

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK ANTİVİRAL ÖZELLİĞE SAHİP 3D
ELEKTROSPUN NANOFİBER FİLTRE ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS

ÖZAY EROĞLU

TEMMUZ 2023
MUĞLA

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK ANTİVİRAL ÖZELLİĞE SAHİP 3D
ELEKTROSPUN NANOFİBER FİLTRE ÜRETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖZAY EROĞLU

TEMMUZ 2023
MUĞLA

MUGLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEZ ONAYI

Prof. Dr. HÜLYA KARA SUBAŞAT danışmanlığında **ÖZAY EROĞLU** tarafından hazırlanan “**YÜKSEK ANTİVİRAL ÖZELLİĞE SAHİP 3D ELEKTROSPUN NANOFİBER FİLTRE ÜRETİMİ**” başlıklı tez çalışmasının, 07/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Enerji Anabilim Dalı’nda yüksek lisans derecesi için gerekli şartları sağladığı oybirliği ile kabul edilmiştir.

TEZ SINAV JURİSİ

Doç. Dr. Görkem OYLUMLUOĞLU (Jüri Başkanı)

İmza:

Fizik Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Prof. Dr. Hülya Kara SUBAŞAT (Danışman)

İmza:

Enerji Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Doç. Dr. Elif GÜNGÖR (Üye)

İmza:

Atom ve Molekül Fiziği Anabilim Dalı,
Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir

ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞI ONAYI

Prof. Dr. Hülya KARA SUBAŞAT

İmza:

Enerji Ana Bilim Dalı Başkanı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Prof. Dr. Hülya KARA SUBAŞAT (Danışman)

İmza:

Enerji Ana Bilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

Savunma Tarihi: 07/07/2023

Tez çalışmamda elde ettiğim ve sunduğum tüm doküman, bilgi, belge ve sonuçların bizzat tarafımdan ve bu tez çalışması kapsamında elde edildiğini; akademik ve bilimsel etik kurallarına tam uygun olduğunu beyan ederim. Bilimsel ve akademik etik kuralları gereği tez çalışması sırasında başkalarına ait tüm orijinal bilgi ve sonuçlara atıf yapıldığını da beyan ederim.

Özay EROĞLU

07/07/2023

ÖZET

YÜKSEK ANTİVİRAL ÖZELLİĞE SAHİP 3D ELEKTROSPUN NANOFİBER FİLTRE ÜRETİMİ

Özay EROĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hülya Kara Subaşı

Temmuz 2023, 96 sayfa

Dünya atmosferinde, insan ve doğa sağlığı üzerinde olumsuz etkilere neden olan önemli sorunlardan biri olan hava kirliliği, içerisinde “partikül madde” (PM) olarak isimlendirilen farklı partikül boyutlarında çok fazla miktarda endüstriyel tozlar, polenler, bakteriler, solunabilen parçacıklar, çeşitli dumanlar ve virüsler gibi kirleticiler barındırmaktadır. Bu kirleticilerden kaynaklanan solunum yolu hastalıkları, yüksek tansiyon, kanser ve cilt tahrişi gibi önemli hastalıklar meydana gelerek, kirliliğe bağlı olarak ölüm oranları artmaktadır. Ölüm oranı artışının en önemli nedenlerinden biri de havadaki kirleticilerden kaynaklanan kirlilik ve virüslerin ince partiküllere tutulmasıyla solunum yolu hastalıklarını daha hızlı tetiklemesidir. Yapılan bir araştırmanın sonucuna göre her yıl dünyada 3.2 milyondan fazla insanın PM_{2.5} gibi zararlı maddelerden dolayı hayatını kaybettiği ortaya çıkmıştır. Türkiye’de de hava kirleticileri ve PM_{2.5} nedeniyle ölüm oranları yüksektir. Dolayısıyla hava kirliliği nedeniyle virüsleri taşıyan PM 2.5 gibi zararlı maddelerden kaynaklanan hastalık ve ölümleri minimuma indirmenin en etkili yollarından biri havayı filtreleyerek, hava kalitesini arttırmaktır. Günümüzde aktif olarak kullanılan ticari hava filtreleri, yıkanabilirlik, geri dönüşebilirlik, düşük hava basıncı, yüksek dayanıklılık, yüksek uzaklaştırma etkinliği ve yüksek hava geçirgenliği gibi başlıca özellikleri üretim sırasında oluşan dezavantajlardan dolayı yeterince karşılayamamaktadır. Hava filtrelerinin PM ve virüs uzaklaştırma etkinliğini artırma yollarından biri, nanofiber membran olarak da adlandırılan nano boyutlu fiberlere sahip membran filtreler kullanmaktır. Nanofiberler, yüksek geçirgenlik, düşük ağırlık, küçük gözenekler ve yıkanabilirlik gibi mükemmel özellikler gösterdiği için filtreleri güçlendirmede önemli avantajlara sahiptir. Kullanılacak nanofibere bağlı olarak, hava filtresinin mekanik, antiviral, filtrasyon ve bir çok özellik ile geliştirilmesi sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, toksik içeriği olmayan ve geri dönüşüm özelliğine sahip *Polivinil Alkol (PVA)*, *Kitosan (CS)*, *Politetrafloroetilen (PTFE)* ve *Polivinilidenfloridin (PVDF)* polimerlerinden oluşan üç katmanlı (PTFE@PVA/PVDF@Kitosan/PTFE@PVA) nanofiber hava filtresi elektroegirme

yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen nanofiber yüzeyler, hava geçirgenlik özelliği ve filtrasyon verimliliği bakımından test edilmiştir.

Bilgimiz dahilinde literatürde yer almayan ve ticari olarak bulunmayan yeni nanofiber tabanlı üç katmanlı (PTFE@PVA/PVDF@Kitosan/PTFE@PVA) hava filtresi ilk kez üretilmiştir. Yeni üç katmanlı hava filtresi formülasyonu ile mekanik ve filtrasyon özelliklerine sahip, çevre dostu nanofiber hava filtresi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu nanofiber hava filtresi ile havada bulunan bir çok zararlı partiküller ve virüsler yakalanabilecek ve hava kirliliğinin neden olduğu hastalıkların oranı düşürülebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Polivinil Alkol, Politetrafloroetilen, Polivinilidenfloridin, Kitosan, Nanolif, Elektroğirme



ABSTRACT

PRODUCTION OF 3D ELECTROSPUN NANOFIBER FILTER WITH HIGH ANTIVIRAL PROPERTIES

Özay EROĞLU

Master Thesis

Institute of Science

Energy Department

Supervisor: Prof. Dr. Hulya Kara Subasat

July 2023, 96 pages

Air pollution, which is one of the important problems that cause negative effects on human and nature health in the world's atmosphere, is caused by large amounts of industrial dust, pollen, bacteria, respirable particles, various fumes and viruses in different particle sizes called "particulate matter" (PM). contains pollutants. Important diseases such as respiratory tract diseases, high blood pressure, cancer and skin irritation caused by these pollutants occur and death rates increase due to pollution. One of the most important reasons for the increase in the death rate is the pollution caused by airborne pollutants and the fact that viruses trigger respiratory diseases faster by keeping them in fine particles. According to the results of a study, it has been revealed that more than 3.2 million people in the world die every year due to harmful substances such as PM_{2.5}. Death rates are also high in Turkey due to air pollutants and PM_{2.5}. Therefore, one of the most effective ways to minimize diseases and deaths caused by harmful substances such as PM_{2.5}, which carries viruses due to air pollution, is to increase air quality by filtering the air. Commercial air filters, which are actively used today, cannot adequately meet the main features such as washability, recyclability, low air pressure, high durability, high removal efficiency and high air permeability due to the disadvantages that occur during production. One of the ways to increase the PM and virus removal efficiency of air filters is to use membrane filters with nano-sized fibers, also called nanofiber membranes. Nanofibers have significant advantages in reinforcing filters as they show excellent properties such as high permeability, low weight, small pores and washability. Depending on the nanofiber to be used, the air filter can be developed with mechanical, antiviral, filtration and many features. In this thesis, a three-layer (PTFE@PVA/PVDF@Chitosan/PTFE@PVA) nanofiber consisting of non-toxic and recyclable Polyvinyl Alcohol (PVA), Chitosan (CS), Polytetrafluoroethylene (PTFE) and Polyvinylidene fluoride (PVDF) polymers was used. The air filter is produced by the electrospinning method. The produced nanofiber surfaces were tested in terms of air permeability and filtration efficiency. To the best of our knowledge, a new nanofiber-based three-layer

(PTFE@PVA/PVDF@Chitosan/PTFE@PVA) air filter, which is not commercially available and not included in the literature, has been produced for the first time. An environmentally friendly nanofiber air filter with mechanical and filtration properties has been developed with a new three-layer air filter formulation. With this developed nanofiber air filter, many harmful particles and viruses in the air can be caught and the rate of diseases caused by air pollution can be reduced.

Keywords: PolyvinylAlcohol, Polytetrafluoroethylene, Polyvinylidene fluoride, Chitosan, Nanofiber, Electrospinning



ÖNSÖZ

Tez çalışmasının her aşamasında yardımlarını esirgemeyen ve deneyimlerini benimle paylaşan çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Hülya KARA SUBAŞAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitimim süresince bilgi, hoşgörü ve güler yüzünü esirgemeyen değerli bölüm hocalarıma saygı ve şükranlarımı sunarım.

Üretilen üç katmanlı hava filtresinin analiz ve ölçümlerini gerçekleştiren Açık Kart Bilgi Teknolojileri Laboratuvarı, Abdullah Gül Üniversitesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi TUAM, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tümleşik Araştırma Merkezleri Malzeme Araştırma Merkezi ile Ege Üniversitesi MATAL Laboratuvarı'na teşekkürlerimi sunarım

Bu tez çalışması Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından (21/121/01/1/1) kod numaralı proje ile desteklenmiştir, teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma ve çalışma esnasında yardım ve desteklerini esirgemeyen Doktora öğrencisi Fatma KURU ALPASLAN'a, Yüksek Lisans öğrencileri Serdar GÖKCE, Kanan ISAZADE, Hanife Şevval DERE'ye ve ismini burada sayamadığım, çalışmalarına katkısı olan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında beni destekleyen, maddi, manevi fedakârlıklar yaparak beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan annem Ayşe EROĞLU'na, babam Üzeyir EROĞLU'na, ablam Öznur EROĞLU'na ve yol arkadaşım İrem YURT'a minnet ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	2
2. TEORİK BİLGİLER	7
2.1. Nanofiberler	7
2.1.1. Nanofiberlerin özellikleri.....	7
2.1.2. Nanofiberlerin elde edildiği malzemeler	8
2.2. Elektroğirme Metodu ile Nanofiber Üretimi.....	9
2.2.1. Elektroğirme metodunun aşamaları	10
2.2.1.1. Damlacık oluşumu.....	11
2.2.1.2 Taylor konisinin oluşumu.....	11
2.2.1.3. Jetin oluşumu	12
2.2.1.4. Kararlı bölgede jetin uzaması.....	13
2.2.1.5. Kararsız bölgenin oluşumu	13
2.2.1.6. Fiber formunda katılaşma.....	15
2.2.2. Elektroğirme metodu kullanılarak üretilen nanofiberlerin üzerine etki eden parametreler	16
2.2.2.1. Kullanılacak çözeltinin özellikleri.....	16
2.2.2.2. Proses parametreleri.....	18
2.2.2.3. Çevresel etkiler.....	20
2.3. Hava Filtrasyonu	21
2.4. Hava Filtrelerinin Özellikleri	23
2.4.1. Filtre performansı	23
2.4.1.1. Partikül tutma verimi	23
2.4.1.2. Basınç kaybı	24
2.4.1.3. Filtreleme ömrü.....	24

2.4.2. Filtrelerin yapısal özellikleri.....	25
2.4.2.1. Fiberlerin çapı	25
2.4.2.2. Fiberlerin yüzey alanı	25
2.4.2.3. Gözeneklilik.....	25
2.4.2.4. Filtre kalınlığı	26
2.4.2.5. Liflerin gramajı	26
2.4.3. Filtrelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri	26
2.4.3.1. Geçirgenlik.....	26
2.4.3.2. Patlama ve kopma-yırtılma mukavemeti.....	26
2.4.3.3. Sıcağa dayanım	27
2.4.3.4. Kimyasal maddelere dayanım	27
2.4.3.5. Aşınma direnci	27
2.5. Hava filtrelerinin sınıflandırılması.....	27
2.5.1. Performansına göre filtrelerin sınıflandırılması.....	28
2.5.2. Yapısına göre filtrelerin sınıflandırılması.....	31
2.5.2.1. Dokuma filtreler	31
2.5.2.2. Keçe filtreler.....	31
2.5.3. Hava filtrelerinin partikül yakalama sistemleri	32
2.5.3.1 Elek Sistemi	32
2.5.3.2. Elektrostatik sistemi	33
2.5.3.3. Atalet sistemi	33
2.5.3.4. Difüzyon sistemi	34
2.5.3.5. Yakalama sistemi.....	35
2.6. Virüslerin Hava Filtrelerinde Yakalanması ve Filtreden Uzaklaştırılması.....	35
2.6.1. Virüsler ve filtre yüzeyleri arasındaki etkileşim.....	36
2.6.2. Virüs filtrasyonu için membran teknolojisi	37
2.6.2.1. Hidrofobik membran.....	38
2.6.3. Su buharı geçirgenliğinin çok katmanlı yapı ile etkileşimi	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM	40
3.1. Kullanılan Materyaller	41
3.1.1. Polimerik membranda kullanılacak olan polimerlerin özellikleri	41
3.2. Polimer Çözeltilerinin Hazırlanması.....	43
3.2.1. PTFE@PVA polimer çözeltisinin hazırlanması	43
3.2.2. PVDF@CS polimer çözeltisinin hazırlanması	43
3.3. Üç Katmanlı Hava Filtresinin Elektroeğirme Metodu ile Üretimi.....	43
3.3.1. PTFE@PVA nanofiber üretimi	46

3.3.2. PVDF@CS nanofiber üretimi.....	47
3.3.3. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA nanofiber filtre malzemesinin üretimi	49
3.4. Üretilen Nanofiberlerin Karakterizasyonu.....	50
3.4.1. Yüzey morfolojisi ve topografisi analizi	50
3.4.2. Gözeneklilik ve gözenek dağılımı analizi.....	51
3.4.3. Hava geçirgenliği ve filtrasyon performansı analizi.....	52
3.4.4. Mekanik dayanıklılık analizi	53
3.4.5. Nem buhar iletim hızı (MVTR) / su buharı geçirgenliği analizi	53
3.4.6. Yüzey temas açısı analizi.....	53
3.4.7. Termogravimetrik analizi	54
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	55
4.1. Yapılan Test ve Analizler.....	55
4.1.1. Yüzey morfolojisi analizleri	55
4.1.2. Gözeneklilik ve gözenek dağılımı analizleri	58
4.1.3. Hava geçirgenliği ve filtrasyon performansı analizi.....	59
4.1.4. Mekanik dayanıklılık analizi	60
4.1.5. Nem buhar iletim hızı (MVTR) / su buharı geçirgenliği	61
4.1.6. Yüzey temas açıcı analizi	62
4.1.7. Termogravimetrik analizi	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Filtrasyon uygulamalarındaki elektroğirme nanofiber kompozit filtreler	3
Çizelge 2.1. EN 779 - 2012 standardında kaba, orta ve ince filtrelerin sınıflandırılması	29
Çizelge 2.2. EN 1822-2009 standardında HEPA filtrelerin sınıflandırılması.....	30
Çizelge 3.1. Birinci katman için belirlenen elektroğirme işleminin parametreleri ..	47
Çizelge 3.2. İkinci katman için belirlenen elektroğirme işleminin parametreleri	48
Çizelge 4.1. Filtre gözeneklilik sonuçları	59
Çizelge 4.2. Hava geçirgenliği ve filtrasyon performansı test sonuçları	59
Çizelge 4.3. Mekanik analiz test sonuçları.....	61
Çizelge 4.4. Üç katmanlı ve iki katmanlı filtrenin nem buhar hızı (MVTR) değerleri	62
Çizelge 4.5. Yüzey temas açısı değerleri	63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Elektroğirme metodunun şeması.....	10
Şekil 2.2. Damlacık oluşumu	11
Şekil 2.3. Taylor konisinin 49.3° ile oluşması. V_c : Kritik voltaj değeri	12
Şekil 2.4. Jetin oluşumu	12
Şekil 2.5. Elektroğirme metodunda kararlı ve kararsız bölge	13
Şekil 2.6. Jet üzerine etki eden kuvvetler.....	15
Şekil 2.7. Nanofiber üretimine etki eden parametreler	16
Şekil 2.8. Havadaki kirlilik kaynakları ve neden olduğu hastalıklar	23
Şekil 2.9. Elek sistemi.....	32
Şekil 2.10. Elektrostatik sistemi.....	33
Şekil 2.11. Atalet sistemi	34
Şekil 2.12. Difüzyon sistemi	34
Şekil 2.13. Yakalama sistemi	35
Şekil 2.14. (a) Farklı boyutlarda partikül, (b) Koronavirüs hastalığı (COVID-19) ...	36
Şekil 2.15. Filtreleme ve virüs uzaklaştırma için polimerlere özgü özellikler.....	37
Şekil 2.16. Su temas açısının optik görüntüsü	38
Şekil 3.1. Elektroğirme metodu.....	40
Şekil 3.2. Kullanılan polimerlerin kimyasal bağ yapıları ve filtre mekanizması.....	42
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan “Spingenix SG1 Elektroğirme Cihazı”	44
Şekil 3.4. Besleme pompası	45
Şekil 3.5. Yüksek voltaj ayar ekranı	46
Şekil 3.6. 20cm x 20cm hareketli toplayıcı plaka	46
Şekil 3.7. Birinci Katmandaki PTFE@PVA nanofiberi	47
Şekil 3.8. İkinci katmandaki PVDF@CS nanofiberi	48
Şekil 3.9. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA nanofiber	49
Şekil 3.10. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA nanofiber filtre.....	50
Şekil 3.11. FESEM cihazı	51
Şekil 3.12. Micromeritics Marka Autopore IV Model Civa Porozimetre.....	51
Şekil 3.13. Filtre medya test sistemi cihazı.....	52
Şekil 3.14. TA Instruments Q800 DMA (Dinamik Mekanik Analiz).....	53
Şekil 3.15 Yüzey Temas Açısı Cihazı.....	54

Şekil 4.1. Üretilen filtre malzemesinde iki katmanlı (PTFE@PVA/PVDF@CS) nanofiberlerin boyutları.....	55
Şekil 4.2. İki katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS çap dapılım grafiği.....	56
Şekil 4.3. İki katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS IMAGE J gözeneklilik görüntüsü	56
Şekil 4.4. Üretilen filtre malzemesinde üç katmanlı (PTFE @ PVA / PVDF @ CS / PTFE @ PVA) nanofiberlerin boyutları	57
Şekil 4.5. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA çap dapılım grafiği	57
Şekil 4.6. İki katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA IMAGE J gözeneklilik görüntüsü.....	58
Şekil 4.7. Nanofiber filtre katmanlarının gerilim-gerinim grafiği	60
Şekil 4.8. Su buharı geçirgenlik grafiği	62
Şekil 4.9. PTFE@PVA/PVDF@CS Yüzey temas açısı	63
Şekil 4.10. PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA Yüzey temas açısı	63
Şekil 4.11. İki katmanlı ve üç katmanlı filtrenin ermogravimetrik grafiği	65

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler:

°C	: Celsius derecesi
%	: Yüzde
dk	: Dakika
sn	: Saniye
g	: Gram
cm	: Santimetre
m^3	: Metreküp
m^2/g	: Gramda metrekare
Kg	: Kilogram
L	: Litre
G	: Gram
g /mol	: Mola gram
ml	: Mililitre
mm	: Milimetre
ml/dak	: Dakikada mililitre
l/dak	: Dakikada litre
cm/s	: Saniyede santimetre
nm	: Nanometre
μm	: Mikrometre
KHz	: Kilohertz
kV	: Kilovolt
Pa	: Paskal
PVA	: Polivinil Alkol
CS	: Kitosan
PU	: Poliüretan
PAN	: Poliakrilonitril
PE	: Polietilen

PP	: Polipropilen
PVDF	: Poliviniliden Florür
PTFE	: Politetrafloroetilen
PVC	: Polivinil Klorür
XPS	: Ekstrüde Polisterin
PMMA	: Polimetil Metakrilat
TPU	: Termoplastik Poliüretan
PI	: Poliimid
PLA	: Polilaktik Asit
PEO	: Polietilen Oksit
PVP	: Polivinilpirolidon
V_a	: Filtre yoğunluğu
V_b	: Fiber yoğunluğu
%e	: Filtrasyon verimi
M_u	: Filtreye giren partikül miktarı
M_d	: Filtrede tutulan partikül miktarı
Δm_t	: Belirli bir zaman aralığındaki kütle artışı
Δm_{UT}	: Toplam kütle artışı
NaCl	: Sodyum Klorür

Kısaltmalar:

HEPA	: Yüksek Etkinlikli Hava Filtresi (High Efficiency Particulate Arresting)
ULPA	: Ultra Küçük Partikül Yakalayan Hava Filtresi (Ultra-Low Particulate Air)
PM	: Partikül madde
EN 1822	: Yüksek Etkinlikli Hava Filtreleri Standardı
MPPS	: Most Penetrating Particle Size En Çok Sızan Parçacık Boyutu
EN 779	: Genel Havalandırma Hava Filtreleri Standartı
STEP	: Spinneret-Based Tunable Engineered Parameters
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
MVTR	: Nem Buhar İletim Hızı

1. GİRİŞ

İnsan yaşamının her bölümünde yer alan Nanoteknoloji, bir çok farklı alanda ve sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Nanoteknolojinin yaygın kullanılmasının altında yatan sebep, bu teknoloji sayesinde üretilen ürünlerin, nano boyut düzeyinde mükemmel kimyasal ve fiziksel özellikler sunmasıdır. Bu teknolojinin en önde gelen uygulamalarından biri nanofiber üretimidir. Çünkü nanofiberler, üretilmek istenilen malzemelerde kullanıldığında, malzemelerin var olan özelliklerini değiştirerek yada yeni özellikler katarak, bir öncekine göre yüksek performans sergileyen yeni ürünlerin oluşmasına olanak sağlar. Nanofiberler, bir mikronun çapından çok daha düşük çapa sahip fiberler olarak belirtilmektedirler. Nanoteknoloji alanındaki nanofiberlerin üretilmesi için farklı metotlar vardır. Bu metotlar; kendiliğinden tutunma metodu, faz ayrımı metodu, şablon sentez metodu, çift bileşenli ekstrüzyon metodu, çekme metodu, eriyik üfleme metodu, eğirmeli bağlama metodu ve elektroegirme metodudur. Tüm bu metotlar içerisinde, nanofiber üretimi için en yaygın kullanılan ve en yüksek güvenliğe sahip olan elektroegirme metodudur. Elektroegirme metodu ile nanofiberlerin üretimini kolay ve fiber özelliklerini değiştirebileceğimiz şekilde gerçekleştirebiliriz (Bhardwaj ve diğerleri, 2010). Elektroegirme metodu 1990 yılından itibaren çok daha yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Bhardwaj ve diğerleri, 2010). Elektroegirme metodu ile üretilen nanofiberler, partikül madde uzaklaştırma etkinliği için kullanılan hava filtreleri alanında da ön plana çıkmıştır (Akduman ve diğerleri, 2018). Çünkü nanofiberler düşük fiber çapı ve gözenek çapı gibi özellikleri sayesinde, hava filtrelerinin verimli çalışması açısından önemli olan dayanıklılık, filtrasyon verimliliği, düşük basınç düşüşü gibi performansı etkileyen özelliklerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesinde büyük bir rol oynamaktadır (Kumar ve diğerleri, 2021). Elde edilen bilgilere göre 1m³ hacime sahip havada 60 milyondan daha fazla partikül madde bulunmaktadır. Bu yüzden partikül maddelerden kaynaklı bir çok farklı hastalık insanlarda kolayca ortaya çıkabilmektedir. Partikül maddelerin yanı sıra, virüs ve bakteriler de partikül maddelere tutunarak insan sağlığını daha hızlı bir şekilde tehdit etmektedir. Bu problemi ortadan kaldırmak ya da etkisini azaltabilmek için

nanofiberler 1mm boyutundan küçük olabilen fiber çaplarıyla havadaki virüs ve partikül maddelerin yakalanmasında oldukça önemli bir rol oynamaktadır (S. Zhang ve diğerleri, 2017).

1.1. Literatür Araştırması

Fiber malzemelerin en ileri noktasında yer alan elektroğirme nanofiberler, ultra ince çaplar (10-1000 nm), geniş ölçüde birbirine bağlı gözenekler, ayarlanabilir bir gözeneklilik ve çeşitli kaynak malzemelerden ölçeklenebilir üretim kolaylığı sergileme avantajlarına sahiptir (Si ve diğerleri, 2014). Bu nanofiberler bu nedenle hava filtrasyonu için yüksek performanslı malzemelerin üretiminde kullanılan yeni nano ölçekli yapı taşı için yüksek bir potansiyel sunar (Si ve diğerleri, 2015). Bu nedenle, poliüretan (PU) (Sambaer ve diğerleri, 2011), polivinil klorür-PU (N. Wang ve diğerleri, 2013), polisülfon (Wan ve diğerleri, 2014), poliakrilonitril (C. Liu ve diğerleri, 2015) ve polimid-66 (N. Wang ve diğerleri, 2012) dahil olmak üzere elektroğirme filtre malzemelerinin geliştirilmesi çok dikkat çekmiştir. Ayrıca, nanofiberlerin elektret etkisini arttıran nanopartiküller aracılığıyla hibritlenen kompozit nanofiberler rapor edilmiştir (Yeom ve diğerleri, 2010). Nanofiberlerin sunmuş olduğu avantajlar nedeniyle filtre uygulamalarının yanı sıra ısı yalıtımında, enerji depolamada, doku mühendisliğinde, yara tedavisinde ve biyomedikal uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Nanofiberlerin sahip olduğu düşük fiber çapları ve çapa bağlı olarak fiberlerin biriktiği alandaki yüksek yüzey alanı gibi ayarlanabilir özellikler, nanofiberleri filtre uygulamalarında istenilen filtre özelliklerini mükemmel derecede karşılamaktadır. Nanofiberler havadaki PM_{2.5} gibi ince partikülleri yakalama konusunda yüksek bir verim sunmaktadır. Ek olarak nanofiberlere virüs ve bakterileri yakalayarak ortadan kaldırmak ya da yıkanabilir bir filtre üretmek gibi bazı uygun malzemeleri kullanarak modifiye edebiliriz. Yapılan bir çalışmada PEO polimeriyle birlikte kitosan polimeri kullanılmış ve elde edilen malzeme yüksek antibakteriyel ve antiviral özellikler kazanmıştır (Desai ve diğerleri, 2009). Filtre üretiminde nanofiberleri kullanarak elde edilen bazı araştırmalar aşağıdaki verilmiştir (Çizelge 1.1.).

Çizelge 1.1. Filtrasyon uygulamalarındaki elektroğirme nanofiber kompozit filtreler

Yayın İsmi	Kullanılan Malzeme ve Teknik	Bulgular	Referans
Efficient removal of water bacteria and viruses using electrospun nanofibers	Bu çalışmada Selüloz-PAN, PVDF ve PET malzemelerinden elektroğirme metodu ile kompozit membran üretilmiştir.	Selüloz ve PAN'dan oluşan kompozit fibröz membranlar elde edilerek (PAN ÇAPI 0,2 µm) ve PET tabakası alt tabaka olarak kullanılarak (30 µm çapında ve 100 µm kalınlığında) oluşturulan nanoyapı E-coli ve MS2 virüsünü %99,9999 tutma oranı ile yakalamıştır. Üçüncü katman bir adsorptif membran olarak 95:05 oranında PAN/bionchar (biyolojik kömür) elektrospinlenmesi ile imal edilmiş ve 5 dk'dan kısa temas süresinde mikroorganizmaların yaklaşık %99'unun, mikro kirleticilerin %83'ünün gidermiş ve bulanıklığın %77'den fazlasını azaltmıştır.	(Fahimirad ve diğerleri, 2021)
Electrostatic charged nanofiber filter for filtering airborne novel coronavirus (COVID-19) and nano-aerosols	Bu çalışmada PVDF polimeri dimetilfomamid ve aseton karışımından oluşan çözücü içinde çözülerek elektroğirme metodu ile PVDF nanofiber üretilmiştir.	PVDF nanofiberler mükemmel morfoloji ile 84-191-349 ve 525 nm fiber çaplarında üretilmişlerdir. Elektrospun PVDF nanofiberler, optimum koşullarda korona deşarjı kullanılarak elektrostatik olarak yüklenmiştir. Korona virüsü negatif yüklü olduğu için tutunma gerçekleşmiştir. Basınç düşüşü artan elyaf çapı ile ters yönde azalmıştır. Çalışmanın amacında olan 100nm COVID-19'u yakalamak için 30Pa'dan az basınç düşüşü ile 100nm'li aerosolün en az %90'ını yakalamak için 30 Pa	(Leung ve diğerleri, 2020)

Çizelge 1.1. (devam)

		düşüş sınırı ile belirlenen verimlilik hedefine ulaşılmıştır. Son olarak çok katmanlı/çok modüllü yaklaşımı kullanarak, %90'ın üzerinde yakalama sağlayan yüksek verimli nanofiber filtreler geliştirilmiştir.	
Electret Polyvinylidene Fluoride Nanofibers Hybridized by Polytetrafluoroethylene Nanoparticles for High-Efficiency Air Filtration	Bu çalışmada PVDF ve PTFE NanoPartikül kullanılarak elektroğirme metodu ile kompozit membran üretilmiştir.	Yük artırıcı olarak PTFE NP'leri PVDF polimerleri ile kompozitleştirilmiştir. PVDF membrana PTFE NP ilave edilerek fiber çapı 622nm'den 380nm'ye düşürülmüştür. Sonuç olarak PVDF/PTFE NP membranlar %99,972 yüksek verimlilik 57 Pa'lık düşük basınç düşüşü ve 0.14 Pa'lık tatmin edici bir kalite faktörü elde etmiştir. Ancak nano partiküllerin konsantrasyonlarının artması ile birbirleriyle yapışarak aglomerasyon (nanoparçacıkların birbirine yapışması) meydana gelmiştir. Bu nedenle fiber çapları 480 nm'ye yükselmiştir.	(S. Wang ve diğerleri, 2016)
Waterproof-breathable PTFE nano- and Microfiber Membrane as High Efficiency PM2.5 Filter	Bu çalışma PTFE ve PVA malzemeleri kullanılarak elektroğirme metodu ile kompozit PTFE/PVA filtre elde edilmiştir.	Hidrofobik olan PTFE malzemesi ile filtrenin su temas açısı ~107°'den ~130°'ye, PM2.5'in filtrasyon verimliliği %44.778'den %98.905'e ve PM7.25'in filtrasyon verimliliği %66.655'ten %100'e yükselmiştir. PTFE mikrofiber substrat üzerinde ince bir PTFE nano fiber membran tabakasının, mikrofiber membranın filtrasyonunu ve su direncini artırabileceği gösterilmiştir.	(Li ve diğerleri, 2019)

Çizelge 1.1. (devam)

Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications	Bu çalışmada PEO ve Kitosan malzemelerinden elektroöğirme metodu ile kompozit membran üretilmiştir.	6 saat temas süresinden sonra chitosan karışım lifleri <i>E. coli</i> cfu'da 2-3 kat azalma göstermiştir. Suda asılı aerosol ve PS boncukları kullanılarak ölçülen nanofibrous filtre medyasının hava ve su filtrasyon verimlilikleri, lifli ortam boyutu ve şekli ile ilişkili yüksek verimlilik göstermiştir. Bununla birlikte, nanofiber tabakası, sonuçları etkileyen PS boncuk filtrasyonu sırasında uygulanan stand basıncı ile mekanik mukavemetten yoksundur.	(Desai ve diğerleri, 2009)
Cleanable Air Filter Transferring Moisture and Effectively Capturing PM2.5	Bu çalışmada PVDF ve PAN polimerleri kullanılarak elektroöğirme metodu ile kompozit membran üretilmiştir.	Burada, nemi hızla aktarabilen ve PM _{2.5} 'yi verimli bir şekilde yakalayabilen temizlenebilir bir hava filtresi, nem buharı için süperhidrofilik poliakrilonitril/silikon-dioksit fiberleri ve yüksek nem altında kılcal su oluşumunu önlemek için itici bileşenler olarak hidrofobik PVDF fiberleri elektroöğirme ile tasarlanmıştır. Sonuçta yüksek PM _{2.5} yakalama (%99,99) düşük basınç düşüşü 86 Pa ve 13612 gm ² d ⁻¹ 'lık nem buhar iletim hızı (MVTR) ile yüksek temizlenebilirlik elde edilmiştir.	(X. Zhao ve diğerleri, 2017)
Washable Multilayer Triboelectric Air Filter for Efficient Particulate Matter PM2.5 Removal	Bu çalışmada PTFE kumaş ve naylon kumaş malzemeleri kullanılarak çok katmanlı hava filtresi üretilmiştir.	PTFE polimeri bu çalışmada naylon ile kompozit oluşturulmuş ve PM'lerin çıkarılması için 5 yıkama döngüsünden geçirilmiş. Yıkamalar sonucunda yakalama verimliliğinin neredeyse hiç değişmediği ve PTFE kumaşının hidrofobik olduğunu ve yüksek	(Bai ve diğerleri, 2018)

Çizelge 1.1. (devam)

		nemli ortamlarda kullanılabileceği belirtilmiştir.	
Transparent Antibacterial Nanofiber Air Filters with Highly Efficient Moisture Resistance for Sustainable Particulate Matter Capture	Bu çalışmada Polidimetilsiloksan (PDMS), poli(metilmetakrilat) (PMMA) ve kitosan polimerleri kullanarak elektroegirme metodu ile kompozit bir filtre üretilmiştir.	Bu çalışmada PDMS/PMMA@kitosan kompozit filtrenin, 45 derecede 10 dakika boyunca deterjanlı suyla kolayca temizlendiği ve süperhidrofilik kitosan liflerinin, gelişmiş temizleme kabiliyetinin rolünü oynadığı ve 5 yıkama döngüsünden sonra %99'un üzerinde yüksek yakalama sonucunun korunduğu belirtilmiştir.	(Hui Liu ve diğerleri, 2019)

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Nanofiberler

Nanofiberler günümüzde teknolojinin gelişmesi ile daha fazla yaygın hale gelen, nano ölçekli malzemelerdir. Nanofiberlerde ölçü birimi 10^{-9} nanometredir. Nanofiberlerin boyutları 100-800 nm arasında olmaktadır. Boyutlarının bu kadar küçük olması ile nanobilim ve nanoteknoloji alanında gelecek vaat eden malzemelerdir. Çünkü nanometre ölçeğinde maddelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri değişir. Bu durum kuantum fiziği ile açıklanmaktadır ve nanofiberlerin küçük boyutlu olmasından kaynaklanır. Örnek olarak gümüşü ele aldığımızda bulk hali ile nano-tanecikli gümüşü karşılaştırdığımızda, bulk hali nano-taneciklerine göre virüsleri öldüremez.

2.1.1. Nanofiberlerin özellikleri

Nanofiberlerin boyutları sayesinde sunmuş olduğu ve en çok yararlanılan özelliği yüzey alanlarının çok yüksek olmasıdır. Bu sayede düşük gözenek çapları ve yüksek gözeneklilik sunabilmektedir. Bunların dışında mekanik özellikleri ve düşük ısı iletkenliği de önemli özellikleri arasında yer almaktadır. Tüm bu özellikleri ile birlikte kullanım alanları değişim gösterir. Bu alanların başında filtre üretimi gelmektedir.

Bir nanofiber filtre üretimi sırasında en önemli parametre, nanofiberlerin çaplarıdır. Çünkü fiber çapı küçük olursa filtrasyon açısından avantaj sunar. Nanofiber üretimi için elektroçirme metodu diğer metotlara göre çözelti ve proses parametrelerini değiştirebilme imkanı sunarak (50-2000nm) geniş bir aralıkta fiber çaplarının üretilmesine imkan sağlar (Bhardwaj ve diğerleri, 2010). Örneğin yapılan bir çalışmada PVDF polimerinden üretilen nanofiberlerin, iç çapının 680 nm'den 410 nm'ye düşürülmesiyle verimlilik %79,89'dan %99,99'a kadar yükseltildiği gözlemlenmiştir (X. Zhao ve diğerleri, 2017). Ek olarak fiber çapları 50-500nm arasında NaCl partiküllerini yakalama konusunda %99'luk verim sağlayacağı belirtilmiştir (Leung ve diğerleri, 2020). Elde edilen elektrospun nanofiber filtreler küçük çap, yüksek özgül yüzey alanı, birbirine bağlı gözenekli yapılar ve kontrol edilebilir morfolojiler gibi çeşitli olağanüstü özelliklere sahiptir (Bhardwaj ve

diğerleri, 2010). Bu olağanüstü özellikler, hava filtrelerine takdire şayan filtreleme performansı ve düşük maliyetle yeni filtrelerin kontrol edilebilir üretimi için yeni bir strateji sağlar. Öte yandan nanofiberlere katkı malzemeleri eklenerek fiberler işlevselleştirilebilir. Çünkü kompozit olmayan, yani tek bileşenli olan nanofiber malzemeler küçük çap, yüksek gözeneklilik gibi filtre malzemeleri açısından uygun olsalar dahi, kimyasal direnç, mekanik mukavemet ve kirlenme önleyici özellikler gibi istenilen yeni özellikler bakımından hala daha eksiktirler (N. Wang ve diğerleri, 2013). Yapılan bir çalışmada PSU polimerinden elde edilen nanofiber malzemeye çözelti esnasında TiO_2 nanopartiküller eklenerek, elde edilen yeni nanofiber malzeme 152 derecelik bir su temas açısı ile sağlam bir hidrofobiklik sergileyerek ultra ince parçacıkları %99,997'lik yüksek uzaklaştırma verimliliği sergilemiştir (Wan ve diğerleri, 2014). Filtrasyon verimliliğinin artmasında önemli olan yüzey alanı ve gözeneklilik nanofiberler sayesinde elde edilebilir. Yapılan bir çalışmada PAN polimerinden elde edilen nanofiber malzemeye çözelti esnasında SiO_2 eklenerek özgül yüzey alanını, gözenekli yapı ile arttırmıştır ve böylelikle PAN/ SiO_2 hibrit filtreler, tek katmanlı filtrelere kıyasla %99,989 gibi yüksek filtrasyon verimliliği sergilemiştir (N. Wang ve diğerleri, 2014).

Filtre performansı açısından, nanofiberlerin mekanik özelliklerinin iyi olma özelliği filtrelere bir avantaj sunmaktadır. Yapılan bir çalışmada PVC polimerinden elde edilen nanofiber malzemeye ek olarak PU polimerinden elde edilen nanofiber malzeme eklenerek var olan mekanik özellik, PVC/PU kompozit polimer bazlı malzeme üretilerek arttırılmıştır (N. Wang ve diğerleri, 2013). Genel olarak nanofiberler kendi özelliklerinin geliştirilmesine, katkı malzemelerinin eklenmesiyle imkan sunabilen malzemelerdir.

2.1.2. Nanofiberlerin elde edildiği malzemeler

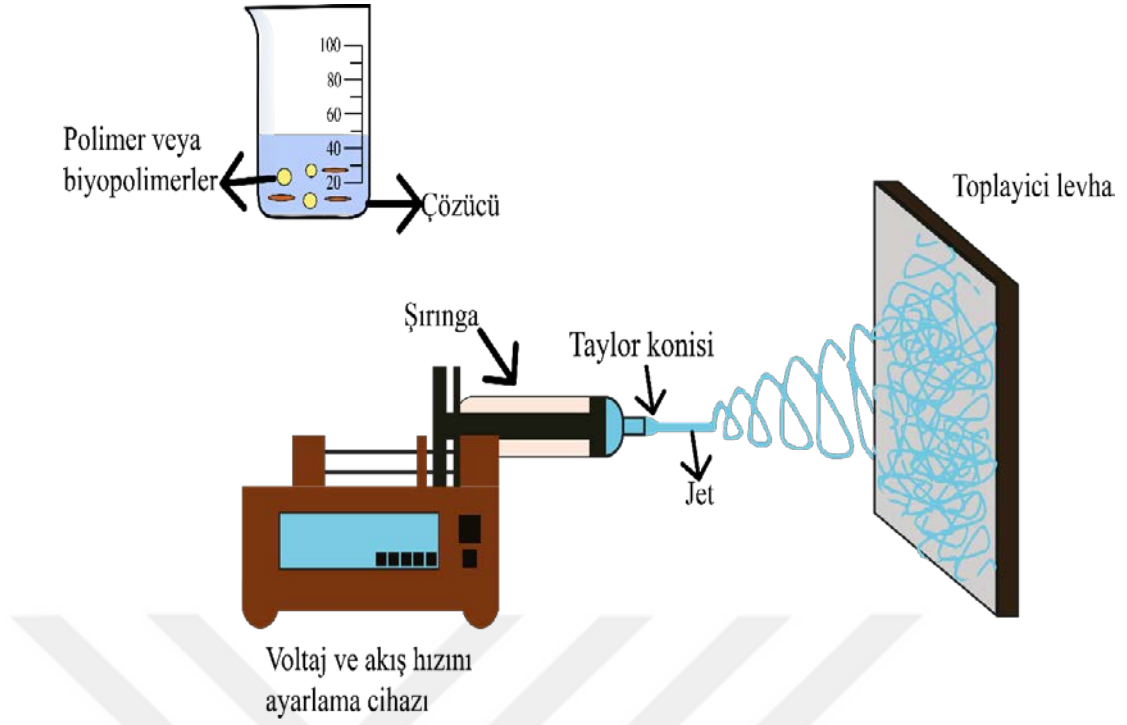
Nanofiberler sentetik polimer veya biyopolimerlerden üretilen, çeşitli ham madde imkanlarına sahiptirler. Bir nanofiber üretimi için öncelikle, kullanılacak olan polimer veya biyopolimer, kullanılacak amaca yönelik belirlenmelidir. Çünkü hem polimerin hem de biyopolimerlerin kullanım alanlarına göre kendi içlerindeki her bir malzemenin farklı farklı özellikleri vardır. Nanofiber üretimi için sıklıkla kullanılan sentetik polimerlerden bazıları PAN, PMMA, PE, PP, PVC, PS, TPU, PI gibi sentetik

polimerlerdir. Biyopolimerden bazıları ise kitosan, jelatin, aljinat, lignin ve selüloz gibi biyopolimerlerdir.

2.2. Elektroeğirme Metodu ile Nanofiber Üretimi

Elektroeğirme metodu, polimer ve biyopolimerlerden hazırlanan çözeltilere yüksek gerilim vererek nanofiber üretme metodudur. Bunun için Şekil 2.1.'de de gösterildiği gibi elektroeğirme metodunda kullanılan şırınganın içine çözelti eklenir ve sonrasında şırınga ucu elektrik alana maruz bırakılır. Bu metot sayesinde 2 nm ile birkaç μm arasında değişen farklı çaplarda nanofiberler üretilmektedir (Bhardwaj ve diğerleri, 2010). Elektroeğirme metodunun tarihi ilk olarak 1897 yılına dayanmaktadır. Metodun ortaya çıkışı, Rayleigh'in yapmış olduğu araştırmalar ile bilinmektedir. Rayleigh sonrasında elektroeğirme metodundaki en önemli gelişmeler bilim insanı Taylor tarafından gerçekleştirilmiştir. Taylor elektriklenmiş sıvılar üzerine yapmış olduğu çalışmalar ile, gelecekteki bu metot alanındaki tüm çalışmalara ön ayak olmuştur. Taylor yapmış olduğu teorisinde, elektriksel alana maruz kalan sıvılardan nanofiberlerin oluşmasını, sıvı yüzeyindeki elektriksel kuvvetlerin oluşturmuş olduğu kararsızlıklardan dolayı olduğunu göstermiştir. Metodun gerçekleşme aşamasında, şırınga içindeki çözeltinin şırınga ucundaki iğne ucundan çıktığı anda, iğne ucunda ince uzun bir jet oluşmadan hemen önce bir koni oluşturmaktadır. Oluşan bu koni literatürde Taylor konisi olarak tanımlanmıştır. Elektroeğirme metodunun doğru bir şekilde gerçekleşmesi için bu koninin oluşması ve gözlemlenmesi gereklidir.

Metodun kelime anlamına baktığımızda, Elektroeğirme terimi “electro-static spinning” olan İngilizce kelimenin kısaltmasıdır ve 1994 yılından beri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak kelime kökeninin daha eskilere dayandığını ifade eden bir çok bilim insanı vardır. Elektroeğirme alanındaki ilk patent, 1934 yılında bu metod ile selüloz asetattan tekstil iplerini üreten Antonin Formhals tarafından alınmıştır (Bhardwaj ve diğerleri, 2010).



Şekil 2.1 Elektroeğirme metodunun şeması

Nanofiber üretim metotları arasında en yaygın kullanılan metodun elektroeğirme metodu olmasının nedeni, daha kullanışlı, pratik ve verimli olmasıdır. Bu metot ile nanofiberler küçük çaplı, küçük gözenekli ve iyi mekanik özellikler sergilemesi için ayarlanabilir şekilde üretilabilmektedir. Bu sayede farklı alanlarda kullanılmak üzere, çeşitli özellikler sergileyen nanofiberler, bir çok kullanım alanı için farklı avantajlar sunmaktadır (Si ve diğerleri, 2014).

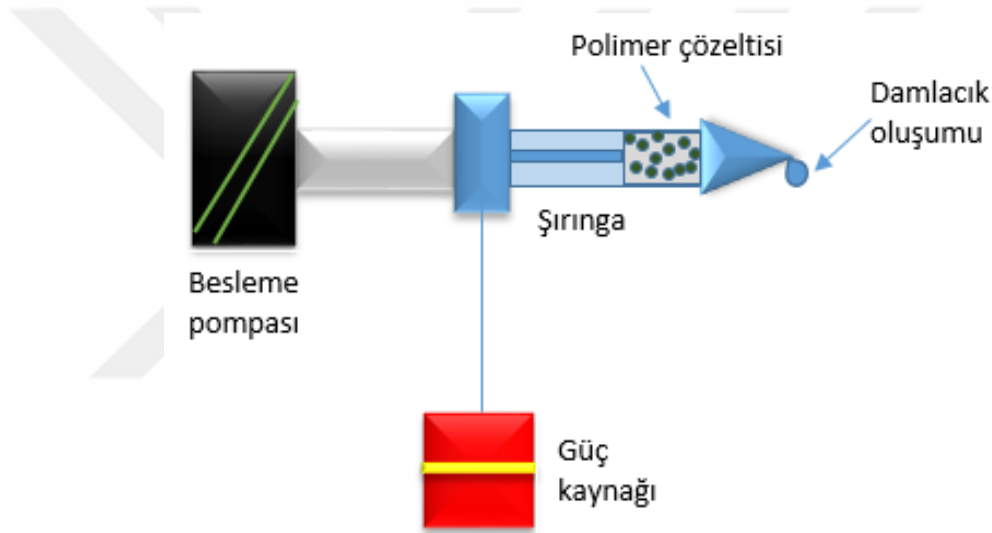
2.2.1. Elektroeğirme metodunun aşamaları

Elektroeğirme metodunun aşamaları sırasıyla aşağıdaki gibidir.

- Damlacık oluşması
- Taylor konisinin oluşması
- Jetin oluşması
- Kararlı bölgede jetin uzaması
- Kararsız bölge oluşması
- Fiberlerin sıvı fazdan katı faza geçerek katılaşması

2.2.1.1. Damlacık oluşumu

Elektroeğirme sürecindeki ilk gözlemlenen aşama damlacık oluşumudur. Damlacık oluşumunun gözlemlenmesinden önce hazırlanan solüsyon, şırınga içine konularak, pompaya yerleştirilir. Elektroeğirme prosesinin 3 ana temel kısmından olan pompa sayesinde (diğerleri voltaj miktarı ve iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafe) fiber çekimi esnasında belirlenmiş olan akış/besleme hızı ayarlanmaktadır. Daha sonrasında pompa hareket ettirilerek polimer, çözücü ve diğer malzemeler eklenerek hazırlanmış olan solüsyon iğne ucuna kadar iletilmiş olur (Şekil 2.2.). Bu esnada iğne ucunda elektrik alan etkisi olmazken, yer çekimi kuvveti ve sıvı yüzey gerilim kuvveti etkisi altında bir damlacık oluşumu gözlemlenir (Andrady, 2005).

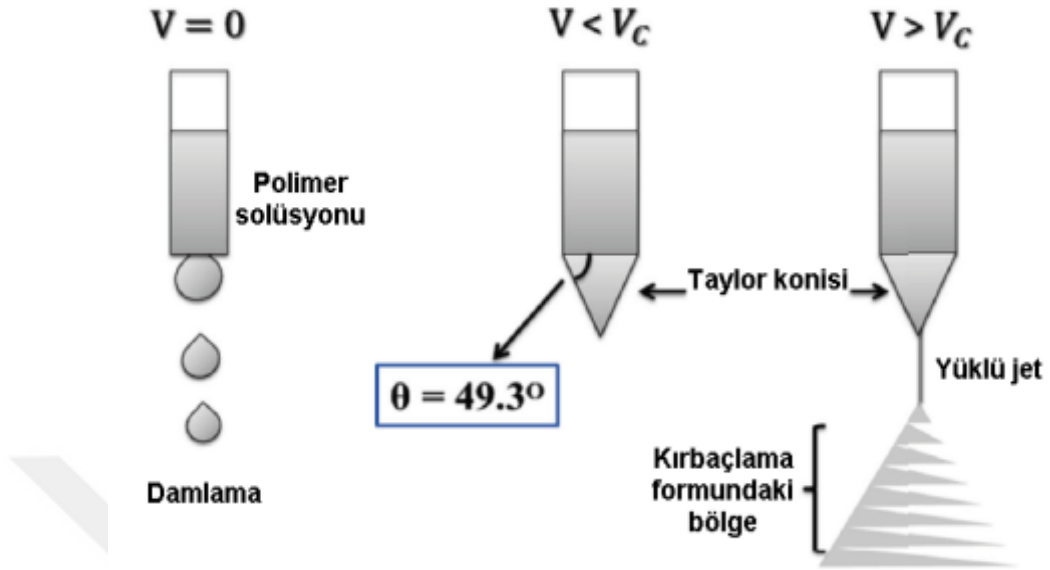


Şekil 2.2. Damlacık oluşumu

2.2.1.2 Taylor konisinin oluşumu

İğne ucunda damlacık oluşuktan sonra Taylor konisi oluşmaya başlar. Damlacık oluştuğu esnada iğne ucuna uygulanan voltaj değeri sıfır olduğundan, voltaj değeri arttırılmaya başlanır. Bir süre sonra taylor konisinin oluşumu için Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi uygun olan kritik voltaj değerine ulaşıldığı anda, elektrik yüklü alan içindeki elektriksel kuvvetler damlacığın yüzey gerilimine ve maruz kaldığı yer çekimi kuvvetlerine eşitlenerek taylor konisini oluşturur. Damlacığın koni şeklini alması buradaki elektriksel alan sayesinde olmaktadır. Taylor konisinin açısı 49.3° kadardır (Larrondo ve diğerleri, 1981). Ancak kullanılan malzemeye, çözeltiliye ve polimere

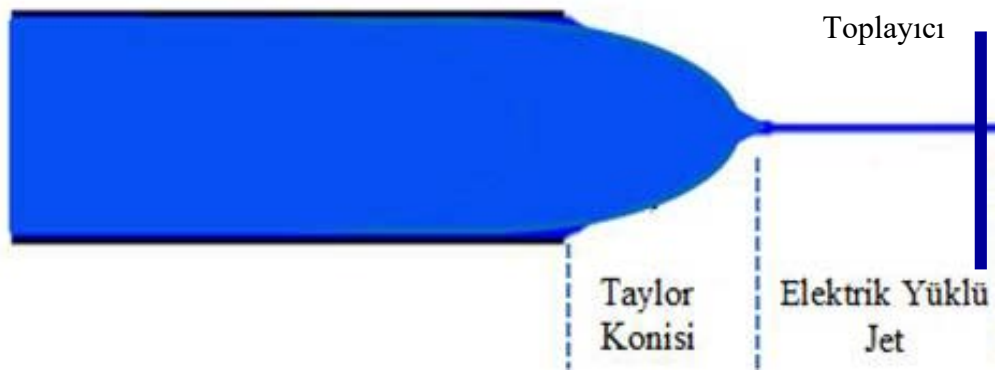
göre koninin oluşmasını sağlayan kritik voltaj değeri değişiklik göstermektedir (Taylor ve diğerleri, 1969).



Şekil 2.3. Taylor konisinin 49.3° ile oluşması. V_c : Kritik voltaj değeri

2.2.1.3. Jetin oluşumu

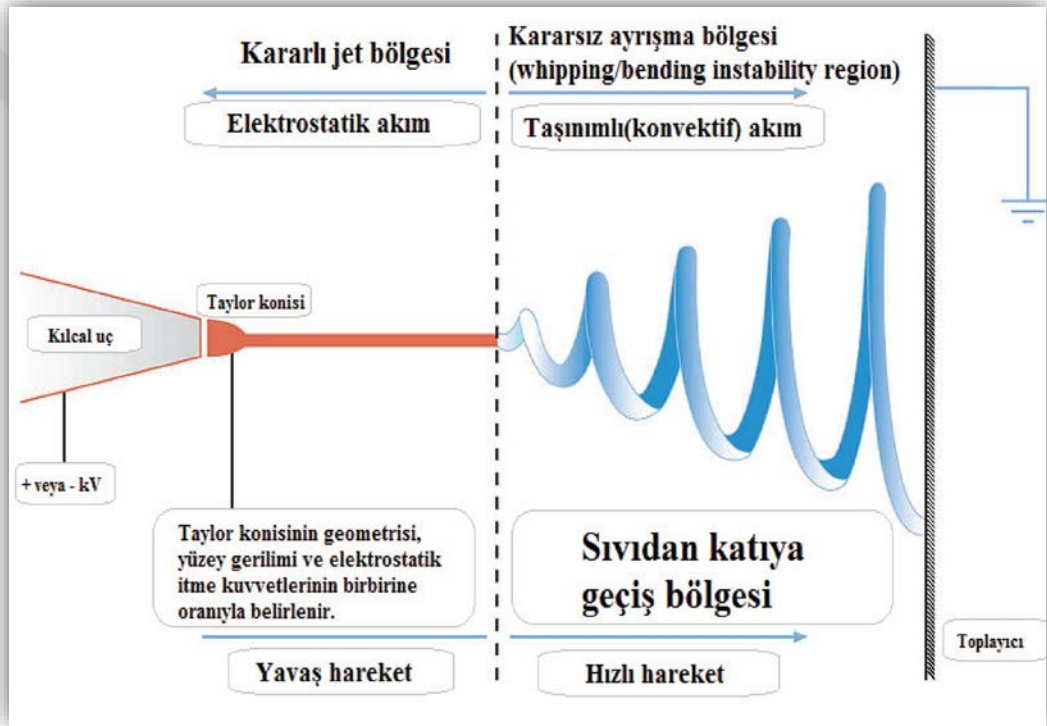
Damlacık oluşumu ile taylor konisi oluşuktan sonra, toplayıcı ile iğne ucu arasında, taylor konisinden itibaren bir jet oluşumu meydana gelir (Şekil 2.4.). Jetin kendi kararlılığını devam ettirebilmesi için, en uygun proses parametrelerinin belirlenmesi gerekir (Taylor ve diğerleri, 1969).



Şekil 2.4. Jetin oluşumu

2.2.1.4. Kararlı bölgede jetin uzaması

Toplayıcı ile iğne arasındaki bölge kararlı ve kararsız bölge olarak ikiye ayrılır. Kararlı bölge iğne ucunu kapsayan bölgedir. Jet bu bölgede oluştuktan sonra jetin kararlılığını sürdürebilmesi için Coloumb itme kuvvetleri ile jet toplayıcıya doğru uzamaya devam eder (Şekil 2.5.). Jet Taylor konisinden uzaklaştıkça, toplayıcıdaki elektriksel çekim nedeniyle, toplayıcıya yaklaştıkça jetin hızı artar (Bunyan ve diğerleri, 2006). Jet hızlandıkça toplayıcıya doğru kararlı bir çizgisel yol izler. Daha sonra ortamdaki voltaj sebebiyle çözücü buharlaşması meydana gelerek, jet çapında ve jet hızında azalma görünür.



Şekil 2.5. Elektroeğirme metodunda kararlı ve kararsız bölge

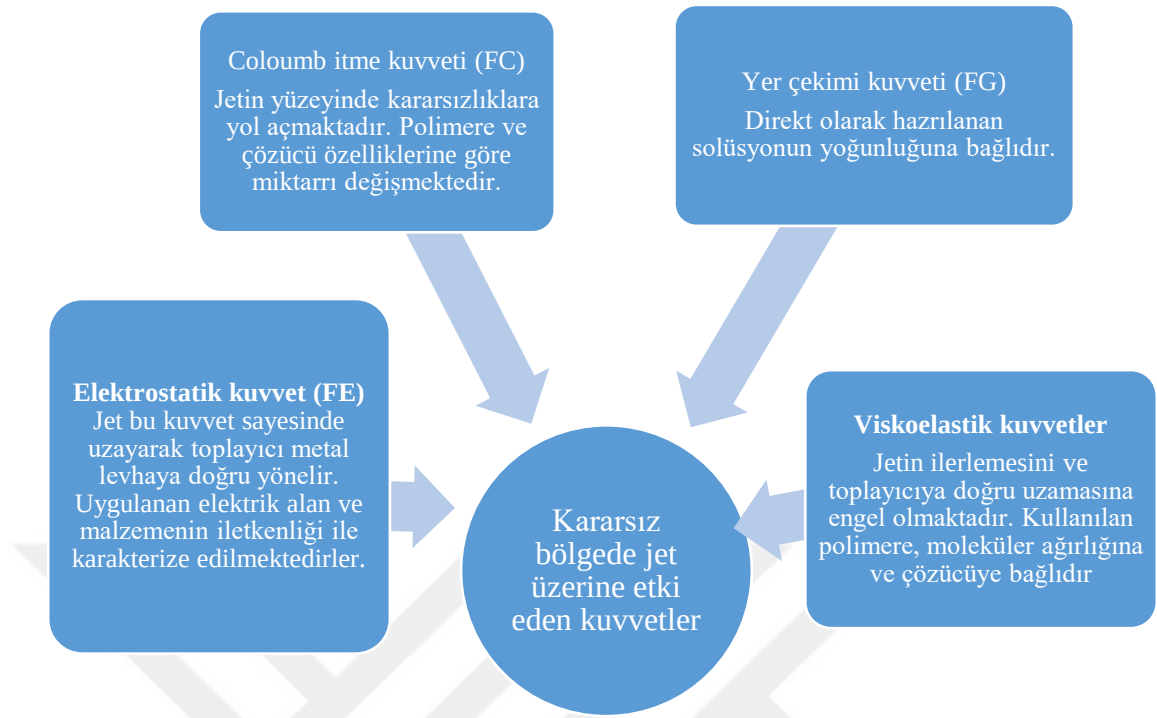
2.2.1.5. Kararsız bölgenin oluşumu

Toplayıcı ile iğne arasındaki 2 bölgeden diğeri ise kararsız bölgedir. Kararsız bölge toplayıcıyı kapsayan bölgedir. Jet kararlı bölgeden sonra, izlemiş olduğu çizgisel yoldan saparak kararsız bölgeye girer. Böylelikle whipping kararsızlığı olarak da bilinen kararsız bölge oluşmuş olur (Şekil 2.5.). Kararsız bölge için 3 farklı kararsızlık vardır. Bu farklılıklar polimerin özelliklerine, çözeltilerin özelliklerine ve proses

parametrelerine göre değişiklik göstermektedir. Öte yandan kararsızlık tipleri farklı olsalar dahi her üçü de proses esnasında aynı anda meydana gelebilir. Kararsız bölgedeki kararsızlıklar aşağıdakilerdir:

- Whipping kararsızlığı
- Rayleigh kararsızlığı
- Eksenel simetrik elektrik alan akımı

Kararsız bölgedeki gözlemlenen bu 3 kararsızlık türünden en fazla gözlemlenen whipping kararsızlığıdır. Kararsız bölgenin oluşmasında jetin önemi oldukça büyüktür. Jet içinde proses esnasında burkulmalar meydana gelmektedir ve bu da whipping oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Buradaki burkulma olayı, jet üzerine etki eden yüklerin bir arada olmamaları ve bu yüzden de birbirlerini itmeleri sebebiyle oluşmaktadır. Jet toplayıcıya yaklaştıkça hızında azalma meydana geldiğinden burkulmalar da artmaktadır. Prosesteeki iğne ucu ile toplayıcı arasındaki önemli bir parametre olan mesafe değiştikçe jetin uzunluğu da doğru orantılı olacak şekilde değişmektedir. Bu durumun sebebi, jet üzerindeki radyal olan yüklerin birbirlerini itmesiyle jetin merkezinden ayrılmak istemesidir (Jia ve diğeri, 2002). Hem kararlı hem de kararsız bölgede polimer çözeltisine etki eden kuvvetler vardır. Kararsız bölgedeki jete etki eden kuvvetler bazen jet oluşumundan önceki damlacık oluşumunu etkilerken, bazen de direkt olarak jet ve damlacık oluşumunu destekler niteliktedir. Kararlı bölgede oluşmaya başlayan jet üzerine, kararsız bölgede etki eden kuvvetler şekil 2.6.'da belirtilmiştir.



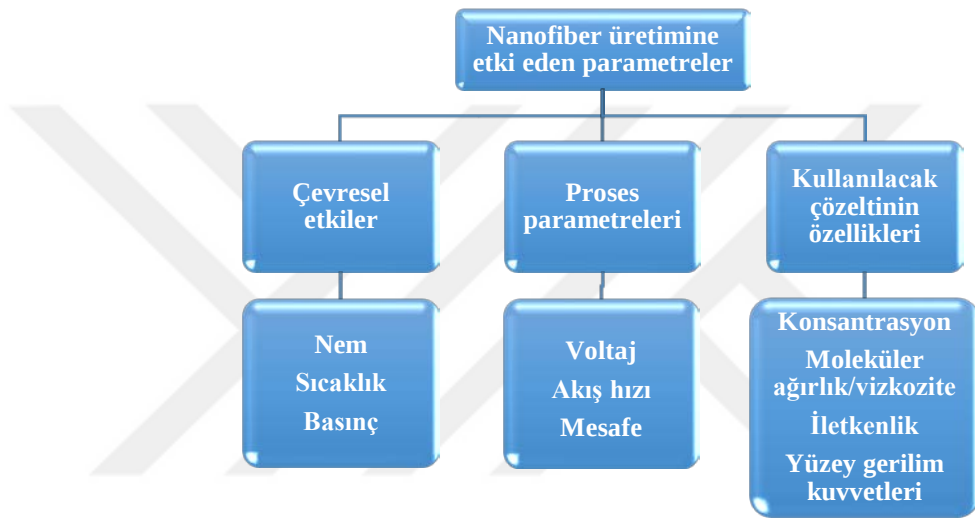
Şekil 2.6. Jet üzerine etki eden kuvvetler

2.2.1.6. Fiber formunda katılaşma

Fiber formunda katılaşma olayı toplayıcı bölgesindeki kararsız bölgede gerçekleşmeye başlar. Bu bölgedeki jet üzerine etki eden kuvvetlerde artış meydana gelir. Bu artış ile jet kütlesi artarak solüsyon içindeki çözücü buharlaşmaya başlar. Çözücü buharlaştıkça, sıvı halde olan solüsyon katı bir hale geçmeye başlar, yani sıvı halden katı hale bir geçiş söz konusudur. Burada çözelti buharlaşma süresi, oluşan fiberlerin kalınlığına etki edebilmektedir. Örneğin buharlaşma süresi çok düşük olursa kalın fiberler meydana gelecektir (Andrady, 2005). Çözücünün buharlaşmasını etkileyen iki tane önemli durum söz konusudur. Bunlardan biri buharlaşmanın artan voltaj değeri ile doğru orantılı olarak artması, diğeri ise iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafenin uzunluğudur. Uzun bir mesafe söz konusu olduğunda, jetin maruz kalacağı elektrik alan da genişleyeceğinden, jet içindeki çözücünün yeteri sürede uçmasına olanak sağlanır. Sonuç olarak yüksek elektrik alana maruz kalan çözeltideki çözücünün buharlaşması ile sıvı fazdan katı faza geçiş tamamlanmış olup, toplayıcı üzerinde katı hale gelmiş nanofiberler oluşmaktadır.

2.2.2. Elektroğirme metodu kullanılarak üretilen nanofiberlerin üzerine etki eden parametreler

Elektroğirme metodu ile nanometre boyutlarında geliştirilebilir özelliklere sahip malzemeler üretilmektedir. Bu üretimler esnasında, üretilen malzemenin üzerinde istediğimiz gelişimleri tamamlayabilmek için başlıca bazı önemli parametrelere dikkat edilmesi gerekir (Pillay ve diğerleri, 2013). Parametreleri incelediğimizde 3 başlık dikkat çekmektedir. Bunlar; çevresel etkiler, proses parametreleri ve kullanılacak olan çözeltinin özellikleridir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Nanofiber üretimine etki eden parametreler

2.2.2.1. Kullanılacak çözeltinin özellikleri

Elektroğirme işlemin yapılabilmesi için ilk önce kullanılacak olan çözelti hazırlanır. Proses sonrasında üretilecek olan nanofiberlerin özelliklerini etkileyen bu çözeltinin ilk hazırlanma aşaması oldukça önemlidir. Hazırlama esnasında çözeltiye etki eden kuvvetler şunlardır; konsantrasyon, molekül ağırlık yani viskozite, iletkenlik ve yüzey gerilim kuvvetleridir. Bu kuvvetleri göz önünde bulundurarak çözelti hazırlayıp, proses sonucunda üretilen katı haldeki nanofiberleri istediğimiz düzeyde oluşturma şansımız artmaktadır.

- Konsantrasyon: Moleküler ağırlık ve viskozite ile bağlantılı olan konsantrasyon fiber oluşumunu etkileyen çözelti parametrelerinden biridir.

Konsantrasyon düşük olması durumunda mikro ve nano boyutlu polimerik partiküller üretilmektedir. Ancak viskozitenin düşük olması ve jet üzerindeki yüksek yüzey gerilimi nedeniyle proses sonunda toplayıcı üzerinde fiber oluşumunun oluşmadığı, bunun yerine elektro spre yay oluşumu meydana geldiği görülebilir. Eğer konsantrasyon biraz daha yükseltilir ise pürüzlü bir fiber karışımı elde edilecektir. Konsantrasyon değerinin en uygun olduğu esnada ise sürekli olacak şekilde pürüzsüz bir fiber karışımı elde edilecektir (Ramakrishna ve diğerleri, 2005). Konsantrasyon değeri çok yüksek ise nano boyutlu fiberler gözlemlenmek yerine helix şekilli mikro ribbonlar gözlenecektir.

- **Moleküler ağırlık:** Moleküler ağırlık oluşan fiberin yapısını etkileyebilecek en önemli kısımlardan biridir. Eğer moleküler ağırlık düşük ise pürüzlü bir fiber oluşumu meydana gelmektedir. Moleküler ağırlık yüksek olduğunda ise elde edilen fiberlerin ortalama fiber çapının büyük olduğu gözlemlenmektedir. Moleküler ağırlık demek çözeltideki kullanılan polimerin polimer zincirlerinin birbiriyle bağlanma sayısı yani viskozitesi demektir (Ramakrishna ve diğerleri, 2005). Viskozite az olursa damlacık oluşumunda akışkanlık oldukça yüksek olur, ancak viskozite yüksek olursa damlacık oluşumu daha stabil bir şekilde gözlemlenebilir. Yani elektroğirme işlemi sırasında viskozite büyük bir öneme sahiptir. Viskozitenin düşük olması durumunda sürekli olacak şekilde fiber üretimi gözlemlenemez. Öte yandan çok fazla yüksek viskoziteye sahip olan çözelti, jetin oluşumuna engel olur (Haiqing Liu ve diğerleri, 2004). Sonuç olarak çözeltinin viskozitesi, moleküler ağırlığı ve konsantrasyonu proses içerisinde birbiriyle bağlantılıdır.
- **İletkenlik:** Çözeltinin iletkenliği proses esnasında kullandığımız voltajdan dolayı prosesin doğru bir şekilde ilerlemesi açısından en önemli koşullardan biridir. Damlacık oluşumundan sonra gözlemlediğimiz jet için iletkenlik oldukça önemlidir. Eğer hazırladığımız çözelti olması gerektiği kadar iletken değilse kararlı bölgede jet oluşumu gözlenmez. Bu nedenle sıvı halden katı fazla geçebilecek bir jet oluşmadığı için katı formda bir fiber oluşumu sağlanamaz. Kullanılması istenen malzeme hazırlandıktan sonra eğer iletkenlik yeteri kadar iyi değilse çözeltiye tuz ilave edilerek iletkenlik artırılabilir. Öte yandan iletkenliğin düşük olmasının yanı sıra iletkenliğin çok yüksek olması

da fiber oluşumu açısından dezavantajlar barındırır. Örneğin iletkenlik yüksek olduğu zaman iğne ucundaki Taylor konisinin oluşmasını engelleyebilir. İletkenliğin optimum düzeyde gerekli miktarda olması ile fiber yüzeyleri pürüzsüz olacak şekilde ince fiberler üretebilme imkânı sağlanır (Zong ve diğerleri, 2002). Ayrıca iletkenliğin yeteri kadar yüksek olması demek proses esnasında kullanılması gereken voltaj değerinin de düşük olması demektir. Bu durum daha az elektrik yükü kullanılarak fiberin oluşması anlamına gelmektedir.

- Yüzey gerilim kuvvetleri: Yüzey gerilimi çözücünden kaynaklanan önemli bir fonksiyondur ve bu yüzden elektro eğirme prosesinde de önemli bir role sahiptir. Eğer çözeltinin yüzey gerilimi düşük ise toplayıcı da toplanan fiberler pürüzsüz bir yapıya sahip olur. Yüzey gerilimi hazırlanan çözeltiye bağlı olarak değişiklikler gösterir. Tam tersi olarak da çözeltinin yüzey gerilimi yüksek ise kararlı bölgedeki jetin kararsız olmasına, dolayısıyla damlacıkların oluşmasına neden olur. Etanol gibi çözücüler düşük bir yüzey gerilimine sahiptir, bu nedenle pürüzsüz fiberlerin oluşumunu teşvik etmek için eklenebilir (Lukáš ve diğerleri, 2009). Hazırlanan çözeltinin viskozitesini değiştirebileceğimiz gibi yüzey gerilimini de solüsyon karışımının kütle oranını ve yapısını değiştirerek değiştirebiliriz.

2.2.2.2. Proses parametreleri

Solüsyon hazırlandıktan sonra üretim için elektroegirme prosesine geçilir. Çözelti parametrelerinden sonra burada ise proses parametreleri oldukça önemlidir. Proses parametreleri incelendiği zaman voltaj, şırınga ile toplayıcı arası mesafe ve akış hızı oldukça önemlidir. Öte yandan proses içindeki parametreler hazırlamış olduğumuz polimer ve solüsyona bağlı olarak değişiklikler gösterir. Elektroegirme metodu sırasında kullanılacak proses parametreleri, kullandığımız polimerin referans bilgilerine göre belirlendiği gibi aynı zamanda deneme yanılma yoluyla da stabil hale getirilebilir.

- Voltaj: Elektroegirme prosesinin ilk aşaması voltajdır. Şırınga ucunda damlacık oluşuktan sonra taylor konisinin oluşması için yüksek voltaj, çözelti üzerinde gerekli yükleri indükleyerek kritik voltaj değerine ulaşılması gerekir.

Bu yüzden voltaj oldukça önemlidir. Çözeltinin akış hızına bağlı olacak şekilde, Taylor konisinin kararlı olabilmesi için daha yüksek bir voltaj gerekebilir. Uygulanan voltaj çok yüksek ise, daha fazla yük miktarından dolayı jetin daha hızlı hızlanmasına neden olacaktır. Dolayısıyla iğne ucundan daha fazla hacimde çözelti çekilecek ve daha küçük, daha az kararlı bir Taylor konisi oluşacaktır (Pillay ve diğerleri, 2013). Çözeltinin metal toplayıcıya çekilmesi esnasında, akış hızı daha hızlı olduğunda Taylor konisi iğneye doğru geri çekilebilir (Zong ve diğerleri, 2002).

- Akış hızı: Akış hızı jetin hızını, kolaylıkla sürecin tamamlanma hızını belirler. Hızın artması ile fiberlerin toplayıcı üzerinde toplanma hızını etkileyen önemli bir parametredir. Proses esnasında akış hızı düşük tutulursa, çözelti toplayıcı ile iğne ucunda daha uzun süre kalacağı için, buharlaşma süresi de artmış olur (Yuan ve diğerleri, 2004). Akış hızı düşük tutulduğu zaman, toplayıcıda toplanan fiberlerin fiber yapısı iyi ve düzenli olur. Fiberlerin çapları ve gözeneklilikleri dikkate alındığında ise her ikisi de akış hızı ile doğru orantılıdır. Öte yandan akış hızı çok yüksek olur ise, çözücü buharlaşmak için gerekli zamana sahip olamayacağı için fiberler toplayıcıya ıslak bir şekilde yani boncuklu bir şekilde toplanır.
- Mesafe: Elektroegirme yönteminde mesafe parametresi, iğne ile toplayıcı arasındaki bölgeyi ifade eder. Mesafenin artması ya da azalması ile fiberlerin morfolojisi ve fiber çapı etkilenmektedir. Mesafenin fazla olduğu durumlarda fiberlerin çapında bir azalma gözlenir (Ayutsede ve diğerleri, 2005). Çözeltinin akış hızının düşük tutulması buharlaşma süresini etkilediği gibi mesafe parametresi de buharlaşma süresini etkilemektedir. Mesafe artması buharlaşmaya olanak sağlarken, mesafenin düşük olması buharlaşmaya imkan vermemektedir. Eğer mesafe çok fazla olur ise bu sefer de fiberlerin katı bir şekilde toplayıcıya ulaşması zorlaşır. Mesafenin az olması da buharlaşma imkanı sunmadığından, boncuklu yapıya sahip fiberlerin toplayıcıda toplanmasına neden olur. Boncuksuz bir fiber toplanabilmesi için mesafenin optimal ayarlanması gerekir (Jarusuwannapoom ve diğerleri, 2005). Eğer fiber birikimi gözlemlenmiyor ise bunun nedeni mesafenin çok daha fazla olmasıdır (S. Zhao ve diğerleri, 2004). Mesafe parametresinin fiber çapı ve fiber

morfolojisi üzerindeki etkisi, diğer sistem parametrelerinin etkisinden daha azdır (Drosou ve diğerleri, 2018).

2.2.2.3. Çevresel etkiler

Fiberlerin oluşumu esnasında fiberler üzerine etki eden çevresel parametreler nem, sıcaklık ve basınçtır. Çevresel etkilerden kaynaklanan sorunlardan kaçınmak için tüm sorunların minimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Çünkü çevresel etkiler toplayıcıda toplanan fiberlerin morfolojisini ve çapını etkilemektedir (Huan ve diğerleri, 2015).

- Nem: Sıcaklık ve basınç parametrelerine göre elektroğirme üzerindeki etkisi en fazla olan çevresel parametredir. Ortamdaki nemin yüksek olması direk olarak fiberlerin morfolojisine etki etmektedir. Eğer çözelti içinde yüksek uçucu bir çözücü var ise bu etki daha da artmaktadır (Megelski ve diğerleri, 2002). Fiber morfolojisinin yanı sıra nemin yüksek oluşu, fiber çapını arttırmaktadır. Dolayısıyla fiberlerin gözenekliliğinde de etkisi bulunmaktadır (Casper ve diğerleri, 2004).
- Sıcaklık: Çevresel etkilerde sıcaklık iki çeşit olarak karşımıza çıkmaktadır. İlki prosesin gerçekleştiği ortamın sıcaklığı, diğeri ise çözeltinin sıcaklığıdır. Sıcaklığın artması ile çözücünün buharlaşma hızı artarken, çözeltinin sıcaklığının artmasıyla da çözeltinin vizkozitesinde düşme meydana gelmektedir. Vizkozitenin düşmesi ile birlikte daha ince fiberler elde edilebilmektedir (Mit-Uppatham ve diğerleri, 2004).
- Basınç: Basınç parametresi, elektroğirme prosesini kapalı bir ortamda etkilemektedir. Nem ve sıcaklığın aksine basınç parametresinin etkisi proses sonrasında değil, proses esnasında gözlemlenmektedir. Eğer proses ortamındaki basınç değeri atmosfer basıncından düşük ise elektroğime prosesine olumsuz bir etki yaratmaktadır (Ramakrishna ve diğerleri, 2005). Çünkü basınç düşük olursa kararlı bir jetin oluşmasının aksine kararlı olmayan bir jetin oluşmasına neden olur.

2.3. Hava Filtrasyonu

Şehirlerde yaşayan toplulukların çoğunluğu, günlük yaşamlarında zamanlarının yaklaşık olarak %80-90'ını işyerleri, evler, alışveriş merkezleri ve ulaşım araçları gibi kapalı ortamlarda geçirmektedirler. Bu durum zamanlarının çoğunu kapalı ortamlarda geçiren insanların çalışma verimliliklerini ve sağlıklarını hava kalitesi nedeniyle etkileyebilmektedir. Öte yandan çevresel hava kirliliği içme suyundan nefes alabildiğimiz havaya kadar hayatımızı etkilemektedir. Tüm bu durumlar dikkate alındığında hava kirliliğinden kaynaklanan olumsuz durumların önüne geçebilmek için, teknolojiden yararlanmak kaçınılmazdır. Teknolojinin getirdiği avantajların yanı sıra getirdiği kirlilik zararından kurtulmak için de filtrasyon teknolojisini kullanabiliriz. Filtrasyon, sıvı ve gaz gibi akışkanların içindeki değerli maddelerin veya istenmeyen partikül maddelerin süzülmesinde kullanılan bir süreçtir. Örneğin hava filtrelerinde havanın içindeki partikül, polen, sigara dumanı, kötü koku gibi istenmeyen maddeler uzaklaştırılarak temiz hava elde edilir.

Partikül maddelerin ve gazlı kirleticilerin boyutları ve kimyasal yapıları farklılık gösterebilmektedir. Partikül maddeler 3 farklı grupta, boyutlarına göre sınıflandırabiliriz. Bunlar; PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{0.1}$ 'dir. PM_{10} . Boyutundan dolayı $PM_{2.5}$ ve $PM_{0.1}$ 'e göre kaba bir partiküldür. Boyutu yaklaşık olarak 2.5 ila 10 μm arasında değişmektedir. $PM_{2.5}$ ise PM_{10} 'dan sonra gelen ince partikül olarak bilinen ve boyut olarak yaklaşık 0.1 ile 2.5 μm arasında olan partikül maddedir. $PM_{0.1}$ ise diğer ikisine göre kıyaslandığında boyut olarak ultraince partiküllerdir. $PM_{0.1}$ boyutu 0.1 μm 'den küçüktür. PM filtrelerini gaz filtrelerinden farklı kılan özellikleri daha ince, gözenekli ve hafif olmalarıdır (Brown, 2001).

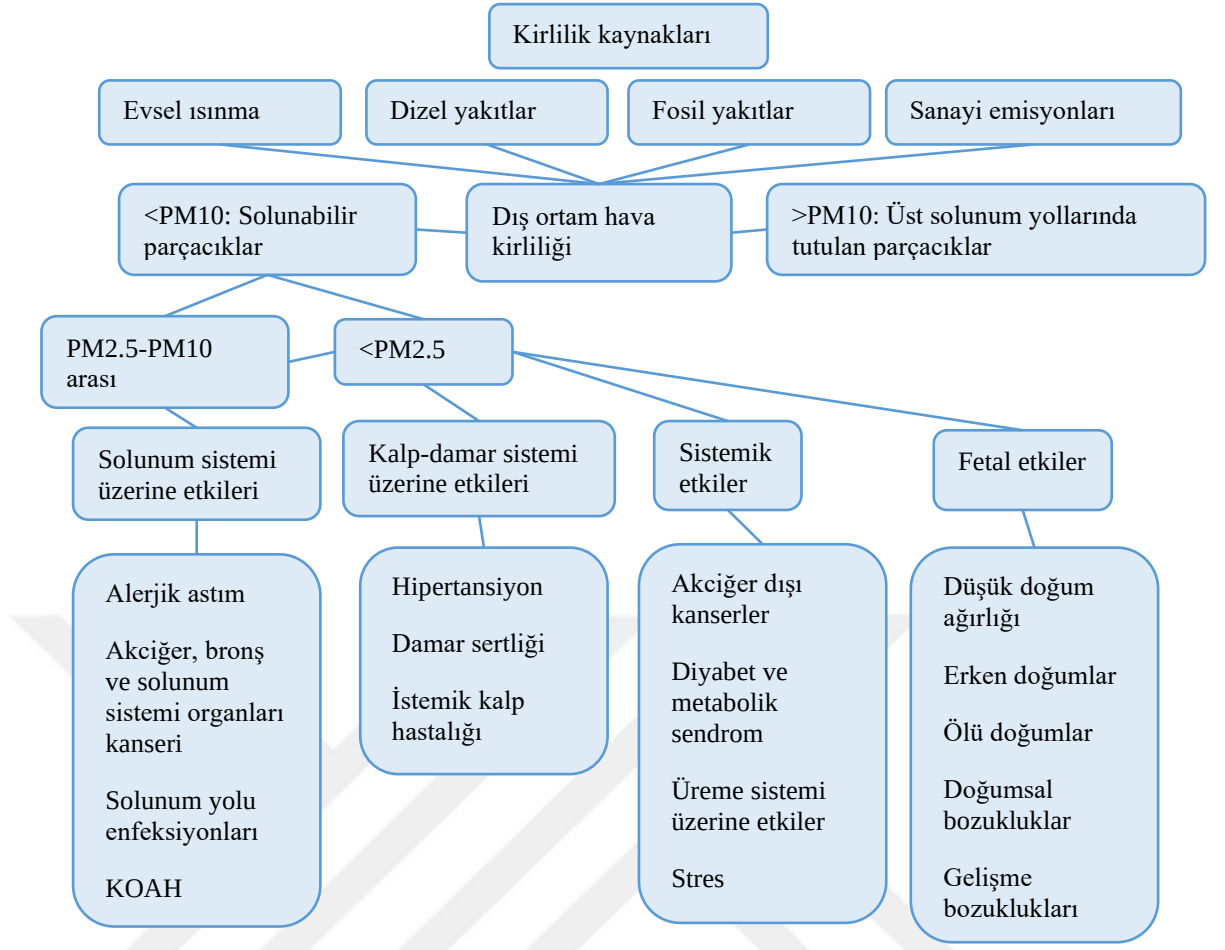
Filtrasyonun teknoloji ile birlikte çok farklı alanlarda kullanılması, onu geleceğin belki de en önemli proseslerinden biri kılabilir. Hava filtrasyonu, filtrasyon türlerinin en önemlilerinden biridir. Çevresel kirliliklerden oluşan hastalıkların artması bu önemi daha da arttırmaktadır. Bunun en dikkat çeken örneklerinden biri de 2020 yılında dünya çapında etkisini gösteren COVID-19 pandemisidir. Yüksek verimli hava filtrelerinin kullanılması hem sağlık çalışanları hem de hasta yakınları için hayati bir öneme sahiptir. Aynı zamanda hava filtresi sağlık, ev, iş yerlerinin yanı sıra taşıtlar için de büyük bir öneme sahiptir.

Partikül maddeler (PM) hava içerisinde bulunan bir çok farklı kirleticiden oluşur ve cilt tahrişi, astım, yüksek tansiyon, doğum kusurları ve kanser gibi bir çok çeşit hastalığın kaynağı olabilmektedir (Cohen ve diğerleri, 2005). Partikül maddeler açık ve kapalı alanlardaki havanın kirlenmesine neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda kapalı alanlardaki hava kirliliği, açık alanlardaki hava kirliliğinden 2 ile 5 kat daha fazla olduğunu ortaya koymuştur (Fedel, 2012). Çünkü kapalı ortamlardaki hava sirkülasyonu açık ortama göre daha azdır. Kapalı alanlardaki kirletici kaynaklar, yemek pişirilmesi, sigara dumanı gibi kaynaklardır (Bernstein ve diğerleri, 2004). Açık alanlardaki kirletici kaynaklar ise taşıtlardan çıkan egzoz dumanları ve fabrikalardan çıkan emisyonlardır.

Açık ve kapalı ortamlardaki ideal bir hava filtresi tüm kirlilikleri çok düşük basınç farkı oluşturarak ortadan kaldırmalı, bunu yaparken de çok fazla sayıda partikül tutma kapasitesine ve düşük maliyete sahip olmalıdır. İdeale yaklaşım 3 önemli parametre ile mümkündür (Selbes, 2013).

- 1) Havanın vizkozite, sıcaklık ve kimyasal özelliği
- 2) Kirliliğin boyutu ve konsantrasyonu
- 3) Filtrenin filtre etkinliği, akış direnci, filtre ömrü ve filtre boyutu açısından performansı

Filtrenin ilk amacı kirlilikleri tutmaktır. Eğer bu kirlilikler partikül ise partiküllerin boyut dağılımları önemlidir. Büyük partiküller polenler, sporlar, büyük bakteriler ve tozlar olarak sınıflandırılabilir. Küçük partiküller ise virüs ve sigara dumanı gibi sınıflandırılır. Havadaki kirleticilerin kaynakları, ortaya çıktıkları ortam, kimyasal bileşimi ve boyutu olarak sınıflandırılması önemlidir (Selbes, 2013). Havadaki kirliliği oluşturan kirlilik kaynakları ve neden olduğu hastalıklar şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Havadaki kirlilik kaynakları ve neden olduğu hastalıklar

2.4. Hava Filtrelerinin Özellikleri

Hava filtreleri özellik olarak filtre performansı, filtrenin yapısı, filtrenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini barındırır.

2.4.1. Filtre performansı

Hava filtrelerinin performans özellikleri üç kısımda incelenmektedir.

2.4.1.1. Partikül tutma verimi

Filtrede yakalanan kirliliğin filtreye giren kirliliğe oranıdır. Partikül tutma verimi havanın hızına, partikülün boyutuna, fiberin çapına, fiberin gramajına, filtre

kalınlığına, filtrenin gözenek boyutuna ve homojenik bir dağılıma bağlıdır. Partikül tutma verimi denklem 1' e göre belirlenir.

$$\%e = 100 \left(\frac{M_u - M_d}{M_u} \right) \quad (\text{Denklem 1})$$

%e - Filtrasyon verimi

M_u- Filtrenin içine giren partikül madde miktarı

M_d- Filtre ile tutulan partikül madde miktarı

2.4.1.2. Basınç kaybı

Filtre çalışmaya başladıktan sonra ulaşılacak en yüksek basınç kaybı değerine, mümkün olduğunca en uzun zamanda ulaşılması istenir. Bu özellik filtrenin çalışma ömrünü etkiler. Gözenek çaplarının fazla düşük olması basınç kaybını arttırır. Eğer filtrasyon verimi de çok yüksek olursa basınç kaybı artar (Yang ve diğerleri, 2010).

2.4.1.3. Filtreleme ömrü

Filtrenin kullanım ömrüne etki eder. Filtrenin partikül maddeleri yakalama kapasitesi ne kadar yüksek ise filtrenin ömrü de o kadar yüksektir. Filtrenin kapasitesi, filtrenin ömrünü tamamladığı andaki kütle artışındaki değişiklik ile belirlenir ve denklem 2'ye göre hesaplanır.

$$\Delta m_t = \frac{t_1}{t_T} \Delta m_{UT} \quad (\text{Denklem 2})$$

Δm_t – Zamana bağlı kütle artışı

t₁ –Toplam zaman

t_T – Deneyin sonunda toplam zaman

Δm_{UT} – Deney sonu toplam kütle miktarı

2.4.2. Filtrelerin yapısal özellikleri

Filtrenin yapısal özellikleri beş kısımda incelenmektedir.

2.4.2.1. Fiberlerin çapı

Fiberler filtrenin temel yapı elemanıdır. fiber çapı azaldıkça birim alandaki fiber miktarı artar ve gözenek sayısı azalarak partikül maddenin filtre için alacağı yol karmaşık hale gelir. Filtrenin yüzey alanının artması sayesinde gözenek sayısı azalması ile partikül maddelerin yakalanma ihtimali artar (Vaughn ve diğerleri, 2002). Ancak fiber çapı düşük olursa basınç kaybı yükselebilmektedir. Bu da filtrasyon verimini düşürür. Bu yüzden filtre performansının yüksek olması isteniliyor ise en uygun fiber çapı belirlenmelidir.

2.4.2.2. Fiberlerin yüzey alanı

Fiberlerin yüzey alanı filtrasyon performansı açısından önemlidir. Birim hacimdeki fiber yüzey alanı artışı fiber sayısının artmasına ve partikül maddelerin fiber ile çarpışma ihtimalini artırır (Vaughn ve diğerleri, 2002). Bu durumda fiberlerin yerleşimi de önemli bir konudur. Fiberlerin gözenek sayısını azaltacak şekilde yerleşmesi performansı arttıracaktır.

2.4.2.3. Gözeneklilik

Birim hacim filtrenin içindeki boş olan hacim miktarını ifade eder ve birimsizdir (Frank, 2004). Yani filtre içindeki boş alanların toplam hacminin, filtredeki toplam hacmine hacimce oranıdır. Fiberler ne kadar ince olur ne kadar sık dizilirse yoğunluğu o kadar fazla artar ve geçirgenliği azalır ve filtrasyon verimliliği artar. Aşağıdaki denklem 3'deki gibi hesaplanmaktadır (Epps ve diğerleri, y.y.).

$$V = 100 - \frac{V_a}{V_b} \quad (\text{Denklem 3})$$

V_a -Filtre yoğunluğu

V_b -Fiber yoğunluğu

2.4.2.4. Filtre kalınlığı

Filtre kalınlığı fiber çapına ve oluşum şekline bağlıdır. Örneğin dokuma filtreler, keçelere göre daha incedir. Filtre kalınlığının yüksek olması efektif filtreleme alanının arttırdığı için, bu durum filtreleme performansı için istenilen bir durumdur.

2.4.2.5. Liflerin gramajı

Gramaj filtrenin birim alanına düşen ağırlık olarak tanımlanır. Ağırlık fiberin çapı ve kullanılan fiberin yoğunluğu ile bağlantılıdır. Fiberin apı azaldıkça gözenek boyutu küçüldüğünden dolayı gramaj da artar. Filtre kalınlığının azalması gramaj ile ters orantılıdır. Eğer bir filtrenin gramajı yüksek ise o filtrelerin geçirgenliği de düşük olur.

2.4.3. Filtrelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Filtrelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri beş kısımda incelenmektedir.

2.4.3.1. Geçirgenlik

Havanın filtreden geçiş durumunun kolaylığını etkileyen bir parametredir. Örneğin gözenek miktarı artar ise havanın filtreden geçişi daha kolay olur ve geçirgenlik artar. Gözeneklilik fiberin çap kalınlığı ve filtrenin toplam kalınlığı ile ilişkilidir. Dolayısıyla geçirgenlik değeri fiber çapının güçlü bir bağlantısıdır.

2.4.3.2. Patlama ve kopma-yırtılma mukavemeti

Filtre kullanım esnasında hava akım kuvvetlerine ve filtreyi çevreleyen filtre aparatları tarafından uygulanan bazı kuvvetlere maruz kalır. Maruz kaldığı kuvvetlere dayanması beklenir. Filtre maruz kaldığı kuvvetlere bir süre dayanıp zamanla kopabilir, yırtılabilir ve üzerinde delikler oluşabilir. Bu yüzden filtrelerle katkı malzemeleri eklenerek, bazı kompozitleştirmeler yapıp, dayanıklılıkları artırılabilir.

2.4.3.3. Sıcağa dayanım

Filtrelerin sıcağa dayanımını, fiberi oluşturan malzemelerin ısıya karşı göstermiş olduğu özellikler belirler. Filtrelerin sıcaklık aralıkları, sentetik fiberlere göre 10-150 derece arasında değişir. Bunun için gaz filtrelerinde yüksek sıcaklık dayanımlı malzemeler tercih edilir.

2.4.3.4. Kimyasal maddelere dayanım

Filtrelerin fiziksel olarak dayanıklı olmasının yanı sıra, kimyasal olarak da kimyasal maddelere karşı dayanıklı olabilmesi istenir. Filtre malzemesinin çalışması sırasında, filtreden süzmüş olduğu partikül maddelerle kimyasal yönden etkilenmemesi gerekir. Filtrelerde tutulan maddelerin filtreye kimyasal yönden zarar vermemesi için bu husus dikkate alınarak kimyasallara karşı dayanıklı fiberlerin kullanılması gerekir. Hava filtrasyonunda seçilen filtreler genel olarak kimyasal tehditlerle karşı karşıya kalmadıklarından dolayı, filtrede kullanılan fiber malzemelerinin seçim yelpazesi geniştir.

2.4.3.5. Aşınma direnci

Filtrelerin çalışması esnasında bazı sürtünme kuvvetleri filtre üzerinde etkili olur. Bu kuvvetler bir süre sonra filtreyi aşındırır ve filtre üzerinde açılmalar meydana gelir. Bu yüzden filtrenin performansının düşmemesi için bu filtrelerin değiştirilmesi gerekir ya da aşınmaya karşı dirençli filtreler tercih edilmelidir.

2.5. Hava filtrelerinin sınıflandırılması

Hava filtrelerini sınıflandırırken, filtrelerin sunmuş olduğu filtre performansına, filtrelerin yapılarına ve filtrelerin yakalama mekanizmalarına göre bir sınıflandırma yapılmaktadır. Bir filtrenin filtreleme performansını arttırmak için filtreye elektrik akımı verilir ise elektrostatik filtre, virüs ve mikropların ortadan kaldırılmasını için virüs ve mikropları öldüren katkı maddeleri eklenmiş olan filtre ise antimikrobiyal/antiviral filtre, ya da ortamdaki istenmeyen koku moleküllerinin

uzaklaştırılması isteniliyorsa özellikle aktif karbon gibi katkı malzemeleriyle katkılanmış filtreler ise havadaki kokuları ayıran filtre olarak filtreleri sınıflandırma başlığı altında başlıca örnek verilebilir.

2.5.1. Performansına göre filtrelerin sınıflandırılması

Filtreleri performans açısından sınıflandırabilmek için, performans testleri yapılması gerekir. Performans testlerinin hava filtreleri açısından belli standartlara uyumlu olması istenmektedir. Bu standartlar CEN tarafından hazırlanmış ve EN 1822 ve EN 779 standartlarıdır. EN 779 ve EN 1822 genel havalandırma için parçacık hava filtrelerini kapsar. Bu filtreler, standarttaki deney prosedüründe ölçülen performanslarına göre sınıflandırılırlar. Bu standart parçacık hava filtrelerinde olması gereken özellikleri ihtiva eder. Filtre performansının ölçülmesinde kullanılan deney donanımını ve deney metotlarını tarif eder.

CEN standartlarının yanı sıra ABD'nin hazırlamış olduğu standartlar da vardır. Filtreler üzerinde yapılmış olan ilk hava filtresi standardı 1968 yılında American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) tarafından yayınlanmış ve sürekli olarak da güncellenmiştir.

Hava filtrelerinin testlerinden önce, öncelikle filtrelerdeki çekim kuvvetlerinin yok edilmesi amacıyla, dizel sisi kullanılarak fiberlerdeki elektrostatik çekim etkisi giderilir (Gustavsson, 2003). Yüksek etkinlikli hava filtreleri standardı (EN 1822) ve genel havalandırma için partikül hava filtreleri standardı (EN 779) Avrupa standartları olarak kabul görmüştür. EN 779 aralıkları çizelge 2.1.'de ve EN 1822 aralıkları çizelge 2.2.' de belirtilmiştir (Bulgurcu, 2015).

Çizelge 2.1. EN 779 - 2012 standardında kaba, orta ve ince filtrelerin sınıflandırılması

Partikül madde grupları	Sınıf	$\Delta P_{\max}$ (Pa)	% A_m	% E_m	% En düşük Verim
Kaba	G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-	
	G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-	
	G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-	
	G4	250	$A_m \leq 90$	-	
Orta	M5	450	-	$40 \leq E_m < 60$	-
	M6	450	-	$60 \leq E_m < 80$	-
İnce	F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$	35
	F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$	55
	F9	450	-	$95 \leq E_m$	70

En 779'un 2012 yılında yayımlanan partikül madde tutma testlerindeki sentetik partikül maddelerin 0,2 ile 3 μm arasındaki boyutları, 0,944 m^3/h debi ile akan havanın içine gönderilir. Partikül maddeler birim hacim başına 70 gr olacak şekilde karıştırılır. Daha sonra deney başladığı gibi partikül tutma verimi ve basınç kayıpları hesaplanır. Partikül madde tutma verimi tutulan partikül maddelerin miktarı ölçülerek hesaplanır (Selbes, 2013).

Basınç kaybının ölçülmesi ise kaba filtreler için 250 Pa, orta ve ince filtreler için ise 450 Pa olana kadar deney sürdürülür. Yakalanan partikül maddelerin miktarı ise, deney bittikten sonra filtre ağırlığı tartılarak bulunur.

Filtrenin kaba filtre olduğunu tespit etmek için, tutulan partikül maddenin miktarının, filtreye gönderilen partikül maddenin ağırlığına oranı yapıldığında çıkan sonucun 0,9'dan düşük veya eşit olup olmadığına bakılır. Eğer çıkan sonuç 0,9'dan büyük ise filtre, orta veya ince filtre olarak sınıflandırılır. Çizelge 2.1.'de gösterildiği gibi bu oran A_m olarak isimlendirilir ve A_m 'nin miktarına göre çizelgedeki sınıflandırılma yapılır.

Orta ve ince filtrelerin için optik tanecik sayısı belirlenir. Bunun için hava filtresinin içine gönderilen lazer ışınları, partikül maddelere çarparak yönünü değiştirir ve yönü değişen ışınlar bir reflektör yardımı ile toplanarak veriler elde edilir. Bu veriler sayesinde partikül maddelerin boyutu ve konumları tespit edilebilmektedir. Orta ve ince filtrelerdeki partikül maddelerin (0,4 μm çap) tutulmasının verimi optik tanecik sayısının ölçülmesiyle belirlenir. Bu ölçüm E_m olarak adlandırılır. Orta kaliteli bir filtre olduğu E_m miktarının $0,4 \leq E_m < 0,8$ aralığında olması ile belirlenir ve M5 veya M6

filtre olarak sınıflandırılır (Selbes, 2013). Eğer bu miktar $E_m \geq 0,8$ ise bu sefer de filtre ince filtre olarak sınıflandırılır. Çizelge 2.2.'deki en düşük verim ise filtrasyon sürecinin başındaki ve test süresi boyunca tutulan partikül verimidir. Test edilen filtrenin verimleri çizelgedeki hem E_m veriminden hem de en düşük verimden düşük olamaz.

Çizelge 2.2. EN 1822-2009 standardında HEPA filtrelerin sınıflandırılması

Filtrenin sınıfı	En Fazla Sızan Parçacık Boyutunun Verimi (%)		En Fazla Sızan Parçacık Boyutunun Geçirgenliği	
	Filtrenin Bütün Verimi	Bölgesel Verim	Filtrenin Bütün Verimi	Bölgesel Verim
E10	≥ 85	-	15	-
E11	≥ 95	-	5	-
E12	≥ 99.5	-	0.5	-
H13	≥ 99.95	99,75	0.05	0.25
H14	≥ 99.995	99.975	0.005	0.025
U15	≥ 99.9995	99.9975	0.0005	0.0025
U16	≥ 99.99995	99.99975	0.00005	0.00025
U17	≥ 99.999995	99.9999	0.000005	0.000025

Ultra küçük partikül maddeleri yakalayan filtrelerin sınıflandırılması EN 1822 standardı esas alınmaktadır. Bu standart kapsamında hava filtreleri etkin partikül yakalayan filtre (Efficiency Particulate Filter (EPA)), Yüksek verimli partikül yakalayan filtre (High Efficiency Particulate Filter (HEPA)) ve Ultra düşük partikül yakalayan (Ultra Level Particulate Air Filter (ULPA)) filtreleridir. Çizelge 2.2.' de ifade edilen sızıntı terimi, filtrelerin yakalayamadığı yani sızan partikül maddelerin miktarını belirtmektedir. Optik okuyucu sayesinde filtrenin tüm kısımlarındaki ve bölgesel kısımlardaki partikül maddelerin taranması ile de filtrenin en düşük verimi belirlenmektedir.

EN 1822 standardı kapsamında yapılan test sırasında, en çok nüfuz eden partikül boyut (Most Penetrating Particle Size (MPPS)) olarak belirtilen ve boyutları 0,1 ile 0,3 μm arasında değişen partikül maddeler kullanılır. Test için, filtreye giren ve filtreden çıkan partikül maddelerin miktarları bölgesel olarak ayrı ayrı belirlenir. Bu sayede bölgesel olarak partikül madde tutma verimi ölçülür. Bu şekilde bölgesel ölçümler yapılarak en sonunda filtrenin tümünün partikül tutma verimi ölçülür. Yapılan bu testlerin sonucunda bölgesel ve tüm filtrenin partikül tutma verimleri dikkate alınarak filtrenin

sınıfı belirlenir (Bulgurcu, 2015). Örneğin çizelge 2.2.'de en düşük tüm filtre partikül tutma verimi %86, en düşük bölgesel filtre partikül tutma verimi %84 olan filtre E10 sınıfındadır.

2.5.2. Yapısına göre filtrelerin sınıflandırılması

Geleneksel hava filtreleri genel olarak tekstil ürünü olan filtrelerdir. Tekstil esaslı hava filtreleri ise dokuma ve keçe filtrelerdir.

2.5.2.1. Dokuma filtreler

Gramajları 20 ile 500 g/m² arasında değişen ve uzun iplikleri dokuyarak elde edilen filtrelerdir. Gramajlarının yüksek olması ve dokuma ürünü olmalarıyla birlikte dayanıklılıkları yüksektir. Nanofiberlerin aksine dokuma filtrelerin gözenek boyutları düzenlidir (Stokols ve diğerleri, 1987). Ancak dokunmuş filtrelerin fiber kalınlıkları küçük ve gözenek boyutlarının bu yüzden büyük olması ile partikül maddeler sadece yüzey filtrasyonu ile yakalanabilmektedirler. Bu yakalama prensibinin olabilmesi için, yakalanan partikül maddelerin boyutu, dokunmuş filtrenin gözenek boyutundan büyük olmak zorundadır. Dolayısıyla gözenek boyutundan küçük olan partikül maddeler, dokunmuş filtrenin gözeneklerinden kolaylıkla geçerler. Yüzey filtrasyonunu ile partikül maddelerin yakalanması olayında en büyük sorun, yüzeylerin partikül maddeler tarafından kısa bir süre içinde kaplanması ve tıkanmasıdır. Bu sorun sebebiyle dokuma filtreler, hava filtrasyonu alanında tek başlarına kullanılamazlar. Bu yüzden dokuma filtreler genel olarak, ince filtrelere destek amaçlı ya da keçe filtreler ile kompozit oluşturmak için kullanılır.

2.5.2.2. Keçe filtreler

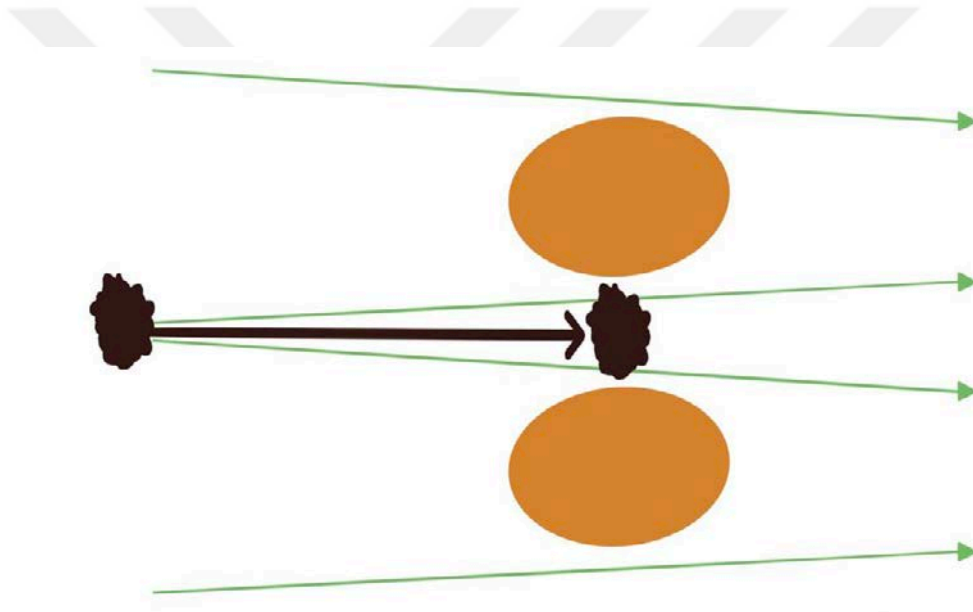
Keçe filtrelerin elde edilmesi için çeşitli sentetik polimerler kullanılmaktadır. Bu polimerler Poliamid (PA), Polipropilen (PP), Polietilen (PE) ve Poliakrilonitril (PAN) gibi polimerlerdir. Keçe filtreler ile dokuma filtreler arasındaki en ayırt edici fark, keçelerin dokuma filtrelerden çok daha fazla gözeneğe sahip olması ve dolayısıyla daha fazla hava geçirgenliğine sahip olmasıdır. Keçe filtreler hava filtrasyonu için

çokça kullanılmaktadırlar. Bunun sebebi fiyat-performans ilişkisidir. Fiyatları dokuma filtrelerle göre daha ucuzdur (Doğan, 2006).

2.5.3. Hava filtrelerinin partikül yakalama sistemleri

Hava filtreleri için yakalama sistemleri incelendiğinde istenmeyen partikül maddelerin yakalanabilmesi için elek, elektrostatik, atalet, difüzyon ve yakalanma mekanizmaları hem ayrı ayrı hem de aynı anda gerçekleşebilmektedir. Bu mekanizmalar aşağıda detaylandırılmıştır.

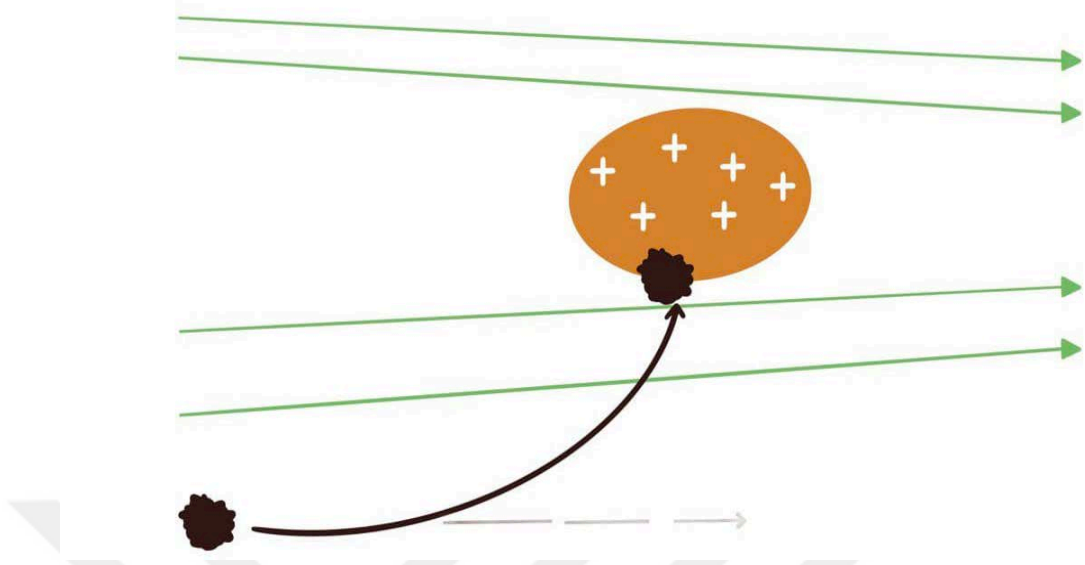
2.5.3.1 Elek Sistemi



Şekil 2.9. Elek sistemi

Hava filtrelerinde partikül maddelerin yakalanması açısından elek yakalama sistemi en basit yakalama sistemidir. Nanofiber filtrelerin getirmiş olduğu yüksek yüzey alanı ve alan başına düşen fiber sayısının çok yüksek olmasının avantajı kullanılarak elek mekanizmasında en az iki fiber birbirine paralel bir şekilde araları mesafeli olarak yerleştirilir (Şekil 2.9.). Eğer yakalanması istenilen partikül maddelerin çapı, fiberlerin arasındaki mesafeden büyük ise partiküller kolaylıkla yakalanır (Yang ve diğerleri, 2002).

2.5.3.2. Elektrostatik sistemi

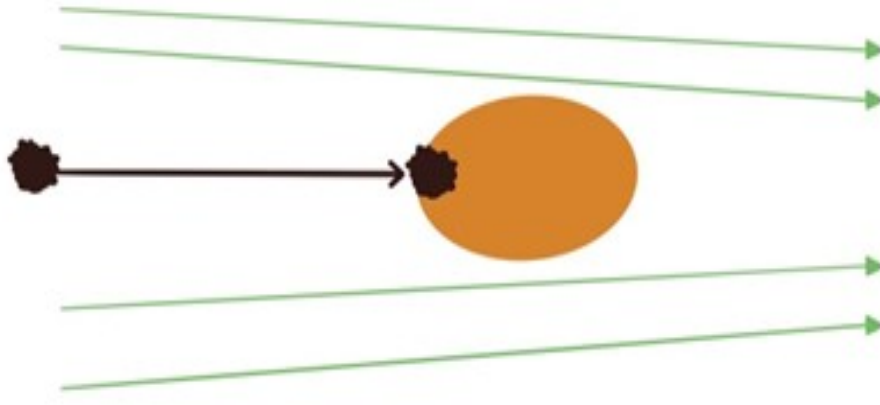


Şekil 2.10. Elektrostatik sistemi

Elektrostatik yakalama genel olarak mekanik yakalamanın düşük olduğu filtrelerde, filtre yakalama performansını arttırmak için kullanılmaktadır. Elektrostatik mekanizmasının çalışma prensibi filtredeki fiber çaplarının büyük olmasına ve zıt yükler ile partikül maddenin fiber tarafından kendisine çekilerek yakalanmasına dayanır (Şekil 2.10.). Ne kadar yüksek fiber çapı olursa o kadar da fiber yüzeyinde tutunan yük olur ve büyük fiber çapının olması hava filtresinin düşük hava direncine sahip olmasını ifade eder. Ancak elektrostatik yakalamada fiberlerin yüzeyindeki yüklerin zamanla azalması elektrostatik filtrelerde bir sorun olarak karşımıza çıkar. Bu sorunun en temel nedeni, elektrostatik fiberlerin yüzeyinde yakalanan partikül maddelerin yüklü kısımları kaplamasıdır. Bu sistem ile sadece küçük ve orta boyutlardaki partikül maddeleri yakalamak için geçerlidir (Vaughn ve diğerleri, 2002).

2.5.3.3. Atalet sistemi

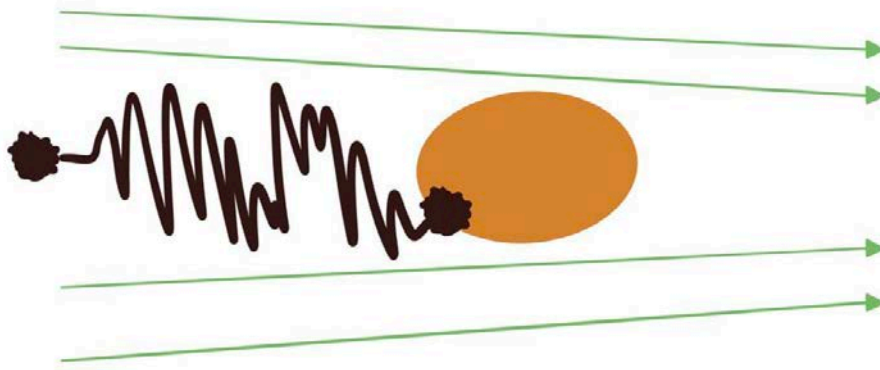
Hava filtrelerinde atalet sistemi ile yakalama yapılması, filtreden geçen havanın beraberinde getirdiği partikül maddelerin, filtreden geçtiği sırada önlerine çıkan fiberin direkt olarak üzerine çarpması ve fibere yapışması prensibine dayanır (Şekil 2.11.). Eğer atalet sistemi etkisinin artırılması istenilirse filtredeki fiberlerin çapı küçültülerek filtrenin içinden geçen hava akışının hızı artırılır (Adanur, 1995).



Şekil 2.11. Atalet sistemi

2.5.3.4. Difüzyon sistemi

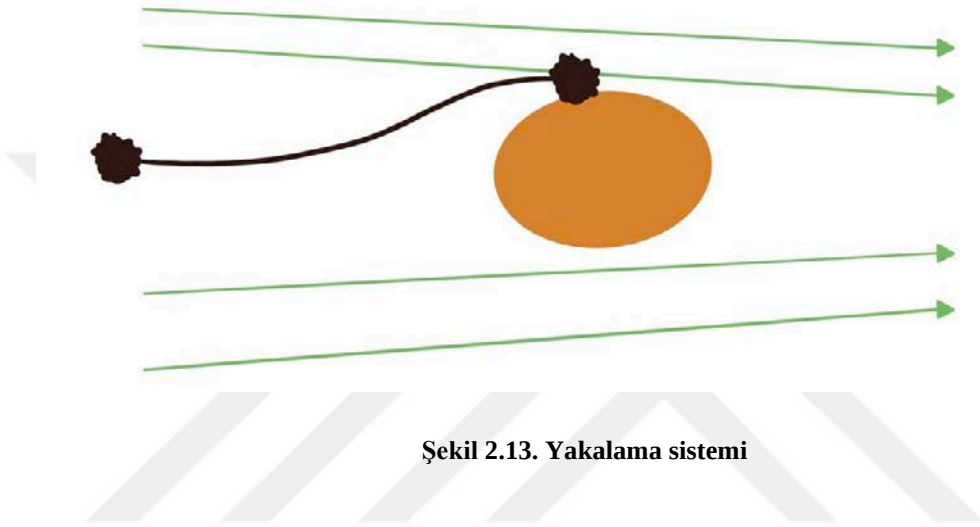
Havanın içindeki gaz molekülleri ile filtrenin içinden geçmeye çalışan 1 mikrometreden daha küçük partikül maddelerin çarpışmasını ifade eden yakalama mekanizmasıdır. Difüzyon yakalama mekanizması, partikül maddenin çapına, havanın hızına ve fiber çapına bağlı olarak artmaktadır. Filtre içinde partikül maddelerin gaz molekülleri ile çarpışması sonucu, partikül maddeler Brownian hareketini sergilerler (Şekil 2.12.). Brownian hareketi partikül maddelerin, moleküllere çarparak rastgele ve karmaşık bir hareket sergilemesine dayanır. Bu hareketin sonunda partikül maddeler fiberlere çarpar ve fiberin yüzeyine yapışır (Adanur, 1995).



Şekil 2.12. Difüzyon sistemi

2.5.3.5. Yakalama sistemi

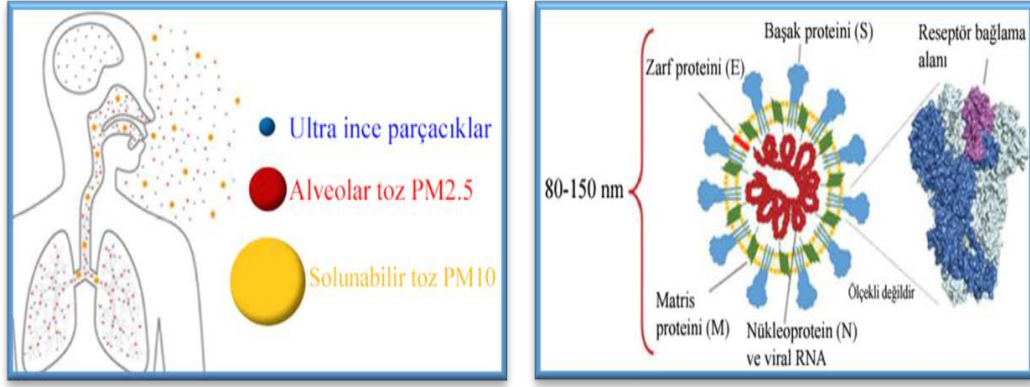
Hava ile birlikte hareket eden partikül maddelerin fiberin etrafında yörüngesel bir yönelimde bulunur. Partikül maddenin izlemiş olduğu yörünge ile fiber arasındaki mesafe, partikül maddenin yarıçapının en az yarısı ise partikül madde fibere çarpar ve ona yapışır (Şekil 2.13.). Yakalama verimliliğinin artması için fiberin çapının azaltılması ve partikül maddenin çapının büyük olması gerekir (Yang ve diğerleri, 2002).



Şekil 2.13. Yakalama sistemi

2.6. Virüslerin Hava Filtrelerinde Yakalanması ve Filtreden Uzaklaştırılması

Elektrostatik yakalama dışındaki tüm toplama mekanizmaları mekanik filtrelere benzer ve parçacık boyutu ve hızından etkilenir. Engelleme ve eylemsizlik etkisi makro ve mikropartiküller için baskın kombinasyon mekanizmaları olduğu bilinirken, nanopartiküller için difüzyon baskındır.

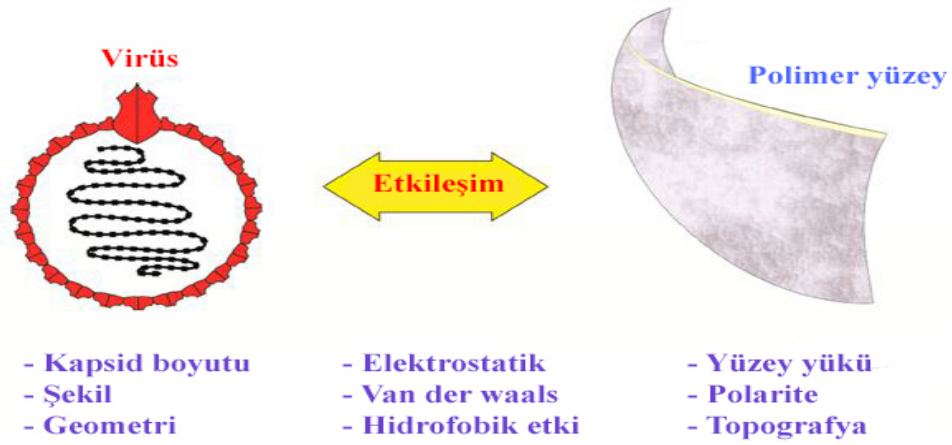


Şekil 2.14. (a) Farklı boyutlarda partikül, (b) Koronavirüs hastalığı (COVID-19)

Virüs ve diğer partikül maddelerin, bahsedilen yakalama mekanizmaları ile polimerik membran sayesinde yakalanabilmesi için filtre yüzeyinin virüsler açısından değerlendirilmesi önemlidir. Virüslerin su tanecikleri ile taşınabildiği de göz önünde bulundurularak, filtrede kullanılan polimerin su tanecikleri ile yapmış olduğu etkileşim de dikkate alınmalıdır (Chua ve diğerleri, 2020).

2.6.1. Virüsler ve filtre yüzeyleri arasındaki etkileşim

Yüzeyler üzerine virüs adsorpsiyonu, elektrostatik etkileşim, hidrofobik etki, van der Waals etkileşimi, hidrojen bağı ve sterik engellemeden etkilenir. Etkileşim virüsün kapsid boyutu, şekli, geometrisi ve yüzey yüküne, polaritesine ve yüzeyin topografyasına bağlıdır (Armanious ve diğerleri, 2016). Farklı boyutlardaki partikül maddeler solunum yoluyla üzerlerinde bulundurduğu virüs ve bakterilerle birlikte sağlığımızı etkiler (Sanità di Toppi ve diğerleri, 2020). Havadaki virüsler için, aerosol damlacık taşıyıcı boyutu, virüslerin bulaşıcılığını ve hayatta kalma kabiliyetini etkiler (Ladhani ve diğerleri, 2017). Koronavirüsün şekil 2.14.'de boyut aralığı verilmiştir (Ruiz-Hitzky ve diğerleri, 2020). Farklı boyutlarda partikül maddeleri soluyabilmekteyiz. Bu boyutlar dikkate alınarak, filtrelerin filtrasyon verimliliğini ve virüs etkisizliğini arttırmak için, mikro aerosol damlacıklarını yakalayabilen ve koronavirüsü adsorbe edebilen polimerlere özgü özelliklerin ayarlanması önemlidir (Şekil 2.15.).



Şekil 2.15. Filtreleme ve virüs uzaklaştırma için polimerlere özgü özellikler

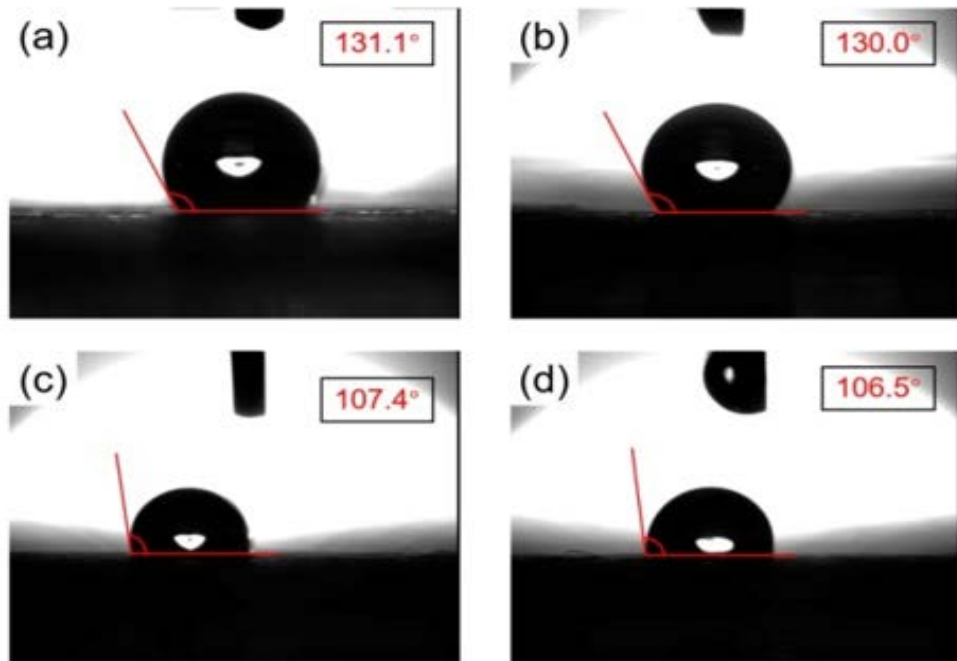
Elektro-yüklü filtreler, partikülleri boyutsal dışlama yerine elektrostatik etkileşim yoluyla tutabilir. Genellikle negatif yüklü virüsleri filtrelemek için pozitif yüklü filtrelere ihtiyaç vardır. Filtreler, merkezi bir filtre katmanının elektret özelliklerinden oluştuğu çok katmanlı kompozit yapılar içerir. Merkezi katman, polipropilen, polibütilentereftalat ve politetrafloroetilen gibi sentetik polimer fiberlerinden yapılabilir. Elektrostatik yükleme, korona deşarjı, triboelektrifikasyon veya elektrostatik eğirme ile merkezi katmana iletilir. Ayrıca, mekanik hareket ve elektrostatik kuvvetler nedeniyle parçacıklar etkili bir şekilde tutulur.

2.6.2. Virüs filtrasyonu için membran teknolojisi

Membran tipik olarak belirli gözenek boyutlarına sahip ince gözenekli polimerik filminden oluşur. Viral partikül maddelerden havanın saflaştırılması, daha küçük gözenekleri nedeniyle virüsler membranın yüzeyinde tutuldukça gerçekleşir. Polimerik membran filtrenin gözenek boyutu, uygulama amacına göre ayarlanabildiğinden, membran malzemesi virüsleri filtrelemek için büyük bir potansiyele sahiptir. Tipik olarak, virüs filtreleri hem mekanik özellikler hem de virüs tutulumu sağlayan kompozit membranlardır (Reis ve diğerleri, 2007). Membran teknolojisi ile filtrasyonun etkinliği büyük ölçüde gözenek boyutlarına ve dağılımına bağlıdır.

2.6.2.1. Hidrofobik membran

Hidrofobik ve hidrofilik olmak üzere iki tür yüzey membran özelliği vardır. Hidrofobik membran, ıslanmayı engelleyen bir yüzey olduğu için su itici olarak bilinir. Hidrofobik membranın yüzeyinde düşük yüzey enerjisinden dolayı su damlacıkları oluşur. Bu nedenle, bir membranın hidrofobik özellikleri filtrenin geliştirilmesi ve uygulamasında büyük bir avantajdır (Ahmad ve diğerleri, 2015). Bir sıvının yüzey enerjisi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey gerilimi gibi membranın yüzeyinin ıslanabilirliğini etkileyen birkaç faktör vardır. Kohezyon kuvveti ile yapışma kuvveti arasındaki ilişki nedeniyle yüzey enerjisi indüklenir. Ek olarak, sıvı yüzeyi gerilimi, daha güçlü moleküller arası kuvvetlerin yüzey gerilimini yükselttiği durumlarda membranın ıslanabilirliğini etkiler. Membran yüzeyine bir sıvı damlacık yerleştirildiğinde, hidrofobikliğini gösteren 90°den fazla bir damlacık temas açısı oluşturacaktır (Şekil 2.16.).



Şekil 2.16. Su temas açısının optik görüntüsü

Elektroeğirme ile üretilmiş nanofiber kullanılarak çok yüksek temas açısına (150 dereceden büyük) sahip polimer membran elde edilmektedir. Çok yüksek temas açısı (90 dan büyük), membranın yüksek hidrofobiklik özelliklerini gösterir (Li ve diğerleri, 2019). Yüksek hidrofobikliği, yüzeyde tutulan partiküllerin su damlacıkları ile

yıkılarak kuru ve temiz bir membran bırakacağı için kendi kendini temizleyen bir yüzey sağlar (M. Zhao ve diğerleri, 2020). PTFE mikrofiber membran üzerinde PTFE/PVA nanofiberler kullanılarak yapılan bir çalışmada, üretilen kompozit membran 130 derecelik temas açısı ile hidrofobik bir membran ve filtrasyon verimliliği PM2.5 için %98,905 olarak bulunmuştur (Hui Liu ve diğerleri, 2019).

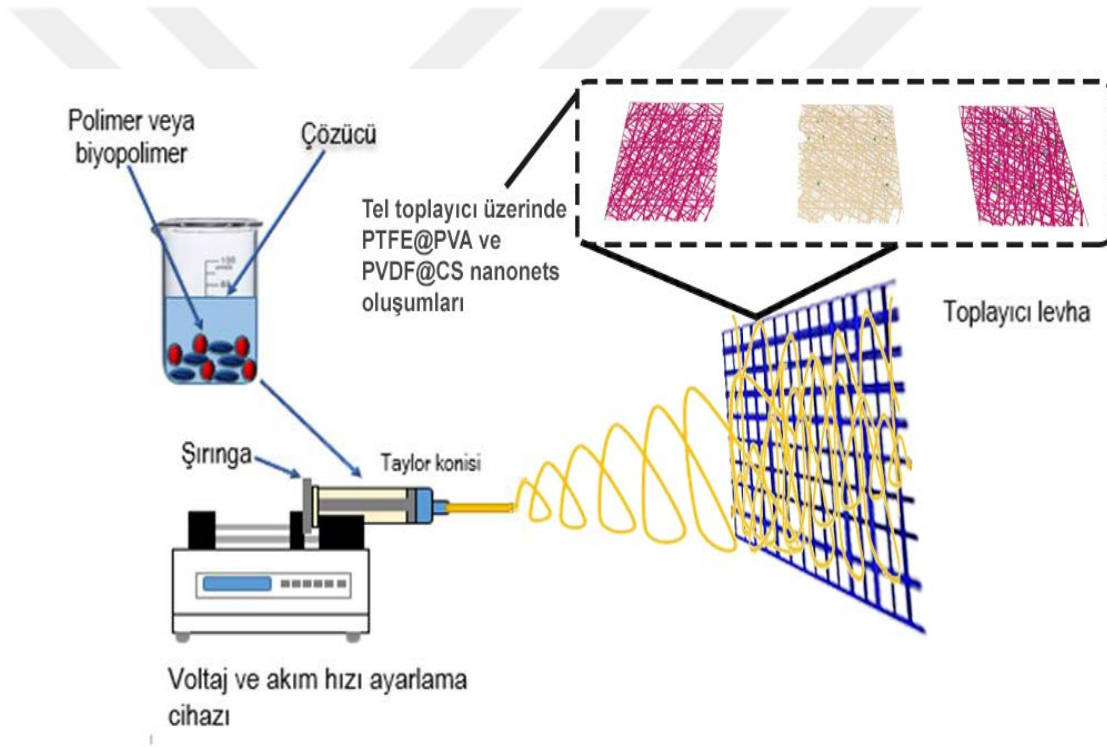
2.6.3. Su buharı geçirgenliğinin çok katmanlı yapı ile etkileşimi

Su buharı geçirgenliği için kullanılan polimerlerin mukavemetlerinin, temas açısının ve düşük buhar iletim hızının (MVTR) olması oldukça önemlidir. Hidrofobik özellik sunan PVDF düşük MVTR sunduğu raporlanmıştır (X. Zhao ve diğerleri, 2017). Öte yandan yüksek ve güçlü bir polarite sayesinde filtrenin adsorpsiyon oranının artırılması için süper hidrofobiklik özellik sunan kitosan yüksek neme maruz kaldığında hava direncinde hızlı bir artış sağlar. Bu özellikler dikkate alındıklarında tek başlarına temizleme işlemi zorlaşır. Bu nedenlerin sonucunda hidrofobik ve hidrofilik malzemeler birleşerek birlikte gradyan bir yapı oluşturarak temizlenme açısından avantaj sundukları raporlanmıştır (Hui Liu ve diğerleri, 2019).

Yüksek antiviral özelliğe sahip 3D nanofiberin elde edilmesi için bu tez çalışmasında üç katmanlı bir modelleme tercih edilmiştir. Filtrenin üç katmanlı olma nedeni, katmanlardaki kompozitleşmeler sonucunda mekanik yakalama, elektrostatik yakalama ve antiviral performansın artmasını sağlamaktır. Yapılan bir araştırmada çok katmanlı fiberlerin tek katmanlılara nazaran daha iyi filtrasyon performansı gösterdiği belirtilmiştir (Neisiany ve diğerleri, 2020). Üç katmanlı modelin stratejisi sayesinde değişken çaplara, farklı gözenek boyutlarına ve yüksek gözenekliliğe sahip farklı bileşenleri, düzenli bir şekilde birleştirilmiş katmanlar halinde bir araya getirerek, kompozit membran filtrenin verimli çalışmasını ve belirli boyutlardaki partikül maddeleri kademeli olarak tutarak, gözenek yapılarının tıkanması önlenmektedir (S. Zhang ve diğerleri, 2016). Böylelikle her katmanda yeterli gözeneklilik oluşturularak hava geçişi kolaylaştırılmış olacaktır. Öte yandan hava direnci düştüğü için, basınç düşüşünün düşük tutulabilmesi sağlanırken, buna rağmen filtreleme performansının iyileştirilebilmesi ve dolayısıyla kalite faktörünü arttıracaktır. Bu tez çalışmasındaki üç katmanlı nanofiber filtrenin hava alma ve filtrelemenin şematik gösterimi ileren bölümlerde şekil 3.10.'de gösterilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması katmanları ayrı ayrı ele alındığında, filtrenin birinci katmanında geri dönüştürülebilir olan politetrafloroetilen (PTFE), polivinil alkol (PVA), ikinci katmanında ise polivinilidenfloridin (PVDF) ve kitosan (CS) ve yeniden üçüncü katmanda da birinci katman stratejisinin aynısının olduğu, 4 farklı polimerden oluşan üç katmanlı (PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA) nanofiber hava filtresinin elektroğirme metodu ile üretilmesini ve sonucunda da nanofiber yüzeyli membranların hava geçirgenliği ve filtrasyon verimliliğinin test edilmesini kapsamaktadır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Elektroğirme metodu

Tez kapsamında, tezin başından sonuna kadar 3 aşama takip edilmiştir.

1. Her katmandaki nanofiberlerin elektroğirme metodu ile üretilmesi.
2. Üretilen nanofiberlerin karakterize edilmesi.
3. Polimerik nanofiber filtre özelliklerinin değerlendirilmesi.

3.1. Kullanılan Materyaller

Tez çalışmasındaki nanofiberlerin üretimi için Projemizdeki nanofiber üretiminde PTFE (Polytetrafluoroethylene) dispersiyonunun sulu emülsiyonu (Sigma-Aldrich; %60wt), (CS) Kitosan (Chitosan medium molecular weight, Deacetylation 75 - 85 %, Viscosity 200 - 800 cps, c = 1%, 1% Acetic Acid), PVDF (poly(vinylidene fluoride) (Sigma Aldrich: Mw:534.000) Polivinilalkol (PVA) (85,000-124,000, 87-89% hydrolyzed), Glutaraldehyde solution (50 wt. % in H₂O), HCL (Sigma-Aldrich; Hydrochloric acid solution), DMF (Dimetilformamid) (Sigma-Aldrich) ve Aceton (Sigma-Aldrich) kullanılacaktır.

3.1.1. Polimerik membranda kullanılacak olan polimerlerin özellikleri

Polimerik membranda kullanılan polimerlerin özellikleri aşağıda verilmiştir. Şekil 3.2.'de ise kullanılan polimerlerin kimyasal bağ yapıları ve filtre üzerindeki kullanımı yer almaktadır.

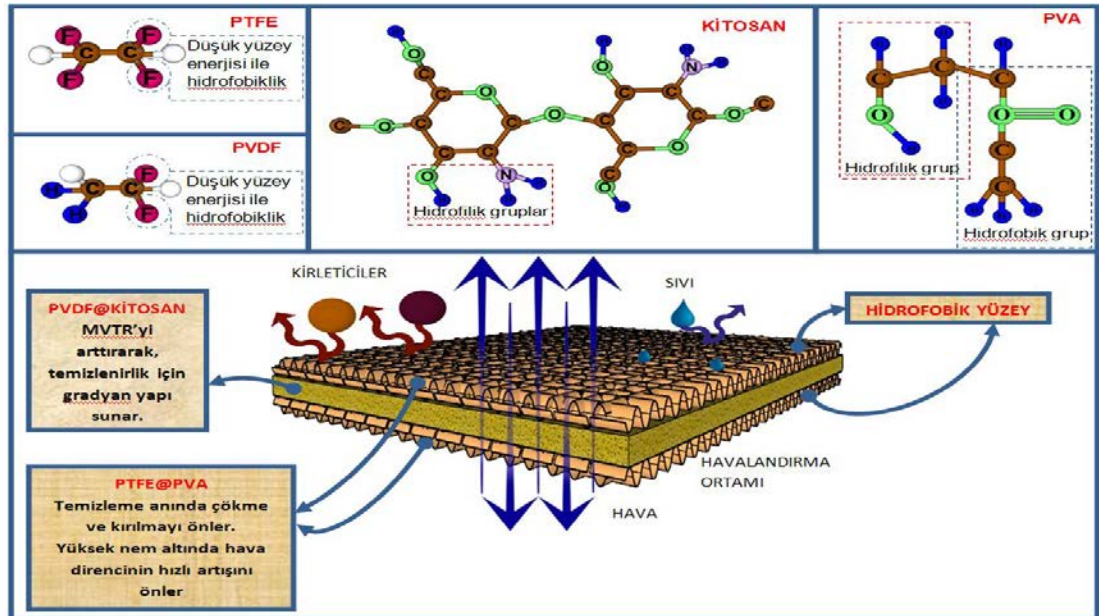
PTFE: Politetrafloroetilen, sentetik, kimyasal olarak stabil ve biyolojik olarak inert bir floropolimerdir. PTFE biyolojik (enzimatik) saldırılara karşı dayanıklıdır, yapışmaz ve biyoyumludur ve birçok medikal uygulamada kullanılmaktadır (Güngör, 2017). Kimyasallara ve neme karşı mukavemeti yüksek, elektriksel izolasyon, yanmazlık ve yapışmazlık gibi çok üstün özelliklere sahiptir. Yüzeyi kaygan olduğu için yapışmaz ve dış etkenleri uzaklaştırır (Feng ve diğerleri, 2018). Ayrıca PTFE kısmi olarak geri dönüştürülerek farklı uygulamalarda kullanılabilecek duruma getirilebilir. Etanol ile yıkandığı zaman etanolün içinde çözünmez.

PVA: Polivinil Alkol, sentetik polimerler arasında ucuz olması ve hava filtresinde kullanıma çok uygun olmasıyla dikkat çekmektedir. PVA sentetik polimerinin göstermiş olduğu mükemmel mekanik, termostabilite ve biyoyumluluk gibi özelliklerinden dolayı filtrasyon için mükemmel malzeme olduğu belirtilmiştir (L. Zhang ve diğerleri, 2020). PVA geri dönüştürülebilirdir ve toksik bir kimyasal değildir. Dezenfeksiyon işlemi sırasında çözünmemesi için hidroksil grupları ile çapraz bağlayıcı olan glutaraldehitin, aldehit grupları ile bağlanması gerekmektedir. Çapraz bağlanma sonrasında yüzeyin lifli yapısını kaybetmez ve nanofiberlerin

morfolojisinde herhangi bir değişim gerçekleşmediği gibi fiber çapları açısından da olumsuz bir etkinin meydana gelmez (iftci ve diğerleri, 2015).

PVDF: Polivinilidenfloridin düşük kütle, yüksek mekanik, elektrik, kimyasal ve termal dayanımı, asitlere karşı gösterdiği direnç ve oksidasyon ile termal bozunmalara uğramaması nanofiber üretiminde PVDF'in kullanılmasını mümkün kılmıştır. Kısmi florlu bir yüksek performans malzemesi olan PVDF malzemeler neredeyse tümorganik ve inorganik kimyasallara karşı dayanım gösterir (Oflaz, 2016). PVDF membran son derece hidrofobiktir ve sulu çözeltelerde ıslanmaz (Cho ve diğerleri, 2012). Ayrıca PVDF, geri dönüştürülebilirdir. Koronavirüs negatif yüklü olduğundan, pozitif yüklü PVDF nanofiber filtre daha da yüksek yakalama verimliliği sağlayacaktır (Leung ve diğerleri, 2020)

CS: Kitosan antiviral, antibakteriyel ve antifungal özelliklere sahiptir (Kurtuluş ve diğerleri, 2020). Yüksek antiviral özelliğe sahip olduğundan ve kompozit malzemenin bir parçası olarak kullanıldığında kompozit malzemeye yüksek antiviral özellikler kazandırdığı ispatlanmıştır (Zarayneh ve diğerleri, 2018). Kitosandan üretilen nanofiber membran yüksek antibakteriyel özelliklerle beraber yüksek kalite faktörü de göstermiştir. Ayrıca, bir çalışmada PEO ve Kitosandan üretilen nanofiberler ortalama 88-132 nm aralığında küçük fiber çapları sergilemiştir (Desai ve diğerleri, 2009).



Şekil 3.2. Kullanılan polimerlerin kimyasal bağ yapıları ve filtre mekanizması

3.2. Polimer Çözeltilerinin Hazırlanması

Nanofiber üretimi için çalışmada kullanılan polimer ve biyopolimerlerin solüsyonları hazırlanmış ve daha sonra da PTFE, PVA, PVDF ve CS belirlenen oranlarda karıştırılmıştır. Her bir solüsyonun hazırlanma prosedürü aşağıda belirtilmiştir.

3.2.1. PTFE@PVA polimer çözeltisinin hazırlanması

PVA ağırlıkça %12 oranında damıtılmış saf su içerisinde, 80° C’de 6 saat boyunca karıştırılarak çözüldü ve bir süre oda sıcaklığında dinlendirildi. PTFE dispersiyonu ve PVA birbirleri ile ağırlıkça PTFE:PVA 6:1 oranında bir araya getirilerek 3 saat boyunca oda sıcaklığında manyetik karıştırıcı (Mtops marka, model: HSD 120-03P) yardımıyla karıştırıldı.

3.2.2. PVDF@CS polimer çözeltisinin hazırlanması

Öncelikle, saf PVDF nanofiberlerini imal etmek için, PVDF ağırlıkça %16wt oranında DMF/aseton (7/3) içerisinde 6 saat boyunca 50 °C’de karıştırılarak çözdürüldü. Kitosan ağırlıkça %1 oranında %90/10 asetik asit/saf su içerisinde, oda sıcaklığında 24 saat boyunca manyetik karıştırıcıda (Mtops marka, model: HSD 120-03P) karıştırılarak çözdürüldü. Sonra bu iki çözelti birbirleri ile ağırlıkça 3:2 (PVDF@CS) oranında bir araya getirilerek oda sıcaklığında, manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırıldı.

3.3. Üç Katmanlı Hava Filtresinin Elektroeğirme Metodu ile Üretimi

Polimerik hava filtresindeki nanofiberlerin elektroeğirme metodu ile üretimi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Moleküler Nano-Malzeme Araştırma Laboratuvarında yer alan yatay yönde çalışma prensibine dayanan “Spingenix SG1 Elektroeğirme Cihazı” ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3.).

Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan “Spingenix SG1 Elektroğirme Cihazı”

Elektroğirme cihazı başlıca farklı türlere sahip olabilmektedir (Waqas Munir ve diğerleri, 2020).

- Malzeme cinsine göre çözültiden veya eriyikte olmak üzere 2 türde bulunmaktadır. Bu çalışmada çözültiden hazırlanan nanofiberler üretilmiştir.
- Düze sayısına göre tekli, ikili ve çoklu olacak şekilde 3 türde bulunmaktadır. Bu çalışmada tekli düze (tek şırınga) kullanılarak nanofiberler üretilmiştir.
- Voltaj tipine göre DC, AC ve yanlı AC olmak üzere 3 tür vardır. Bu çalışmada 220 V AC voltaj kaynağı kullanılarak nanofiberler üretilmiştir.
- Çalışma büyüklüğüne göre mikro ve makro olarak 2 tür vardır. Bu çalışmada mikro boyutta çalışma büyüklüğüne göre nanofiberler üretilmiştir.
- Çevre atmosferine göre açık ve kapalı olmak üzere 2 tür vardır. Bu çalışmada kapalı atmosferde nanofiberler üretilmiştir.
- Düzenek yapısına göre dikey veya yatay olarak 2 tür vardır. Bu çalışmada yatay düzenek yapısı kullanılarak nanofiberler üretilmiştir.

Bu tez çalışmasındaki elektroğirme cihazı temel olarak, hazırlanan solüsyonun cihaz içinde ilerlemesini sağlayan besleme pompası, voltaj değerlerinde değişiklik

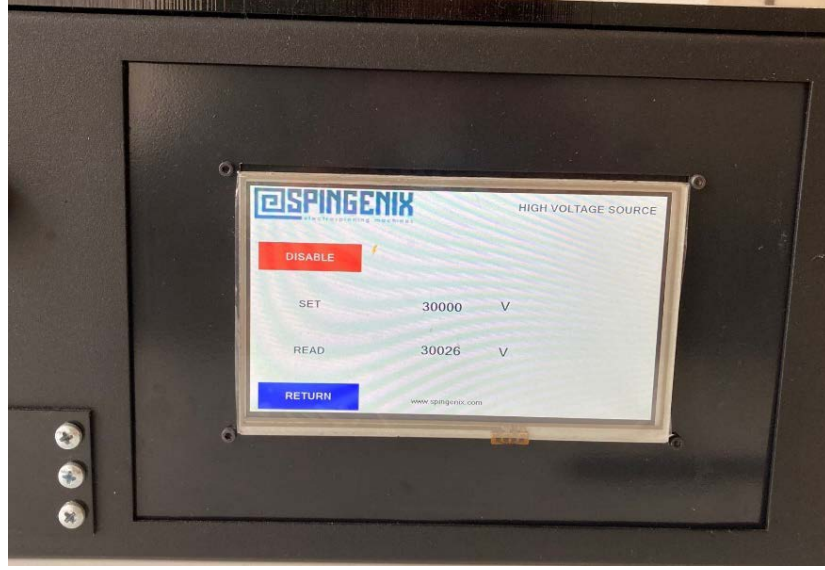
yapılmasını sağlayan yüksek voltaj ayar ekranı ve nanofiberlerin üzerinde toplanmasını sağlayan toplayıcı metal levhadan oluşmaktadır.

- Besleme pompası, üretilecek olan nanofiberin polimerik çözeltisinin şırınga içine çekildikten sonra, belirlenen hızda (ml/dk veya ml/sa) iğnenin ucuna ulaştıran cihazdır. Besleme pompasının üzerinde, şırınganın tipi, kullanılan şırınganın hacmi, iletim hızı ve şırınganın içinde kalan çözelti miktarı gibi parametrelerin ayarlanmasını sağlayan bir ekran yer almaktadır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Besleme pompası

- Yüksek voltaj ayar ekranı, besleme pompasının yardımı ile şırıngadan gelen ve iğne ucuna iletilen çözeltinin, kritik voltaj değerine ulaşana kadar yükseltilip, bir süre sonra taylor konisini oluşturup daha sonra da sıvı fazdaki çözeltinin katı hale geçerek, toplayıcı levha üzerinde katı formda nanofiberlerin toplanmasını sağlar. Cihazın en önemli parametrelerinden olan yüksek voltaj ayarı, bu tez çalışmasındaki kullanılan elektroğirme cihazında maksimum 30 kV'a ulaşabilmektedir. (Şekil 3.5.)



Şekil 3.5. Yüksek voltaj ayar ekranı

- Toplayıcı metal levha, elektroëğirme metodunda kullanılan birden fazla farklı farklı toplayıcı metal levhalar mevcuttur. Bu çalışmada homojen bir şekilde en az 20cm x 20cm boyutunda nanofiber filtre elde edebilmek için kendi tasarladığımız hareketli bir plaka kullanılmıştır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. 20cm x 20cm hareketli toplayıcı plaka

3.3.1. PTFE@PVA nanofiber üretimi

PTFE solüsyonu ve PVA solüsyonundan oluşan PTFE@PVA solüsyonu çapı 1mm olan kapiler uçlu 5 ml'lik şırınganın içine çekilmiştir. Solüsyon yüklü şırınga besleme pompasına yerleştirilip, çizelge 3.1.'de belirtilen parametreler ayarlanmıştır. Şırınga

yerleştirildikten sonra kapiler uç kısmına yüksek voltaj kaynağının pozitif kutbu bağlanmış ve polipropilen altlık bez ile kaplanmış toplayıcı metal levha kısmına da topraklanmış kutup bağlanmıştır. Son olarak yüksek voltaj kaynağının miktarı ve kapiler uç ile toplayıcı metal levha arasındaki mesafe ayarlanılarak elektroëğirme işlemi başlatılmıştır. Aşağıdaki çizelge 3.1.'de belirtilen parametrelere proses sırasında karar verilip, nanofiber filtrenin birinci katmanı şekil 3.7.'daki haliyle homojen bir şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. Birinci katman için belirlenen elektroëğirme işleminin parametreleri

Besleme/akış hızı (ml/dk)	0,45
Voltaj (kV)	25
İğne ucu ile toplayıcı metal levha arasındaki mesafe (cm)	16



Şekil 3.7. Birinci Katmandaki PTFE@PVA nanofiberi

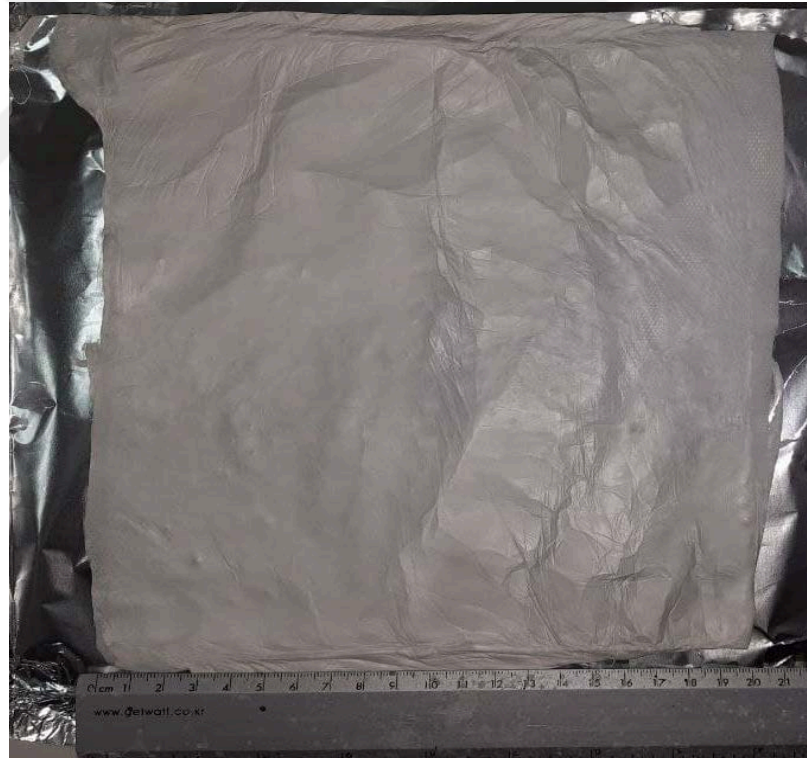
3.3.2. PVDF@CS nanofiber üretimi

PVDF solüsyonu ve CS solüsyonundan oluşan PVDF@CS solüsyonu çapı 1mm olan kapiler uçlu 5 ml'lik şırınganın içine çekilmiştir. Solüsyon yüklü şırınga besleme

pompasına yerleştirilip, çizelge 3.2.'de belirtilen parametreler ayarlanmıştır. Şırınga yerleştirildikten sonra kapiler uç kısmına yüksek voltaj kaynağının pozitif kutbu bağlanmış ve polipropilen altlık bez ile kaplanmış toplayıcı metal levha kısmına da topraklanmış kutup bağlanmıştır. Son olarak yüksek voltaj kaynağının miktarı ve kapiler uç ile toplayıcı metal levha arasındaki mesafe ayarlanılarak elektroegirme işlemi başlatılmıştır. Aşağıdaki çizelge 3.2.'de belirtilen parametrelere proses sırasında karar verilip, nanofiber filtrenin ikinci Katmanı şekil 3.8.'deki haliyle homojen bir şekilde elde edilmiştir.

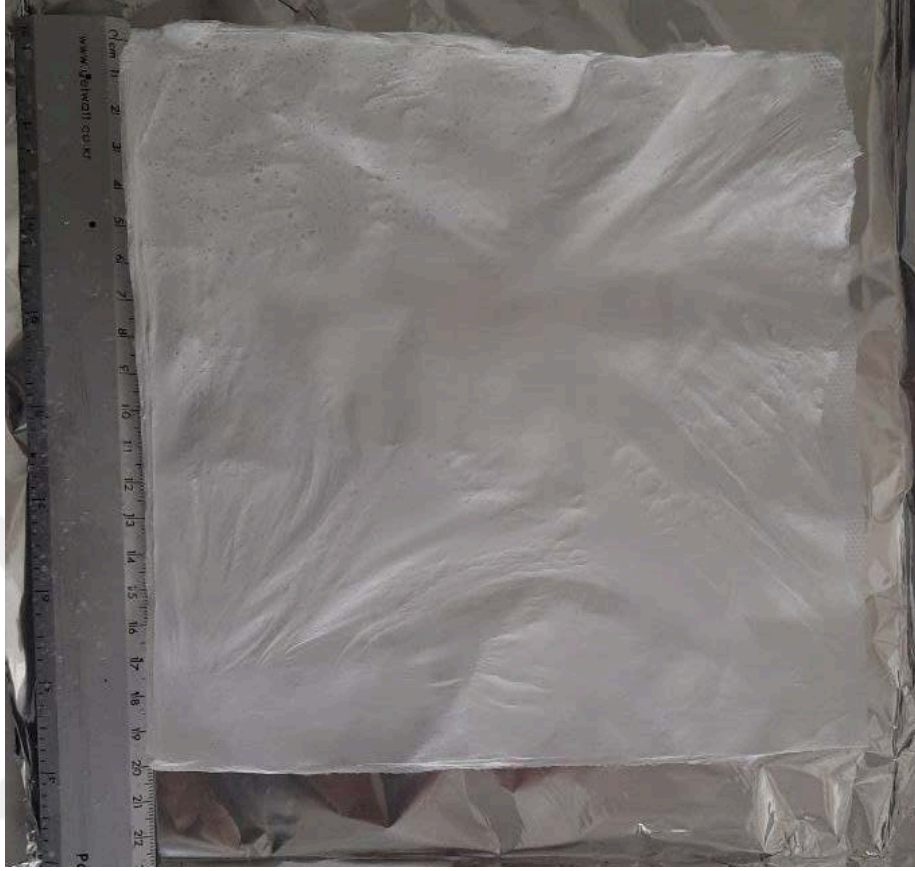
Çizelge 3.2. İkinci katman için belirlenen elektroegirme işleminin parametreleri

Besleme/akış hızı (ml/h)	0,6
Voltaj (kV)	20
İğne ucu ile toplayıcı metal levha arasındaki mesafe (cm)	15



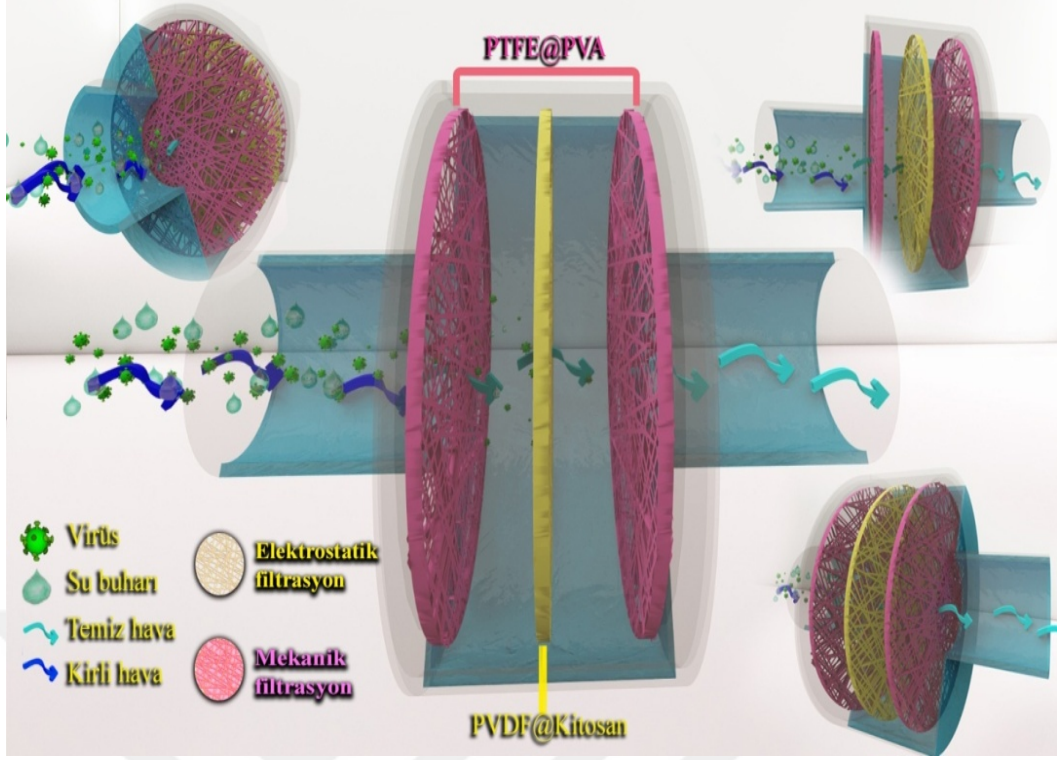
Şekil 3.8. İkinci katmandaki PVDF@CS nanofiberi

3.3.3. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA nanofiber filtre malzemesinin üretimi



Şekil 3.9. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA nanofiber

Birinci katman ve ikinci katman fiber elde edildikten sonra her iki katmanında üretim parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra üç katmanlı PTFE/PVA@PVDF@CS/PTFE@PVA filtre üretimine başlanmıştır. Her bir katmanın üretimine 2 saatlik bir süre tanınmıştır. Böylelikle şekil 3.9.'deki haliyle üç katmanlı nanofiber filtre toplamda 6 saatte oluşturulmuştur. Üretilen üç katmanlı nanofiber filtrenin şematik olarak çalışma prensibi şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA nanofiber filtre

3.4. Üretilen Nanofiberlerin Karakterizasyonu

Nanofiberlerin elektroğirme metodu ile üretilmesinin ardından, hava filtreleri için yapılan mekanik ve filtrasyon analizlerin doğrultusunda, üretilen üç katmanlı nanofiber hava filtresinin özelliklerini belirlemek amacıyla filtre üzerinde test ve analizler yapılmıştır.

3.4.1. Yüzey morfolojisi ve topografisi analizi

Üretilen nanofiberlerin morfolojisi ve yüzey topografisi, JSM-7600F Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) (şekil 3.11.) ile yapılmıştır. Ölçümler İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Tümlşik Araştırma Merkezleri Malzeme Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. FESEM cihazı

3.4.2. Gözeneklilik ve gözenek dağılımı analizi

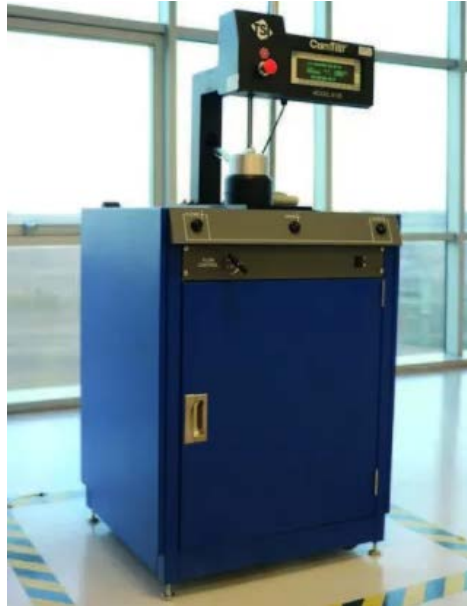


Şekil 3.12. Micromeritics Marka Autopore IV Model Civa Porozimetresi

Nanofiberlerin gözenekliliği ve gözenek büyüklüğü dağılımları hizmet alımı ile Afyon Kocatepe Üniversitesi, TUAM da Micromeritics Marka Autopore IV Model Civa Porozimetresi kullanılarak yapılmıştır (3.12.). Üretilen fiber yapının analizi 3 nm-360 µm boyutlara sahip gözenekler için ölçüm alınabilen düşük basınç analizi (0-50 psi) ile yapılmıştır. Testte civa yüzey gerilimi 485 dyne/cm ve civa ile gözenek duvarı arasındaki kontak açısı 130° olmak üzere civa intrüzyon verileri kullanılmıştır. Kısaca, filtre gözenekleri basınç 0'dan (büyük gözenekler) 50 psi (nispeten küçük gözenekler) değerine arttırılarak civa ile doldurulmuştur. Ölçüm sonucunda basınca karşı numuneye giren civa miktarının belirlenmesinden sonra malzemenin gözeneklilik, gözenek hacmi dağılımı, gözenek boyutu dağılımı ve yığın yoğunluğu ve görünür yoğunluğu elde edilmiştir.

3.4.3. Hava geçirgenliği ve filtrasyon performansı analizi

Üretilen nanofiber hava filtresinin hava geçirgenliğini belirleme analizi ve filtrasyon performansı analizi Açık Kart Bilgi Teknolojileri Laboratuvarı'nda Geçirgenlik testleri TSI 8130'a göre yapılmış ve bu parametreler kullanılmıştır: %2 NaCl test aerosolü, 60 L/dk hava akış hızı, 5,33 sm/s medya hızı (Şekil 3.13.).



Şekil 3.13. Filtre medya test sistemi cihazı

3.4.4. Mekanik dayanıklılık analizi

Çekme testleri hizmet alımı ile Ege Üniversitesi MATAL da TA Instruments Q800 DMA (Dinamik Mekanik Analiz) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.14.). Testler 37°C’de 0,1N/dk kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. TA Instruments Q800 DMA (Dinamik Mekanik Analiz)

3.4.5. Nem buhar iletim hızı (MVTR) / su buharı geçirgenliği analizi

Nanofiber iskelelerin nem geçirgenliklerini belirlemek amacıyla standart su buharı geçirgenlik analizi yapılacaktır. Yöntemde özetle distile su içeren açık ağızlı kapların ağızları test numunesi iskeleler ile kapatılacaktır. 24 saat bekletilecek olan kaplara daha sonra ne kadar suyun buharlaştığının bulunması amacı ile tartım işlemi uygulanacaktır.

3.4.6. Yüzey temas açısı analizi

Nanofiber filtrelerin ıslatılabilirlik özellikleri yüzey temas açısı ölçümleri hizmet alımı ile *Abdullah Gül Üniversitesi, Merlab da Biolin Scientific Attension Theta Lite marka cihaz* ile belirlenmiştir (Şekil 3.15.). Ölçümler 2x2 cm nanofiber filtre katmanlarının üzerine 10 µL distile su damlatılarak yapılmıştır. Ölçümler üç tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15 Yüzey Temas Açısı Cihazı

3.4.7. Termogravimetrik analizi

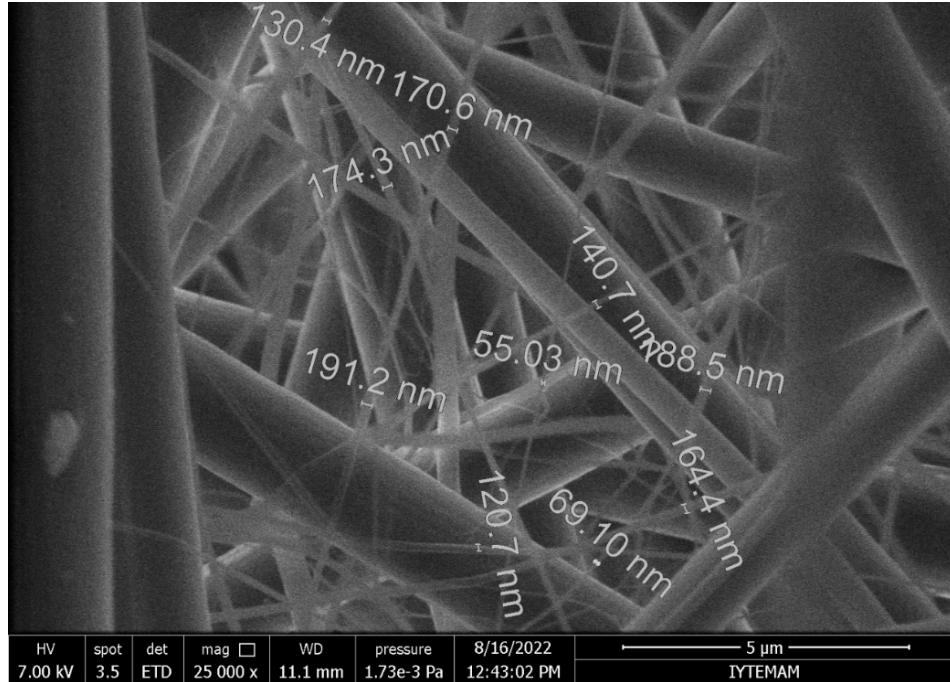
Nanofiber filtre için termal analizler, azot (2.5 bar, 10 mL/min) atmosferi altında 10°Cdk-1 ısıtma hızında, 30-700°C sıcaklık aralığında Perkin Elmer Termal Analizör ile MSKÜ Araştırma Laboratuvarları Merkezi'nde hizmet alımı yoluyla yapılmıştır.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

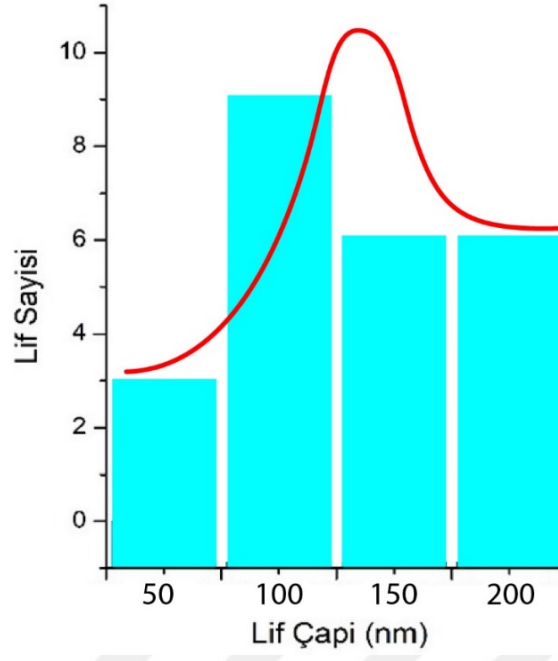
4.1. Yapılan Test ve Analizler

4.1.1. Yüzey morfolojisi analizleri

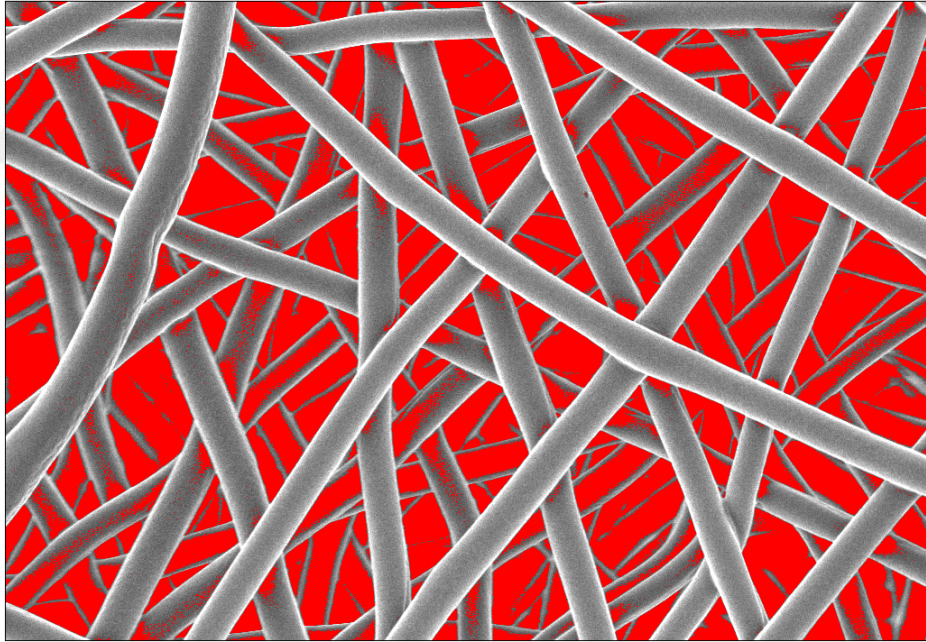
Üretilen nanofiber filtre malzemesinin SEM ölçümleri, Quanta 250 SEM cihazı ile İYTE Malzeme Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Nanofiberlerin çapları SEM görüntüleri (10000X) üzerinden ImageJ (NIH, Bethesda, MD) yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Üretim aşamasında küçük çaplı nanofiberlerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.1. ve Şekil 4.4.'deki SEM analizlerinden elde edilen sonuçlar da bu hedefe ulaşıldığını kanıtlar niteliktedir. Analizler sonucunda üretilen iki katmanlı ve üç katmanlı nanofiberlerin fiber çaplarının 55-200 nm arasında değiştiği Şekil 4.2. ve Şekil 4.5.'de verilen çap dağılım grafiğinde verilmiştir. İki katmanlı ve üç katmanlı filtre malzemesinin IMAGE J gözeneklilik görüntüleri Şekil 4.3. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir.



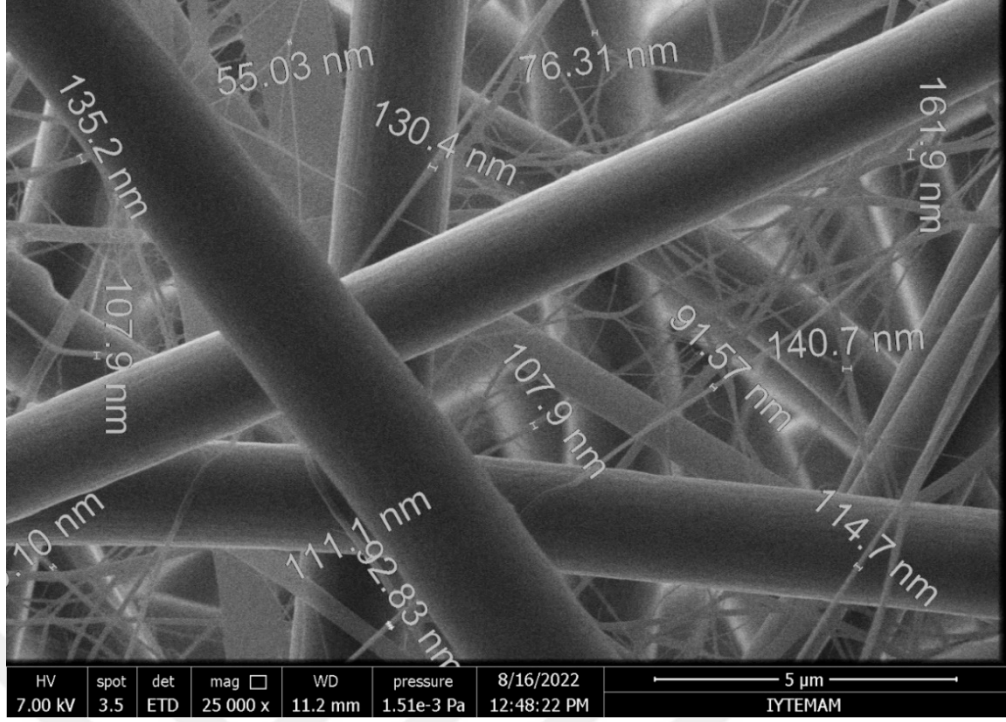
Şekil 4.1. Üretilen filtre malzemesinde iki katmanlı (PTFE@PVA/PVDF@CS) nanofiberlerin boyutları



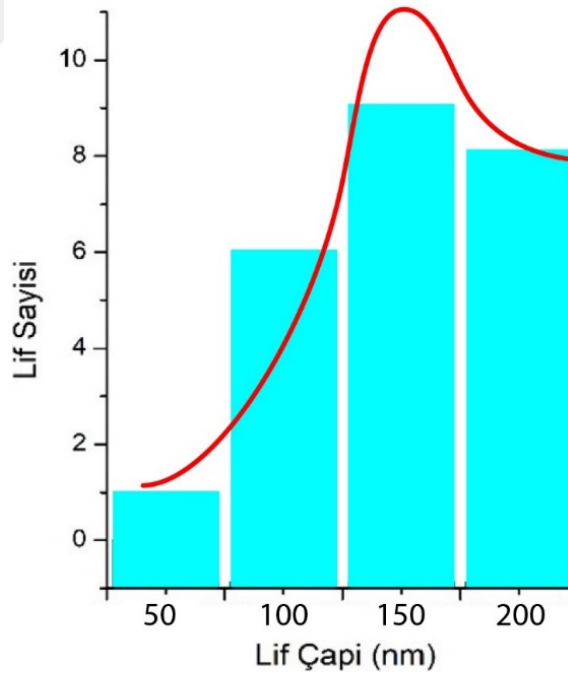
Şekil 4.2. İki katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS çap dağılım grafiği



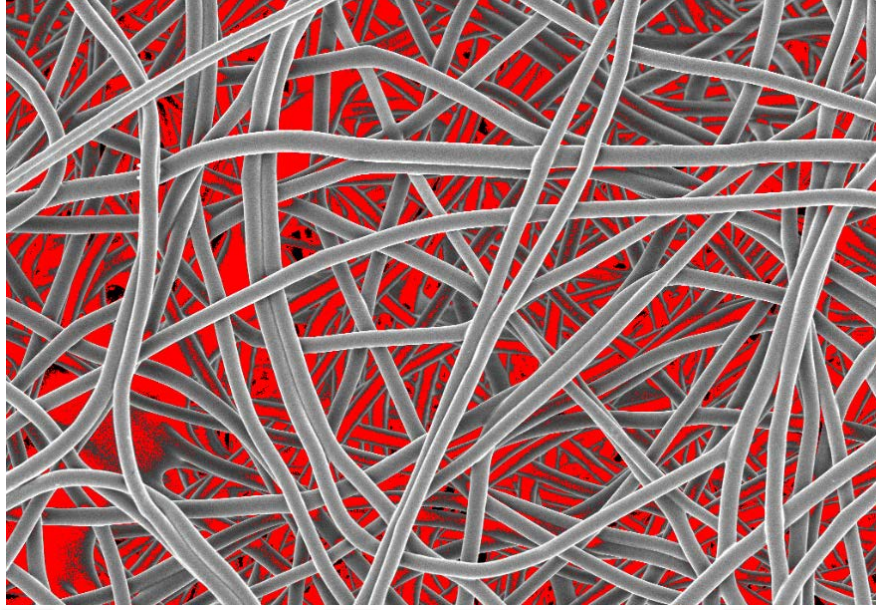
Şekil 4.3. İki katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS IMAGE J gözeneklilik görüntüsü



Şekil 4.4. Üretilen filtre malzemesinde üç katmanlı (PTFE @ PVA / PVDF @ CS / PTFE @ PVA) nanofiberlerin boyutları



Şekil 4.5. Üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA çap dağılım grafiği



Şekil 4.6. İki katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA IMAGE J gözeneklilik görüntüsü

Şekil 4.1. ve şekil 4.3.'e göre tüm iskelelerin morfolijisinin düzgün olduğu, boncuk yapısı içermediği ve pürüzsüz olduğu anlaşılmıştır. İki katmanlı filtre malzemesinin çap dağılım grafiğine göre ortalama çap değeri 130 nm'dir (Şekil 4.2.). Üç katmanlı filtre malzemesinin çap dağılım grafiğine göre ortalama çap değeri 150 nm'dir (Şekil 4.4.). Üç katmanlı filtrenin çap kalınlıkları iki katmanlı filtrenin sahip olduğu fiber çap kalınlıklarına göre yüksek olduğu Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.'de görülmektedir.

4.1.2. Gözeneklilik ve gözenek dağılımı analizleri

Üretilen hava filtresinin sahip olduğu gözenekliliğin belirlenmesi amacıyla Afyon Kocatepe Üniversitesi, TUAM da Micromeritics Marka Autopore IV Model Civa Porozimetre kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonuçları hedeflenen küçük gözenek boyutuna ulaşıldığını göstermektedir. Analizler sonucunda 1,99-59855,59 psia uygulanan basınç aralığında en küçük gözenek boyutu 3 nm, ortalama gözenek boyutu ise 452 nm olduğu bulunmuştur (Çizelge 4.1.).

Çizelge 4.1. Filtre gözeneklilik sonuçları

En Küçük Test Basıncı (psia)	En Büyük Test Basıncı (psia)	En küçük gözenek çapı (nm)	Ortalama gözenek çapı (nm)	Gözeneklilik (%)
1,99	59855,59	3	452	76%

4.1.3. Hava geçirgenliği ve filtrasyon performansı analizi

Üretilen nanofiber hava filtresinin hava geçirgenliğini belirleme analizi ve filtrasyon performansı analizi Açık Kart Bilgi Teknolojileri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Geçirgenlik testleri TSI 8130'a göre yapılmış ve bu parametreler kullanılmıştır: %2 NaCl test aerosolü, 60 L/dk hava akış hızı, 5,33 sm/s medya hızı. Elektroegirme yöntemi ile üretilen fiberler polipropilen altlık üzerine toplanmıştır. Altlık kullanılmasının nedeni nanofiberlerin rijit bir şekilde durmasını sağlamak ve yapılacak testlerde kopma gibi sorunları önlemektir. Kullanılan hidrofobik altlık (PP spunbond non woven 160cm en, 300cm boy ve 60 gsm) BASAL technical textile firmasından temin edilmiştir.

Çizelge 4.2. Hava geçirgenliği ve filtrasyon performansı test sonuçları

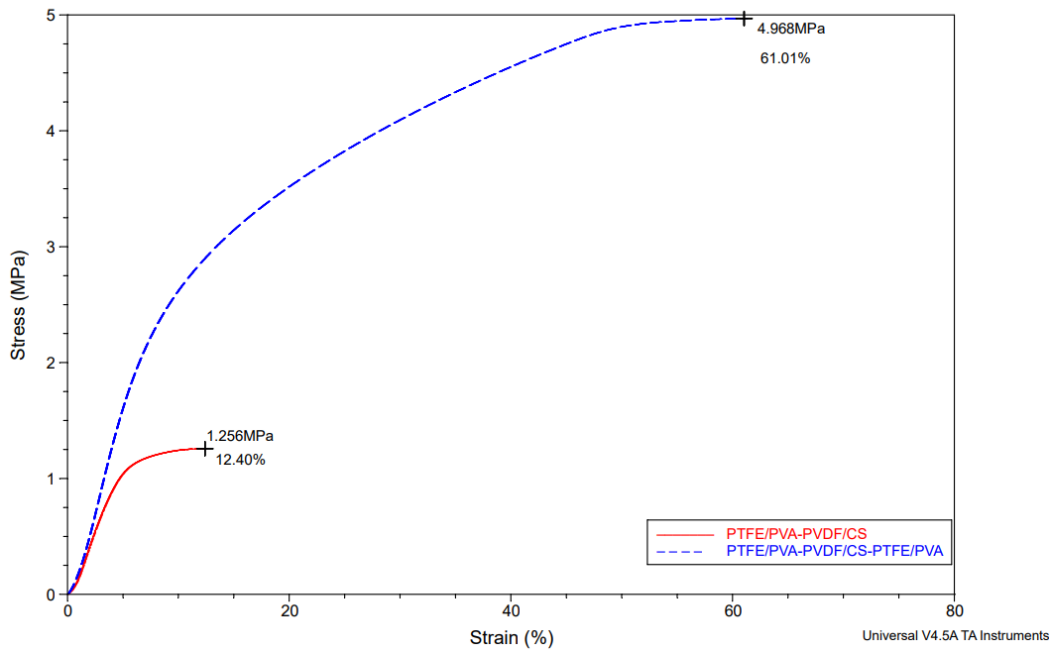
Malzeme	Direnç (Pa)	Pen (%)	Filtrasyon verimliliği (%)
PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA	305,9	0.016	99.99
PTFE@PVA/PVDF@CS	186,5	5.910	94.09

Covid-19 virüsünü yakalama ve bağlı olduğu aerosolünü yakalama analizi, 50-500 nm'lik sodyum klorür aerosolleri ile simüle edildi. Covid-19 virüsünün boyutunun (80-140 nm'dir) 50-500 nm'lik sodyum klorür aerosollerinin boyut aralığında olması simülasyon için yeterli olmuştur (X. Zhao ve diğerleri, 2017). Çapları üniform, düz ve boncuksuz olan üç katmanlı (PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA) ve iki katmanlı (PTFE@PVA/PVDF@CS) nanofiber filtre sırasıyla %99,99 ve %94,09 gibi bir verim ile yakalama gerçekleştirdi (Çizelge 4.2.). Sonuçlar karşılaştırıldığında, katman sayısı arttıkça basınç düşüşünün arttığı ve beraberinde de filtrasyon verimliliğinin arttığı

görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda filtre, HEPA sınıfına girmektedir (Bulgurcu, 2015).

4.1.4. Mekanik dayanıklılık analizi

Çekme testleri için, nanofiber filtre katmanları aynı koşullarda üretilmiş ve çekme testleri hizmet alımı ile Ege Üniversitesi MATAAL da TA Instruments Q800 DMA (Dinamik Mekanik Analiz) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Testler 37°C’de 0,1N/dk kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerden elde edilen gerilim-gerinim eğrilerinden faydalanılarak filtrenin kopma uzaması (%), Çekme dayanımı (MPa) değerleri belirlenmiştir. Kopma testlerinde kullanılan örneklerin eni 10 cm, boyu 10 cm’dir. Şekil 4.7.’deki gerilim-gerinim grafiğinde görüldüğü gibi ölçümler sonucunda üretilen üç katmanlı filtrenin, iki katmanlı filtreye göre mukavemetin yüksek olması, üç katmanlı nanofiberler açısından beklenen bir sonuç olduğu için, elde edilen sonuçlarla bu doğrultuda uyumludur (X. Zhao ve diğerleri, 2017). Mekanik analizin test sonuçları çizelge 4.3.’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Nanofiber filtre katmanlarının gerilim-gerinim grafiği

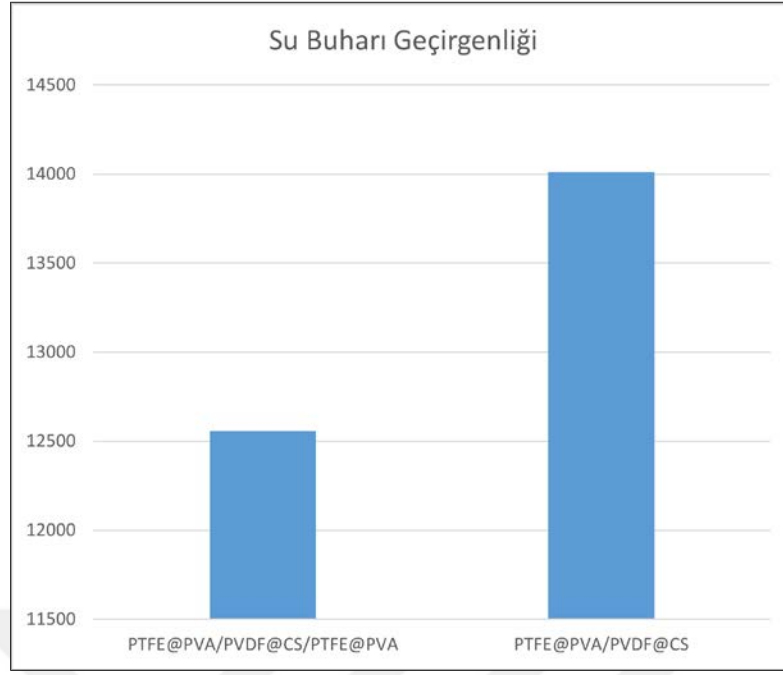
Çizelge 4.3. Mekanik analiz test sonuçları

Malzeme	Çekme Dayanımı (Mpa)	Kopma Uzaması (%)
PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA	4,96 MPa	61,01
PTFE@PVA/PVDF@CS	1,25 MPa	12,40

4.1.5. Nem buhar iletim hızı (MVTR) / su buharı geçirgenliği

MVTR sonuçları Çizelge 4.4.'de gösterilmiştir. İki ve üç katmanlı nanoliflerin MVTR çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre MVTR değerleri sırasıyla 12.94 ve 13.25 $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ olarak bulunmuş ve bu değerler 10.00 ile 15.00 $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ arasında belirtilen literatür aralığı içindedir (X. Zhao ve diğerleri, 2017). Üç katmanlı filtrenin iki katmanlı filtreye göre düşük sonuç göstermesinin nedeni, üç katmanlı yapının nanolif sayısını artırarak, nanolifler içinde daha yoğun ve daha sıkı bir şekilde paketlenmiş bir yapının üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla filtreden nem buharı geçiş kolaylığı azaldı ve sonuç olarak MVTR iki katmanlı filtreye göre düşük sonuçlanmıştır.

Temizlenebilirlik için kullanılan polimerlerin mukavemetlerinin, temas açısının ve düşük buhar iletim hızının (MVTR) yüksek olması oldukça önemlidir. Geçirgenlik, polimer içeriğindeki suyun çözünürlüğüne ve difüzyonuna bağlıdır. Bu özellik film yapısı, plastikleştirici, ortamın bağıl nemi ve çevrenin sıcaklığı ile ilgilidir (X. Zhao ve diğerleri, 2017). Üç katmanlı nanofiber filtrenin, özellikle ikinci katmanındaki PVDF/CS polimerlerinin MVTR açısından gradyan bir yapı içinde olması bu açıdan önemlidir. Bu çalışmada nanofiber filtredeki ikinci katmanın oluşturduğu gradyan yapılı (hidrofobik ve hidrofilik bir geçiş olması) kıvrımlı yolun etkisi ile su buharı geçirgenliğinin artması (MVTR) gerçekleşmiştir. Şekil 4.8.'de ölçüm sonuçları yer almaktadır.



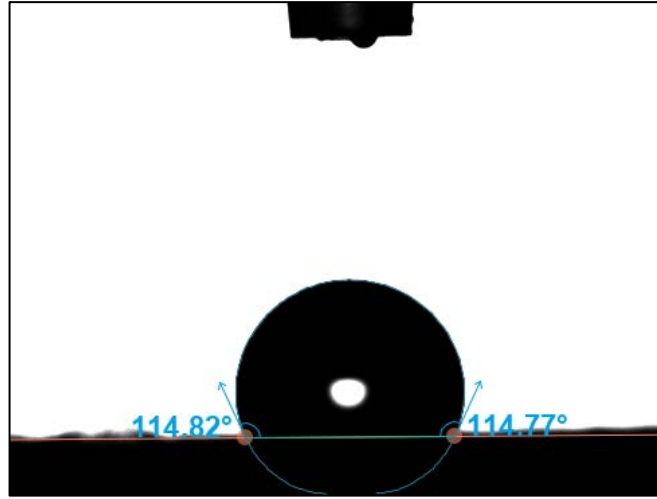
Şekil 4.8. Su buharı geçirgenlik grafiği

Çizelge 4.4. Üç katmanlı ve iki katmanlı filtrenin nem buhar hızı (MVTR) değerleri

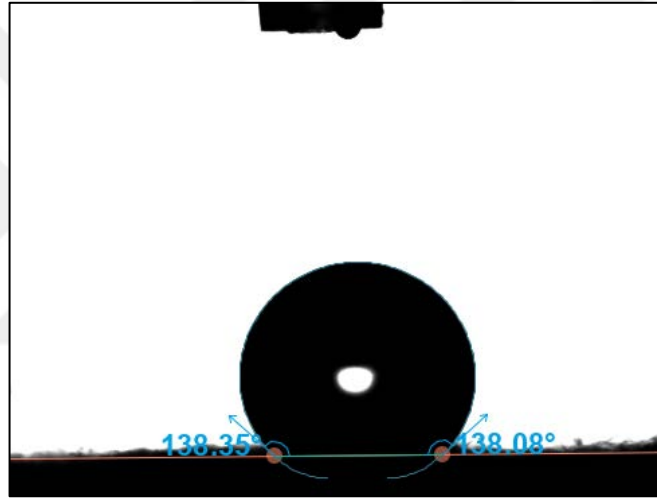
Numune	MVTR (gm ⁻² d ⁻¹)
PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA	12,940
PTFE@PVA/PVDF@CS	13,250

4.1.6. Yüzey temas açıcı analizi

Temas açısı ölçümü, nanofiber filtrelerin hidrofilik-hidrofobik özelliklerini araştırmak için uygun ve yaygın bir yöntemdir. Temas açısı değeri, iskelenin hidrofobikliği ve hidrofilikliği ile ilgilidir: Temas açısı değeri ne kadar düşükse, iskelenin hidrofilikliği o kadar yüksek olur. Filtre katmanlarına ait yüzeylerdeki su temas açısı Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. PTFE@PVA/PVDF@CS Yüzey temas açısı



Şekil 4.10. PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA Yüzey temas açısı

Çizelge 4.5. Yüzey temas açısı değerleri

Numune	Temas açısı (CA) (°)
PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA	138,35
PTFE@PVA/PVDF@CS	114,82

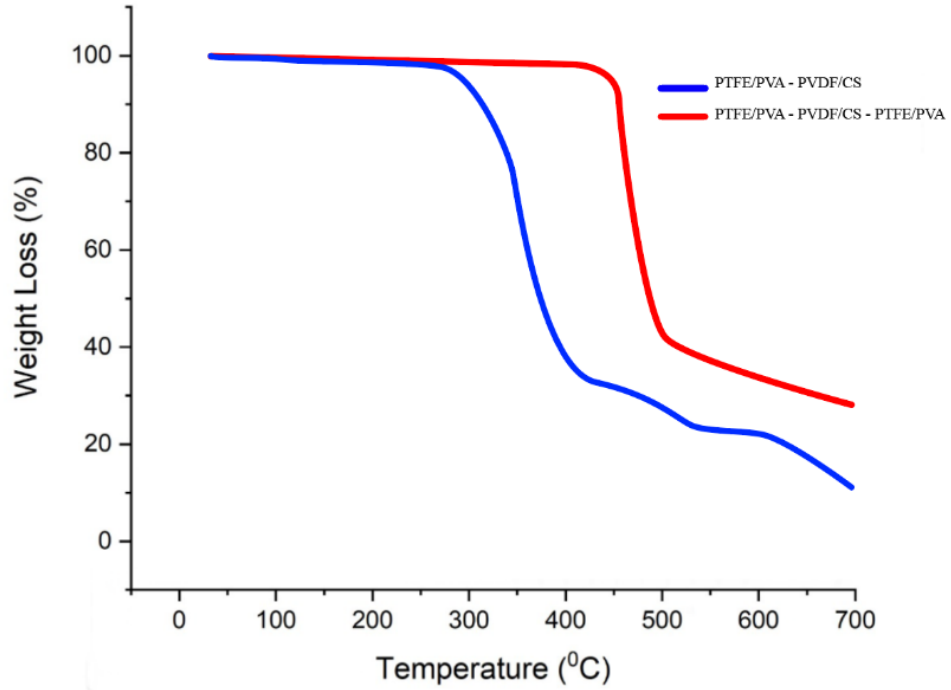
Temas açısı analiz değerleri, iki ve üç katmanlı nanoliflerin sırasıyla 114.82° ve 138.35° temas açısı değerlerine sahip olduğunu göstermektedir (Çizelge 4.5.). Daha yüksek bir temas açısı (90 dereceden büyük), daha yüksek bir hidrofobiklik derecesine karşılık gelir (X. Zhao ve diğerleri, 2017). Bu durumda üç katmanlı nanoliflerin temas açısı daha yüksek olduğundan iki katmanlı nanoliflere göre daha hidrofobik

olduklarını düşündürür. Şekil 4.10. üç katmandan oluştuğu ve filtrenin dış katmanlarında yüksek hidrofobik malzeme PTFE'nin bulunmasıyla birlikte, Şekil 4.9.'a göre daha yüksek temas açısının oluşması, bu bağlamda tutarlıdır (Li ve diğerleri, 2019).

Daha yüksek hidrofobiklik, nanoliflerin nemi emmeye karşı daha büyük bir dirence sahip olduğu anlamına gelir, bu da onları daha sağlam ve nemden kaynaklanan hasarı önlemede etkili kılar. Bu, hava filtrelerinin işlevselliğini ve dayanıklılığını sağlamak için MVTR'nin belirli bir aralıkta (10,00 ila 15,00 gm-2d-1) tutulmasını öneren literatür yönergeleriyle uyumludur. Daha yüksek derecede hidrofobikliğe sahip olan üç katmanlı nanolifler, yeterli hava geçişi ve filtrasyona izin verirken nemi etkili bir şekilde yönetebildikleri için hava filtresi uygulamaları için daha uygundur. Yüksek hidrofobikliği, yüzeyde tutulan partiküllerin su damlacıklar ile yıkanarak kuru ve temiz bir membran bırakacağı için kendi kendini temizleyen bir yüzey sağlar (M. Zhao ve diğerleri, 2020).

Üç katmanlı nanoliflerdeki daha yüksek nanolif sayısı (daha yoğun bir yapıyla sonuçlanır) ve daha yüksek hidrofobikliğin kombinasyonu, hava filtreleri olarak gelişmiş performanslarına katkıda bulunur. Nemden kaynaklanan hasarı etkili bir şekilde önleyebilirler ve zaman içinde işlevselliklerini koruyabilirler, bu da literatür yönergeleriyle desteklendiği gibi hava filtreleme uygulamaları için onları uygun bir seçim haline getirir (Li ve diğerleri, 2019).

4.1.7. Termogravimetrik analizi



Şekil 4.11. İki katmanlı ve üç katmanlı filtrenin termogravimetrik grafiği

Şekil 4.11. iki ve üç katmanlı nano lifler için TGA eğrilerini göstermektedir. İki katmanlı nanolifler, sıcaklık 700 °C'ye çıktıkça beş ağırlık kaybı aşaması sergiledi. 50-100 °C (ağırlık kaybı yüzdesi) kadar düşük, 100-300 °C civarında ikinci ağırlık kaybına ilerleyen hafif bir azalma gözlemlendi, bu da nanofiberlerin yüzeyinde çözücülerin ve birkaç oksijen içeren fonksiyonel grubun kaybına bağlanabilir (Chanachai ve diğerleri, 2010). Üçüncü ağırlık kaybı, nanofiber polimerlerin ayrışmasına atfedilen 300-400 °C civarında başlayan en önemli kayıptır. Dördüncü ağırlık kaybı 400-500 °C civarında görülmüş ve sonuncusu 575-700 °C'de görülmüştür. Sonuncu ağırlık kaybının kalan nanofiber omurgaların aşama aşama azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Olvera Bernal ve diğerleri, 2023).

Öte yandan, üç katmanlı nanolifler, yalnızca üç kilo kaybı aşaması göstererek daha yüksek stabilite gösterdiler. 100-480 °C'den hafif ve düşük ağırlık azalması, iki katmanlı nanoliflerde olduğu gibi, çözücülerin kaybı ve nanoliflerin yüzeyindeki çeşitli oksijen içeren fonksiyonel grupların bozunmasıyla ilişkilendirilir. İkinci kilo kaybı; nanofiber polimerlerin ayrışmasına atfedilen 480-500 °C civarında meydana gelen başlıca olaylar olarak kabul edilir. İki katmanlı nanoliflerle karşılaştırıldığında,

bu aşama, üç katmanlı sistemdeki PTFE@PVA katmanının eklenmesi nedeniyle sonraki aşamada gerçekleşti. Son olarak, nano elyafın omurgalarının daha fazla bozulması nedeniyle 500-700'de üçüncü bozulma gözlemlendi.

Genel olarak, nanofiber malzemeler, literatürle uyumlu olarak yüksek bozunma sıcaklığına sahip sağlam malzemelerdir (Yeo ve diğerleri, 2020).



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu çalışmada üç katmanlı PTFE@PVA/PVDF@CS/PTFE@PVA nanofiber hava filtresi özellikleri belirlenmiş ve filtre performansı incelenmiştir.

- PTFE içeriği arttırıldığında, PTFE/PVA fiberleri fiberli yapılardan boncuklu ıslak fiber toplanması görülmüştür. 10:1'lik bir PTFE/PVA kütle oranı ile sadece boncuk benzeri yapılar üretildi. PTFE/PVA'nın kütle oranı arttıkça, toplayıcıda fiberler yerine reçineli ıslak ve yapışkan bir toplanma meydana geldi. Kütle oranları 2:1'den 10:1'e yükseldiğinde, düzensiz fiber atımı meydana geldi. Bu da, PTFE fiberlerinin neden daha yüksek kütle oranlarında fiberli bir yapıdan boncuk benzeri bir yapıya dönüştüğünü açıklar. Bu çalışmada, en uygun fiber elde edilimi 6:1'lik bir PTFE/PVA kütle oranında elde edilmiştir.
- MVTR değerinin katman sayısının artmasıyla azaldığı gözlenmiştir.
- Elde edilen nanofiber filtreler, virüsleri simüle eden Sodyum klorür (NaCl (50-500nm)) üzerinde yüksek yakalama aktivitesi göstermiştir.
- Nanofiberlerin oluşturmuş olduğu kıvrımlı yolun ve gözenekliliğin etkisiyle filtrenin katman sayısının artması ile filtreleme performansının arttığı gözlenmiştir. İki ve üç katmanlı filtrenin filtrasyon performansı sırasıyla %94,99 ve %99,99, basınç düşüşü ise sırasıyla 186,5 Pa ve 305,9 Pa olarak ölçülmüştür.
- Üç katmanlı filtre üzerinde yapılan gözeneklilik analizinin sonucuna göre en küçük gözenek boyutu 3 nm, ortalama gözenek boyutu ise 452 nm olarak ölçülmüştür.
- Yapılan mekanik test sonucunda üç katmanlı bir yapı oluşturması mekanik özelliklerini olumlu etkilediği gözlenmiştir. İki ve üç katmanlı filtrenin mekanik dayanımı sırasıyla 1,25 MPa ve 4,96 MPa olarak ölçülmüştür.
- Üç katmanlı filtrenin yüzey temas açısının, iki katmanlı filtrenin yüzey temas açısından yüksek olduğu gözlenmiştir.
- Nanofiber filtredeki ikinci katmanın oluşturduğu gradyan yapı (hidrofobik ve hidrofilik bir geçiş olması) kıvrımlı yolun etkisi ile su buharı geçirgenliğinin azalması (MVTR) gözlenmiştir.

- Yapılan termogravimetrik analizi sonucunda üç katmanlı yapının iki katmanlı yapıya göre sıcaklık dayanımının yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun da nedeni sıcaklık dayanımı yüksek olan PTFE malzemesinin iki katmanlı yapıya göre, üç katmanlı yapının içeriğinde daha fazla yer almasıdır.
- Üretilen filtreleere farklı polimerlerin eklenmesiyle bariyer ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi desteklenebilir.
- Filtrenin kalınlığına göre filtreleme performansı araştırılabilir.
- Filtre katman sayısı değiştirilerek filtreleme performansı üzerine etkisi araştırılabilir.
- Filtrenin farklı virüs çeşitleri üzerindeki etkileri araştırılarak, fiberin antimikrobiyal etkisi araştırılabilir.
- Toplayıcı türünün fiber çapları üzerinde etkili olabileceği düşünüldüğünden dolayı, farklı toplayıcı çeşitleri geliştirilerek, fiber çapları üzerinde etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Adanur, S. (1995). *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*.
- Ahmad, N. A., Leo, C. P., Ahmad, A. L. ve Ramli, W. K. W. (2015). Membranes with great hydrophobicity: A review on preparation and characterization. *Separation and Purification Reviews*, 44(2), 109–134. doi:10.1080/15422119.2013.848816
- Akduman, C. ve Akcakoca Kumbasar, E. P. (2018). Nanofibers in face masks and respirators to provide better protection. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 460(1), 0–5. doi:10.1088/1757-899X/460/1/012013
- Andrady, A. L. (2005). *Science and Technology of Rubber*. *Science and Technology of Rubber*. doi:10.1016/B978-0-12-464786-2.X5000-7
- Armanious, A., Aeppli, M., Jacak, R., Refardt, D., Sigstam, T., Kohn, T. ve Sander, M. (2016). Viruses at Solid-Water Interfaces: A Systematic Assessment of Interactions Driving Adsorption. *Environmental Science and Technology*, 50(2), 732–743. doi:10.1021/acs.est.5b04644
- Ayutsede, J., Gandhi, M., Sukigara, S., Micklus, M., Chen, H. E. ve Ko, F. (2005). Regeneration of Bombyx mori silk by electrospinning. Part 3: Characterization of electrospun nonwoven mat. *Polymer*, 46(5), 1625–1634. doi:10.1016/j.polymer.2004.11.029
- Bai, Y., Han, C. B., He, C., Gu, G. Q., Nie, J. H., Shao, J. J., ... Wang, Z. L. (2018). Washable Multilayer Triboelectric Air Filter for Efficient Particulate Matter PM_{2.5} Removal. *Advanced Functional Materials*, 28(15), 1–8. doi:10.1002/adfm.201706680
- Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, C., Bernstein, I. L., Bernstein, J. A., Nel, A., ... Williams, P. B. (2004). Health effects of air pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 114(5), 1116–1123. doi:10.1016/j.jaci.2004.08.030
- Bhardwaj, N. ve Kundu, S. C. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, 28(3), 325–347. doi:10.1016/j.biotechadv.2010.01.004

- Brown, R. C. (2001). Filtration in industrial hygiene. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 62(5), 633–643. doi:10.1080/15298660108984663
- Bulgurcu, H. (2015). Bölüm -3 havalandırma filtreleri 3.1. *Havalandırma*, 54–93.
- Bunyan, N. N., Chen, J., Chen, I. ve Farboodmanesh, S. (2006). Electrostatic effects on electrospun fiber deposition and alignment. *ACS Symposium Series*, 918, 106–120. doi:10.1021/bk-2006-0918.ch008
- Casper, C. L., Stephens, J. S., Tassi, N. G., Chase, D. B. ve Rabolt, J. F. (2004). Controlling surface morphology of electrospun polystyrene fibers: Effect of humidity and molecular weight in the electrospinning process. *Macromolecules*, 37(2), 573–578. doi:10.1021/ma0351975
- Chanachai, A., Meksup, K. ve Jiratananon, R. (2010). Coating of hydrophobic hollow fiber PVDF membrane with chitosan for protection against wetting and flavor loss in osmotic distillation process. *Separation and Purification Technology*, 72(2), 217–224. doi:10.1016/j.seppur.2010.02.014
- Cho, E., Kim, C., Kook, J. K., Jeong, Y. Il, Kim, J. H., Kim, Y. A., ... Hwang, C. H. (2012). Fabrication of electrospun PVDF nanofiber membrane for Western blot with high sensitivity. *Journal of Membrane Science*, 389(October 2019), 349–354. doi:10.1016/j.memsci.2011.10.047
- Chua, M. H., Cheng, W., Goh, S. S., Kong, J., Li, B., Lim, J. Y. C., ... Loh, X. J. (2020). Face Masks in the New COVID-19 Normal: Materials, Testing, and Perspectives. *Research*, 2020, 1–40. doi:10.34133/2020/7286735
- Çiftci, Ş., Özek, S., Aksoy, S. A., Aksoy, K. ve Göde, F. (2015). Nanokil Katkılı PVA/Kitosan Nanolif Sentezi ve Karakterizasyonu Synthesis and Characterization of PVA/Chitosan Nanofiber Added Nanoclay. *SDU Journal of Science (E-Journal)*, 10(1), 118–128.
- Cohen, A. J., Anderson, H. R., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., ... Smith, K. (2005). The global burden of disease due to outdoor air pollution. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A*, 68(13–14), 1301–1307. doi:10.1080/15287390590936166
- Desai, K., Kit, K., Li, J., Michael Davidson, P., Zivanovic, S. ve Meyer, H. (2009).

- Nanofibrous chitosan non-wovens for filtration applications. *Polymer*, 50(15), 3661–3669. doi:10.1016/j.polymer.2009.05.058
- Doğan, G. (2006). Kuru Hava Filtrasyonunda Kullanılan Dokusuz Yüzeylerin Performansları Üzerine Bir Çalışma.
- Drosou, C., Krokida, M. ve Biliaderis, C. G. (2018). Composite pullulan-whey protein nanofibers made by electrospinning: Impact of process parameters on fiber morphology and physical properties. *Food Hydrocolloids*, 77, 726–735. doi:10.1016/j.foodhyd.2017.11.014
- Epps, B. H. H. ve Leonas, K. K. (y.y.). ORIGINAL PAPER / Peer Reviewed Pore Size and Air Permeability Of Four Nonwoven Fabrics, 1–8.
- Fahimirad, S., Fahimirad, Z. ve Sillanpää, M. (2021). Efficient removal of water bacteria and viruses using electrospun nanofibers. *Science of the Total Environment*, 751. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141673
- Fedel, T. (2012). Air filtration: Evaluating filtration efficiency. *Filtration and Separation*, 49(6), 37–39. doi:10.1016/S0015-1882(12)70289-6
- Feng, S., Zhong, Z., Wang, Y., Xing, W. ve Drioli, E. (2018). Progress and perspectives in PTFE membrane: Preparation, modification, and applications. *Journal of Membrane Science*, 549(December 2017), 332–349. doi:10.1016/j.memsci.2017.12.032
- Frank. (2004). From Textile to Geotextiles. In: *Seminar in Honour of Professor Robert Koerner*, (December), 1–19.
- Güngör, F. (2017). Sızdırmaz Conta Malzemesinin Aksiyomatik Tasarım Metoduyla Seçilmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(1), 1–10. doi:10.31202/ecjse.289632
- Gustavsson, J. (2003). New developments in air filter test methods and classification. *Filtration and Separation*, 33(2), 155–160. doi:10.1016/s0015-1882(97)84207-3
- Huan, S., Liu, G., Han, G., Cheng, W., Fu, Z., Wu, Q. ve Wang, Q. (2015). Effect of experimental parameters on morphological, mechanical and hydrophobic properties of electrospun polystyrene fibers. *Materials*, 8(5), 2718–2734.

- Jarusuwannapoom, T., Hongrojjanawiwat, W., Jitjaicham, S., Wannatong, L., Nithitanakul, M., Pattamaprom, C., ... Supaphol, P. (2005). Effect of solvents on electro-spinnability of polystyrene solutions and morphological appearance of resulting electrospun polystyrene fibers. *European Polymer Journal*, 41(3), 409–421. doi:10.1016/j.eurpolymj.2004.10.010
- Jia, H., Zhu, G., Vugrinovich, B., Kataphinan, W., Reneker, D. H. ve Wang, P. (2002). Enzyme-carrying polymeric nanofibers prepared via electrospinning for use as unique biocatalysts. *Biotechnology Progress*, 18(5), 1027–1032. doi:10.1021/bp020042m
- Kumar, S., Jang, J., Oh, H., Jung, B. J., Lee, Y., Park, H., ... Lee, J. S. (2021). Antibacterial Polymeric Nanofibers from Zwitterionic Terpolymers by Electrospinning for Air Filtration. *ACS Applied Nano Materials*, 4(3), 2375–2385. doi:10.1021/acsanm.0c02366
- Kurtuluş, G. ve Vardar, F. (2020). Kitosanin Özellikleri, Uygulama Alanları, Bitki Sistemlerine Etkileri. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(3), 222–235. doi:10.7240/jeps.635430
- Ladhani, L., Pardon, G., Meeuws, H., Van Wesenbeeck, L., Schmidt, K., Stuyver, L. ve Van Der Wijngaart, W. (2017). Sampling and detection of airborne influenza virus towards point-of-care applications. *PLoS ONE*, 12(3), 1–15. doi:10.1371/journal.pone.0174314
- Larrondo, L. ve Manley, R. S. J. (1981). Electrostatic Fiber Spinning From Polymer Melts - 2. Examination of the Flow Field in an Electrically Driven Jet. *Journal of polymer science. Part A-2, Polymer physics*, 19(6), 921–932. doi:10.1002/pol.1981.180190602
- Leung, W. W. F. ve Sun, Q. (2020). Electrostatic charged nanofiber filter for filtering airborne novel coronavirus (COVID-19) and nano-aerosols. *Separation and Purification Technology*, 250(February), 116886. doi:10.1016/j.seppur.2020.116886
- Li, X., Wang, X. X., Yue, T. T., Xu, Y., Zhao, M. L., Yu, M., ... Long, Y. Z. (2019).

- Waterproof-breathable PTFE nano- and microfiber membrane as high efficiency PM2.5 filter. *Polymers*, 11(4), 1–14. doi:10.3390/polym11040590
- Liu, C., Hsu, P. C., Lee, H. W., Ye, M., Zheng, G., Liu, N., ... Cui, Y. (2015). Transparent air filter for high-efficiency PM 2.5 capture. *Nature Communications*, 6. doi:10.1038/ncomms7205
- Liu, Haiqing, Kameoka, J., Czaplewski, D. A. ve Craighead, H. G. (2004). Polymeric nanowire chemical sensor. *Nano Letters*, 4(4), 671–675. doi:10.1021/nl049826f
- Liu, Hui, Huang, J., Mao, J., Chen, Z., Chen, G. ve Lai, Y. (2019). Transparent Antibacterial Nanofiber Air Filters with Highly Efficient Moisture Resistance for Sustainable Particulate Matter Capture. *iScience*, 19, 214–223. doi:10.1016/j.isci.2019.07.020
- Lukáš, D., A, A, A. S., Martinová, L., A, Vodsed'áľková, K., ... A, & M. K. (2009). Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of the twenty-first century). *Textile Progress*, 40(May), 01–140.
- Megelski, S., Stephens, J. S., Bruce Chase, D. ve Rabolt, J. F. (2002). Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers. *Macromolecules*, 35(22), 8456–8466. doi:10.1021/ma020444a
- Mit-Uppatham, C., Nithitanakul, M. ve Supaphol, P. (2004). Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: Effect of solution conditions on morphology and average fiber diameter. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 205(17), 2327–2338. doi:10.1002/macp.200400225
- Neisiany, R. E., Enayati, M. S., Kazemi-Beydokhti, A., Das, O. ve Ramakrishna, S. (2020). Multilayered Bio-Based Electrospun Membranes: A Potential Porous Media for Filtration Applications. *Frontiers in Materials*, 7(April), 1–6. doi:10.3389/fmats.2020.00067
- Oflaz, K. (2016). MANYETİK NANOFİBER MEMBRANLAR. *Revista Brasileira de Ergonomia*, 9(2), 10. doi:10.5151/cidi2017-060
- Olvera Bernal, R. A., Olekhovich, R. O. ve Uspenskaya, M. V. (2023). Chitosan/PVA Nanofibers as Potential Material for the Development of Soft Actuators. *Polymers*, 15(9). doi:10.3390/polym15092037

- Pillay, V., Dott, C., Choonara, Y. E., Tyagi, C., Tomar, L., Kumar, P., ... 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*, 2013. doi:10.1155/2013/789289
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.-E., Lim, T.-C. ve Ma, Z. (2005). *Front Matter. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, i–xi. doi:10.1142/9789812567611_fmatter
- Reis, R. van ve Zydney, A. (2007). Bioprocess membrane technology. *Journal of Membrane Science*, 297(1–2), 16–50. doi:10.1016/j.memsci.2007.02.045
- Ruiz-Hitzky, E., Darder, M., Wicklein, B., Ruiz-Garcia, C., Martín-Sampedro, R., del Real, G. ve Aranda, P. (2020). Nanotechnology Responses to COVID-19. *Advanced Healthcare Materials*, 9(19), 1–26. doi:10.1002/adhm.202000979
- Sambaer, W., Zatloukal, M. ve Kimmer, D. (2011). 3D modeling of filtration process via polyurethane nanofiber based nonwoven filters prepared by electrospinning process. *Chemical Engineering Science*, 66(4), 613–623. doi:10.1016/j.ces.2010.10.035
- Sanità di Toppi, L., Sanità di Toppi, L. ve Bellini, E. (2020). Novel Coronavirus: How Atmospheric Particulate Affects Our Environment and Health. *Challenges*, 11(1), 6. doi:10.3390/challe11010006
- Selbes, M. (2013). Elektro-eğirme yöntemiyle nanofiber tabakalı hava filtresi üretimi ve performans testleri. 66, עולון הננוטק(1997), 39–37.
- Si, Y., Fu, Q., Wang, X., Zhu, J., Yu, J., Sun, G. ve Ding, B. (2015). Superelastic and Superhydrophobic Nanofiber-Assembled Cellular Aerogels for Effective Separation of Oil/Water Emulsions. *ACS Nano*, 9(4), 3791–3799. doi:10.1021/nn506633b
- Si, Y., Yu, J., Tang, X., Ge, J. ve Ding, B. (2014). Ultralight nanofibre-assembled cellular aerogels with superelasticity and multifunctionality. *Nature Communications*, 5. doi:10.1038/ncomms6802
- Stokols, D., Altman, I. ve Wiley, J. (1987). *HANDBOOK OF Edited by. Russell The Journal Of The Bertrand Russell Archives*.

- Taylor, G. ve A, P. R. S. L. (1969). Electrically driven jets. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 313(1515), 453–475. doi:10.1098/rspa.1969.0205
- Vaughn, E. ve Ramachandran, G. (2002). Fiberglass Vs. Synthetic Air Filtration Media. *International Nonwovens Journal*, os-11(3), 1558925002OS–01. doi:10.1177/1558925002os-01100309
- Wan, H., Wang, N., Yang, J., Si, Y., Chen, K., Ding, B., ... Yu, J. (2014). Hierarchically structured polysulfone/titania fibrous membranes with enhanced air filtration performance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 417, 18–26. doi:10.1016/j.jcis.2013.11.009
- Wang, N., Raza, A., Si, Y., Yu, J., Sun, G. ve Ding, B. (2013). Tortuously structured polyvinyl chloride/polyurethane fibrous membranes for high-efficiency fine particulate filtration. *Journal of Colloid and Interface Science*, 398, 240–246. doi:10.1016/j.jcis.2013.02.019
- Wang, N., Si, Y., Wang, N., Sun, G., El-Newehy, M., Al-Deyab, S. S. ve Ding, B. (2014). Multilevel structured polyacrylonitrile/silica nanofibrous membranes for high-performance air filtration. *Separation and Purification Technology*, 126, 44–51. doi:10.1016/j.seppur.2014.02.017
- Wang, N., Wang, X., Ding, B., Yu, J. ve Sun, G. (2012). Tunable fabrication of three-dimensional polyamide-66 nano-fiber/nets for high efficiency fine particulate filtration. *Journal of Materials Chemistry*, 22(4), 1445–1452. doi:10.1039/c1jm14299b
- Wang, S., Zhao, X., Yin, X., Yu, J. ve Ding, B. (2016). Electret Polyvinylidene Fluoride Nanofibers Hybridized by Polytetrafluoroethylene Nanoparticles for High-Efficiency Air Filtration. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(36), 23985–23994. doi:10.1021/acsami.6b08262
- Waqas Munir, M. ve Ali, U. (2020). Classification of Electrospinning Methods. *Nanorods and Nanocomposites*, 1–19. doi:10.5772/intechopen.88654
- Yang, J.H., L., I.S., T. ve T.Y., K. (2002). Particle Filtration with an Electret of Nonwoven Polypropylene Fabric, 1099–1104.

- Yang, Z., Peng, H., Wang, W. ve Liu, T. (2010). Bacterial Nanocellulose-Reinforced Arabinoxylan Films. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(5), 2658–2667. doi:10.1002/app
- Yeo, J. C. C., Kai, D., Teng, C. P., Lin, E. M. J. R., Tan, B. H., Li, Z. ve He, C. (2020). Highly Washable and Reusable Green Nanofibrous Sorbent with Superoleophilicity, Biodegradability, and Mechanical Robustness. *ACS Applied Polymer Materials*, 2(11), 4825–4835. doi:10.1021/acsapm.0c00786
- Yeom, B. Y., Shim, E. ve Pourdeyhi, B. (2010). Boehmite nanoparticles incorporated electrospun nylon-6 nanofiber web for new electret filter media. *Macromolecular Research*, 18(9), 884–890. doi:10.1007/s13233-010-0910-5
- Yuan, X. Y., Zhang, Y. Y., Dong, C. ve Sheng, J. (2004). Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning. *Polymer International*, 53(11), 1704–1710. doi:10.1002/pi.1538
- Zarayneh, S., Sepahi, A. A., Jonoobi, M. ve Rasouli, H. (2018). Comparative antibacterial effects of cellulose nanofiber, chitosan nanofiber, chitosan/cellulose combination and chitosan alone against bacterial contamination of Iranian banknotes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 1045–1054. doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.06.160
- Zhang, L., Li, L., Wang, L., Nie, J. ve Ma, G. (2020). Multilayer electrospun nanofibrous membranes with antibacterial property for air filtration. *Applied Surface Science*, 515(February). doi:10.1016/j.apsusc.2020.145962
- Zhang, S., Liu, H., Yin, X., Li, Z., Yu, J. ve Ding, B. (2017). Tailoring mechanically robust poly(m-phenylene isophthalamide) nanofiber/nets for ultrathin high-efficiency air filter. *Scientific Reports*, 7, 1–11. doi:10.1038/srep40550
- Zhang, S., Tang, N., Cao, L., Yin, X., Yu, J. ve Ding, B. (2016). Highly Integrated Polysulfone/Polyacrylonitrile/Polyamide-6 Air Filter for Multilevel Physical Sieving Airborne Particles. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 8(42), 29062–29072. doi:10.1021/acsami.6b10094
- Zhao, M., Liao, L., Xiao, W., Yu, X., Wang, H., Wang, Q., ... Cui, Y. (2020). Household Materials Selection for Homemade Cloth Face Coverings and Their

Filtration Efficiency Enhancement with Triboelectric Charging. *Nano Letters*, 20(7), 5544–5552. doi:10.1021/acs.nanolett.0c02211

Zhao, S., Wu, X., Wang, L. ve Huang, Y. (2004). Electrospinning of ethyl-cyanoethyl cellulose/tetrahydrofuran solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(1), 242–246. doi:10.1002/app.13196

Zhao, X., Li, Y., Hua, T., Jiang, P., Yin, X., Yu, J. ve Ding, B. (2017). Cleanable Air Filter Transferring Moisture and Effectively Capturing PM2.5. *Small*, 1–11. doi:10.1002/sml.201603306

Zong, X., Kim, K., Fang, D., Ran, S., Hsiao, B. S. ve Chu, B. (2002). Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes. *Polymer*, 43(16), 4403–4412. doi:10.1016/S0032-3861(02)00275-6

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Ad Soyad : Ö*** E*****
Uyruk : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi: ***/**/****
Medeni Hali : Bekar
Telefon : 0 **** * * *
E-posta : ****@gmail.com

Eğitim

Alınan Derece	Aldığı Kurum/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lise	Balıkesir Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2014
Lisans	Balıkesir Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi	2019
Yüksek Lisans	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	2022

Dil Bilgisi

Dil	Seviye
İngilizce	C1
Türkçe	C2

Kongre, Sempozyum, Seminer

İsmi	Konu başlığı
VII. Uluslararası Battalgazi Bilimsel Çalışmalar Kongresi (Malatya, Türkiye)	Yüksek Antiviral Özelliğe Sahip 3D Elektrospun Nanofiber Filtre Üretimi
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Semineri	Doğal Elyaf Kompozit Paneller İçin Termal Yalıtım Malzemeleri ve Doğal Ürünlerin Yalıtımda Kullanılması
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi X1. Fen Bilimleri Araştırma E-Sempozyumu	Doğal Lifler ile Polimerlerin Kompozit Olarak Isı Yalıtımında Kullanılması
mESC-IS 2023 International Symposium on Materials for Energy Storage and Conversion	Electrochemical Properties of Polytetrafluoroethylene (PTFE) Encapsulated in Polyvinylalcohol (PVA) Nanofibers and Their Supercapacitor Application

Proje

Proje Destekçisi	Proje ismi
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi	Yüksek Antiviral Özelliğe Sahip 3D Elektrospun Nanofiber Filtre Üretimi (21/121/01/1/1)

