül halinde hazırlanabilir ve elektro eğirme sonrası lif yapısına püskürtülebilir, daldırılabilir veya spreylenebilir [30].

2.8. Elektro Eğirme Yönteminde Kullanılan Polimerler

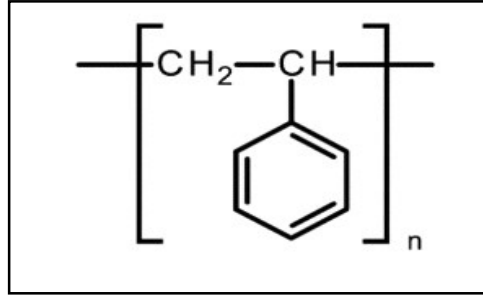
Polimerler yapısında karbon ve hidrojen atomlarını bulunduran monomerlerin kovalent bağlar ile bir araya gelmesiyle meydana gelmiş yapılardır. Polimerler doğal, yarı sentetik ve sentetik olmak üzere farklı gruplara ayrılmaktadırlar[31]. Sentetik polimerlerin kullanılması son yıllarda ortaya çıkmıştır. Polimerlerin biyouyumluluklarının olması nedeniyle elektro eğirme işleminde kullanılmak üzere daha çok doğal polimerlere yönelim olmuştur. Çünkü doğal polimerler daha düşük toksisite gösterirler. Bu yüzden sentetik polimerlere göre tıbbi ve biyolojik alanlarda daha fazla tercih edilmektedirler. En çok bilinen doğal polimerler; kollajen, jelatin, kitin, selüloz ve polisakkaritlerdir[32]. Polimer sistemine inorganik bileşenlerin eklenmesi, nanofiberlerin özel işlevlerle üretilmesine izin verir. Böyle meydana gelen polimerlere sentetik polimerler denir. Mekanik özelliklerine göre istenildiği gibi üretilebilirler. Sentetik polimerler bundan dolayı doğal polimerlere kıyasla daha fazla kullanılır[24]. Bu polimerlere örnek olarak poliviniliden florür, polilaktik asit, polivinil alkol, polikaprolakton ve polistiren örnekleri verilebilir. Şekil 2.5' te en çok kullanılan polimerlerden üretilen nanofiberlerin sem görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 2.5: En çok kullanılan polimerlerden üretilen nanofiberlerin sem görüntüleri.

2.8.1. Polistiren

Elektro eğirme tekniği ile sıkça kullanılan polimerlerden biri olan PS bir petrol türevlidir ve stirenin polimerizasyonu ile oluşur (Şekil 2.6). PS oda sıcaklığında katı halde bulunur, yüksek sıcaklıkta işlenirken eriyik hale gelmektedir. Eriyik hale gelen polistiren daha sonra soğutulur ve tekrar katılaştırılması sağlanır. Amorf polistiren, şeffaf, renksiz ve parlak malzemedir [33].



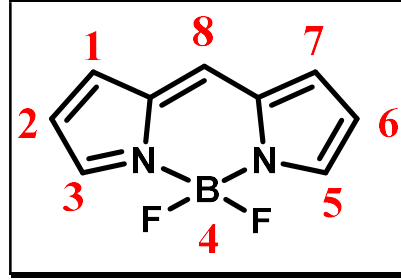
Şekil:2.6: Polistirenin yapısı.

PS, çok yüksek elektrik direncine ve düşük dielektriğe sahiptir. PS lifleri elektro eğirme, erime, ıslak ve kuru iplik eğirme gibi yöntemlerle üretilebilmektedir. Elektro eğirme tekniği hazırlanan polimer liflerin çapları, mikrometreden nanometreye kadar istenilen çapta elde edilebilmektedir. Elektro eğirme ile oluşturulan polistiren liflerin morfolojisinin bazı uygulamalarda kullanılacak ürünlerin fiziksel/mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bundan dolayı homojen polistiren liflerin tekrarlanabilir elektro eğirmesi şarttır. Polistiren; paketleme, yalıtım, filtreleme vb. alanlarda sıklıkla kullanılan polimerlerden biridir. Polistiren liflerin medikal, iyon değiştirici, enzim ve kataliz immobilizasyonu, filtreleme ve sensör gibi alanlarda da uygulamalara sahip olduğu görülmektedir [34], [35].

2.9. BODIPY Bileşikleri

Genel adıyla BODIPY bileşikleri olarak bilinen 4,4-Difloro-4-bora-3a,4a-diaza-s-indacene ilk defa 1968 yılında sentezlenmiştir [36]. Bor atomu ile dipirometen meydana gelen bileşikler BODIPY olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.7) [37]. 1977 yılında metil grubu içeren pirol kullanılarak kararlı yapıya sahip BODIPY bileşikleri üretilmiş [38] ve sonrasında bu bileşikler üzerindeki çalışmalar hızlanmıştır. Bu

bileşikler suda çok az veya hiç çözünmez, fakat organik çözücülerdeki çözünürlükleri iyidir [39].



Şekil 2.7: BODIPY Çekirdeğinin Yapısı.

Kristal yapısı ve spektroskopik özellikleri sebebi ile bu bileşikler yoğun ilgi görmüştür. BODIPY bileşikleri, yüksek floresans kuantum verimleri dar emisyon bantları, termal ve fotokarlıkları, iyi çözünürlükleri ve çeşitli pozisyonlardan kolayca fonksiyonlandırılabilirmeleri gibi özelliklere sahip olmaları onları diğer organik floresans bileşiklerden üstün kılmaktadır. BODIPY bileşiklerinin enerji transfer ajanı, kemosensör, lazer boya, güneş pilleri ve fotodinamik ajanı gibi birçok uygulama alanı mevcuttur [40]. İyotlu bordipirometen, antimikrobiyal özelliklere sahip bir bileşiktir. Bakterilerin hücre zarını ve protein yapısını hedefleyerek, hücrelerin normal işlevlerini bozarak veya öldürerek antibakteriyel etki gösterebilmektedir.

3. DENEYSEL BÖLÜM

Bu tez çalışmasında ilk olarak literatüre göre BODIPY bileşiği sentezlenmiştir[41]. Daha sonra elektro eğirme işlemi ile polistiren nanofiberler için cihaz parametreleri ile optimizasyon çalışması yapıldı. Optimizasyon çalışması sonucunda uygun bulunan polistiren nanofiberler BODIPY bileşiği ile katkılendirma çalışmaları yapıldı. Bileşiklerin sentezi, elektro eğirme prosesinde ve karakterizasyon sırasında kullanılan kimyasal maddeler ve cihazlar aşağıdaki tablolarda verildi.

Tablo 3.1: Kimyasal Maddeler.

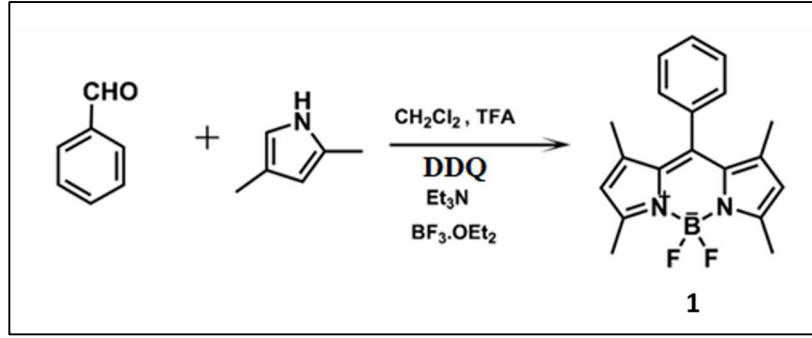
Bileşiğin Adı	Üretici Firma	CAS-No
Benzaldehit	SIGMA-ALDRICH	100-52-7
Polistiren (PS, Mw = 192.000 g/mol)	SIGMA-ALDRICH	9003-53-6
Bortrifloroetileterat (BF ₃ .OEt ₂)	MERCK	109-63-7
Sodyum sülfat (Na ₂ SO ₄)	SIGMA-ALDRICH	71962
2,3-dikloro-5,6-disiyano-1,4-benzokinon (DDQ)	SIGMA-ALDRICH	84-58-2
Diklorometan (DCM)	SIGMA-ALDRICH	75-09-2
Dimetilformamid (DMF)	VWR	68-12-2
Hekzan	MERCK	110-54-3
Silika jel	Merck	7631-86-9
2,4-Dimetilpirol	SIGMA-ALDRICH	625-82-1
Trifloro asetik asit (TFA)	SIGMA-ALDRICH	67-68-5
Tetrahidrofuran (THF)	Sigma-Aldrich	109-99-9
Disikloheksilkarbodiimid (DCC)	MERCK	538-75-0
Tribütülamın	Merck	102-82-9
İyodik asit	ALFA AESAR	7782-68-5
İyot	SIGMA-ALDRICH	7553-56-2
Sodyum tiyosülfat	SIGMA-ALDRICH	7772-98-7

Tablo 3.2: Cihazlar.

Adı	Modeli	Bulunduğu Yer
FT-Infrared Spektrofotometresi	Perkin Elmer Spectrum 100	Gebze Teknik Üniversitesi
NMR Spektrofotometresi	Varian 500 MHz	Gebze Teknik Üniversitesi
Kütle Spektrometresi	Bruker Microflex LT MALDI-TOF MS	Gebze Teknik Üniversitesi
UV-Visible Spektrofotometresi	Schimadzu 2101 UVPc	Gebze Teknik Üniversitesi
TGA	Mettler Toledo TGA/SDTA 85	Gebze Teknik Üniversitesi
Elektro eğirme	Mavi Teknik, (NE-1000 Model Şırınga Pompası, Spellman V6D30P30RS Güç Kaynağı).	Gebze Teknik Üniversitesi
SEM	Philips XL30 SFEG	Gebze Teknik Üniversitesi
EDX	Philips XL30 SFEG	Gebze Teknik Üniversitesi

3.1. BODIPY Bileşiğinin (1) Sentezi

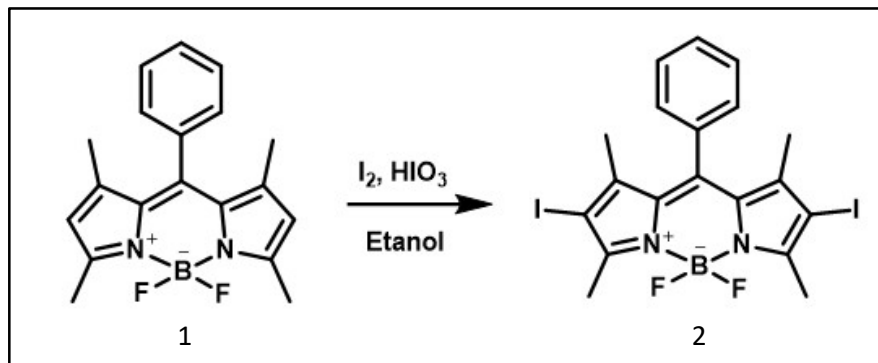
1 L'lik yuvarlak dipli reaksiyon balon içindeki 300 mL diklorometan'dan 15 dakika argon gazı geçirildi ve ortama sırasıyla benzaldehit (1 mL, 9.4 mmol) ve 2,4-dimetil-pirol (1.95 mL, 18.86 mmol) ilave edildi. Trifloro asetik asitin iki damlası ilave edildikten sonra reaksiyon argon atmosferinde TLC ile takip edilerek 12 saat oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırıldı. Reaksiyon ortamına önce 50 mL diklorometan içinde çözülmüş DDQ (2.14 g, 9.43 mmol), 30 dakika sonra, sırasıyla trietilamin (6.5 mL) ve $\text{BF}_3 \cdot \text{OEt}_2$ (6.5 mL) damla damla ilave edildi. Reaksiyon karışımı, reaksiyondan alınan örneklerin TLC ile kontrol edilmesiyle, 3 saat oda sıcaklığında karıştırıldı. Reaksiyon karışımı üç kez diklorometan:su sistemine ekstrakte edildi. Organik faz (diklorometan fazı) susuz sodyum sülfat üzerinden kurutulduktan sonra çözücüsü döner buharlaştırıcı yardımıyla uzaklaştırıldı. Kalan reaksiyon karışımı, diklorometan:hekzan (3:2) çözücü sisteminin yürütücü faz olarak kullanıldığı, silikajel (230- 400 mesh) dolgulu kolondan geçirildi ve **1** bileşiği saf olarak izole edildi (250 mg, 17 %). Bileşik için elde edilen spektral verileri literatürdekilerle örtüşmektedir.



Şekil 3.1: 1 numaralı Bileşiğinin Sentezi.

3.2. 2 ve 6 Pozisyonlarından İyot ile Katkılandırılmış BODIPY Bileşiğinin (2) Sentezi

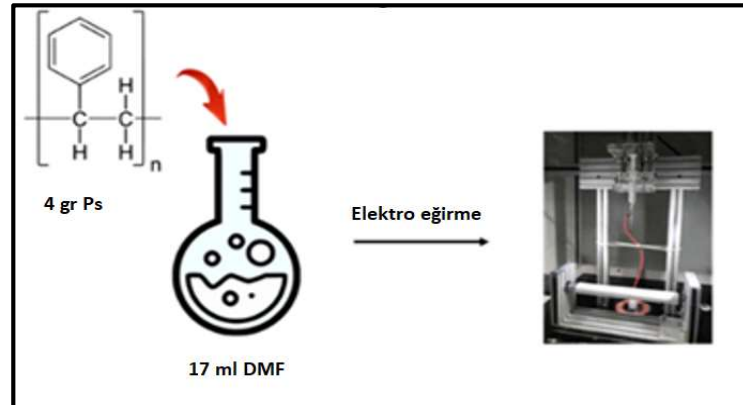
1 bileşiği (100mg, 0.30mmol) alınarak 80 mL etanol ile 250ml'lik reaksiyon balonunda çözüldü. Reaksiyon ortamına iyot (195mg, 0.77mmol) ilave edildi. Daha sonra HIO₃ (135mg, 0.77mmol) minimum suda çözüldü ve reaksiyon karışımına damla damla ilave edildi. Reaksiyon ortamının sıcaklığı 50 °C'yi geçmeyecek şekilde ısıtıldı ve 2 saat karıştırıldı. Reaksiyon karışımı, reaksiyondan alınan örneklerin TLC ile kontrol edilmesiyle, pembe renkli ürün oluşumu gözlenene kadar karıştırıldı. Reaksiyona sodyum tiosülfat eklenerek 20 dk karıştırıldı. Kalan reaksiyon karışımından, diklorometan: n-hekzan (3:1) çözücü sisteminin yürütücü faz olarak kullanılmasıyla, silikajel (230- 400 mesh) dolgulu kolonda 2 bileşiği elde edildi. Bileşik için elde edilen spektral verileri literatürdeki verilerle örtüşmektedir.



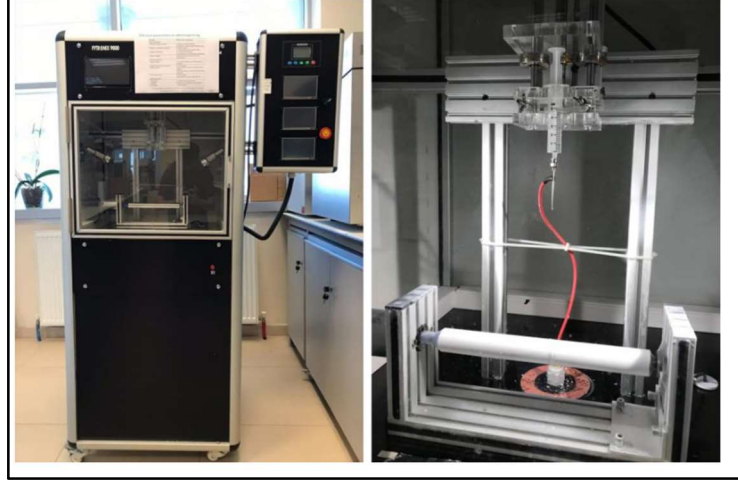
Şekil 3.2: 2 Bileşiğinin Sentezi.

3.3. PS Nanofiberlerinin Hazırlanması ve Optimizasyon Denemeleri

Yapılan çalışmalarda PS polimeri için en iyi ve homojen nanolifin %20 PS içeriğiyle elde edildiği rapor edilmiştir [42]. Bu yüzden ilk olarak şekil 3.3'te ki gibi DMF solventi içinde ağırlıkça %20 PS içeren 20 mL çözelti hazırlandı. Çözelti manyetik karıştırıcıda 25 °C' de 24 saat boyunca çözünene kadar karıştırıldı. Daha sonra şırınga içerisine aktarılan çözülden elektro eğirme cihazı ile (şekil 3.4) nanofiber üretildi. PS nanoliflerinin oluşumu sırasında, nanofiberlerin morfolojisi üzerindeki etkiyi görmek için farklı parametreler denendi. PS çözeltisi plastik 2 ya da 5 mL'lik şırıngaya koyulup paslanmaz çelik bir iğne takıldı ve bir şırınga pompası kullanılarak 0.5 ve 1 mL/saat akış hızlarında enjekte edildi. Toplayıcı alüminyum folyo ile kaplanmış bir bobin şeklindeydi. İğnenin ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe yaklaşık olarak 15 cm idi. İğne yüksek gerilimli bir güç kaynağına bağlıydı ve elektro eğirme işlemi sırasında 15-18 ve 20 kV olarak çalıştırıldı. Elektro eğirme işlemi oda sıcaklığında kapalı bir ortamda gerçekleştirildi.

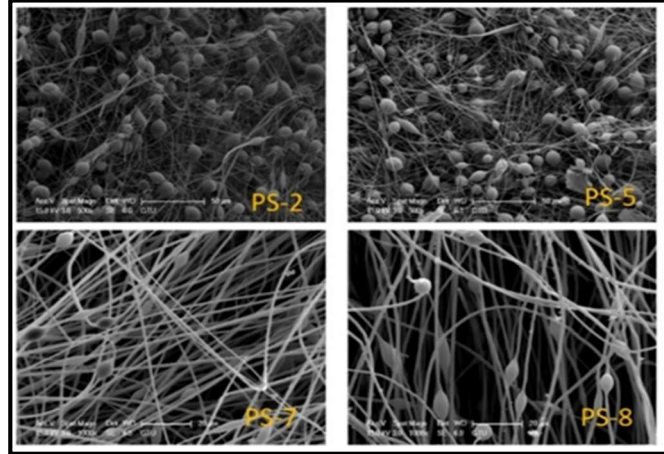


Şekil 3.3: DMF ile hazırlanan PS nanofiberlerinin üretimi.



Şekil 3.4: Çalışma laboratuvarında bulunan elektro eğirme cihazı.

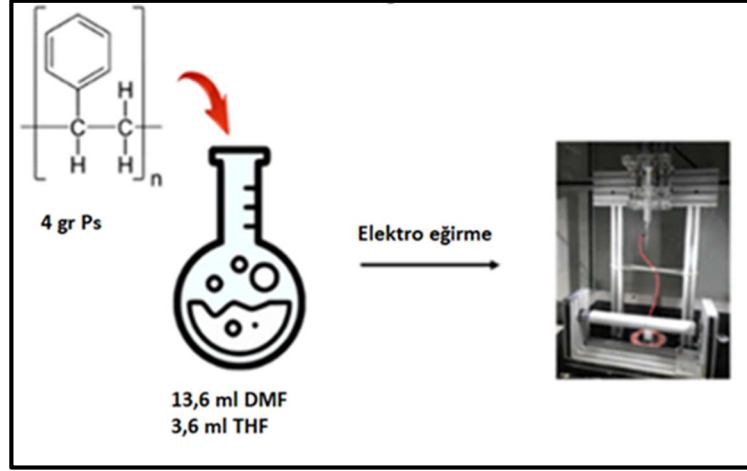
Bu işlem sonucunda elde edilen SEM görüntüsü Şekil 3.5'te gösterildi. Görüntüler incelendiğinde lif formu oluşmuş olsa da nanofiberlerin üzerinde yoğun miktarda boncuklar görüldü.



Şekil 3.5: DMF ile hazırlanmış PS nanofiberlerin SEM görüntüsü.

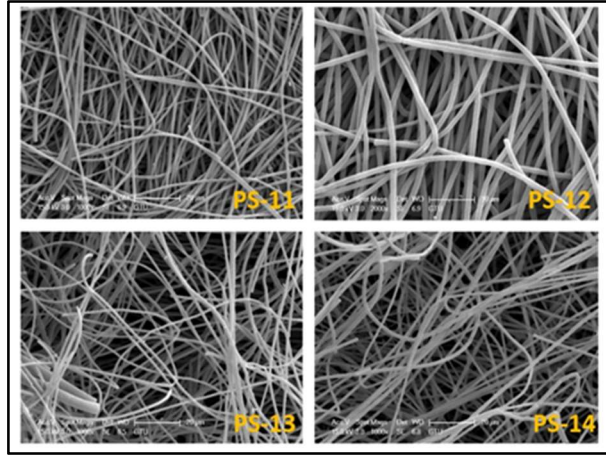
Hazırlanan nanofiberlerin boncuklu görünümünden dolayı yapılan çalışmalar dikkate alınarak PS polimeri, 8:2 DMF ve THF içinde çözülerek 20 mL ağırlıkça %20 PS içeren çözelti oluşturuldu. (Şekil 3.6) Oluşan çözelti oda sıcaklığında karıştırılarak 24 saat boyunca bekletildi. DMF konsantrasyonu artırılarak hazırlanmış elektro çekim çözeltilerinden elde edilen nanofiberlerin ortalama fiber çapı azalmakta ve yüksek uçuculuktaki elektro çekim çözeltilerinden daha yoğun fiber elde edilmektedir[43]. PS çözeltisi plastik bir 2-5 mL şırıngaya yerleştirildi ve paslanmaz çelik bir iğne takılarak, bir şırınga pompası yardımıyla 0,5 ve 1 mL/saat akış hızlarında enjekte edildi. Yüksek

gerilim güç kaynağı değerleri 15-18 ve 20 kV olarak çalıştırıldı. Elektro eğirme işlemi oda sıcaklığında kapalı bir ortamda gerçekleştirildi.



Şekil 3.6: DMF ve THF ile hazırlanmış PS nanofiberlerin SEM görüntüsü.

Bu işlem sonucunda elde edilen nanofiberlerin SEM görüntüleri Şekil 3.7’de gösterildi. Görüntüler incelendiğinde boncuksuz nanofiberler elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3.7: DMF ve THF ile hazırlanan PS nanofiberlerin SEM görüntüsü.

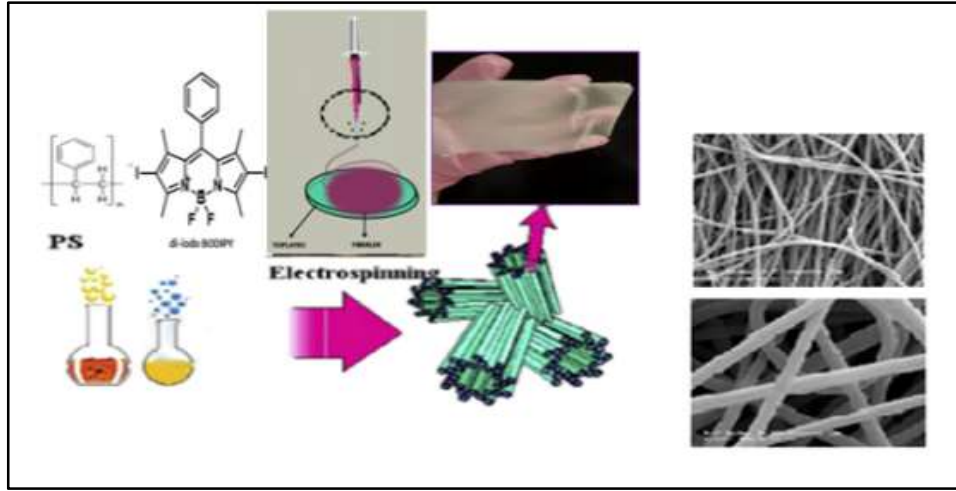
Tablo 3.3: PS nanofiberlerin üretim parametreleri.

Numune	Polimer (Wt.%Ps)	Enjektör (MI)	Uzunluk (Mm)	Çap (Mm)	Akış Hızı (MI/H)	Sıcaklık (°C)	Nem (Hum.%)	Süre (Min)	Uygulanan Voltaj (Kv)	Hız (Rpm)
PS-1	20	5	30	10	1	26	44	60	15000	30
PS-2	20	5	30	10	1	28.8	38.4	30	15000	30
PS-3	20	2	30	8	0.5	24.5	24.5	60	15000	30
PS-4	20	2	30	8	0.5	24.1	24.1	15	15000	30
PS-5	20	2	30	8	0.5	24.3	24.3	30	18000	30
PS-6	20	2	20	8	1	26.7	26.7	15	15000	30
PS-7	20	2	15	8	1	27.3	35.3	30	18000	30
PS-8	20	2	10	8	1	27.8	34.1	30	20000	30
PS-9	20	2	10	8	1	26.7	34.8	15	18000	30
PS-10	20 8:2	2	20	8	0.5	25.3	47.4	30	18000	30
PS-11	20 8:2	2	10	8	0.5	26.5	45.8	30	15000	30
PS-12	20 8:2	5	50	10	1	26.7	46.3	30	18000	30
PS-13	20 8:2	5	40	10	1	27.1	43.6	30	15000	30
PS-14	20 8:2	5	30	10	1	26.7	42.4	30	20000	30
PS-15	20 8:2	5	20	10	0.5	25.7	45.6	30	20000	30

3.4. PS/BODIPY Nanofiberlerin Hazırlanması ve Optimizasyon Denemeleri

3.4.1. Elektro Eğirme Öncesi BODIPY ile Katkılandırma

PS polimeri, 8:2 DMF ve THF içinde çözülerek 20 mL ağırlıkça %20 PS içeren çözelti oluşturmak için oda sıcaklığında karıştırılarak 24 saat boyunca bekletildi. PS çözeltilerine 5, 10, 15 ve 20 mg iyotlu BODIPY eklendi ve ardından bir gece boyunca karışması sağlandı. Daha önce düzgün şekilde nanofiber üretilebilen 0.5-1 mL/saat akış hızında ve 15-18-20 kV değerlerinde elektro eğirme cihazına enjekte edildi. Dönme hızı %30 ve toplayıcı alüminyum folyo ile kaplanmış bir bobin şeklindeydi. İğnenin ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe yaklaşık olarak 15 cm idi. İğne, yüksek gerilimli bir güç kaynağına bağlıydı ve süre 30 dakika olarak ayarlandı. 30 dakika sonra toplama ünitesindeki nanofiberler toplanarak 2 gün oda sıcaklığında vakumlu etüvde kurumaya bırakıldı.



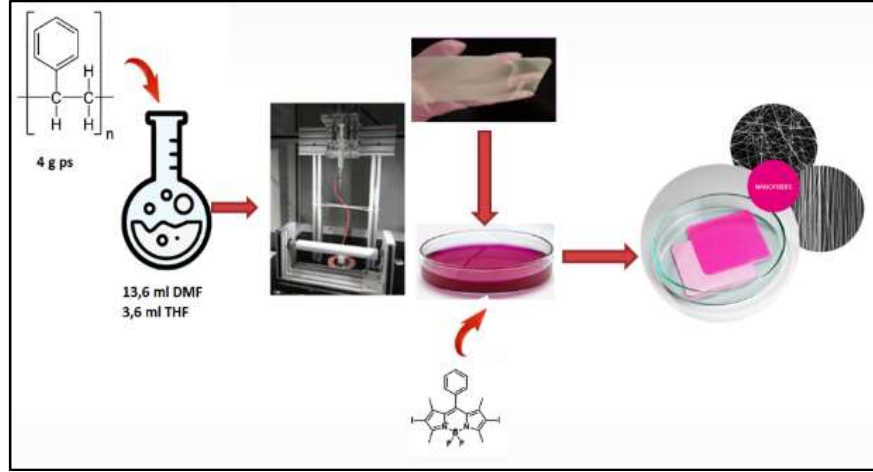
Şekil 3.8: PS/BODIPY Nanofiberlerinin Hazırlanması.

Tablo 3.4: PS/BODIPY Nanofiberlerin Hazırlanma Parametreleri.

Numune	Polimer (Wt. %Ps)	Enjektör (ML)	Uzunluk (Mm)	Çap (Mm)	Akış Hızı (ML/H)	Sıcaklık (°C)	Nem (Hum.%)	Süre (Min)	Uygulanan Voltaj (Kv)	Hız (Rpm)
PSB-5-1	20 8:2	5	50	10	1	24.9	45	30	15000	30
PSB-5-2	20 8:2	5	30	10	1	23	46	30	18000	30
PSB-10-1	20 8:2	5	50	10	1	26.4	63.4	30	15000	30
PSB-10-2	20 8:2	5	40	10	1	27.7	67	30	18000	30
PSB-15-1	20 8:2	5	50	10	1	26.5	61.9	30	15000	30
PSB-15-2	20 8:2	5	40	10	1	26.7	60.5	30	18000	30
PSB-25-1	20 8:2	5	50	10	1	25	55.6	30	15000	30
PSB-25-2	20 8:2	5	40	10	1	26.2	51.2	30	18000	30

3.4.2 Elektro Eğirme Sonrası BODIPY ile Katkılandırma

2.5 mg İyotlu BODIPY bileşğinin 10 ml hekzan solventi içerisinde çözünmesi sağlandı. Optimizasyon çalışmaları sonucunda düzgün olduğuna karar verilen PS nanofiber (PS-12) iyotlu BODIPY çözeltisi içerisinde daldırılıp emmesi sağlandı (Şekil 3.9). Çeker ocakta bir gün kuruması bekletildi.



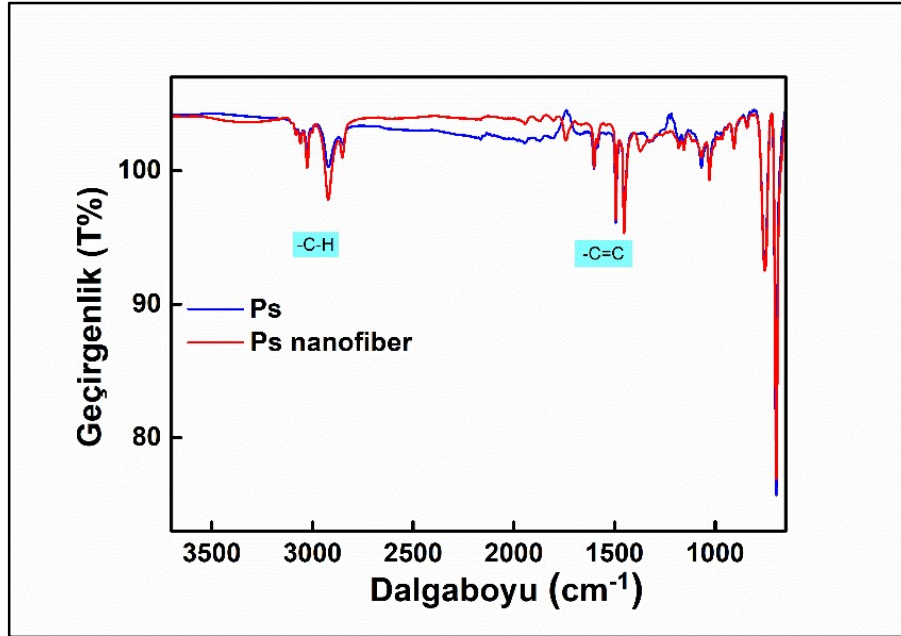
Şekil 3.9: Elektro Eğirme Sonrası BODIPY ile Katkılandırma.

4. DENEYSEL BULGULAR

Tez çalışması kapsamında sentezlenen bileşiklerin ve elektro eğirme sonucu üretilen nanofiberlerin yapı karakterizasyonları FT-IR, UV-Vis, MALDI-TOF, ¹H-NMR, ¹³C NMR spektroskopisi, SEM ve EDX teknikleri kullanılarak yapıldı.

4.1. Polistiren Nanofiberlerin Karakterizasyonu

Saf PS ve PS nanofiberleri FT-IR ile karakterize edildi. PS nanofiberlerinin üretimi sırasında, PS'nin yapısal değişikliğe uğramadan, sadece form değiştirdiği görüldü. Şekil 4.1, saf PS ve PS nanofiberlerinin FT-IR spektrumları gösterildi.

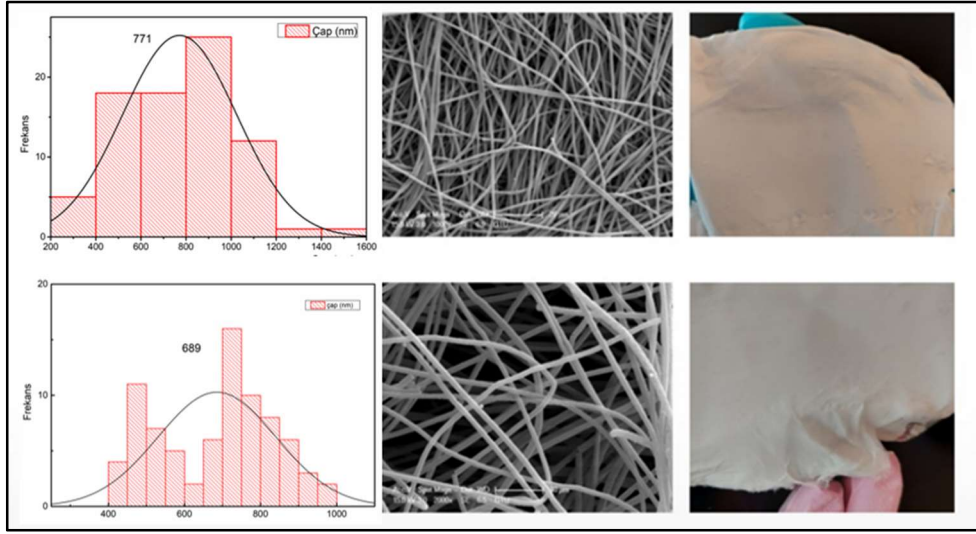


Şekil 4.1: Saf PS ve PS nanofiberin FT-IR spektrumları.

Saf PS ve PS nanofiberlerin FT-IR' inde, 2900-3050 cm^{-1} arasında polistirenin aromatik zincirindeki C-H gerilmeleri, 1601 cm^{-1} , 1583 cm^{-1} , 1492 cm^{-1} ve 1451 cm^{-1} gözlenen absorpsiyon bantları aromatik halka C-C ve C=C gerilme titreşimleri, 500-900 cm^{-1} de ise C-H düzlem dışı eğilme titreşimlerine karşılık gelmektedir.

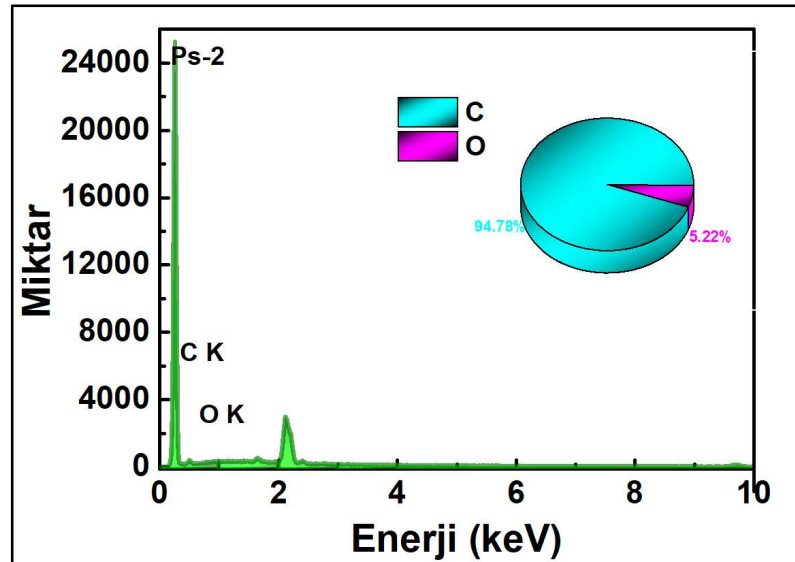
PS nanofiberlerin morfolojileri SEM ile karakterize edildi. PS nanofiberlerin üretimi sırasında farklı parametreler kullanılmış ve farklı morfolojilere sahip nanofiberler oluşturuldu. Şekil 4.2 Ps-12 ve Ps-13 nanofiberlerin SEM görüntülerini ve nanofiberlerin ortalama çap dağılımını göstermektedir. SEM görüntülerine göre

nanofiberlerin; homojen, ince ve uzun lifli yapıları gözlemlendi. Ayrıca nanofiber morfolojisinde istenmeyen bir durum olan boncuk benzeri yapıların gözlenmedi.



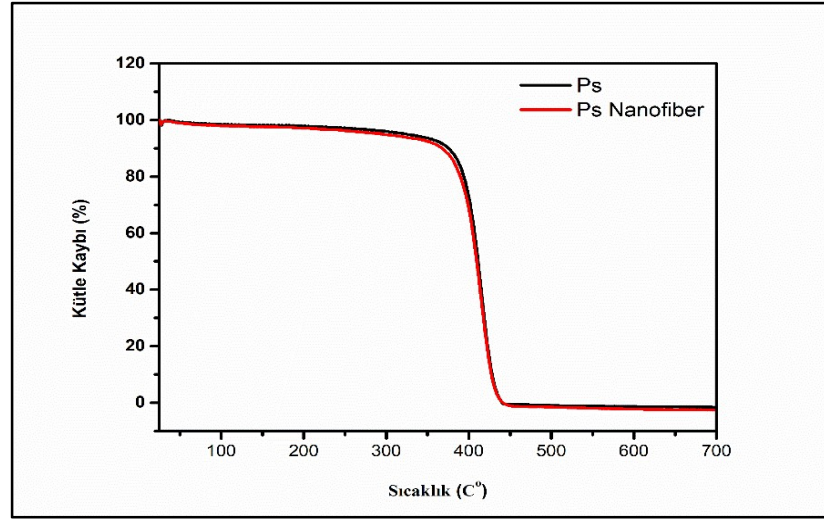
Şekil 4.2: a) Ps-12, b) Ps-13 nanofiberleri için SEM görüntüleri, ortalama çap dağılımı ve fotoğrafları.

Polistiren nanofiberin kimyasal karakterizasyonu ve elementel analizi için EDX analizi yapıldı (Şekil 4.3). Elde edilen sonuçlara göre üretilen Polistiren nanofiberin elementel bileşimi beklenen yüzdelerde oluştu.



Şekil 4.3: PS nanofiberin EDX spektrumu.

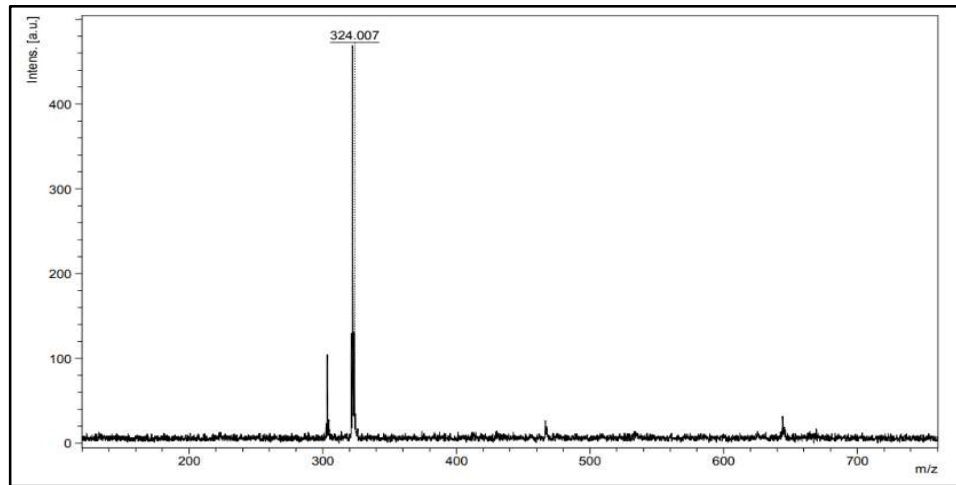
PS nanofiberler ve saf PS termogravimetrik analiz (TGA) yöntemiyle karakterize edildi. PS nanofiberin ve saf PS'nin TGA eğrisi Şekil 4.4'te gösterildi. TGA ölçümleri, 10°C/dakika ısıtma hızında nitrojen atmosferi altında gerçekleştirildi. Termogramda polimerik yapının korunduğu, sadece yaklaşık 400 °C'de polimerin erimesini gösteren endotermik bir reaksiyonun oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4: PS ve PS nanofiberin TGA termogramı.

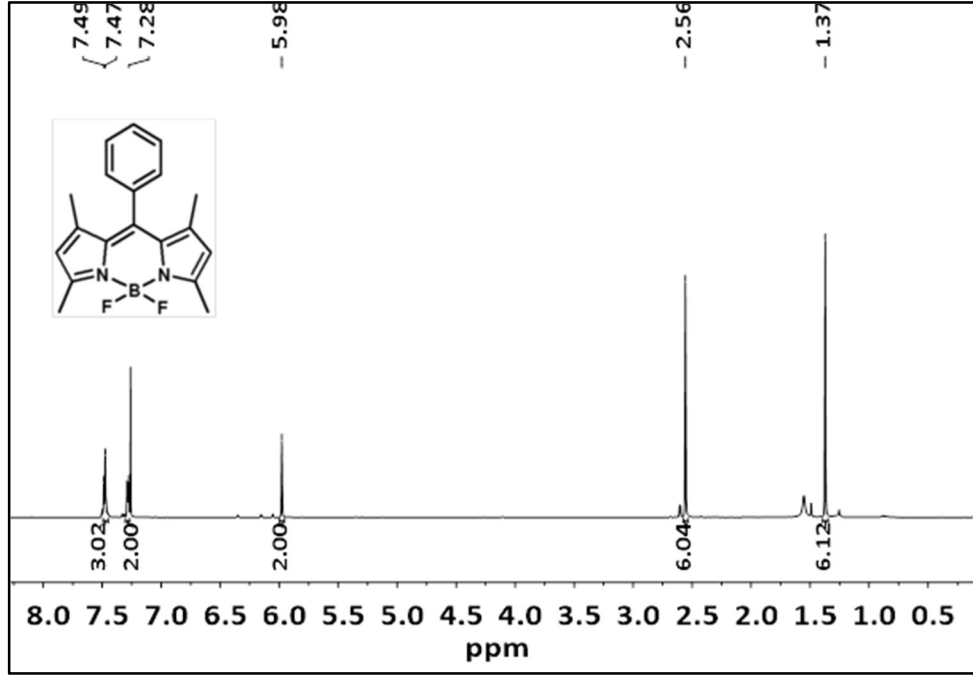
4.2. BODIPY Bileşiğinin (1) Karakterizasyonu

1 bileşiğinin Matriks Yardımlı Lazer Desorpsiyon/İyonlaşma (MALDI) tekniği ile alınmış kütle spektrumu incelendiğinde, moleküler iyon piki 324.007 m/z (%100) olarak görülmektedir ve beklenen değerle uyum göstermektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5:1 Bileşiğin Kütle spektrumu.

1 bileşiğın CDCl_3 içerisinde alınan ^1H -NMR spektrumu incelendiğinde aromatik protonları 7.49-7.28 ppm aralığında gözlendi. Pirool halkasındaki protonlar 5.98 ppm'de komşu karbon atomlarında eşleşebileceğı proton olmadığı için tekli pik şeklinde gözlendi. BODIPY ekirdeğı üzerindeki metil protonları 2.56 ve 1.37 ppm'de tekli pik şeklinde gözlendi. Bu bileşik için gözlenen tüm kimyasal kayma değeri (δ) ve integrasyon değeri yapının doğruluğunu kanıtlamaktadır (Şekil 4.6).

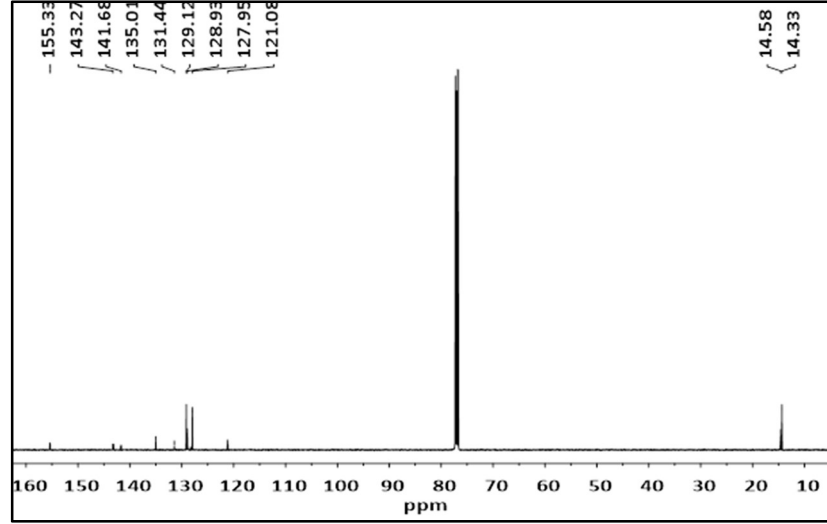


Şekil 4.6: **1** bileşiğın ^1H -NMR Spektrumu.

1 bileşiğine ait CDCl_3 içerisinde alınan ^{13}C NMR ölçümünden elde edilen veriler aşağıda verildi.

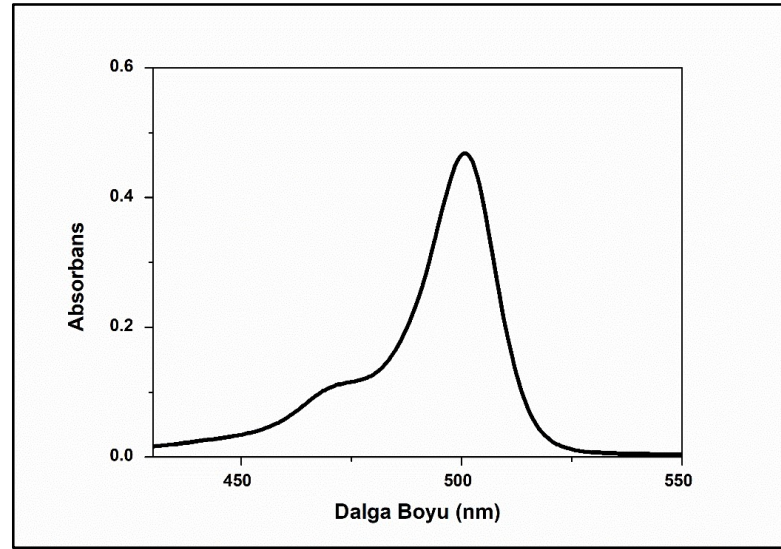
(126 MHz, CDCl_3): 155.33, 143.66, 141.73, 135.02, 129.3, 129.12, 128.12, 127.95, 121.08, 14.58, 14.33 pmm (Şekil 4.7).

Elde edilen bu veriler, **1** bileşiğının başarılı bir şekilde sentezlendiğini göstermektedir.



Şekil 4.7: 1 bileşiğın ¹³C-NMR Spektrumu.

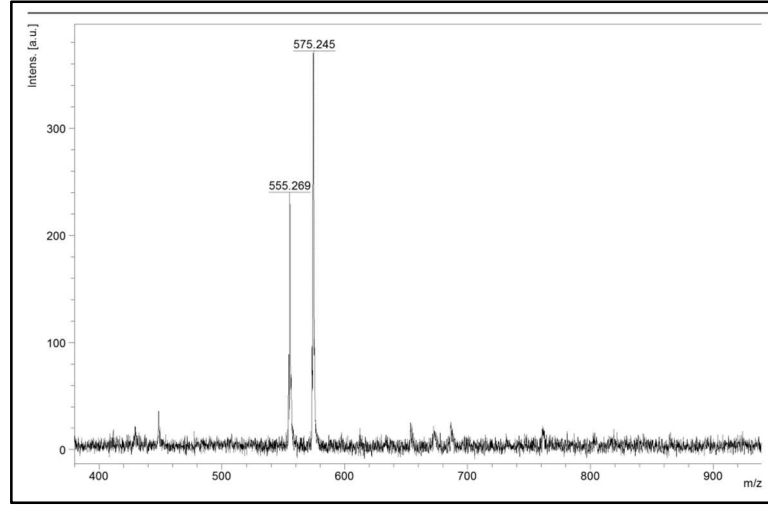
1 bileşiğın DCM içerisinde alınan UV-Vis spektrumu incelendiğinde 501 nm'de BODIPY grubuna ait karakteristik pik gözlendi. (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: 1 bileşiğının diklorometan içerisindeki UV-Vis Spektrumu.

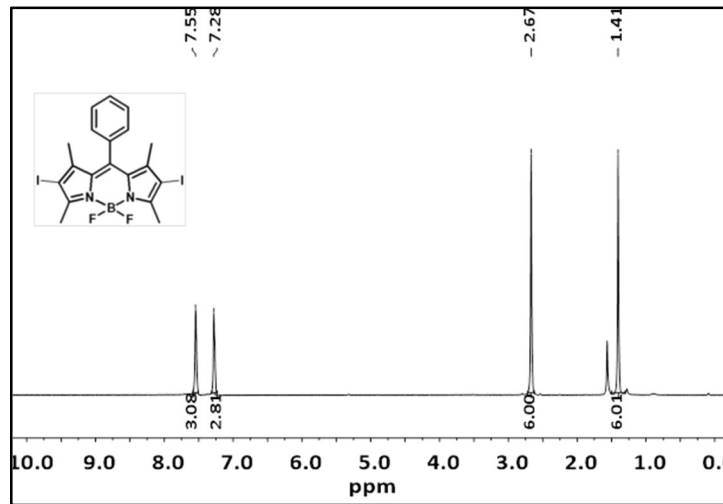
4.3. 2 ve 6 Pozisyonlarından İyot ile Katkılandırılmış İyotlu BODIPY Bileşiğının (2) Karakterizasyonu

2 Bileşiğın Matriks Yardımlı Lazer Desorpsiyon/İyonlaşma (MALDI) tekniği ile alınmış kütle spektrumu incelendiğinde, moleküler iyon piki 575.245 m/z (%100) olarak görülmektedir ve beklenen değlerle uyum göstermektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: 2 Bileşiğinin kütle spektrumu.

2 bileşiğinin CDCl_3 içerisinde alınan $^1\text{H-NMR}$ spektrumu incelendiğinde aromatik protonları 7.55-7.28 ppm aralığında gözlenmiştir. BODIPY çekirdeği üzerindeki metil protonları 2.67 ve 1.41 ppm'de tekli pik şeklinde gözlendi. Ayrıca başlangıç bileşiğinde 5.98 ppm'de gelen pirol halkasına ait proton piklerinin kaybolması reaksiyonun başarılı bir şekilde gerçekleştiğinin en önemli göstergelerinden biridir. Bu bileşik için gözlenen tüm kimyasal kayma değerleri (δ), eşleşme sabitleri (J) ve integrasyon değerleri yapının doğruluğunu kanıtlamaktadır (Şekil 4.10).

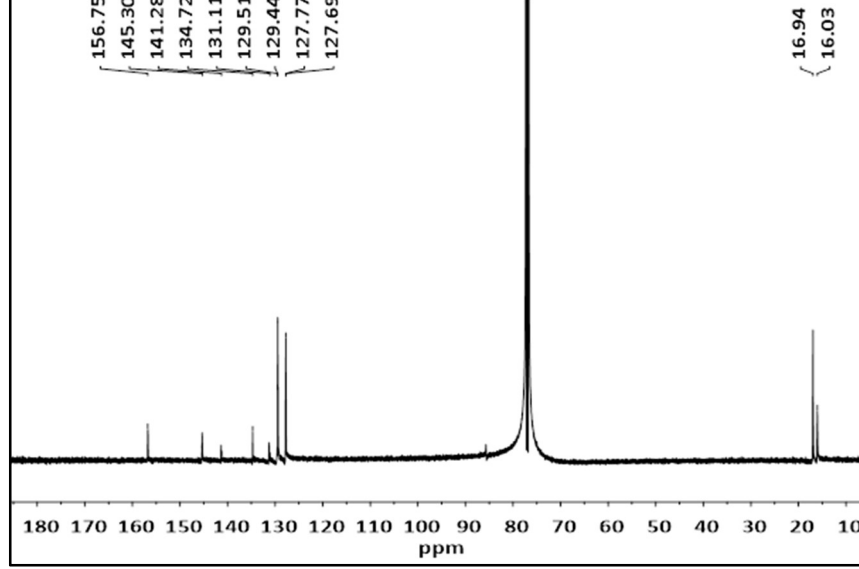


Şekil 4.10: 2 bileşiğinin $^1\text{H-NMR}$ Spektrumu.

2 bileşiğine ait CDCl_3 içerisinde alınan ^{13}C NMR ölçümünden elde edilen veriler aşağıda verildi.

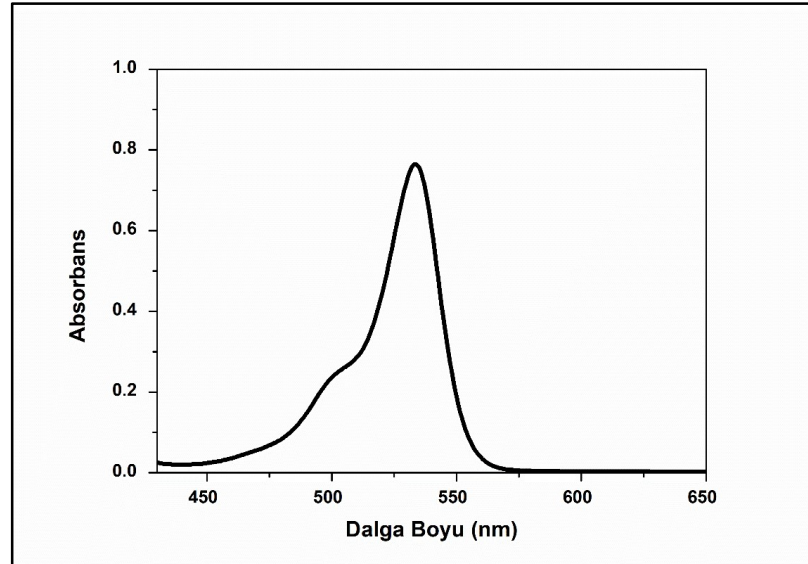
(126 MHz, CDCl₃): 156.75, 145.30, 141.28, 134.72, 131.11, 129.51, 129.44, 127.77, 127.69, 121.08, 16.94, 16.03 ppm (Şekil 4.11).

Elde edilen bu veriler, 2 bileşiğinin başarılı bir şekilde sentezlendiğini göstermektedir.



Şekil 4.11: 2 bileşiğinin ¹³C-NMR Spektrumu.

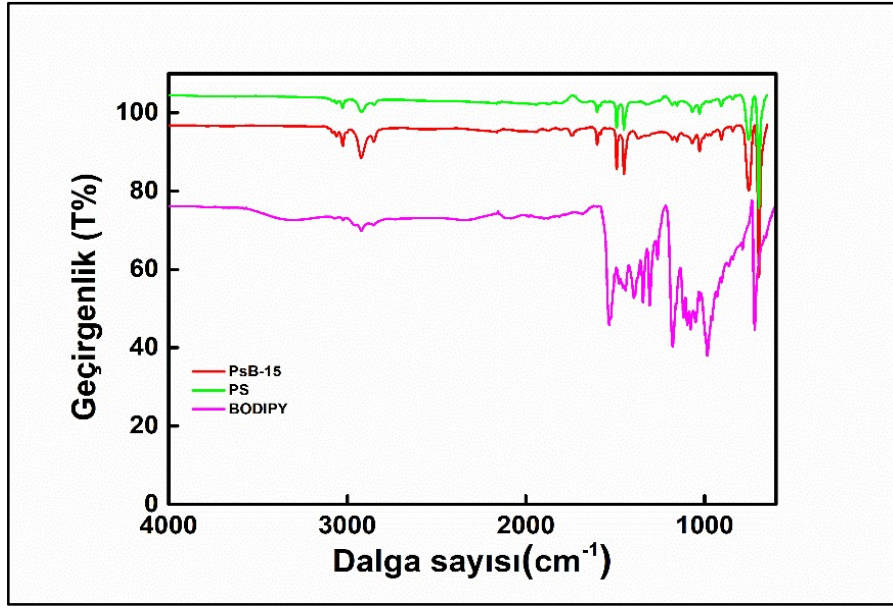
2 bileşiğinin DCM içerisinde alınan UV-Vis spektrumu incelendiğinde 533 nm'de BODIPY grubuna ait pik gözlemlendi. (Şekil 4.12).



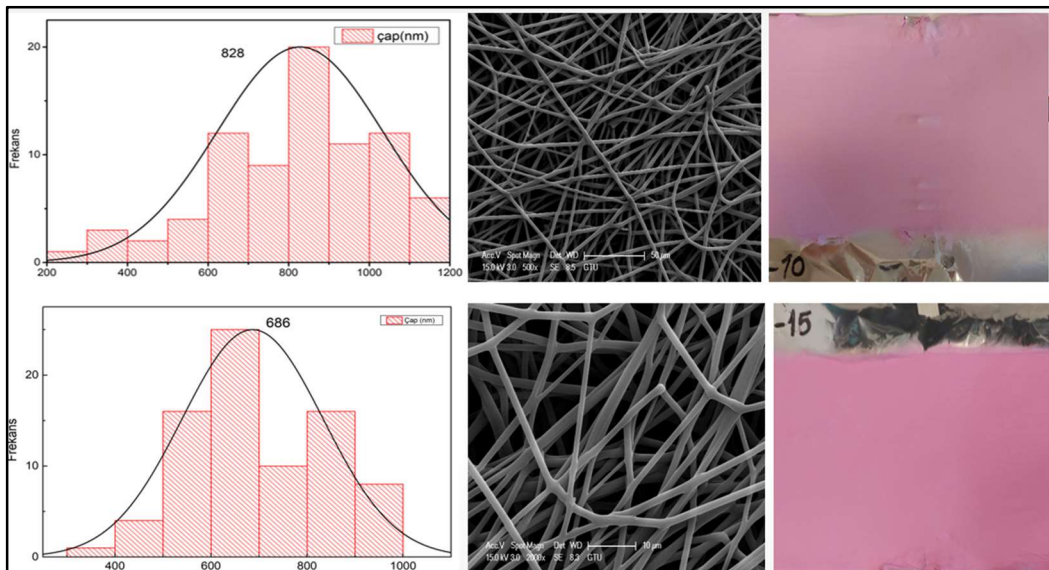
Şekil 4.12: 2 bileşiğinin diklorometan içerisindeki UV-Vis Spektrumu.

4.4. PS/ BODIPY Nanofiberlerin Karakterizasyonu

FT-IR spektrumunda, 2900-3050 cm^{-1} arasında aromatik -C-H gerilmesi 1601, 1583, 1492 ve 1451 gözlenen absorpsiyon bantları aromatik halka C-C ve C=C gerilme titreşimleri, C-H düzlem dışı eğilme titreşimleri ise 500-900 cm^{-1} de görülmektedir. (Şekil 4.11). BODIPY bileşiğine ait piklerin gözükmemesi hibrit nanofiber katalizöründeki BODIPY miktarının az olduğundan kaynaklandığı öngörüldü.

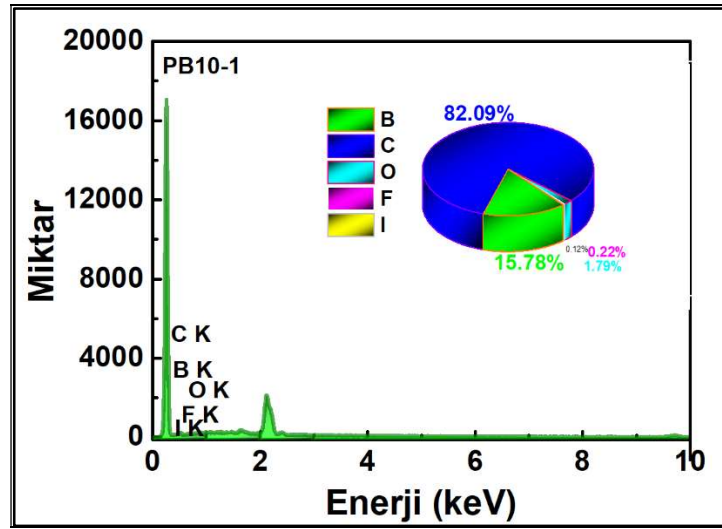


Şekil 4.11: PS/ BODIPY Nanofiberlerin FT-IR spektrumu.



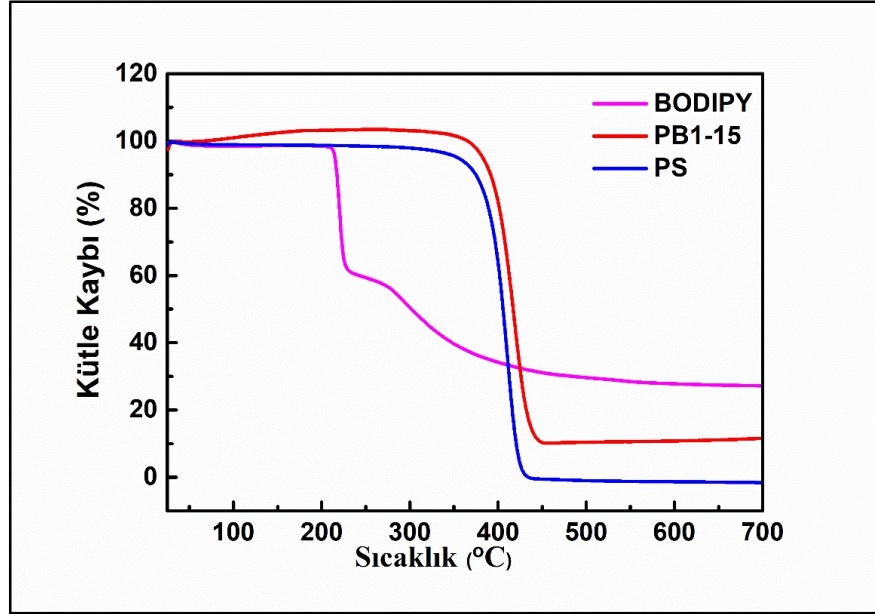
Şekil 4.12: a) Psb-10 b) Psb-15 nanofiberleri için SEM görüntüleri, ortalama çap dağılımı ve fotoğrafları.

Hazırlanan nanofiberlerin karakterizasyonu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS) kullanılarak gerçekleştirildi. Nanofiberlerin SEM görüntüsü, nispeten homojen çap ve morfolojiye sahip nanofiberleri göstermektedir (4.12). Polistiren ve BODIPY bileşiği arasında π - π ve hidrofobik etkileşimlere meydana gelmektedir ve EDX spektrumlarındaki B, F ve I atomlarının varlığı, PS/ BODIPY nanofiberlerin başarılı bir şekilde üretildiğini göstermektedir (Şekil 4.13).



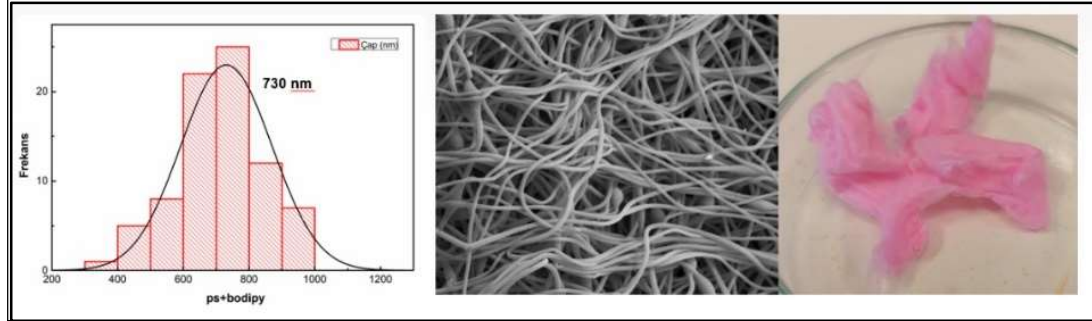
Şekil 4.13: PS/BODIPY nanofiberin EDX spektrumu.

Termogravimetrik analiz metodu (TGA) kullanılarak PS/BODIPY nanofiberlerin termal davranışları incelendi. Termogravimetrik analiz metodu (TGA) kullanılarak BODIPY Bileşiği, PS nanofiber ve PS / BODIPY Nanofiberlerin termogramı Şekil 4.14 'te gösterildi. Polistiren içindeki BODIPY ile PS nanofiberlerin termal kararlılığında artış görüldü.



Şekil 4.14: BODIPY Bileşiği, PS ve PS/BODIPY (PSB-15) nanofiberlerin termogramı.

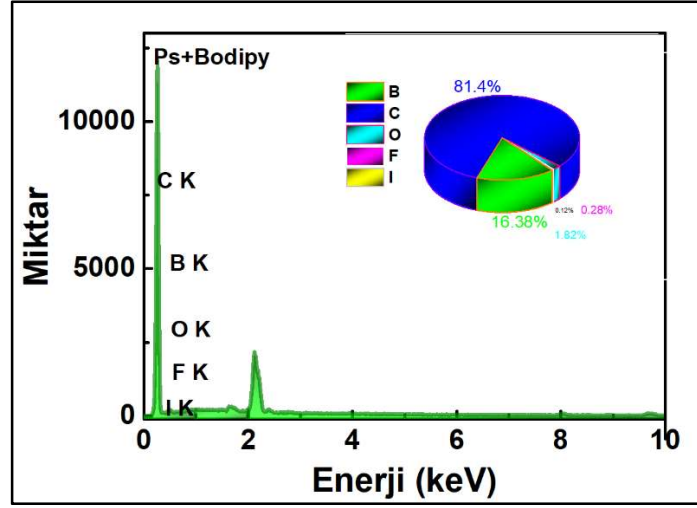
4.5. PS+B-1 Nanofiberlerin Karakterizasyonu



Şekil 4.15: PS+B-1 nanofiberi için SEM görüntüsü, ortalama çap dağılımı ve fotoğrafı.

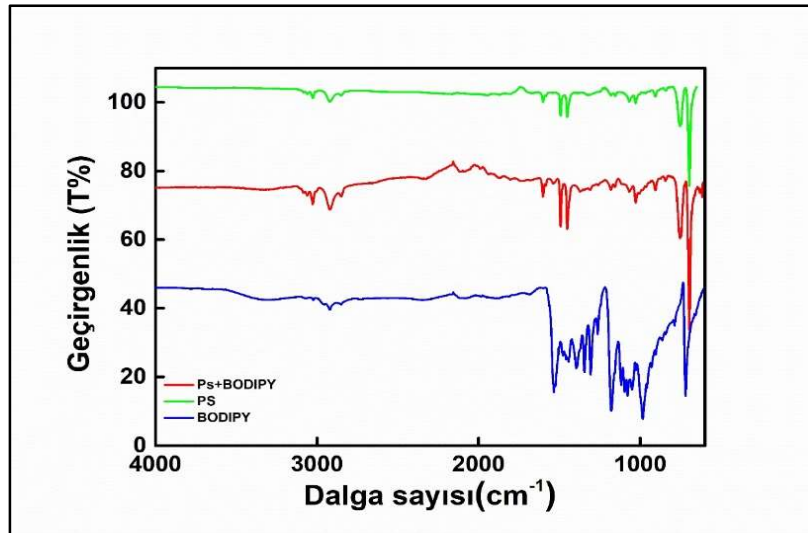
Hazırlanan nanofiber taramalı elektron mikroskopundaki görüntüsü nanofiber yapısının bozulmadığı görülmektedir (Şekil 4.15).

EDX spektrumlarındaki I, B ve F atomlarının varlığı, BODIPY'nin nanofiber matrisine dahil edildiğini doğrulamaktadır. (Şekil 4.11).



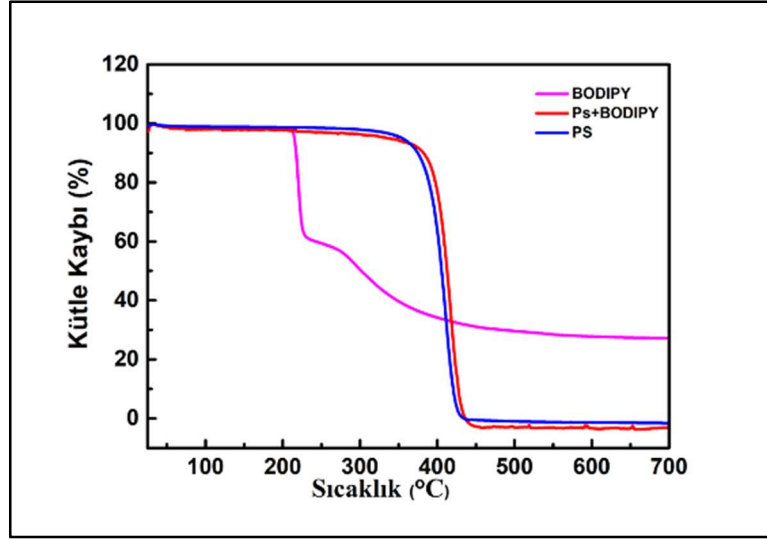
Şekil 4.16: PS+B-1 nanofiberin EDX spektrumu

FT-IR spektrumunda, 2900-3050 cm^{-1} arasında aromatik -C-H gerilmesi 1601, 1583, 1492 ve 1451' de gözlenen absorpsiyon bantları aromatik halka C-C ve C=C gerilme titreşimleri, C-H düzlem dışı eğilme titreşimleri ise 500-900 cm^{-1} de görülmektedir. BODIPY Bileşiğine ait piklerin gözükmemesi hibrit nanofiber katalizöründeki BODIPY miktarının az olduğundan kaynaklandığı öngörüldü (Şekil 4.17).



Şekil 4.17: PS+B-1 nanofiberi için FT-IR spektrumu.

Termogravimetrik analiz metodu (TGA) kullanılarak BODIPY bileşiği PS ile üretilmiş nanofiber ve PS+B-1' nin termogramı Şekil 4.18 'de gösterildi. Polistiren içindeki BODIPY ile PS nanofiberin termal kararlılığında artış görüldü.

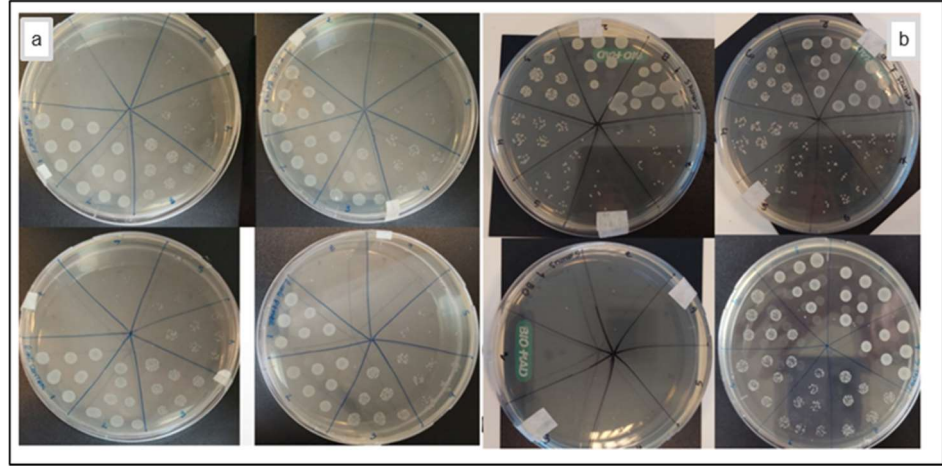


Şekil 4.18: 2 bileşiği, PS ve PS+B-1 'in nanofiberlerin termogramı.

5. UYGULAMA DENEMELERİ

5.1. Antibakteriyel Aktivite Testi

Elektro eğirme sonrası teknik ile katkılanarak hazırlanan PS+B-1 hibrit nanofiberlerin farklı bakterilerde oluşturduğu büyüme inhibisyonu *S. aureus* ve *E. coli* suşları kullanılarak belirlendi. *S. aureus* ve *E. coli* izolatları Muller-Hinton (MH) agar üzerine çizgi ekimi yapılarak 16 saat 37 °C da inkübe edilmiştir. Ertesi gün alınan tek koloniler LB broth besiyeri içerisinde OD₆₀₀ değeri 0.1 olacak şekilde (5 mL, 10⁸ CFU/mL) hazırlandı. Hazırlanmış olan nanofiberler UV ışık altında 15 dakika sterilize edildikten sonra bu besiyerlerine ilave edilerek 200 rpm ve 37 °C 6 saat inkübe edilmiştir. 6 saatlik inkübasyon sonrasında besiyerlerinden alınan 100 µL'lik bakteriler 900 µL LB (10⁷ CFU/mL) ile seyreltildi. Daha sonra elde edilen bakteri süspansiyonu, tuzlu çözelti içinde ardışık dilüsyonlar (100 µL süspansiyon, 900 µL tuzlu çözeltiye eklenerek) ile 7 ayrı tüp halinde hazırlandı. Bu seri dilüsyon ile hazırlanmış örneklerden 25 µL alınarak 7 ye bölünmüş LB agar üzerine damla ekim yapılarak 24 saat 37 °C'de inkübe edildi (Şekil 5.1). Ertesi gün her bir alandaki koloniler sayılıp (Tablo 5.1) Formül 5.1 ile CFU/mL değeri belirlendi.



Şekil 5.1: PS+B-1 Nanofiberi ile Hazırlanan çözeltilere yerleştirilen a) *S. Aureus* b) *E. coli* antibiyogram diskler.

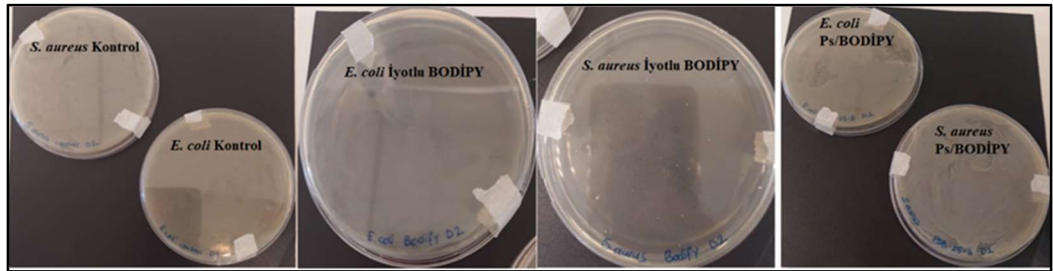
Tablo 5.1 Bakteri Sayısı.

Mikroorganizma	CFU/mL (koloni oluşturan bakteri sayısı/mL)				
	Kontrol	Polistiren nanofiber	BODIPY	Polistiren-BODIPY nanofiber	Polistiren nanofiber+BODIPY
<i>E. coli</i>	8,4x10 ⁷	5,4x10 ⁷	3,8x10 ⁷	Yok	2,2x10 ⁷
<i>S. aureus</i>	5,4x10 ⁸	5,2x10 ⁸	4x10 ⁷	Yok	1,6x10 ⁸

$$\text{Sayı/mL} = (\text{Koloni sayısı} * \text{Seyreltme Faktörü}) / \text{Ekim hacmi} \quad (5.1)$$

Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, PS polimerinin başlangıçta herhangi bir antibakteriyel aktiviteye sahip olmadıkları gözlenmektedir. Elektro eğirme sonrası BODIPY katkılanmış PS fiberlerin hem Gram pozitif (*S. aureus*) hem de Gram negatif (*E. coli*) izolatlarına karşı antimikrobiyal etki gösterdiği belirlendi.

Elektro eğirme öncesinde iyotlu BODIPY (2 bileşiği, 15 mg) ilave edilerek katkılanmış PSB-15 nanofiber katalizörü farklı bakterilerinde oluşturduğu büyüme inhibisyonu *S. aureus* ve *E. coli* suşları kullanılarak belirlendi. Bu teknikle oluşturulan nanofiber katalizörde antibakteriyel etki gözlenmedi. (Şekil:5.2)



Şekil 5.2: PB-15 Nanofiber ile hazırlanan çözeltilere yerleştirilen antibiyogram diskler.

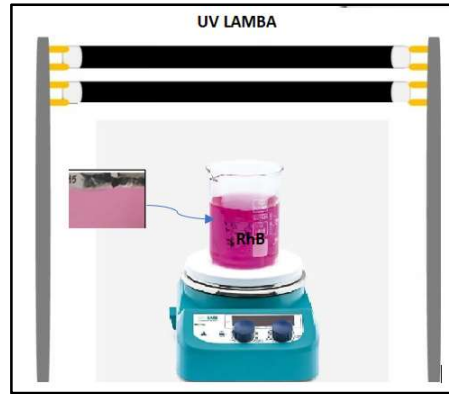
5.2. Rodamin B'nin Fotokatalitik Giderimi

Hazırlanan hibrit nanofiberlerin uygulama alanlarından biri, onları katalizör olarak kullanmaktır. BODIPY ve türevleri yüksek kimyasal ve fotokararlılık sıcaklık ve çözücü polaritesine karşı duyarsızlık, görünürden yakın kızılötesine (NIR) kadar yoğun emilim bantları ve uygun yapısal değişikliklerden sonra singlet oksijen üretme

becerisine sahip olmak gibi bir dizi son derece cazip özellik gösterirler. Bu özellikler, BODIPY bileşiklerinin fotooksidatif katalizör olarak kullanılmasını uygun kılar [42]. 2,6-halojenli BODIPY çekirdeklerinin 500-550 nm bölgesinde güçlü bir şekilde emilim yaptığı ve nanofiberlere gömülü olduklarında uygun fotodegradasyon özelliklerine sahip olduğunu Orange G'nin fotodegradasyonunda başarılı bir şekilde kullanıldığı bildirildi [44].

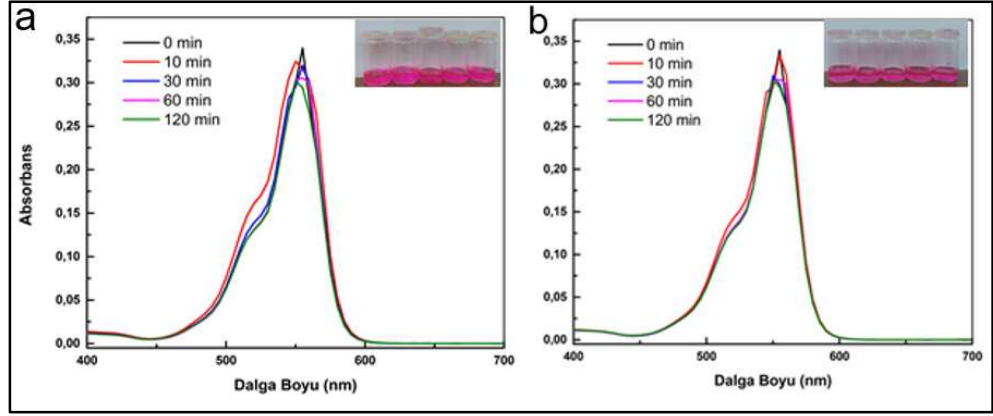
Bu çalışmada, katkılandırılmamış PS nanofiberin ve 2 numaralı bileşik ile katkılandırılan PS nanofiberlerin Rhodamine B (Rh B) bozunma sürecindeki fotokatalitik aktiviteleri incelendi. Yapılan tüm fotokatalitik deneylerin yapıldığı deney düzeneği Şekil 5.3' te verildi.

PSB-10 ve PSB-15 hibrit nanofiberlerin fotokatalitik aktivitesini araştırmak için, katyonik bir boya olan Rh B 5 ppm kullanıldı. T=0 'da ilk örnek referans olarak alındı, ardından 10 dakika boyunca adsorpsiyon etkisini belirlemek amacıyla karanlıkta bekletilip numune alındı. Sonrasında 30., 60., ve 120. dakikada bir toplamda 5 örnek alındı. Heidolph manyetik karıştırıcıda katalitik boya bozulması kurulumu Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Katalitik proste boyanın konsantrasyon değişimi 554 nm'de, UV-Vis spektrofotometresi, Shimadzu, UV-2600 ile izlendi.



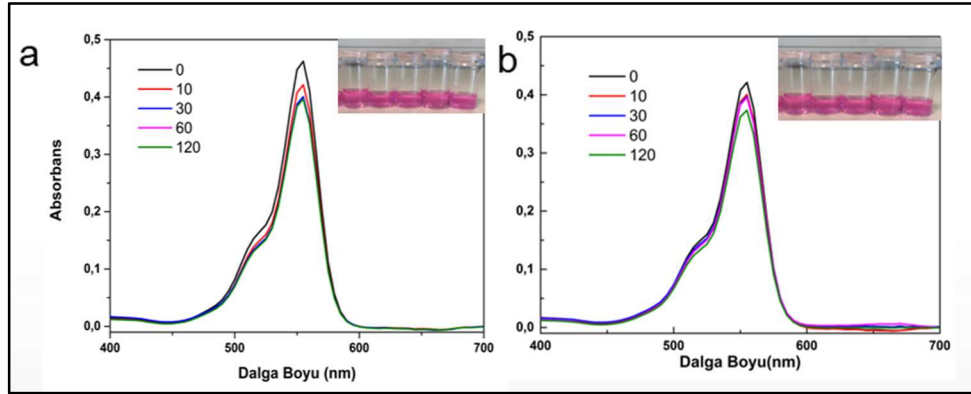
Şekil 5.3: Fotokatalitik çalışmaların yapıldığı deney düzeneği.

İlk numune olarak PS-12 nanofiberin Ph 8 ve 11 değerlerinde ve 20 mg kullanılarak Rh B in giderim çalışması yapıldı. Fotokatalitik bozunmayı gözlemlemek için örneklerin UV spektrumu ölçüldü. Renk açılması ve absorbans değerinde önemli bir değişiklik gerçekleşmedi (Şekil 5.4).



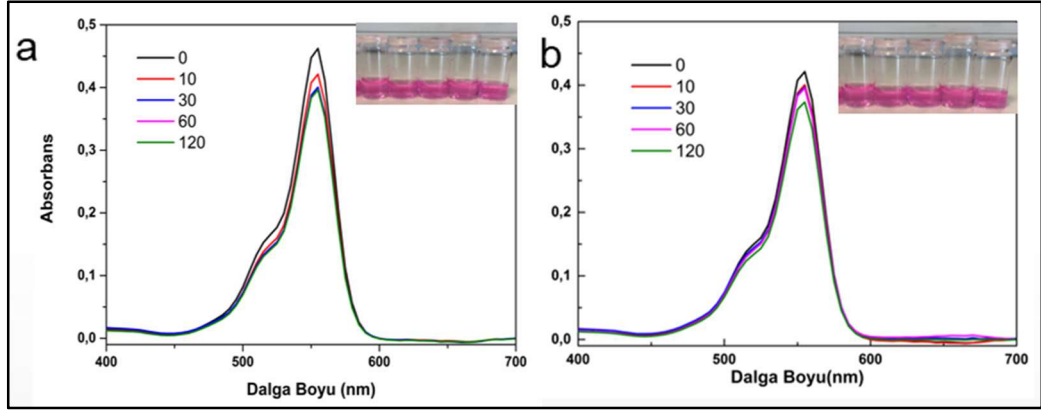
Şekil 5.4: PS nanofiber için farklı Ph değerlerinde (a) 8 ve (b) 11 için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.

Ph 8 ve nanofiber miktarı (20 mg) sabit tutulup, 10 mg (PSB-10) ve 15 mg 2 bileşiği içeren (PSB-10 ve PSB-15) hibrit nanofiberler kullanılarak giderim çalışması yapıldı. Fotokatalitik bozunmayı gözlemlemek için örneklerin UV spektrumu ölçüldü. Örneklerin absorbans değerinde ve çözeltilerin renginde önemli bir değişiklik görülmedi (Şekil 5.5).



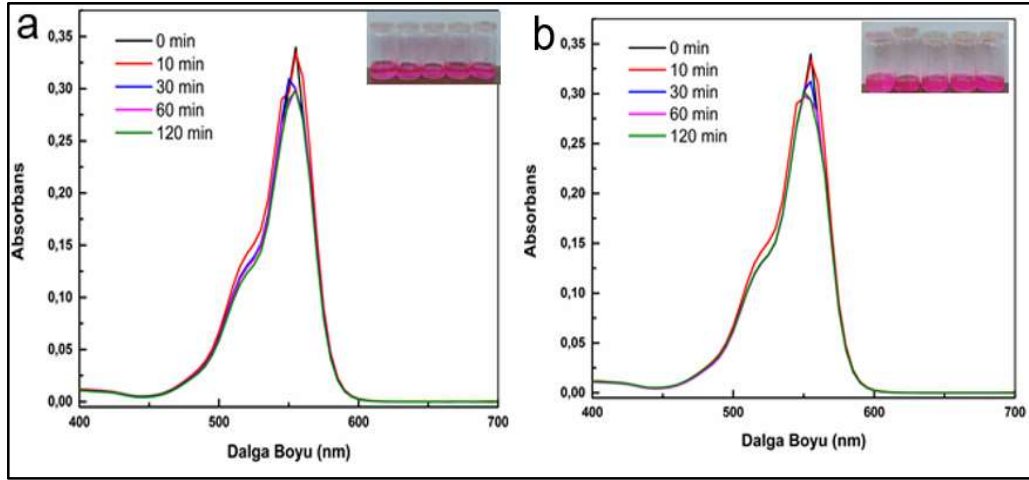
Şekil 5.5: PSB-10 ve PSB-15 nanofiberler için (a) 10 mg ve (b) 15 mg için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.

PSB-15 nanofiberden 20 mg ve 30 mg ve ph 8 değerinde kullanılarak Rh B in giderim çalışması yapıldı. Fotokatalitik bozunmayı gözlemlemek için örneklerin UV spektrumu ölçüldü. Örneklerin absorbans değerinde ve çözeltilerin renginde önemli bir değişiklik görülmedi (Şekil 5.6).



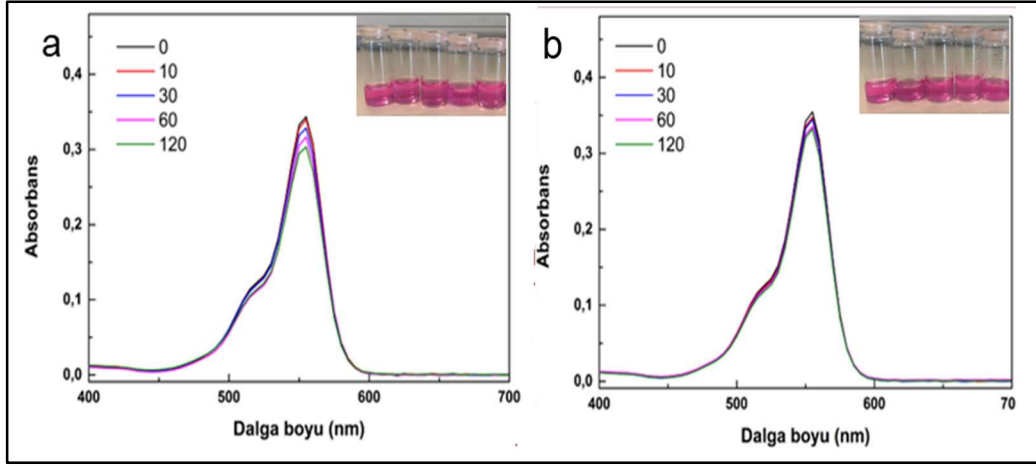
Şekil 5.6: Farklı Nanofiber miktarlarında a) 20 mg ve b) 30 mg için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.

PSB-15 nanofiberden 20 mg kullanılarak Ph 8 ve 11 değerlerinde Rh B in giderim çalışması yapıldı. Fotokatalitik bozunmayı gözlemlemek için örneklerin UV spektrumu ölçüldü. Örneklerin absorbans değerinde ve çözeltilerin renginde önemli bir değişiklik görülmedi (Şekil 5.7).



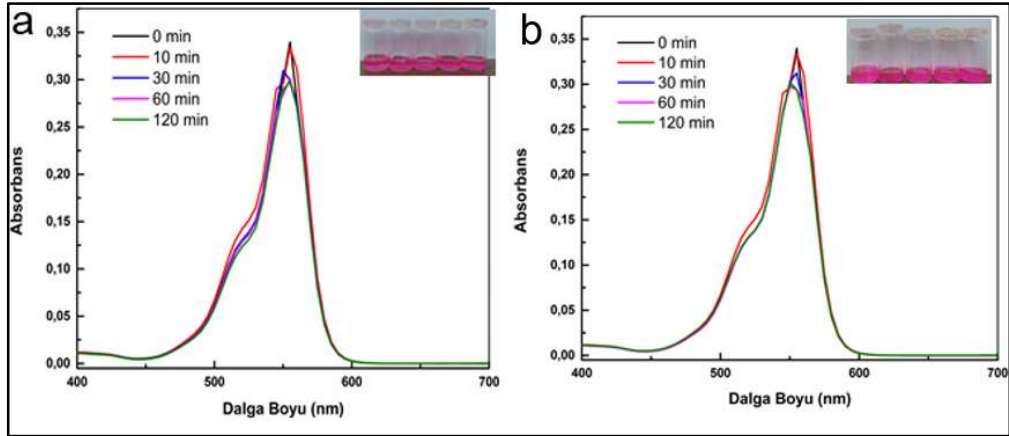
Şekil 5.7: PSB-15 nanofiber farklı Ph değerlerinde a) 8 ve b) 11 için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.

PSB-10 ve PSB-15 nanofiberlerden için Ph 4 değerinde ve nanofiber miktarı 20 mg kullanılarak Rh B in giderim çalışması yapıldı. Fotokatalitik bozunmayı gözlemlemek için örneklerin UV spektrumu ölçüldü ve örneklerin absorbans değerinde ve çözeltilerin renginde önemli bir değişiklik görülmedi (Şekil 5.7).



Şekil 5.8: PSB-10 ve PSB-15 nanofiberler için Ph 4'te ve nanofiber miktarı (20 mg) sabit tutulup, (a) 10 mg ve (b) 15 mg için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.

Elektro eğirme sonrası 2 bileşiği ile katkılandırılarak hazırlanan PS+B- 1 nanofiberden 20 mg kullanılarak Ph 8 ve 11 değerlerinde Rh B in giderim çalışması yapıldı. Fotokatalitik bozunmayı gözlemek için örneklerin UV spektrumu ölçüldü. Örneklerin absorbans değerinde ve çözeltilerin renginde önemli bir değişiklik görülmedi (Şekil 5.9).



Şekil 5.9: Farklı Ph değerlerinde a) 8 ve b) 11 için Rh B gideriminin absorpsiyon spektrumları.

6. SONUÇ

Bu tez kapsamında nanofiberlerin üretimi için toksik olmayan, biyolojik olarak parçalanabilen ve ticari olarak satın alınabilen bir polimer olan PS ve nanofiberlerin üretimi için yaygın olarak kullanılan elektro eğirme tekniği tercih edildi. İlk olarak, en homojen ve düzgün PS nanofiberi üretmek için elektro eğirme parametrelerinin optimizasyon çalışması yapıldı. Üretilen nanofiberler FT-IR, SEM, EDX ve TGA yöntemleriyle karakterize edilerek en homojen ve düzgün nanofiber PS-12 ve PS-13 kodlu nanofiberler olduğu tespit edildi. Bu nanofiberler 1 mL/s besleme hızı, 15 ve 18 gerilim ve 30 dk süre kullanılarak üretildi. SEM görüntüleri, üretilen PS nanofiberlerinin nano ölçekte bir çapa sahip olduğunu ve başarılı bir şekilde nanofiber üretiminin gerçekleştirildiğini gösterdi. Ayrıca, EDX sonuçları PS nanofiberin elementel bileşiminin saf PS ile aynı olduğunu gösterdi ve saf PS 'nin lif formasyonu sadece PS 'nin formunun değiştiği ve yüzey alanının arttığı söylenebilmektedir. Elde edilen FT-IR sonuçları, PS nanofiberlerinin yapısının saf PS ile aynı olması bu görüşü kanıtlamaktadır. İyotlu BODIPY ile katkılandırma işleminde optimize edilmiş bu parametreler kullanıldı.

Ayrıca tez çalışması kapsamında **1** ve **2** (2 ve 6 pozisyonlarında iyot içeren BODIPY) bileşiği sentezlendi. Sentezlenen bu bileşiklerin yapıları MALDI, ¹H-NMR, ¹³C-NMR ve UV-Vis spektroskopi teknikleri kullanılarak aydınlatıldı. Karakterizasyon sonucunda elde edilen veriler moleküler yapının doğruluğunu kanıtladı

Katkılama amacıyla başarılı bir şekilde sentezlenen **2** bileşiği hem nanofiber üretimi öncesi hem de nanofiber üretimi sonrası sırasıyla,

- 5, 10, 15, 25 mg olarak elektro eğirme prosesi ile
- 2,5 mg olarak elektro eğirme prosesi sonrasında

Olmak üzere iki farklı teknikle birleştirilerek hibrit PS nanofiberler hazırlandı. PSB-10 ve PSB-15 nanofiberleri, en homojen ve düzgün nanofiber olup en kısa ortalama çapı olan fiberlerdir. Bu nanofiberlerin üretilmesi sırasında PS nanofiber üretiminde kullanılan parametreler kullanıldı. SEM görüntülerinde, üretilen hibrit nanofiberlerin nano ölçekte bir çapa sahip olduğu ve istenmeyen bir durum olan boncuk oluşumunun bulunmadığı görüldü.

Hazırlanan tüm hibrit nanofiberler FTIR, TGA, EDX ve SEM yöntemleri ile karakterize edildi. EDX ve FT-IR analizleri, PS nanofiber ve BODIPY yapılarıyla uyumlu sonuçlar verdi. Bu da 2 bileşiğinin elektro eğirme yöntemiyle PS nanofibere başarılı bir şekilde eklendiğini göstermektedir. PS nanofiber ve hibrit nanofiberin termal kararlılığı karşılaştırıldığında, 2 bileşiğinin eklenmesinin PS nanofiberin termal kararlılığına olumlu yönde katkı sağladığı görüldü.

Nanofiberler üretimi sonucunda yüzey alanı, gözeneklilik ve katalitik aktif bölgeler artırıldı ve bu özellikler ile nanofiberlerin antibakteriyel etkinlik ve fotokatalitik bozunma uygulamalarında potansiyel kullanımı üzerine uygulama çalışmaları yapıldı. Bu kapsamda antibakteriyel etkinlik testinde, PSB-5, PSB-10, PSB15, PSB-25 ve PS+B-1 nanofiberleri kullanıldı. PS+B-1 nanofiberi antibakteriyel etkinlik açısından *S. aureus* ve *E. coli*'ye karşı direnç gösterdi. Elde edilen sonuçlara göre, gelecekte hazırlanacak benzer hibrit nanofiberlerin daha fazla antibakteriyel uygulamalar için umut verici bir potansiyele sahip olduğu görüldü.

Fotokatalitik bozunma için, Ps-12, Psb-10, Psb15 ve PS+B-1 nanofiberleri kullanıldı. Ps-12 örneği ile yapılan çalışmada 2 bileşiği ile katkılanmadığı için absorbans değerinin azalması ve çözeltilerin renginin açılması beklenmiyordu. Bu ölçüm katkılanmamış nanofiberlerin fotokatalitik aktivite göstermediğini doğrulamak amacıyla yapıldı. Hibrit nanofiber katalizör miktarı, katalizör içerisindeki BODIPY miktarı ve farklı iki (8) Ph değeri değişkenlerinde fotokatalitik giderim çalışması yapıldı. Fotokatalitik bozunmayı gözlemlemek için örneklerin UV spektrumu ölçüldü. Örneklerin absorbans değerinin azalması ve çözeltilerin renginin açılması gözlenmedi.

Sonuçlar, elde edilen 2,6-diiodo BODIPY nanofiber katalizörlerin tez kapsamında yapılan çalışmalar doğrultusunda fotokatalitik giderimde istenilen sonuçları sağlamadığını göstermektedir. Bununla birlikte, gelecekte yapılacak farklı değişkenler ile benzer çalışmaların geliştirilmesiyle daha etkili fotokatalitik giderim sağlanabileceği umut verici olabilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, nanofiberlerin atık su arıtması ve antibakteriyel uygulamalarda potansiyel kullanımını göstermiştir. Ancak fotokatalitik giderimde etkili sonuçlar elde etmek için ileri çalışmaların yapılması gerektiği belirtilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Thenmozhi S., Dharmaraj N., Kadirvelu K., Kim H. Y., (2017), "Electrospun nanofibers: New generation materials for advanced applications", *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 217, 36-48.
- [2] Tijing L. D., Yao M., Ren J., Park C. H., Kim C. S., Shon H. K., (2019), "Nanofibers for Water and Wastewater Treatment: Recent Advances and Developments", *Energy, Environment, and Sustainability*, Springer Nature, 20, 431-468.
- [3] Bhardwaj N., Kundu S. C., (2010), "Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique", *Biotechnology Advances*, 28 (3), 325-347.
- [4] Leach M. K., Feng Z. Q., Tuck S. J., Corey J. M., (2010), "Electrospinning fundamentals: Optimizing solution and apparatus parameters", *Journal of Visualized Experiments*, (47), e2494.
- [5] Fidalgo L. M., Maerkl S. J., (2011), "A versatile software-programmable microfluidic platform for auto-mated biology. Electronic Supplementary Information 1 Methods", *11*, 1612-1619.
- [6] Lou L., Osemwegie O., Ramkumar S. S., (2020), "Functional Nanofibers and Their Applications", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59 (13), 5439-5455.
- [7] Kenry, Lim C. T., (2017), "Nanofiber technology: current status and emerging developments", *Progress in Polymer Science*, 70, 1-17.
- [8] Pillay V., Dott C., Choonara Y. E., Tyagi C., Tomar L., Kumar P., Du Toit L. C., Ndesendo V. M. K., (2013), "A review of the effect of processing variables on the fabrication of electrospun nanofibers for drug delivery applications", *Journal of Nanomaterials*, 22.
- [9] Fujihara K., Kotaki M., Ramakrishna S., (2005), "Guided bone regeneration membrane made of polycaprolactone/calcium carbonate composite nano-fibers", *Biomaterials*, 26 (19), 4139-414.
- [10] Steinhart M., Greiner A., (2018), "Nanostructured Fibers Via Electrospinning Nonlinear microscopy and harmonic nanoparticles View project", 137, 459-465.
- [11] İçoğlu H. İ., İbrahim İçoğlu H., Tuđrulođulata R., "Effect of ambient parameters on morphology of electrospun poly (Trimethylene Terephthalate) (PTT) fibers", 27 (3), 215 - 223.
- [12] Cramariuc B., Cramariuc R., Scarlet R., Manea L. R., Lupu I. G., Cramariuc O., (2013), "Fiber diameter in electrospinning process", *Journal of Electrostatics*, 71 (3), 189-198.

- [13] Pham Q. P., Sharma U., Mikos A. G., (2006), "Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review", *Tissue Engineering*, 12 (5), 1197-1211.
- [14] Lannutti J., Reneker D., Ma T., Tomasko D., Farson D., (2007), "Electrospinning for tissue engineering scaffolds", *Materials Science and Engineering C*, 27 (3), 504-509.
- [15] Haider S., Al-Zeghayer Y., Ahmed Ali F. A., Haider A., Mahmood A., Al-Masry W. A., Imran M., Aijaz M. O., (2013), "Highly aligned narrow diameter chitosan electrospun nanofibers", *Journal of Polymer Research*, 20 (4), 105.
- [16] Ki C. S., Baek D. H., Gang K. D., Lee K. H., Um I. C., Park Y. H., (2005), "Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-formic acid solution", *Polymer*, 46 (14), 5094-5102.
- [17] Huang Z. M., Zhang Y. Z., Kotaki M., Ramakrishna S., (2003), "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites", *Composites Science and Technology*, 63 (15), 2223-2253.
- [18] Barakat N. A. M., Kanjwal M. A., Sheikh F. A., Kim H. Y., (2009), "Spider-net within the N6, PVA and PU electrospun nanofiber mats using salt addition: Novel strategy in the electrospinning process", *Polymer*, 50 (18), 4389-4396.
- [19] Megelski S., Stephens J. S., Bruce Chase D., Rabolt J. F., (2002), "Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers", *Macromolecules*, 35 (22), 8456-8466.
- [20] Deitzel J. M., Kleinmeyer J., Harris D., Tan N. C. B., (2001), "The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles", *Polymer*, 42 (1), Issue 1, 261-272
- [21] Doshi J., Reneker D. H., "Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers".
- [22] Cheng Y., Cheng H., Jiang C., Qiu X., Wang K., Huan W., Yuan A., Wu J., Hu Y., (2015), "Perfluorocarbon nanoparticles enhance reactive oxygen levels and tumour growth inhibition in photodynamic therapy", *Nature Communications*, 6, 8785.
- [23] De Vrieze S., Van Camp T., Nelvig A., Hagström B., Westbroek P., De Clerck K., (2009), "The effect of temperature and humidity on electrospinning", *Journal of Materials Science*, 44 (5), 1357-1362.
- [24] Wang H.-S., Fu G.-D., Li X.-S., (2009), "Functional Polymeric Nanofibers from Electrospinning", *Recent Patents on Nanotechnology*, 3 (1), 21-31.
- [25] Fridrikh S. V., Yu J. H., Brenner M. P., Rutledge G. C., (2003), "Controlling the Fiber Diameter during Electrospinning", *Physical Review Letters*, 90 (14), 4.
- [26] Yang N., Wang J., Guo Y., Zhou X., (2008), "SnO₂ nanofibers prepared by sol-gel template method", *Xiyou Jinshu Cailiao Yu Gongcheng/Rare Metal Materials and Engineering*, 37 (4), 694-696.

- [27] Hohman M. M., Shin M., Rutledge G., Brenner M. P., (2001), "Electrospinning and electrically forced jets. I. Stability theory", *Physics of Fluids*, 13 (8), 2201-2220.
- [28] Ohkawa K., Cha D., Kim H., Nishida A., Yamamoto H., (2004), "Electrospinning of chitosan", *Macromolecular Rapid Communications*, 25 (18), 1600-1605, doi: 10.1002/marc.200400253.
- [29] Jiang S., Chen Y., Duan G., Mei C., Greiner A., Agarwal S., (2018) "Electrospun nanofiber reinforced composites: A review", *Polymer Chemistry*, 9 (20), . Royal Society of Chemistry, 2685-2720.
- [30] Lu P., Murray S., Zhu M., "Electrospun nanofibers for catalysts", içinde *Electrospinning: Nanofabrication and Applications*, Elsevier, 2018, 695-717.
- [31] Nair L. S., Laurencin C. T., (2016), "Polymers as biomaterials for tissue engineering and controlled drug delivery", *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 102 . 47-90.
- [32] Silva A. C. Q., Silvestre A. J. D., Vilela C., Freire C. S. R., (2022), "Natural polymers-based materials: A contribution to a greener future", *Molecules*, 27 (1), 94.
- [33] Urgan Maul J. ", Frushour B. G., Kontoff J. R., Eichenauer H., Ott K.-H., (1988), "Polystyrene and Styrene Copolymers", Springer, Dordrecht, 76-89.
- [34] Chung S.-L., Chu M.-F., Lee H.-Y., Wen D.-J., Lo C.-H., Qian Q., Zhang Q., (2003), "Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet", *November*, 31 (11), 1021–1024.
- [35] Uyar T., Havelund R., Hacaloglu J., Zhou X., Besenbacher F., Kingshott P., (2009), "The formation and characterization of cyclodextrin functionalized polystyrene nanofibers produced by electrospinning", *Nanotechnology*, 20 (12),14.
- [36] Loudet A., Burgess K., "BODIPY dyes and their derivatives: Syntheses and spectroscopic properties", *Chemical Reviews*, 107 (11), . 4891-4932.
- [37] Alfred Treibs von, Kreuzer F.-H., (1968), "Difluorboryl-Komplexe von Di- und Tripyrrylmethenen", *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 718 (1), 208-223.
- [38] Berendsen M. G. E., Billiet M. H. A., Vos De Wael E., Pardoën J. A., Van Koeveeringe J. A., Lugtenburg J., (2011), "Pyromethene-BF₃ complexes (4,4'-difluoro-4-bora-3a,4-diaza-s-indacenes). Synthesis and luminescence properties", *ChemInform*, 67(20), 3573–3601.
- [39] Niu S. L., Ulrich G., Retailleau P., Harrowfield J., Ziessel R., (2009), "New insights into the solubilization of Bodipy dyes", *Tetrahedron Letters*, 50 (27), 3840-3844.
- [40] Wang Y., Zhou H., Ding J., Chen Q., Qian S., Chen Y., (2009), "Nonlinear Optical Properties and Ultrafast Dynamics of two Compounds containing Chromophore Dispersed Red one (DR1)", *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 978(1), 4244-3830-3.

- [41] Öztürk Gündüz E., Eserci Gürbüz H., Tasasız B., Yıldız Gül E., Tanrıverdi Eçik E., Okutan E., (2022), “Synthesis, characterization, photophysical, and photochemical studies of BODIPY derivatives”, *New Journal of Chemistry*, 46 (41), 19702-19711.
- [42] Lebechi A. K., Gai L., Shen Z., Nyokong T., Mack J., (2018), “Electrospun 3,5-dithienylvinyleneBODIPY embedded polystyrene nanofibers for the photocatalytic degradation of azo dyes in industrial wastewaters”, *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines*, 22 (6), 501-508.
- [43] Subbiah T., Bhat G. S., Tock R. W., Parameswaran S., Ramkumar S. S., (2005), “Electrospinning of nanofibers”, *Journal of Applied Polymer Science*, 96 (2), 557-569.
- [44] Lebechi A. K., Nyokong T., Mack J., (2017), “BODIPY dye embedded electrospun polystyrene nanofibers for the photocatalytic degradation of orange G in industrial wastewaters”, *Macroheterocycles*, 10 (4-5), 460-466.

ÖZGEÇMİŞ

Zehra Yamak Kahveci 2013 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2020 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Bölümü yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılından itibaren Gebze Teknik Üniversitesi Kimya Bölümünde Kimya Teknikeri kadrosu ile çalışmaktadır.