

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FİLTRASYON UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI
BİMODAL FİLTRE KUMAŞLARININ ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Melike GÜNGÖR

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

Haziran 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FİLTASYON UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI
BİMODAL FİLTRE KUMAŞLARININ ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Melike GÜNGÖR
503181809**

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali KILIÇ

Haziran 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503181809 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Melike GÜNGÖR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FİLTREASYON UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI BİMODAL FİLTRE KUMAŞLARININ ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ali KILIÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ali DEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kenan YILDIRIM
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 17 Mayıs 2021
Savunma Tarihi : 01 Haziran 2021





Hayallerime...



ÖNSÖZ

Tezimde sağlamış olduğu katkılarından, vermiş olduğu kıymetli, manevi desteklerinden dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Ali KILIÇ' a teşekkürlerimi arz ederim. Tez ve makale çalışmalarımı gerçekleştirme fırsatı bulduğum TEMAG Laboratuvarının kapılarını bana açtığı için de kendisine memnuniyetimi ayrıca belirtmek isterim. Tez yazım sürecimde sorduğum sorulara içtenlikle ve açıklayıcı bir şekilde cevap veren, yardımlarını esirgemeyen ve laboratuvar deneyimi kazanmamda büyük emeği olan Mehmet D. ÇALIŞIR'a, ve yine laboratuvara ilk geldiğim yıllarda edindiğim bilgilerde emeği olan Feyza Nur BÜYÜKNALÇACI'ya, Emine CANBAY GÖKÇE'ye ve tüm TEMAG Ailesine de özel olarak teşekkürlerimi iletirim. Tabiki bu süreçte tüm kahrımı çeken ve asla desteğini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür eder, varlıklarını her daim hissettiğimi burada belirtmek isterim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na Araştırma Destek Programları (ARDEB) tarafından bu tez çalışmasına 1003 Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri destekleme programı kapsamında 118M035 hibe numaralı 'Endüstriyel Boyutta Nanolif Üretimi İçin Çözümlenmiş Üfleme Sisteminin Tasarımı, Simülasyonu ve İmalatı' projesi aracılığıyla vermiş oldukları desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Haziran 2021

Melike Güngör
(Tekstil Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Hipotez.....	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
2.1. Partikül Maddeler	7
2.2. Partikül Maddelerin Sınıflandırılması	7
2.3. Partikül Maddelerin Neden Olduğu Problemler	8
2.4. Filtrasyon	8
2.5. Nanolifli Yapılar.....	10
2.6. Bimodal Lifli Yapılar	12
2.7. Nanolif Üretim Yöntemleri	15
2.7.1. Elektro üretim yöntemi.....	15
2.7.2. Çözeltilerden üfleli nanolif üretim yöntemi	19
2.7.3. Elektrik alanlı çözeltilerden üfleli nanolif üretim yöntemi	24
2.7.4. Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemi.....	26
3. DÜŞÜK BASINÇ FARKINA SAHİP YÜKSEK FİLTRE VERİMLİ BİMODAL YAPILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU	29
3.1. Düşük Basınç Farkına Sahip Yüksek Filtre Verimli Bimodal Yapıların Üretimi	29
3.1.1. Malzemeler.....	29
3.1.2. Çözeltilerden üfleli nanolif üretim yöntemi ile bimodal PA6 liflerinin üretimi	30
3.1.3. Santrifüj kuvvetleri ile lif üretim yöntemi kullanılarak bimodal pa6 liflerin üretimi	31
3.1.4. Santrifüj kuvvetleri ile lif üretim yöntemi ve çözeltilerden üfleli nanolif üretim yönteminin kombinlenmesi ile bimodal pa6 liflerinin üretimi	32
3.2. Düşük Basınç Farkına Sahip Yüksek Verimli Bimodal Yapıların Karakterizasyonu.....	33
3.2.1. Viskozite.....	34
3.2.2. Yüzey morfolojisi analizi	35
3.2.3. Hava geçirgenlik testi.....	36
3.2.4. Porozite testi.....	37
3.2.5. Katı hacim değeri	37

3.2.6. Filtrasyon testi	38
3.2.7. Çekme mukavemeti testi	40
3.3. Çözültiden Üflemleri Nanolif Üretim Yöntemi ile Bimodal PA6 Liflerin Üretim Parametreleri	41
3.3.1. Çözültiden üflemleri nanolif üretim yöntemi ile bimodal pa6 liflerin üretim sonuçları	43
3.3.1.1. Çözülti viskozitesi	43
3.3.1.2. Liflerin yüzey morfolojisi	44
3.3.1.3. Hava geçirgenlik analizi	48
3.3.1.4. Porozite ölçümleri	48
3.3.1.5. Katı hacim değeri	49
3.3.1.6. Filtrasyon özellikleri.....	51
3.3.1.7. Mekanik performans.....	54
3.4. Santrifüj Kuvvetleri ile Nanolif Üretim Yöntemi Kullanılarak Bimodal PA6 Liflerin Üretim Parametreleri	56
3.4.1. Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemi kullanılarak bimodal pa6 liflerin üretim sonuçları	59
3.4.1.1. Çözülti viskozitesi	59
3.4.1.2. Liflerin yüzey morfolojisi	59
3.4.1.3. Hava geçirgenlik analizi	64
3.4.1.4. Katı hacim değeri	65
3.4.1.5. Filtrasyon özellikleri.....	66
3.5. Santrifüj Kuvvetleri ile Lif Üretim Yöntemi ve Çözültiden Üflemleri Nanolif Üretim Yönteminin Kombinlenmesi ile Bimodal PA6 Liflerin Üretim Parametreleri.....	67
3.5.1. Santrifüj kuvvetleri ile lif üretim yöntemi ve çözültiden üflemleri nanolif üretim yönteminin kombinlenmesi ile bimodal pa6 liflerin üretim sonuçları	70
3.5.1.1. Liflerin yüzey morfolojisi	70
3.5.1.2. Hava geçirgenlik analizi	74
3.5.1.3. Porozite ölçümleri	75
3.5.1.4. Katı hacim değeri	75
3.5.1.5. Filtrasyon özellikleri.....	77
3.5.1.6. Mekanik performans.....	80
4. GENEL SONUÇLAR.....	83
4.1. Viskozite.....	83
4.2. Yüzey Morfolojisi	83
4.3. Hava Geçirgenliği.....	84
4.4. Katı Hacim Değeri.....	85
4.5. Filtre Performansı.....	85
4.6. Mekanik Performans	86
5. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME	87
6. ÖNERİLER.....	89
6.1. Çalışmanın Uygulama Alanı	89
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	103

KISALTMALAR

PM	: Partikül Madde
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
PA6	: Poliamid 6
GO	: Grafen oksit
PLA	: Polilaktik asit
R-PET	: Geri dönüştürülmüş polietilen
3B	: Üç boyutlu
PSU	: Polisülfon
PCL	: Polikaprolakton
ES	: Elektro üretim yöntemi
EB	: Elektrik alanlı çözeltiden üflemlenmiş nanolif üretim yöntemi
MB	: Eriyikten üflemlenmiş lif üretim yöntemi
SB	: Çözeltiden üflemlenmiş nanolif üretim yöntemi
SB-B	: Çözeltiden üflemlenmiş nanolif üretim yöntemi ile Bimodal yapılar
CS	: Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemi
CS-B	: Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemi ile Bimodal yapılar
PVDF	: Poliviniliden florür
PAN	: Poliakrilonitril
TPU	: Termoplastik poliüretan
PA6,6	: Poliamid 6,6
PVA	: Polivinil alkol
PTFE	: Politetrafloroetilen
PVP	: Polivinilprolidon
PMMA	: Polimetil metakrilat
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PE	: Polietilen
PEO	: Polietilen Oksit
P(VDF-HFP)	: Poli (viniliden-ko-heksafloro propilen)
FA	: Formik asit

AA	: Asetik asit
DMAc	: N,N Dimetilasetamid
EN	: Avrupa normu
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
ULPA	: Ultra düşük penetrasyonlu hava
HEPA	: Yüksek verimli partikül hava
DSÖ	: Dünya Sağlık Örgütü
TENG	: Tribo elektrik nanojeneratörü
MFP	: Ortalama Por Boyutu
QF	: Kalite faktörü



SEMBOLLER

CeO₂	: Seryum oksit
CuO	: Bakır oksit
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
NaCl	: Sodyum klorür
CH₂O₂	: Formik Asit
C₂H₄O₂	: Asetik Asit
Be	: Berry sayısı
Au-Pd	: Altın-Paladyum
N	: Newton
µm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
G	: Gauge
gsm	: Metrekare başına gram
mm	: Milimetre
cm	: Santimetre
ml	: Mililitre
dk	: Dakika
kV	: Kilovolt
Pa	: Paskal
Kn	: Knudsen sayısı
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
F_{centri}	: Merkezkaç kuvveti
F_{fti}	: Sürtünme kuvveti
m	: Çözelti kütlesi
ω	: Jetin dönüş hızı
D	: Eğirme kafasının çapı
π	: Pi sayısı
C	: Sayısal bir sürükleme katsayısı
ρ	: Hava yoğunluğu
α	: Katı hacim değeri

X, kX	: Optik büyütme katsayısı
°C	: Derece
P	: Partikül nüfüzyon değeri (Penetrasyon)
η	: Filtrasyon değeri
ΔP	: Basınç değışimi
C_{up}	: Yukarı akış partikül konsantrasyonu
C_{down}	: Aşağı akış partikül konsantrasyonu
lnP	: Nanopartiküllerin değışimi
λ	: Havanın lifler arası boşluklardan geçtiğı serbest yol
df	: Lif çapı
n_c	: Kalın lif sayısı
R_{cf}	: Lif çap oranı
σ	: Gerilme (Stress)
P	: Yük
A₀	: Numunenin kesit alanı
ε	: Gerinim (Strain)
Δl	: Numunenin uzama miktarı
l₀	: Numunenin ilk boyu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Poliamid 6 polimerinin kimyasal özellikleri.	30
Çizelge 3.2: Çözücülerin kimyasal özellikleri.	30
Çizelge 3.3: Çözeltiden üflemlenilen nanolif üretim cihazına ait teknik özellikler.	30
Çizelge 3.4: Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim cihazına ait teknik özellikler.	32
Çizelge 3.5: Aerosol özellikleri.	39
Çizelge 3.6: SB yönteminde kullanılacak PA6 çözelti parametreleri.	41
Çizelge 3.7: SB ön denemelere ait üretim parametreleri.	42
Çizelge 3.8: SB yönteminde çift nozul ile bimodal filtre kumaşı üretim parametreleri.	43
Çizelge 3.9: SB yönteminde denenmek üzere hazırlanan PA6 çözeltilerine ait viskozite değerleri.	43
Çizelge 3.10: SB-B kodlu filtre kumaşlarına ait hava geçirgenlik değerleri.	48
Çizelge 3.11: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kumaş özellikleri ve katı hacim değerleri.	49
Çizelge 3.12: SB-B kodlu filtre kumaşlarının filtre özellikleri.	52
Çizelge 3.13: CS yönteminde kullanılacak PA6 çözelti parametreleri.	57
Çizelge 3.14: CS ön denemelere ait üretim parametreleri.	57
Çizelge 3.15: Farklı iğne kombinasyonu ile üretilecek CS-B kodlu filtre kumaşlarının üretim parametreleri.	58
Çizelge 3.16: CS yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan PA6 çözeltilerine ait viskozite değerleri.	59
Çizelge 3.17: CS-B kodlu filtre kumaşlarının hava geçirgenlik değerleri.	65
Çizelge 3.18: CS-B kodlu filtre kumaşlarının kumaş özellikleri ve katı hacim oranları.	65
Çizelge 3.19: CS Bimodal filtre kumaşlarının filtre özellikleri.	66
Çizelge 3.20: % 25 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi kullanılarak farklı iğneler ile CS yönteminde yapılan ön denemelerin üretim parametreleri.	68
Çizelge 3.21: İki sistemin kombinlenmesi ile üretilen bimodal filtre kumaşlarının üretimi için hibrit sisteme ait üretim parametreleri.	69
Çizelge 3.22: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının hava geçirgenlik değerleri.	75
Çizelge 3.23: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının kumaş özellikleri ve katı hacim oranları.	75
Çizelge 3.24: Farklı üretim sürelerinde üretilen CSB kodlu filtre kumaşlarının filtrasyon değerleri.	77
Çizelge 3.25: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının 95 lt/dk akış hızında filtrasyon değerleri.	78
Çizelge 3.26: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının 32 lt/dk akış hızında filtrasyon değerleri.	78



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Gözenekli bir ortamda gaz akış modelleri.....	9
Şekil 2.2: Partiküllerin filtrelenmesi.....	10
Şekil 2.3: 3B yapılı R-PET/nano PLA kumaşın yapısı.	13
Şekil 2.4: Elektro üretim (ES) yönteminin genel gösterimi.	17
Şekil 2.5: Çözültiden üfleli nanolif üretim yönteminin şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.6: Elektrik alanlı çözültiden üfleli nanolif üretim yöntemi şeması.....	24
Şekil 2.7: Geleneksel santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim sistemi.	28
Şekil 3.1: SB yöntemi ile bimodal kumaş üretimi için deney düzeneği.....	31
Şekil 3.2:CS cihazı ve 30G (sol) ve 18G (sağ) çapa sahip iğnelerin takılı olduğu nozulun gösterimi.	32
Şekil3.3: SB ve CS sistemlerinin kombinlenmesi ile oluşturulan hibrit deney düzeneği.....	33
Şekil 3.4: Viskozimetre cihazı.	35
Şekil 3.5: Taramalı elektron mikroskobu (SEM).	36
Şekil 3.6: Hava geçirgenlik cihazı.	36
Şekil 3.7: Porozite cihazı.	37
Şekil 3.8: Filtre test santrali.	38
Şekil 3.9: Gerilme mukavemeti analiz cihazı.	41
Şekil3.10:SB yönteminde yapılan ön denemelerden elde edilen liflere ait SEM görüntüleri.	45
Şekil 3.11: Ön denemelerden üretilen SB liflerin lif çapı grafiği.....	46
Şekil3.12:SB yöntemi ile üretilen SB-B kodlu bimodal PA6 liflerin SEM görüntüleri.	47
Şekil 3.13: SB-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait lif çapı dağılım grafiği.....	47
Şekil3.14:SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı katı hacim değeri-kumaş kalınlığı grafiği	50
Şekil3.15:SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kumaş kalınlığı-hava geçirgenlik değerleri grafiği.	51
Şekil 3.16: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı QF-Kn grafiği.....	52
Şekil3.17:SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı katı hacim değeri-kalite faktörü grafiği.	53
Şekil 3.18: SB-B kodlu filtre kumaşlarının Çekme-Gerilme mukavemeti eğrileri. ..	54
Şekil3.19:SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı çekme mukavemeti-lif Çapı-katı hacim grafiği.	55
Şekil3.20:21G iğne kullanılarak farklı konsantrasyona sahip PA6 çözülteleri ile yapılan ön üretimlerden elde edilen liflere ait SEM görüntüleri ve lif çap dağılım grafiği.	61
Şekil3.21:%20 konsantrasyonlu PA6 çözültisi ile farklı çaplardaki iğneler (30G-18G) ve farklı nozul dönme hızları kullanılarak yapılan üretimlere ait SEM görüntüleri ve lif çapı grafiği.	63

Şekil 3.22: CS 1.12, CS 1.15 ve CS-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait liflerin SEM görüntüleri ve CS-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait lif çapı dağılım grafiği.	64
Şekil3.23: CS-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı katı hacim değeri-kumaş gramajı grafiği.	66
Şekil3.24: CS-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kumaş kalınlığı-hava geçirgenlik-filtre verimi grafiği.	67
Şekil 3.25: % 25 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi ile farklı iğneler (18G-16G) ve farklı nozul dönme hızları kullanılarak yapılan üretimlere ait SEM görüntüleri ve lif çapı grafiği.	71
Şekil 3.26: Farklı kaplama süreleri ile CSB bimodal üretimlere ait SEM görüntüleri.	72
Şekil3.27: CS 1.18, SB 1.2 ve CSB-B 3 bimodal üretime ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve CSB-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait lif çapı dağılım grafiği.	73
Şekil3.28: CSB Bimodal numunelere ait kıyaslamalı katı hacim değeri-kumaş gramajı grafiği.	76
Şekil 3.29: CSB-B kodlu numunelerin QF-Kn değerlerinin kıyaslamalı grafiği.	79
Şekil3.30: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kalite faktörü-kumaş kalınlığı-hava geçirgenlik değerleri grafiği.	80
Şekil 3.31 CSB-B kodlu filtre kumaşlarının Çekme-Gerilme mukavemeti eğrileri. 81	
Şekil3.32: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı lif çapı-kumaş kalınlığı-çekme mukavemeti grafiği.	82

FİLTRASYON UYGULAMALARI İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI BİMODAL FİLTRE KUMAŞLARININ ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Partikül maddeler (PM), nefes aldığımız havada bulunan, yoğunluğuna ve boyutuna göre insan sağlığında ciddi problemlere yol açan, genellikle 10 mikron ve altı büyüklüklerdeki parçacıklardır. Dünyada artan nüfus ile daha da hızlanan endüstriyel faaliyetler hava kirliliğini en üst seviyelere taşımıştır. Bu sebepten PM, hem bilimsel açıdan hem global ekonomi açısından hem ekolojik çevre açısından hem de insan sağlığı açısından etkileri üzerine birçok araştırma yapılan konu haline gelmiştir.

Dünya Sağlık Örgütü'ne (DSÖ) göre, yılda 4 milyondan fazla insan, 10 mikrondan daha küçük parçacıklar içeren kirli havaya uzun süre maruz kalmalarından dolayı enfekte olup ölmektedir.

Havada bulunan partiküller, boyutlarına göre PM_{10} , $PM_{2,5}$ ve $PM_{0,3}$ olarak sınıflandırılmaktadır. Bu partiküllerden en tehlikelisi 300 nm boyuta sahip $PM_{0,3}$ partikülleridir. Yakalanmaları zordur ve havada uzun süre asılı kalabilirler. Aynı zamanda büyük miktarda toksik özellikler taşıyabilir; akciğerlere, kalbe ve kan dolaşımına derinlemesine nüfuz ederek çeşitli solunum ve kardiyovasküler hastalıklara yol açabilirler. Bu sebeple solunan havadan temizlenmeleri, filtrelenmeleri gerekir. Özellikle hastanelerdeki yoğun bakım ünitelerinde, ameliyathanelerde, sağlık sorunu bulunan hastaların bulunduğu her türlü ortamlarda havanın filtrelenmesi için HEPA ya da ULPA filtreler kullanılmaktadır. Aynı zamanda sağlığı sıkıntıya sokacak derecede kirli havası bulunan ortamlarda çalışacak kişiler, filtrelenmiş hava nüfuz edebilmeleri için yüz maskeleri kullanmaktadır. Bu malzemelerin yapımında mikro ve/veya nano gözenekli dokusuz yüzeyli kumaşlar kullanılmaktadır.

Mikro gözenekli ve lifli filtre malzemeleri olarak polimer eriyiğinden elde edilen dokusuz yüzeyli kumaşlar (spunbond veya eriyik üfleli ağlar (meltblown)) kullanılmaktadır. Polyester (PET) polipropilen (PP), aramid, selüloz ve cam yünü gibi çok çeşitli malzemelerden elde edilen bu kumaşlar genel olarak derinlemesine filtrasyonda kullanılmaktadırlar. Genellikle mikrolifli olan bu kumaşlarla yüksek filtrasyon performansının sağlanması için kumaşların elektriksel olarak yüklenmesi bir yaklaşımdır. Fakat kumaş üzerindeki elektrik nötrlendiğinde kumaşın filtreleme özelliği neredeyse tamamen kaybolmaktadır.

Nanolifli kumaşlarda gözenek boyutları da nano seviyelerde olduğundan kumaşa genellikle elektriksel yüklemeye yapmadan ortamdaki nano boyuttaki partiküllerin toplanabilmesi mümkündür. Fakat liflerin nano boyutta olması bu malzemelerde sıkı dokunmuş bir yapı oluşmasına sebebiyet verebilir. Bu da filtre malzemesinin basınç farkını yükseltebilmektedir.

Nano- ve mikroliflerin bir arada bulunduğu bimodal filtre kumaş yapılarında ise amaç havada bulunan nano boyuttaki partikül maddeleri, nanolifler sayesinde filtrelenirken, filtre malzemesi içerisinde geçen havanın da mikroliflerin oluşturmuş olduğu boşluklar sayesinde rahat bir şekilde geçmesini sağlamaktır. Genel anlamda nanolifler düşük mekanik mukavemete sahip malzemelerdir. Mikroliflerin varlığı kumaşın mekanik dayanımını arttırmaktadır. Bu sebeple bimodal yapı kumaşların üretilmesi ile yüksek filtre verimine ve düşük basınç farkı değerine sahip dayanıklı filtreleme elemanları elde edilebilmektedir.

Lifli malzemeler özellikle de nanolifli malzemeler birkaç yöntemle üretilmektedir. Bunlardan ilki en eski ve geleneksel nanolif üretim yöntemi olan elektrik alanlı nanolif üretim ya da elektro üretim (Electrospinning, ES) yöntemidir. Bu yöntemde polimer çözeltisine ve toplayıcı yüzeye elektrik alanın bağlanması ve yüksek elektrik voltajlarının uygulanması neticesinde nanolifler elde edilmektedir. Elektrik alanın varlığından ötürü nispeten tehlikeli olan bu sistemin üretim kapasitesi de düşüktür. Çözeltiden üfleli nanolif üretim (Solution blowing, SB) yönteminde polimer çözeltisine sadece doğrudan temas eden yüksek basınçlı hava ile çözelti jetinin oluşturulması ve çözücünün buharlaşması sonucu nanolif yüzeyler elde edilmektedir. Bu sistemde elektrik alanın olmaması sistemi daha güvenli hale getirmektedir. Ayrıca üretim hızı da çözelti besleme hızına bağlı olarak elektro üretim yöntemine kıyasla 5-150 kat arası daha fazladır. Elektro üretim yöntemi ile 0,1-1 ml/saat çözelti besleme hızlarında üretim yapılırken çözeltiden üfleli nanolif üretim yöntemi ile 5-15 ml/saat çözelti besleme hızlarında üretim yapılabilmektedir. Bir diğer nanolif üretim yöntemi ise elektrik alanlı çözeltiden üfleli nanolif üretim (Electroblowing, EB) yöntemidir. Bu sistemde nanolifler basınçlı hava ve elektrik alan yardımı ile üretilmektedir. Elektrik alanlı çözeltiden üfleli nanolif üretim sistemine güç kaynağının entegre edilmesi ile elde edilmiş bir yöntemdir. Bu sistemler haricinde diğer bir nanolif üretim yöntemi ise santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim (Centrifugal spinning, CS) yöntemidir. Bu yöntemde polimer çözeltisi, yüksek santrifüj kuvvetlerine maruz bırakılır. Santrifüj kuvvetleri ile nozul ucundan çıkan polimer jeti ve çözücünün uzaklaşması neticesinde lif haline dönüşmektedir. Bu sistemde de çözeltiden üfleli nanolif üretim yönteminde olduğu gibi elektrik alan bulunmamaktadır. Çözelti besleme hızı, kullanılan iğne çapına göre değişiklik göstermekle birlikte 100 ml/saat besleme hızına kadar çıkabilmektedir. Aynı zamanda bu sistem ile hem nano hem de mikro boyutlarda lif üretimi mümkündür.

Nanoliflerin üretiminde kullanılan polimer ve polimerin çözücüsü de büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında sahip olduğu nanolif üretim kalitesi, mekanik mukavemet özellikleri ve düşük maliyet avantajlarından dolayı Poliamid 6 (PA6) polimeri kullanıldı.

Bu tez kapsamında çözeltiden üfleli ve santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemleri kullanılarak çeşitli konsantrasyonlardaki PA6 çözeltilerinden bimodal filtre kumaş yapıları üretilmeye çalışıldı. Bimodal yapı sayesinde düşük basınç farkına ve yüksek filtre verimine sahip PA6 filtre kumaşlarının üretimi gerçekleştirildi. Bu kumaşların, HEPA/ULPA filtreler ve yüz maskesi gibi filtre uygulama alanlarında kullanılmalarının uygun olduğu yapılan analizler neticesinde ispatlandı.

Nanolif üretim yöntemlerinde çözelti viskozitesi, elde edilecek lif çaplarının belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu sebeple üretimlerde kullanılan her

çözeltilinin viskozite ölçümleri Fungilab marka viskozimetre ile ölçüldü. Üretilen lifli kumaşların yüzey morfolojilerinin incelenmesi ve lif çapı ölçümlerinin yapılabilmesi için TESCAN marka Taramalı Elektron Mikroskopu ile mikroskop görüntüleri alındı. Hava geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi için hava geçirgenlik analizi ve filtre uygulamalarında kumaşın gözenekliliği önem arz ettiğinden kumaşların gözenek boyutları hakkında bilgi edinebilmek için porozite testi yapıldı. Bu testler haricinde filtre uygulamaları için üretilen kumaşlarda katı hacim değeri hesabı yapılmaktadır. Katı hacim değeri hesabında gerekli olan kumaş kalınlığı değerleri dijital komparatör ile ölçüldü. Kumaşların sahip oldukları basınç farkı değerlerinin ve filtrasyon verimlerinin tayini için endüstride de kullanılan TSI marka 8130A model Filtre Test cihazı kullanılarak kumaşların filtre testleri gerçekleştirildi. Bimodal kumaş yapısı, yalnızca filtre performansını artırmakla kalmayıp yapısındaki mikrolifler sayesinde filtre kumaşının mekanik özelliklerini de iyileştirmektedir. Bu sebeple bu tez kapsamında üretilen bimodal filtre kumaşlarına mekanik mukavemet analizi de yapıldı.





PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF HIGH PERFORMANCE BIMODAL FILTER FABRICS FOR FILTRATION APPLICATIONS

SUMMARY

Today, with industrial activities and increasing human population, the air is highly polluted and pandemic epidemics occur. As a result of air pollution, clean air becomes a necessity. Particulate matter (PM) having diameters below 10 micrometer causes serious problems in human health, productivity and life quality. According to their sizes PM is classified as PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{0.3}. Among them, PM_{0.3} particles with a size below 300 nm are the most dangerous, since it is more challenging to capture them and they can stay suspended for a long time in the air. It can also possess a large amount of toxic properties. They can penetrate deep into the lungs, heart and bloodstream, leading to a variety of respiratory and cardiovascular diseases. According to the World Health Organization (WHO), every year more than 4 million people are infected and die from prolonged exposure to polluted air containing particles smaller than 10 microns. For this reason, they must be filtered from the air. The process of separating these particulate matter by passing through a nano or microporous filter material is called filtration. HEPA or ULPA filters are used to filter the air, especially intensive care units, operating rooms in hospitals and environments where patients with health problems are present. At the same time, people who will work in environments with a high level of PM in the air should use face masks to breathe the filtered air. Nano and microporous nonwoven fabrics are used in the production of filtration materials such as filters and face masks.

Filter materials used in air filtration appear in two groups as membrane and fibrous filters. Fibrous air filters are preferred more because of their many advantageous features such as low pressure drop, high efficiency, high porosity, high gas permeability, light weight, large surface area/volume ratio and low cost.

Conventional filter materials with nonwoven surfaces cannot capture very small particles because their fiber diameters are in the micron level. These fabrics, obtained from various resources such as polyester (PET), polypropylene (PP), cellulose and glass fibers, are generally used in depth filtration. In depth filtration, an electrical charge is loaded on the fabric. However, when the electrical charges on the fabric are neutralized, the filtering feature of the fabric is almost completely lost.

Since the pore sizes in nanofiber fabrics are also at nano levels, it is possible to collect nanoparticles without electrostatic forces. Therefore, nanofibrous filters with high filtration performance are more attractive than microfibrinous filters for air filtration. However, filters with high solidity values and very fine nanofiber structure (below 65 nm) can increase the filter pressure drop value. This causes the filter material to become clogged by filling up quickly and the air cannot easily pass through the filter material. In order to improve this situation, bimodal filter fabrics consisting of nano- and microfibers are effective structures in separating nanoparticles from the fluid. Bimodal filter fabrics have a wide Knudsen range due to the nano- and microfibers in their structure. In this way, air flow through the fabric

can be provided more easily. At the same time, the presence of micro fibers increases the mechanical strength of the fabric. Using bimodal structured fabrics, robust filtering elements with high filter efficiency and low pressure drop value are obtained.

The first studies on bimodal filter structures in the literature are usually on simulation or theoretical calculations. In the study of S.Fotovati et al. on the numerical simulation of bimodal filter fabrics, it was determined that smaller particles were captured when the ratio of thick fibers in the structure increased. The first studies to produce bimodal fibers were obtained by using the meltblown method. In studies using the MB method, it is possible to produce bimodal structures from two separate extruders of polymers with different melting temperatures and molecular weights, from a single extruder or from island in the sea fibers by mixing two polymers. In the literature, there are also studies in which bimodal structures are formed in a layered manner from thick fibrous layers to thin fibrous layers using the electrospinning method. The prominent point in these studies is that the thinnest layer consists of nanonets, expressed as nanonets. In addition to these studies, there are bimodal studies produced by the combination of ES and MB methods, which still have current studies in the literature.

Various polymers are used in these studies. Fibrous materials produced from the solution are generally polyvinylidene fluoride (PVDF), polyacrylonitrile (PAN), thermoplastic polyurethane (TPU), polyamide 6 (PA 6) and polyamide 6.6 (PA 6.6), polyvinyl alcohol (PVA), polytetrafluoroethylene (PTFE).) can be obtained from synthetic polymers such as polyvinylpyrrolidone (PVP), as well as from natural polymeric materials such as gelatin, collagen, chitosan, carboxymethyl cellulose. Fibers produced from the melt using the MB method are obtained from various thermoplastic polymers such as polyester (PET), polypropylene (PP), polybutylene terephthalate (PBT), polylactic acid (PLA) or from natural origin materials such as aramid, cellulose and glass wool.

The polymer and the solvent of the polymer used in the production of nanofibers are also of great importance. In this thesis, Polyamide 6 (PA6) polymer was used because of its acceptable mechanical performance, spinnability and low cost advantages.

Fibrous materials, particularly nanofibrous materials, can be produced via several methods. Electrospinning (ES) is one of the oldest and widely investigated system where nanofibers are obtained by charging the polymer solution in an electric field. The production capacity of this system is pretty low compared to solution blowing (SB) where nanofibers are obtained by the effect of compressed air directly contacting the polymer solution inside a coaxial nozzle. The absence of electric field makes the system safer. In addition, the production speed is 5-150 times higher than the electrospinning method depending on feeding rate of solution. Electrospinning method produces with solution feed rates of 0,1-1 ml/h, while solution blowing nanofiber production method can go up to 5-15 ml/h solution feed rates. Another nanofiber production method is the electroblowing (EB) system. In this hybrid system, nanofibers are produced via forces created by compressed air and electric field. Apart from these systems, another nanofiber production method is centrifugal spinning (CS). In this method, the polymer solution is exposed to centrifugal forces. With the removal of the solvent from the solution, the extended polymer jets become fibers. Similar to solution blowing method, there is no electric field in this system.

The solution feed rate varies according to the diameter of the needle used and can be as high as 100 ml/h. At the same time, it is possible to produce both nano and micro fibers with this system.

Within the scope of this thesis, bimodal filter fabric structures have been produced from PA6 polymer by using nanofiber production methods; solution blowing and centrifugal spinning. Thanks to the bimodal structure, PA6 filter fabrics with low pressure drop and high filter efficiency have been produced. It has been proved that these fabrics are suitable for using in filtration applications such as HEPA/ULPA filters and face mask production.

In the first part of the thesis, experiments were carried out for optimum nano- and microfiber formation with different concentrations of PA6 solutions using the SB method. 22G size needle was used in the productions. In the studies, the distance between the needle and the collector required for the evaporation of the solvent was set as 40 cm. For each solution, different feed rates (5, 10, 15 ml/h) and different pressure difference values (1, 2 bar) were tested and 1 ml pre-productions were made. After determining the system and material parameters where the thinnest and thickest fiber diameters are obtained, long-term (60 min) productions were carried out with each solution separately. For the production of bimodal filter fabric, solutions with two different concentrations (7 % and 20 %) were produced on 13 gsm Polyethylene spunbond nonwoven fabric by means of the vacuum collector with the SB method in equivalent time from two separate nozzles.

In the second part of the thesis, in order to produce the most optimum fibers in the CS system, in the first stage, PA6 solutions at different concentrations (15, 20, 25) were produced using 21G needles, with different nozzle rotation speeds (4000, 6000 and 8000 rpm) until 5 ml was spent. As a result of the production, the most suitable solution concentration was determined, where the smoothest fibers were obtained. In the second stage, new productions were made to obtain the thinnest and thickest fibers by using needles with different diameters (30G and 18G) with this concentration. Throughout the study, the distance between the collector and the nozzle was kept constant and set as 30 cm. Feed rates of 30 ml/hr for the 21G needle, 20 ml/hr for the 30G needle and 50 ml/hr for the 18G needle were used in the productions. For bimodal production, 30G and 18G needles were attached to a single nozzle with 20 % PA6 solution, and long-term productions were made with both needles separately (up to 20 ml) for comparison purposes.

In the third part, new pre-productions (5 ml) were made using a 25 % concentrated PA6 solution, in which the thickest fibers were obtained as a result of the pre-production using the 21G needle in the CS method in Chapter 2, and using thicker diameter needles (18G, 16G). In productions, feed rates were set as 50 ml/h and 100 ml/h for 18G and 16G needles, respectively. Again, productions were carried out with nozzle rotation speeds of 4000, 6000 and 8000 rpm. For the production of nanofibers in bimodal filter fabric production, the production parameters (7 % PA6 solution, 5 ml/h feed rate, 2 bar air pressure) were used again in the SB method in Section 1, where the finest fiber structure was obtained. After the production parameter (25 % PA6 solution, 18G needle diameter, 50 ml/h feed rate, 8000 rpm nozzle rotation speed) was determined as a result of the preliminary trials in the CS method, the CS and SB methods were combined for bimodal production. A hybrid system was created. Three different bimodal fabrics were produced at different production times (12, 36, 60 min) to decide the amount of fiber picking at which the

best performance was obtained. Filter tests and SEM analysis of each fabric obtained from the productions were carried out. The best filter efficiency and fabric structure were obtained from hybrid production for 60 minutes. Since the two systems and the fiber structures obtained by the use of these systems are very different from each other, the production times were set as 60 minutes in order to compare all productions.

Solution viscosity plays an active role in determining the fiber diameters to be obtained in nanofiber production methods. For this reason, viscosity measurements of each solution was performed with a Fungilab viscometer. TESCAN Scanning Electron Microscopy was used in order to examine the surface morphology of the produced fibrous fabrics and measure the fiber diameter. Porosity test was carried out in order to obtain information about the pore sizes of the fabrics. Besides, solidity values were calculated to determine suitability for depth filter applications. The fabric thickness values required in the solidity calculation were measured with a digital comparator. Filter tests were carried out with the TSI 8310a Filter Test device. The bimodal fabric structure not only improves the filter performance, but also improves the mechanical properties of the filter fabric thanks to the microfibers in its structure. For this reason, the mechanical strength analysis of the bimodal filter fabrics produced within the scope of this thesis was also made.

1. GİRİŞ

Günümüzde artan hava kirliliği ve pandemik hastalıklardan dolayı oluşan temiz hava ihtiyacı, filtre malzemelerinin araştırılmasına, geliştirilmesine ve yüksek oranda üretilmesine neden olmuştur. Filtre kumaşları EPA, HEPA, ULPA gibi ortam filtrasyonunu sağlayacak filtre malzemelerinin ve kişisel koruyucu ekipman olan yüz maskelerinin üretiminde kullanılır.

Kaliteli bir filtre malzemesinden yüksek filtre performansına sahip olması beklenmektedir. Bunun için kaliteli bir filtre malzemesi mekanik dayanıma, yüksek filtre verimine, düşük filtre basınç farkı değerine ve bu sayede uzun kullanım ömrüne sahip olmalıdır.

Literatürde bu özelliklerin birarada elde edilebilmesi adına çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda bimodal yapıların, kaliteli filtre kumaşından beklenen özellikleri sağladığı belirtilmektedir. Bimodal yapıların üretimi üzerine yapılan çalışmalar oldukça yenidir. Fakat yapılan çalışmalarda bazı kısıtlamalar vardır.

Yapılan çalışmalarda mikroliflerin üretimi için genellikle eriyikten üfleli lif üretim yöntemi (Meltblown, MB) kullanılmıştır. Nanoliflerin üretimi için ise genellikle eski ve oturmuş bir yöntem olan elektro üretim (Electrospinning, ES) yöntemi kullanılmıştır ki bu yöntemin en büyük dezavantajları ise elektrik alanının varlığı ve üretim hızının çok düşük olmasıdır.

Bu tez ile yenilikçi nanolif üretim yöntemleriyle farklı konsantrasyonlardaki PA6 çözeltileri ve farklı çaplara sahip iğneler kullanılarak yapılan ön üretimler ve neticesinde belirlenen parametrelerle elde edilen bimodal yapı kumaşların filtrasyon performansları araştırıldı.

Bölüm 1'de SB yöntemi kullanılarak farklı çözelti konsantrasyonlarına sahip PA6 çözeltileri ile lif çapı ön çalışması yapıldı. Daha sonra en ince ve en kalın liflerin elde edildiği çözeltiler, iki ayrı nozul yardımıyla destek kumaşı üzerine üretilerek bimodal yapı kumaşları üretilti. Farklı PA6 çözelti konsantrasyonu, hava basıncı ve

çözelti beslemesi denemeleri ile SB sisteminde nano- ve mikrolif üretim optimizasyonu yapılmış olundu. Yapılan denemeler ile SB sisteminin sınırları keşfedildi. En nihayetinde SB yöntemi ile elde edilmiş yüksek performanslı bimodal filtre kumaşları üretilmiş olundu.

Bölüm 2’de CS yöntemi kullanılarak öncelikle Bölüm 1’de olduğu gibi yine farklı PA6 çözeltileri ile lif çapı ön çalışması yapıldı. En iyi lif formunun elde edildiği çözelti konsantrasyonu belirlenerek farklı çaplara sahip iğnelerle en ince ve en kalın lif çaplarının eldesi denendi. Son olarak en ince ve en kalın lif çapının sağlandığı iğneler, CS nozulunun biri bir tarafında diğeri diğeri tarafında olacak şekilde takılarak bimodal yapılı filtre kumaşının üretilmesi çalışıldı. Böyle farklı PA6 çözelti konsantrasyonu, hava basıncı ve çözelti beslemesi denemeleri ile CS sisteminde nano- ve mikrolif üretim optimizasyonu yapılmış olundu. Bu bölümde de yapılan denemeler ile CS sisteminin sınırları keşfedilmiş olundu.

Bölüm 3’te ise hem SB yönteminin hem de CS yönteminin bir arada kullanıldığı hibrit bir sistem oluşturuldu ve sonrasında bimodal yapılı filtre kumaşları üretildi. Bu çalışmada SB yöntemi ile daha ince nanolif yapıları ve CS yöntemi ile daha kalın mikrolif yapıları elde edildiğinden bimodal filtre kumaşı üretimi için nanoliflerin üretiminde SB, mikroliflerin üretiminde ise CS yöntemleri bir arada kullanıldı. Bölüm 1’de elde edilen en ince nanolif üretim parametreleri bu bölümde de kullanıldı. CS mikrolif üretimi için Bölüm 2’de en kalın lif çapının elde edildiği çözelti konsantrasyonu ve üretim parametresi seçildi. Daha sonra daha geniş çaplı iğneler kullanılarak daha kalın lif yapısı elde edilmeye çalışıldı. CS yönteminde en kalın lif çapının elde edildiği üretim parametresi belirlendikten sonra SB ve CS yöntemleri kombinlenerek yeni bir hibrit lif üretim sistemi oluşturuldu ve bimodal kumaş üretimi gerçekleştirildi.

Tez kapsamında hazırlanan çözeltilerin viskozite ölçümleri viskozimetre ile ölçüldü. Yapılan ön üretimlerin ve neticesinde üretilen bimodal filtre kumaşlarının taramalı elektron mikroskobu ile lif ve yüzey morfolojileri incelendi. Filtre amaçlı uzun üretimlerle üretilen ayrı ayrı nanolifli, mikrolifli ve bimodal filtre kumaşı üretimlerinin her birinin sırası ile hava geçirgenlik, porozite, katı hacim ölçümü, filtrasyon ve mekanik performans analizleri yapıldı. Bu sayede elde edilen filtre kumaşlarının filtrasyon performansları, mekanik dayanımları ve filtre uygulamaları için uygunlukları tayin edilmiş olundu.

1.1. Tezin Amacı

Belli bir düzene sahip olmayan farklı veya yakın boyutlardaki liflerin rastgele serilmesiyle üretilen kumaş yapısına dokusuz yüzeyle (nonwoven) kumaşlar denilmektedir. Bu kumaşların özellikle filtre uygulamalarında kullanımları, günümüzde yaşanan pandemi probleminden dolayı oldukça artmıştır. Polyester (PET), polipropilen (PP) gibi çeşitli termoplastik polimerlerden veya aramid, selüloz ve cam yünü gibi doğal kökenli maddelerden elde edilen bu kumaşlar genel olarak derinlemesine filtrasyonda kullanılmaktadırlar. Bu kumaşların üretimi MB yöntemi ile gerçekleştirildiğinden genellikle mikrolifli kumaşlardır ve mikrolifli filtre kumaşlarında filtrasyon performansı kumaşın elektriksel olarak yüklenmesi ile sağlanır. Fakat kumaş üzerindeki elektrik nötrlendiğinde kumaşın filtreleme özelliği önemli oranda düşmektedir. Bu sebeple, filtre malzemesi ilk üretildiği andaki filtrasyon performansını koruyamaz. Elektriksel yükleme yapılmadan mikron boyutlu (2-11 μm arası) liflerden oluşan dokusuz yüzeyle kumaşlar ile oluşturulan filtre malzemelerinde yüksek filtre verimi genellikle sağlanamamakta (Leung vd., 2018), istenen filtre veriminin sağlanması için ise çok kalın kumaşların üretilmesi gerekmektedir.

Nanoliflerden (1 μm altı) oluşan hava filtreleri kayma akışı etkisiyle düşük basınç farkı ve yüksek toplama verimliliği sağlamaktadır. Fakat yüksek paketleme yoğunluğu ile biraraya gelen nanolifler (65 nm altı), filtre verimini arttırsa da filtrenin basınç farkı değerinin yüksek olmasına neden olabilmektedir (Zhao vd., 2016) ki bu maskelerde kullanıcının zor nefes almasına, filtre sistemlerinde ise filtrenin çabuk tıkanmasından dolayı sistemin yüksek enerji sarfiyatına sebep olmaktadır. Bu sebeple lifler arasında filtre verimini düşürmeyecek boşlukların oluşmasına ve böylece basınç farkı değerinin düşürülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda nanolifler ince yapıları sebebiyle düşük mekanik mukavemete sahiptirler. Bu yüzden genellikle mikrolifli dokusuz yüzeyle destek kumaşları üzerine üretilmeleri gerekir.

Nano ve mikro çaplı liflerin bir arada bulunduğu bimodal/kompozit filtre kumaş yapıları ile yukarıda bahsedilen olumsuzlukların ortadan kalkması söz konusudur. Bu kumaşlardan, yüksek filtre verimine ve düşük basınç farkı değerine sahip dayanıklı filtreleme elemanları elde edilebilmektedir. Bimodal yapıli filtre kumaşları ile

havada bulunan nano boyuttaki partikül maddeleri, nanolifler sayesinde filtrelenirken, filtre malzemesi içerisinde geçen havanın da mikroliflerin oluşturmuş olduğu boşluklar sayesinde rahat bir şekilde geçmesi sağlanır. Ayrıca, bimodal kumaşlarda nanoliflerin içinde mikroliflerin de mevcut olmasıyla kumaşın mekanik dayanımı sağlanmaktadır.

Bu tez çalışması ile nano- ve mikrolif kombinasyonu sayesinde yüksek filtre verimine ve düşük basınç farkı değerine sahip dayanıklı filtre kumaşlarının üretilmesi amaçlandı.

Günümüzde pek çok nano- ve/veya mikrolif üretim metodu bulunmaktadır. Çözültiden üfleli nanolif üretim (SB) ve santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim (CS) yöntemleri yeni üretim metodlarıdır. Bu tez çalışmasında bimodal filtre kumaşlarının üretimi için her iki nanolif üretim yöntemi ayrı ayrı ve birlikte hibrit bir sistem oluşturacak şekilde kullanılarak çalışmaların yapılması hedeflendi. Çalışmalar, 3 ayrı bölümde incelendi. Her bir bölümde hedeflenen bimodal yapıyı filtre kumaşların üretilmesi için öncelikle kapsamlı deney planları yapılarak optimum üretim parametreleri belirlendi. Deney parametreleri neticesinde PA6 polimeri ile her iki sistemde üretilebilecek en ince ve en kalın lif yapısı optimize edildi.

1.2. Hipotez

Çözelti konsantrasyonu lif üretiminde lif çapını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. PA6 polimeri ile farklı konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanarak iki nanolif üretim yönteminde de hem ince hem de kalın lif üretimi gerçekleştirilip, sonrasında elde edilen parametrelerin kullanılması ile aynı anda üretimler yapılarak bimodal yapıların elde edilmesi beklenmektedir. Hedeflenen bimodal yapılarda nanolif eldesi için sistemlerde çalışılabilen düşük viskoziteli çözeltilerin ve küçük çaplı iğnelerin kullanılması ile 100 ± 50 nm seviyelerinde nanolif üretimi hedeflenmektedir. Çalışmada SB sisteminde 22G iğne çapına kadar, CS sisteminde ise 30G iğne çapına kadar küçük çaplı iğnelerin kullanılması; çözelti konsantrasyonu için ise SB sisteminde en düşük % 7, CS sisteminde ise en düşük % 10 çözelti konsantrasyonlarının denenmesi planlanmaktadır. Yine aynı şekilde konsantrasyonun artması ile lif çapları arttığı gibi kullanılan iğne çapının artırılması ile liflerin çaplarında artış olması beklenmektedir. Bunun için CS sisteminde 16G boyutlu

iğnelerin denenmesi, SB sisteminde ise daha önceki çalışmalardan yola çıkılarak geniş çaplı iğneler ile SB yönteminde düzgün lif oluşumu elde edilemediğinden, iğne çapının 22G olarak sabit tutulması; çözelti konsantrasyonu için ise SB sisteminde en fazla % 20, CS sisteminde ise en fazla % 25 çözelti konsantrasyonlarının denenmesi planlanmaktadır. İki sistemin birleştirilmesi ile elde edilen hibrit sistemde ise bimodal lif üretimi için SB sisteminin kullanılması ile ince lif eldesi ve CS sisteminin kullanılması ile de kalın lif eldesi planlanmaktadır. Yapılan denemeler ve uzun üretimler neticesinde hedeflenen bimodal filtre kumaş yapısına ulaşılması planlanmaktadır. Bu tez çalışmasında SB ve CS yöntemlerinin ayrı ayrı kullanılması ve iki yöntemin bir araya getirilip hibrit bir sistem oluşturulması ile bimodal filtre kumaşlarının üretilmesi hedeflenmiş ve bu sayede daha düşük fark basıncı, daha iyi mekanik özellikler ve daha yüksek toz tutuş kapasitesi değerlerinin sağlanacağı düşünülmüştür.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Partikül Maddeler

Hava içerisindeki iyonlar, reaktif gazlar, organik bileşikler, metaller, partikül karbon çekirdeği (El Morabet, 2019) ve katı veya sıvı tüm maddeler(Rogoff & Screve, 2011) gibi safsızlıklar hava kirliliğine sebep olan partikül maddeleri (PM)'ni oluşturmaktadır. PM, yoğunluk ve boyutuna göre insan sağlığında ciddi problemlere yol açan, insan veya doğa kaynaklı olabilen(Ukaogo vd., 2020), genellikle 10 mikron ve altı boyutlardaki(El Morabet, 2019) parçacıklardır(Yadav & Devi, 2019). Partikül maddelerin ekolojik çevre ve insan sağlığı üzerindeki neden olduğu olumsuz etkilerinden dolayı PM, hem bilimsel açıdan hem de global ekonomi açısından birçok araştırmaya konu olmaktadır.

2.2. Partikül Maddelerin Sınıflandırılması

Partikül maddeler, iklim değişimi(November 01 & Mackenzie, t.y.) gibi dünyadaki ekolojik hayatı tehdit eden durumlara sebep olduğu gibi insanlarda doğuştan gelen bağışıklık sistemine zarar vererek hastalık risklerinin artmasına neden olmaktadır (Huang vd., 2019).

Havada bulunan partiküller sahip oldukları boyutlara göre PM_{10} , $PM_{2,5}$ ve $PM_{0,3}$ gibi sınıflandırılmaktadır. PM'nin partikül boyutuna göre neden olduğu sağlık problemleri değişmektedir. PM_{10} üst solunum yollarında hasara sebep olurken 0,1 mm partikül boyutuna sahip ince partiküller, akciğer enfeksiyonuna sebep olmaktadır (El Morabet, 2019). Ultra ince (300 nm altı) partikül maddelerin ise yakalanmaları oldukça zordur ve havada uzun süre asılı kalabilirler. Aynı zamanda toksik özellik taşıyabilir; akciğerlere, kalbe ve kan dolaşımına derinlemesine nüfuz ederek çeşitli solunum ve kardiyovasküler hastalıklara yol açabilirler(Du vd., 2016; Jenko Pražnikar & Pražnikar, 2012). Bu sebeple havadan temizlenmeleri, filtrelenmeleri gerekir.

2.3. Partikül Maddelerin Neden Olduğu Problemler

Endüstride ortaya çıkan anormal emisyonlar, fosil ve yakıt bazlı taşımacılıkta oluşan partikül maddeler, hava kirliliği gibi büyük sorunlara neden olmaktadır(He vd., 2016). 2018 yılında yapılan bir istatistik raporuna göre her 10 insandan 9'u kirli hava solumaktan dolayı(WarrenMay. 2 vd., 2018) sağlığını kaybetmektedir. DSÖ'ye göre, yılda 4 milyondan fazla insan, 10 mikrondan küçük parçacıklar içeren kirli havaya uzun süre maruz kaldıklarından dolayı enfekte olup ölmekte ve yine DSÖ'ye göre, hava kirliliği, her yıl dünya çapında yaklaşık 7 milyon insanın ölümüne neden olmaktadır. Geçtiğimiz asırda hava kirliliğinden dolayı toplumları etkileyen 10 gribal salgın meydana gelmiş ve binlerce insan hayatını kaybetmiştir (*Air Pollution*, t.y.). Günümüzde de aynı sorunlar ortaya çıkmaktadır. 2019 senesinde ortaya çıkan Covid 19 virüsünden dolayı insanlar salgından korunabilmek ve temiz hava soluyabilmek adına hala yüz maskeleri ile dolaşmaktadır. Salgılardan dolayı oluşan yasaklar, insan ömrünün % 80'inden fazlası kapalı ortamlarda geçmesine neden olmuştur(Jenkins vd., 1992; Shoeib vd., 2005). Günümüzde bu oranın daha da arttığı tahmin edilmektedir. Bu sebeple kapalı ortamlardaki havanın kalitesi insan sağlığını doğrudan etkilemektedir ve bu ortamlardaki havanın filtrelenmesi büyük önem arz etmektedir.

2.4. Filtrasyon

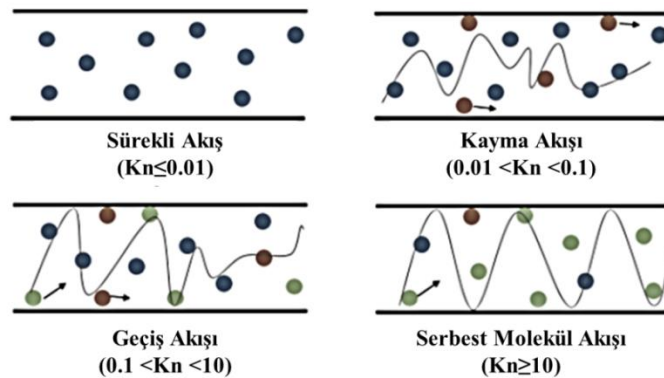
Ev, hastane, çalışma ortamı gibi pek çok alanda giderek artan kirli hava, temiz hava ihtiyacını artırmaktadır. Bir ortamdaki akışkanın içinde bulunan sıvı ve/veya katı nano ve mikro boyutlu parçacıkların, yine nano veya mikro gözenekli bir yapı içerisinden geçerek ayrıştırılması işlemine filtrasyon denir. Aynı zamanda filtrasyon; katı-katı, katı-sıvı, sıvı-sıvı, sıvı-gaz, gaz-gaz, gaz-katı gibi ortamları birbirinden ayrıştırma işlemidir(Walker, 2012). Genellikle lifli filtreler, PM'nin gaz ortamından yani havadan ayrıştırılmasında kullanılmaktadır(Friedlander, 1958). Lifli hava filtreleri, düşük basınç farkı değeri, yüksek verimlilik, yüksek gözeneklilik, yüksek gaz geçirgenliği, hafifliği, geniş yüzey alanı/hacim oranı ve düşük maliyeti gibi pek çok avantajlı özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler(Q. Zhang vd., 2010). Dokusuz yüzeyli geleneksel filtre malzemeleri, lif çapları mikron seviyelerinde olduğu için çok küçük partikülleri yakalayamazlar(Leung & Choy, 2018). Daha ince

lif çaplarına sahip filtreleme ortamı, filtrasyon verimliliğini arttırmaktadır(Galka & Saxena, 2009).

Avrupa standardı EN 1822-1'e göre 0,15-0,3 µm partiküller için ULPA (ultra düşük penetrasyonlu hava) filtrasyon etkinliği % 99,9995'ten daha fazladır ve HEPA (yüksek verimli partikül hava) filtrasyon etkinliği % 85 - 99,995 arasındadır (Matulevicius vd., 2014).

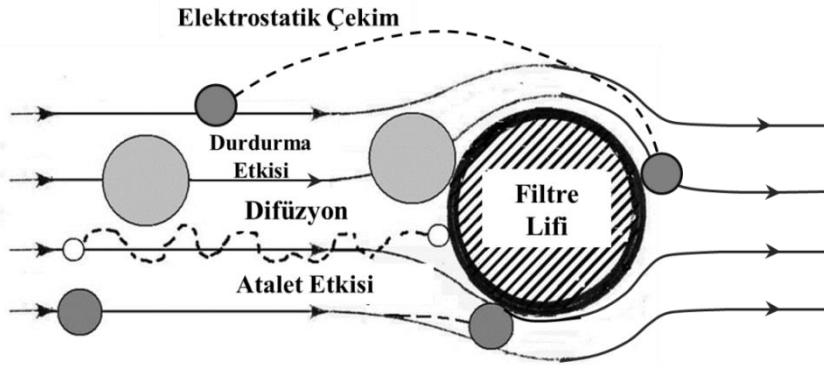
Filtrasyon, derinlemesine ya da 2 boyutlu filtre yüzeyleriyle (örneğin; pilesiz) yüzey filtrasyonu yapılarak iki farklı mekanizma ile gerçekleştirilmektedir. Nano gözenekli malzemelerde yüzey difüzyonu, kayma akışı ve Knudsen akışı gözlemlenmektedir. Filtre malzemelerindeki mikro-nano kanallar gaz moleküllerinin ve partikül maddelerin çarpma sıklığını arttırmaları. Gaz akışı sıvı akışından farklıdır ve bu akış genel olarak **sürekli akış** ($Kn \leq 0,01$), **kayma akışı** ($0,01 < Kn < 0,1$), **geçiş akışı** ($0,1 < Kn < 10$) ve **serbest moleküler akış** ($Kn \geq 10$) olmak üzere 4 grupta incelenir(Feng vd., 2019) (Şekil 2.1).

Sürekli akışta ortalama serbest gaz molekülleri yolu çok küçük olduğundan, gaz sürekli bir ortam olarak kabul edilir. **Kayma akışı** genellikle birinci dereceden kayma sınır koşullarına sahip Navier-Stokes (N-S) denklemleriyle modellenir. **Geçiş akışı** için hala net bir tanımlama yapılamamakla(Y. Yuan & Rahman, 2016) birlikte bu akışta kayma akışı ile serbest akış arasında bir akış söz konusudur. **Serbest moleküler akış** etkisinde serbest gaz molekülleri yolu çok büyüktür ve gaz molekülleri ile kanal duvarları arasında yoğun bir çarpışma söz konusudur. Gaz molekülleri bağımsız olarak hareket eder ve moleküller arası çarpışma önemsizdir. Bu rejimdeki gaz akışı Knudsen difüzyonu ile tanımlanabilir(Y. Yuan & Rahman, 2016).



Şekil 2.1: Gözenekli bir ortamda gaz akış modelleri(Qi & Zhu, 2018).

Diğer taraftan havadaki partiküllerin derinlemesine filtrasyonunda lifli bir filtre kumaşına karşı davranışları Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2: Partiküllerin filtrelenmesi(Bulejko, 2018’ den uyarlandı.).

Şekil 2.2’de gösterildiği üzere parçacıkların hayali bir hava akımı içerisinde üç farklı davranışı olabilmektedir. Hayali hava akım çizgisini takip eden bir partikül, lifin yüzeyi ile partikülün merkezi arasında kalan mesafe, lifin yüzeyinin hayali akım çizgisine olan mesafesinden iki kat fazla olduğunda filtre kumaşının lifi tarafından yakalanır. Bu durum **Durdurma etkisi** olarak açıklanır.

Atalet etkisi davranışında, partikülün sahip olduğu kütle ve akış hızından kaynaklanan atalet, parçacığı hayali hava akım çizgisinden ayırabilir. Böylece filtre malzemesinin olduğu yörüngeye doğru hareket edip life etki edebilir.

Üçüncü davranış olan **Difüzyon** davranışı ise partikülün lif ile etkileşimine neden olabilen Brownian hareketi olarak bilinen rastgele bir şekilde hayali hava akımı çizgisi etrafında salınmasıdır. Bu şekilde partiküller, filtre yapısını oluşturan nano-ve/veya mikrolifler tarafından havadan ayrıştırılırlar.

Bu üç davranışın haricinde bir de **Elektrostatik çekim davranışı** bulunmaktadır. Üretilen filtre kumaşlarının elektrostatik yüklenmesi sonucunda filtre malzemesinin yakınından geçen partiküller, zıt yükle şarj olur ve filtre malzemesine doğru hareket ederler. Böylece filtre malzemesi tarafından yakalanırlar(Aslan & Kaplan, 2010).

2.5. Nanolifli Yapılar

Bir lifin nano sayılabilmesi için çapının 1 μm ’den küçük olması gerekir. Nanolif yapısına sahip bir kumaş ise yönlendirilmiş veya rastgele konumlanmış birbirine bağlı nanoliflerden ve nano gözeneklerden meydana gelmektedir.

Nanolifler yara örtüleri(Kurtoğlu & Karataş, 2009), atıksu arıtım membranları(ElDefrawy & Shaalan, 2007), Lityum-iyon pil bileşenleri(Mikulášek & Cuhorka, 2017, ss. 275-290) ve hava filtrasyonu(Gundogdu vd., 2018) gibi pek çok alanda kullanılmaktadırlar.

Nanolifler genel olarak poliviniliden florür (PVDF), poliakrilonitril (PAN), termoplastik poliüretan (TPU), poliamid 6 (PA6) ve poliamid 6,6 (PA6,6), polivinil alkol (PVA), politetrafloroetilen (PTFE), polivinilpirolidon (PVP) gibi sentetik polimerlerden elde edilebildikleri gibi(Shahabadi vd., 2015; Supaphol vd., 2005; Yee vd., 2007) jelatin, kolajen, kitosan, karboksimetil selüloz gibi doğal polimerik malzemelerden de elde edilirler.

Nanoliflerin üretimi elektro üretim (Electrospinning, ES), çözülden üfleli nanolif üretim (Solution blowing, SB), elektrik alanlı çözülden üfleli nanolif üretim (Electroblowing, EB) ve santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim (Centrifugal spinning, CS) yöntemleri gibi yöntemlerle yapılmaktadır.

Yüksek filtrasyon performansına sahip nanolifli filtreler, hava filtrasyonu için cazip durumdadır(Z. Li vd., 2016). Çalışmalarda düşük hava basıncıyla 0,3 mikron boyuttaki partiküllerin % 99,97'sini yakalayabilen nanolifli hava filtrelerinin, geleneksel cam elyaf HEPA filtreleri kadar yüksek toplama verimliliği sağlayabildiğini göstermektedir(Q. Zhang vd., 2010). Bu durum nanolifli hava filtrelerinin elektrikli süpürge torbaları, endüstriyel gaz temizleme sistemleri, temiz oda hava temizleme sistemleri, tek kullanımlık solunum aygıtları gibi farklı pek çok alanda kullanılmalarını sağlamaktadır(Barhate & Ramakrishna, 2007; Gopal vd., 2006; C. Wang & Otani, 2013; C.-S. Wang, 2001).

Nanolifli malzemelerin ekonomik anlamda kazanımları da oldukça fazladır. Sutherland'ın raporuna göre(Sutherland, 2003) filtrasyon sektörünün halihazırdaki büyüklüğü 50 milyar Euro civarındadır ve bu sektör yıllık ortalama % 8-10 oranı ile büyümektedir. Yapılan başka bir araştırmada sadece nanolif pazarının 2020 yılı itibariyle 2,2 milyar Euro civarına ulaşması beklenilmiştir(S. Sinha-Ray vd., 2011). Fakat nanolifli filtreler, düşük mekanik mukavemete sahiptirler. **Nanolifli filtrelerin filtre performanslarına ek olarak yüksek mekaniğe sahip olmaları da(Erben vd., 2015) beklenmektedir. Ayrıca** filtre malzemesi olarak kullanıldıklarında yüksek katı hacim oranları nedeniyle filtrenin yüksek basınç farkı değerine bu

sebeple de kullanım sırasında hızlı bir şekilde tıkanmasının neden olurlar(Choi vd., 2017). **Düşük basınç farkına sahip dayanıklı bir filtre elde edebilmek adına filtrenin lifleri arasında boşlukların sağlanabilmesi ve mekaniğinin artması için nanoliflerin mikroliflerle kombinasyonları üzerine çalışmalar yapılmıştır.**

2.6. Bimodal Lifli Yapılar

Tek tip ya da genel olarak belli aralıklardaki lif çaplarından oluşan yapılar, tek modlu İngilizce ifadeyle ‘unimodal’ olarak isimlendirilmektedir. Kalın ve ince liflerden oluşan hibrit yapılara ise bimodal denilmektedir(Fotovati vd., 2010). Bazı çalışmalarda kompozit ifadesi de kullanılmaktadır(Km & L, 2017; Pant vd., 2012; Przekop & Gradoń, 2008). **Bimodal yapı ile daha gözenekli kumaşların elde edilmesinden dolayı kumaş içinden hava akışı daha kolay sağlanır(Km & L, 2017).** Aynı zamanda **bimodal filtre kumaşları yapısındaki nano- ve mikroliflerden dolayı geniş bir Knudsen aralığına da sahip malzemelerdir(Przekop & Gradoń, 2008).** Bu sayede nanopartiküller, nano- ve mikroliflerden oluşan bimodal filtre kumaşları kullanılarak düşük bir basınç farkı değeri ile gazdan (havadan) kolayca ve verimli bir şekilde ayrıştırılırlar.

Literatürde bimodal filtre yapıları üzerine yapılan ilk çalışmalar genellikle simülasyon ya da teorik hesaplamalar üzerine yapılmıştır. H. Vahedi ve arkadaşları da bimodal lifli filtrelerin (cam lifli filtreler) lif çap dağılımlarını ($1 \leq R_{cf} \leq 5$), ağırlıklarını ($0 \leq n_c \leq 1$) ve katı hacim oranlarını ($5 \leq \alpha \leq 15$) kullanarak çeşitli hesaplamalar ve yöntemlerle bimodal kumaşların üç boyutlu simülasyonunu incelemişlerdir(Vahedi Tafreshi vd., 2009).

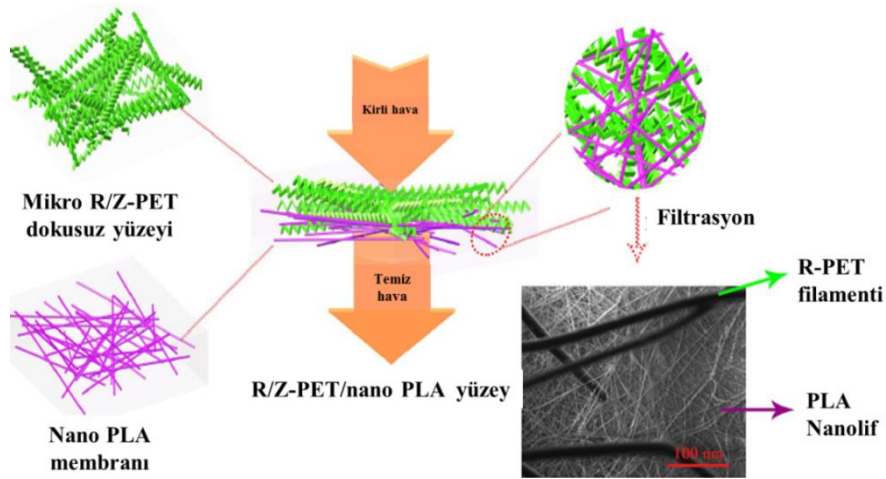
Benzer bir çalışma olarak S.Fotovati ve arkadaşları bimodal yapılu filtre kumaşlarının sayısal simülasyonu üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada bimodal yapılarda bulunan kalın ve ince liflerin oranlarına göre filtrenin yakaladığı partiküllerin oranlarında da değişiklik olduğu raporlanmıştır. Yapıdaki kalın liflerin oranı daha fazla olduğunda daha küçük partiküllerin daha az yakalandığı tespit edilmiştir(Fotovati vd., 2010).

Başka bir çalışmada bimodal yapı Poliamid 6 (PA6) ve Grafen oksit (GO) lifleri ile oluşturulmuştur. Lifler ES yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Poliamid 6 çözeltisi hazırlamak için çözelti olarak formik asit kullanıldığından PA6 lifleri ile GO nano

ağları arasında hidrojen bağlarının olduğu raporlanmıştır. Aynı zamanda bu iki çözelti arasındaki iletkenlik uyumundan dolayı GO nano ağlar, PA6 lifleri üzerinde homojen bir şekilde dağılım sağlamışlardır. Bu çalışmada bimodal yapıyı oluşturan PA6 lifleri ortalama 192 nm lif çapına sahipken GO nano ağlar ortalama 14 nm lif çapına sahip olmuştur. Yapıdaki 14 nm'lik nano ağlar sayesinde elde edilen bimodal kumaşın hem su hem de hava filtrasyonunda kullanılmaya uygun olduğu sonucuna varılmıştır(Pant vd., 2012).

Shichao Zhang ve arkadaşları ES yöntemini kullanarak sırasıyla yaklaşık 1 µm boyutta polisülfon (PSU) mikrolifli, 200 nm boyutta poliakrilonitril (PAN) nanolifli ve 20 nm boyutta PA6 nano ağı katmanları üst üste üreterek katmanlı bir multimodal filtre kumaşı üretmişlerdir. Her çözelti 1 ml/saat besleme hızıyla ve 30 kV elektrik alan ile üretilmiştir. Elde edilen katmanlı multimodal filtre kumaşı % 99,992'lik filtre verimine ve 118 Pa'lık basınç farkı değerine sahip olmuştur(S. Zhang vd., 2016).

Hava filtrasyonu üzerine yapılan benzer başka bir çalışmada, Lingli Deng ve arkadaşları ES yöntemi ile PLA nanolifleri polietilen (PET) şişelerden geri dönüştürülerek elde edilmiş mikrolifli R-PET dokusuz yüzeyli kumaş üzerine üreterek bimodal yapıyı daha kabarık/boşluklu filtre kumaşı üretmeyi hedeflemişlerdir. Yapılan çalışmaya ait görüntü Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3: 3B yapıları R-PET/nano PLA kumaşın yapısı(L. Deng vd., 2019).

Çalışmada sırası ile % 8, 10, 12 ve 14 çözelti konsantrasyonlarında PLA çözeltileri hazırlanmıştır. Hazırlanan çözeltiler 3,2 ml/saat besleme hızında, 15 kV elektrik voltajla üretilmiştir. Elde edilen lif çapları kullanılan çözelti konsantrasyonlarına göre sırasıyla 300, 740, 770 ve 1300 nm olmuştur. Yapılan üretimlerden elde edilen en homojen üretim % 12'lik çözeltilerden elde edildiğinden R-PET dokusuz yüzeyli

kumaş üzerine % 12'lik PLA çözültüsü ile nanolif üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretime ait kumaşın lif çap dağılımı 1,2 ila 3,4 µm arasında ve porları ise 1,3 ila 5 µm arasında olmuştur. Elde ettikleri bimodal kumaş % 99,992 filtre verimine, 201,11 Pa basınç farkı değerine ve 0,047 Pa⁻¹ Kalite Faktörü (QF) değerine sahip olmuştur(L. Deng vd., 2019).

MB yöntemi ile yapılan bir patent çalışmasında 2010 yılında tek tip polimer ve iki ayrı ekstruder kullanarak iki ayrı üretim parametreleri ile bimodal kumaş yapılmıştır. İki ayrı ekstruderden beslenen eriyik iki monokomponent nozul ucundan toplayıcı üzerine toplanmıştır(Fox vd., 2010).

Yine MB yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmada farklı kimyasal yapılara sahip polipropilen (PP) ve polistiren (PS) polimerleri ekstrudere birlikte beslenerek değişken polimer eriyik viskozitesi elde etmişlerdir. Bu sayede ekstruder ucundan kalın ve ince eriyik beslemesi sağlanmıştır. Bu da nano- ve mikroliflere sahip bimodal kumaş üretmelerini sağlamıştır. Yazarlar, mikro ölçekli liflerin kumaşların geçirgenliğini arttırdığını ve nano ölçekli liflerin yüksek yüzey alanı/hacim oranını artırarak filtrasyon performansını iyileştirdiğini raporlamışlardır. Aynı ifade Hiremath ve arkadaşlarının çalışmasında da geçmektedir(Hiremath & Bhat, 2015). Elde edilen bimodal dokusuz yüzeyli kumaşlar, % 99,87'lik hava filtreleme verimliliğine, 37,73 Pa'lık basınç farkı değerine ve 0,18 Pa⁻¹'lık QF değerine sahip olmuştur. Üretimde kullanılan düzenin çapı 0,2 mm'dir ve üretilen kumaşlara 20 cm mesafeden 80 kV'luk korona şarj uygulanmıştır(N. Deng vd., 2019).

Kailong ve arkadaşları da yine MB yöntemini kullanarak erime sıcaklıkları farklı olan ve birbirine karışmayan üç ayrı polimeri aynı ekstrudere besleyip deniz-ada lifleri elde etmişlerdir. Burada Polistiren/Polietilen/Poliamid 6 (PS/PE/PA6) ve Polietilen oksit/Polietilen/Poliamid 6 (PEO/PE/PA6) olmak üzere iki ayrı kombinasyon yapılarak deniz-ada lifleri elde edilmiştir. Daha sonra bu deniz-ada liflerinde matris görevi gören PS ve PEO polimerleri kendi çözücülerini (PS için tetrahidrofuran ve PEO için su) içerisinde çözülürük içerisindeki bağımsız bir şekilde oluşmuş nano boyutlardaki PE lifleri ve mikro boyutlardaki PA6 lifleri ortaya çıkarılmıştır(Jin vd., 2020).

Bimodal yapılu kumaşlar filtre uygulamalarında avantaj sağladığı gibi ilaç dağıtımı, doku mühendisliği gibi biyomedikal alandaki uygulamalarda da avantaj

sağlamaktadırlar(Yang vd., 2018). Bu konular üzerine Gentsch vd. hücre iskelet üretimi için tek bir şırınga kullanarak ES yöntemi ile bimodal kumaş üretmişlerdir. Bimodal kumaş yapısı sayesinde nanolifler ile artan hücre yapışması ve çoğalması gibi avantajları ve mikroliflerin açık ve büyük gözenek boyutu gibi özellikleri sayesinde artan nem alışverişi özelliği bir araya gelmiştir. Bu nedenle bimodal kumaşların hücrel infiltrasyon için iskelet üretiminde kullanılmaları dikkat çekici olmuştur. Çalışmada farklı konsantrasyonlardaki polikaprolakton (PCL) çözeltileri (% 10, 15, 20, 25) ile farklı besleme hızları (0,2, 0,3, 0,4, 1 ml/saat) ve farklı ortam nemi (% 47-68) kullanılarak bimodal yapı elde edilmeye çalışılmıştır. Üretim esnasında % 52'den % 39'a düşürülen nemli ortamda % 15'lik PCL çözeltisi kullanılarak 0,2 ml/saat çözelti beslemesi ile bimodal yapı kumaşlar üretilmiştir. Üretim esnasında değiştirilen nem, bimodal yapının oluşturulmasında önemli rol oynamıştır(Gentsch vd., 2010).

Bugüne kadar akademik anlamda yapılan çalışmalarda tek tip lif üretim yöntemi kullanılarak bimodal yapıların üretilmesi, genellikle kullanılacak olan çözeltiliye iletkenlik artırıcı ajanların eklenmesi ile (yukarıda bahsedilen PA6 ve GO çalışmasında olduğu gibi) ES yöntemi kullanılarak(Yang vd., 2018) ya da birbiri içerisinde karışmayan termoplastik polimerlerin birlikte MB sistemine beslenmesi ile(Jin vd., 2020) gerçekleştirilmiştir. Literatürde ES ve MB yöntemlerinin kombinlenmesi ile bimodal kumaş üretimi çalışmaları da (Erben vd., 2015, 2016; Kimmer vd., 2015; Km & L, 2017; Oh vd., 2020) bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında farklı konsantrasyonlarla ve farklı iğne çapları ile yeni nanolif üretim yöntemlerini (SB ve CS yöntemleri) ayrı ayrı ve birbirleriyle kombinlenmiş bir şekilde kullanarak sıvı-gaz ve katı-gaz ortamların yani katı veya sıvı partiküllerin havadan ayrıştırılması için nano- ve mikroliflere sahip bimodal filtre kumaşlarının üretimi çalışılacaktır.

2.7. Nanolif Üretim Yöntemleri

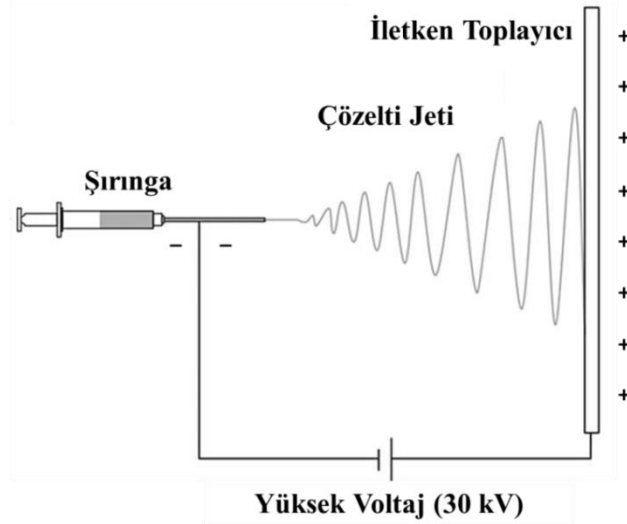
2.7.1. Elektro üretim yöntemi

Elektro üretim (Electrospinning, ES) yöntemi, nanolifli yapıların üretilmesinde kullanılan en yaygın ve eski yöntemlerden birisidir. ES sistemi; şırınga pompası, şırınga (cam/plastik), toplayıcı plaka veya döner tambur ve bir voltaj üreten güç

kaynağından oluşmaktadır. Sistem çalıştırıldığında uygulanan voltaj ile negatif yüklenen iğne/nozul ucu, çözeltiyi indükler ve çözeltide kararsızlığa neden olur. Kararsız çözelti jeti, anot ve katot arasında makroskopik bir elektrik alanının yani elektrostatik kuvvetlerin oluşması ile çözeltinin yavaşça uzayarak sivrileşmesi sonucu oluşur. Buna Taylor konisini denir (Deitzel, Kleinmeyer, Harris, vd., 2001; Deitzel, Kleinmeyer, Hirvonen, vd., 2001). Elektrostatik kuvvetler sayesinde çözeltinin yüzey gerilimi aşılar ve çözelti Taylor konisi halinden çözücünün de uzaklaşması ile lif formuna geçer. Oluşan lifler, pozitif yüklenen toplayıcı üzerinde toplanır(Agarwal vd., 2008; Balagangadharan vd., 2017; Haider vd., 2018; Ranganathan vd., 2019). ES yönteminin genel gösterimi Şekil 2.4'te verilmektedir.

ES yönteminde kullanılacak olan polimer ve çözücünün elektriksel iletkenlik özellikleri önemlidir. Aynı zamanda çözelti viskozitesi de lif oluşumunda etkin rol oynayan parametrelerden birisidir. Boyutsuz bir terim olan Berry sayısı (Be), içsel viskozite ve çözelti konsantrasyonunun ürünüdür(Almetwally vd., 2017) ve lif morfolojisini kontrol etmek için ES yönteminde genel olarak dikkat edilen bir konudur(Eda vd., 2007; Tao & Shivkumar, 2007; X. Zhang & Lu, 2014). **Be sayısı polimer zinciri ile orantılı bir terimdir. Yüksek Be değeri, yüksek polimer zinciri demektir. Kullanılan polimerin zincirleri uzun olur ise zincirlerin birbirlerine dolanmasından dolayı lif eldesi azalır ve daha kalın lifler elde edilir**(Almetwally vd., 2017). Bunun haricinde viskozitenin yüksek olması da düzenli bir çözelti jeti oluşumuna engel olan durumlardandır ve beslenen yüksek viskoziteli çözeltinin üretim esnasında bir kısmının lif olamadan toplayıcı üzerine damlacık olarak gitmesine neden olmaktadır. Ayrıca **uygun bir Be değerine sahip polimer ile yapılacak üretimlerde düzgün bir lif oluşumunun gerçekleşmesi için çözelti viskozitesi Be değerinden fazla olmalıdır. Be değeri düşük olan ve düşük viskoziteli çözeltiler ile üretilen lifli yapının, boncuklu yapıya sahip olması söz konusudur**(Almetwally vd., 2017). Bunlar haricinde uygun viskoziteli bir çözelti ile elde edilen liflerin daha ince lif çaplarına sahip olması için çözücünün hızlı bir şekilde buharlaşması gerekmektedir (Z. Zhou vd., 2009).

ES yönteminde çözeltinin viskozitesi, iletkenliği, toplayıcı-iğne arası mesafe, elektrik voltajının değeri gibi parametrelerin haricinde ortamın sıcaklığı, nemi gibi parametreler de lif morfolojisinde önem arz etmektedir(Nayak vd., 2012).



Şekil 2.4: Elektro üretim (ES) yönteminin genel gösterimi(SalehHudin vd., 2018 makalesinden uyarlandı.).

ES yöntemi ile yapılan bir çalışmada pozitif ve negatif polaritelerin kullanılması ile PA6 lifleri üretilmiştir. Bu çalışmada çözelti sıcaklığının, PA6 polimerinin moleküler ağırlığının, çözelti konsantrasyonunun, elektrot polaritesinin ve inorganik tuz ilavesinin liflerin polaritesi ve morfolojisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonunda negatif polarite ile üretilen PA6 lif çaplarının, pozitif polarite ile üretilen PA6 lif çaplarına kıyasla daha kalın olduğu keşfedilmiştir. Fakat negatif polariteli PA6 liflerinin çapları daha büyük olmasına rağmen üretimde oluşan damlacıkların boyutu pozitif polarite altında oluşan damlacıklardan daha küçük olmuştur. Negatif polariteli PA6 lifleri daha düz lif yapısına sahip olmuşken pozitif polariteli PA6 lifleri daha dairesel bir yapıya sahip olmuştur. Çalışmada 21, 24 ve 27 kV değerlerinde elektrik alan ile lif üretimleri yapılmıştır. Çözelti viskozitesinin % 10-14 arası olması mikron altı boncuk yapısının oluşmasına neden olmuştur(Supaphol vd., 2005).

Rgalski ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ES ve CS yöntemlerinin kıyaslaması yapılmıştır. Çalışmada polimer olarak PA6 kullanılmıştır. Çalışmanın ES aşamasında 15-25 kV arası güç kaynağı kullanılmıştır. İğne çapı 600 µm olarak seçilmiştir ve toplayıcı-igne arası mesafe 10 cm olarak ayarlanmıştır. CS sisteminde ise 2 iğneli nozul kullanılmıştır ve iğne çapları 160 µm olarak seçilmiştir. Toplayıcı-igne arası mesafe yine 10 cm'dir. % 22,5 çözelti konsantrasyonuna sahip çözelti ile yapılan üretimlerde lif çap dağılım aralığı CS ile üretilen liflerde daha fazla olmasına rağmen ortalama lif çapı neredeyse iki sistem için de aynı olmuştur. Düşük viskozitelere iki sistemde de lif oluşumu gözlemlenmemiştir. Fakat CS yönteminde

lif oluşumu % 17,5 çözelti konsantrasyonunda başlarken ES yönteminde % 7,5 çözelti konsantrasyonunda lif oluşumu gözlenmiştir. İki sistem için de lif oluşumunun gerçekleşebildiği en yüksek çözelti konsantrasyon değeri % 25 olmuştur(Rogalski vd., 2018).

Başka bir çalışmada, Polistiren (PS) polimerinin mekanik mukavemetini arttırmak için PA6 polimeri ile birlikte ES yönteminde nanolif üretimi yapılmıştır. Liflerin üretimi için 20 kV elektrik alan kullanılmış ve üretim hızı 0,2 ml/saat olarak ayarlanmıştır. Ortam koşulu sıcaklık ve nem sırası ile 25 °C ve % 40 olacak şekilde ayarlanmıştır. Toplayıcı-iğne arası mesafe 20 cm'dir. Elde edilen nanolifli yapının, lif morfolojisi, ısıl direnci, gerilme davranışı, hava ve su geçirgenliği ve yüzey hidrofilik özelliği incelenmiştir. Sadece PS polimerinden üretilen lifler daha fazla gözenekliliğe sahip olmuştur. PA6 liflerinin PS liflerine kıyasla 5 kat daha fazla mukavemete sahip olduğu görülmüştür. PA6 ile kombinlenen PS'den elde edilen lifli yapının mukavemeti artmasına rağmen hava ve su geçirgenlikleri azalmış, termal direnci düşmüştür(Yoon vd., 2017).

Matulevicius ve arkadaşları deneysel olarak ES yöntemi ile PA6 polimerinden üretilen nanolifli filtre ortamının toplama performansını ölçmüş ve daha ince liflere sahip filtrenin yüksek toplama verimliliğine ve yüksek kalite faktörüne sahip olduğunu bildirmişlerdir(Matulevicius vd., 2014).

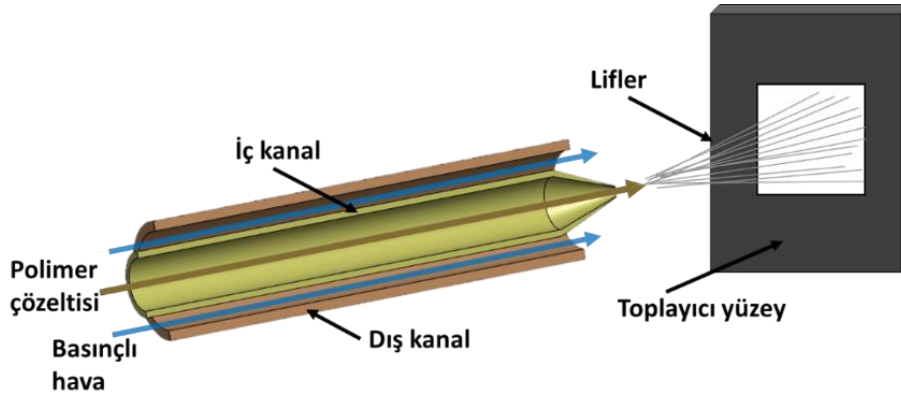
ES yöntemi kullanılan başka bir çalışmada Poli (viniliden-ko-heksafloro propilen) (P(VDF-HFP)) ve PA6 polimerleri ile katman katman olacak şekilde ayrı ayrı lifli yapılar üretilerek kompozit bir membran oluşturulmuştur. P(VDF-HFP), N,N Dimetilasetamit (DMAc) içerisinde, PA6 ise Formik Asit (FA) içerisinde çözdürülerek çözeltiler hazırlanmıştır. Nanolif üretimi için 600 µm çapında iğne kullanılmıştır. Toplayıcı-iğne arası mesafe 15 cm, ortam sıcaklığı 25 °C, ve nemi % 40 olarak ayarlanmıştır. PA6 nanolifleri 0,8 ml/saat besleme hızı ile 20 kV elektrik akımı kullanılarak üretilmiştir. P(VDF-HFP) katmanı ise 1 ml/saat besleme hızı ve 15 kV elektrik akımı kullanılarak üretilmiştir. Üretimler toplayıcı üzerine sırası ile gerçekleştirilip katmanlı üretim sağlanmıştır. Her katman için 4 saat üretim yapılmıştır. Lif formuna geçmeyen damlacıklı yapıların buharlaşması ve katmanların büzülmesini engellemek için üretimin son hali 80 °C'lik vakumlu etüv içerisinde 12 saat bekletilmiştir. 17,11 MPa mekanik dayanıma ve % 90,35 oranında gözenekli

yapıya sahip olan PA6 nanolifli yapıları kompozit membranın alt ve üst tabakalarını oluşturacak şekilde konumlandırılmıştır(Qin vd., 2020).

ES yöntemi yaygın kullanılmasına rağmen bu sistemin düşük üretim hızı, yüksek voltajlı elektrik alanından kaynaklanabilecek güvenlik sorunları, malzemenin yüksek voltajdan olumsuz etkilenme olasılığı, iletken bir toplayıcı için malzeme seçim limitleri ve her çözelti ile üretim yapılamaması gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır(F. Liu vd., 2017). Çalışmalara bakıldığında da ES yönteminde üretim hızlarının 0,1-1 ml/saat arasında olduğu ve lif oluşumu için 30 kV'a kadar güç gerektiği görülmektedir(Subbiah vd., 2005). Bu dezavantajlardan dolayı farklı nanolif üretim yöntemleri geliştirilmiş ve bu yöntemlerle çeşitli denemeler yapılmıştır.

2.7.2. Çözeltiden üfleli nanolif üretim yöntemi

ES yönteminden sonra geliştirilen çözeltiden üfleli nanolif üretim (Solution Blowing, SB) yönteminde lif oluşumu basınçlı hava ile gerçekleşmektedir. Bir iğne/nozul ucuna beslenen polimer çözeltilisine yüksek basınçlı havanın çarpması ile çözeltideki çözücü hızlı bir şekilde uzaklaştırılır(Shi vd., 2013) ve basınçlı havanın etkisi ile uzayan polimer zincirleri lif formunda vakumlu bir toplayıcı üzerinde toplanır(Polat vd., 2016). Yöntemin şeması Şekil 2.5'te gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Çözeltiden üfleli nanolif üretim yönteminin şematik gösterimi(Lauricella vd., 2020; Polat vd., 2016).

SB yöntemi, ES yönteminden maksimum 150 kat daha fazla üretim hızına sahip olması(Oliveira vd., 2011) sayesinde endüstriyel üretim için uygun bir yöntemdir. Bu yöntem ile yüksek voltajlı elektrik alan kullanılmadan nano boyutlarda liflerin üretimi mümkündür. Elektrik alanın olmamasından dolayı ES yöntemine kıyasla

daha güvenilir bir yöntem olan SB yönteminde, üretim esnasında nozullara kolaylıkla müdahale edilebilmektedir.

Bu yöntemde ES yönteminde de olduğu gibi çözelti viskozitesi, polimerin molekül zinciri, çözücünün buharlaşma hızı ve çözelti besleme hızı nanoliflerin oluşumunu etkileyen parametrelerdir. Fakat ES yönteminden farklı olarak SB ile nanolif üretimi yapabilmek için kullanılacak olan polimerin veya çözücünün iletken olması gerekmektedir.

Medeiros ve arkadaşları ES ve SB yöntemlerini karşılaştırma adına önce ES yöntemi ile farklı malzemeleri kullanarak nanolif üretimini gerçekleştirmişlerdir ve aynı malzemelerden SB yöntemi ile nanolif üretmişlerdir. Daha sonra konsantrasyonu ağırlıkça % 10 olan Polimetil metakrilat (PMMA) çözeltisi ile parametrik çalışarak parametrelerin etkisini incelemişlerdir. Bu parametrik çalışmada gaz basıncı 276 kPa, çalışma mesafesi 20 cm, iç düze ile dış düze arasındaki mesafe 2 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Sonraki aşamalarda parametrelerden sadece bir tanesini değiştirerek o parametrenin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre SB yöntemiyle ES yönteminde üretilen lif çapı aralığında liflerin üretilebildiği ve bu yöntemin ES yönteminden daha yüksek nanolif üretim kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ayrıca çevre ortamın bağıl nem oranı kontrol edilerek gözenekli lif üretilebileceği gösterilmiştir. Lif formunun oluştuğu yerdeki bağıl nem buna olanak sağlamaktadır ve bu tarz gözenekli, lifli yapılar ilaç salınımı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Lifin yapısının gözenekli olması, lif içine enjekte edilen ilaçların yavaş yavaş salınmasına olanak sağlamaktadır(Medeiros vd., 2009).

Havanın nemli olması ile damlacık miktarı da artmaktadır. Bu sebeple SB yönteminde kullanılacak havanın nem değerinin en düşük seviyede olması gerekmektedir.

Bu parametreler haricinde lif oluşumunu etkileyen en temel parametrelerden birisi havanın basıncıdır. Hava basıncının 100 kPa olduğu üretimde çok fazla damlacığın oluştuğu, 300 kPa ve üzerinde olduğunda ise kalın lif oluşumunun ve liflerde aglomerasyonun gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca **hava basıncının çok yüksek olmasından kaynaklı olarak kabin içinde oluşan türbülansın, oluşan lifleri dağıtarak toplama verimini düşürdüğü** gözlemlenmiştir(Polat vd., 2020; L. Zhang vd., 2009).

Zhang vd. etanol ve suda çözünen polivinilprolidon'u (PVP) polimerinden oda sıcaklığındaki basınçlı hava ile lif üretmişlerdir. Ayrıca polimer çözeltisine ilaveler yapılarak lif üzerinde çok ince TiO₂ gibi seramik malzemeler biriktirilmiştir. Daha sonra bu lifler fotokataliz uygulamalarında kullanılmıştır. Zhang ve arkadaşları bu çalışmalarında belirli konsantrasyonlarda, saf su ve etanol ile çeşitli polivinilpirolidon (PVP) çözeltileri hazırlamışlardır. **Çözelti konsantrasyonu artırıldığında üretilen lif çapının arttığı, fakat daha düzgün lif yapısı üretildiği** belirtilmiştir. Bu çalışmaya göre hava basıncı az olursa çözücü uzaklaşmamakta ve çözelti damlacık halinde toplayıcı yüzeyde birikmektedir. Ayrıca hava basıncı fazla olduğunda aşırı türbülans oluşumundan dolayı lifler etrafa saçılmakta ve yüzeydeki lif toplama miktarını azaltmaktadır. Çalışmaya göre bu **türbülans en çok etkilenen ince liflerdir**. Bunlara ek olarak çözelti besleme debisi arttıkça üretim hızı artmıştır. Fakat buna bağlı olarak lif çapı da artmıştır. Çözelti besleme debisinin çok yüksek olması durumunda basınçlı hava çözücüyü uzaklaştırmak için yetersiz kalmaya başlamıştır. Bu sebeple çözeltinin toplayıcı yüzeye damlacık şeklinde gitmeye başladığı gözlenmiştir(L. Zhang vd., 2009).

Düzenli ve minimum damlacıklı bir üretimin gerçekleşmesi için toplayıcı-nozul arası mesafe de oldukça önemlidir. Çözücünün buharlaşabilmesi için bu mesafenin en az 30 cm olması gerekmektedir. Yapılan bir çalışmada bu mesafe 8,75 cm olarak ayarlanmış ve lif oluşumu sağlanamadığı raporlanmıştır(Polat vd., 2020).

İğne çapı da lif üretimini sınırlayan parametreler arasındadır(Polat vd., 2016). Büyük iğne çapları, havanın çözeltinin yüzey gerilimini yenmesine engel olmaktadır. Bu sebeple çözelti viskozitesine ve kullanılacak olan hava basıncına uygun iğne çapları ile çalışılmalıdır.

Zhuang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada SB yöntemini kullanarak ve moleküler ağırlığı 50000 olan polietilen oksit'i (PEO), dimetilformamid (DMF) içerisinde çözerek % 10 konsantrasyonunda hazırladıkları çözelti ile lif üretimi yapmışlardır. Bu çalışmada polimer jet üzerindeki çözücüyü daha hızlı buharlaştırabilmek için ısıtma ünitesi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan düzenin iç çapı 0,33 mm ve dış çapı da 0,55 mm'dir(Zhuang vd., 2012).

Bir diğer çalışmada Pourdeyhimi ve arkadaşları, SB yöntemiyle soya lifleri üretmişlerdir. Soya proteini ile formik asit içerisindeki poliamid 6 (PA6)'yı karıştırıp

lif formuna getirmişlerdir. Soya proteini ve PA6'nın ortak çözücüsü (formik asit) olmasından dolayı PA6 seçilmiştir. Soya proteini ile PA6'nın karışma oranları 40/60 olarak ayarlanmıştır. Bu çalışmada ayrıca soya proteini merkez, PA6 kabuk olacak şekilde merkez-kabuk (core-shell) yapıda nanolifler de üretilmiştir. PA6'nın ilave edilmesinin sebebi viskoelastisiteyi artırarak çözeltiden üfleme işlemini kolaylaştırmaktır(S. Sinha-Ray vd., 2011).

Soya proteini ve PA6 karışımı şırınga pompası ile çapı 1,8 mm olan iç düzeye beslenmiştir. Daha sonra bu düzeye silindirik olarak çevreleyen ve eş merkezli olan dış düzeden 230–250 m/sa hızlarında azot gazı gönderilmiştir. Azot gazı sayesinde çözelti daha kolay uzayarak lif formuna geçmiştir. Çözelti besleme debisi ise 4-5 ml/saat ve basınçlı gazın basıncı da 2-2,5 bar olarak ayarlanmıştır. Merkez-kabuk yapısının elde edilebilmesi için iki farklı şırınga pompası kullanılmıştır. İki malzeme şırınga pompalarından eş eksenli içteki kanalın çapı 0,84 mm ve dıştaki kanalın çapı 1,80 mm olan iki kanallı bir düzeye beslenmiştir. Bu düze de yine eş eksenli bir dış düzenin içerisine yerleştirilmiştir. Dış düzeden yüksek hızlı azot gazı gönderilmektedir. Kabuk malzemesinin besleme debisi 5 ml/saat ve merkez malzemesinin besleme debisi 6 ml/saat olarak ve azot gazının basıncı da 20-25 bar olarak ayarlanmıştır(S. Sinha-Ray vd., 2011).

Yarin ve arkadaşları da benzer bir çalışma yaparak soya proteininden ürettikleri nanolifli yapının çekme mukavemetini incelemişlerdir. SB yöntemi ile ürettikleri lifleri dönen bir silindir üzerinde toplamışlardır. Bu kumaşların elastiklik modülü, akma gerilmesi ve özgül şekil verme enerjisi ölçülmüştür. Bu hesaplar soya proteini ve PA6 karışımından ve sadece PA6'dan üretilen numuneler için yapılmıştır ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çözeltiler hazırlanırken 2011 yılında yaptıkları bir çalışmadaki(S. Sinha-Ray vd., 2011) adımları izlemişlerdir. Soya proteini-PA6 karışımı ve saf PA6 çözeltileri hazırlanmıştır. Merkez-kabuk yapıda nanolif üretmek için kullanılan SB yönteminde soya proteini iç düzeye, PA6 ise dış düzeye 4 ml/saat debiyle beslenmiştir. Bu iki eş eksenli düzeye dairesel çevreleyen yine eş eksenli bir düzeden çıkış basıncı 1,5–2,5 bar olan hava beslenmiştir. Üretilen iki numuneyi kıyaslayabilmek için sadece PA6'dan hazırlanan çözelti ile de nanolif üretilmiştir. Formik asit içerisinde çözülerek ağırlıkça % 20 konsantrasyondaki PA6 çözeltisi iç çapı 1,8 mm olan düzeye 5 ml/saat debiyle beslenmiştir. Bu düzeye dairesel olarak çevreleyen eş eksenli düzenin çıkışında hava, basıncı 1,5–2,5 bar olacak şekilde 19-

24 cm uzaklıktaki dönen silindir üzerinde toplanmıştır. Silindirin açısal hızı 100-280 rad/s'dir. Üretilen liflerin çapı 300–500 nm aralığında olmuştur. Nanolifler folyo üzerinde toplandıktan sonra, folyo silindir üzerinden çıkarılıp, mekanik test için uzunluğu 25-35 mm ve genişliği 10–15 mm olacak şekilde numuneler kesilmiştir. Bu numunelerin çekme testi 100 N kapasiteli Instron makinesiyle yapılmıştır. Üst çene 0,1 mm/dk hızla uzatılmaya başlanmıştır ve alt çene ilk pozisyonunda sabit kalmıştır. İlk çatlak/yırtılma oluşana kadar test devam ettirilmiştir(Khansari vd., 2012).

Bu çalışmaların yanı sıra SB yöntemi ES yöntemine kıyasla yeni bir yöntem olmasına rağmen literatürde SB yöntemi kullanılarak filtreleme, elektronik, lityum-iyon pil ve doku mühendisliği gibi pek çok alanda uygulamalar yapılmıştır(Daristotle vd., 2016; Naeimirad vd., 2018; Suman Sinha-Ray vd., 2013).

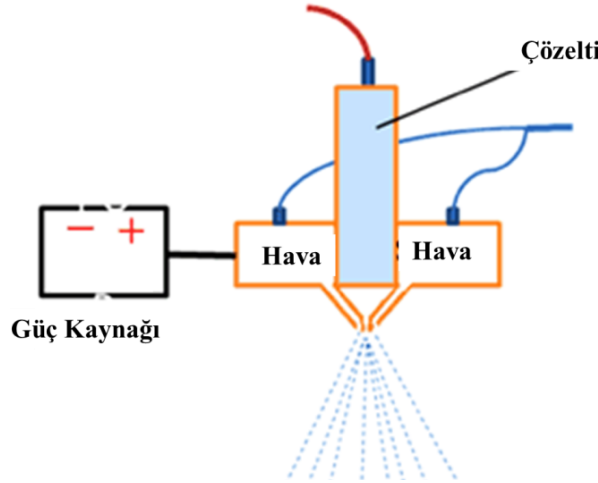
Liu ve arkadaşları SB yöntemini kullanarak jelatin nanolif üretmişlerdir. Çalışmalarında, üç farklı Bloom değerine (100, 150, 225) sahip A tipi domuz derisi jelatinlerini ve yüksek moleküler ağırlıklı balık derisi jelatinlerini kullanarak % 10, 15, 20 ve 25 konsantrasyonlarda çözelti hazırlayıp farklı besleme hızlarında (0,04, 0,05, 0,06 ml/dk) ve farklı hava basıncı değerlerinde (0,2, 0,3, 0,4 Mpa) üretim yapmışlardır. Çalışmanın sonucunda, sadece balık derisi jelatini ile başarılı bir şekilde lif oluşumu gerçekleştiği raporlanmıştır. Elde edilen liflerin lif çapları 10-120 nm arasında olmuştur(F. Liu vd., 2017).

Ryan ve arkadaşları silika/jelatin sol-jel sistemleri ile SB yöntemi ve kriyo-SB ile inorganik/organik hibrit bir elyaf üretimi gerçekleştirmişlerdir. Seçilen inorganik ve organik malzemeler yardımıyla elyafların mekanik ve bozunma özelliklerinde ve çözeltilerin viskozite davranışında ayarlama yapabilmek için hibrit bir sistem seçilmiştir. SB ile hibrit elyaf elde etmek için, farklı oranlarda tetraetil ortosilikat (TEOS), deiyonize su, etil alkol (EtOH) ve hidroklorik asit (HCl) dahil olmak üzere iki silis içeren çözelti hazırlanmıştır ve daha sonra % 10 (ağır./hac.) sulu jelatin solüsyonları ile karıştırılmıştır. Bu çalışma için çözeltiler, kriyo-SB için farklı şekilde hazırlanmıştır. Silika içeren solüsyonlarda EtOH yerine yeterli donma ve liyofilizasyon özelliği sağlayan tert-butil alkol (TBA) kullanılmıştır; jelatin solüsyonlarında ise çözücü olarak su yerine fosfat tamponlu salin (PBS) kullanılmıştır. SB ile hazırlanan çözeltilerle yapılacak lif üretiminde üretim parametreleri 200 µl/dk besleme hızı, 0,2 MPa hava basıncı ve 30 cm toplayıcı-nozul arası mesafesi olacak şekilde belirlenmiştir. Sonuç olarak 1-6 µm arası çaplarda lifler

elde edilmiştir. Kriyo-SB sistemi farklı şekilde hazırlandığı gibi farklı şekilde de uygulanmıştır. Parametreler 230 µl/dk besleme hızı, 0,1 MPa hava basıncı ve 10 cm toplayıcı-nozul mesafesi şeklinde ayarlanmıştır. Bu sistemde toplayıcı, 45 ° açıyla bir sıvı N₂ banyosu içerisine yerleştirilmiştir. Çözelti, sıvı N₂ içerisine üflenerek üretimden sonra donmuş olan lifli membranlar toplanarak liyofilize edilmiştir. İşlem sonrası 2-6 µm çap aralığında 1. sınıf hibrit lifler ve 3-9 µm çap aralığında 2. sınıf hibrit lifler elde edilmiştir(Greenhalgh vd., 2017).

2.7.3. Elektrik alanlı çözültiden üflelemeli nanolif üretim yöntemi

Elektrik alanlı çözültiden üflelemeli nanolif üretim (Electroblowing, EB) yönteminde nanolifler, basınçlı havanın ve elektrik alanının etkisiyle oluşturulmaktadır. Bu yöntemde nozul ucuna beslenen çözülti, yüksek basınçlı hava ile lif formuna getirilirken, üretim esnasında kararsız kalıp lif formuna geçemeyen çözültinin de, nozul ucuna bağlanan güç kaynağı ile elektrik yüklenerek lif formuna geçmesi sağlanır. EB yönteminde ES yönteminde olduğu gibi çözülti konsantrasyonu, iletkenliği, çözültinin yüzey gerilimi lif oluşumunu etkileyen çözülti parametreleridir. Havanın basıncı, elektrik alan, toplayıcı yüzeyi ve toplayıcı-nozul mesafesi gibi parametreler ise lif oluşumunda etkin rol oynayan sistem parametreleridir. Şekil 2.6’da EB yönteminin genel çalışma prensibini gösteren şema gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Elektrik alanlı çözültiden üflelemeli nanolif üretim yöntemi şeması(X. Zhou vd., 2017).

EB ile yapılan bir çalışmada güç kaynağı 8 kV altına düşmeyen bir triboelektrik nanojenaratöre dayalı EB sistemi tasarlanmış ve üretimlerde kullanılmıştır. Bu çalışmada lifleri oluşturan temel etken elektrik alandır. Hava basıncı yardımcı eleman olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hedef voltaj değerini 8 kV’un altına

düşürebilmektir. Yapılan denemeler neticesinde sistem, yüksek voltaj tüketiminin % 21'inden fazlasını koruyarak 6250 V değerinde çalıştırılmıştır. Oluşturulan sistem ile 5 saniyelik üretim ile birkaç mikron kalınlığında nanolifli membran üretimi sağlanmıştır. Bu sebeple üretim hızının ES yöntemine kıyasla oldukça fazla olduğu ve çalışma sonunda elektrik alan sayesinde SB yöntemine kıyasla daha ince liflerin elde edildiği raporlanmıştır(Y. Liu vd., 2020).

EB yöntemi ile yapılan başka bir çalışmada katalizör yapımı için $CeO_2/CuO/Al_2O_3$ ultra ince liflerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen lifler daha sonra kalsine edilmiştir. Çözeltiye eklenen Al_2O_3 , $CeO_2/CuO/Al_2O_3$ liflerinin daha esnek olmasını sağlamış ve aynı zamanda kalsinasyon işlemi sırasında CeO_2 ve CuO 'nun kristal büyümesini sorunsuz bir şekilde engellemiştir. CuO 'nun varlığı da daha yüksek oksijen içeriği sağlamıştır. Üretim esnasında 0,8 mm çaplı iğne kullanılmıştır. İğne-toplayıcı arası mesafe 80 cm olarak ayarlanmıştır. Hava basıncı olarak 0,5, 1, 1,5 ve 2 bar değerler denenmiş ve 10, 20, 30 ve 40 kV elektrik akımı kullanılmıştır. Besleme hızı için ise 10, 20, 30 ve 40 ml/saat değerleri denenmiştir. Bu çalışmadaki değerlerden de görüleceği üzere üretim hızı, sistemde var olan hava basıncı sayesinde ES yönteminden en az 40 kat daha fazladır(X. Zhou vd., 2017).

EB yöntemi ile yapılan bir başka çalışmada Poli(viniliden florür) (PVDF) polimerinden üretilen elektret filtreler üretilmiştir. Üretilen yapıların lif morfolojisi ve filtrasyon özellikleri incelenmiştir. Çözelti konsantrasyonunun ve uygulanan elektrik voltajın bu özelliklere olan etkileri incelenmiştir. % 12 ve % 16 çözelti konsantrasyonları ile ve 0-30 kV arası uygulanan elektrik alan ile yapılan üretimlerde ortalama lif çapı 727 ± 366 nm'den 408 ± 143 nm'ye ve 424 ± 233 nm'den 328 ± 105 nm'ye düşürülmüştür. Azalan çözelti konsantrasyonu ve artan elektrik akım lif çaplarında azaltıcı etki göstermiştir. Üretim yönteminde kullanılan elektrik alan sayesinde üretilen lifli filtre kumaşının elektrik yüklendiği ve bu sebeple elektret filtre kumaş uygulamalarında elektrikleme için yapılan ikinci bir uygulamaya gerek olmadığı raporlanmıştır. Üretimde besleme hızı 5 ml/saat olarak, hava basıncı ise 1,3 bar olarak seçilmiştir. % 12 konsantrasyonlu çözelti ile 30 kV akımda yapılan üretim sonucu elde edilen kumaşın filtre verimi % 82,5 olarak ölçülmüştür(Rai vd., 2020).

Li ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada EB yöntemi kullanılarak alümina lifli kumaş üretilmiştir. Bu çalışmada da bir önceki çalışmada olduğu gibi EB yönteminde elde edilen liflerin lif çaplarının SB yöntemine kıyasla çok daha küçük

olduğu raporlanmıştır. Aynı zamanda daha homojen ve azalan damlacık yapısından dolayı daha esnek yapıların üretildiği de belirtilmiştir(L. Li vd., 2015).

EB yöntemi gibi üretim hızı yüksek bir başka nanolif üretim yöntemi de santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemidir.

2.7.4. Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemi

Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim sistemi, bir başka deyişle santrifüj lif eğirme yöntemi (Centrifugal Spinning, CS), aslında eski bir üretim yöntemidir ve ilk olarak mikron çaplardaki cam yünlerinin üretimi ile ortaya çıkmıştır. Nanolif üretimi için uygulama alanı ise henüz yeni yeni gelişmektedir(X. Zhang & Lu, 2014). Bu sistemde lifler, merkezkaç kuvvetleri sayesinde meydana gelmektedir. Eğirme kafası olarak isimlendirilen döner nozul veya plaka üzerine beslenen çözeltinin hızlı bir şekilde döndürülmesiyle içerisinde bulunan viskoelastik bir çözelti, yüzey gerilimini aşarak kafadan uzaklaşır(Melike vd., 2019). Kafandan uzaklaşmaya başlayan çözelti, çözelti jetini oluşturur ve içerisindeki çözücü buharlaşarak geride kalan polimer zincirlerinin uzaması ile lifler elde edilir. Bu sistem, diğer nanolif üretim sistemlerine özellikle ES yöntemine kıyasla daha güvenilirdir(X. Zhang & Lu, 2014). Aynı zamanda bu üretim yöntemi ile daha hizalanmış ve yüksek polimer zincir oryantasyonuna sahip lifler, 100-200 kata kadar yüksek üretim hızları ile üretilmektedir(Zhmayev vd., 2015, 2015). CS yöntemi, yüksek üretim hızından dolayı uygun maliyetli ve kolay kullanımlı(Jiang vd., 2015) bir üretim sistemidir(X. Zhang & Lu, 2014).

CS yönteminde merkezkaç kuvveti, çözelti jetini çekme ve çözeltinin yüzey alanını genişletme eğilimindeyken; reolojik kuvvet, hızlı değişimlere direnmektedir(X. Zhang & Lu, 2014). Bu sebeple **bu sistem ile pürüzsüz liflerin oluşumu mümkündür**. Bu yöntem kullanılırken polimere ait moleküler yapının, moleküler ağırlığın ve çözücü tipinin ayarlanması, yüzey gerilimini kontrol etmek için uygun bir yaklaşımdır(X. Zhang & Lu, 2014).

CS yönteminde merkezkaç kuvveti haricinde hava sürtünme kuvveti, reolojik kuvvetler, yerçekimi kuvveti ve yüzey gerilimi gibi diğer kuvvetler de nanolif oluşumunu etkilemektedir(Zhmayev vd., 2015). Merkezkaç kuvveti ve hava sürtünme kuvvetini doğrudan etkileyen eğirme kafasının dönme hızı ise bu yöntemde en önemli parametredir. CS yönteminde lif eğirme sırasında döner kafa/nozul

ucundan çıkan çözelti jetinin maruz kaldığı merkezkaç kuvveti (F_{centri}) denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır.

$$F_{centri} = m\omega^2 D/2 \quad (2.1)$$

Burada m sıvının kütlesi, ω eğirme kafasının dönme hızı ve D eğirme kafasının çapıdır. **Çözelti jetinin nozul ucundan çıkıp lif formuna gelmesi için merkezkaç kuvvetinin, çözeltinin yüzey gerilimini aşması gerekmektedir**(X. Zhang & Lu, 2014). Bu sebeple üretimde uygun dönme hızlarının kullanılması gerekir.

CS yönteminde lif eğirme sırasında oluşan sürtünme kuvveti ise denklem 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$F_{fri} = \pi C \rho A \omega^2 D/2 \quad (2.2)$$

Bu denklemde ω jetin dönüş hızını, D de jetin almış olduğu yolunun çapını temsil etmektedir. C sayısal bir sürüklenme katsayısı, ρ hava yoğunluğu, A jetin enine kesit alanıdır.

Bu eğirme yönteminde de diğer yöntemlerde olduğu gibi nanoliflerin morfolojisi; çözeltinin viskozitesi, yüzey gerilimi, polimerin moleküler yapısı ve ağırlığı, çözeltinin konsantrasyonu, çözücü tipi gibi çözelti parametrelerine bağlı olduğu gibi dönme hızı, döner kafanın şekli, çapı, iğne çapı ve iğneden toplayıcıya olan çalışma mesafesi gibi işlem parametrelerine de bağlıdır(Lu vd., 2013).

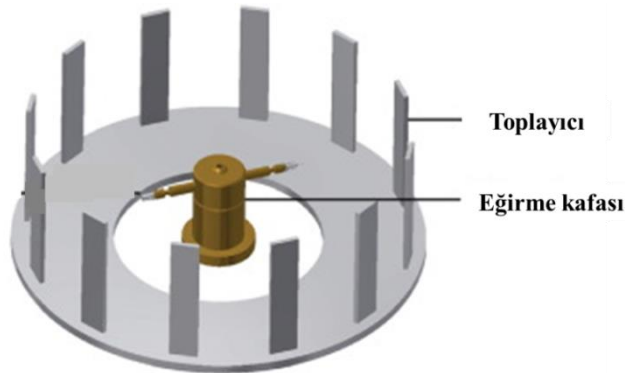
Polivinilpirolidon (PVP), polikaprolakton (PCL) ve polilaktik asit (PLA) polimerleri, CS sistemi ile başarılı bir şekilde üretilebilen polimerlerdir(Amalorpava Mary, 2013; Loordhuswamy vd., 2014; Sebe vd., 2015; L. Wang vd., 2017). Bu yöntem ile karbon ve seramik liflerin (Tepekiran vd., 2019) üretimi de mümkündür.

Bu sistem ortaya çıkmadan önce Weitz ve arkadaşları 2008 yılında şans eseri yapmış oldukları ve “standart bir eğirme-kaplama işlemi sırasında bir polimer çözeltisi ile 25 nm'den daha küçük çapta beklenmedik nano ölçekli lif bulgusu” olarak isimlendirdikleri çalışmada bir dönen kaplayıcı üzerinde, 3000 rpm dönüş hızında Polimetil metakrilat (PMMA) polimer çözeltisinden yaklaşık 25 nm çapında nanolif elde etmişlerdir. Lif oluşumunun nedeni merkezkaç kuvvetine ve çözelti yüzey gerilimine bağlanmıştır(Lozano & Sarkar, 2009).

Gündoğdu ve arkadaşları, ağırlıkça % 10 termoplastik poliüretan (TPU) çözeltisi ile çeşitli işlem parametrelerini kullanarak CS yöntemiyle nanofibröz hava filtreleri üretmiştir. Bu çalışma sonucunda optimize edilmiş numuneden 98 Pa basınç düşüşü değeri ve E12 seviyesinde filtrasyon verimi elde edilmiştir(Gundogdu vd., 2018).

Başka bir çalışmada Melike ve arkadaşları CS yöntemini kullanarak PVP polimerinden neme dayanıklı yüksek filtre verimine sahip filtre kumaşları üretmişlerdir. Bu çalışmada öncelikle farklı konsantrasyonlarda (% 5, 10 ve 20) PVP çözeltileri hazırlanarak ve farklı nozul dönme hızları (4000, 6000 ve 8000 rpm) denenerek damlacıksız ve en ince liflerin oluştuğu optimum üretim parametreleri (% 5 çözelti konsantrasyonu, 8000 rpm nozul dönme hızı) belirlenmiştir. Optimum üretim parametrelerinin belirlenmesi neticesinde filtre kumaş üretimi için uzun süreli üretim yapılmıştır. Elde edilen PVP kumaş, neme dayanıksız olduğundan, fiziksel olarak çapraz bağlanarak neme karşı dayanıklı olması sağlanmıştır. Bu işlem için üretilen filtre kumaşı 5 saat boyunca 250 °C'deki etüv içerisinde bekletilmiştir. Sonuç olarak % 99,995 filtre verimine ve 0,39 mmH₂O⁻¹ kalite faktörü değerine sahip neme dayanıklı filtre kumaşları elde edilmiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardaki CS yöntemlerinde kullanılan toplayıcıdan farklı olarak vakumlu silindirik bir toplayıcı kullanılmıştır(Melike vd., 2019).

Çalışmalarda genel olarak kullanılan CS sistemine ait görsel Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7: Geleneksel santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim sistemi(Upson vd., 2017).

3. DÜŞÜK BASINÇ FARKINA SAHİP YÜKSEK FİLTRE VERİMLİ BİMODAL YAPILARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

3.1. Düşük Basınç Farkına Sahip Yüksek Filtre Verimli Bimodal Yapıların Üretimi

Bu tez kapsamında nano- ve mikroliflerden oluşan bimodal filtre kumaşlarının üretimi hem çözültiden üfleli nanolif üretim (SB) yöntemi hem de santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim (CS) yöntemi ayrı ayrı kullanılarak farklı iğne çapı ve çözelti konsantrasyonlarının kombinlenmesi ile elde edildi. Aynı zamanda iki sistemin bir arada kullanılması ile bimodal filtre kumaşının üretilmesi de denendi. İki sistemin bir arada kullanıldığı bimodal çalışmada SB yöntemi ile daha nano boyutta lif çapına sahip liflerin üretimi mümkün olduğundan nanolif üretimi bu sistem ile gerçekleştirilirken, CS sisteminde maksimum yani mikron boyutta lif çapına sahip liflerin üretilmesi mümkün olduğundan mikron boyuttaki liflerin üretimi de bu yöntem ile gerçekleştirilerek bimodal filtre kumaşı elde edildi. Yalnızca SB yöntemi kullanılarak yapılan bimodal çalışması tezin birinci bölümünü, yalnızca CS yöntemi kullanılarak yapılan bimodal çalışması tezin ikinci bölümünü ve her iki yöntemin birlikte kullanılması neticesinde oluşturulan hibrit üretim sistemi ile yapılan bimodal çalışması ise tezin üçüncü bölümünü oluşturmaktadır.

3.1.1. Malzemeler

Polimer olarak Ultramid marka B27 kodlu Poliamid 6 polimeri, BASF firmasından temin edildi. Molekül ağırlığı 27000 gr/mol'dür. Erime sıcaklığı 220 °C'dir. Poliamid 6 polimeri 2:1 oranındaki asetik asit:formik asit karışımında çözüldü. TEKKİM marka % 99,9 saflıktaki asetik asit ve Merck marka % 99,9 saflıkta formik asit Labor Kimya firmasından temin edildi. Poliamid 6 polimerine ait kimyasal özellikler Çizelge 3.1'de, çözücü kimyasallara ait kimyasal özellikler ise Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.1: Poliamid 6 polimerinin kimyasal özellikleri.

Özellikler	Birim	Değer
Erime noktası	°C	220
Yoğunluk	g/cm ³	1,12-1,15
Viskozite	-	2,62-2,83
Nem içeriği	%	≤ 0,060
Amino grupları	meq/kg	35-39

Çizelge 3.2: Çözücülerin kimyasal özellikleri.

Özellikler	Formik Asit	Asetik Asit
Formülü	CH ₂ O ₂	C ₂ H ₄ O ₂
Kaynama noktası °C	107	117
Yüzey gerilimi mN/m	0,037	0,028
Yoğunluk g/cm ³	1,19	1,05
Molar kütle g/mol	46,03	60,05
Safiyet %	99,9	99,9
Viskozite	1,8	1,17
Dielektrik sabiti	58,5	6,19

3.1.2. Çözültiden üflemlenmiş nanolif üretim yöntemi ile bimodal PA6 liflerinin üretimi

Çözültiden üflemlenmiş nanolif üretim (SB) yönteminde lifler nozul içerisinden gelen çözültinin etrafından yüksek basınçlı havanın beslenmesi ile elde edilmektedir. Yüksek basınçlı hava, çözülti içerisindeki çözücüyü uzaklaştırır ve basınçlı hava sayesinde uzayan polimer zincirleri lif formunda toplayıcı bant/yüzey üzerinde toplanır. Liflerin dokusuz yüzeyli kumaş olan bir destek tabakası (nonwoven) üzerine toplanabilmesi için toplayıcı yüzey, vakumlu emiş fanlarına sahiptir. SB yönteminin teknik özellikleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3: Çözültiden üflemlenmiş nanolif üretim cihazına ait teknik özellikler.

Özellikler	Değerler
Toplayıcı-Nozul Mesafesi	30-100 cm
Maksimum Kumaş Eni	150 cm
Kumaş Sarım Hızı	20-600 m/sa
Vakum Emiş Kapasitesi	250 m ³ /sa
Maksimum Hava Basıncı	6 bar

Deney, SB cihazı içerisinde iki ayrı nozul yerleştirilerek gerçekleştirildi. Bir nozuldaki düşük konsantrasyonlu (% 7) PA6 çözeltisi beslenirken diğeri bir nozuldaki yüksek konsantrasyonlu (% 20) PA6 çözeltisi beslendi. Nozullara çözeltinin beslenmesi iki ayrı şırınga pompası ile gerçekleştirildi. Yüksek basınçlı hava ise tek bir regülatörden sağlandı. Deney düzeneğine ait görüntü Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1: SB yöntemi ile bimodal kumaş üretimi için deney düzeneği.

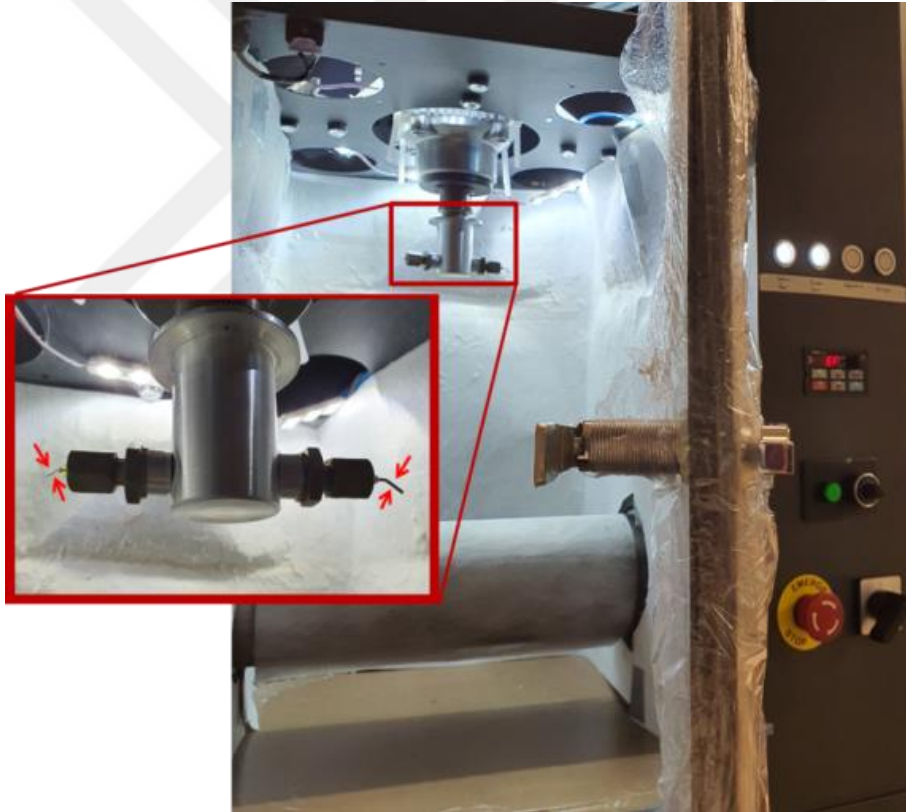
3.1.3. Santrifüj kuvvetleri ile lif üretim yöntemi kullanılarak bimodal pa6 liflerin üretimi

Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim (CS) yönteminde lifler, nozul içerisine beslenen çözeltinin yüksek dönme kuvvetleri sayesinde nozulda bulunan iğnelere dışarıya bir çözelti jeti oluşturması ile elde edilir. Yüksek dönme kuvvetleri sayesinde çözelti, yüzey gerilimini aşarak çözücü buharlaşır ve uzayan polimer zincirleri, lif formunda silindirik bir toplayıcı üzerinde toplanır. Tezde kullanılan CS sisteminde çözücünün çözelti jetinden daha kolay uzaklaşabilmesi ve liflerin toplayıcı üzerine yönlenebilmesi için nozul ucuna yukarıdan aşağıya olacak şekilde dört farklı noktadan basınçlı hava gönderilir. Aynı zamanda liflerin toplayıcı üzerine toplanabilmesi için toplayıcı içerisinde emiş yapan fanlar bulunmaktadır. CS yönteminin teknik özellikleri Çizelge 3.4’te verilmektedir.

Çizelge 3.4: Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim cihazına ait teknik özellikler.

Özellikler	Değerler
Nozul Maksimum Dönme Hızı	15000 rpm
Toplayıcı-Nozul Mesafesi	40 cm
Nozul Hacmi	6,5 cm ³
Nozul İğne Çapı	0,250-1,00 mm
Maksimum Kumaş Eni	40 cm
Silindirik Toplayıcı Hızı	30-220 rpm
Vakum Emiş Kapasitesi	1000 m ³ /sa

Bimodal yapının oluşturulması için yapılan ön üretimler neticesinde en uygun çözelti konsantrasyonu (% 20) seçilerek ve nozula iki farklı çapa sahip (30G ve 18G) iğneler takılarak deney gerçekleştirildi. Sisteme ait görüntü Şekil 3.2’de verilmektedir.

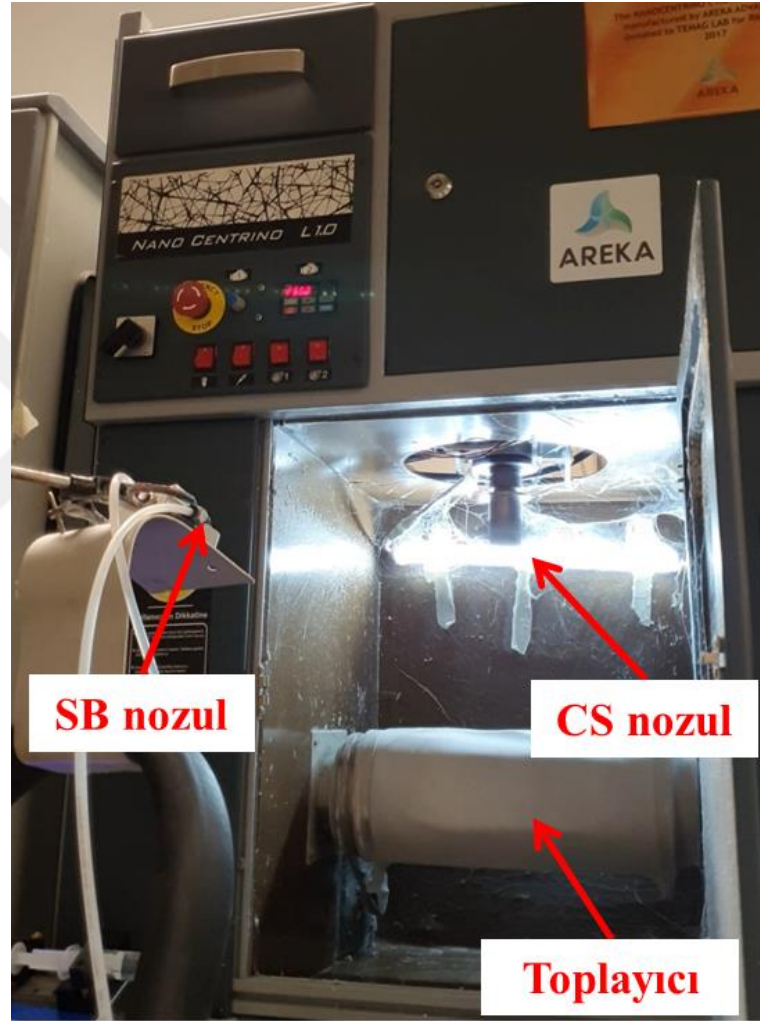


Şekil 3.2: CS cihazı ve 30G (sol) ve 18G (sağ) çapa sahip iğnelerin takılı olduğu nozulun gösterimi.

3.1.4. Santrifüj kuvvetleri ile lif üretim yöntemi ve çözeltiden üfleli nanolif üretim yönteminin kombinlenmesi ile bimodal pa6 liflerinin üretimi

Bu aşamada hem çözeltiden üfleli nanolif üretim (SB) yöntemi hem de santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim (CS) yöntemi bir arada kullanıldı. İki sistemin bir araya

getirilmesi ile tez boyunca CSB şeklinde isimlendirilen hibrit bir yöntem oluşturuldu. SB yöntemi ile 50 nm'ye kadar ince liflerin üretilmesi mümkün olduğundan bimodal yapının ince lifleri bu yöntem ile üretilirken CS yöntemiyle de 3-4 μm 'ye kadar kalın liflerin eldesi mümkün olduğundan bimodal yapının kalın lifleri de bu yöntem ile üretilecek şekilde deney düzeneği oluşturuldu. SB yönteminde kullanılan nozul taşınabilir olduğundan nozullar CS cihazının önüne yerleştirildi. Oluşturulan deney düzeneğine ait görüntü Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3: SB ve CS sistemlerinin kombinlenmesi ile oluşturulan hibrit deney düzeneği.

3.2. Düşük Basınç Farkına Sahip Yüksek Verimli Bimodal Yapıların Karakterizasyonu

Nanolif üretim yöntemlerinde çözelti viskozitesi, elde edilecek lif çaplarının belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu sebeple üretimlerde kullanılan her

çözeltinin viskozite ölçümleri bir viskozimetre yardımı ile ölçüldü. Üretilen lifli kumaşların yüzey morfolojilerinin incelenmesi ve lif çapı ölçümlerinin yapılabilmesi için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikroskop görüntüleri alındı. İmage J programı ile üretimlerin lif çapları SEM görüntüleri kullanılarak ölçüldü. Hava geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi için üretimlerin hava geçirgenlik analizi yapıldı. Filtre uygulamalarında kumaşın gözenekliliği önem arz ettiğinden kumaşların gözenek boyutları hakkında bilgi edinebilmek için üretilenlere Porozite testi yapıldı. **İkinci bölümde CS yöntemi kullanılarak oluşturulmaya çalışılan bimodal kumaş üretim çalışmasında lif çaplarında belirgin bir farklılık oluşmadığından porozite testi ve çekme mukavemeti testi yapılmadı.** Yapının porozitesi, hava geçirgenliği testi ile tahmin edilmeye çalışıldı ve ilgili formül kullanılarak hesaplandı. Filtre uygulamaları için üretilen kumaşlarda katı hacim değeri hesaplanmaktadır. Katı hacim değeri hesabında gerekli olan kumaş kalınlığı değerleri dijital komparatör ile ölçüldü. Kumaşların sahip oldukları basınç farkı değerlerinin ve filtrasyon verimlerinin tayini için endüstride de kullanılan Filtre Test cihazı ile filtre testleri gerçekleştirildi. Son olarak kumaşların sahip oldukları mikroliflerden dolayı çekme mukavemetlerinin ne derece iyileştiğini gözlemlemek adına bimodal ve referans üretimlerin çekme mukavemeti ölçümleri yapıldı.

3.2.1. Viskozite

Polimerin moleküler ağırlığı, çözücü tipi ve çözelti konsantrasyonu çözelti viskozitesinin belirlenmesinde etkili rol oynayan faktörlerdir (Robb & Lennox, 2011; H. Yuan vd., 2017). Bu tez çalışmasında çözücü tipi ve kullanılan PA6 polimerinin moleküler ağırlığı sabit tutuldu ve farklı konsantrasyonlarda PA6 çözeltileri hazırlanarak düşük ve yüksek viskoziteli çözeltilerin CS yönteminde lif oluşumuna olan etkileri gözlemlendi. Hazırlanan PA6 çözeltilerinin viskoziteleri Fungilab Alpha Serisine ait dijital viskozimetre ile ölçüldü. Ölçüm, cihaza takılan ve çözelti içerisine doğru salınan mil ile gerçekleştirilir. Çözeltinin sahip olduğu viskozite değerine göre mil ucunda bulunan çaplar değişiklik göstermektedir. Uygun çapa sahip milin çözelti içerisinde yapmış olduğu dönme hareketi neticesinde elde edilen tork değeri, çözeltinin viskozitesi hakkında bilgi vermektedir. Ölçümlerde 100 rpm mil dönüş hızı kullanıldı. Non-newtonian özellik gösteren polimer çözeltilerinde oluşan reolojik kuvvetlerden dolayı zamanın geçmesi neticesinde viskozite değerinde düşüş gözlenir.

Bu sebeple cihaz ekranında ilk saniyelerdeki verilen viskozite değeri not edilir. Cihazın görüntüsü Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Viskozimetre cihazı.

3.2.2. Yüzey morfolojisi analizi

Üretilen liflerin, morfolojik yapılarının ve lif çaplarının tayini için TESCAN marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroskop görüntüleri alındı. Cihaza ait görsel Şekil 3.5'te verilmektedir. Numuneler, cihazın içerisine yerleştirilen özel başlıklara çift taraflı karbon bant sayesinde yapıştırılırlar. Hazırlanan numunelerin iletkenlik özellikleri bulunmadığından, SEM içerisine yerleştirilmeden önce Quorum SC7620 marka kaplama (sputter) cihazı kullanılarak vakum altında Altın-Paladyum (Au-Pd) ile kaplanırlar. Kaplamanın gerçekleştirildiği cam fanusa beslenen argon gazının ardından, numune anot, kaplamayı sağlayan metal ise katot görevi görür ve aralarında yüksek gerilime oluşur. Oluşan yüksek gerilimin etkisiyle katottan koparılan elektronlar, anoda doğru hareket ederler. Serbest kalan elektronların argon atomlarına çarpması neticesinde argon gazı iyonlaşır. İyonize olan argon atomları katot metalinden yani Au-Pd plakasından atom kopartırlar. Kopan bu atomlar numune üzerinde birikir ve bu olay cihaz üzerinde ayarlanan süre boyunca devam eder. Süre tamamlandığında numuneler iletken bir Au-Pd yüzeye sahip olurlar.

Kaplama yapılan numuneler analiz için SEM içerisine yerleştirilirler. Taramalı elektron mikroskobunda ısıtılmış bir tungsten elektron tabancasının, bir elektrik alan içinde hızlanan ve lenslerin içinden geçen ve odaklanan bir ışın üretmek üzere lenslerden geçen yüksek enerjili bir elektron ışınının, vakumlu bir oda içindeki numunenin yüzeyine doğru yayılması sonucu dijital ekranda görüntü elde edilir. Tez çalışmasında üretilen numunelerin SEM görüntüleri 10-20 kV yüksek enerji altında

alındı. Görüntüleri alınan liflerin ortalama lif çapları, Image J programı kullanılarak en az 100 farklı lifin ölçülmesi ile hesaplandı.



Şekil 3.5: Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

3.2.3. Hava geçirgenlik testi

Üretilen bimodal filtre kumaşlarının hava geçirgenlik değerleri Prowhite marka hava geçirgenlik cihazı ile ölçüldü. Şekil 3.6'da gösterilen cihaz yalnızca kumaşlarda hava geçirgenliğini ölçmek için kullanılır. Cihazın farklı çaplarda belli standartlara uygun başlıkları (5-20-25-38-50-100 cm²) bulunur. Tezde üretilen numuneler, ASTM D737 standardına göre ölçüldü. Bu standarda göre test edilen numune yüzeyi 38 cm², kullanılan hava basıncı 125 Pa'dır. Test esnasında ortam sıcaklığı 22±2 °C olmalıdır. Numunelerin hava geçirgenlik değerleri ölçülmeden önce uygun ortam koşullarında 24 saat bekletilerek kondisyonlanmaları sağlandı.



Şekil 3.6: Hava geçirgenlik cihazı.

3.2.4. Porozite testi

Filtre uygulamalarında kullanılacak kumaşların por boyutlarının tayini o kumaşların ortalama hangi boyutlardaki partikülleri daha rahat bir şekilde yakalayabileceği hakkında bizlere bilgi sağlamaktadır. **Porozite analizi ile numunelerin daha çok dairesel formdaki por yapıları tayin edilmektedir.** Üretilen numunelerin por analizleri sahip olduğu por yapılarının incelenmesi, Şekil 3.7’de gösterilen Quantachrome marka Porometer 3G zh model porozite cihazı ile gerçekleştirilmeye çalışıldı. Bu cihaz ile **0,013 µm ve 500 µm** arasındaki por boyutları ölçülebilmektedir. Test/Analiz başlatılmadan önce numuneler, yüzey gerilimi çok düşük ıslatma sıvıları ile ıslatılır. Bu tezde ıslatma sıvısı olarak düşük yüzey tansiyonuna (16 dyn/cm) sahip Galpore 16 kimyasalı kullanıldı. Porozite analizinde öncelikle numunelerin sıvı ölçümleri alınır. Test esnasında ıslanan numuneye 0,001-34 bar arasında basınç ile vakum uygulanarak numunenin porlarından sıvının uzaklaşması sağlanır. Büyük porlu numunelerin por ölçümlerinde düşük basınçlar kullanılır. Uygulanan basınç ile ıslatma sıvısı, numuneden tamamen uzaklaştıktan sonra cihaz, kuru ölçüme başlar. İki ölçüme ait eğriler dijital bir ekranda grafiğe dönüşür. Test tamamlandığında numunelere ait maksimum, minimum ve ortalama por boyutları raporlanır.



Şekil 3.7: Porozite cihazı.

3.2.5. Katı hacim değeri

Katı hacim değeri aynı zamanda 'bağlı veya lif paketlenme yoğunluğu' olarak da adlandırılır(Choong vd., 2013; Leung vd., 2010). **Yüksek katı hacim değeri, hem filtre direncini hem de filtre verimliliğini artıran etkindir**(Dehghan vd., 2015; J. Wang vd., 2008). Lif üretiminde kullanılan polimerin gramajı, kumaş kalınlığı ve yoğunluğu, katılığın hesaplanmasında etkili parametrelerdir. Numunelerin katı hacim oranları denklem 3.1’e göre hesaplandı(Leung vd., 2010; Velu vd., 2012).

$$\text{Katı hacim } (\alpha) = \frac{\text{Temel ağırlık}}{\text{Kalınlık} \times \text{Yoğunluk}} \quad (3.1)$$

Elde edilen numunelerin kalınlıkları ve ağırlıkları ölçülerek katı hacim oranları hesaplandı. Numunelerin kalınlığı dijital komparatör ile, ağırlıkları ise hassas terazi ile ölçüldü. Komparatörün numune test yüzey alanı 0,5 cm²'dir.

3.2.6. Filtrasyon testi

Hava filtrasyon verimliliğini ölçmek için TSI marka 8130A model otomatik hava filtresi test cihazı kullanıldı. Cihaz ilk açıldığında cihazın test yapmaya hazır hale gelmesi için 500 saniye kadar ısınma süresi vardır. Cihaz ısındıktan sonra dokunmatik ekrandan test standardı seçilir. Cihaz kalibre edildikten sonra numune, test alanına yerleştirilir. Cihaz içerisinde bulunan Sodyum klorür (NaCl) çözelti tankında NaCl aerosolü nötrleştirildikten sonra 100 cm²'lik bir filtre test alanına gönderilir ve cihaz tarafından aerosollerin yukarı ve aşağı akış arasındaki parçacık konsantrasyonu farkı ölçülür. Cihaza ait görüntü Şekil 3.8'de verilmektedir. NaCl aerosol özellikleri Çizelge 3.5'te verilmektedir.



Şekil 3.8: Filtre test santrali.

Birkaç saniye süren ölçümler sonucunda filtrasyon değeri (η) ya da partikül nüfuziyet değeri (P) ve basınç değişimine (ΔP) ait veriler elde edilir. P, denklem 3.2'ye göre cihaz tarafından hesaplanır. C_{down} aşağı akış partikül konsantrasyonunu, C_{up} ise yukarı akış partikül konsantrasyonunu ifade etmektedir (Chang vd., 2015).

$$P = C_{down}/C_{up} \quad (3.2)$$

Çizelge 3.5: Aerosol özellikleri.

Aerosolün Özellikleri	Değerler
Ham madde	Sodyum Klorür
Partikül boyutu	0,3±1,53 µm
Konsantrasyon	%2

Kumaşların filtre verimi; lif çapı ve dağılımı, katı hacim değeri, partikül boyutu ve akış hızı gibi parametrelerden etkilenmektedir(Yeom vd., 2010; Yeom & Pourdeyhimi, 2011). Bu sebeple numunelerin filtrasyon verimlilikleri, tek kat numune yüzeyi olacak şekilde 95 l/dk (15,83 cm/sn) akış oranında tayin edildi.

Bimodal filtre kumaşlarının filtre verimi belirlendikten sonra sahip oldukları kalite faktörü de hesaplanmalıdır. Kalite faktörü (QF) hesaplanırken temel parametre olarak numunelerin basınç farkı değerleri ve filtre verimi değerleri bilinmelidir(Leung vd., 2010). Numunelerin kalite faktörleri denklem 3.3'e göre hesaplandı(Kilic vd., 2015).

$$QF = -\frac{\ln P}{\Delta P} \quad (3.3)$$

Knudsen sayısı (Kn) moleküllerin serbest yolunun lif çapına olan oranıdır(Feng vd., 2019). Knudsen sayısı, lif yüzeyindeki hava moleküllerinin moleküler hareketlerinin toplam akış alanına olan önemini tanımlamak için kullanılır. Bu aşamada Knudsen sayısı da hesaplanmalıdır. Numunelerin Knudsen sayısı denklem 3.4'e göre hesaplandı.

$$K_n = \frac{2 \cdot \lambda}{d_f} \quad (3.4)$$

λ havanın/gazın lifler arasındaki boşluklardan geçtiği serbest yolu ifade etmektedir. d_f ise lif çapıdır. Kn ile lifler üzerinde oluşan bir kayma akışı teorisinden bahsetmek mümkündür. **Knudsen teorisine göre, lif çapı, hava moleküllerinin ortalama serbest yolu ile aynı veya daha az olduğunda, hava molekülleri liflerin arasından kolayca geçebilir**(P. Li vd., 2014; Mikheev vd., 2016). **Kn 0,1'den büyük olduğunda yüksek kalite faktörünü sağlayan lifler arasından kayma akışı**

oluşmaktadır(Gundogdu vd., 2018). Yani yüksek knudsen number değerine sahip filtreler havayı daha kolay bir şekilde geçireceğinden düşük basınç farkı değerine sahip olacaklardır. Kısaca Knudsen teorisine göre azalan lif çapı ile basınç farkı da azalmaktadır(Zhao vd., 2016). Kayma akışı durumu en fazla 60-100 nm arası lif çapına sahip lifli filtre kumaşlarında oluşmaktadır. Fakat ince lifler, yoğun bir şekilde bir araya geldiklerinde çok küçük porlu filtre yapılarını meydana getirerek bu filtrelerin yüksek basınç farkı değerine sahip olmasına neden olabilmektedir. Bu sebeple kayma akışının oluşabilmesi için nanolifler arası boşluğun da 3,5 µm ve üzeri değerde olması gerekmektedir(Zhao vd., 2016). Geniş porların oluşabilmesi ve hava geçişinin rahatlatılabilmesi açısından bimodal yapılar önemli bir yere sahiptir.

3.2.7. Çekme mukavemeti testi

Çekme mukavemeti testi, Bölüm 1 ve Bölüm 3'te elde edilen bimodal ve referans numunelerin mukavemetlerini ve gerilme modüllerini ölçmek için 50 N'luk yük aparatına sahip bir Instron 4411 model Evrensel Çekme Test Cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Testten önce numuneler, 24 °C'lik bir odada 1 gün koşullandırma için bekletildi. Daha sonra numuneler, aralarında 30 mm mesafe bulunan iki numune tutucu aparata tutturuldu. Test hızı 15 mm/dk'ya ayarlandı. Test sırasında her numunenin kumaş kalınlığı değerleri bilgisayardaki programa girildi. Her üretim için 3 ayrı numune test edildi. Şekil 3.9'da çekme mukavemeti analizi için kullanılan test cihazı gösterilmektedir.

Çekme mukavemeti testi neticesinde her bir numunenin uzama ve çekme esnasında maruz kaldığı yük değerleri elde edilir. Daha sonra sırası ile denklem 3.5 ve denklem 3.6 kullanılarak gerilme ve gerinim değerleri hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'e göre S gerilmeyi, P yükü, A₀ ise numunenin kesit alanını ifade etmektedir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'ya göre ϵ gerinimi, Δl numunenin uzama miktarı ve l_0 numunenin ilk uzunluğunu yani çeneler arası mesafeyi ifade etmektedir.



Şekil 3.9: Gerilme mukavemeti analiz cihazı.

3.3. Çözültiden Üflemleri Nanolif Üretim Yöntemi ile Bimodal PA6 Liflerin Üretim Parametreleri

Bu çalışmaya başlarken PA6 polimeri ile SB sisteminde çalışmaya uygun en optimum liflerin üretilebilmesi için iğne çapı sabit tutularak ve farklı konsantrasyonlarda (% 7, 13, 20) çözelti hazırlanarak kısa süreli üretimler (maksimum 1 ml çözelti besleyecek kadar) yapıldı. Üretimler yapılırken her bir çözelti konsantrasyonu için 3 farklı çözelti besleme hızı (5, 10, 15 ml/saat) denendi ve her besleme hızı için besleme hızına uygun hava basıncı değerinin tayin edilebilmesi adına 1 ve 2 bar hava basınçlarında üretimler yapıldı. Bu sayede en ince ve en kalın liflerin elde edildiği üretim parametreleri belirlenmiş oldu. Toplayıcı-nozul yüzey arası mesafe de 40 cm olarak ayarlandı. Yapılan ön denemelere ait üretimlerin çözelti ve üretim parametreleri sırası ile Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7'de verilmektedir.

Çizelge 3.6: SB yönteminde kullanılacak PA6 çözelti parametreleri.

Polimer	Çözücü	Çözelti Konsantrasyonu (%)
PA6	AA:FA (2:1)	7
		13
		20

Çizelge 3.7: SB ön denemelere ait üretim parametreleri.

Numune İsmi	Çözelti Konsantrasyonu (%)	Besleme Hızı (ml/saat)	Hava Basıncı (bar)	Toplayıcı Hızı (m/sa)	İğne Çapı (G)	Üretim Miktarı (ml)
SB 1.1		5	1			
SB 1.2			2			
SB 1.3	7	10	1			
SB 1.4			2			
SB 1.5		15	1			
SB 1.6			2			
SB 1.7		5	1			
SB 1.8			2			
SB 1.9	13	10	1	0	22	1
SB 1.10			2			
SB 1.11		15	1			
SB 1.12			2			
SB 1.13		5	1			
SB 1.14			2			
SB 1.15	20	10	1			
SB 1.16			2			
SB 1.17		15	1			
SB 1.18			2			

Ön denemeler neticesinde bimodal üretimlerde en düşük lif çapına sahip lifli tabakayı oluşturacak üretim konsantrasyonu olarak % 7, en kalın lif çapına sahip lifli tabakayı oluşturacak üretim konsantrasyonu olarak ise % 20 seçildi. İki ayrı nozul kullanılarak yapılan üretimlere ait deney parametreleri Çizelge 3.8’de verilmektedir. Çizelge 3.8’de isimlendirilen SB-B 1 numunesi, Çizelge 3.7’deki SB 1.2 isimli numunenin 60 dk boyunca üretilmiş halidir. Aynı şekilde SB-B 2 numunesi de SB 1.14 numunesinin 60 dk boyunca üretilmiş halidir. SB-B 3 bimodal numunesinin net üretim süresi 30 dk’dır. İki nozuldan eşdeğer sürede lif üretimi gerçekleştirildiği için toplam lif miktarını diğer üretimlerle aynı tutma adına üretim süresi yarıya indirilerek 30 dk olarak ayarlandı.

Çizelge 3.8: SB yönteminde çift nozul ile bimodal filtre kumaşı üretim parametreleri.

Numune İsmi	1.Nozuldan Beslenen Çözelti Konsantrasyonu (%)	2.Nozuldan Beslenen Çözelti Konsantrasyonu (%)	1.Nozul Üretim Süresi (dk)	2.Nozul Üretim Süresi (dk)
SB-B 1	7	-	60	-
SB-B 2	-	20	-	60
SB-B 3	7	20	30	30

3.3.1. Çözeltiden üfleli nanolif üretim yöntemi ile bimodal pa6 liflerin üretim sonuçları

3.3.1.1. Çözelti viskozitesi

Damlacıksız bir üretim için Be değeri, çözelti konsantrasyonunun, buna bağlı olarak çözelti viskozitesinin yeterince yüksek olduğu ve polimer zincirlerinin normal oranda dolanmış olduğu kritik bir değeri (Be) geçmelidir. Düşük viskoziteli çözeltilerde Be değeri de düşük olur. **Düşük viskoziteli çözeltilerle yapılan nanolif üretimlerinde boncuk oluşumu gözlenmektedir.** Düşük bir Be'de, çözeltideki polimer zincirleri bazen üst üste biner ve bu durum lif oluşmasına engel olur. Bu nedenle çok az lif oluşur ve oluşan liflerde boncuk yapısı gözlemlenir (Robb & Lennox, 2011; X. Zhang & Lu, 2014). Fakat **çözelti konsantrasyonunun artması (Baumgarten, 1971) veya daha yüksek moleküler ağırlıklı polimerlerin kullanılması (Q. Zhou vd., 2013) viskoziteyi artırır ve bu da daha kararlı jet oluşumunu sağlar (H. Yuan vd., 2017).**

Çizelge 3.9'a bakıldığında % 7'lik PA6 çözeltisi 71,6 mPa.s viskozite değerine sahip olurken artan konsantrasyon ile % 13'lük PA6 çözeltisi 405,7 mPa.s ve % 20'lik PA6 çözeltisi 1488,6 mPa.s viskozite değerlerine sahip olmaktadır.

Çizelge 3.9: SB yönteminde denenmek üzere hazırlanan PA6 çözeltilerine ait viskozite değerleri.

Çözelti Konsantrasyonu (%)	Çözelti Viskozitesi (mPa.s)
7	71,6
13	405,7
20	1488,6

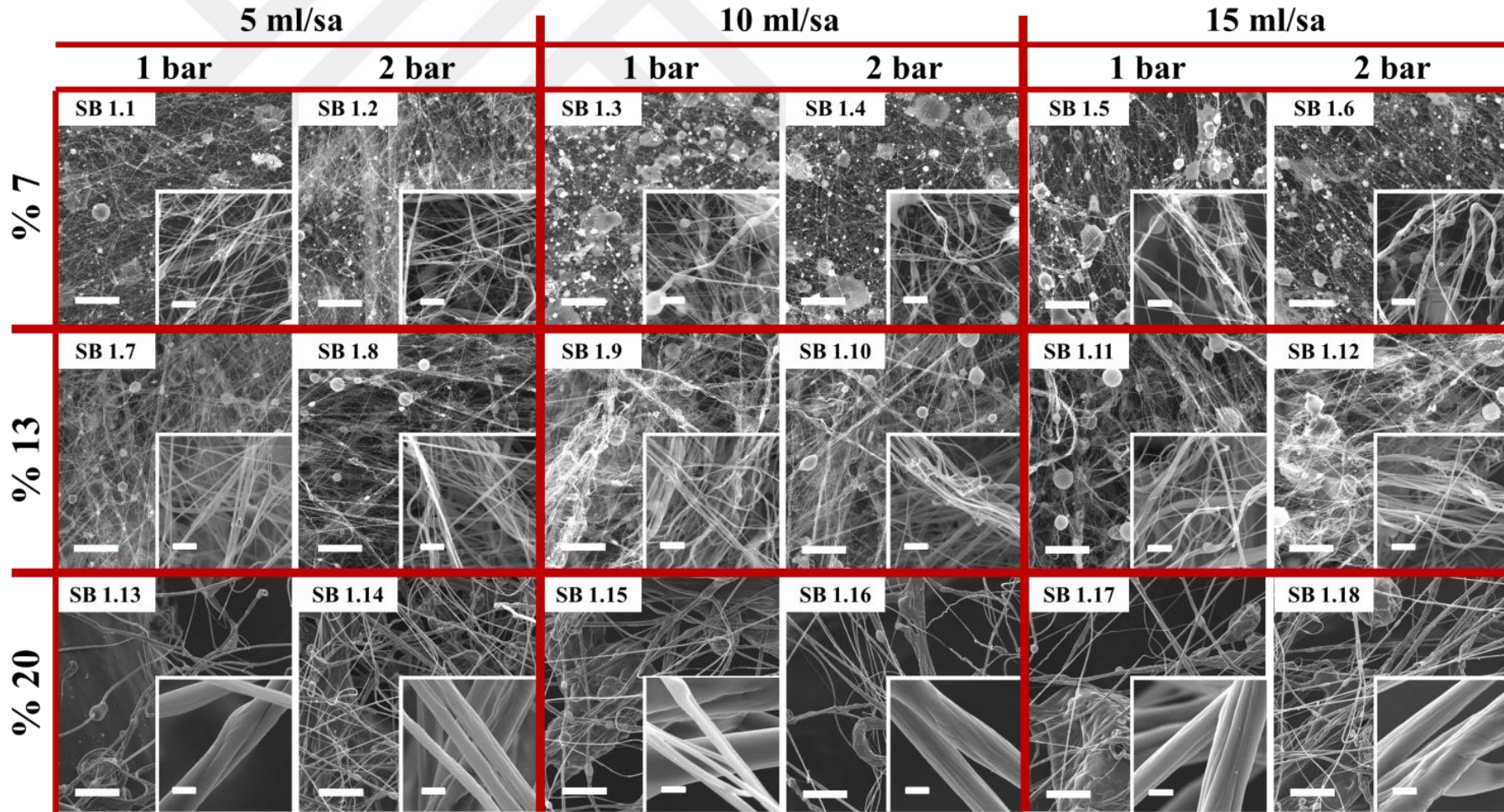
3.3.1.2. Liflerin yüzey morfolojisi

Düşük viskoziteli çözeltiler ile yapılan üretimlerde boncuk oluşumunun nedeni olarak çözücü içindeki polimer dağılımında tutarsızlıkların olması öngörülmektedir(Lee vd., 2003). Bu bilgi ışığında SB sisteminde kullanılan yüksek hava basıncının çözeltilere şiddetli bir şekilde çarpması ile özellikle viskozitesi düşük çözeltilerde çözelti içerisindeki polimer zincirlerinin yapısını bozarak daha fazla boncuk oluşumuna sebep olduğu kanısına varılabilir. Çünkü bu sistemde düşük viskoziteli çözeltiler (% 7, % 13) ile üretilen neredeyse tüm üretimlerde (SB 1.1- SB 1.12 arası) boncuk oluşumu gözlemlenmektedir. Hazırlanan düşük ve yüksek viskoziteli çözeltiler ile yapılan ön denemelerden elde edilen liflere ait SEM görüntüleri Şekil 3.10'da verilmektedir. Yapılan her bir üretim için 500 X ve 10 kX büyütmelerde SEM görüntüleri alındı.

Belli bir orana kadar artan çözelti konsantrasyonlarında viskozitenin artması ile daha kararlı çözelti jetleri oluşmaktadır(Fong vd., 1999). Bu nedenle % 20 çözelti konsantrasyonuna sahip PA6 çözeltisi ile yapılan üretimlerde (SB 1.13-SB 1.18 arası) az miktarda lif oluşmasına rağmen liflerde boncuk oluşumu gözlemlenmemekle birlikte daha düz formda lifler elde edildi. Liflerin çapları ise mikron boyutlarda oldu. % 20 PA6 ile yapılan üretimde lif formuna geçemeyen çözelti ise toplayıcı üzerine damlacık olarak düştü. % 20 çözelti konsantrasyonuna sahip PA6 çözeltisi ile yapılan üretimlerde çözelti viskozitesinin çok yüksek olmasından dolayı düşük basınç, çözeltinin yüzey gerilimi kuvvetini aşamadı ve bu nedenle yeterli oranda lif oluşmadı.

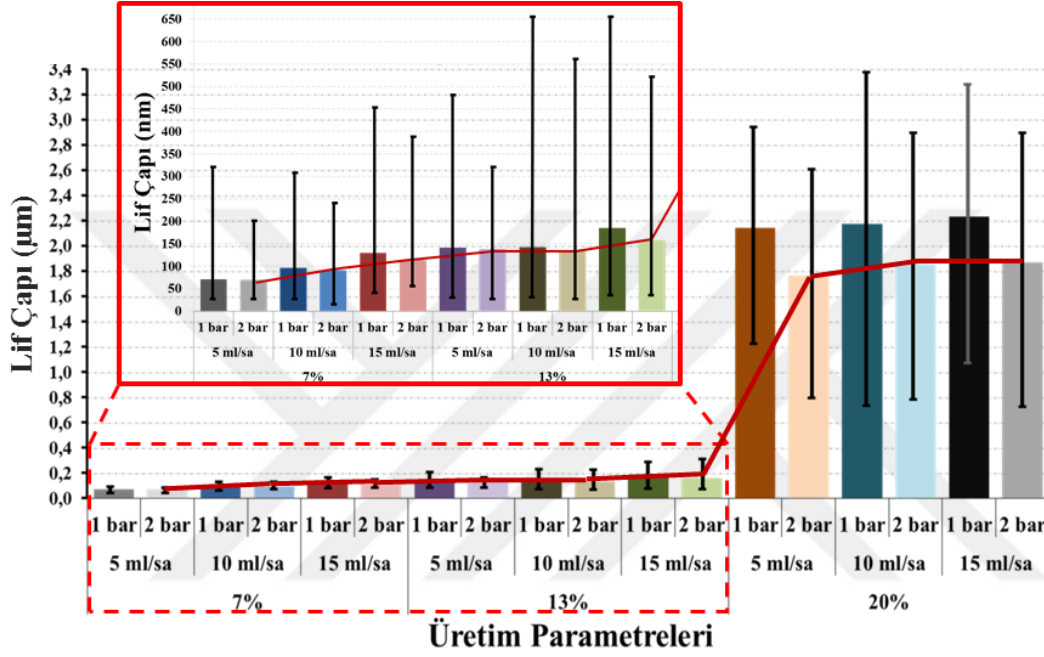
Şekil 3.10'a tekrar bakıldığında tüm konsantrasyonlardaki çözeltiler ile 5 ml/saat besleme hızında yapılan üretimler en az boncuk ve damlacık yapılarının oluştuğu üretimlerdir. Besleme hızının artması ile bu yapıların ve aynı zamanda lif yapısında düzensizliklerin (bozuk lif yapısı ve dolaşık lif yapısı) arttığı açık bir şekilde görülmektedir.

% 7 çözelti konsantrasyonu ile düşük çözelti besleme hızlarında 70 nm lif çapı elde edilirken besleme hızının artması ile lif çapı yaklaşık 130 nm'ye ulaştı. % 13 konsantrasyonlu çözelti ile yapılan üretimlerde 5 ve 10 ml/saat çözelti besleme hızlarında lif çaplarında değişiklik gözlemlenmedi. Fakat besleme hızının 15 ml/saat'te çıkarılması lif çaplarını yaklaşık 185 nm'ye kadar arttırdı.



Şekil 3.10: SB yönteminde yapılan ön denemelerden elde edilen liflere ait SEM görüntüleri (Büyük görüntü 500 X ve küçük görüntü 10 kX büyütmede alındı.).

Çözelti konsantrasyonu % 20' ye çıkarıldığında lif çaplarında yaklaşık 10 kat artış meydana gelerek 2 µm mertebelerinde lif çapları elde edildi. % 20 konsantrasyonlu çözelti ile üretim yapılırken besleme hızının artırılması lif çaplarında önemli derecede artışa neden olmadı. Üretimlerde hava basıncının 1 bar'dan 2 bar'a çıkarılmasıyla genel olarak SEM görüntülerinde açık bir fark gözlemlenmese bile Şekil 3.11'deki lif çapı grafiği incelendiğinde artan hava basıncının lif çaplarında azaltıcı bir etkisi olduğu görüldü.



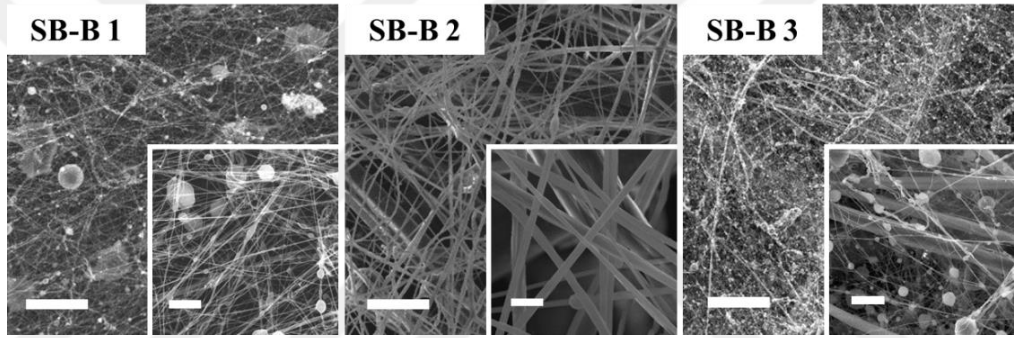
Şekil 3.11: Ön denemelerden üretilen SB liflerin lif çapı grafiği.

SEM görüntülerinden ve lif çapı grafiğinden elde edilen sonuçlar neticesinde bimodal filtre kumaş üretiminde ince lif üretimi için % 7 konsantrasyonlu çözelti ve kalın lif üretimi için ise % 20 konsantrasyonlu çözelti seçildi. SB sisteminde besleme hızı ve hava basıncı birbirine eş değer olmalıdır. Bu sebeple her iki çözeltinin üretim parametreleri olarak 5 ml/saat düşük besleme hızı ve 2 bar yüksek hava basıncı değerleri seçildi.

Bimodal üretilere ait SEM görüntüleri Şekil 3.12'de gösterilmektedir. SB-B 1 numaralı üretimin lif çapı 100 nm'nin altındadır. Üretimde viskozitenin düşük olmasından kaynaklı olarak boncuk yapıları da mevcuttur. Fakat bu boncuk yapıların boyutları nano seviyelerde olduğundan elde edilen nanolifli filtre kumaşının formu bozulmadı. Yani bu numunede filmleşmiş bir yapı söz konusu değildi.

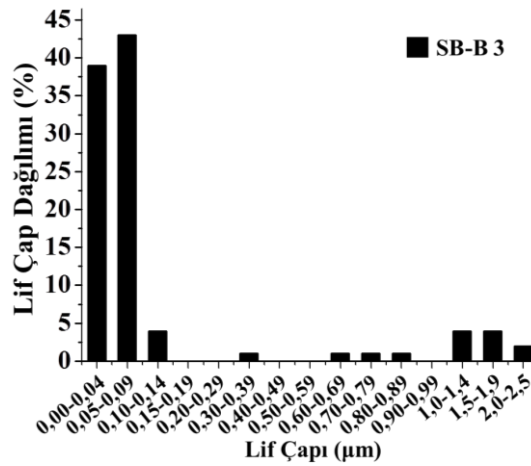
SB-B 2 isimli numunenin lif çapları yaklaşık 1,8 mikron boyuttur. SB-B 2 numunesinin lifleri SB-B 1 numunesinin liflerinden yaklaşık 15 kat büyüktür. SB-B 2 numunesinde yüksek viskoziteden dolayı oluşan damlacık boyutları da büyük oldu. Fakat damlacıklar lifli yapıyı bozmayacak kadar az miktarda olduğundan varlıkları önemsenmedi.

SB-B 3 numunesinde bu iki lif yapısının homojen bir şekilde dağıldığı 50 µm ölçekli SEM görüntüsüne bakıldığında görülmektedir. Üretim esnasında iki nozul aynı anda üretim yapacak şekilde deney düzeneği ayarlandığından mikron boyutlu kalın lifler ve nanolifler birbirleri ile iç içe oldu. Nanolifler, mikroliflerin arasındaki büyük gözeneklerin küçülmesini sağlarken mikrolifler de nanoliflerin üst üste binerek sıkı bir doku oluşturmasını önledi.



Şekil 3.12: SB yöntemi ile üretilen SB-B kodlu bimodal PA6 liflerin SEM görüntüleri (Büyük SEM görüntüsünün ölçeği 50 µm, küçük SEM görüntüsünün ölçeği 5 µm'dir.).

SB-B 3 numunesinin lif çapı dağılım grafiği **Error! Reference source not found.**'te verilmektedir. Bu grafiğe göre mikrolifler beklendiği üzere genel olarak 1-2,5 µm arasında yoğunluk gösterdi.



Şekil 3.13: SB-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait lif çapı dağılım grafiği.

Ortalama mikrolif çapı 1,6 µm'dir. Nanoliflerin yoğun olduğu lif çapı aralığı ise 0-150 nm arasında oldu. Ortalama nanolif çapı ise 81,5 nm oldu. Ara lif çapı değerlerinde ise ihmal edilebilecek oranlarda (<% 1) lifler oluştu. Bu grafiğe göre SB-B 3 numunesinin yapısında mikroliflere kıyasla daha fazla (yaklaşık % 90 oranında) nanolif bulunduğu tespit edildi.

3.3.1.3. Hava geçirgenlik analizi

SB-B 1 numunesinde düşük viskoziteden dolayı en küçük liflere sahip olması, en küçük porlara da sahip olmasını sağladı. Bu sebeple SB-B 1 numunesi en düşük hava geçirgenlik değerine (23,786 m³/saat) sahip oldu. Aynı şekilde SB-B 2 numunesinde çözelti viskozitesinin yüksek olması numunenin kalın liflerden oluşmasını sağlarken lifler arası boşlukların da fazla olmasına neden oldu. Yani lif çaplarının artması por boyutlarının da en büyük olmasına sebep olmaktadır. Bu da kumaş içerisinde daha fazla miktarda hava geçmesine izin vermektedir. Bu sebeple SB-B 2 numunesinin hava geçirgenliği en fazladır(214,075 m³/saat). Mikro ve nano boyutlu liflerin bir araya getirildiği SB-B 3 numunesinde ise beklenildiği gibi diğer iki numunenin hava geçirgenlik değerlerinin arasında bir hava geçirgenlik değeri (39,077 m³/saat) elde edildi. Kumaşın içerisindeki mikron boyutlu lifler nanoliflerin aşağı ve yukarı yönlü boşluklarını artırdığından hava geçişi SB-B 1 numunesine kıyasla bir miktar daha fazla oldu. Numunelerin hava geçirgenlik sonuçlarına ait detaylar Çizelge 3.10'da verilmektedir.

Çizelge 3.10: SB-B kodlu filtre kumaşlarına ait hava geçirgenlik değerleri.

Numune İsmi	Test Standardı	Test alanı (cm ²)	Basınç (Pa)	Değer (m ³ /saat)
SB-B 1				23,786
SB-B 2	ASTM D737	38	125	214,075
SB-B 3				39,077

3.3.1.4. Porozite ölçümleri

Porozite analizinde ıslak ölçümde gözlenen ilk kabarcık noktası basıncı, maksimum gözenek boyutunu, kuru ve ıslak ölçüm değerlerinin bulunduğu basınç noktası da minimum gözenek boyutunu verir. Bimodal çalışması için üretilen 3 numunenin

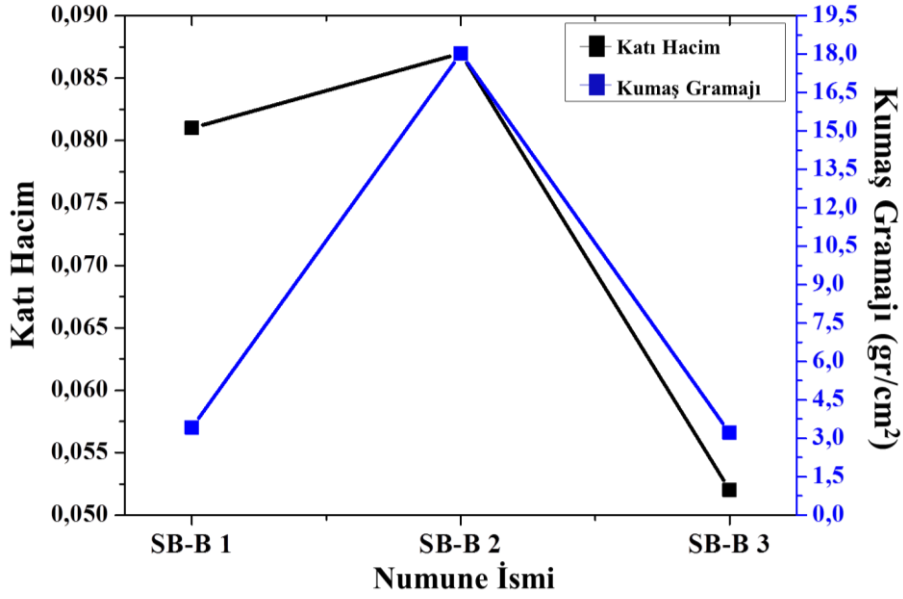
porozite ölçümleri yapıldı fakat sahip oldukları maksimum por boyutları cihaz kapasitesinin yukarısında olduğundan porozite ölçümlerinden bir netice alınamadı.

3.3.1.5. Katı hacim değeri

Çizelge 3.11’de Bölüm 1’de bimodal çalışması amacıyla üretilmiş üç numunenin üretim sonrasında sahip olduğu kumaş kalınlığı, ağırlığı yoğunluğu ve bu değerlerden yola çıkarak hesaplanan katı hacim değeri yer almaktadır. Çizelge 3.11 ve Şekil 3.14 incelendiğinde kumaş yoğunluğunun ve kumaş gramajının katı hacim değerini doğrudan etkilediği açık bir şekilde görülmektedir. SB-B 1 numunesi neredeyse SB-B 3 numunesi kadar düşük kumaş ağırlığına sahip olmasına rağmen SB-B 3 numunesinden çok daha yüksek katı hacim değerine sahiptir. Bu durum SB-B 1 numunesinin daha sıkı ve nanolifli bir kumaş olmasından dolayı daha ince kumaş yapısına (37,25 μm) sahip olmasından kaynaklanmaktadır. SB-B 3 numunesi yapısındaki mikroliflerden dolayı SB-B 1 numunesinden yaklaşık 1,5 kat daha kalın bir numunedir. Çizelge 3.11’e göre SB-B 2 numunesi kumaş ağırlığının diğer numunelerden çok daha fazla (5-6 kat) olmasından dolayı en yüksek katı hacim değerine (0,087) sahip numunedir. SB-B 2 numunesi, SB-B 1 numunesine kıyasla yaklaşık 5 kat daha fazla kalın ve ağır olmasına rağmen SB-B 2 numunesindeki ağırlık ve kalınlık artışı yaklaşık eşit oranlarda olduğundan iki numune de neredeyse aynı katı hacim değerine sahip oldular. Bu durum fiziksel olarak iki numune arasında büyük farklar bulunsa da teorik hesapta aralarında oransal olarak bir fark bulunmamasından kaynaklanmaktadır. SB-B 3 numunesi ise sahip olduğu kumaş kalınlığına rağmen çok daha düşük lif yoğunluğuna sahiptir. Bu sebeple en düşük katı hacim değerine sahiptir.

Çizelge 3.11: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kumaş özellikleri ve katı hacim değerleri.

Numune İsmi	Kumaş Kalınlığı (μm)	Kumaş Gramajı (gr/m^2)	Kumaş Yoğunluğu (gr/cm^3)	Polimer Yoğunluğu (gr/cm^3)	Katı Hacim
SB-B 1	37,25	3,427	0,092		0,081
SB-B 2	181,4	18,021	0,099	1,14	0,087
SB-B 3	54,75	3,216	0,059		0,052



Şekil 3.14: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı katı hacim değeri-kumaş kalınlığı grafiği

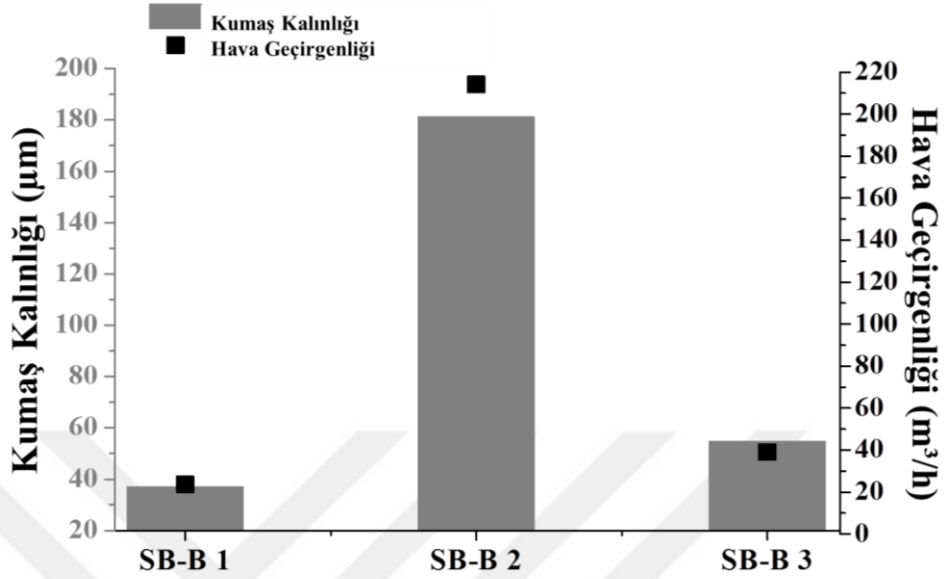
Şekil 3.15'te SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kumaş kalınlığı-hava geçirgenlik değerleri grafiği verilmektedir. Bu grafiğe göre SB-B 1 numunesinin kumaş kalınlığı en düşük olmasına rağmen nanolifli yapısından ve yüksek katı hacim değerinden dolayı bu numune havayı en az derecede geçiren numune oldu.

SB-B 2 numunesi mikroliflerden oluştuğundan kumaş kalınlığı en kalın numunedir. Buna rağmen mikroliflerin oluşturduğu büyük gözenekler dolayısı ile hava geçirgenliği değeri de en yüksek olan numunedir. SB-B 2 numunesinin hava geçirgenlik değerinin yüksek olmasına rağmen yapısındaki mikrolifler, bu numunenin kalın olmasını sağladığı gibi kumaşın daha ağır olmasına da neden olduğundan SB-B 2 numunesi teorik olarak katı hacim değeri en yüksek numunedir.

SB-B 3 numunesinde mikroliflerin varlığı kumaş kalınlığının SB-B 1 numunesinin kumaş kalınlığından fazla olmasına neden olsa da SB-B 3 numunesinin üretimi için aynı anda kullanılan iki nozuldan gelen yaklaşık 4 barlık hava basıncı, lifleri dağıttı ve destek kumaşı üzerine daha az oranda lif kaplanmasına neden oldu. Yani SB-B 3 numunesinde kumaş kalınlığına oranla yapısındaki var olan lif yoğunluğu daha düşüktür. Bu sebeple kumaş ağırlığı da daha düşüktür. Bu da katı hacim değerinin oldukça düşük çıkmasına neden oldu(Çizelge 3.11).

Diğer taraftan yapıdaki kalın liflerin yanı sıra kalınlığın az olması, daha az lif kaplamasından dolayı kalın bir kumaşa kıyasla numunenin por boyutlarının daha büyük olmasına neden olmaktadır(L. Deng vd., 2019). Fakat SB-B 3 numunesinin

yapısındaki nanoliflerden dolayı bu numunenin hava geçirgenlik değeri SB-B 2 numunesinden oldukça azdır. Yine de SB-B 1 numunesine kıyasla hava geçirgenlik değerinde iyileşme gerçekleşmiştir(Şekil 3.15).



Şekil 3.15: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kumaş kalınlığı-hava geçirgenlik değerleri grafiği.

3.3.1.6. Filtrasyon özellikleri

Bölüm 1'e ait bimodal çalışmasından elde edilen ve tek kat üzerinden filtrasyon ölçümleri yapılan numunelerin filtre performanslarına ait veriler Çizelge 3.12'de yer almaktadır. Veriler incelendiğinde en yüksek filtre veriminin SB-B 1 numunesine ait olduğu görülmektedir. Yapının sadece nano ölçekli liflerden (ortalama 70 nm) oluşması nedeniyle 0,3 µm boyutundaki NaCl tuz aerosolleri, difüzyon ve durdurma etkileriyle(Hung & Leung, 2011) SB-B 1 numunesi tarafından yakalanmaktadır. Fakat SB numunelerinin üretim yönteminde kullanılan yüksek basınçlı hava, SB-B 1 numunesinin oldukça sıkı bir dokumaya ve bu sebeple de yüksek basınç farkı değerine (265 Pa) sahip olmasına neden olmaktadır.

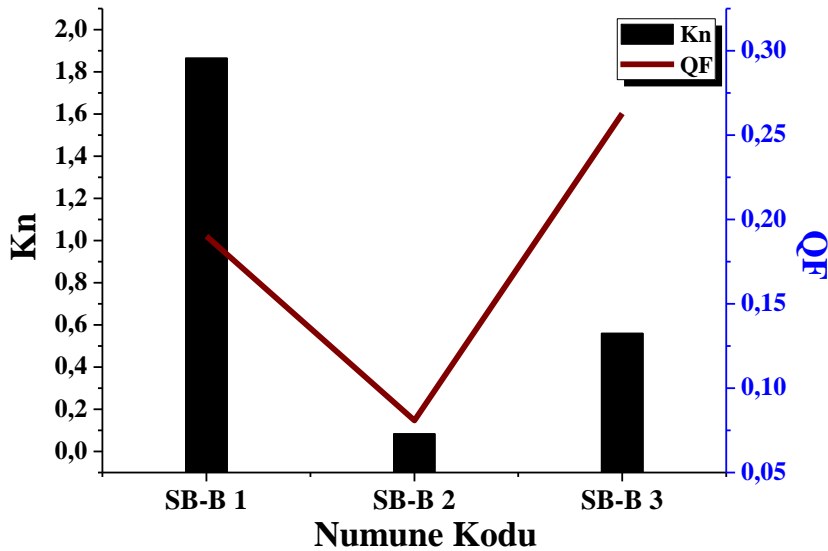
Ortalama 1,8 µm boyutunda mikroliflerden oluşan SB-B 2 numunesi, mikroliflerin neden olduğu geniş gözeneklerden dolayı diğer numunelere kıyasla en düşük filtre performansına sahiptir. Aynı şekilde numunenin büyük gözenekleri, filtrelenecek havayı da çok kolay bir şekilde geçirdiğinden dolayı SB-B 2 numunesinin basınç farkı değeri de (21 Pa) oldukça düşüktür. SB-B 3 numunesinde mikro ve nano boyutta liflerin bir araya getirilmesinin amacı düşük basınç farkına ve filtre verimine sahip filtre kumaş yapısının elde edilmesidir. Katı hacim değeri ölçümleri

incelendiğinde en ince kumaş kalınlığına sahip numune SB-B 3 numunesi olmasına rağmen bu numune istenilen yüksek filtre verimini (% 98,891) ve düşük basınç farkı değerini (168 Pa) sağlamaktadır. Sahip olduğu yüksek filtre verimine kıyasla düşük basınç farkı değerine sahip olması nedeniyle kalite faktörü en yüksek numunedir. Bu da SB-B 3 numunesinin lif çap ölçümlerinden sonra yapısında mikroliflere kıyasla daha fazla nanolif bulunduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.12: SB-B kodlu filtre kumaşlarının filtre özellikleri.

Numune İsmi	Akış Oranı (l/dk)	Basınç Farkı (Pa)	Filtre Verimi (%)	Kn	QF (mmH ₂ O ⁻¹)
SB-B 1	95	265	99,413	1,865	0,190
SB-B 2		21	15,898	0,074	0,081
SB-B 3		168	98,891	0,560 1,595-0,082	0,263

Knudsen teorisine göre lif çapı, lifler arası boşluklar ile aynı veya boşluklardan daha küçük (dar) olursa havanın filtre kumaşı içerisinden geçişi daha kolay olmaktadır. Yani Kn sayısı 0,1'den büyük olursa kalite faktörü yüksek filtrelerin elde edilmesi mümkündür. Şekil 3.16'da numunelerin sahip oldukları Kn ve QF değerlerinin kıyaslamalı grafiği gösterilmektedir. Bu grafiğe ve Çizelge 3.12'ye göre en büyük Kn değerine sahip numune SB-B 1 numunesidir.

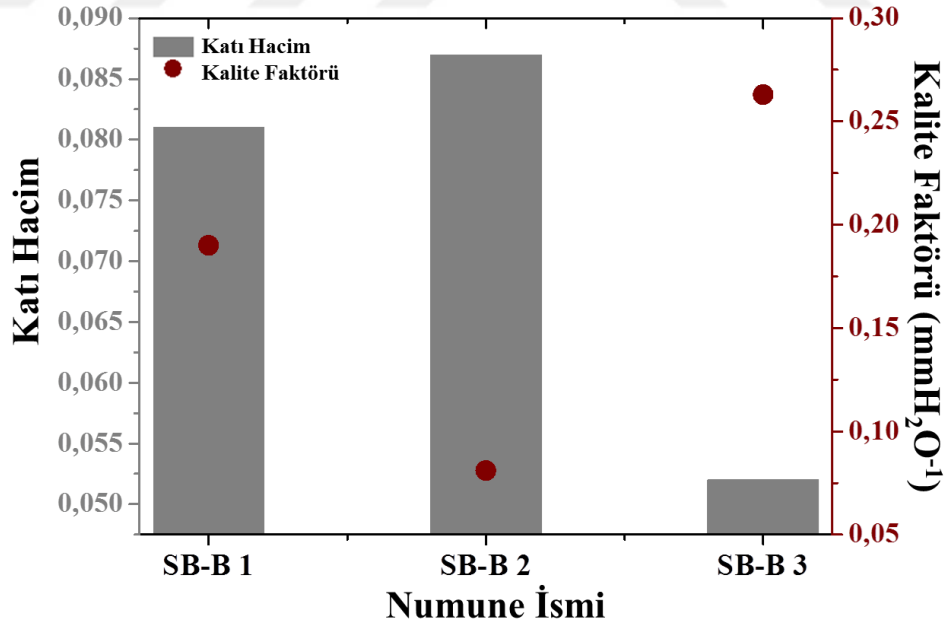


Şekil 3.16: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı QF-Kn grafiği.

SB-B 1 numunesi sahip olduğu 1,865 değerinde Kn sayısı nedeniyle filtrasyon esnasında partikül maddelere karşı **geçiş akış** etkisini oluşturmaktadır. SB-B 1

numunesi 265 Pa basınç farkı değerine sahiptir. Bu sebeple kalite faktörü 0,19 mmH₂O⁻¹'dur. Şekil 3.17'de numunelerin kıyaslamalı katı hacim değeri ve QF grafikleri yer almaktadır. Bu grafiğe göre Fakat katı hacim değeri, numunelerin kumaş yoğunluğu ile de doğrudan ilişkili bir değer olduğundan SB-B 2 numunesinin katı hacim değeri en fazla olmasına rağmen filtre verimi ve bağlı olarak kalite faktörü en düşük (0,081) olan numunedir. Ayrıca SB-B 2 numunesi tamamen mikroliflerden oluşmasına rağmen 95 l/dk akış hızında yaklaşık % 16 oranında filtre verimi sergilemesinden dolayı ve sahip olduğu Kn değeri (0,074) neticesinde sürekli akış etkisi yerine **kayma akışı** etkisine sahip oldu. Yani bu numunede havanın lifler arasından kolayca geçtiği, hava direncinin az olduğu bir akış etkisi gözlemlenmektedir.

SB-B 3 numunesi nano- ve mikroliflerden oluşan bimodal yapısı dolayısı ile 0,082-1,595 olacak şekilde geniş bir Kn aralığına sahiptir. Bu sebeple **kayma ve geçiş akışı etkileri birlikte** gözlemlenmektedir. Ortalama Kn değeri 0,560 olmasına rağmen yapısındaki mikroliflerin varlığı sayesinde SB-B 1 numunesine kıyasla daha düşük basınç farkı değerine sahip olduğundan QF değeri (0,263 mmH₂O⁻¹) en yüksektir.



Şekil 3.17: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı katı hacim değeri-kalite faktörü grafiği.

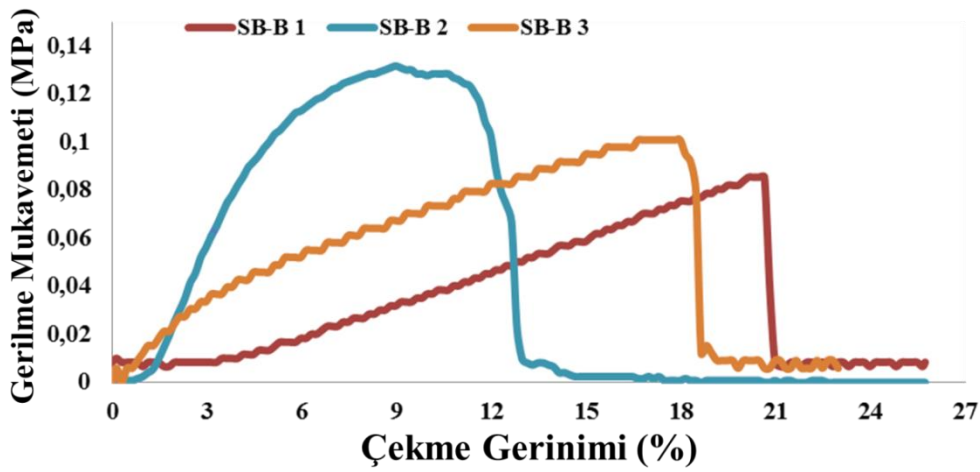
SB-B 3 bimodal üretiminde 2 nozul birlikte kullanıldığından üretim süresi diğer numunelerin yarısı kadardır. Ayrıca iki ayrı nozuldan üretim esnasında toplayıcı yüzeyine ayrı ayrı 2 barlık havanın vurması liflerin daha sıkı bir şekilde üst üste

gelmelerine neden olmaktadır. Aynı zamanda toplamda 4 bar'lık hava basıncı, oluşan lif kaybını bir miktar daha artırmaktadır. Bu sebeple bimodal üretimin yani SB-B 3 numunesinin sahip olduğu kumaş ağırlığı diğer numunelerden azdır. Bu da bu numunenin filtre veriminin neredeyse SB-B 1 numunesininki kadar yüksek olmasına rağmen katı hacim değerinin diğer numunelerden düşük çıkmasına neden olmaktadır (0,052).

3.3.1.7. Mekanik performans

Bölüm 1'de yapılan bimodal çalışmasından elde edilen numunelerin mekanik dayanım eğrileri Şekil 3.18'de gösterilmektedir. Bu grafik incelendiğinde nanoliflerden oluşan SB-B 1 numunesi daha amorf bir yapıya sahip olması nedeniyle % 21 oranında gerinim göstermiştir. Grafikten elde edilen sonuca göre nanolifli numunenin daha mukavemetsiz olduğu da açık bir şekilde görülmektedir. Fakat yapının daha boşluksuz ve homojen olması daha düzgün bir uzama eğrisi elde edilmesini sağladı.

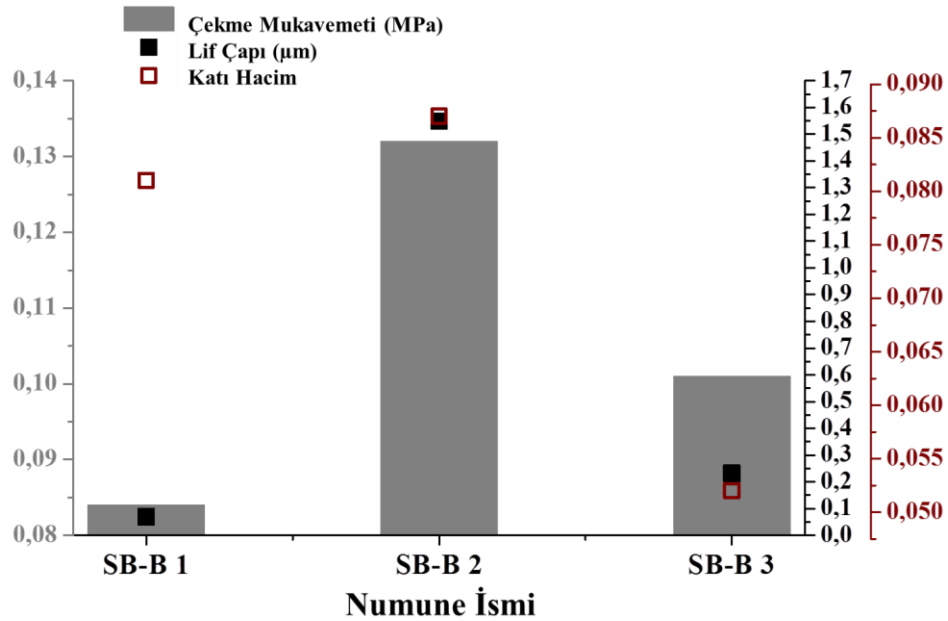
SB-B 2 numunesi mikrolifli olmasından dolayı yüksek gerilme mukavemetine sahiptir. Numunenin çekme gerinimi ise en düşüktür. Bu durum liflerin daha sert ve tok bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Fakat eğri oldukça parabolik bir yapıya sahiptir. Bu durumun SB-B 2 numunesindeki mikroliflerden dolayı çok fazla gözenekli olmasına ve bu sebeple liflerin birbirinden bağımsız, dağınık durmasına bağlı olarak çekme yükü uygulandığı sırada liflerin düzensiz bir şekilde kopmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.18: SB-B kodlu filtre kumaşlarının Çekme-Gerilme mukavemeti eğrileri.

SB-B 3 numunesi SB-B 2 numunesine kıyasla daha düşük gerilme mukavemetine sahiptir. Fakat yapı SB-B 2'ye kıyasla daha oryantedir. Tüm bu sonuçlar SB-B 3 bimodal numunesinin yapısında bulunan nanoliflerden kaynaklanmaktadır. SB-B 3 numunesi mikroliflerin varlığı ile SB-B 1 numunesinden daha mukavemetli bir yapıya sahip oldu. Fakat arada çok büyük bir fark bulunmamaktadır. Bu durum SB-B 3 numunesindeki nanolif miktarının yaklaşık % 90 oranında olmasından kaynaklandı. % 10 oranındaki mikrolif varlığı yapının yaklaşık 0,04 MPa daha mukavemetli olmasını sağladı.

Şekil 3.19 incelendiğinde SB-B 1 numunesinin en düşük çekme mukavemeti değerine (0,085 MPa) sahip olduğu görülmektedir. Bu durum SB-B 1 numunesinin tamamen nanoliflerden oluşmasından kaynaklanmaktadır. SB-B 2 numunesi ise tamamen mikroliflerden meydana geldiği için en yüksek mekanik dayanıma (0,132 MPa) sahiptir. Nanolifli yapılarda toplanan lif miktarı yani katı hacim değeri kumaşın mekanik performansını belirlemede önemli rol oynamaktadır. Fakat SB-B 3 numunesi en düşük katı hacim değerine (0,052) sahip olmasına rağmen yapısındaki yaklaşık % 10 oranındaki mikroliflerden dolayı 0,101 MPa çekme mukavemeti değerine sahip olarak SB-B 1 numunesinden daha mukavemetli bir numune oldu. Genel olarak bakıldığında numunelerin sahip olduğu ortalama lif çapına göre sahip olduğu mekanik performans da şekillenmektedir. Mikrolif varlığı daha dayanıklı bir numune elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.19: SB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı çekme mukavemeti-lif Çapı-katı hacim grafiği.

3.4. Santrifüj Kuvvetleri ile Nanolif Üretim Yöntemi Kullanılarak Bimodal PA6 Liflerin Üretim Parametreleri

Bu çalışma, tezin ikinci bölümünü oluşturmaktadır. CS yöntemi ile yapılan çalışmalarda lif çapı üzerine iki durum gözlemlenmektedir. Bunlardan ilki artan **nozul dönme hızı ile lif çaplarında artmanın meydana gelmesi durumudur. Yapılan birkaç çalışmada nozul dönme hızı çok yüksek olduğunda, sıvı jetin kollektöre ulaşması için uçuş süresinin daha kısa olması ve azalan uçuş süresinin jetin gerilmesi ve uzaması için yeterli olmaması nedeniyle, kalın liflerin elde edilebileceği** bildirilmiştir. Ayrıca, **daha yüksek dönme hızı, jetin daha büyük kütle ile nozul veya iğne ucundan çıkmasını ve bu sebeple lif çapının daha kalın olmasına neden olur**(Stojanovska vd., 2018; X. Zhang & Lu, 2014).

İkinci durum ise ilk durumun aksine **artan nozul dönme hızı ile daha ince liflerin oluşmasıdır. Eğirme kafasının daha yüksek bir dönüş hızı ile jetin de daha yüksek bir hızla dönmesinden dolayı jet üzerinde daha fazla merkezkaç kuvveti ve hava sürtünme kuvveti oluşur. Ayrıca sürtünme kuvvetinden dolayı sıvı jeti, nozul ucundan kollektöre doğru ilerledikçe, dönüş hızı kademeli olarak azalmaktadır**(Zhmeyev vd., 2015). Bu da sıvı jetinin daha fazla uzamasına ve lif çapının azalmasına yol açabilmektedir. Bu sebeple CS ile yapılan çalışmalarda en ince ya da en kalın lif çapını meydana getirebilecek optimum dönme hızının belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Çalışmaya başlamadan önce CS sisteminde çalışmaya uygun en optimum liflerin üretilmesi için iğne çapı sabit tutuldu ve farklı konsantrasyonlarda PA6 çözeltisi hazırlanarak 4000, 6000 ve 8000 rpm nozul dönme hızlarıyla tek tek kısa süreli üretimler yapıldı. Üretimler neticesinde en düzgün liflerin elde edildiği en uygun çözelti konsantrasyonu belirlendi ve bu konsantrasyon üzerinden farklı çaplara sahip iğneler kullanılarak en ince ve en kalın liflerin eldesi için üretimler yapıldı. İnce liflerin elde edilmesi için 30G boyutundaki ince çaplı iğne, kalın liflerin elde edilmesi için ise 18G boyutundaki kalın çaplı iğne ile yine kısa süreli üretimler yapıldı ve CS yönteminde bimodal filtre kumaşı üretimi için optimum üretim parametreleri belirlendi. Yapılan ön denemelere ait üretimlerin çözelti ve üretim parametreleri Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14'te verilmektedir.

Üretim esnasında çözeltinin toplayıcı üzerine ulaşmadan önce içerisindeki çözücünün buharlaşması için belli bir süreye ihtiyaç vardır(X. Zhang & Lu, 2014). Bunun için nozul ile toplayıcı arasındaki mesafe önemlidir. Çalışma boyunca toplayıcı-nozul arası mesafe sabit tutulup, 30 cm olarak ayarlandı. Çözelti besleme hızı ise kullanılan iğne çapına uygun bir şekilde değiştirildi. İğne çapı arttıkça iğne ucundan çıkan çözelti miktarı arttığından çözelti besleme hızları da arttırıldı. Üretimlerde 21G iğne için 30 ml/saat, 30G iğne için 20 ml/saat ve 18G iğne için 50 ml/saat besleme hızları kullanıldı.

Çizelge 3.13: CS yönteminde kullanılacak PA6 çözelti parametreleri.

Polimer	Çözücü	Çözelti Konsantrasyonu (%)
PA6	AA:FA (2:1)	15
		20
		25

Çizelge 3.14: CS ön denemelere ait üretim parametreleri.

Numune İsmi	Çözelti Konsantrasyonu (%)	Besleme Hızı (ml/saat)	Nozul Dönme Hızı (rpm)	Toplayıcı Hızı (rpm)	İğne Çapı (G)	Üretim Miktarı (ml)
CS 1.1			4000			
CS 1.2	15		6000			
CS 1.3			8000			
CS 1.4			4000			
CS 1.5	20	30	6000		21	
CS 1.6			8000			
CS 1.7			4000			
CS 1.8	25		6000	500		5
CS 1.9			8000			
CS 1.10			4000			
CS 1.11	20	20	6000		30	
CS 1.12			8000			
CS 1.13			4000			
CS 1.14	20	50	6000		18	
CS 1.15			8000			

Nozul/iğne çapının ayarlanması, elde edilecek lif yapısını kontrol etmenin başka bir yoludur. Lif morfolojisini ve lif çapını ayarlayabilmek için iğne çapı ile iğne ucundan çıkacak çözelti jetinin miktarı değiştirilir(X. Zhang & Lu, 2014). Bu sebeple birinci aşamada elde edilen en düzgün ve etkili liflerin üretildiği % 20 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi kullanılarak farklı çaplara sahip iğnelerle üç farklı nozul dönme hızlarında (4000, 6000, 8000 rpm) üretimler gerçekleştirildi.

18G iğne kullanılarak yapılan üretimlerde iğne ucundan daha fazla çözelti çıkacağından çözelti besleme hızı 50 ml/saat olarak ayarlandı. Bu değer 18G için optimum değerdir. Aynı şekilde 30G iğne kullanıldığında da çözelti çıkış miktarı çok azalacağından nozul içerisinde çözeltinin birikip motora yükselmemesi için optimum besleme hızı 20 ml/saat olarak ayarlandı.

30G iğne ile yapılan üretimlerde yalnızca 8000 rpm nozul dönme hızında düzgün lifler elde edildi. 18G iğne ile nozulun her dönüş hızında düzgün lifler elde edildi. Genel olarak her iki iğne ile yapılan üretimlerde neredeyse aynı lif çaplarına sahip lifler elde edildi. Yine de iki farklı çapa sahip iğnenin takılması ile üretimden elde edilecek liflerde oluşacak etkinin gözlemlenebilmesi için tek bir nozula maksimum ve minimum iğne çapı olan 30G ve 18G iğneleri takılarak ve kıyas yapabilmek adına her iki iğneyle ayrı ayrı uzun süreli (20 ml harcayacak kadar) üretimler yapıldı. CS yönteminde rotary motor ile nozulun dönmesi sağlandığından motorun uzun süre çalıştırılması motorun ısınmasına neden olmaktadır. Bu da motor içinden beslenen çözeltinin ısınarak viskozitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu sebeple üretimlerin 1 saatten fazla sürmemesine özen gösterildi. Üretimlere ait deney parametreleri Çizelge 3.15'te verilmektedir.

Çizelge 3.15: Farklı iğne kombinasyonu ile üretilecek CS-B kodlu filtre kumaşlarının üretim parametreleri.

Numune İsmi	Besleme Hızı (ml/saat)	Takviye Hava Basıncı (bar)	Nozul Dönme Hızı (rpm)	Üretim Miktarı (ml)	İğne (G)
CS-B 1	20				30
CS-B 2	50	2	8000	20	18
CS-B 3	35				30-18

3.4.1. Santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim yöntemi kullanılarak bimodal pa6 liflerin üretim sonuçları

3.4.1.1. Çözelti viskozitesi

Bu bölümde hazırlanan çözeltilerin konsantrasyonlarına ve sahip oldukları viskozitelere ait değerler Çizelge 3.16'da verilmektedir. Hazırlanan % 10'luk PA6 çözeltisi, CS yönteminde lif oluşmasına yetmeyecek oranda düşük viskozite değerine (155,4 mPa.s) sahip oldu. Bu sebeple % 10'luk PA6 çözeltisi ile lif elde edilemedi. Konsantrasyonun arttırılması ile çözeltilerin viskozite değerlerinde lineer olmayan bir artış gözlemlendi. Çözelti konsantrasyonu % 30 yapıldığında ise doygun bir çözelti oluşmasından dolayı çözelti tamamen karıştığı anda kürleşme davranışı sergiledi. Bu sebeple çalışmada % 15, 20 ve 25 konsantrasyonlu PA6 çözeltileri ile üretimler yapıldı. CS yönteminde düşük viskoziteli çözeltiler ile üretim yapıldığında çözücü oranı daha yüksek olduğundan daha yüksek nozul dönme hızlarında yapılan üretimlerden daha iyi lif eldesi sağlandı. Yüksek viskoziteli çözeltilerde ise çözücünün daha hızlı buharlaşmasına bağlı olarak düşük nozul dönme hızlarında yüksek dönme hızlarına kıyasla genel olarak daha ince lif eldesi sağlandı. Fakat yüksek çözelti viskozitesi çözeltilerin yüzey geriliminin aşılmasını da zorlaştırdığından bu çözeltilerle yapılan üretimlerden daha değişken sonuçlar elde edildi.

Çizelge 3.16: CS yönteminde kullanılmak üzere hazırlanan PA6 çözeltilerine ait viskozite değerleri.

Çözelti Konsantrasyonu (%)	Çözelti Viskozitesi (mPa.s)
10	155,4
15	696,4
20	1488,6
25	3895,9

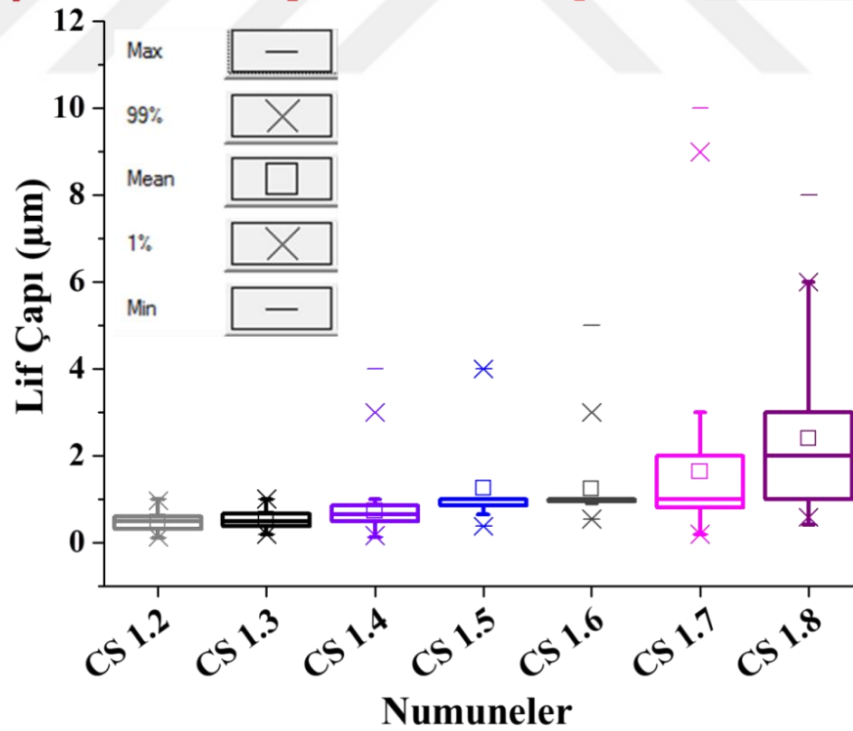
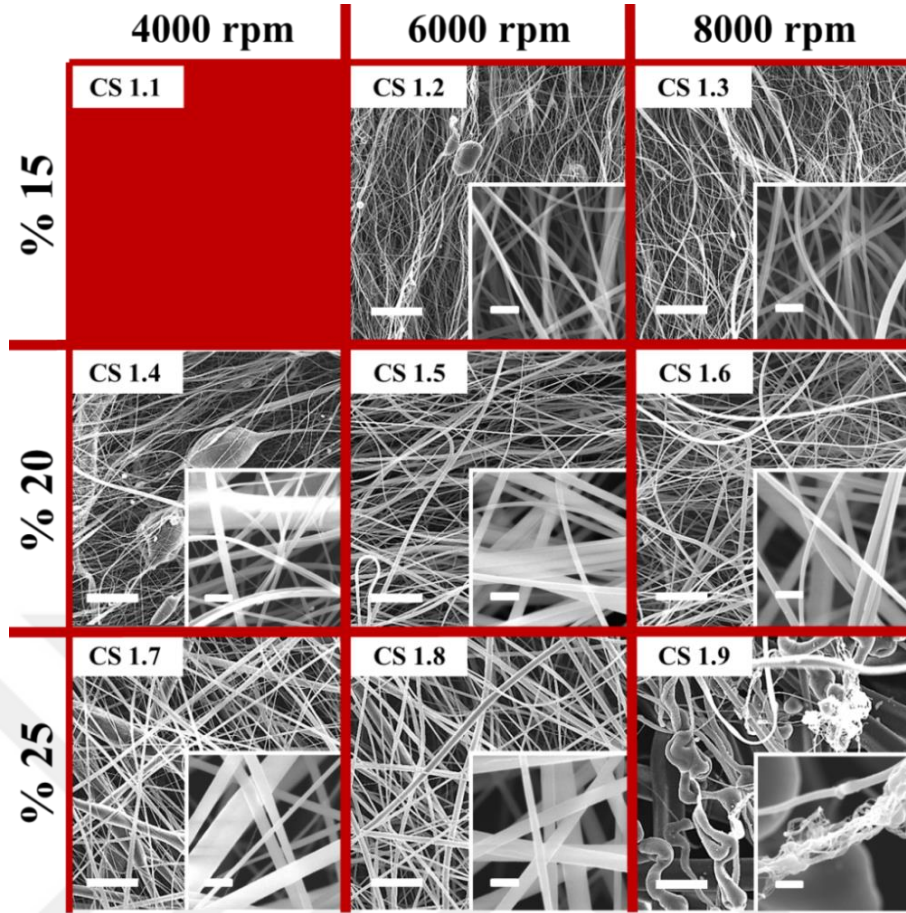
3.4.1.2. Liflerin yüzey morfolojisi

Bu çalışmada Çizelge 3.14'te verilen parametrelerle yapılan ön denemelerden elde edilen liflerde Stojanovska vd. (2018) ve X. Zhang & Lu (2014)'nin çalışmalarında gözlemlendiği durum gerçekleşti. Artan nozul dönme hızı ile lif çaplarında artış meydana geldi(Şekil 3.20 ve Şekil 3.21). Ayrıca düşük nozul dönme hızlarında lif

oluşamamasının ya da daha küçük çaplarda liflerin üretilmesinin nedeni, yüksek dönme hızlarına kıyasla düşük dönme hızlarında çözeltinin daha yavaş yani daha az oranda nozul ucuna gitmesidir. Yapılan üretimlerde iğne çapı sabit tutulduğundan çözelti besleme hızı da sabit tutulup 30 ml/saat olarak ayarlandı.

21G iğne kullanılarak farklı konsantrasyona sahip PA6 çözeltileri ile yapılan ön üretimlerden elde edilen liflere ait SEM görüntüleri Şekil 3.20'de verilmektedir. Düşük viskoziteye sahip % 15 konsantrasyonlu PA6 çözeltisinde polimer miktarı daha az olduğundan çözelti içerisindeki çözücünün uzaklaşabilmesi için yüksek dönme hızlarına ihtiyaç vardır. Bu sebeple Şekil 3.20'e göre CS 1.1 numaralı üretimde viskozitenin düşük olmasından dolayı düşük nozul dönme hızında (4000 rpm) düzgün lif formu elde edilemedi. Fakat dönme hızının 6000 rpm'ye çıkartılması çözeltideki çözücünün uzaklaşp geride kalan polimer zincirlerinin uzayarak lif formu alması için yeterli geldi ve düzgün, ortalama 471 nm lif çapına sahip lifler elde edildi. % 15'lik çözelti ile yapılan üretimde nozul dönme hızının 8000'e arttırılması ile çözeltinin toplayıcı üzerine daha kısa sürede ulaşmasından ve çözücünün daha hızlı buharlaşp çözelti jetinin daha az uzamasından dolayı daha kalın çaplara (543 nm) sahip lifler elde edildi.

Çözelti konsantrasyonunun artması ile çözelti viskozitesinin ve çözelti yüzey geriliminin artmasından dolayı, üretilen liflerin çaplarının arttığı bilinmektedir. Bu çalışmada da çözelti konsantrasyonunun % 15'ten % 20'ye çıkartılması ile lif çaplarında artış meydana geldi. Artan nozul dönme hızı ile çözeltinin daha hızlı bir şekilde toplayıcı üzerine ulaşmasından ve liflerin yeteri miktarda incelememesin dolayı daha kalın lifler elde edildi. % 20'lik PA6 çözeltisi ile 4000, 6000 ve 8000 rpm nozul dönme hızlarında üretilen liflerin ortalama lif çapları sırası ile 748 nm, 1,273 µm ve 1,306 µm oldu. Çözelti konsantrasyonu % 25'e çıkartıldığında nozulun 6000 rpm'de döndürüldüğü üretimlerde düzgün ve artan lif çapı elde edildi fakat iğne ucundan çıkan tüm çözelti lif formuna dönemedi. Lif olmayan çözelti, üretim esnasında makinenin iç kabine sızdı. 4000 ve 6000 rpm dönme hızlarında üretilen liflerin lif çapları sırası ile 1,649 µm ve 2,361 µm oldu. Nozul dönme hızı 8000 rpm'ye ulaştığında ise düzgün lif oluşumu gözlemlenemedi. Elde edilen lifler iyice azaldı ve lif formu oldukça bozdu. Bu üretimde düzgün bir lif formu olmadığından dolayı lif çap ölçümü gerçekleştirilemedi.

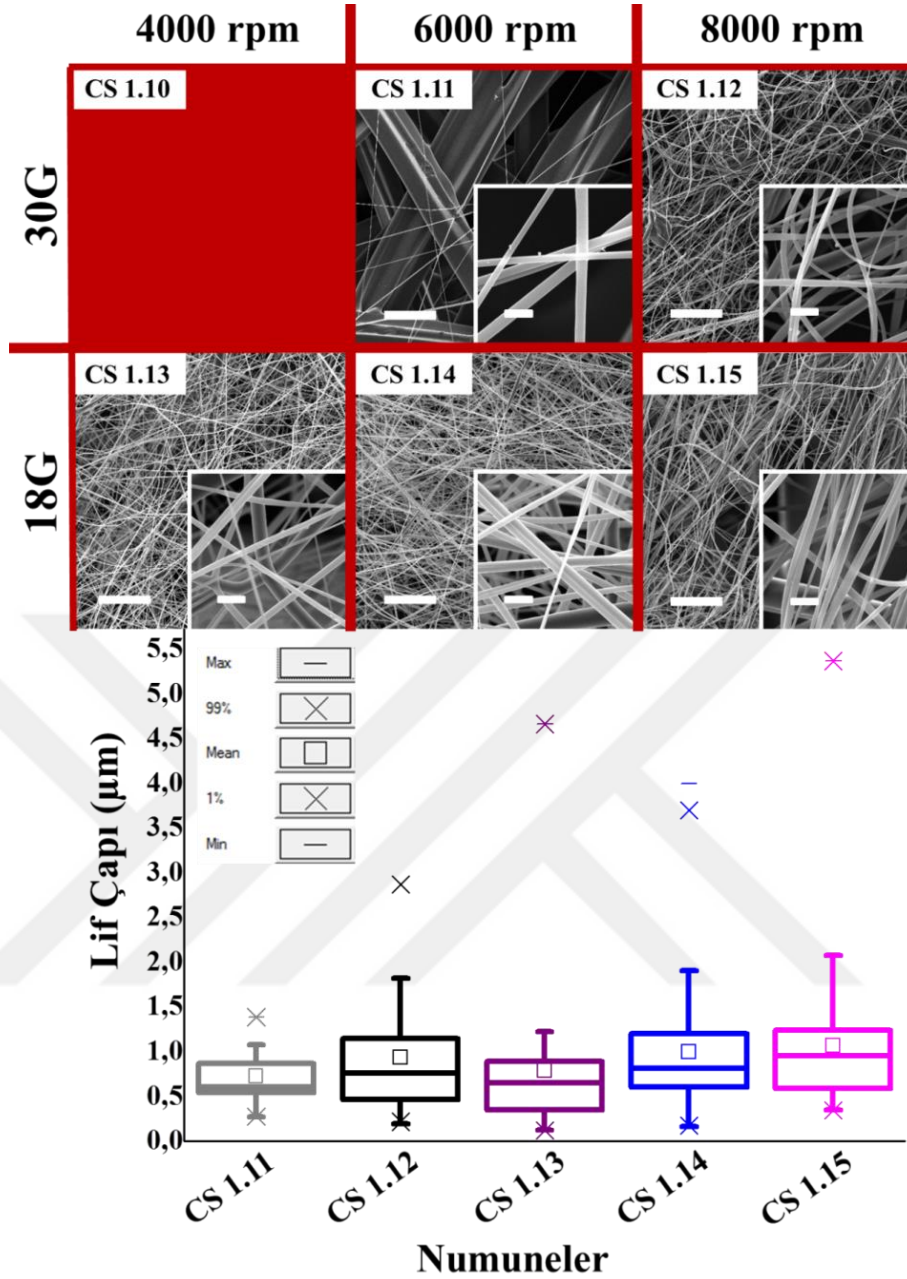


Şekil 3.20: 21G iğne kullanılarak farklı konsantrasyona sahip PA6 çözeltileri ile yapılan ön üretimlerden elde edilen liflere ait SEM görüntüleri (Büyük görüntü 500 X ve küçük görüntü 5 kX büyütmede alındı.) ve lif çap dağılım grafiği.

Şekil 3.21’de farklı iğne çapları kullanılarak üretilen liflere ait SEM görüntüleri ve bu liflerin ortalama lif çapları grafiği yer almaktadır. İğne çapı çok fazla daraldığında iğne ucundan çözelti çıkışı gerçekleşmemektedir(X. Zhang & Lu, 2014). Bu sebeple 30G iğne ile yapılan üretimlerden 4000 rpm nozul dönme hızında lif elde edilemedi. Nozul dönme hızı 6000 rpm’ye çıkarıldığında bir miktar düzensiz ve çok ince çaplara (732 nm) sahip lif oluşumu gözlemlendi. Nozul hızı 8000 rpm’ye çıkarıldığında artan merkez kaç kuvvetlerinin etkisiyle daha düzgün, kabul edilebilir ve ortalama 935 nm lif çapına sahip lifler üretildi. Fakat dar iğne çapına bağlı olarak 30G iğne ile 8000 rpm’de üretilen dokusuz kumaştaki lif miktarının 18G iğne ile yapılan üretimlerden elde edilen dokusuz kumaştaki lif miktarına kıyasla daha seyrek bir kumaş yüzeyinin elde edildiği anlaşılmaktadır.

Daha küçük çaplı bir nozul kullanmak, temelde kütle verimini sınırlar ve böylece daha ince lifler oluşur(X. Zhang & Lu, 2014). 30G ile üretilen liflerde daha ince lif çapları elde edilmektedir. Fakat iğne çapı 18G’ye çıkarıldığında elde edilen liflerin lif çapı değerlerinde önemli ölçüde artış olmadığı hatta neredeyse 30G iğne ile elde edilen liflerin çapları ile aynı genişlikte lifler üretildiği Şekil 3.21’deki lif çap dağılım grafiğine bakıldığında açıkça görülmektedir. 18G iğne kullanılarak 4000 rpm nozul dönme hızıyla yapılan üretimde 787 nm lif çapına sahip düzgün morfolojili lifler elde edildi. Nozul dönme hızının 6000 rpm’ye çıkarılması ile elde edilen lif miktarı ve lif çapı (996 nm) arttı. Nozul dönme hızı 8000 rpm’ye çıkarıldığında ise daha heterojen lif çapına sahip lifler elde edildi. Standart sapmanın daha fazla olması sebebiyle bu üretimden elde edilen ortalama lif çapı yaklaşık 1 µm oldu.

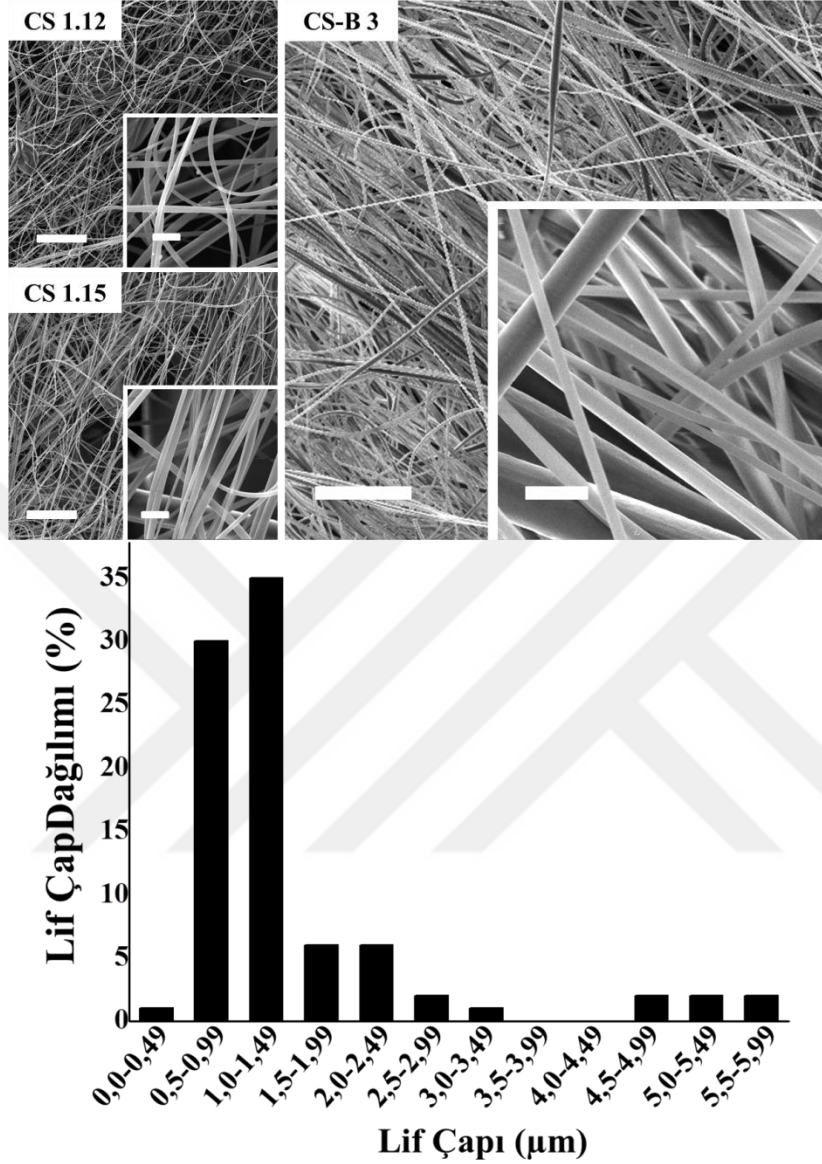
Bu veriler ışığında nozula aynı anda bir 18G ve bir 30G iğne takılarak bimodal kumaş yapısının oluşturulması için üretim düzeneği hazırlandı ve 30G ve 18G iğne çapları için düzgün liflerin elde edildiği nozul dönme hızı 8000 rpm olduğundan üretimler, 8000 rpm nozul dönüş hızında gerçekleştirildi. Yapılan üretimde elde edilen yapının SEM görüntüsü ve lif çap dağılım grafiği Şekil 3.22’de verilmektedir. CS 1.12 isimli numune 30G iğne kullanılarak 8000 rpm nozul dönme hızıyla üretilmiş numunedir. CS 1.15 isimli numune ise 18G iğne kullanılarak 8000 rpm nozul dönme hızıyla üretilmiş numunedir.



Şekil 3.21: %20 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi ile farklı çaplardaki iğneler (30G-18G) ve farklı nozul dönme hızları kullanılarak yapılan üretilere ait SEM görüntüleri (Büyük görüntü 500 X ve küçük görüntü 5 kX büyütmede alındı.) ve lif çapı grafiği.

Bu numuneler CS-B 3 isimli iki iğnenin birlikte kullanılarak üretilen bimodal kumaş ile kıyas yapılabilmesi adına Şekil 3.22’de verildi. SEM görüntüsü incelendiğinde CS sisteminin nozuluna farklı çapa sahip iğneler takılmış olsa bile, bimodal yapısının elde edilemediği sonucuna varılmaktadır. Lif çaplarının ölçülmesi ile elde edilen lif çapı değerlerinden bu sonuç doğrulanmaktadır. CS-B 3 numunesinin ortalama lif çapı yaklaşık 1,5 µm’dir. CS-B 3 numunesinde kalın lif miktarı daha fazladır. Bu sebeple standart sapma daha fazladır. Bu çalışma sonunda CS yönteminde iğne

çapından ziyade çözelti konsantrasyonunun lif çapını belirlemede daha etkili olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 3.22: CS 1.12, CS 1.15 ve CS-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait liflerin SEM görüntüleri ve CS-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait lif çapı dağılım grafiği.

3.4.1.3. Hava geçirgenlik analizi

CS ile planlanan bimodal çalışmasında 30G'lik iğnelerle yapılan toplamda 20 ml'lik üretimin yani CS-B 1 numunesinin hava geçirgenlik değeri 112,135 m³/saat olarak ölçüldü (Çizelge 3.17). CS-B 1 numunesi daha az lif oluşması nedeniyle CS-B 2 ve CS-B 3 numunelerinden daha ince kumaş kalınlığına sahiptir. Bu nedenle hava geçirgenlik değeri diğer numunelerden fazladır. CS-B 2 numunesi en kalın numunedir. Kumaş kalınlığı hava geçirgenliğini engelleyen bir etkidir. Bu sebeple

CS-B 2 numunesinin hava geçirgenlik değeri CS-B 1 ve CS-B 3 numunesinden daha azdır. CS-B 3 numunesi 30G ve 18G iğnenin birlikte kullanılarak üretildiği numune olduğundan toplayıcı üzerine toplanan lif miktarı CS- B 1 numunesinden biraz fazla CS-B 2 numusinden daha azdır. Bu sebeple kumaş kalınlığı ve dolayısı ile hava geçirgenlik değeri de bu iki numunenin sahip olduğu değerlerin arasındadır.

Çizelge 3.17: CS-B kodlu filtre kumaşlarının hava geçirgenlik değerleri.

Numune İsmi	Test Standardı	Test alanı (cm ²)	Basınç (Pa)	Değer (m ³ /saat)
CS-B 1				112,135
CS-B 2	ASTM D737	38	125	66,261
CS-B 3				78,155

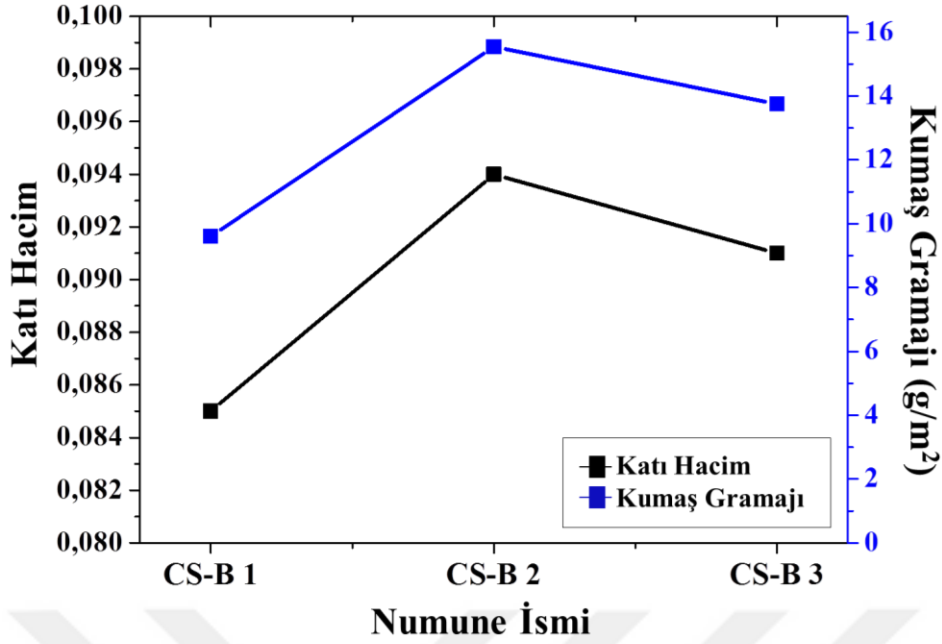
3.4.1.4. Katı hacim değeri

CS-B 1 numunesinin kumaş kalınlığı diğer numunelerden incedir. Bu durum kumaştaki lif miktarının daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple bu numune diğer iki numuneye kıyasla en düşük katı hacim değerine (0,085) sahiptir. CS-B 2 ve CS-B 3 numuneleri CS-B 1 numunesinden daha kalın olmalarından dolayı daha küçük gözeneklere sahiptirler. Bundan dolayı da hava geçirgenlikleri CS-B 1 numunesine kıyasla daha azdır. Numunelere ait kumaş kalınlığı, kumaş ağırlığı ve katı hacim oranları Çizelge 3.18’de verilmektedir.

Çizelge 3.181: CS-B kodlu filtre kumaşlarının kumaş özellikleri ve katı hacim oranları.

Numune İsmi	Kumaş Kalınlığı (µm)	Kumaş Gramajı (gr/m ²)	Kumaş Yoğunluğu (gr/cm ³)	Polimer Yoğunluğu (gr/cm ³)	Katı Hacim Değeri
CS-B 1	90	9,6	0,107		0,085
CS-B 2	161	15,55	0,096	1,14	0,094
CS-B 3	132	13,75	0,104		0,091

Kumaş gramajı, katı hacim değeri hesabında temel parametre olduğundan iki değerini kıyaslamalı grafiği Şekil 3.23’te verilmektedir. Grafik incelendiğinde artan kumaş ağırlığı ile orantılı bir şekilde katı hacim değerinin arttığı da açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.23: CS-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kıta hacim değeri-kumaş gramajı grafiği.

3.4.1.5. Filtrasyon özellikleri

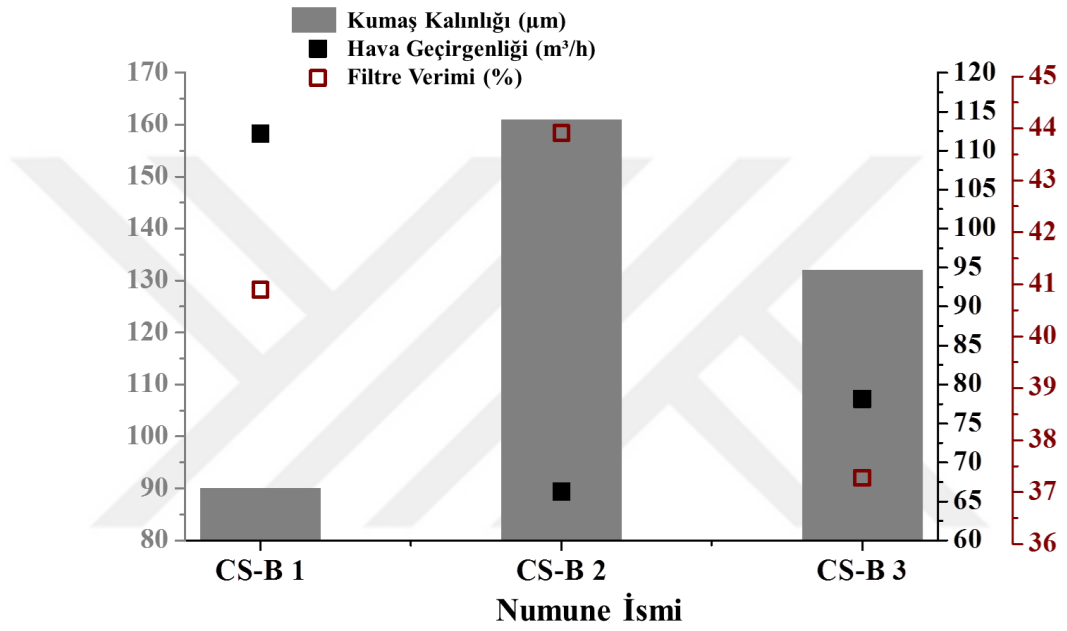
CS ile elde edilen liflerin yapısı SB sistemi ile elde edilen liflerin yapısına kıyasla daha sürekli ve hizalıdır. Aynı zamanda lif çapları SB liflere göre oldukça büyüktür. Kumaşın bu morfolojik yapısından dolayı sahip olduğu porlar, daha geniş yüzey alanına sahiptir. Bu da filtre testi esnasında kumaşa salınan aerosollerin kolay bir şekilde porlardan geçmesine neden olmaktadır. Bu sebeple SB numunelerine kıyasla CS numunelerinden çok daha düşük filtre verimi elde edildi. Numunelerin sahip olduğu basınç farkı değerleri, filtre verimleri, Kn ve kalite faktörü değerleri Çizelge 3.19’da verilmektedir. Numunelerin filtre verimleri düşük olduğu gibi basınç farkı değerleri de bu özelliklerinden dolayı düşüktür.

Çizelge 3.19: CS Bimodal filtre kumaşlarının filtre özellikleri.

Numune İsmi	Akış Oranı (l/dk)	Basınç Farkı (Pa)	Filtre Verimi (%)	Kn	QF (mmH ₂ O ⁻¹)
CS-B 1		49	40,893	0,139	0,105
CS-B 2	95	54	43,911	0,123	0,105
CS-B 3		52	37,275	0,084	0,088

CS-B 1 numunesi daha ince kumaş kalınlığına sahip olmasından dolayı filtre verimi de CS-B 2 ve CS-B 3 numunelerinininkinden düşüktür. Fakat CS-B 1 numunesinin sahip olduğu basınç farkı değeri (49 Pa), CS-B 1 ve CS-B 2 numunelerinin sahip

oldukları filtre verimleri düşünüldüğünde (sırası ile % 40,893 ve % 43,911) CS-B 2 numunesinin basınç farkı değerine (54 Pa) oranla daha azdır. Bu sebeple bu iki numune aynı kalite faktörüne sahiptir. CS-B 3 numunesi CS-B 2 numunesi ile eş değer lif çaplarına, kumaş kalınlıklarına ve hava geçirgenlik değerlerine sahip olmalarına rağmen ortalama lif çapı diğer iki numuneden daha fazla olduğundan (1,5 μm) Kn değeri daha düşüktür. Bu sebeple filtre verimi en düşüktür (Şekil 3.24). Bu durumun CS-B 3 numunesinin iki iğne ile üretilmesinden dolayı daha heterojen bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3.24: CS-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kumaş kalınlığı-hava geçirgenlik-filtre verimi grafiği.

3.5. Santrifüj Kuvvetleri ile Lif Üretim Yöntemi ve Çözültiden Üflemlerle Nanolif Üretim Yönteminin Kombinlenmesi ile Bimodal PA6 Liflerin Üretim Parametreleri

Bu bölüm tezin üçüncü bölümünü oluşturmaktadır. Bu bölümde SB yönteminin ve CS yönteminin birlikte ve aynı anda kullanılmasıyla hibrit lif üretim sistemi oluşturularak bimodal yapılı filtre kumaşları üretildi. SB yöntemiyle daha ince lifler elde edildiğinden bimodal filtre kumaşları üretimi için nanolifler bu yöntemle üretilirken, CS yöntemiyle daha kalın liflerin elde edilmesinden dolayı bimodal filtre kumaşının kalın lifleri de CS yöntemi ile üretilmeye çalışıldı. CS ile yüksek filtre verimleri elde edilemediğinden CS liflerin sadece SB nanolifleri arasındaki mesafeyi

açarak basınç farkını düşürmesi ve aynı zamanda mikrolif yapısı ile elde edilen nihai filtre kumaşının mekanik dayanımının artırılması hedeflendi.

Bölüm 2’de CS yöntemi ile yapılan bimodal çalışmada Çizelge 3.14’te verilen parametreler ile 21G iğne kullanılarak yapılan ön üretimler neticesinde % 25 konsantrasyonlu PA6 çözeltisinin en yüksek çözelti viskozitesine sahip olmasından dolayı (Çizelge 3.13) bu çözelti ile yapılan üretimlerde en kalın lif çaplarının elde edildiği görüldü (Şekil 3.20). İğne çapı da lif çapını etkileyen bir parametre olduğundan daha kalın lif elde edebilme adına bu bölümde % 25 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi ile CS yönteminde daha kalın çaplı iğneler (18G, 16G) kullanılarak yeni ön üretimler yapıldı (Çizelge 3.20). İğne çapı arttıkça üretim esnasında iğne ucundan çıkan çözelti miktarı arttığından iğne çaplarına uygun besleme hızları 18G ve 16G iğne için sırası ile 50 ml/saat ve 100 ml/saat olarak ayarlandı. Toplayıcı hızı diğer bölümlerde olduğu gibi 500 rpm olarak ayarlandı ve sabit tutuldu. Bimodal çalışması için en uygun üretim parametresinin belirlenmesi adına ön üretimler yapıldığı için üretim miktarı, tüm üretimlerde toplamda 5 ml çözelti harcanacak şekilde ayarlandı. Nozul dönme hızları yine 4000, 6000 ve 8000 rpm hızlarında denendi.

Çizelge 3.20: % 25 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi kullanılarak farklı iğneler ile CS yönteminde yapılan ön denemelerin üretim parametreleri.

Numune İsmi	Çözelti Konsantrasyonu (%)	Besleme Hızı (ml/saat)	Nozul Dönme Hızı (rpm)	Toplayıcı Hızı (m/sa)	İğne Çapı (G)	Üretim Miktarı (ml)
CS 1.16			4000			
CS 1.17		50	6000		18	
CS 1.18			8000			
CS 1.19	25		4000	500		5
CS 1.20		100	6000		16	
CS 1.21			8000			

Bimodal filtre kumaş üretiminde ince lifli yapının üretimi için SB yönteminde Bölüm 1’de en ince lif yapısının elde edildiği üretim parametreleri (% 7 PA6 çözeltisi, 5 ml/saat besleme hızı, 2 bar hava basıncı) tekrar kullanıldı. CS yönteminde yapılan ön denemeler neticesinde en kalın lif çapının elde edildiği üretim parametresi de (% 25

PA6 çözültüsü, 18G iğne çapı, 50 ml/saat besleme hızı, 8000 rpm nozul dönme hızı) belirlendikten sonra CS ve SB yöntemleri bimodal üretim için bir araya getirilerek hibrit bir sistem oluşturuldu. En iyi oranda lif toplanmasına karar vermek için farklı üretim sürelerinde yani farklı çözelti miktarlarında besleme yapılarak üretimler yapıldı. Bu üretimler CSB-B 12, CSB-B 36 ve CSB-B 60 olarak isimlendirildi. Kullanılan besleme miktarı ve üretim süreleri Çizelge 3.21’de verilmektedir. Üretimlerde Çizelge 3.21’de yer alan üretim parametresi sütununda verilen numune kodlarına ait üretim parametreleri kullanıldı. Numune kodlarındaki ‘B’, bimodal anlamına gelmektedir. ‘CSB’ gösterimi SB ve CS yöntemlerinin bir arada olduğu hibrit üretim yöntemini ifade etmektedir. CSB-B ifadesinin sağındaki rakamlar ise üretim süresini ifade etmektedir. Üretimlerden elde edilen her bir kumaşın filtre testi gerçekleştirildi ve en iyi filtre verimi 60 dk boyunca yapılan hibrit üretimden yani CSB-B 60 numunesinden elde edildi.

Çizelge 3.21: İki sistemin kombinlenmesi ile üretilen bimodal filtre kumaşlarının üretimi için hibrit sisteme ait üretim parametreleri.

Numune	Üretim Parametresi	Beslenen Çözelti Miktarı (ml)	Üretim Süresi (dk)
CSB-B 12	SB 1.2-12	1	12
	CS 1.18-12	10	
CSB-B 36	SB 1.2-36	3	36
	CS 1.18-36	30	
CSB-B 60	SB 1.2-60	5	60
	CS 1.18-60	50	

60 dakikalık bimodal üretimden istenen filtre verimi elde edildiğinden (bkzn. Çizelge 3.24) kıyaslama adına sadece SB 1.2 ve CS 1.18 numuneleri de 60 dakika boyunca üretildi. İki sistem ve bu sistemlerin kullanımı ile elde edilen lif yapıları birbirlerinden çok farklı olduğu için tüm üretimlerin kıyaslanabilmesi adına üretim süreleri 60 dk olarak ayarlandı. Üretimlerde beslenen çözelti miktarına göre üretim yapılamadığından bimodal üretim için de üretim süreleri eşit tutuldu. Daha sonra bu üç üretim birlikte incelendi. Bu sayede bimodal yapının sadece nanoliflerden ve sadece mikroliflerden oluşan numunelere kıyasla daha avantajlı ve kaliteli filtre kumaşı oluşturduğu anlaşıldı.

Çizelge 3.21’de verilen deney düzeneğine ait üretim parametreleri ile elde edilen en iyi numune olan CSB-B 60 numunesi, bundan sonraki bölümlerde CSB-B 3 olarak isimlendirilmektedir. SB 1.2 isimli üretimin tek başına 60 dk boyunca üretilmiş hali CSB-B 1 olarak, CS-1.18 isimli üretimin tek başına 60 dk boyunca üretilmiş hali ise CSB-B 2 olarak isimlendirilmektedir.

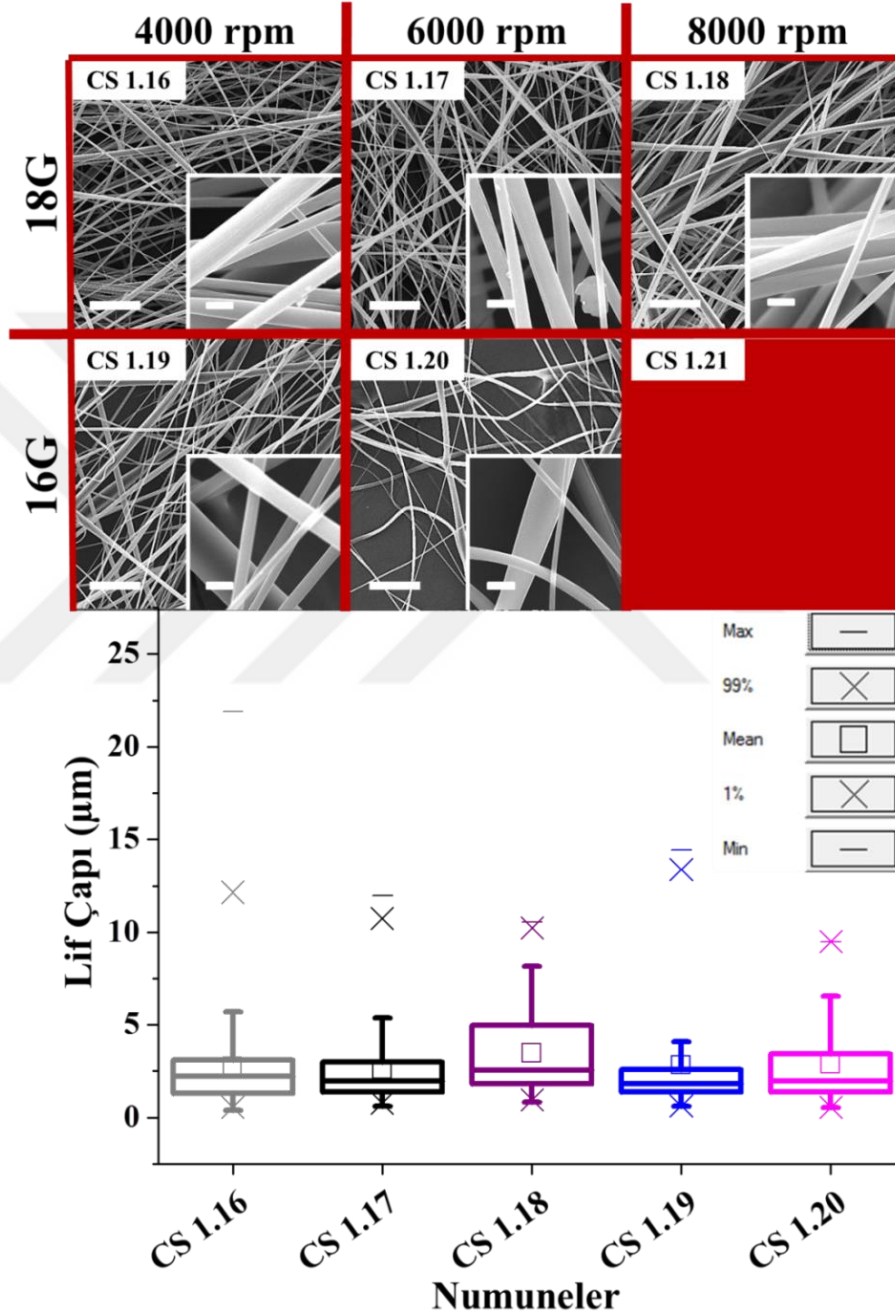
3.5.1. Santrifüj kuvvetleri ile lif üretim yöntemi ve çözeltiden üfleli nanolif üretim yönteminin kombinlenmesi ile bimodal pa6 liflerin üretim sonuçları

3.5.1.1. Liflerin yüzey morfolojisi

Bölüm 3’te yapılan ön üretilere ait SEM görüntüleri ve üretilere ait lif çap dağılım grafiği Şekil 3.25’de verilmektedir. Üretimlerde genel olarak Bölüm 2’de bahsedilen CS yöntemi ile üretilen liflerde gözlemlenen iki durumdan ilki yani nozul dönme hızının artması ile iğne ucundan daha fazla çözeltinin çıkmasına ve çözeltinin daha hızlı buharlaşmasına bağlı olarak liflerde artma durumu meydana geldi. Fakat % 25’lik PA6 çözeltisi kullanılarak 18G iğne ile yapılan üretimlerde nozul dönme hızının 4000 rpm’den (CS 1.16) 6000 rpm’ye (CS 1.17) arttırılması ile lif çapı yaklaşık 3 µm’den 2,5 µm’ye düştüğünden burada ikinci durum yani daha hızlı dönme neticesinde liflerin daha fazla uzayarak incelmeleri durumu gözlemlendi. Fakat rpm 8000’e (CS 1.18) çıkarıldığında nozul % 25’lik PA6 çözeltisi için maksimum hıza ulaştığından ve % 25’lik çözelti doyma noktasına yakın bir çözelti olduğundan çözelti jeti incelemeyen çok hızlı bir şekilde lif formuna geçmiştir. Bu sebeple lif çapı yaklaşık 3,5 µm’a çıkmıştır. % 25 çözelti konsantrasyonuna sahip PA6 çözelti ile yapılan üretimlerde her iki durumun da gözlemlenmiş olması, bu çözelti konsantrasyonunun ve kullanılan 18G iğne çapının üretimde kritik bir durum, eşik oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Diğer taraftan 8000 rpm’de elde edilen lifler 4000 ve 6000 rpm’de üretilen liflere kıyasla daha tek düze lif yapısına sahiptir. Bu sebeple standart sapma değeri düşüktür. Bu da 8000 rpm’de daha düzgün ve stabil liflerin üretilmişliğini göstermektedir.

Şekil 3.25 incelendiğinde 16G iğnenin kullanılması neticesinde iğne çapının çok fazla artmasının lif oluşumunu olumsuz etkilediği ve başarılı bir şekilde lif üretilmediği görülmektedir. 16G iğne ile yapılan üretimlerde 4000 rpm nozul dönme hızında lif elde edilirken nozul dönme hızının artması ile lif oluşumu giderek

azaldı ve 8000 rpm’de hiç lif üretilmedi. CS 1.21 isimli numunenin SEM görüntüsünün kırmızı renkte olması lif oluşmadığını ifade etmektedir. Fakat elde edilen liflerin artan nozul dönme hızı ile kendi içinde lif yapısındaki ve boyutundaki değişikliklerin mukayese edilebilmesi için yine de SEM görüntüleri alındı ve numunelerin lif çapı ölçümleri yapıldı.



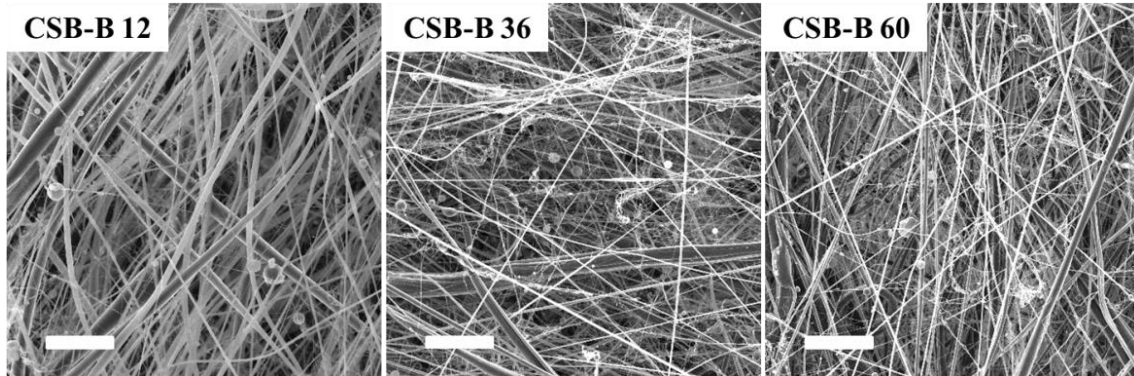
Şekil 3.25: % 25 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi ile farklı iğneler (18G-16G) ve farklı nozul dönme hızları kullanılarak yapılan üretilere ait SEM görüntüleri (Büyük görüntü 500 X ve küçük görüntü 5 kX büyütmede alındı.) ve lif çapı grafiği.

İğne çapının çok fazla artması dönme kuvvetlerine oranla iğne ucuna çok yoğun çözelti gitmesine, çözeltinin yeterli oranda incelememesine ve çözeltinin yüzey

geriliminin aşılamamasına neden oldu. Aynı zamanda yoğun çözelti çıkışı, çözelti içerisindeki çözücünün özellikle yüksek nozul dönme hızlarında yeterli miktarda uzaklaşmamasına da neden oldu. Bu sebeple 16G ile yapılan üretimlerde özellikle 4000 rpm yukarıdaki nozul dönme hızlarında iğne ucuna beslenen çözelti, olduğu gibi makine içerisine savruldu. Düşük nozul dönme hızında (4000 rpm) iğne ucuna gelen çözeltideki çözücü, yavaş dönme ile zaman açısından bir miktar buharlaşabildiğinden az oranda lif oluşumu gerçekleşti.

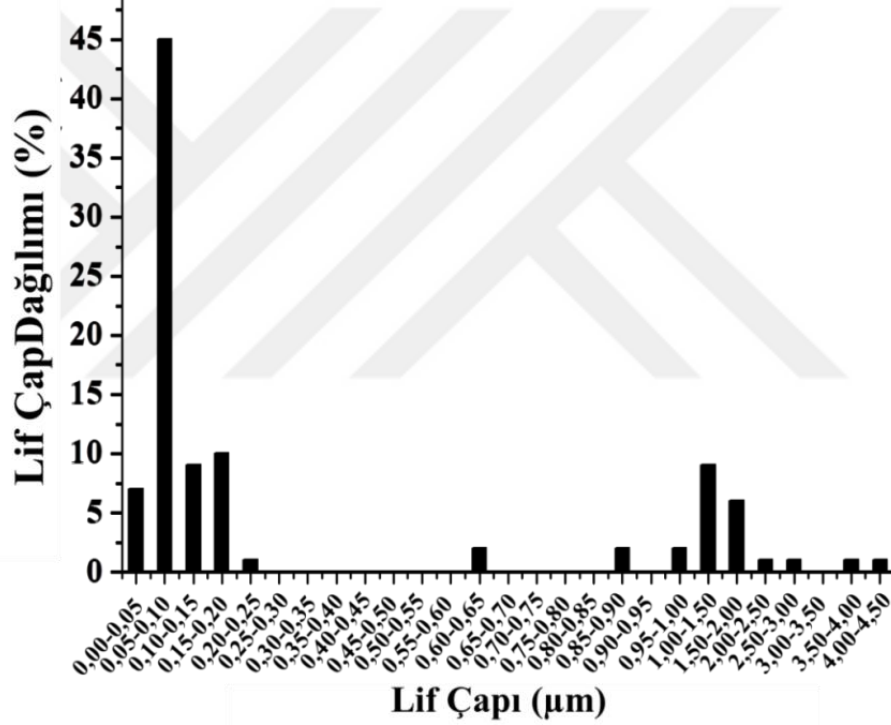
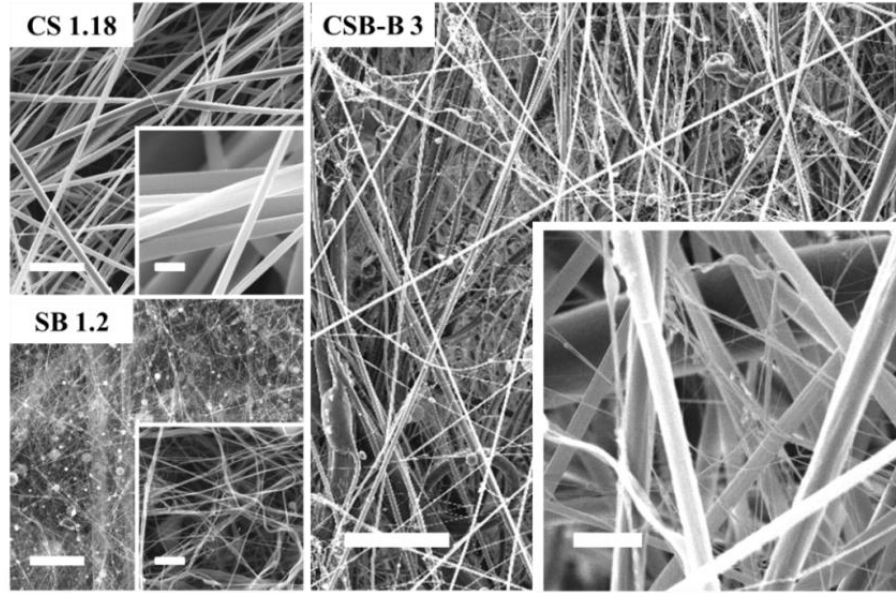
CS yönteminde % 25 PA6 çözeltisi ile farklı çaplardaki iğneler kullanılarak yapılan üretimlerden düzgün ve en mikrolifli üretim, 18G iğne kullanılarak 8000 rpm nozul dönme hızlarında yapılan üretimden elde edildiğinden bimodal üretimler, CS yönteminde bu parametrelerin SB nanolifleri ile kombinlenmesiyle üretildi.

Farklı kaplama sürelerinde üretilen bimodal üretimlerin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 3.26) CSB-B 12 numunesinde nanolif miktarının çok az olduğu, yapının neredeyse tamamının mikroliflerden oluştuğu görülmektedir. CSB-B 36 ve CSB-B 60 numuneleri ilk bakışta birbirlerine benzer yapıya sahip görünseler de CSB-B 36 numunesinin SEM görüntüsü dikkatli incelendiğinde yapısında hala bir miktar boşlukların olduğu görülmektedir. CSB-B 6 numunesinde ise mikroliflerin araları tamamen nanolifler ile doludur.



Şekil 3.26: Farklı kaplama süreleri ile CSB bimodal üretimlere ait SEM görüntüleri (Büyütme skalası 50 μ m).

Oluşturulan CSB hibrit üretim yöntemi ile üretilen bimodal kumaş yapısı ve lif çapı dağılım grafiği Şekil 3.27'de verilmektedir. Kumaş yapılarının kıyaslanabilmesi adına sadece CS ve sadece SB yöntemi kullanılarak yapılan üretimlerin SEM görüntüleri de burada verilmektedir.



Şekil 3.27: CS 1.18, SB 1.2 ve CSB-B 3 bimodal üretime ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (Büyük görüntü 500 X ve küçük görüntü 5 kX büyütmede alındı.) ve CSB-B 3 isimli bimodal filtre kumaşına ait lif çapı dağılım grafiği.

Şekil 3.27 incelendiğinde CSB-B 3 isimli bimodal numunesinde CS 1.18 ve SB 1.2 isimli numunelerin sahip olduğu nano- ve mikrolif yapılarının bir araya geldiği açık bir şekilde görülmektedir. Bu da hedeflenen bimodal yapının düzgün bir şekilde elde edildiğini göstermektedir. CSB-B 3 bimodal numunesinin lif çap grafiğine bakıldığında da numunenin bimodal lif dağılımı sahip olduğu görülmektedir. Bimodal numunedeki nanolifler ortalama 143 nm lif çapına, mikrolifler ise ortalama 1,86 µm lif çapına sahiptir. Nanoliflerin ortalama hesaplaması 1 mikrona kadar olan

liflerin çaplarının ortalaması alınarak, mikroliflerin ortalama hesaplaması ise 1 mikron ve üzeri liflerin çaplarının ortalaması alınarak hesaplandı. Fakat grafiğe bakıldığında nanoliflerin 50-100 nm arasında toplandığı, mikroliflerin ise 1 ila 2 µm arasında dağılım gösterdiği görülmektedir. Normal şartlarda mikroliflerin ortalama 3-4 µm civarında olması beklenirken mikroliflerin ortalaması düştü. CS ve SB lifleri aynı anda üretildiğinden SB yönteminde kullanılan basınçlı hava, CS liflerin daha ince olmasına neden oldu. CSB-B 3 numunesinin % 78'i 1 mikron altı nanoliflerden, % 22'si ise 1 mikron ve üstü mikroliflerden oluşmaktadırdır. Bölüm 1'deki SB bimodal çalışmasındaki bimodal numune ile kıyaslayacak olursak bu çalışmada da mikroliflerin varlığı nanoliflere kıyasla daha az oldu. Fakat CS mikrolif eldesi SB mikrolif eldesinden daha fazladır. Bu sebeple burada mikroliflerin oranı SB bimodal numunesininkinden daha fazladır.

3.5.1.2. Hava geçirgenlik analizi

Çizelge 3.22'de hava geçirgenlik test standartları ve numunelerin sahip olduğu hava geçirgenlik değerleri yer almaktadır. CSB-B 1 numunesi yalnızca nanoliflerden oluşmaktadırdır. Ayrıca SB yöntemi kullanılarak üretildiği için yüksek basınçlı havadan dolayı oldukça sıkı dokunmuş bir yapıya sahipti. Ayrıca Fakat SB nanolifler, çok küçük yapılarından dolayı yüksek yüzey alanlarına sahiptirler. Bundan dolayı oldukça küçük gözeneklerin oluşmasına neden olurlar. Bu sebeple en az hava geçirgenlik değerine (23,786 m³/saat) sahip numunedir. CSB-B 2 numunesi ise yalnızca CS yöntemi ile üretildi ve sadece mikroliflerden oluşmaktadırdır. Kalın lif yapısı, yapının daha büyük porlara sahip olmasına neden olmaktadır(N. Deng vd., 2019). Bundan dolayı CSB-B 2 numunesi 168,202 m³/saat değeri ile en yüksek hava geçirgenlik değerine sahiptir. Aynı zamanda Bölüm 2'de de bahsedildiği gibi CS numunelerinin lifleri SB numunelerine kıyasla çok daha düz ve hizalı olduklarından CS numuneleri havayı oldukça iyi oranda geçirmekte dirler. CSB-B 3 numunesinde SB ve CS liflerin kombinasyonu söz konusudur. Bu sebeple tahmin edildiği gibi bu numunenin hava geçirgenlik değeri diğer iki numunenin sahip olduğu değerlerin arasındadır. CSB-B 3 numunesinde var olan SB nanoliflerin oranları (% 78), CS mikroliflerin oranlarından (% 22) ok daha fazladır. Buda CSB-B 3 numunesinin neredeyse CSB-B 1 numunesi kadar havayı az oranda (37,378 m³/saat değerinde) geçirmesine neden olmaktadır.

Çizelge 3.22: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının hava geçirgenlik değerleri.

Numune İsmi	Test Standardı	Test alanı (cm ²)	Basınç (Pa)	Değer (m ³ /saat)
CSB-B 1				23,786
CSB-B 2	ASTM D737	38	125	168,202
CSB-B 3				37,378

3.5.1.3. Porozite ölçümleri

Porozite analizinde ıslak ölçümde gözlenen ilk kabarcık noktası basıncı, maksimum gözenek boyutunu, kuru ve ıslak ölçüm değerlerinin bulunduğu basınç noktası da minimum gözenek boyutunu verir. Bimodal çalışması için üretilen 3 numunenin de porozite ölçümleri yapıldı fakat sahip oldukları maksimum por boyutları cihaz kapasitesinin yukarısında olduğundan porozite ölçümlerinden bir netice alınamadı.

3.5.1.4. Katı hacim değeri

Bu bölümde yer alan bimodal çalışması üzerine üretilmiş yalnızca nanolifli, yalnızca mikrolifli ve nano-/mikrolif karışımli bimodal numunelerin katı hacim oranları Çizelge 3.23'te verilmektedir. Birinci ve ikinci bölümlerde belirtildiği gibi katı hacim değerinin artması filtre performansını olumlu yönde etkileyen unsurdur.

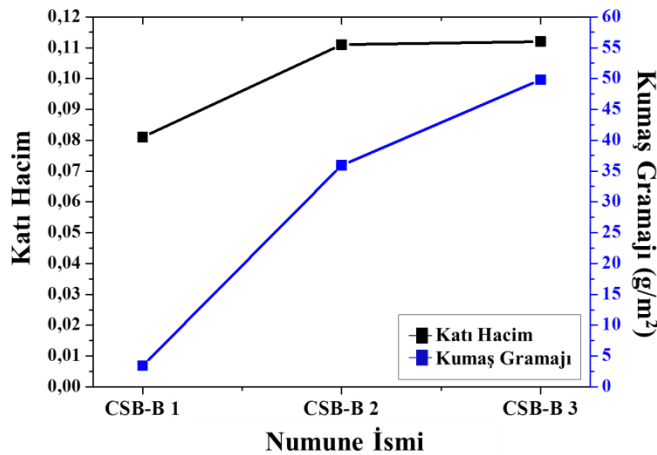
Çizelge 3.23: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının kumaş özellikleri ve katı hacim oranları.

Numune İsmi	Kumaş kalınlığı (µm)	Kumaş Gramajı (gr/m ²)	Kumaş Yoğunluğu (gr/cm ³)	Polimer Yoğunluğu (gr/cm ³)	Katı Hacim Değeri
CSB-B 1	37,25	3,427	0,092		0,081
CSB-B 2	283,25	35,929	0,127	1,14	0,111
CSB-B 3	389,18	49,786	0,128		0,112

CSB-B 1 numunesinin filtre verimi en fazla olmasına rağmen en düşük katı hacim değerine (~0,081) sahip oldu. SB liflerin ve oluşturduğu kumaş yapısının CS liflerinden ve kumaşlarından çok daha ince olması bu duruma neden olmaktadır. CS ile yapılan üretimde üretim süreleri 1 saat olmasına rağmen besleme hızı SB'nin 10 katıdır. Yani CS yönteminde 10 kat daha fazla polimer beslenmesi söz konusudur. Bundan dolayı CS numuneleri (CSB-B 2 ve CSB-B 3), CSB-B 1 numunesinden çok daha ağırdır. Diğer taraftan CS yönteminde kullanılan çözelti konsantrasyonu SB

yönteminde kullanılan çözelti konsantrasyonunun yaklaşık 3,5 katıdır. Bu durum da CS yöntemi kullanılarak üretilen kumaşların daha kalın olmasına neden olmaktadır. CSB-B 2 ve CSB-B 3 numunelerinin katı hacim oranları sahip oldukları kumaş ağırlıkları ve kumaş kalınlıklarından dolayı CSB-B 1 numunesininkinden daha fazladır. 60 dk boyunca hem CS hem SB ile üretilen liflerin bir araya gelerek oluşturduğu CSB-B 3 numunesinin kumaş kalınlığı ve ağırlığı, yalnızca SB ve CS üretimlerinden elde edilen kumaşlara kıyasla daha fazladır. İki sistemden elde edilen lif yapısı oldukça farklı olduğundan CSB-B 3 numunesindeki SB nanolifler, CS mikroliflerin arasında adeta bir ağ örerek CSB-B 3 numunesinin daha kip (sert, stabil, düzenli vs.) bir yapıya sahip olmasını sağladı. Bu sebeple de CSB-B 3 numunesinin lifler arası boşluğu CSB-B 2'ye kıyasla daha fazla olmamasına rağmen daha kalın bir kumaş yapısı elde edildi. Fakat CSB-B 3 numunesinin kumaş kalınlığında ve kumaş ağırlığında CSB-B 2'ye göre neredeyse aynı oranda artma oldu. Bu sebeple bu iki numune teorik olarak neredeyse aynı katı hacim değerine sahip oldular.

Katı hacim hesabı ile kumaştaki katı lif miktarı teorik olarak hesaplanır. SB nanoliflerden oluşan CSB-B 1 numunesi, nanoliflerden oluşan kompakt yapısı dolayısı ile nispeten küçük gözenek boyutuna ve düşük bir geçirgenliğe sahip olmasına rağmen diğer numunelerden nispeten daha yüksek bir gözeneklilik ve daha düşük katı hacim değeri gösterdi. CSB-B 2 ve CSB-B 3 numuneleri teorik olarak yaklaşık aynı değerlerde katı hacim oranlarına sahip oldular. Kumaş gramajı, katı hacim değerini doğrudan etkilemektedir. Şekil 3.28'e göre artan kumaş ağırlığıyla katı hacim değeri de arttı.



Şekil 3.28: CSB Bimodal numunelere ait kıyaslamalı katı hacim değeri-kumaş gramajı grafiği.

3.5.1.5. Filtrasyon özellikleri

Farklı üretim sürelerinde üretilen bimodal kumaşlardan elde edilen filtre performansı değerleri Çizelge 3.24'te verilmektedir. Verilen değerler incelendiğinde en yüksek filtre veriminin 60 dk'lık hibrit üretimden elde edildiği görüldü. Üretim süresi arttıkça nanolif oranı da arttığından ortalama lif çapı azaldı. Fakat üç üretimin de ortalama nanolif ve mikrolif oranları ayrı ayrı hesaplandığında birbirleri ile neredeyse aynı oranda oldu. Ortalama lif çapı üzerinden Kn hesaplandığında üretim süresi en az olan CSB-B 12 numunesinin filtre veriminde olduğu gibi en düşük Kn değerine sahip oldu. Kn değerinin en yüksek olduğu numune ise CSB-B 60 numunesidir. Bu sebeple kıyaslamalı bimodal çalışması için yapılan tüm üretimler 60 dk üretim süresiyle üretildi.

Çizelge 3.24: Farklı üretim sürelerinde üretilen CSB kodlu filtre kumaşlarının filtrasyon değerleri.

Numune	Akış Oranı (l/dk)	Basınç Farkı (Pa)	Filtre Verimi (%)	Kn	QF (mmH ₂ O ⁻¹)
CSB-B 12		53	62,539	0,133 0,929-0,069	0,182
CSB-B 36	95	115	89,668	0,194 0,942-0,068	0,194
CSB-B 60		160	96,567	0,244 0,910-0,070	0,206

Bölüm 3'te kıyaslanan CSB bimodal üretimlerin filtre analizinden elde edilen filtre performansı değerleri Çizelge 3.25'te verilmektedir. Bu çizelge incelendiğinde En yüksek filtre verimine sahip numunenin CSB-B 1 numunesi olduğu görülmektedir. Fakat CSB-B 1 numunesinin yalnızca nanoliflerden oluşması ve sıkı bir dokumaya sahip olması bu numunenin en yüksek basınç farkı değerine sahip olmasına neden oldu. CSB-B 2 numunesi ise yalnızca micron boyutlu CS liflerden oluşmaktadır. Bu da diğer bölümlerde de açıklandığı üzere büyük porları bulunan bir kumaş yapısını ifade etmektedir ve havayı kolayca geçirebilmektedir. Bu sebeple CSB-B 2 numunesi en düşük filtre verimi ve basınç farkı değerine sahiptir. CSB-B 3 bimodal yapılı numune de iki yapıya ait olumlu özelliklerin bir araya getirilmesi hedeflendi. Bu doğrultuda hedeflenen gerçekleşti ve nano-/mikrolifli CSB-B 3 bimodal numunesi elde edildi. CSB-B 3 numunesinin bimodal yapısından dolayı hem küçük hem de büyük porlardan oluşması, bu numunenin filtre performansını iyileştirmektedir. Küçük porlar ile küçük partiküllerin geçmesi engellenirken büyük porlar ile hava

geçirgenlik analizinde de ortaya koyulduğu gibi havanın geçişi daha kolay bir şekilde sağlanmaktadır(Oh vd., 2020). CSB-B 3 bimodal numunesinin filtre verimi neredeyse CSB-B 1 numunesininki kadar olmasının yanında CSB-B 1 numunesinin sahip olduğu basınç farkı değerinden 100 Pa kadar daha düşük hava basınç farkı değerine sahip oldu. Böylece kalite faktörü en yüksek (0,207) numune elde edildi.

Çizelge 3.25: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının 95 lt/dk akış hızında filtrasyon değerleri.

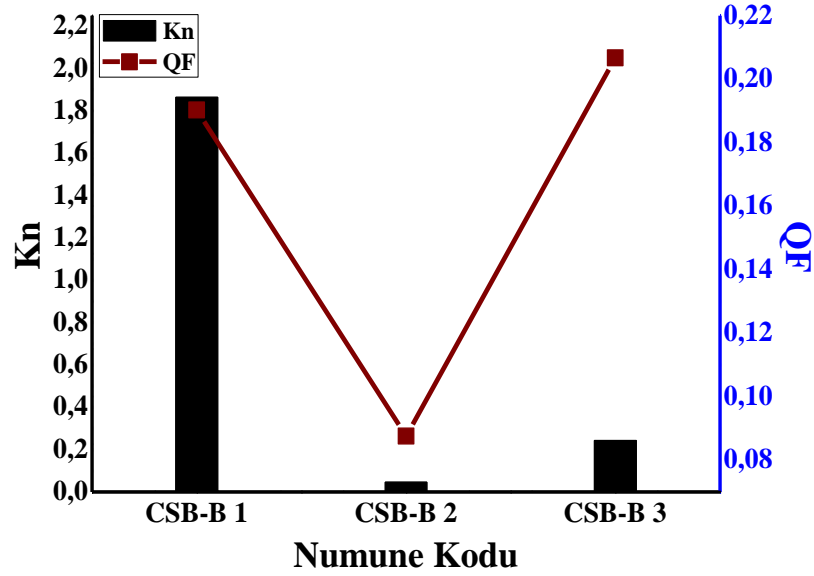
Numune İsmi	Akış Oranı (l/dk)	Basınç Farkı (Pa)	Filtre Verimi (%)	Kn	QF (mmH ₂ O ⁻¹)
CSB-B 1	95	265	99,413	1,865	0,190
CSB-B 2		29	22,828	0,047	0,088
CSB-B 3		160	96,567	0,244 0,910-0,070	0,207

Akış hızı 32 lt/dk'ya düşürüldüğünde (Çizelge 3.26) tüm numuneler, 95 lt/dk akış hızına göre yaklaşık 3 kat daha az basınç farkı değeri elde edildi. Akış hızının düşmesinden dolayı numunelerin filtre performansları çok daha iyidir. Çizelge 3.25'in aksine CSB-B 2 numunesi 4 Pa basınç farkı değerine sahip olduğundan bu değer filtre verimi ile oranlandığında en yüksek kalite faktörü değerine (0,854) sahip oldu. Fakat bu değer yanıltıcıdır. Çünkü CSB-B 2 numunesinin oldukça geçirgen bir kumaş olduğu SEM görüntülerinde, hava geçirgenlik analizinde ve 95 lt/dk akış hızındaki filtre ölçümlerinde kanıtlandı.

Çizelge 3.26: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının 32 lt/dk akış hızında filtrasyon değerleri.

Numune İsmi	Akış Oranı (l/dk)	Basınç Farkı (Pa)	Filtre Verimi (%)	QF (mmH ₂ O ⁻¹)
CSB-B 1	32	94	99,604	0,577
CSB-B 2		4	29,425	0,854
CSB-B 3		54	97,597	0,677

Şekil 3.29'da numunelerin sahip olduğu Kn ve QF değerlerinin kıyaslamalı bir şekilde gösterimleri grafik halinde verilmektedir. CSB-B 1 numunesi sahip olduğu % 99,413 oranındaki filtre verimi ve 265 Pa basınç farkı değeri ile yüksek kalite faktörüne sahiptir. Ayrıca CSB-B 1 numunesinin ortalama lif çapı 70 nm olduğundan en yüksek Kn değerine sahiptir.



Şekil 3.29: CSB-B kodlu numunelerin QF-Kn değerlerinin kıyaslamalı grafiği.

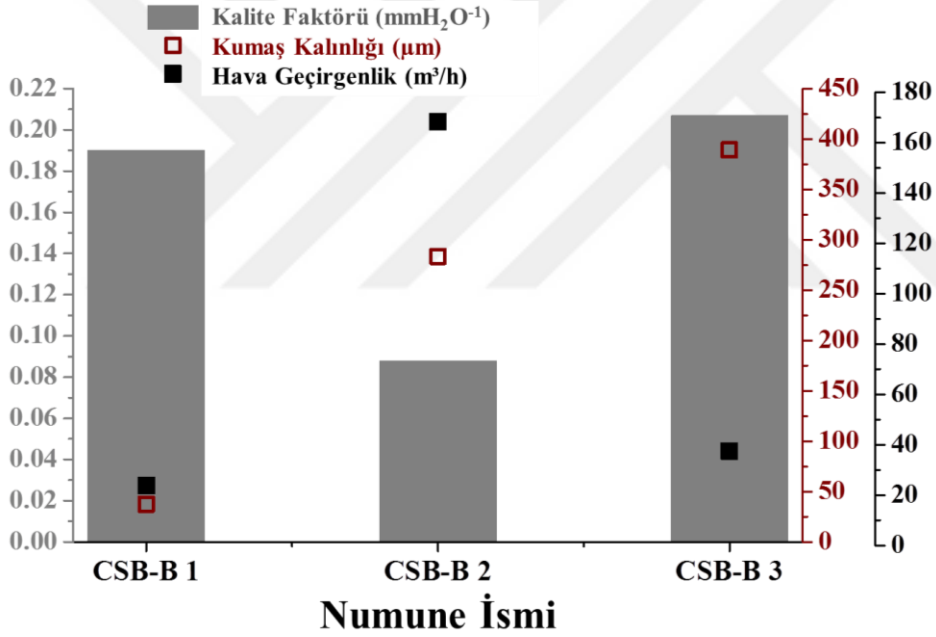
Bölüm 1 ve Bölüm 2’de açıklandığı gibi Kn değerinin 0,1’den fazla olması kayma akışından dolayı havanın lifler arasından kolay bir şekilde geçmesini sağlamaktadır. CSB-B 2 numunesi ortalama 2,5 µm lif çaplarında liflerden oluşmaktadır. Bu numune mikrolifli kumaş yapısından dolayı büyük porlara da sahiptir ve **havayı rahat bir şekilde içerisinden geçirmektedir. Fakat kalın lifler havanın kayma akışını engellediklerinden**(Fotovati vd., 2010) dolayı bu kumaşın Kn değeri 0,1’in altındadır.

CSB-B 2 numunesinin filtre verimi ve basınç faktörü değerleri düşük olduğundan kalite faktörü oldukça düşüktür. CSB-B 2 ve CSB-B 3 numuneleri neredeyse aynı katı hacim oranlarına sahip olmalarına rağmen CSB-B 3 en yüksek kalite faktörüne sahip oldu. Bu durum bimodal yapıya sahip CSB-B 3 numunesindeki SB nanolifleri ile yüksek filtre veriminin sağlanmasından ve CS mikrolifleri sayesinde de havanın rahat bir şekilde kumaş içerisinden geçebilmesinden dolayı düşük basınç farkı değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

CSB-B 3 numunesi sahip olduğu düşük filtre basınç farkı değeri ve buna ters oranda yüksek filtre veriminden dolayı en yüksek kalite faktörü değerine sahip olmasına rağmen Kn değeri oldukça düşüktür. Bu durum yapısında bulunan mikroliflerden dolayı ortalama lif çapının fazla çıkmasından kaynaklanmaktadır. CSB-B 3 numunesinin yapısındaki 1 µm altındaki nanoliflerin ortalama lif çapı yaklaşık 143 nm ve mikroliflerin ortalama lif çapı ise 1,86 µm’dir. Bu sebeple CSB-B 3 numunesi

aslında 0,910-0,070 aralığında olmak üzere geniş bir Kn değerine sahiptir ve filtrasyon esnasında **kayma ve geçiş akışı etkileri birlikte** gözlemlenmektedir.

Hava geçirgenlik değeri ile filtre kumaşların kalite faktörleri ters orantılıdır. Şekil 3.30 incelendiğinde bu bölümde üretilen numunelerde de bu durum açık bir şekilde görülmektedir. CSB-B 1 numunesi havayı en az geçiren numunedir ve yüksek filtre verimine sahiptir. Bu sebeple yüksek kalite faktörüdür. CSB-B 2 numunesinde ise tam tersi durum gözlemlenir. Bu numune mikroliflerinden kaynaklı olarak sahip olduğu büyük gözenekleri sebebiyle havayı yüksek oranda geçirdiğinden çok düşük filtre verimine ve dolaylı olarak en düşük kalite faktörü değerine sahiptir. CSB-B 3 numunesi ise yapısındaki mikrolifler sayesinde CSB-B 1 numunesine kıyasla havayı bir miktar daha fazla geçirir fakat yine yapısındaki nanolifler sayesinde ise yüksek filtre verimine sahiptir. Bu sebeple en yüksek kaliteye sahip numunedir.



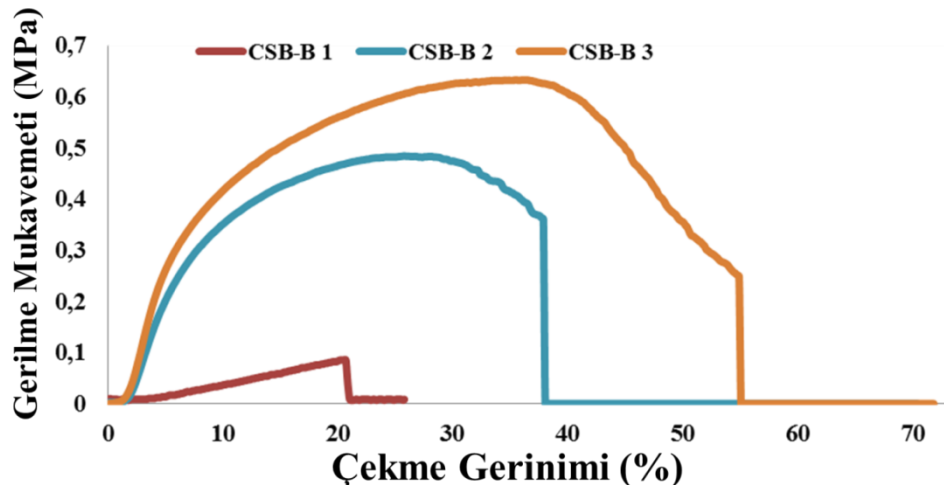
Şekil 3.30: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı kalite faktörü-kumaş kalınlığı-hava geçirgenlik değerleri grafiği.

3.5.1.6. Mekanik performans

Mekanik testi için 3 numunenin 3 ayrı yerinden ölçümler yapıldı. Optimum sonuçlardan çizdirilen çekme-gerinim grafiği Şekil 3.31’de gösterilmektedir. Mekanik test sonuçları incelendiğinde CSB-B 1 nanolifli numunesi diğer numunelere kıyasla en küçük çekme gerinimi eğrisine sahiptir. Bu durum SB ve CS lifleri arasındaki farkı ortaya koymaktadır. Fakat yine nanoliflerin sağlamış olduğu daha sıkı yapı sayesinde yük esnasında liflerin birlikte kopmasından dolayı CSB-B 1

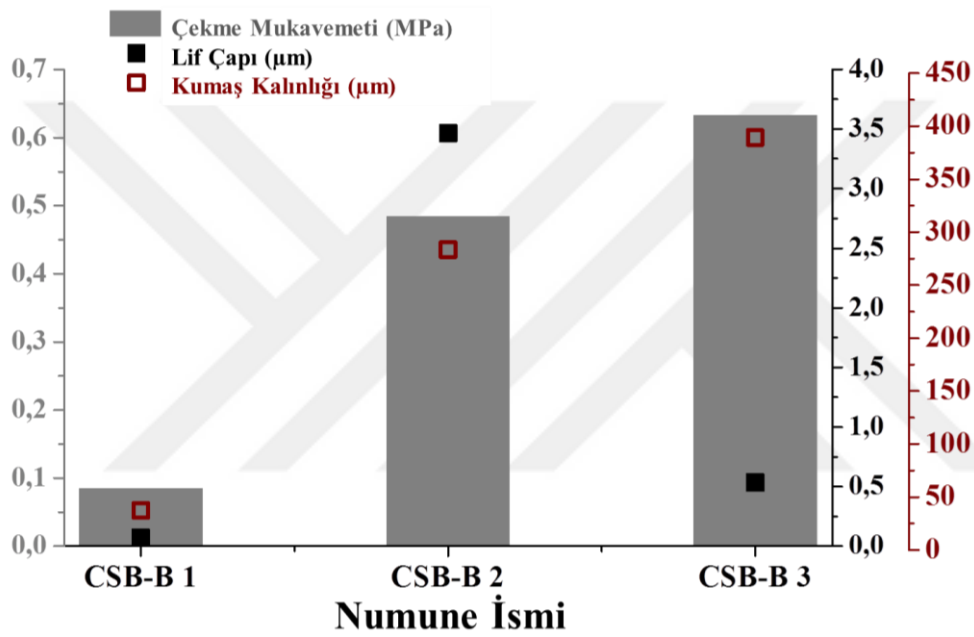
numunesinin grafiği daha liner bir şekilde uzamaktadır. CSB-B 2 numunesi ise mikroliflerden oluşmaktadır ve oldukça gözenekli/boşluklu bir yapıya sahiptir. Bu sebeple çekme esnasında lifler kademeli bir şekilde birbirinden ayrılarak koptu. Bu sebeple CSB-B 1'e kıyasla kavisli bir eğri oluştu. Fakat CSB-B 2 numunesi CSB-B 1 numunesinden yaklaşık 7 kat daha mukavemettir. CSB-B 3 bimodal numunesinde de boşluklu yapısından dolayı liflerin çekme esnasında kademeli bir şekilde birbirinden ayrılarak kopması söz konusudur. Bu sebeple liflerden ziyade kumaş amorf gibi davranarak geniş bir çekme gerinimi eğrisine sahip oldu. Yapıdaki nanolifler sayesinde artan yüzey alanından dolayı(Jin vd., 2020) CSB-B 3 numunesi çekme esnasında en yüksek gerilme mukavemetini sağladı. Fakat yine nanoliflerin varlığından dolayı kopma mukavemeti CSB-B 2 numunesinden daha düşük oldu. Bu durum biraz da nano- ve mikrolif dağılımından kaynaklanmaktadır. Lifli yapılarda çekme testi sırasında nanoliflerin veya mikroliflerin yoğun olduğu bölgelere denk gelinir ise daha farklı grafikler elde edilebilir. Bu homojensizlikten dolayı CSB-B 3 numunesinin % 43-55 çekme gerinimi değerlerinde bir miktar dalgalanma meydana geldi.

Numunelerin Şekil 3.31'e bakıldığında morfolojik yapılarını ele alacak olursak; SB nanolifli CSB-B 1 numunesinin çok geniş bir elastik bölgeye sahip olduğu ve plastik ve hasar bölgelerinin olmadığı görülmektedir. CS liflere sahip CSB-B 2 ve CSB-B 3 numuneleri ise daha dar elastik bölgeye sahiptir. Aynı zamanda bu iki numune CSB-B 1 numunesine kıyasla geniş plastik ve hasar bölgeleri bulunmaktadır. Fakat genel olarak CS liflerin yani mikroliflerin varlığı kumaşın mukavemeti bariz bir şekilde arttırmaktadır.



Şekil 3.31 CSB-B kodlu filtre kumaşlarının Çekme-Gerilme mukavemeti eğrileri.

Numunelerin çekme mukavemetini etkileyen en temel parametre kumaş kalınlığıdır. Kumaş kalınlığı eşit olan numunelerde katı hacim değeri ve lif çapı gibi etkenler önemli rol oynamaktadır. Şekil 3.32'ye bakıldığında numunelerin çekme mukavemetlerinin kumaş kalınlığı ile doğru orantılı bir grafik oluşturduğu görülmektedir. Aynı şekilde CSB-B 1 ve CSB-B 2 numunelerinde geçerli olan lif çapının artması ile numunelerin mekanik mukavemetlerinin de artması söz konusudur. CSB-B 3 numunesi % 78 oranında nanoliflerden oluştuğundan ortalama lif çapı düşük çıkmaktadır. Fakat % 22'lik mikrolif varlığı kumaşın hem kalın hem de mukavemetli olması için yetti.



Şekil 3.32: CSB-B kodlu filtre kumaşlarının kıyaslamalı lif çapı-kumaş kalınlığı-çekme mukavemeti grafiği.

4. GENEL SONUÇLAR

Tezin ikinci bölümde yapılan bimodal çalışması neticesinde bimodal filtre kumaşı elde edilememiş olsa da birinci ve üçüncü bölümlerde elde edilen bimodal yapılı filtre kumaşları, ‘unimodal’ olarak isimlendirilen tek tip lif yapısından oluşan filtre kumaşlarına kıyasla daha düşük basınç farkı değerine ve yüksek kalite faktörüne sahip oldu. Yapılan üç çalışma birbiri ile kıyaslandığında en iyi değerlere sahip bimodal filtre kumaşı, iki ayrı nanolif üretim yönteminin kombinlenmesi ile oluşturulan hibrit sistem kullanılarak üretilen bimodal kumaştan elde edildi.

4.1. Viskozite

Yapılan çalışmalarda düşük konsantrasyonlu çözeltilerin düşük viskoziteye sahip olduğu, yüksek konsantrasyonlarda hazırlanan çözeltilerin de yüksek viskoziteye sahip olduğu görülmektedir. Viskozitenin elde edilen liflerin lif çaplarında önemli etkisinin olduğu hem SB yöntemi ile hem de CS yöntemi ile üretilen liflerde açık bir şekilde gözlemlendi. Belli orana kadar artan çözelti viskozitesi SB ve CS üretim sistemlerinde lif çaplarını arttırdı. Her iki sistemin de lif elde edilebilen çözelti aralığı farklılık gösterdi. SB yöntemi ile CS yöntemine kıyasla daha düşük viskoziteli çözeltilerle üretim yapılabilirken CS yönteminde de daha yüksek viskozitelerin kullanılarak lif üretilmesi söz konusudur. SB nanolif üretim sisteminde minimum % 7 konsantrasyonlu PA6 çözeltisi ile lif üretilirken CS nanolif üretim sisteminde minimum % 15’lik çözelti ile üretim gerçekleştirildi. SB nanolif üretim sisteminde maksimum % 20’lik PA6 çözeltisi ile lif elde edilebilirken BASF’den alınan B27 kodlu PA6 polimeri ile maksimum % 25 konsantrasyona kadar PA6 çözeltisi hazırlanabildiğinden CS nanolif üretim sisteminde % 25’e kadar çözeltilerle üretim yapıldı.

4.2. Yüzey Morfolojisi

Yapılan üç çalışmada da alınan taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde (SEM) elde edilebilecek en ince ve en kalın lif yapıları gözlemlendi. Düşük viskoziteli

çözeltiler ile yapılan üretimlerde nano boyutlarda lifler oluşurken özellikle SB yönteminde bu liflere boncuk olarak isimlendirilen lif formuna geçememiş çözeltiler de eşlik etti. SB yönteminde düşük viskoziteli çözelti ile üretim yapılırken hava basıncının arttırılması boncuk oluşumunun azalmasını sağladı. CS yönteminde üretilen liflerde de aynı şekilde düşük viskozite daha ince liflerin oluşumunu sağlarken her iki yöntemde de artan viskozite liflerin daha kalın olmasına neden oldu. Viskozitenin artması ile kalın lifler elde edilmesinin yanı sıra alınan SEM görüntülerinde boncuk yapılarının da damlacık formunda, daha büyük olduğu gözlemlendi. SEM görüntülerine göre SB ile üretilen lifler, hava basıncından dolayı birbirleri ile daha ağ ve dolaşık formdaydı. CS ile üretilen lifler ise SB liflere kıyasla daha oval, pürüzsüz, yönlenmiş ve hizalı formda oldu. Tez çalışmasında alınan SEM görüntüleri incelendiğinde her iki yöntemde de artan çözelti viskozitesi ile lif çaplarında artma oldu. Bunun yanı sıra CS ile üretilen liflerde çözelti konsantrasyonuna bağlı olarak artan nozul dönme hızları ile liflerde kalınlaşma gözlemlenirken SB yönteminde artan hava basıncı ile lif çaplarında azalma meydana geldi. Her iki durumun da sebebi ilgili bölümde referans ile açıklandı.

Alınan SEM görüntülerinde yapılan bimodal üretim kombinasyonları neticesinde oluşturulan kombinasyonların lif morfolojisine herhangi bir etki etmediği ve üretilen filtre kumaşlarında kalın ve ince liflerin bir arada olduğu gözlemlendi.

4.3. Hava Geçirgenliği

Tüm üretimler göz önüne alındığında artan viskozite ile artan lif çapı daha büyük gözenekli yapıların oluşmasına neden oldu. Mikrolifli numuneler daha kalın kumaş kalınlığına sahip olurken nanolifli kumaşlar ise daha ince kumaş kalınlığına sahip oldu. Bu sebeple normal şartlarda artan kumaş kalınlığı ile hava geçirgenliği azalmasına rağmen bu çalışmada mikrolifli kalın kumaşlar daha fazla geçirgenlik gösterdiler. CS yönteminden elde edilen mikrolifli dokusuz yüzeyli kumaşlar, SB yöntemi kullanılarak üretilen kumaşlara kıyasla daha hizalanmış ve kalın çaplı liflere sahip olduklarından dolayı gözenekleri daha fazla ve büyük oldu. Bu sebeple CS kumaşların hava geçirgenlikleri SB kumaşlardan daha fazla oldu. Yapılan bimodal deneylerinde üretilen bimodal numunelerin nanolifli numunelere kıyasla yapılarındaki mikrolifler sayesinde havayı çok daha iyi geçirdiği görüldü.

4.4. Katı Hacim Değeri

Bimodal yapıların üretilmesi için yapılan deneylerde üretilen referans ve bimodal kumaşlar farklı katı hacim oranlarına sahip oldular. Lifli kumaşlarda katı hacim değerinin fazla çıkması filtre verimini arttıran bir faktördür. Fakat katı hacim değeri, Knudsen sayısı gibi teorik hesaplamalar ile bulunan değerlerin numuneler arasında daha doğru kıyaslanabilmesi için bu hesaplamalar aynı nanolif üretim metotlarıyla, aynı koşullarda ve tek bir parametrenin değiştirildiği üretimlerden elde edilen numuneler kullanılarak yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında yapılan her üç bölümde de iki farklı çapa sahip bimodal kumaşlar, farklı parametrelere sahip iki ayrı üretimin aynı anda gerçekleştirilmesi ile elde edildiğinden katı hacim ve Kn değerlerinde teorik ile pratik arasında uyuşmayan sonuçlar elde edildi. Bölüm 1’de elde edilen bimodal kumaş (SB-B 3) düşük katı hacim değerine sahipken yüksek filtre verimi gösterdi. Bölüm 2’de bimodal amaçlı üretilen numunede (CS-B 3) ise tam tersi durum gerçekleşerek yüksek katı hacim değerine sahip olmasına rağmen en düşük filtre verimi elde edildi. Bölüm 3’te üretilen bimodal filtre kumaşı (CSB-B 3) ise mikrolifli numune (CSB-B 2) ile aynı katı hacim değerine sahipken yüksek filtre verimi sağladı. Bu tez çalışması ile elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak bimodal yapısı ile bugüne kadar kabul edilen teorik hesapların değiştiği kanısına da varılabilir.

4.5. Filtre Performansı

Genel olarak SB yöntemi ile daha sıkı ve ince liflerin üretimi sağlandığından SB yöntemi ile üretilen filtre kumaşları, SB’ye kıyasla daha kalın ve gözenekli kumaşların üretilmesini sağlayan CS yöntemi ile üretilen kumaşlardan çok daha yüksek filtre verimine ve aynı şekilde çok yüksek basınç farkı değerlerine sahip oldu. Nano- ve mikroliflerin bir araya getirildiği bimodal üretimler neticesinde düşük filtre basıncı değerlerine sahip ve yüksek filtre verimli kumaşlar elde edildi. Bu numunelerin kalite faktörleri de oldukça yüksek oldu. Fakat bimodal olmayan yüksek filtre verimli kumaş yapılarında basınç farkları da yüksek olduğundan bu numunelerden düşük Kn ve kalite faktörü değerleri elde edildi. Bu sonuçlar neticesinde bimodal yapıların kumaşların filtre performansını olumlu yönde iyileştirdiği açık bir şekilde görüldü.

4.6. Mekanik Performans

SB yöntemi ile üretilen kumaşların mekanik dayanımları CS ile üretilen kumaşlara kıyasla çok düşük oldu. Bu durum CS yöntemi ile daha kalın çaplı liflerin elde edilmesinden kaynaklandı. Aynı zamanda yüksek viskoziteli PA6 çözeltileri ile SB ya da CS yöntemleri kullanılarak üretilen filtre kumaşlarından düşük viskoziteli PA6 çözeltisi ile üretilen nanolifli filtre kumaşlarına kıyasla çok daha yüksek çekme mukavemeti değerleri elde edildi. Bölüm 1’de üretilen bimodal filtre kumaşı (SB-B 3) mikrolifli kumaştan (SB-B 2) daha düşük mekanik dayanıma sahip olsa da Bölüm 3’te üretilen bimodal filtre kumaşı (CSB-B 3) tüm numunelerden daha fazla mekanik dayanıma sahip oldu. Tüm çalışmalar neticesinde kumaş kalınlığının mekanik mukavemeti etkileyen en etkin parametre olduğu görüldü.

5. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Filtre uygulamalarında kullanılan filtre kumaşlarının özellikle maske yapımında kullanılacak olan kumaşların rahat nefes alabilirlik için düşük basınç farkına ve yüksek filtreleme özelliklerine sahip olmaları gerekmektedir. Bu tez kapsamında yapılan bimodal filtre kumaşı üretimi çalışmaları neticesinde üretilmiş nano- ve mikroliflerden oluşan bimodal yapının, yüksek filtre verimi sağlayarak havanın filtre kumaşından çok rahat bir şekilde geçmesini sağladığı bu sayede filtre kumaşının sahip olacağı basınç farkı değerini oldukça düşürdüğü görüldü. Aynı zamanda yapıdaki mikrolifler sayesinde kumaşın mekanik mukavemetinin arttığı raporlandı.

Bu tez çalışması ile yalnızca SB nanolif üretim yönteminin kullanılması ve hem SB hem de CS nanolif üretim sistemlerinin kombinlenmesi ile elde edilen hibrit bir üretim sistemi kullanılarak bimodal yapıların üretimlerinin mümkün olduğu kanıtlandı.

Deneylerde kullanılan farklı çözelti konsantrasyonlarının, iğne çaplarının ve diğer sistem parametrelerinin bimodal yapıların oluşturulmasında önemli rol oynadıkları görüldü.

EN 143 ve EN 149 standartlarına göre yüz maskelerinde kullanılacak bir filtreleme yüzeyinin 30 l/dk'daki soluk alma dirençleri FFP1 için 0,6 mbar, FFP2 için 0,7 mbar ve FFP3 için 1 mbar; 95 l/dk'daki soluk alma dirençleri ise FFP1 için 2,1 mbar, FFP2 için 2,4 mbar ve FFP3 için 3 mbar'dır. Maskelerin 160 l/dk'daki soluk verme dirençleri de FFP1, FFP2 ve FFP3 için 3 mbar'dır. Ayrıca tıkanmadan sonra, 95 l/dk'daki sürekli akışta soluk alma ve verme dirençleri, FFP1 için 3 mbar, FFP2 için 4 mbar ve FFP3 için 5 mbar değerlerini geçmemelidir(Standards, t.y.). Bu tez çalışması neticesinde Bölüm 1 ve Bölüm 3'te elde edilen unimodal ve bimodal filtre kumaşları ile FFP2 ve FFP3 seviyelerinde hatta daha düşük basınç farkı değerleri sayesinde daha yüksek kaliteli filtre kumaşları elde edildi. Böylece tez çalışması sonunda mekanik dayanımı yüksek, kaliteli bimodal filtre kumaşlarının üretimi sağlanmış oldu.



6. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında iki ayrı nanolif üretim yöntemi kullanıldı. Biri çözüldiden üflemlili nanolif üretim (SB) yöntemidir. Bu yöntem ile yapılan üretimlerde yüksek filtre verimine sahip üretimler elde edildi. Bir diğeri yöntem olan santrifüj kuvvetleri ile nanolif üretim (CS) yöntemiyle SB yönteminin birlikte kombinlenmesi ile oluşturulan hibrit üretim yöntemi kullanılarak yapılan bimodal çalışmada yüksek filtre verimine ve mekanik dayanıma sahip numuneler elde edildi. Bu tez ile elde edilen bimodal filtre kumaşlarına yapılan analizler neticesinde bu yapıların filtre uygulama alanları için uygun olduğu ispatlandı. Fakat sadece CS yöntemi ile yapılan çalışmada çok ince lif çaplarına inilemediğinden ve elde edilen lifli kumaşların daha düzenli lif dizilimine ve dolayısı ile büyük gözeneklere sahip olmasından dolayı yapılan bimodal üretimlerde istenilen filtre verimi değerlerine ulaşılamadı. Bu çalışma için farklı lif toplama yüzeyleri ve farklı nozullar kullanılarak dağınık lif yüzeyinin elde edilmesi için denemeler yapılabilir. Aynı zamanda daha ince (100 nm ve altı) liflerin üretilmesi için daha düşük viskoziteli PA6 çözüldileri ile daha yüksek hızlarda (10000 rpm ve üstü) dönebilen motora sahip CS yöntemi kullanılarak üretimler yapılabilir.

6.1. Çalışmanın Uygulama Alanı

Bu tez kapsamında Çözüldiden üflemlili nanolif üretim yöntemi kullanılarak farklı çözüldi konsantrasyonlarının bir arada kullanılması ile üretilen bimodal filtre kumaşları ve Çözüldiden üflemlili nanolif üretim yöntemi ve santrifüj nanolif eğirme yönteminin bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit sistem ile üretilen dayanıklı bimodal filtre kumaşları HEPA, ULPA ve diğeri filtre elemanlarında kullanılabilir. Özellikle üretilen bu kumaşlar FFP2 ve FFP3 seviyelerinde filtre verimi ve basınç değerlerine sahip olduğundan N95 ve üstü yüz maskelerinin üretimlerinde de kullanılabilirler.



KAYNAKLAR

- Agarwal, S., Wendorff, J. H., & Greiner, A. (2008). Use of electrospinning technique for biomedical applications. *Polymer*, 49(26), 5603-5621. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.09.014>
- Air pollution*. (t.y.). Geliş tarihi 31 Mart 2021, gönderen <https://www.who.int/news-room/air-pollution>
- Almetwally, A. A., El-Sakhawy, M., Elshakankery, M., & Kasem, M. H. (2017). Technology of nano-fibers: Production techniques and properties - Critical review. *Journal of the Textile Association*, 78, 5-14.
- Amalorpava Mary, L. (2013). Centrifugal spun ultrafine fibrous web as a potential drug delivery vehicle. *Express Polymer Letters*, 7, 238-248. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2013.22>
- Aslan, S., & Kaplan, S. (2010). FİLTRASYON TEKSTİLLERİ: KULLANILAN HAMMADDELER, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE KULLANIM ALANLARI. *Tekstil ve Mühendis*, 17(79). <https://dergipark.org.tr/pub/tekstuh/156041>
- Balagangadharan, K., Dhivya, S., & Selvamurugan, N. (2017). Chitosan based nanofibers in bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 1372-1382. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.12.046>
- Barhate, R. S., & Ramakrishna, S. (2007). Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of Membrane Science*, 296(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.03.038>
- Baumgarten, P. K. (1971). Electrostatic spinning of acrylic microfibers. *Journal of Colloid and Interface Science*, 36(1), 71-79. [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(71\)90241-4](https://doi.org/10.1016/0021-9797(71)90241-4)
- Bulejko, P. (2018). Numerical Comparison of Prediction Models for Aerosol Filtration Efficiency Applied on a Hollow-Fiber Membrane Pore Structure. *Nanomaterials*, 8(6), 447. <https://doi.org/10.3390/nano8060447>
- Chang, D.-Q., Chen, S.-C., Fox, A. R., Viner, A. S., & Pui, D. Y. H. (2015). Penetration of Sub-50 nm Nanoparticles Through Electret HVAC Filters Used in Residence. *Aerosol Science and Technology*, 49(10), 966-976. <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1086723>
- Choi, H.-J., Kumita, M., Hayashi, S., Yuasa, H., Kamiyama, M., Seto, T., Tsai, C.-J., & Otani, Y. (2017). Filtration Properties of Nanofiber/Microfiber Mixed Filter and Prediction of its Performance. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(4), 1052-1062. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.06.0256>
- Choong, L. T., Mannarino, M. M., Basu, S., & Rutledge, G. C. (2013). Compressibility of electrospun fiber mats. *Journal of Materials Science*, 48(22), 7827-7836. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7528-x>

- Daristotle, J. L., Behrens, A. M., Sandler, A. D., & Kofinas, P. (2016). A Review of the Fundamental Principles and Applications of Solution Blow Spinning. *ACS applied materials & interfaces*, 8(51), 34951-34963. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12994>
- Dehghan, S. F., Golbaaei, F., Maddah, B., Yarahmadi, R., & Zadeh, A. S. (2015). Experimental Investigations on Electrospun Mat Production: For Use in High-Performance Air Filters. *International Journal of Occupational Hygiene*, 7(3), 110-118. <https://ijoh.tums.ac.ir/index.php/ijoh/article/view/121>
- Deitzel, J. M., Kleinmeyer, J. D., Hirvonen, J. K., & Beck Tan, N. C. (2001). Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide) fibers. *Polymer*, 42(19), 8163-8170. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00336-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00336-6)
- Deitzel, J. M., Kleinmeyer, J., Harris, D., & Beck Tan, N. C. (2001). The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer*, 42(1), 261-272. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00250-0](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00250-0)
- Deng, L., Zhang, P., Zhang, W., Zhu, R., & Yan, Y. (2019). High filtration efficiency fluffy material: Nano-fiber constructing gradient structure on recycled curved PET micro-fibers web. *SN Applied Sciences*, 1(2), 190. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0209-x>
- Deng, N., He, H., Yan, J., Zhao, Y., Ben Ticha, E., Liu, Y., Kang, W., & Cheng, B. (2019). One-step melt-blowing of multi-scale micro/nano fabric membrane for advanced air-filtration. *Polymer*, 165, 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.01.035>
- Du, Y., Xu, X., Chu, M., Guo, Y., & Wang, J. (2016). Air particulate matter and cardiovascular disease: The epidemiological, biomedical and clinical evidence. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E8-E19. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37>
- Eda, G., Liu, J., & Shivkumar, S. (2007). Solvent effects on jet evolution during electrospinning of semi-dilute polystyrene solutions. *European Polymer Journal*, 43(4), 1154-1167. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.01.003>
- El Morabet, R. (2019). Effects of Outdoor Air Pollution on Human Health. İçinde J. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)* (ss. 278-286). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11509-X>
- ElDefrawy, N. M. H., & Shaalan, H. F. (2007). Integrated membrane solutions for green textile industries. *Desalination*, 204(1-3), 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.542>
- Erben, J., Jencova, V., Chvojka, J., Blazkova, L., Strnadova, K., Modrak, M., & Kostakova, E. K. (2016). The combination of meltblown technology and electrospinning – The influence of the ratio of micro and nanofibers on cell viability. *Materials Letters*, 173, 153-157. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.02.147>
- Erben, J., Pilarova, K., Sanetnik, F., Chvojka, J., Jencova, V., Blazkova, L., Havlicek, J., Novak, O., Mikes, P., Prosecka, E., Lukas, D., & Kuzelova Kostakova, E. (2015). The combination of meltblown and electrospinning for

- bone tissue engineering. *Materials Letters*, *143*, 172-176. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.12.100>
- Feng, X., Ma, F., Zhao, H., Liu, G., & Guo, J. (2019). Gas Multiple Flow Mechanisms and Apparent Permeability Evaluation in Shale Reservoirs. *Sustainability*, *11*, 2114. <https://doi.org/10.3390/su11072114>
- Fong, H., Chun, I., & Reneker, D. H. (1999). Beaded nanofibers formed during electrospinning. *Polymer*, *40*(16), 4585-4592. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00068-3)
- Fotovati, S., Vahedi Tafreshi, H., Ashari, A., Hosseini, S. A., & Pourdeyhimi, B. (2010). Analytical expressions for predicting capture efficiency of bimodal fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*, *41*(3), 295-305. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.01.002>
- Fox, A. R., Stelter, J. D., Angadjivand, S. A., Lindquist, T. J., Brandner, J. M., & Springett, J. E. (2010). *Pleated filter with bimodal monolayer monocomponent media* (United States Patent Sy US7754041B2). <https://patents.google.com/patent/US7754041B2/en>
- Friedlander, S. K. (1958). Theory of Aerosol Filtration. *Industrial & Engineering Chemistry*, *50*(8), 1161-1164. <https://doi.org/10.1021/ie50584a036>
- Galka, N., & Saxena, A. (2009). High efficiency air filtration: The growing impact of membranes. *Filtration & Separation*, *46*(4), 22-25. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(09\)70157-0](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(09)70157-0)
- Gentsch, R., Boysen, B., Lankenau, A., & Börner, H. G. (2010). Single-Step Electrospinning of Bimodal Fiber Meshes for Ease of Cellular Infiltration. *Macromolecular Rapid Communications*, *31*(1), 59-64. <https://doi.org/10.1002/marc.200900431>
- Gopal, R., Kaur, S., Ma, Z., Chan, C., Ramakrishna, S., & Matsuura, T. (2006). Electrospun nanofibrous filtration membrane. *Journal of Membrane Science*, *281*(1), 581-586. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.04.026>
- Greenhalgh, R. D., Ambler, W. S., Quinn, S. J., Medeiros, E. S., Anderson, M., Gore, B., Menner, A., Bismarck, A., Li, X., Tirelli, N., & Blaker, J. J. (2017). Hybrid sol-gel inorganic/gelatin porous fibres via solution blow spinning. *Journal of Materials Science*, *52*(15), 9066-9081. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0868-1>
- Gundogdu, N. A. S., Akgul, Y., & Kilic, A. (2018). Optimization of centrifugally spun thermoplastic polyurethane nanofibers for air filtration applications. *Aerosol Science and Technology*, *52*(5), 515-523. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1433813>
- Haider, A., Haider, S., & Kang, I.-K. (2018). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*, *11*(8), 1165-1188. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015>
- He, M., Ichinose, T., Kobayashi, M., Arashidani, K., Yoshida, S., Nishikawa, M., Takano, H., Sun, G., & Shibamoto, T. (2016). Differences in allergic inflammatory responses between urban PM2.5 and fine particle derived from

- desert-dust in murine lungs. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 297, 41-55. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2016.02.017>
- Hiremath, N., & Bhat, G. (2015). Melt blown Polymeric Nanofibers for Medical Applications- An Overview. *Nanoscience & Technology Open Access*, 2(1). <http://www.symbiosisonlinepublishing.com/nanoscience-technology/nanoscience-technology25.php>
- Huang, J., Liu, Q., & Guo, X. (2019). Short-Term Effects of Particulate Air Pollution on Human Health☆. İçinde J. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)* (ss. 655-662). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10991-1>
- Hung, C.-H., & Leung, W. W.-F. (2011). Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Separation and Purification Technology*, 79(1), 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.008>
- Jenkins, P. L., Phillips, T. J., Mulberg, E. J., & Hui, S. P. (1992). Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources. *Atmospheric Environment*, 26, 2141-2148. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90402-7](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90402-7)
- Jenko Pražnikar, Z., & Pražnikar, J. (2012). The effects of particulate matter air pollution on respiratory health and on the cardiovascular system. *ZDRAVSTVENO VARSTVO*, 51, 190-199. <https://doi.org/10.2478/v10152-012-0022-z>
- Jiang, H., Ge, Y., Fu, K., Lu, Y., Chen, C., Zhu, J., Dirican, M., & Zhang, X. (2015). Centrifugally-spun tin-containing carbon nanofibers as anode material for lithium-ion batteries. *Journal of Materials Science*, 50(3), 1094-1102. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8666-5>
- Jin, K., Eyer, S., Dean, W., Kitto, D., Bates, F. S., & Ellison, C. J. (2020). Bimodal Nanofiber and Microfiber Nonwovens by Melt-Blowing Immiscible Ternary Polymer Blends. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(12), 5238-5246. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b04887>
- Khansari, S., Sinha-Ray, S., Yarin, A. L., & Pourdeyhimi, B. (2012). Stress-strain dependence for soy-protein nanofiber mats. *Journal of Applied Physics*, 111(4), 044906.
- Kilic, A., Shim, E., & Pourdeyhimi, B. (2015). Electrostatic Capture Efficiency Enhancement of Polypropylene Electret Filters with Barium Titanate. *Aerosol Science and Technology*, 49(8), 666-673. <https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1061649>
- Kimmer, D., Vincent, I., Sambaer, W., Zatloukal, M., & Ondracek, J. (2015). *The effect of combination electrospun and meltblown filtration materials on their filtration efficiency*. 1662, 050001. <https://doi.org/10.1063/1.4918896>
- Km, R., & L, S. (2017). Fabrication Techniques of Micro/Nano Fibres based Nonwoven Composites: A Review. *Modern Chemistry & Applications*, 05(02). <https://doi.org/10.4172/2329-6798.1000206>
- Kurtoğlu, A. H., & Karataş, A. (2009). *Yara Tedavisinde Güncel Yaklaşımlar: Modern Yara Örtüleri*. 38, 22.

- Lauricella, M., Succi, S., Zussman, E., Pisignano, D., & Yarin, A. L. (2020). Models of polymer solutions in electrified jets and solution blowing. *Reviews of Modern Physics*, 92(3), 035004. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.035004>
- Lee, K. H., Kim, H. Y., Bang, H. J., Jung, Y. H., & Lee, S. G. (2003). The change of bead morphology formed on electrospun polystyrene fibers. *Polymer*, 44(14), 4029-4034. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00345-8)
- Leung, W. W.-F., & Choy, H.-F. (2018). Transition from depth to surface filtration for a low-skin effect filter subject to continuous loading of nano-aerosols. *Separation and Purification Technology*, 190, 202-210.
- Leung, W. W.-F., Hau, C. W.-Y., & Choy, H.-F. (2018). Microfiber-nanofiber composite filter for high-efficiency and low pressure drop under nano-aerosol loading. *Separation and Purification Technology*, 206, 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.033>
- Leung, W. W.-F., Hung, C.-H., & Yuen, P.-T. (2010). Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. *Separation and Purification Technology*, 71(1), 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.10.017>
- Li, L., Kang, W., Zhuang, X., Shi, J., Zhao, Y., & Cheng, B. (2015). A comparative study of alumina fibers prepared by electro-blown spinning (EBS) and solution blowing spinning (SBS). *Materials Letters*, 160, 533-536. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.08.016>
- Li, P., Wang, C., Zhang, Y., & Wei, F. (2014). Air filtration in the free molecular flow regime: A review of high-efficiency particulate air filters based on carbon nanotubes. *Small (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 10(22), 4543-4561. <https://doi.org/10.1002/sml.201401553>
- Li, Z., Kang, W., Zhao, H., Hu, M., Ju, J., Deng, N., & Cheng, B. (2016). Fabrication of a polyvinylidene fluoride tree-like nanofiber web for ultra high performance air filtration. *RSC Advances*, 6(94), 91243-91249. <https://doi.org/10.1039/C6RA17097H>
- Liu, F., Avena-Bustillos, R. J., Bilbao-Sainz, C., Woods, R., Chiou, B.-S., Wood, D., Williams, T., Yokoyama, W., Glenn, G. M., McHugh, T. H., & Zhong, F. (2017). Solution Blow Spinning of Food-Grade Gelatin Nanofibers. *Journal of Food Science*, 82(6), 1402-1411. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13710>
- Liu, Y., Wen, J., Chen, B., Zheng, M., Liu, D., Liu, Y., Tang, W., Liu, J., Nan, D., & Wang, Z. L. (2020). Electro-blown spinning driven by cylindrical rotating triboelectric nanogenerator and its applications for fabricating nanofibers. *Applied Materials Today*, 19, 100631. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100631>
- Loordhuswamy, A. M., Krishnaswamy, V. R., Korrapati, P. S., Thinakaran, S., & Rengaswami, G. D. V. (2014). Fabrication of highly aligned fibrous scaffolds for tissue regeneration by centrifugal spinning technology. *Materials Science & Engineering. C, Materials for Biological Applications*, 42, 799-807. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.06.011>

- Lozano, K., & Sarkar, K. (2009). *Superfine Fiber Creating Spinneret and Uses Thereof* (Patent Sy 009/0232920 A1).
- Lu, Y., Li, Y., Zhang, S., Xu, G., Fu, K., Lee, H., & Zhang, X. (2013). Parameter study and characterization for polyacrylonitrile nanofibers fabricated via centrifugal spinning process. *European Polymer Journal*, 49(12), 3834-3845. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.09.017>
- Matulevicius, J., Kliucininkas, L., Martuzevicius, D., Krugly, E., Tichonovas, M., & Baltrusaitis, J. (2014). Design and Characterization of Electrospun Polyamide Nanofiber Media for Air Filtration Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2014, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2014/859656>
- Medeiros, E. S., Glenn, G. M., Klamczynski, A. P., Orts, W. J., & Mattoso, L. H. (2009). Solution blow spinning: A new method to produce micro-and nanofibers from polymer solutions. *Journal of applied polymer science*, 113(4), 2322-2330.
- Melike, G., Calisir, M. D., Akgul, Y., Selcuk, S., Ali, D., & Kilic, A. (2019). Submicron aerosol filtration performance of centrifugally spun nanofibrous polyvinylpyrrolidone media. *Journal of Industrial Textiles*, 1528083719865041. <https://doi.org/10.1177/1528083719865041>
- Mikheev, A. Y., Shlyapnikov, Y. M., Kanev, I. L., Avseenko, A. V., & Morozov, V. N. (2016). Filtering and optical properties of free standing electrospun nanomats from nylon-4,6. *European Polymer Journal*, 75, 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.01.001>
- Mikulášek, P., & Cuhorka, J. (2017). Application of nanofibrous membranes and their suitability for membrane bioreactor processes in wastewater treatment. *İçinde Fibrous Filter Media* (ss. 275-290). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100573-6.00012-5>
- Naeimirad, M., Zadhoush, A., Kotek, R., Neisiany, R. E., Khorasani, S. N., & Ramakrishna, S. (2018). Recent advances in core/shell bicomponent fibers and nanofibers: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(21), 46265. <https://doi.org/10.1002/app.46265>
- Nayak, R., Padhye, R., Kyratzis, I. L., Truong, Y. B., & Arnold, L. (2012). Recent advances in nanofibre fabrication techniques. *Textile Research Journal*, 82(2), 129-147. <https://doi.org/10.1177/0040517511424524>
- November 01, & Mackenzie, 2016 Jillian. (t.y.). *Air Pollution: Everything You Need to Know*. NRDC. Geliş tarihi 01 Nisan 2021, gönderen <https://www.nrdc.org/stories/air-pollution-everything-you-need-know>
- Oh, H. J., Bae, J. H., Park, Y. K., Song, J., Kim, D. K., Lee, W., Kim, M., Heo, K. J., Kim, Y., Kim, S. H., Yeang, B. J., & Lim, S. J. (2020). A Highly Porous Nonwoven Thermoplastic Polyurethane/Polypropylene-Based Triboelectric Nanogenerator for Energy Harvesting by Human Walking. *Polymers*, 12(5), 1044. <https://doi.org/10.3390/polym12051044>
- Oliveira, J. E., Moraes, E. A., Costa, R. G., Afonso, A. S., Mattoso, L. H., Orts, W. J., & Medeiros, E. S. (2011). Nano and submicrometric fibers of poly (D, L-lactide) obtained by solution blow spinning: Process and solution variables. *Journal of Applied Polymer Science*, 122(5), 3396-3405.

- Pant, H. R., Park, C. H., Tijing, L. D., Amarjargal, A., Lee, D.-H., & Kim, C. S. (2012). Bimodal fiber diameter distributed graphene oxide/nylon-6 composite nanofibrous mats via electrospinning. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 407, 121-125. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.05.018>
- Polat, Y., Pampal, E. S., Stojanovska, E., Simsek, R., Hassanin, A., Kilic, A., Demir, A., & Yilmaz, S. (2016). Solution blowing of thermoplastic polyurethane nanofibers: A facile method to produce flexible porous materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(9), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/app.43025>
- Polat, Y., Yangaz, M., Calisir, M., Gül, M., Demir, A., Ekici, B., & Kılıç, A. (2020). *Effect of air pressure on nanofiber production in solution blowing method*. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.470850>
- Przekop, R., & Gradoń, L. (2008). Deposition and Filtration of Nanoparticles in the Composites of Nano- and Microsized Fibers. *Aerosol Science and Technology*, 42(6), 483-493. <https://doi.org/10.1080/02786820802187077>
- Qi, Q., & Zhu, W. (2018). The three-zone composite productivity model for a multi-fractured horizontal shale gas well. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121, 052051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/5/052051>
- Qin, S., Wang, Y., Wu, X., Zhang, X., Zhu, Y., Yu, N., Zhang, Y., & Wu, Y. (2020). Nylon-Based Composite Gel Membrane Fabricated via Sequential Layer-By-Layer Electrospinning for Rechargeable Lithium Batteries with High Performance. *Polymers*, 12(7), 1572. <https://doi.org/10.3390/polym12071572>
- Rai, A. A., Stojanovska, E., Fidan, G., Yetgin, E., Polat, Y., Kilic, A., Demir, A., & Yilmaz, S. (2020). Structure and performance of electroblown PVDF-based nanofibrous electret filters. *Polymer Engineering & Science*, 60(6), 1186-1193. <https://doi.org/10.1002/pen.25372>
- Ranganathan, S., Balagangadharan, K., & Selvamurugan, N. (2019). Chitosan and gelatin-based electrospun fibers for bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 354-364. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.115>
- Robb, B., & Lennox, B. (2011). 3—The electrospinning process, conditions and control. İçinde L. A. Bosworth & S. Downes (Ed.), *Electrospinning for Tissue Regeneration* (ss. 51-66). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857092915.1.51>
- Rogalski, J. J., Bastiaansen, C. W. M., & Peijs, T. (2018). PA6 Nanofibre Production: A Comparison between Rotary Jet Spinning and Electrospinning. *Fibers*, 6(2), 37. <https://doi.org/10.3390/fib6020037>
- Rogoff, M. J., & Screve, F. (2011). Chapter 8—Permitting issues. İçinde M. J. Rogoff & F. Screve (Ed.), *Waste-to-Energy (Second Edition)* (ss. 89-116). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7871-7.10008-5>
- SalehHudin, H. S., Mohamad, E. N., Mahadi, W. N. L., & Afifi, A. M. (2018). Multiple-jet electrospinning methods for nanofiber processing: A review.

- Materials and Manufacturing Processes*, 33(5), 479-498.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1388523>
- Sebe, I., Kállai-Szabó, B., Kovács, K. N., Szabadi, E., & Zelkó, R. (2015). Micro- and macrostructural characterization of polyvinylpyrrolidone rotary-spun fibers. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 41(11), 1829-1834.
<https://doi.org/10.3109/03639045.2015.1013967>
- Shahabadi, S. M. S., Kheradmand, A., Montazeri, V., & Ziaee, H. (2015). Effects of process and ambient parameters on diameter and morphology of electrospun polyacrylonitrile nanofibers. *Polymer Science Series A*, 57(2), 155-167.
<https://doi.org/10.1134/S0965545X15020157>
- Shi, L., Zhuang, X., Tao, X., Cheng, B., & Kang, W. (2013). Solution blowing nylon 6 nanofiber mats for air filtration. *Fibers and Polymers*, 14(9), 1485-1490.
<https://doi.org/10.1007/s12221-013-1485-5>
- Shoeib, M., Harner, T., Wilford, B. H., Jones, K. C., & Zhu, J. (2005). Perfluorinated Sulfonamides in Indoor and Outdoor Air and Indoor Dust: Occurrence, Partitioning, and Human Exposure. *Environmental Science & Technology*, 39(17), 6599-6606. <https://doi.org/10.1021/es048340y>
- Sinha-Ray, S., Zhang, Y., Yarin, A. L., Davis, S. C., & Pourdeyhimi, B. (2011). Solution blowing of soy protein fibers. *Biomacromolecules*, 12(6), 2357-2363.
- Sinha-Ray, Suman, Lee, M. W., Sinha-Ray, S., An, S., Pourdeyhimi, B., Yoon, S. S., & Yarin, A. L. (2013). Supersonic nanoblowing: A new ultra-stiff phase of nylon 6 in 20–50 nm confinement. *Journal of Materials Chemistry C*, 1(21), 3491. <https://doi.org/10.1039/c3tc30248b>
- Standards, E. (t.y.). *UNE EN 143:2021 Respiratory protective devices—Particle filters—Requirements, testing, marking (Endorsed by Asociación Española de Normalización in April of 2021.)*. <https://www.en-standard.eu>. Geliş tarihi 25 Mayıs 2021, gönderen <https://www.en-standard.eu/une-en-143-2021-respiratory-protective-devices-particle-filters-requirements-testing-marking-endorsed-by-asociacion-española-de-normalizacion-in-april-of-2021/>
- Stojanovska, E., Kurtulus, M., Abdelgawad, A., Candan, Z., & Kilic, A. (2018). Developing lignin-based bio-nanofibers by centrifugal spinning technique. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 98-105.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.047>
- Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S., & Ramkumar, S. S. (2005). Electrospinning of nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 96(2), 557-569. <https://doi.org/10.1002/app.21481>
- Supaphol, P., Mit-Uppatham, C., & Nithitanakul, M. (2005). Ultrafine electrospun polyamide-6 fibers: Effect of emitting electrode polarity on morphology and average fiber diameter. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 43(24), 3699-3712. <https://doi.org/10.1002/polb.20671>
- Sutherland, K. (2003). *Profile of the International Membrane Industry—Market Prospects to 2008*. Elsevier.

- Tao, J., & Shivkumar, S. (2007). Molecular weight dependent structural regimes during the electrospinning of PVA. *Materials Letters*, *61*(11), 2325-2328. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.09.004>
- Tepekiran, B. N., Calisir, M. D., Polat, Y., Akgul, Y., & Kilic, A. (2019). Centrifugally spun silica (SiO₂) nanofibers for high-temperature air filtration. *Aerosol Science and Technology*, *53*(8), 921-932. <https://doi.org/10.1080/02786826.2019.1613514>
- Ukaogo, P. O., Ewuzie, U., & Onwuka, C. V. (2020). 21 - Environmental pollution: Causes, effects, and the remedies. İçinde P. Chowdhary, A. Raj, D. Verma, & Y. Akhter (Ed.), *Microorganisms for Sustainable Environment and Health* (ss. 419-429). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8>
- Upson, S. J., O'Haire, T., Russell, S. J., Dalgarno, K., & Ferreira, A. M. (2017). Centrifugally spun PHBV micro and nanofibres. *Materials Science and Engineering: C*, *76*, 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.101>
- Vahedi Tafreshi, H., A Rahman, M. S., Jaganathan, S., Wang, Q., & Pourdeyhimi, B. (2009). Analytical expressions for predicting permeability of bimodal fibrous porous media. *Chemical Engineering Science*, *64*(6), 1154-1159. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.11.013>
- Velu, Y. K., Givens, S. R., & Guckert, J. R. (2012). *High porosity high basis weight filter media* (World Intellectual Property Organization Patent Sy WO2012088205A1). <https://patents.google.com/patent/WO2012088205A1/en>
- Walker, G. S. (2012). 3.42—Sample Preparation for Chromatographic Applications in Forensic Science. İçinde J. Pawliszyn (Ed.), *Comprehensive Sampling and Sample Preparation* (ss. 863-876). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00120-4>
- Wang, C., & Otani, Y. (2013). Removal of Nanoparticles from Gas Streams by Fibrous Filters: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *52*(1), 5-17. <https://doi.org/10.1021/ie300574m>
- Wang, C.-S. (2001). Electrostatic forces in fibrous filters—A review. *Powder Technology*, *118*(1), 166-170. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00307-2](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00307-2)
- Wang, J., Kim, S. C., & Pui, D. Y. H. (2008). Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on a substrate. *Journal of Aerosol Science*, *39*(4), 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.12.003>
- Wang, L., Chang, M.-W., Ahmad, Z., Zheng, H., & Li, J.-S. (2017). Mass and controlled fabrication of aligned PVP fibers for matrix type antibiotic drug delivery systems. *Chemical Engineering Journal*, *307*, 661-669. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.135>
- WarrenMay. 2, M., 2018, & Pm, 12:20. (2018, Mayıs 2). *Nine in 10 people around the world breathe polluted air*. Science | AAAS. <https://www.sciencemag.org/news/2018/05/nine-10-people-around-world-breathe-polluted-air>
- Yadav, I. C., & Devi, N. L. (2019). Biomass Burning, Regional Air Quality, and Climate Change. İçinde J. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental*

- Health (Second Edition)* (ss. 386-391). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11022-X>
- Yang, G., Li, X., He, Y., Ma, J., Ni, G., & Zhou, S. (2018). From nano to micro to macro: Electrospun hierarchically structured polymeric fibers for biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, *81*, 80-113. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.12.003>
- Yee, W. A., Kotaki, M., Liu, Y., & Lu, X. (2007). Morphology, polymorphism behavior and molecular orientation of electrospun poly(vinylidene fluoride) fibers. *Polymer*, *48*(2), 512-521. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.11.036>
- Yeom, B. Y., & Pourdeyhimi, B. (2011). Aerosol filtration properties of PA6/PE islands-in-the-sea bicomponent spunbond web fibrillated by high-pressure water jets. *Journal of Materials Science*, *46*(17), 5761-5767. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5531-7>
- Yeom, B. Y., Shim, E., & Pourdeyhimi, B. (2010). Boehmite nanoparticles incorporated electrospun nylon-6 nanofiber web for new electret filter media. *Macromolecular Research*, *18*(9), 884-890. <https://doi.org/10.1007/s13233-010-0910-5>
- Yoon, J. W., Park, Y., Kim, J., & Park, C. H. (2017). Multi-jet electrospinning of polystyrene/polyamide 6 blend: Thermal and mechanical properties. *Fashion and Textiles*, *4*(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40691-017-0090-4>
- Yuan, H., Zhou, Q., & Zhang, Y. (2017). Improving fiber alignment during electrospinning. İçinde *Electrospun Nanofibers* (ss. 125-147). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100907-9.00006-4>
- Yuan, Y., & Rahman, S. (2016). Extended application of lattice Boltzmann method to rarefied gas flow in micro-channels. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *463*, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.06.123>
- Zhang, L., Kopperstad, P., West, M., Hedin, N., & Fong, H. (2009). Generation of polymer ultrafine fibers through solution (air-) blowing. *Journal of applied polymer science*, *114*(6), 3479-3486.
- Zhang, Q., Welch, J., Park, H., Wu, C.-Y., Sigmund, W., & Marijnissen, J. C. (2010). Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. *Journal of Aerosol Science*, *41*(2), 230-236.
- Zhang, S., Tang, N., Cao, L., Yin, X., Yu, J., & Ding, B. (2016). Highly Integrated Polysulfone/Polyacrylonitrile/Polyamide-6 Air Filter for Multilevel Physical Sieving Airborne Particles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *8*(42), 29062-29072. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b10094>
- Zhang, X., & Lu, Y. (2014). Centrifugal Spinning: An Alternative Approach to Fabricate Nanofibers at High Speed and Low Cost. *Polymer Reviews*, *54*(4), 677-701. <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.935858>
- Zhao, X., Wang, S., Yin, X., Yu, J., & Ding, B. (2016). Slip-Effect Functional Air Filter for Efficient Purification of PM2.5. *Scientific Reports*, *6*, 35472. <https://doi.org/10.1038/srep35472>

- Zhmayev, Y., Divvela, M. J., Ruo, A.-C., Huang, T., & Joo, Y. L. (2015). The jetting behavior of viscoelastic Boger fluids during centrifugal spinning. *Physics of Fluids*, 27, 123101. <https://doi.org/10.1063/1.4936391>
- Zhou, Q., Bao, M., Yuan, H., Zhao, S., Dong, W., & Zhang, Y. (2013). Implication of stable jet length in electrospinning for collecting well-aligned ultrafine PLLA fibers. *Polymer*, 54(25), 6867-6876. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.10.042>
- Zhou, X., Li, L., Li, Z., Fan, L., Kang, W., & Cheng, B. (2017). The preparation of continuous CeO₂/CuO/Al₂O₃ ultrafine fibers by electro-blowing spinning (EBS) and its photocatalytic activity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(17), 12580-12590. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7082-4>
- Zhou, Z., Lai, C., Zhang, L., Qian, Y., Hou, H., Reneker, D. H., & Fong, H. (2009). Development of carbon nanofibers from aligned electrospun polyacrylonitrile nanofiber bundles and characterization of their microstructural, electrical, and mechanical properties. *Polymer*, 50(13), 2999-3006. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2009.04.058>
- Zhuang, X., Yang, X., Shi, L., Cheng, B., Guan, K., & Kang, W. (2012). Solution blowing of submicron-scale cellulose fibers. *Carbohydrate polymers*, 90(2), 982-987.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Melike GÜNGÖR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013-2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Tekstil Teknolojileri ve Tasarım Fakültesi, Tekstil Mühendisliği
- **Yüksek lisans** :2019-2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Tekstil Teknolojileri ve Tasarım Fakültesi, Tekstil Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016-2021 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi TEMAG Laboratuvarları'nda Araştırmacı olarak çalıştı.
- 2018-2020 yılları arasında İSTKA destekli MediTek: Medikal Tekstiller Ar-Ge Merkezi Projesinde Proje Koordinatörlüğü yaptı.
- 2020-2021 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesinde yapmış olduğu Yüksek Lisans programı boyunca TÜBİTAK destekli 118M035 Numaralı Endüstriyel Boyutta Nanolif Üretimi İçin Çözümlenmiş Üfleme Sisteminin Tasarımı, Simülasyonu ve İmalatı projesinde bursiyer olarak görev aldı.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Gungor, M., Calisir, M., Akgul, Y., Selcuk, S., Demir, A., Kilic, A., (2019). Submicron aerosol filtration performance of centrifugally spun nanofibrous polyvinylpyrrolidone media. Journal of Industrial Textiles, 1528083719888674.
- Polat, Y., Calisir, M., Gungor, M., Sagirli, M. N., Atakan, R., Akgul, Y., ... & Kiliç, A. (2019). Solution blown nanofibrous air filters modified with glass microparticles. Journal of Industrial Textiles, 1528083719888674.

- M. D. Calisir, M. Gungor, A. Demir, A. Kilic, and M. M. Khan, “Nitrogen-doped TiO₂ fibers for visible-light-induced photocatalytic activities,” *Ceramics International*, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.03.250.
- Solvent Engineering for the Centrifugal Spinning of Polyvinylpyrrolidone (PVP) Nanofibers, 14. Nanobilim ve Nano Teknoloji Konferansı, Istanbul, Turkey, September 22-25, 2018.
- Tasdelen Yuucedag, C., Canbay Gokce, E., Gungor, M., Sagirli, M.N., Kilic, A. (2019). Yara Örtüsü Uygulamaları için Jelatin CMC Köpük Üretimi, International Fiber and Polymer Research Symposium, Istanbul, Turkey, May 2-3, 2019. (Proceedings pp. 5-7).
- CALISIR, Mehmet, GUNGOR, Melike, AKGUL, Yasin, POLAT, Yusuf , KILIC, Ali, (2019). Effect of Pressurized Air on Fiber Production and the Collection Efficiency on Centrifugal Spinning, International Fiber and Polymer Research Symposium, Istanbul, Turkey, May 2-3, 2019. (Proceedings pp. 48-49).
- GUNGOR, Melike , POLAT, Yusuf, AKGUL, Yasin, CALISIR, Mehmet, KILIC, Ali, (2019). Electrostatic-assisted centrifugal spinning of PVP Fibers, International Fiber and Polymer Research Symposium, Istanbul, Turkey, May 2-3, 2019. (Proceedings pp. 50-51).
- Calisir, Mehmet Durmus, Gungor, Melike, Kılıc, Ali, Demir, Ali, (2019). Production Of TiO₂ Nanofibers via Centrifugal Spun Method for Energy Application, International Fiber and Polymer Research Symposium, Istanbul, Turkey, May 2-3, 2019. (Proceedings pp. 89-90).
- CALISIR Mehmet D, GUNGOR Melike, KILIC Ali, (2020). Electro-solution Blown Polyacrylonitrile Nanofibers for Air Filtration Application, Istanbul, Turkey, Ocak 24-25, 2020. (Proceedings pp. 111-112).
- CALISIR Mehmet D, GUNGOR Melike, KILIC Ali, (2020). A Comparative Study of Silica Fibers Prepared by Solution Blowing (SB) and ElectroSolution Blowing (ESB) Methods, Istanbul, Turkey, Ocak 24-25, 2020. (Proceedings pp. 34-35).
- GUNGOR, Melike, SAGIRLI, Merve Nur, CALISIR, D. Mehmet, KILIC, Ali, (2020). Production of Fibrous Gelatin Mat as Antibacterial Wound Dressing Material via Centrifugal Spinning Method, Istanbul, Turkey, Ocak 24-25, 2020. (Proceedings pp. 26-27).
- TOPTAŞ, Ali, AKGÜL, Yasin, GÜNGÖR, Melike, KILIÇ, Ali, DEMİR, Ali, (2020). Antibakteriyel HEPA Filtrelerin Elektro Üfleme Yöntemi ile Üretimi, Istanbul, Turkey, Ocak 24-25, 2020. (Proceedings pp. 36-37).
- GUNGOR, Melike, KILIÇ, Ali, (2020). An Optimization Study on Centrifugal Spinning via Polyamide 6 Solution, Istanbul, Turkey, September 25-26, 2020. (Proceedings pp. 31-32).
- GUNGOR, Melike, SAGIRLI, Merve Nur, KILIÇ, Ali, (2021). Elektro-üfleme Yöntemi ile Elde Edilen Nanolifli Filtre Yapılarında Çözelti İletkenliğinin Filtre Performansı Üzerine Etkisi, Istanbul, Turkey, June 18-19, 2021. (Proceedings pp.231-232).