



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOFİBER TABAKALI HAVA FİLTRESİ ÜRETİMİ VE PERFORMANS TESTLERİ

Mehmet SELBES

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2013
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOFİBER TABAKALI HAVA FİLTRESİ ÜRETİMİ VE PERFORMANS TESTLERİ

Mehmet SELBES

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

2013, 117 Sayfa

Jüri
Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof.Dr. Ahmet AVCI
Doç.Dr. Ali KAHRAMAN

Bu çalışmada, 25-85 g/m^2 gramaj arasındaki mikrofiber hava filtrelerinin üzeri nanopartikül yakalama performansını arttırmak için elektro-eğirme yöntemiyle nanofiber tabaka kaplanmıştır. Elektro-eğirme deneyi, polimer solusyonu besleme debisi 21-30 mL/h, uygulanan gerilim 28-32 kV ve elektrotlar arası mesafe 19-23 cm deney parametreleri kullanılarak yapılmış ve beş farklı nanofiber filtre tabakası elde edilmiştir. Üretilen nanofiber tabaka ağırlıkları 2-4 g/m^2 ve nanofiber çapları 77-200 nm arasında olup, filtrelerin performans tayini için deney setleri hazırlanmıştır. Mikrofiber filtrelerin ve nanofiber tabakaların performans tespiti için basınç kaybı ve partikül tutma testleri gerçekleştirilmiştir. Basınç kaybı testleri 0.3, 0.8 ve 1.3 m/s alın hızlarında, partikül tutma testleri ise 0.3 m/s hava hızında yapılmıştır. Partikül testlerinde 80-120 nm çapa sahip toksik olmayan $CaCO_3$ nanopartikülleri kullanılmıştır. Partikül testleri 25 dakika boyunca yapılmış basınç kaybı artışı ölçülerek yakalanan partikül miktarı tartılmıştır.

Deneylerin sonunda, nanofiber katmanların karakteristikleri ve mikrofiber filtrelerin performans artış miktarı tespit edilmiştir. Partikül yakalama performansının nanofiber katmanlı filtrelerde yüksek olduğu belirlenmiştir. En çok nanopartikül yakalayan filtrenin, 85 g/m^2 gramaja sahip mikrofiber filtre (sekizinci numune) kullanılarak üretilen ikinci nanofiber tabaka olduğu tespit edilmiştir. Sekizinci mikrofiber filtre 2.2 mg nanopartikülü 1.5 mmHgS basınç kaybı oluşturarak yakaladığı, nanofiber tabakadan oluşan ikinci numunenin ise 8.6 mg nanopartikülü 14.5 mmHgS basınç kaybı oluşturarak yakaladığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, nanofiber tabakanın filtrasyon performansını arttırdığı, nanofiber tabakası gramajının artmasıyla performansın yükseldiği fakat kritik bir değerden sonra filtrenin tıkanarak ömrünü doldurduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava filtrasyonu, Elektro-eğirme, Nanofiber, Nanofiltre, HEPA Filtre, Termoplastik Poliüretan, $CaCO_3$ Nanopartikül

ABSTRACT

MS THESIS

PRODUCTION AND PERFORMANCE TESTS OF AIR FILTER WHICH COATED NANOFIBER LAYER BY ELECTROSPINNING METHOD

Mehmet SELBES

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR

2013, 117 Pages

Jury
Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof.Dr. Ahmet AVCI
Assoc.Prof.Dr. Ali KAHRAMAN

In this study, nanofiber layer is coated on the microfiber air filters which are 25 and 85 g/m^2 weight to improve capturing of nanoparticles by electrospinning. Electrospinning experimental parameters are polymer feed rate 21-30 mL/h, voltage 28-32 kV, between of electrodes 19-23 cm and are hold five specimen. Nanofiber layers are obtained an experimental setup 2-4 g/m^2 weigths and 77-200 nm nanofiber diameters. An experimental setup are established to evaluate performance of the nanofilters. Pressure drop and particle capture tests are performed performance of the nanofilters. Pressure drops are performed 0.3, 0.8, 1.3 m/s air velocities, particle captures are performed 0.3 m/s air velocity. In the particle capture tests are used 80-120 nm diameter spherical $CaCO_3$ nanoparticules and these tests are performed for 25 minutes measured presure drop and weight the amount of particule capture.

Experimantal results, performance increasing of the microfiber filter and nanofiber layer caracteristics are determinated. Maximum nanoparticule capturing performance are held with coated microfiber filter specimen also maximum performance is the second specimen which spunbond microfiber filter coated with 2.5 g/m^2. The eigth specimen which used to product the second nanofiber layer is determined captured 2.2 mg nanoparticule at 1.5 mmHgS pressure drop. The second specimen which nanofiber layer is captured 8.6 mg nanoparticle at 14.5 mmHgS pressure drop. As a result, the filtration performance improved nanofiber coating on the microfiber filters, the performance increases with increasing weight of the nanofiber but attains the critical value, then the life of the filter is determined by occluding.

Keywords: Air Filtration, Electrospinning, Nanofiber, Nanofilter, HEPA Filter, Thermoplastic Polyurethane, $CaCO_3$ Nanoparticle

ÖNSÖZ

Hava filtrasyonunda kullanılan HEPA filtre kâğıdı yerine nanofiber kaplı mikrofiber keçe kullanılmasının filtrasyonu arttıracağı düşünülerek bu çalışmaya başlanmıştır. Literatürde, nanofiber tabakalı filtreler üretilerek, performans testleri yapılmış ve fiber çapı ile fiber morfolojisinin filtrasyona etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada ise, filtrasyonda hiç kullanılmamış termoplastik poliüretan (TPU) nanofiberlerinin filtrasyondaki davranışları incelenmiş, $CaCO_3$ nanopartikül kullanılmış, filtrasyon etkinliği ölçümü için basit ve özgün bir deney seti tasarlanmıştır. Ayrıca, filtrasyon kapasitesi tespitinde filtrelenen partiküllerin miktarı yerine partikül ağırlığından faydalanılmıştır.

Bu tez çalışmasında, elektro-eğirme deney cihazı ile mikrofiber keçe filtrelerin yüzeyi TPU nanofiber kaplanarak deney numuneleri elde edildikten sonra, performans testlerine geçilmiştir. Farklı bir metotla filtre performansları tespit edileceğinden performans test düzenekleri tasarlanmıştır. Bu konuda araştırma yapan herkesin kolay ve ucuz olarak kurabileceği deney setinde, $CaCO_3$ nanopartikülleri akışkan yatak vasıtasıyla mikrofiber ve nanofiber keçe üzerine gönderilerek testler tamamlanmıştır.

Bu projeye S.Ü. B.A.P. (proje no: 11401130)'nin desteğinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca değerli vaktini ve bilgisini esirgemeyen, danışmanım Prof.Dr. Ahmet Akdemir'e, karbon örgü kumaş veren Prof.Dr. Ahmet Avcı'ya, performans test düzeneklerinin kurulmasında destek olan, beni sürekli motive eden Yrd.Doç.Dr. Kevser Dinçer'e, laboratuvarı açarak, alet-cihaz ve çözücülerden istifade etmemi sağlayan Yrd.Doç.Dr. Özcan Köysüren'e, polimer tedarikinde ve elektro-eğirme deney cihazını kullanmama yardımcı olan Inovenso firması kurucularından Tekstil mühendisi Abdullah Aşlamacı'ya ve Faik Mıdık'a çok teşekkür ederim. Ayrıca, nanofiberle ilgili bilgisini paylaşan doktora öğrencisi Mehmet Okan Erdal'a, H13 sınıfı HEPA filtre temin ettiğim Ulpatek firmasından Makine Müh. Murat Odabaş'a teşekkür ederim.

Mehmet SELBES
KONYA-2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

3. HAVA FİLTRASYONU **9**

3.1. Hava Filtrelerinin Özellikleri 11
3.1.1. Filtrelerin yapısal özellikleri 11
3.1.2. Hava filtrelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri 12
3.1.3. Hava filtrelerinin performans özellikleri 14
3.2. Hava Filtrelerinin Sınıflandırılması 15
3.2.1. Filtre yapısına göre sınıflandırma 15
3.2.2. Filtre performansına göre sınıflandırma 17
3.3. Partikül Yakalama Mekanizmaları 19
3.3.1. Durdurma mekanizması 20
3.3.2. Atalet etkisi mekanizması 20
3.3.3. Zigzag difüzyonu 20
3.3.4. Yerçekimi kuvvetleri 21
3.3.5. Elektrostatik etki 21
3.4. Partikül Yakalama Teorisi 21
3.5 Filtrasyon Mekanizmaları 23
3.5.1. Yüzey filtrasyonu 23
3.5.2. Derinlik filtrasyonu 23
3.5.3. Kek filtrasyonu 24
3.6. Keçeler ve Üretim Metotları 24
3.6.1. Ergitme-üfleme prosesi 26
3.6.2. Spunbond 27
3.6.3. Islak yatırma metodu 28

4. NANOFİBERLER **29**

4.1. Nanofiber Özellikleri 29
4.2. Nanofiber Kullanım Alanları 30
4.2.1. Hava filtreleri 30
4.2.2. Diğer kullanım alanları 31
4.3. Nanofiber Üretim Yöntemleri 32
4.3.1. Elyaf Çekme 32
4.3.2. Kalıp sentezi 33

4.3.3. Elektro-eğirme 33
4.3.4 Diğer üretim yöntemleri 33

5. ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOFİBER ÜRETİMİ....34

5.1. Elektro-eğirme Üretim Yöntemi....35
5.2. Elektro-eğirme Prosesinin Modellenmesi....36
5.2.1. Damlacık oluşumu 36
5.2.2. Taylor konisi oluşumu....37
5.2.3. Jet oluşumu 37
5.2.4. Kararlı bölgede jetin uzaması 38
5.2.5. Kararsız bölgenin oluşması 38
5.2.6. Fiber formunda katılaşma....40
5.3. Elektro-eğirme İşlemine Etki Eden Parametreler....40
5.3.1. Çözelti parametreleri....41
5.3.2. Proses parametreleri....44
5.3.3. Ortam parametreleri 50

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR....51

6.1. Nanofiber Tabaka Üretiminde ve Filtre Testinde Kullanılan Malzemeler 51
6.1.1. Altlık 51
6.1.2. Kullanılan diğer filtreler....52
6.1.2. Termoplastik poliüretan 53
6.1.3. Dimetilformamit 53
6.1.4. Elektro-eğirme deney cihazı....54
6.1.5. Filtre test materyalleri 55
6.2. Nanofiber Filtre Üretimi 56
6.2.1. Altlıkların hazırlanması....56
6.2.2. TPU polimerinin çözünmesi....57
6.2.3. Elektro-eğirme deneyi....57
6.3. Nanofiltre ve Mikrofiltrelerin Performans Testleri 58
6.3.1. Filtre numunelerinin hazırlanması 61
6.3.2. Basınç kaybı deneyleri 62
6.3.3. Partikül yakalama deneyleri 65

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 72

7.1. Nanofiber Filtre Üretim Sonuçları....72
7.2. Filtre Numuneleri Performansları....79
7.2.1. Basınç kaybı deneyleri 79
7.2.2. Partikül yakalama deneyleri 84

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 103

KAYNAKLAR 107

EKLER 111

ÖZGEÇMİŞ....117

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Hava kanalı alanı (cm^2)
A_m	: Sentetik toz ağırlığı oranı
α	: Taylor konisinin dikeyle yaptığı açı (°)
β	: Polimer besleme debisi (mL/h)
C	: Elektriksel gerilim (kV)
CA	: Selüloz asetat
$CaCO_3$	: Kalsiyum karbonat
$Ca(HCO_3)_2$	: Kalsiyum bikarbonat
DEHS	: Di-ethyl hexil-sebacat
DMF	: Dimetyl formamit
ΔP_i	: Yakalanan nanopartiküller oluşan ilave basınç kaybı (mmHgS)
ΔP_{max}	: Maksimum basınç kaybı (mmHgS)
$\Delta P_{ort.}$	: Ortalama basınç kaybı (mmHgS)
dak	: Dakika
E_m	: Toz tutma verimi
EF	: PET sentetik elyaf filtre (G2 sınıfı)
F_E	: Elektrik alan kuvveti (N)
F_g	: Yer çekimi kuvveti (N)
F_γ	: Yüzey gerilimi kuvveti (N)
KH_2PO_4	: Potasyum fosfat
l	: Lüle ile silindirik toplayıcı arasındaki mesafe (m)
M	: Ergitme-üfleme mikrofiber filtre
MF	: Monoflament mikrofiber filtre
M_u	: Filtreye giren kirlilik miktarı (g)
M_d	: Filtreden çıkan kirlilik miktarı (g)
NaCl	: Sodyum klorür
NaH_2PO_4	: Sodyum fosfat
Ø	: Fiber çapı (nm)
$Ø_{max.}$	: En büyük fiber çapı (nm)
$Ø_{min.}$	: En düşük fiber çapı (nm)
$Ø_{ort.}$	:Ortalama fiber çapı (nm)
PA 6	: Poliamid 6
P_a	: Kumaş yoğunluğu (g/cm^3)
Pa	: Pascal (N/m^2)
PAN	: Poliakrilonitril
P_b	: Fiber yoğunluğu (g/cm^3)
PBI	: Polibenzimidazole
PCL	: Polikaprolaktam
PCL	: Polikaprolaktan
PET	: Polietilen tereftalat
PGA	: Poliglikolik asit
PLCL	: Poli -L- kaprolaktam
PLGA	: Poli (laktik-ko-glikolik acid)
PLLA	: Poli (L-laktik) acid
PP	: Polipropilen
PS	: Polistren

PTFE : Politetrafluoroethilen (Teflon)
PU : Polyuretan
PVA : Polivinil alkol
PVC : Polivinilklorür
S : Spunbond mikrofiber filtre
t_e : Elektro-eğirme deney süresi (h)
THF : Tetrahidrofuran
t_p : Partikül yakalama deney süresi (dak.)
V : Filtreden geçen partiküllü havanın hızı, Alın hızı (m/s)
$\dot{V}$: Hacimsel debi (m^3/s)
υ : Özgül hacim (m^3/kg)
Ω : Yakalanan partikül ağırlığı (mg)
$\dot{Q}$: Kütlesel debi (kg/s)

Kısaltmalar

AC : Alternatif akım (Alternate Current, kV)
ASHRAE : Amerikan Isıtma-Soğutma-İklimlendirme Mühendisleri Derneği (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)
CEN : Avrupa Standartlar Komitesi (European Committee for Standardization)
DC : Doğru Akım (Direct Current, kV)
EN 779 : Genel Havalandırma İçin Partikül Hava Filtreleri Standartı
EN 1822 : Yüksek Etkinlikli Hava Filtreleri Standardı
EPA : Etkin Hava Filtresi (Efficiency Particulate Filter)
HEPA : Yüksek Etkinlikli Hava Filtresi (High Efficiency Particulate Filter)
MPPS : Ençok Nufüzeden Partikül Boyutu (Most Penetrating Particle Size)
SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
ULPA : Ultra Küçük Partikül Yakalayan Hava Filtresi (Ultra Level Particule Air Filter)

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi, insanoğlunun işini kolaylaştırıp konforunu arttırdığı gibi, doğal kaynakların da kirlenmesini beraberinde getirmiştir. Bu kirlenme, havada asılı olan mikro ve makro boyuttaki partiküllerden meydana gelmektedir. Katı ve sıvı fazda olabilen bu partiküller insan vücuduna solunum yoluyla girerek çeşitli solunum yolu rahatsızlıklarına sebep olmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle, hassas görüntüleme sistemleri geliştirilmiş ve hastalığa sebep olan partiküllerin örneğin virüslerin sadece 100 nm boyutunda olduğu keşfedilmiştir. Bu nedenle, virüs gibi çok küçük canlıların etkisinden korunmak için havanın etkin bir şekilde filtrelenmesi gerekmektedir. Sadece insan sağlığı için değil, yaşantımızın her alanında örneğin elektronik cihazlar, otomobil kaportalarının boyanması, mercek kaplaması, yüksek derecede duyarlı sensörlerin geliştirilmesi gibi çeşitli alanlarda ürünü toz taneciklerinden korumak ve ürün kalitesini yükseltmek için etkin hava filtreleri kullanılmaktadır. Günümüzde etkin bir filtrasyon için HEPA (High Efficiency Particulate Air-Yüksek Etkinlikli Hava Filtresi) kullanılmaktadır.

Hava filtrelerinin sınıflandırılmasıyla ilgili biri Avrupa diğeri ABD tarafından hazırlanan iki standart mevcuttur. ABD tarafından hazırlanan standart daha çok tavsiye niteliği taşımakta olduğundan pek kullanılmaz. Genellikle CEN (European Committee for Standardization-Avrupa Standartlar Komitesi) tarafından hazırlanan standartlar kullanılmaktadır. Hava filtreleri yakaladıkları partikül büyüklüğüne göre kaba, ince ve hassas olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Kaba ve ince partiküllerin yakalanmasında kullanılan filtrelerin standartı EN 779 (Genel Havalandırma İçin Partikül Hava Filtreleri)'dur. EN 779 standartında kaba ve ince filtreler yakalanan partikül ağırlığına ve partikül tutma verimine göre sınıflandırılmıştır. Kaba ve ince filtreler genellikle klimalar, otomobil kabin ve motor filtreleri gibi hassas olmayan yerlerde kullanılmaktadır. Ayrıca çok küçük partikül, toz ve organizma varlığının önemli olduğu yerlerde kullanılan hassas filtrelerden hemen önce kullanılmaktadır. Hassas filtreler için EN 1822 (Yüksek Etkinlikli Hava Filtreleri) standartı kullanılmaktadır. Hassas filtreler geçirdikleri partikül miktarına göre sınıflandırılmış olup ameliyathaneler, mikroçip üretim tesisleri, nükleer fabrikalar, elektrikli süpürgeler gibi hassas yerlerde ve proseslerde kullanılmaktadır. İnsanların konfor beklentilerinin yükselmesi ve hassas yerlerin, süreçlerin artması yüksek etkin hava filtrelerinin önemini arttırmaktadır.

Hassas filtreler yirminci yüzyılın ortalarından yüzyılın sonuna kadar cam mikrofiberlerden elde edilmekteydi. Yirmi birinci yüzyılın başında nanoteknolojinin hızla gelişmeye başlamasıyla mikrofiberlerin yerini daha küçük fiberler almıştır. Nanofiberlerin boyutlarının küçük olması, daha etkin bir filtreme yapmasını beraberinde getirmektedir. Nanofiber üretiminde hızlı, tekrarlanabilir ve kütlesel üretime uygun olduğundan genellikle elektro-eğirme yöntemi kullanılmaktadır. Elektro-eğirme yöntemi, nispeten daha az enerjiyle, daha az maddeyle ve çok farklı polimerle nanofiber üretimine izin vermektedir. Çok çeşitli polimerlerden üretilmesi fiberlere dolayısıyla filtreye istenilen özelliklerin verilmesine imkân sağlar. Örneğin iletken nanofiber elde edilen polimerlerin kullanılmasıyla filtreye düşük bir akım verilerek havadaki pozitif partiküller kolayca yakalanabilmektedir.

Nanofiltre mikrofiltreye göre birçok yönden üstün olduğundan bu çalışmada üretilerek optimum elektro-eğirme parametreleri ile optimum nanofiltre özellikleri tespit edilmiştir. Bu amaçla elektro-eğirme deney cihazında mikrofiberlerden oluşan ve altlık olarak adlandırılan filtrelerin üzerine, farklı debi, mesafe ve elektrik gerilimde termoplastik poliüretan-dimetil formamit polimer çözeltisi kaplanarak nanofiltre numuneleri üretilmiştir. Elektro-eğirme deney parametrelerinin nanofiber çapını ve ağ morfolojisini nasıl etkilediği incelenmiştir. Nanofiltrelerin filtrasyon etkinliğini tespit etmek için yapılan performans testleri, üretilen nanofiltre numuneleri ile geleneksel (ticari olarak kullanılan) mikrofiber HEPA filtre numunesi kullanılarak yapılmıştır. Performans testlerinden basınç kaybı deneyi, farklı alın hızlarında yapılmıştır. Nanofiber ağırlığının, nanofiber içinde bulunan iri ve silindirik yapının (boncuk), filtre kalınlığının ve fiber çapının basınç kaybına etkileri incelenmiştir. Performans testlerinden partikül tutma deneyinde belli aralıklarla filtrenin tuttuğu nanopartikül miktarı tartılmış ve filtrede oluşan basınç kaybı ölçülmüştür. Böylece zamana bağlı olarak, partikül tutma miktarıyla basınç kaybı tespit edilmiş, filtre numunesinin davranışları (tıkanma, şişerek genişleme vs.) ile bu davranışların sebepleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda, elektro-eğirme yöntemiyle üretilen nanofiber filtre, geleneksel HEPA filtreden daha fazla partikülü daha düşük basınç kaybı oluşturarak yakaladığı belirlenmiştir. Bu numunenin hem altlık, hem de nanofiber ağırlığı orta düzeyde olup nispeten boncuksuz ve küçük nanofiberlerden oluştuğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmayı özgün kılan özelliklerden birincisi, partikül tutma testine özel tasarlanmış bir test düzeneği kurulmuştur. Partikül yakalama deney setinde nanopartiküller atomizör gibi bir aerosol üretecine gerek duymadan, akışkan yatak

kullanılarak filtre numunesine gönderilmiştir. İkincisi, partikül tutma testinin uygulanmasında farklı bir yol izlenmiştir. Filtre numuneleri partikül testleri, filtrenin yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı farkının zamana göre değişimi ölçülerek deneyler sonuçlandırılmıştır. Böylece filtrelerin zamana bağlı davranışları incelenerek ilerleyen süreçte filtrenin nasıl davranacağı konusunda fikirler ortaya konmuştur. Üçüncüsü, partikül tutma testinde kullanılan partiküle literatürde rastlanmamıştır. Zehirli olmayan $CaCO_3$ (kalsiyum karbonat) nanopartiküller herhangi bir makineye ihtiyaç duymadan direkt olarak suyu uçurulup kullanılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kataphinan (2004), elektro-eğirme tarihinin 17. yüzyıla dayandığını, elektro-eğirmenin William Gilbert'ın manyetizma üzerinde çalışırken tesadüfi bir şekilde elektro-magnetizmanın sıvılar üzerinde bir çekim kuvveti doğurduğunu keşfetmesiyle ortaya çıktığını ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006), 1934 yılında Formhals'ın elektrik alan kullanarak suni fiber üretim sistemi tasarlayarak elektro-eğirmeyle ilgili ilk patenti aldığını, Taylor'un 1960'lı yıllarda elektriklenmiş sıvılarla ilgili temel teorik prensipleri açıkladığını ifade etmiştir. Taylor tarafından geliştirilen bu teoride, bir elektrik alan içindeki damladan ince fiberlerin oluşması, elektriksel kuvvetler tarafından yüklenen sıvı yüzeyindeki maksimum kararsızlıktan dolayı meydana geldiğini belirtmiştir.

Ramaknishna ve ark. (2005) ve Jayaraman ve ark. (2004) nanofiber üretim yöntemlerini araştırmışlardır. Zahmetli ve yavaş bir metod olan elyaf çekme yönteminde, mikroskop altında bir ince çubuk, damla haldeki polimer çözeltisinin içine daldırılarak yavaşça çekerek uzun ve tek bir nanofiber elde etmişlerdir. (Ramaknishna ve ark., 2005). Feng ve ark. (2002), farklı bir fiber üretim şekli olan kalıp sentezi metodunda, polimer çözeltisini nanogözenekli bir membrandan geçirilerek üretmişlerdir. Bunun için polimer çözeltisi bir sıvı ile (örneğin su) sıkıştırılarak nano membran içinden geçirilmiş ve katılaşma çözeltisi adı verilen bir solüsyon içinde nanofiber üretilmiştir (Üstündağ, 2009).

Ramaknishna ve ark. (2005), elektro-eğirme sisteminin basitçe, polimer solüsyonunu tutan bir pipet, iki elektrot (kılcal boru ve toplayıcı) ve DC (Direct Current-Doğru Akım) yüksek voltaj güç kaynağından (kV düzeyinde) oluştuğunu ifade etmişlerdir. Pipetin ucunda bulunan kılcal boru ucundaki polimer damlasının yüksek voltaj yardımıyla çekilerek fiber oluştuğunu belirtmişlerdir. Elektrikle yüklenen polimer jetinin bükülmesinden dolayı, jetin birçok parçaya ayrıldığını ve böylece çok küçük fiberler oluşturduğunu, oluşan fiber ağlarının toplayıcı adı verilen topraklanmış elektrotta yığılacağını belirtmişlerdir. Huang ve ark. (2003), elektro-eğirme yöntemiyle 3 nm-1μm arasında sürekli nanofiberin farklı polimerlerle elde edilebildiğini ifade etmişlerdir.

Kozanoğlu (2006) ve Andray (2008) elektro-eğirme prosesinin modellenmesi ile ilgili çalışmalarda bulunmuşlardır. Andray (2008), elektro-eğirmenin ilk aşaması olan polimer damlacığının maruz kaldığı kuvvetleri açıklamıştır. Buna göre iletken polimer çözeltisinin veya eriyiğin kılcal bir boruya düşük hızda geldiğini, boru ucunda

oluşan damlacığa yüzey gerilimi ve yer çekimi kuvvetinin tesir ettiğini ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006), elektro-eğirme prosesinin ikinci aşamasında oluşan Taylor konisini tanımlayarak damlacık halindeki polimer çözeltisine elektriksel bir gerilim uygulandığında, kritik bir değerde damlacığın yarı küresel formdan ucunun sivrilerek geniş bir koni haline geçtiğini belirtmiştir. Huang ve ark. (2003) elektrik alan içindeki viskoz sıvının 49.3° konik formda iken yüzey gerilimi ve elektrostatik kuvvetlerin dengede olduğunu ifade etmiştir. Andray (2008), Taylor açısının polimer besleme hızı ve çözelti özelliğine bağlı olarak değişebileceğini belirtmiştir. Kozanoğlu (2006), üçüncü aşama olan polimer jeti oluşumunda kritik bir geriliminin hemen üstündeki bir değerde koni ucundan polimer jetinin fışkırmasıyla elektro-eğirmenin başlayacağını ifade etmiştir. Andray (2008), kararlı bölgede polimer jeti hızının arttığını ve doğrusal bir yol izlediğini belirtmiştir. Bu sırada jet içindeki çözücünün buharlaşmasıyla polimer jeti inceldiğini ve jet hızının bu nedenle arttığını belirtmiştir. Jet hızın kritik bir değere ulaştığında jetin kararsız bölgeye girdiğini Kozanoğlu (2006) belirtmiş ve bu sırada jet yüzeyindeki merkezkaç kuvvetinin jeti ittiğini söylemiştir. Jetin, toplayıcı adı verilen pozitif kutbuna yaklaşmasıyla merkezkaç kuvvetin ve toplayıcıdaki çekim kuvvetinin jette kopmalar meydana getirdiğini ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006) ve Andray (2008) jetin bu kararlı bölgeden sonra kararsız bölgeye girmesiyle oluşan kuvvetlerden bahsetmişler, bu kuvvetlerin yerçekimi kuvveti, elektrostatik çekim kuvveti, coloumb itme kuvveti, jetin uzamasına ve ilerlemesine karşı yönde etki eden viskoelastik kuvvetler, jetin çekilmesine aksi yönde etki eden yüzey gerilim kuvveti ve hava ile sürtünme kuvveti olduğunu belirtmişlerdir. Andray (2008), son aşama olan katılaşma prosesinde, toplayıcıya ulaşan polimer jetindeki çözücünün buharlaşmasıyla katılaşma meydana geleceğini ve sonuçta nanofiber oluşacağını belirtmiştir.

Ko (2004) ve Daşdemir (2006) nanofiberlerin özelliklerini incelemişlerdir. Ko (2004), fiber çapının yüzey alanına göre değişimini irdeleyerek 5 nm çapındaki nanofiberlerin 1000 m^2/g yüzey alanına sahip olduğunu, 1000 nm çapındaki fiberlerin 10 m^2/g yüzey alanına sahip olduğunu belirtmiştir. Daşdemir (2006), nanofiberlerin mukavemetinin çok yüksek olduğunu ifade etmiştir. Bunun nedenini, nanofiberlerin yüksek kristalliğe (boşluksuz, yabancı atomsuz olması) sahip olması ile açıklamıştır.

Graham ve ark. (2002) ve Üstündağ (2009) nanofiber kullanım alanları üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Graham ve ark. (2002), hava filtreleri olarak kullanılan nanofiberlerle ilgili araştırmalarda bulunmuştur. Buna göre aynı basınç değerinde 1 μm'dan küçük fiberlerin partikülleri daha verimli yakaladığını, fiber çapının

küçülmesiyle yakalanan partikül boyutunun küçüleceğini, partikül yakalama veriminin artacağını tespit etmişlerdir. Üstündağ (2009) nanofiberlerin doku mühendisliğinde kullanıldığını ve Delaware Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar sonucunda, polilaktik asit-diklorometan çözeltisinden elde edilen nanofiberlerin üzerine kemik hücrelerinin kuvvetli bir şekilde tutunduğunu ve fiberler içerisinde büyüdüğünü ifade etmiştir. Ramakrishna ve ark. (2005), nanofiberin, ilaç salınımı, membran, doku iskeleti, koruyucu elbise, yara örtücü, kompozit malzeme, sensörler, batarya ve kapasitör üretimi gibi çok çeşitli alanlarda kullanıldığını bildirmiştir.

Ramakrishna ve ark. (2005), Üstündağ ve Karaca (2009), Deitzel ve ark. (2001) ile Kozanoğlu (2006) elektro-eğirme deney parametreleri ile çalışmalarda bulunmuşlardır. Ramakrishna ve ark. (2005) çözelti parametrelerinden molekül ağırlığının ve viskozitenin yüksek olduğu çözeltilerin jet sürekliliğinin iyi derecede olduğunu, fakat yüksek viskozitenin de, polimer pompalamasını zorlaştıracağından belli bir sınırı olduğunu ifade etmiştir. Kozanoğlu (2006) konsantrasyon artışıyla boncuk oluşumunun azalacağını ifade etmiştir. Ramakrishna ve ark. (2005), yüksek viskoziteli çözeltiyle nanofiberlerin küçük bir alanda toplanacağı, böylece büyük çaplı nanofiberlerin oluşacağını belirtmiştir. Ayrıca düzgün nanofiber üretimi için etanol veya yüzey aktif madde ilave edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Elektro-eğirme için mutlaka çözeltinin iletken olması gerektiğini, iletkenliğin ya çözeltiye iyon ilavesiyle veya elektrik alanın arttırılmasıyla mümkün olabileceğini, iyi bir iletkenlik ile düzgün ve küçük nanofiberler üretilebileceğini söylemiştir. Üstündağ ve Karaca (2009), çok fazla iletkenlik ile lüle ucundaki damlacığı muhafaza etmenin zor olduğunu belirtmiştir. Ramakrishna (2005) çözücünün dielektrik özelliğinin yüksek olmasının boncuk oluşumu ve küçük fiber üretiminde faydalı olacağını, çözeltinin dielektrik özelliğini arttırmak için DMF (dimetilformamit) gibi çözücüler ilave edilebileceğini ifade etmiştir. Diğer yandan düşük konsantrasyonla fiber çapının azaldığını ifade etmiştir. Andray (2008) jetin katılaşma sürecinde çözeltinin uçuculuğunun fiber elde etmede önemli bir rol oynadığını yüksek uçucu çözeltiler ile çok küçük çaplı fiberlerin üretilebileceğini belirtmiştir. Deitzel ve ark. (2001) çalışmalarında çok yüksek voltajda polimer jetinin kararsızlığının artarak boncuklu bir yapı oluştuğunu gözlemişlerdir. Ramakrishna ve ark. (2005), polimer besleme debisinin artışı ile fiber çapının bir değere kadar arttığını ifade etmişlerdir. Deitzel ve ark. (2001) ile Ramakrishna ve ark. (2005) besleme hızının yüksek olması ile çözücünün yeterince buharlaşamayacağından boncuk oluştuğunu belirtmişlerdir. Demir ve ark.(2002), poliüretan ile yaptıkları deneylerde yüksek çözelti

sıcaklığında elde edilen fiberlerin daha üniform dağıldığını gözlemişlerdir. Ramakrishna ve ark. (2005) lüle çapının dar olmasının küçük nanofiber üretiminde faydalı olacağını söylemiştir. Ramakrishna ve ark. (2005) ve Kozanoğlu (2006) lüle ile toplayıcı arasındaki mesafenin azalmasıyla büyük, artmasıyla küçük çaplı nanofiber oluştuğunu ifade etmiştir.

Duran ve Öneş (1993), Vaughn ve Ramachandran (2002) ve Doğan (2006) hava filtrelerinin fiber çapı, yüzey alanı, gözeneklilik, gramaj gibi yapısal özelliklerini inceleyerek, bunların filtreleme mekanizmasına etkisini açıklamışlardır. Konuyla ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.1.1'de sunulmuştur.

Hutten (2007) hava filtrasyonunda kullanılan keçelerin üretim metotlarını incelemiştir. Bu metotların ergitme üfleme, spunbond, ıslak yatırma ve elektro-eğirme yöntemi olduğunu ifade etmiştir. Bu metotlardan en büyük fiberin spunbond yöntemi ile en küçük fiberin ise elektro-eğirme yöntemiyle elde edileceğini belirtmiştir. Ayrıca elektro-eğirme haricindeki tüm üretim yöntemlerinde 1 μm fiber çapının altına inilmesinin pek mümkün olmadığını ifade etmiştir. Süpüren ve ark.(2007) spunbond yönteminin ergitme üfleme (meltblown) yöntemi ile teknik olarak çok benzediğini aralarındaki farkın, fiberleri inceltmek için kullanılan havanın hacmi ve sıcaklığı olduğunu ifade etmiştir. Ergitme-üfleme metodunda fiberlerin gerdirilmesi için yüksek miktarda hava kullanıldığını, spunbond yönteminde ise polimer soğuyup katılaştığında germe işlemi yapıldığını bu sebeple üretilen fiberlerin daha kalın tabakalı olduğunu (spunbond 15-40 μm, ergitme üfleme 2-10 μm) bildirmiştir.

Hutten (2007) filtre performansını karşılaştırmada kullanılan parametrelerden partikül tutma verimini, yakalanan partikülün filtreye giren partiküle oranı olarak açıklamıştır. Doğan (2006) filtre performans parametrelerinden basınç kaybıyla ilgili olarak, filtrenin filtrasyona başladıktan sonra mümkün olan en yüksek basınç kaybına en uzun sürede ulaşmasının istenen bir özellik olduğunu ifade etmiştir. Basınç kaybının toz tutma kapasitesine dolayısıyla filtre ömrüne etki ettiğini belirtmiş, nedenini artan basınç farkıyla filtrenin ömrünü kısa sürede tamamlaması ile açıklamıştır.

Adanur (1995), Vaughn ve Ramachandran (2002) hava filtrelerini partikül tutma mekanizmalarına göre, durdurma, atalet etkisi, brownian difüzyonu ve elektrostatik depolama olarak sınıflandırmıştır. Adanur (1995) durdurma mekanizmasında partikülün fiberin yanından kendi çapından daha düşük bir uzaklıkta geçtiğinde yakalanacağını belirtmiştir. Adanur (1995) hava içindeki büyük partiküllerin ataletlerinden dolayı yakalanacağını ifade etmiştir. Zigzag difüzyonunu ise çok küçük partiküllerin filtre

içinden geçerken rastgele titreşim yapmasıyla yakalanabileceğini belirtmiştir. Bu mekanizmanın çok küçük fiberlerden oluşan kalın tabakalı filtrelerde önemli bir mekanizma olduğunu söylemiştir. Vaughn ve Ramachandran (2002) elektrostatik depolamayı, fiberlerin statik elektrikle yüklendiğinde küçük ve orta büyüklükteki partiküllerin yakalanacağını ifade etmiştir.

Duran ve Öneş (1993), Doğan (2006) filtreleri, filtrasyon mekanizmalarını esas alarak yüzey, derinlik ve kek filtrasyonu olarak sınıflandırmışlardır. Doğan (2006) yüzey filtrasyonunun partiküllerin filtre gözeneklerinden büyük olduğunda oluşacağını ve yüzey filtrasyonu ile filtrenin çok kısa sürede tıkanacağını ifade etmiştir. Doğan (2006), kalın bir keçe tabakasından oluşan filtrenin gözenek boyutlarının partikül boyutlarından daha büyük olduğu durumlarda görüldüğünü fiberler düzensiz yerleştiği için partiküller çok sayıda çarpışmanın gerçekleşeceğini ifade etmiştir.

3. HAVA FİLTRASYONU

Filtrasyonun varlığı, insanoğlunun yaratılışından önceye dayanır. Yaşam henüz yokken, toprak yağan yağmuru süzerek, yer altı sularını oluşturmaya başlamıştır. Bir müddet sonra canlılar yaratılmış ve yüce yaratıcı, kanı ve vücutta istenmeyen kötü maddeleri süzmesi için böbrekleri görevlendirmiştir. Böbrekler, moleküler boyuttaki maddeleri, yarı geçirgen hücre zarı vasıtasıyla süzerek hayatın devamını icra etmektedir. İnsanoğlu var olduğundan bu yana kum eleme, pekmez yapımı gibi farklı amaçları gerçekleştirmede kullandığı süzme metodu, hızla gelişerek günümüze kadar gelmiştir.

Filtrasyon, akışkan içindeki değerli maddenin veya istenmeyen maddelerin süzülmesinde kullanılan bir süreçtir. Örneğin hava filtrelerinde havanın içindeki partikül, polen, sigara dumanı, kötü koku gibi istenmeyen maddeler uzaklaştırılarak temiz hava elde edilir. Süreç filtreleme adı verilen diğer bir filtrelemede amaç, akışkan içindeki değerli maddeyi ayırmaktır. Örneğin süte rengini veren ve sütün özünü oluşturan kolloid madde proses filtreleme sonunda ayrılarak, süt tozu yapımında kullanılmaktadır. Filtrelenen maddenin veya arındırılan akışkanın elde edilmesinde kullanılan filtreler, günlük yaşantıdan, özel endüstriyel uygulamalara kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Günümüzde, endüstriyel uygulamalardan evlerimizdeki elektrik süpürgesine kadar çok çeşitli özellikte ve farklı amaçlar için filtreler kullanılmaktadır. Filtrasyonun çok farklı alanlarda kullanılması, onu geleceğin belki en önemli proseslerinden biri kılar.

Teknolojinin gelişmesiyle hızla artan sanayileşme ve buna bağlı olarak enerji gereksinimi çevremizde soluduğumuz havanın ve su kaynaklarımızın kirlenmesine sebep olmaktadır. Her ne kadar son on yıl içinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artsa da, insanoğlu var olduğu sürece hava kirliliği bir sorun olmaktan çıkmayacaktır. Ayrıca, konfor beklentilerinin yükselmesi, kaliteli hava gereksinimini beraberinde getirmektedir. Hava filtreleri, otomobilden işyerindeki klimalara kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Araç motorundaki hava filtreleri, motorun sorunsuz çalışmasını, sürecin düzgün seyretmesini sağlamaktadır. Hassas üretimlerin yapıldığı imalathanelerde, laboratuvarlarda ya da ameliyathanelerde, çok temiz ortamların oluşturulması gerekmektedir. Örneğin, ameliyathanelerde havanın içindeki bakteri, virüs gibi küçük canlılar, hastaya nüfuz ederek hayatını kaybetmesine sebep olabilmektedir. Yine, mikroçip üretim tesisinde mikroçipin üzerinde bulunan

mikrometre seviyesinde küçük bir toz, elektronik devrenin kısa devre yaparak işlevselliğini kaybetmesine neden olabilir. Bu nedenle temiz havanın önemi büyüktür.

Elaftherakis (1999) ideal hava filtresini şu şekilde tanımlamıştır:

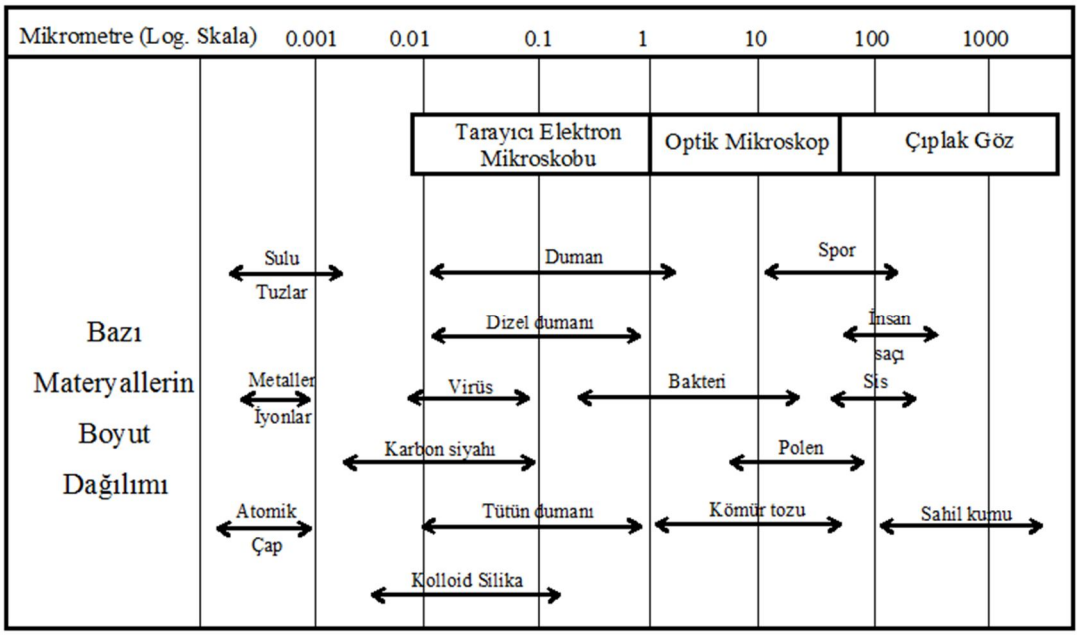
İdeal hava filtresi, tüm kirlilikleri çok düşük basınç farkı oluşturarak ortadan kaldırmalıdır. Bunu yaparken sınırsız toz tutma kapasitesine ve düşük maliyete sahip olmalıdır. Bütün bu ideallerin tümü değil ama bir kısmı yaklaşık olarak gerçekleşebilir. İdeale yaklaşma olanağı ancak şu üç parametrenin uygun olmasıyla mümkündür:

a) Havanın özelliği; örneğin, viskozitesi, sıcaklığı, kimyasal özelliği; örneğin korozifliği

b) Kirliliklerin özelliği; partikül boyutları ve konsantrasyonu

c) Hava filtresinden beklenen performans; filtre etkinliği, akış direnci, filtre ömrü, filtre boyutu (Elafterakis, 1999)

Filtrenin ilk amacı kirlilikleri tutmaktır. Şayet kirlilikler partikülse boyut dağılımı önemlidir. Şekil 3.1'de havadaki kirlilikleri ve partiküllerin boyutsal dağılımı sunulmuştur. Filtreler, polenler, sporlar, büyük bakteriler ve tozlar gibi büyük partikülleri tutmak için tasarlanabileceği gibi küçük partiküller örneğin virüs, tütün dumanı vs. ortadan kaldırmak için de tasarlanabilir. Genellikle daha küçük partiküller daha küçük fiberlerle tutulur ve daha yüksek maliyetlidir. Bu arada, filtre şarj edilerek çok küçük partiküllerin filtrasyonu arttırılabilir (Elafterakis, 1999).



Şekil 3.1. Havadaki partiküllerin boyutları (Elafterakis, 1999)

3.1. Hava Filtrelerinin Özellikleri

Filtrelerin yapısal, fiziksel-kimyasal ve performans özellikleri mevcuttur. Filtrelerin özelliklerine bağlı olarak, filtreleme performansı, filtre ömrü vs. değişiklik gösterir. Bu nedenle, filtre tasarlanırken bu özelliklerin filtreleme sonucunu nasıl etkilediğinin bilinmesi gerekir.

3.1.1. Filtrelerin yapısal özellikleri

Filtreleri oluşturan fiberlerin çapı, yerleşimi, yoğunluğu, filtre ağırlığı, fiberlerin homojen dağılımı gibi unsurlar filtrelerin yapısal özelliklerini teşkil eder ve filtre performansıyla doğrudan ilgilidir.

3.1.1.1. Fiber çapı

Fiber, filtrenin temel yapı elemanı olduğu için filtreleme özelliklerini en çok etkileyen faktördür. Fiber çapı azaldıkça; birim alandaki fiber miktarı artar, dolayısıyla gözenek sayısı azalır, partikülün filtre içinde alacağı yol karmaşık hale gelir. Filtrenin yüzey alanının artmasıyla, gözenek boyutu küçülür ve partikülün yakalanma ihtimali artar (Duran ve Öneş 1993, Vaughn and Ramachandran 2002). Birimi, µm veya nm'dir.

3.1.1.2. Yüzey alanı

Fiber yüzey alanı filtrasyon performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Çünkü birim hacimdeki fiber yüzey alanı artışı, fiber sayısının artmasına ve partiküllerin fiber ile çarpışma ihtimallerinin artması anlamına gelir (Vaughn and Ramachandran 2002). Birimi, m^2/g 'dır.

3.1.1.3. Gözeneklilik

Birim hacim filtredeki boş hacim miktarı olarak tanımlanır, birimsizdir (Frank, 2004). Yani, filtre içindeki boşluk hacminin, filtre toplam hacmine oranıdır (Denklem 3.1).

$$V = 100 - \frac{V_a}{V_b} \qquad (3.1)$$

Burada, V_a filtre yoğunluğu (g/cm^3), V_b fiber yoğunluğu (g/cm^3)'dur. Filtre yoğunluğu V_a, Denklem 3.2'de belirtildiği gibi hesaplanabilir (Epps and Leonas 2000). Filtre yoğunluğu, birim alandaki filtre ağırlığının, filtre kalınlığına oranı olarak tanımlanabilir. Birimi, g/cm^3'tür. Fiberler ne kadar ince olur, ne kadar sık dizilirse, yoğunluğu o kadar artar, geçirgenliği azalır. Buna karşın filtrasyon verimliliği artar (Doğan, 2006).

$$V_a = \frac{\text{Filtre ağırlığı (g/cm}^2\text{)}}{\text{Filtre kalınlığı (cm)}} \quad (3.2)$$

3.1.1.4. Filtre kalınlığı

Filtre kalınlığı; fiber çapına, dokunun oluşum şekline bağlı olarak değişir. Birimi, µm veya mm'dir. Örneğin dokuma filtreler, keçelere göre daha incedir. Filtre kalınlığının fazla olması efektif filtreleme alanının fazla olması anlamına gelir ve bu istenilen bir durumdur (Doğan, 2006). Filtre kalınlığını ölçmek için üretilen özel cihazlar kullanılır. Ölçüm sırasında numune, bir kelepçe yardımıyla dikey durumda bulunan bir referans levhası ile baskı ayağı arasında dik biçimde tutulur. Örneğin 20 mm'ye kadar olan numuneler için 20 Pa basınçla baskı ayağı keçeyi sıkıştırarak keçenin kalınlığı cihazın göstergesinden okunur (Sivri, 2008).

3.1.1.5. Gramaj

Gramaj veya ağırlık, filtrenin birim alanının ağırlığı olarak tanımlanır. Birimi g/m^2'dir. Ağırlık fiber çapı ve kullanılan fiber yoğunluğu ile ilgilidir (Doğan, 2006). Fiber çapı küçüldükçe gözenek boyutu azaldığından gramaj genellikle artar. Filtre kalınlığı azalması da gramajı arttırır. Gramajı yüksek olan filtrelerin geçirgenliği düşüktür.

3.1.2. Hava filtrelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Filtrelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri fiberlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler şunlardır:

3.1.2.1. Geçirgenlik

Havanın filtreden geçiş kolaylığıdır. Gözeneklilik artarsa filtre geçirgenliği artar. Gözeneklilik fiber çapına ve filtre kalınlığına bağlıdır. Geçirgenlik, fiber çapının güçlü bir fonksiyonudur (Doğan, 2006).

3.1.2.2. Kopma, yırtılma ve patlama mukavemeti

Filtrenin kullanım sırasında maruz kaldığı kuvvetlere dayanması beklenir. Bu kuvvetler hava akımı kuvvetleri ya da filtre aparatı tarafından uygulanan kuvvetler (kelepçe, kıskaç kuvvetleri) olabilir. Filtre, bu kuvvetlere belirli bir süre dayanabilir. Zamanla kopar, yırtılır veya üzerinde delikler oluşur. Yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda, daha dayanım filtrelerden faydalanılır. Örneğin keçelerin mukavemetlerini arttırmak için takviye malzemesi ile beraber üretilmeleri söz konusudur. Ayrıca iğneleme tekniği ile üretilen filtreler diğer keçe üretim teknikleri ile elde edilen filtrelere göre daha mukavimdir (Doğan, 2006).

3.1.2.3. Sıcağa dayanım

Filtrenin sıcağa dayanımını fiber malzemesi belirler. Filtrelerin çalışma sıcaklıkları elde edildikleri sentetik fiberlere göre 100-150 ºC arasında değişir. Yüksek sıcaklık, özellikle gaz filtrasyonu uygulamalarında önem taşır. Bunun için gaz filtrelerinde yüksek sıcaklığa dayanıklı Politetrafluoroethilen (PTFE) vs. fiberler kullanılır. (Doğan, 2006).

3.1.2.4. Kimyasal maddelere dayanım

Filtrelerin kimyasal maddelere dayanıklı olması istenir. Yani, filtre malzemesinin süzdüğü akışkan ve partiküllerle kimyasal olarak etkileşmemesi gerekir. Filtrelenen maddenin filtreye zarar verip onu zayıflatmaması için bu maddelere dayanıklı fiberlerden üretilmesi gerekir. Hava filtrasyonunda kullanılan filtreler genellikle kimyasal tehditlerle karşılaşmadıklarından çoğunlukla Polyester (PE) fiberler kullanılır (Hardman, 2000).

3.1.2.5. Aşınma direnci

Filtre kullanımı sırasında birtakım sürtünme kuvvetlerine de maruz kalır. Bu kuvvetler zamanla filtreyi aşındırıp, filtre üzerinde açıklıkların oluşmasına sebep olabilir. Filtrasyon fonksiyonu tam olarak yerine getirilemez, filtrenin değiştirilmesi gerekir. Dolayısıyla aşınma dayanımı yüksek filtreler tercih edilir (Doğan, 2006).

3.1.3. Hava filtrelerinin performans özellikleri

Filtrelerden beklenen, filtreleme performansının yüksek olmasıdır. Filtre performans özellikleri, basınç kaybı, partikül tutma verimi ve ömürdür.

3.1.3.1. Partikül tutma verimi

Filtre performansını karşılaştırmada kullanılan parametrelerin başında partikül tutma verimi gelir. Filtre etkinliği basitçe filtre tarafından yakalanan kirliliğin, filtreye giren kirliliğe oranıdır ve şu şekilde ifade edilir (Denklem 3.3):

$$\% e = 100\left(\frac{M_u - M_d}{M_u}\right) \tag{3.3}$$

Burada, % e: filtrasyon verimi yüzdesi, M_u: filtreye giren partikül miktarı, M_d: filtreden çıkan partikül miktarıdır (Hutten, 2007). M_u ve M_d'nin birimi kaba ve ince filtrelerde gram, hassas filtrelerde adettir.

Partikül tutma verimi, havanın hızı, partikül boyutu, fiber çapı, gramaj, filtre kalınlığı, gözenek boyutu, homojenlik gibi birçok faktöre bağlıdır.

3.1.3.2. Basınç kaybı

Filtrenin, filtreleme işlemi başladıktan sonra mümkün olan en yüksek basınç kaybına en uzun sürede ulaşması istenir. Bu özellik, partikül tutma kapasitesine yani filtrenin ömrüne etki eder. Filtre tam olarak dolmamış olsa bile, filtrede ulaşılabilecek en yüksek basınç kaybı değeri, filtre için temizleme veya değiştirme zamanının geldiği anlamına gelir. Daha kalın fiberlerden üretilmiş, daha büyük gözeneklere sahip filtrelerin geçirgenlikleri yüksek olduğundan daha düşük basınç kaybına sahiptir (Doğan, 2006).

Basınç kaybı, bilhassa gaz maskelerinin testinde önem arz eder, çünkü gaz maskelerinin kullanılmasında üfleyici yoktur, kişi kendi çabasıyla nefes almaktadır. Bu nedenle gaz maskeleri geçirgenliğinin mümkün olduğunca yüksek olması istenir.

3.1.3.3. Filtre ömrü

Filtrenin etkin kullanım ömrünü karakterize eder. Filtrenin partikül tutma kapasitesi ne kadar büyük ise, ömrü de o kadar yüksektir. Filtre kapasitesi, filtre ömrünü tamamladığındaki (belli bir basınç kaybı oluşana kadarki süre) toplam kütle artışı ile belirlenerek, şu şekilde hesaplanır (TS ISO 5011: 2002):

$$\Delta m_t = \frac{t_1}{t_T} * \Delta m_{UT} \qquad (3.4)$$

Burada Δm_t, her bir zaman aralığı sonunda kütledeki artışını, t_1 aralığın sonundaki toplam zamanı, t_T deneyin sonundaki toplam zamanı, Δm_{UT} deneyin sonunda, denenen ünitenin kütlesindeki toplam artışı ifade etmektedir (Doğan, 2006).

3.2. Hava Filtrelerinin Sınıflandırılması

Hava filtreleri farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Hutten'in (2007) yaptığı çalışma, farklı filtre yapıları kullanılarak moleküler boyutta filtrelemenin nasıl gerçekleştiğini açıklamıştır. Elektrik akımı vererek filtreleme etkinliğini arttıran elektro filtre, mikrop öldürücü maddenin emdirilmesi veya filtrenin içine katılarak kullanılmasıyla elde edilen antimikrobiyal filtre, aktif karbon gibi maddelerle koku moleküllerini havadan ayıran filtreler, örnek olarak verilebilir. Hava filtreleri, filtre yapısına göre, performansa ve filtreleme mekanizmasına göre şöyle sınıflandırılabilir.

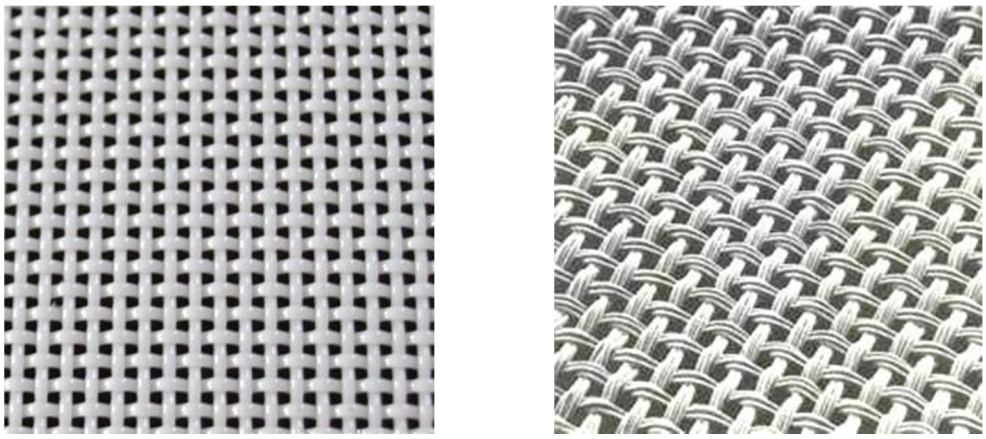
3.2.1. Filtre yapısına göre sınıflandırma

Hava filtrelerinde genellikle tekstil esaslı filtreler kullanılır. Tekstil esaslı filtreler dokuma filtreler ve keçeler olmak üzere iki kategoride incelenebilir.

3.2.1.1. Dokuma filtreler

Dokuma filtreler, uzun ipliklerin dokunması ile elde edilir. Gramajları 20-500 g/m² arasında değişir, mukavemetleri yüksektir. Dokuma filtreler düzenli gözenek boyutuna sahiptir (Hardman, 2000). Dokuma filtrelerin kalınlığının küçük, gözenek boyutunun büyük olmasından dolayı partiküller yüzey filtrasyonu mekanizmasıyla yakalanır. Yüzey filtrasyonunda gözenek boyutundan daha büyük partiküller yüzeyde tutulur, küçük partiküller filtrede tutulmadan geçer. Yüzey filtrasyonu nedeniyle dokuma filtre gözenekleri kısa sürede tıkanır. Dokuma filtrelerin gerek kısa sürede tıkanması gerekse keçelerden pahalı olması nedeniyle hava filtrasyonunda tek başına kullanılmaz. Dokuma filtreler, keçelerle birlikte kompozit filtre temininde veya ince filtreleri takviye etmek amacıyla kullanılır.

Dokuma filtreler Monofilament ve Multifilament olmak üzere iki ayrı şekilde karşımıza çıkar. Monoflament tek iplikçiğin, multifilament ise, birden fazla iplikçiğin birbirine sarılması ile oluşan ipliğin dokunmasıyla oluşur (Şekil 3.2 a,b).



(a) (b)

Şekil 3.2. Dokuma filtre türleri (a) monofilament (b) multifilament (Anonymous, 2013a)

3.2.1.2. Keçeler

Polietilen (PE), Poliamid (PA), Polipropilen (PP), Poliakrilonitril (PAN) gibi çeşitli sentetik polimerlerden elde edilen keçeler, çok fazla gözeneğe sahip olduklarından dokuma filtrelere göre daha yüksek akış hızlarına izin verirler. Keçeler kalın ve gözenekli olduğundan derinlik filtrasyonunda etkindir. Özellikle hava filtrasyonu uygulamalarında sıkça kullanılırlar. Yerine getirdikleri fonksiyonlara

karşılık, maliyetlerinin az olması onları tercih edilir hale getirir (Doğan, 2006). Keçelerden ayrıntılı olarak Bölüm 3.6'de bahsedilmiştir.

3.2.2. Filtre performansına göre sınıflandırma

Filtreler, performans testleri yapılarak sınıflandırılır. Bu amaçla CEN tarafından hazırlanan EN 779 ve EN 1822 standartları ile ABD'nin hazırladığı tavsiye niteliği taşıyan standartlar kullanılır.

İlk hava filtresi test standardı ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers-Amerikan Isıtma-Soğutma-İklimlendirme Mühendisleri Derneği) tarafından 1968 yılında yayınlanmıştır. Bu standart, filtreyi gerçek kullanımda etkileyen koşullar göz önünde bulundurularak, devamlı güncellenmiştir.

Filtreler test edilmeden önce elektostatik çekim etkisinin giderilmesi gerekir. Fiberlerin üzerindeki çekim kuvvetinin yok edilmesi amacıyla birkaç saat dizel sisine (diesel fume) maruz bırakılır (Gustavsson, 2003). Böylece, filtre üzerinde elektrostatik çekim etkisi giderilmiş olur.

Avrupa standartlarında filtre performans sınıflandırması, EN 779 (Genel havalandırma için partikül hava filtreleri standartı) ve EN 1822 (Yüksek Etkinlikli Hava Filtreleri Standardı)'na göre yapılmıştır.

EN 779'da kaba filtreler, yakalanan sentetik toz ağırlığı ortalamasının yüzdesine (A_m) göre G1-G4 sınıf aralığında; orta ve ince filtreler ise atmosferik toz tutma verimliliği ortalamasının yüzdesine (E_m) göre M5 ve M6 ile F7-F9 aralığında sınıflandırılmaktadır (Çizelge 3.1).

2012 yılında yayımlanan EN 779'a göre partikül tutma testinde, 0.2-3 μm arasındaki sentetik partiküller (DEHS sisi, Di-ethyl Hexyl-Sebacat), 0.944 m^3/h debide akan temiz havanın içine gönderilir. Burada, temiz hava akışı birim metrekare başına 0.24-1.5 m^3/h arasında olabilir, ancak genellikle 0.944 m^3/h kullanılmaktadır. Partiküller birim hacim başına örneğin 70 g olacak şekilde karıştırılır. Deneye başladıktan hemen sonra basınç kaybı ve partikül tutma verimi ölçülür. Deney sırasında yakalanan partikül miktarı ölçülerek partikül yakalama verimi hesaplanır. Basınç kaybı değeri kaba filtrelerde 250 Pa, orta ve ince filtrelerde 450 Pa oluncaya kadar deneye devam edilir. Basınç kaybı bu değerlere ulaştığı anda deney sonlandırılır. Deney sonunda yakalanan partikül miktarı filtre tartılarak hesaplanır. Şayet filtrede yakalanan partikül ağırlığının,

filtreye giren partikül ağırlığına oranı, 0.9'dan küçük veya eşit ise test filtresinin kaba filtre olduğu anlaşılır. Bu oran aynı zamanda A_m'dir. A_m'nin sonucuna göre Çizelge 3.1 kullanılarak kaba filtrenin hangi sınıfta olduğu belirlenir. Şayet bu oran 0.9'dan daha büyükse test numunesinin orta veya ince filtre olduğu tespit edilir. Orta veya ince filtre sınıflandırması için optik tanecik sayıcı ile ölçme işlemi yapılır. Optik tanecik sayıcı (particle counter) ile partikül ölçümü, hava filtresine gönderilen lazer ışının partiküle temas etmesiyle yolunu değiştirmesi, yolu değişen ışının da bir reflektör vasıtasıyla toplanarak dedektörle algılanması esasına dayanır. Böylece filtrenin yakaladığı partikülün boyutu ve yeri tespit edilmiş olur. Orta ve ince filtrelerde 0.4 μm çapındaki partiküllerin yakalanma verimi optik partikül sayıcı ile ölçülerek tespit edilir. Bu ölçüm sonucuna göre, yakalanan partikül sayısının, filtreye giren partikül sayısına oranı (E_m) $0.4 \leq E_m < 0.8$ orta kalite filtre olduğu anlaşılır. Orta sınıf filtre, ölçüm sonucuna göre M5 veya M6 olarak sınıflandırılır. Şayet bu oran, $E_m \geq 0.8$ ince filtre olarak adlandırılır ve ölçülen değere göre F7-F9 aralığında sınıflandırılır. Çizelge 3.1'deki asgari verim: Filtrasyon başlangıcındaki veya test süresince partikül tutma verimini ifade etmekte olup sözkonusu test numunesinin her iki verimi asgari verimden daha küçük olamaz. Dolayısıyla ince filtreler hem asgari verimi, hem de % E_m değerini sağlamalıdır.

Çizelge 3.1. Kaba ve ince filtrelerin sınıflandırılması (EN 779-2012)

Grup	Sınıf	ΔP_{max} (Pa)	% A_m	% E_m	% Asgari verim
Kaba	G1	250	$50 \leq A_m < 65$	-	-
	G2	250	$65 \leq A_m < 80$	-	-
	G3	250	$80 \leq A_m < 90$	-	-
	G4	250	$A_m \geq 90$	-	-
Orta	M5	450	-	$40 \leq E_m < 60$	-
	M6	450	-	$60 \leq E_m < 80$	-
İnce	F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$	35
	F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$	55
	F9	450	-	$95 \leq E_m$	70

Çok küçük partiküllerin filtrelenmesinde, EN 1822 standardı kullanılmaktadır. EN 1822 standardında filtreler, EPA filtreden (Efficiency Particulate Filter-Etkin Partikül Yakalayan Filtre), HEPA filtreden ve ULPA filtreden (Ultra Level Particule Air Filter-Ultra Düşük Partikül Yakalayan Hava Filtresi) oluşmaktadır (Çizelge 3.2). Çizelge 3.2'de tüm filtre değeri, filtredeki her bir noktanın optik okuyucu ile partikül taraması yapılarak sonuçların analiz edilmesiyle elde edilen asgari verimi; lokal değer,

filtredeki her bir noktanın optik okuyucu ile partikül taraması yapılarak sonuçların ayrı ayrı (lokal olarak) analiz edilmesiyle elde edilen asgari verimi ifade etmektedir. Sızıntı terimi ise filtrenin yakalayamadığı, filtreden geçen partikül sayısını belirtmektedir.

Çizelge 3.2. Hassas filtrelerin sınıflandırılması (EN 1822-2009)

		Tüm filtre değeri		Lokal değer	
Grup	Filtre sınıfı	Tutma verimi %	Sızıntı %	Tutma verimi %	Sızıntı %
EPA	E10	85	15	-	-
	E11	95	5	-	-
	E12	99.5	0.5	-	-
HEPA	H13	99.95	0.05	99.75	0.25
	H14	99.995	0.005	99.975	0.025
ULPA	U15	99.9995	0.0005	99.9975	0.0025
	U16	99.99995	0.00005	99.99975	0.00025
	U17	99.999995	0.000005	99.9999	0.0001

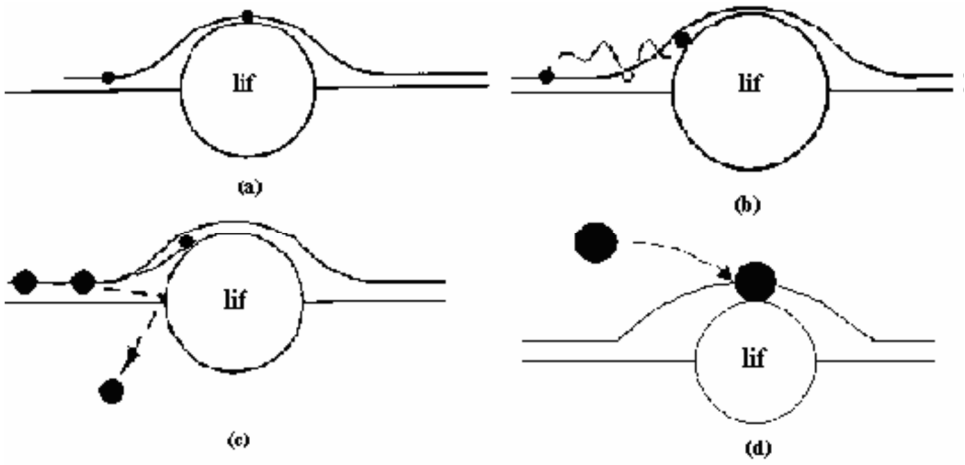
Partikül tutma testi, hassas filtreler için EN 1822'ye göre yapılır. Partikül tutma testi, MPPS (Most Penetrating Particle Size - Ençok Nufüzeden Partikül Boyutu) ismi verilen ve filtreden en çok geçen partikül boyutu olarak tanımlanan 0.1-0.3 μm aralığındaki partiküller kullanılır. Bunun için, MPPS boyutunda DEHS sıvısı hava içine gönderilerek filtre önünde ve arkasında bulunan partikül sayıcılarla filtreye giren ve filtreden çıkan partikül miktarı lokal olarak tespit edilir. Lokal olarak ölçülen partikül sayısı ile lokal partikül tutma verimi hesaplanır. Lokal partikül veriminden elde edilen sonuçların analiz edilemesiyle tüm filtrenin partikül tutma verimi hesaplanır. En düşük lokal verim ve tüm filtre verimi kullanılarak hassas filtre sınıfı tayin edilir. Örneğin en düşük lokal partikül yakalama verimi %94, tüm filtre partikül yakalama verimi %96 olan bir hassas filtre E11 sınıfıdır.

3.3. Partikül Yakalama Mekanizmaları

Hava filtrelerinde, fiberlerin partiküllerin yakalaması çeşitli mekanizmaların yardımı ile gerçekleşir. Bu mekanizmalar yakalama işlemini tek başlarına gerçekleştirebildikleri gibi, iki veya daha fazla mekanizma aynı anda etki edebilir. Bu mekanizmalar, durdurma, atalet etkisi, zigzag (brownian), yerçekimi kuvvetleri ile elektrostatik etkidir.

3.3.1. Durdurma mekanizması

Partikül, kendi çapından daha küçük bir uzaklıktan geçmeye çalışması durumunda fiber tarafından yakalanır (Şekil 3.3a). Partikül fibere dokunarak fiber tarafından tutulur ve hava akımından kurtulur. Fiberin yanından, bir partikül çapından daha büyük bir mesafede geçen partiküller bu mekanizmaya dâhil olmazlar. Partikülün boyutu fiberin ne kadar yakınından geçebileceğini belirler (Adanur, 1995). Bu mekanizmanın filtrenin toplam partikül tutulmasına katkısı filtrenin paketlenme yoğunluğu (fiberler arası mesafe) değiştirilerek arttırılabilir veya azaltılabilir. Paketlenme yoğunluğu arttırılırsa, filtrenin derinliği boyunca boşluk hacmi azalır, böylece küçük partiküllerin tutulma ihtimalleri artar. Durdurma mekanizmasının etkinliği fiber çapına bağlı, akış hızından bağımsızdır (Yang ve ark., 2002).



Şekil 3.3. Fiberlerin partikül yakalama mekanizmaları (a) durdurma, (b) brownian difüzyonu, (c) atalet etkisi, (d) yerçekimi etkisi (Adanur, 1995)

3.3.2. Atalet etkisi mekanizması

Bir hava akışı içerisinde büyük partiküller hareket ederken, ataletleri onların yönlerinde ani değişiklikleri engeller (Şekil 3.3c). Filtre ile partikül çarpışır ve tutunma gerçekleşir (Adanur, 1995).

3.3.3. Zigzag difüzyonu

Zigzag (Brownian) difüzyonu rasgele titreşim yapan küçük moleküllerin akış içerisindeki titreşimlerle yakalanmasıdır (Şekil 3.3b). Bu mekanizmanın oldukça yavaş hareket eden partiküller için ve ince fiberlerden oluşmuş kalın filtrelerden geçişte önemli bir partikülleri tutma mekanizması olduğu söylenebilir (Adanur 1995).

3.3.4. Yerçekimi kuvvetleri

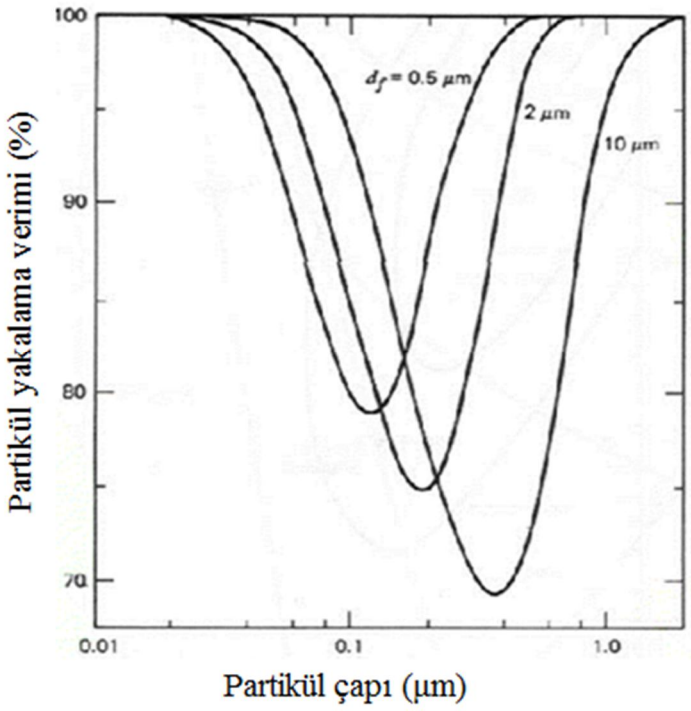
Bilhassa büyük partiküllerin filtrasyonunda görülen yerçekimi etkisiyle partikül yakalamada, filtreden geçen partikül yerçekimi etkisiyle çökelir ve bir fibere çarpışabilir (Şekil 3.3d). Bu mekanizma 50 μm den daha büyük çapa sahip partiküller için baskındır. Akışkan hızı artışı bu mekanizmanın verimini azaltır (Yang ve ark., 2002).

3.3.5. Elektrostatik etki

Sadece mekanik metodların kombinasyonu ile filtre edilen akışkandaki partiküllerin tutulması zordur. Bir partikül, elektrostatik alandan geçerse, kendisi ile zıt yüklü bir gövde üzerinde tutulur. Bu sebeple fiberlere üretimleri sırasında elektrostatik yükler verilerek partikülleri çekmesi sağlanabilir. Bu mekanizma küçük ve orta büyüklükteki partiküller için geçerlidir (Vaughn and Ramachandran 2002).

3.4. Partikül Yakalama Teorisi

Nanofiberler mikrofiberlerle karşılaştırıldıklarında, aynı basınç kaybında partikülleri durdurma mekanizmasıyla daha verimli yakaladıkları bilinmektedir. Şekil 3.4'de 10 cm/s hız, eşit basınç kaybı şartlarında kaymasız akışın gerçekleştiği bir sistemde fiber çapı (d_f), partikül çapı ve partikül yakalama verimi sunulmuştur. Şekilden de görüleceği gibi aynı basınç kaybı ile daha fazla miktarda partikül yakalanmış veya aynı filtreleme verimi daha küçük basınç kaybı ile gerçekleşmiştir. Yani eğrinin sola yukarı doğru ilerlemesi ki, bu da fiber çapının azalmasıyla gerçekleşir, daha küçük partiküllerin daha verimli tutulabileceğini göstermektedir (Graham ve ark., 2002). Şekil 3.4'de görüldüğü gibi, 0.5 μm çapındaki fiberlerden oluşan hava filtresinde 0.1 μm çapındaki partiküller %78 oranında yakalanmış iken, 10 μm çapındaki fiberlerden oluşan hava filtresinde bu oran %70'e düşmektedir.



Şekil 3.4. Değişen fiber boyutuyla yakalanan partikül oranının değişimi (Graham ve ark., 2002)

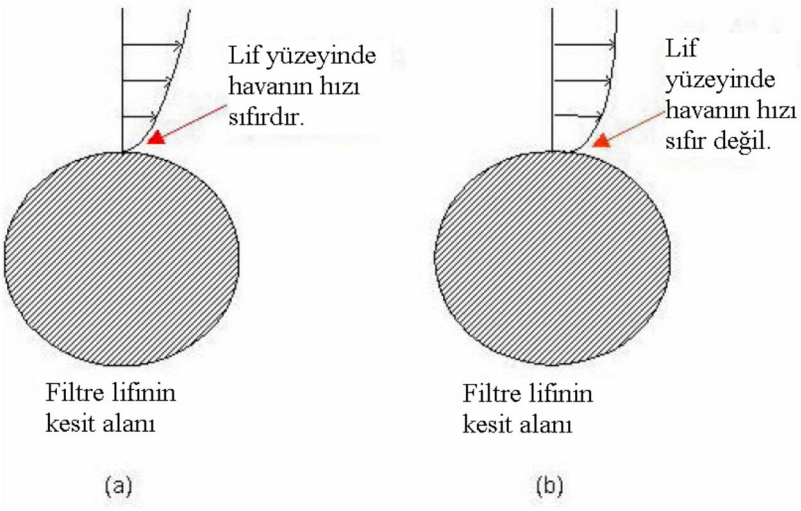
Nanofiberlerin kullanılması, fiber yüzeyinde gerçekleşen hava akışının kaymalı yahut kaymasız oluşunu önemsemeyi gerektirir. Genel filtrasyon teorileri, sürekli akışın olduğu bu nedenle hava veya partiküllerin fiber yüzeyinde kayma olmadan geçtiği yönündedir. Fakat fiber boyutlarının küçülerek hava molekülleri boyutlarına yaklaşması bu teoriyi geçersiz kılar. Bu nedenle kaymalı akış modeli kullanılır. Fiber yüzeyindeki hava moleküllerinin hareketlerinin durumunu tanımlamak amacıyla Knudsen sayısı denilen boyutsuz bir sayı hesaplanır (Graham ve ark., 2002).

$$K_n = \lambda / d_f \qquad (3.5)$$

Burada, λ: gaz serbest yolu, 0.066 μm (hava moleküllerinin devamlı olmayarak aldığı mesafe), d_f: fiber çapıdır. Knudsen sayısı $0.25>K_n>0.1$ aralığında kullanılabilir, bu aralığın dışında kesin sonuç vermez. Bu nedenle $d_f<0.5$ μm'den oluşan filtreler kaymalı akışa maruz olabilir. Yani hava, fiber yüzeyine geldiğinde Şekil 3.5b'de gösterildiği gibi hızı sıfır değildir. Fakat kaymasız akışta (Şekil 3.5a) fiber yüzeyinde havanın hızı sıfırdır (Graham ve ark., 2002).

Küçük fiberlerin yüzeyindeki hava moleküllerinin kaymasından dolayı, büyük fiberlere nazaran basınç kayıpları daha düşüktür (Şekil 3.5b). Ayrıca küçük fiberlerde

kaymalı akış olduğudan daha fazla hava/partikül hareket ederek difüzyon ve durdurma mekanizmaları ile yakalanır. Böylece fiber çapının 0.5 µm altına düştüğünde aynı basınç kaybı ile daha fazla partikül yakalanır (Graham ve ark., 2002).



Şekil 3.5. Fiber yüzeyindeki hava/partikül hızı profilleri (a) kaymasız akış (non-slip flow) (b) kaymalı akış (slip flow) (Graham ve ark., 2002).

3.5 Filtrasyon Mekanizmaları

Hava filtrasyon mekanizmaları, genel olarak yüzey filtrasyonu, derinlik filtrasyonu ve kek filtrasyonu olmak üzere üç kategoride incelenebilir.

3.5.1. Yüzey filtrasyonu

Partikül boyutlarının, filtre gözenek boyutlarıyla aynı olduğu durumda ortaya çıkan yüzey filtrasyonu; aslında filtreleme işleminin idealize edilmiş formudur. Gözenek boyutlarından daha büyük olan partiküller, zaten filtre yüzeyinde tutulur. Gözenek boyutu ile aynı boyutta olanlar ise, gözeneklere sıkı bir şekilde tutunur ve tıkanma denilen olayı meydana getirir. Bu tıkanma ters akışla bile düzeltilemez. Filtrenin kullanımı sırasında, akış hızı azalır ve aşırı basınç kaybı meydana gelir ve filtrasyon çevrimi zamansız tamamlanmış olur (Doğan, 2006).

3.5.2. Derinlik filtrasyonu

Derinlik filtrasyonu, rastgele yerleşmiş fiberlerden oluşan kalın bir tabakanın meydana getirdiği filtre ortamında gerçekleşir. Gözenek boyutları filtre edilen partikül

boyutlarından daha büyüktür. Partiküller akış ile filtre içine doğru hareket ederler. Filtre kalın olduğu ve fiberler filtre içerisinde düzensiz yerleştiği için yeterli sayıda çarpışma sağlanabilir. Partiküllerin fiberlere çarpması ile durdurma gerçekleşir. Derinlik filtrelerinde de belirli bir süre sonra tıkanma gerçekleşir (Doğan, 2006).

Keçeler, derinlik filtrelerine örnektir. Yüzey filtrelerine göre daha düşük verimliliğe sahip olmalarına rağmen, ucuz olmaları, ön ve esas filtre olarak kullanılabilmeleri, yüksek akışkan hızına izin vermeleri ve filtre aparatına kolay yerleştirilmeleri bakımından avantajlıdır (Duran ve Öneş 1993).

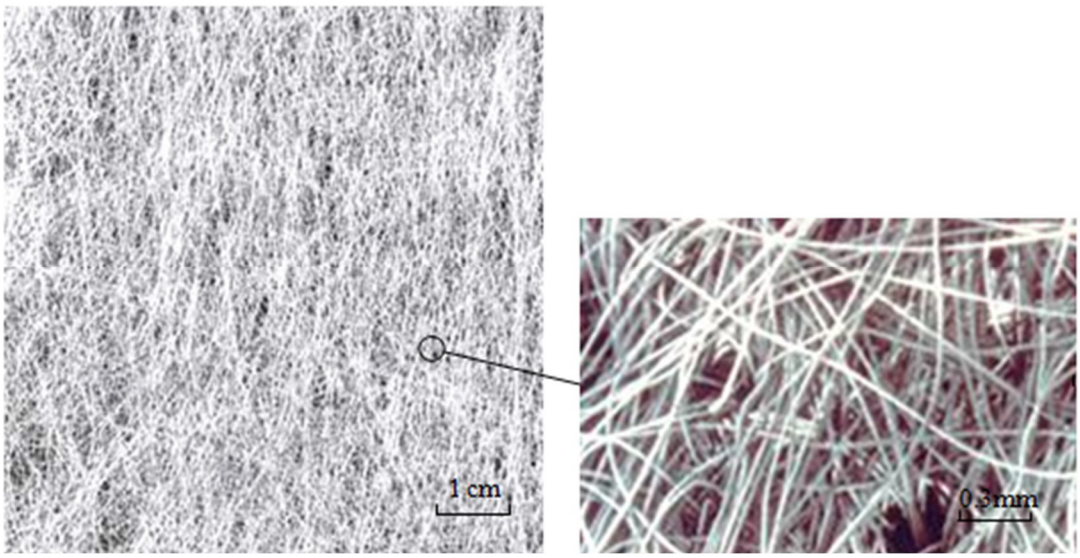
3.5.3. Kek filtrasyonu

Hem yüzey hem de derinlik filtrelerinde, partiküllerin filtre gözeneklerini tıkamasına rağmen filtrasyon devam ettiğinde; partiküller filtre üzerinde tabakalar halinde filtre kekini oluşturur. Filtre keki oluşumunun iki önemli etkisi vardır. Birincisi; kek akışa karşı direnci arttırır ve kek kalınlaştıkça akış hızı düşer. Filtrenin temizlenme zorunluluğu ortaya çıkar. İkincisi, asılı partiküllerin, filtreden önce filtre kekini oluşturan partiküllerin arasındaki küçük boşluklardan geçmek zorunda olmasıdır. Bu boşluklar genellikle filtrenin kendisinden daha küçük boyutta olduğu için, filtrenin kendisinden daha etkili bir filtreleme oluştururlar. Bu tip filtrasyon da kek filtrasyonu olarak bilinir (Duran ve Öneş 1993).

3.6. Keçeler ve Üretim Metotları

Etkin bir filtrasyon için genellikle keçeler kullanılmaktadır. Bu nedenle keçe ürünlerin tanımı yapılarak kısaca üretim yöntemleri üzerinde durulacaktır.

Keçeler dokunmayan ya da örülmeyen elyaf esaslı düzlemsel ağlardır (Şekil 3.6). Pek çok farklı şekilde karşımıza çıkan bu ürünler, rastgele veya düz yönlenmiş fiberlerin tabaka veya yığın halinde sürtünme, kohezyon veya adezyonla birleşerek oluşturulan üründür. Rastgele veya düzgün fiberlerin oluşturduğu kâğıt, dokunmuş, örülmüş, dikişli bağlanan fiberler veya keçeler bu tanımın dışındadır. Filtre özelliklerinin arttırılması için, mekanik (sarılma, katlama, düzleştirme, zımbalama gibi) ve/veya kimyasal işlemlere (örneğin kaplamalar, antimikrobiyal ajanlar vs.) maruz bırakılabilir (Hutten, 2007).



(a) (b)

Şekil 3.6. Filtre olarak kullanılan keçe a) makro boyut, b) mikro boyut (Anonymous, 2013b)

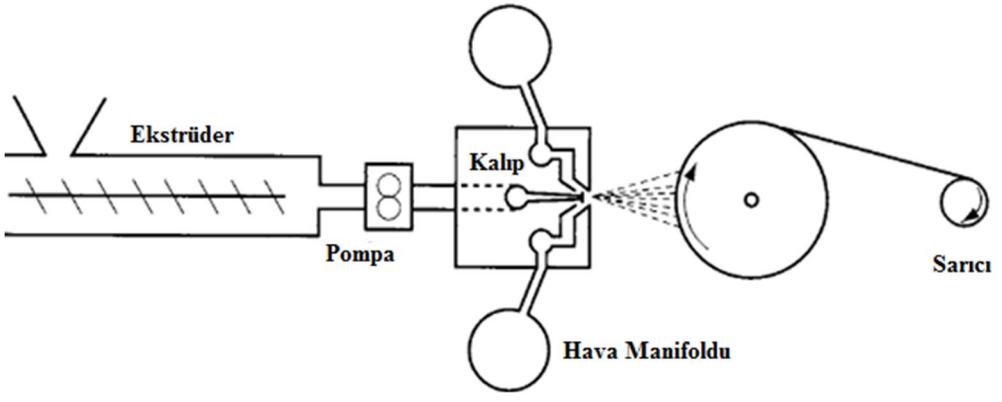
Keçeler, genellikle üretim tekniğine göre kuru ve yaş yatırma olarak sınıflandırılır. Kuru üretim prosesinde fiber yığını hava üflenerek biçim alır, ıslak proseste ise ağlar ıslak bir ortamda şekle girer. Islak yatırma prosesi kâğıt yapma prosesine benzerdir ve makinelerden çıkan filtre tabakası ıslaktır. Filtre kâğıdı, çok gözenekli olup, ağlar uzun fiberlerden oluşmaktadır. Yaş üretim metodu ile üretilen keçelere nazaran daha etkin filtrasyon sağlayan kuru üretim yöntemlerinden birincisi ergitme-üfleme (meltblown), ikincisi spunbond üretim metodudur. Kuru ve yaş üretim metotlarından başka, günümüzde hızla gelişen ve daha küçük nanofiber üretimine izin veren elektro-eğirme metodu da keçe tekstili üretim metotlarından biridir (Hutten, 2007).

Keçeler, hangi üretim metoduyla üretilmiş olursa olsun serbest fiber yığını birbirine beş farklı yöntemle bağlanır. Bu yöntemler: dikiş bağlama, iğne vuruşu ile bağlama, ısı etkisiyle bağlama, su jetiyle bağlama ve kimyasal bağlamadır. Dikiş bağlama prosesiyle, fiber yığını bir dikiş iğnesi ve iplik kullanılarak birbirine bağlanır. İğne vuruşu ile fiber bağlama, belli bir çentik formuna sahip yüzlerce-binlerce iğne fiber yığınına defalarca vurarak fiberlerin birbirine bağlanması esasına dayanır. Isı etkisiyle fiber bağlama prosesinde genellikle düşük ergime sıcaklığına sahip termoplastik fiber yığınını sağlamlaştırmak için kullanılır. Su jetiyle fiber bağlama prosesinde, yüksek hızlı su fiber yığınına püskürtülerek fiberlerin birbirine dolaşması sağlanır. Kimyasal

reçineyle bağlama prosesinde reçine veya lateks tipi yapıştırıcılar kullanılarak fiber yığını birbirine bağlanır (Hutten, 2007).

3.6.1. Ergitme-üfleme prosesi

Ergitme-üfleme (Meltblown) prosesinde fiber ağları ergimiş polimerden meydana gelir. Bu proses, termoplastik polimerlerin bir kalıpta ekstrüde edilmesi ile uygulanır (Şekil 3.7). Bu yöntemle, termoplastik polimerlerden, düşük maliyetle büyük miktarda nanofiber ağların elde edilmesi amaçlanmaktadır (Süpüren ve ark., 2007). Spunbond prosesinden farkı, polimerin sıcak ve hızlı hava vasıtasıyla kalıptan silindire gönderilmesidir. Böylece, spunbond prosesinden daha ince (genellikle 2-4 μm) fiberler elde edilir. Fakat ergitme-üfleme prosesiyle elde edilen ağlar daha yumuşak ve zayıf olduğundan kompozit yapılarda veya tabakalar halinde ağları desteklemekte kullanılmaktadır. Ergitme-üfleme ağlarının düzgün ve küçük çapa sahip fiber yapısı, yüksek verimli sıvı ve hava filtrasyon uygulamalarında onu ideal bir filtre yapar. Bu prosesle, daha küçük çapa sahip fiberler üreterek daha yüksek verimli filtrasyon elde edilebildiği gibi, birden çok malzemeden oluşan fiberler de oluşturulabilir (Hutten, 2007). Bu yöntem daha ziyade mikrofiber üretiminde kullanılmaktadır. Polimerden doğrudan filtre yapılmasına izin veren bu yöntemin, teknik ve ekonomik anlamda fiber çapı farklılaşma ve üretim ekipmanı maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajları bulunmaktadır (Süpüren ve ark., 2007).



Şekil 3.7. Ergitme-üfleme prosesi şematik şekli (Hutten, 2007)

Ergitme-üfleme prosesi şu şekilde uygulanır: Bir ekstrüderde ergimiş ve homojen şekilde karışmış olan polimer bir kompresör vasıtasıyla yüksek hıza sahip (ses hızının 0.5 ila 0.8 katı) sıcak hava (215-340 °C) ile beslenen bir kalıba gönderilir. Bu

kalıp uzun ve ince yüzlerce deliği bulunan bir kalıp olabileceği gibi, boydan boya açık bir delik şeklinde de olabilir. Deliklerden çok yüksek hızla çıkan ergimiş polimerin, toplayıcı giderken ikincil bir hava sirkülasyonu ile soğutularak büzüşmesi ve birbirine dolaşması sağlanır. Toplayıcı genellikle saat yönünde dönen bir tamburdur. Bu proses daha düzgün fiberlerden oluşan ağ yapısının üretilmesini mümkün kılar. Bu teknolojide yaygın olarak PET, PP ve Poliamid 6 (PA 6) kullanılır (Hutten, 2007).

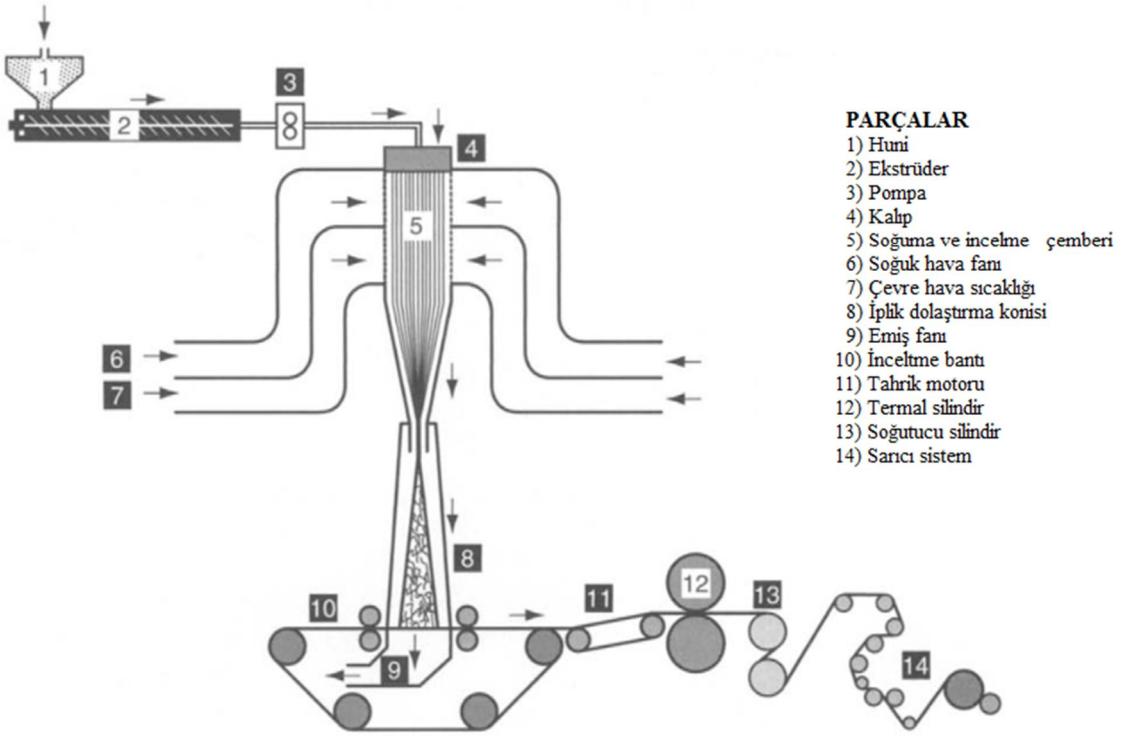
3.6.2. Spunbond

Spunbond prosesinde sıcaklık etkisiyle ergimiş polimerler kullanılabileceği gibi bir solventle çözülmüş polimerler de kullanılabilir (Jirsak ve Wadsworth 2000).

Spunbond yöntemi, ergitme üfleme yöntemi ile teknik olarak çok benzemektedir. Aradaki fark, fiberleri inceltmek için kullanılan havanın hacmi ve sıcaklığıdır. Bu fark, fiberlerin fiziksel özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Ergitme-üfleme metodunda fiberlerin gerdirilmesi için yüksek miktarda hava kullanılmaktır. Spunbond yönteminde ise polimer soğuyup katılaştığında germe işlemi yapılmaktadır (Şekil 3.8). Bu sebeple üretilen fiberler daha kalındır. Spunbond prosesi ile elde edilen fiber çapı ortalama 20 μm'dur. (Süpüren ve ark., 2007). Çizelge 3.3'de farklı keçe üretim yöntemleri ile elde edilen fiber çapları ve yüzey alanı kıyaslanmaktadır (Grafe ve Graham, 2002).

Çizelge 3.3. Farklı üretim yöntemleriyle üretilen keçe özellikleri (Grafe ve Graham, 2002).

Fiber üretim yöntemleri	Fiber çap aralığı (μm)	Yüzey alanı (m^2/g)
Elektro-eğirme	0.04 - 2	20
Ergitme-Üfleme	2 - 10	2
Spunbond	15 - 40	0.2



Şekil 3.8. Spunbond prosesi şematik şekli (Hutten, 2007)

3.6.3. Islak yatırma metodu

Islak yatırma (Wet Laid) prosesiyle yapılan tüm filtreler, kâğıt filtre olarak tanınır. Filtrasyon uygulamalarında genellikle ıslak yatırma prosesiyle üretilen cam mikrofiberler kullanılır. Islak yatırma makinesinde fiberler 5 metreyi aşan genişlikte ve dakikada 300 metreyi aşan hızlarda sarılır. Fiber uzunluğu genellikle 6 mm veya daha kısa olmakla birlikte endüstriyel ürünlerde 35-50 mm uzunluğa kadar çıkabilir. Islak yatırmada, fiberler çoğunlukla reçineyle birbirine bağlanır. Reçine ya fiber süspansiyonu içine veya ürün forma girdikten sonra ağ içine katılarak, birbirine bağlanır. Bazen de ıslak fiberler birbirine termal olarak bağlanır. Bu işlem, PVC ve diğer düşük ergime sıcaklığına sahip polimerleri kapsar (Hutten, 2007).

4. NANOFİBERLER

Günümüzde nano bir ön ek olarak, herhangi bir fiziksel büyüklüğün milyarda birini ifade etmek için kullanılır. Örneğin: Metre biriminin önünde kullanılan nano ifadesi bir metrenin milyarda birini ifade eder. Fiber terimi ise, bir boyutu diğer boyutuna göre çok büyük olan malzemeleri ifade eder. Nanofiber terimi ile nano boyuttaki fiberler anlaşılır. 100 nm çapındaki bir nanofiber saç telinin yaklaşık binde biridir.

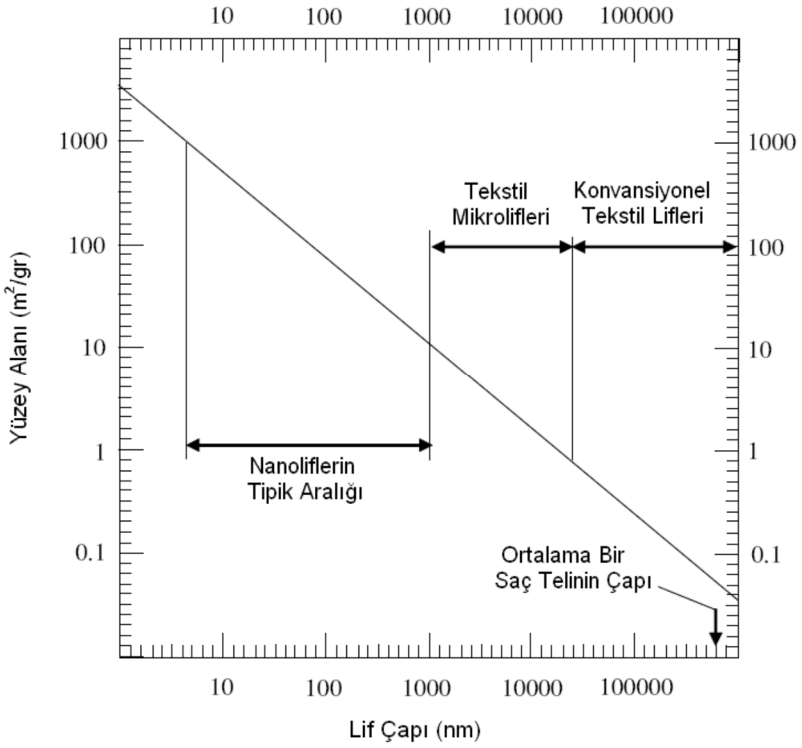
4.1. Nanofiber Özellikleri

Nanofiberler, çeşitli yöntemlerle üretilen iki veya üç boyutlu nano yapılarla kıyaslandıklarında, oldukça uzundurlar. Nanofiberler, genellikle çapı 1 µm'dan daha küçük boyuta sahip ince uzun iplikçiktir. Bu iplikçiğin boyu üretim prosesine göre birkaç mikrometreden birkaç kilometreye kadar çıkabilir.

Nanofiber teknolojisiyle, birim ağırlıktaki ya da hacimdeki yüzey alanı oldukça artar. Fiberler tek tek toplanabilir ve özel yönlendirmelerle sıralandırılabilirse, matristeki fiberlerin hacme oranında maksimuma ulaşacağından malzemenin mukavemeti çok ileri düzeye sahip olacaktır. Yüzey alanının ağırlığa ya da hacme oranının yükselmesi, fiberlerin çekiminden doğan hataların matrisle bağlanarak iyileştirilmesine de imkân tanıyacaktır (Daşdemir, 2006).

Nanoteknoloji, sentetik ve yarı sentetik polimerlerde teorikteki mukavemet değerini yakalama fırsatı verir. Günümüzde üretilen konvansiyonel fiberlerde, fiber formunda sağlanabilecek kristallik yüzdesi için önemli sınırlamalar vardır. Örneğin bir karbon karbon bağının gerçek kalınlığı yaklaşık olarak 1 nm civarındadır. Eğer 5 nm çapında bir fiber üretilirse, molekül zincirleri çok yüksek kristalik davranış göstermeye zorlanacaktır. Bu durumda üretilen fiberin mukavemeti ideal olarak, polimerin molekül zincirleri içerisinde bulunan karbon-karbon bağlarının mukavemeti ile ifade edilir. Oysa konvansiyonel fiber üretim tekniklerinde, örneğin teorik mukavemeti 120-150 GPa olan polyesterin üretim sonrasında mukavemet değeri yaklaşık 20 GPa olmaktadır (Üstündağ, 2009). Bu şu şekilde izah edilebilir: Malzemenin boyutu küçüldükçe içerisindeki yabancı bileşikler/atomlar ve düzensizlikler (boşluklar vs.) azalmaktadır. Dolayısıyla fiberlerin boyutu küçültülerek içerisindeki boşlukları ve yabancı atom/bileşikleri azaltılmış ve yüksek kristalliğe sahip fiberler elde edilmiş olur.

Şekil 4.1'de fiber çapının yüzey alanına göre değişimi gösterilmiştir. Buna göre yüzey alanları, nanofiberler için 1000-10 m^2/g, tekstil mikrofiberler için 10-1 m^2/g, konvansyonel tekstil fiberleri için $1m^2/g$'dan daha küçüktür (Ko, 2004)



Şekil 4.1. Fiber çapının yüzey alanına göre değişimi (Ko, 2004)

Sonuç olarak, nanofiberlerin küçük boyutları, düzgün zincir yerleşimi ve kristalliğinin geleneksel yöntemlerle üretilen mikrofiberlerden daha iyi olduğundan, yüksek elektrik iletimi, yüksek yüzey alanı, çok küçük gözenek boyutu, kemik hücrelerine uygunluk gibi faydaları beraberinde getirdiğinden başta filtrasyon olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır.

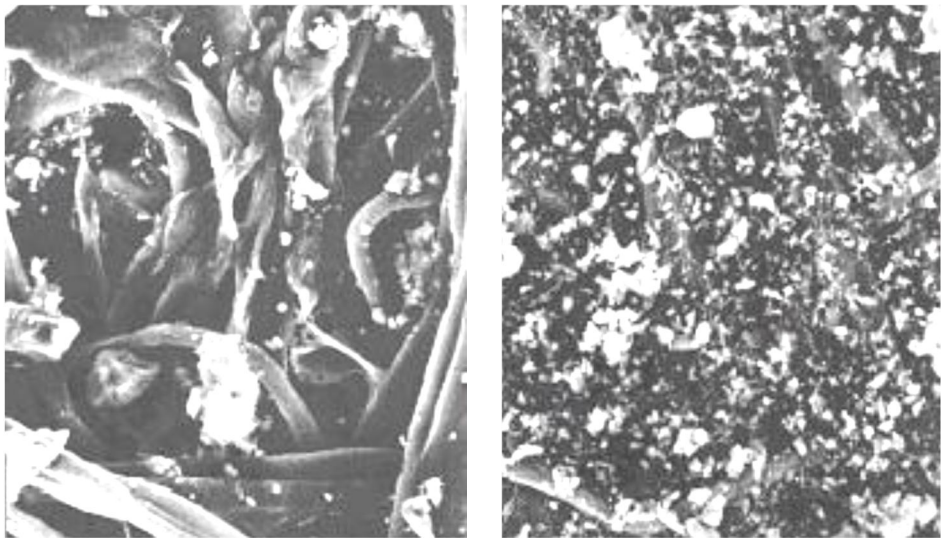
4.2. Nanofiber Kullanım Alanları

4.2.1. Hava filtreleri

Fiber inceliği, filtre verimliliği ile yakından ilişkilidir ve filtre performansını belirleyen en önemli özelliktir. Filtrasyon uygulamalarında nanofiber yapıların diğer materyallere göre en büyük avantajları, içerdiği çok küçük fiberler ve gözenekler, çok geniş yüzey alanı, bunlara bağlı olarak yüksek filtrasyon verimliliğidir. Nanofiber

filtreler, hava, su, kan gibi akışkanlardan çok küçük partiküllerin filtrasyonuna olanak sağlamaktadırlar (Kozanoğlu 2006).

Filtrasyon verimliliği ve filtre malzemesinin tutma kapasitesi, filtredeki fiberlerin çapları ile ters orantılıdır. Nanofiberlerin çok yüksek yüzey alanı ve yüksek yüzey kohezyonu sayesinde, 0.5 μm'den daha küçük partiküller kolaylıkla tutulabilmektedir. Şekil 4.3'te selülozik bir filtre ile selüloz/nanofiber kompozit filtrenin partikül tutma özelliklerinin kıyaslanabileceği bir SEM (Scanning Electron Microscopy-Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü sunulmuştur. Görüldüğü gibi nanofiltre selüloz filtreden daha fazla partikül tutmuştur (Graham ve ark., 2002).



(a) (b)

Şekil 4.3. Farklı filtreler üzerine toplanan tozlar (a) Selülozik filtre üzerindeki tozlar (b) Nanofiber filtre üzerindeki tozlar (Graham ve ark., 2002)

4.2.2. Diğer kullanım alanları

Delaware Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, özellikleri değiştirilmiş kollajen gibi, doğal polimerlerden nanofiber doku iskeletleri üretmişlerdir. Doku mühendisliği uygulamalarında: poliglikolik asit (PGA), poli-L-kaprolaktam (PLCL), polilactik-co-glicolic acid (PLGA), kollajen tip II veya polilaktik asit gibi birçok malzeme kullanılabilmektedir. Örneğin, diklormetan çözeltisinden elde edilen polilaktik asit nanofiberleri, kemik hücreleri için kullanılmaktadır. Bulgular hücrelerin kuvvetli bir şekilde fiberlere tutunduğunu ve fiberler içerisinde büyüdüğünü göstermiştir (Üstündağ, 2009).

İyi bariyer özellikleri ve oksijen geçirgenliği nedeniyle PU (poliüretan) ve PCL polikaprolaktam, yara örtülerinde sıkça kullanılan malzemelerdir. Araştırmalar, çoğu PU olan yarı geçirgen yara örtülerinin, yara iyileşmesini artırdığını göstermiştir. Khil ve ark. (2003), poliüretan polimerini kullanarak elektro-eğirmeyle elde ettikleri nanofiber yara örtüsünün performansını değerlendirmişlerdir.

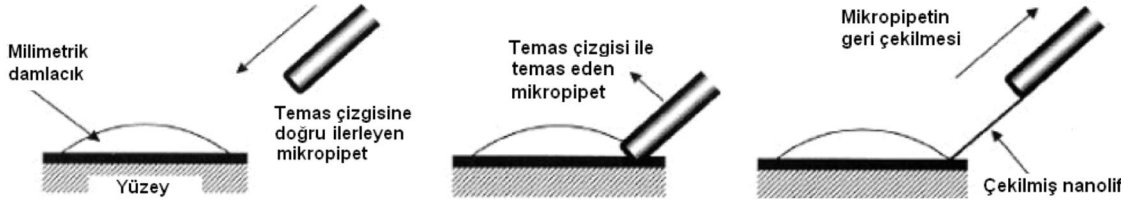
Ramakrishna ve ark. (2005), nanofiberin, ilaç salınımı, membran, doku iskeleti, koruyucu elbise, yara örtücü, kompozit malzeme, sensörler, batarya ve kapasitör üretimi gibi çok çeşitli alanlarda kullanıldığını bildirmiştir.

4.3. Nanofiber Üretim Yöntemleri

Nanofiberler, elyaf çekme, kalıp sentezi, fazlara ayrıştırma ve elektro-eğirme yöntemleriyle üretilir. Nanofiber üretiminde en çok kullanılan yöntem, elektro-eğirme'dir. Bu metodu diğer yöntemlere üstün kılan, prosesin sürekli ve tekrarlanabilir olmasıdır. Elektro-eğirme metodu ayrıntılı olarak 5. bölümde incelenmiştir.

4.3.1. Elyaf Çekme

Elyaf çekme (Drawing) yöntemiyle uzun ve tek nanofiberler elde edilebilir. İşlemde bir mikro manipülatör (mikroskop altında hassas işlem yapmaya yarayan bir cihaz) yardımıyla bir mikro pipet çözeltinin yüzey ile temas ettiği çizgiye daldırılır ve mikro pipet sıvıdan belirli bir hızla çekilir. Bu yöntemle 100 nm altında fiberler elde edilemediği gibi nanofiber çapı da kontrol edilemez. Kütlesel üretime de uygun değildir. İşlem şematik olarak şekil 4.4'de sunulmuştur. Çekme az ekipmana ihtiyaç duymasıyla avantajlı, fakat süreksiz bir işlem olması açısından pratikte uygulama alanı yoktur (Ramaknishna ve ark., 2005).

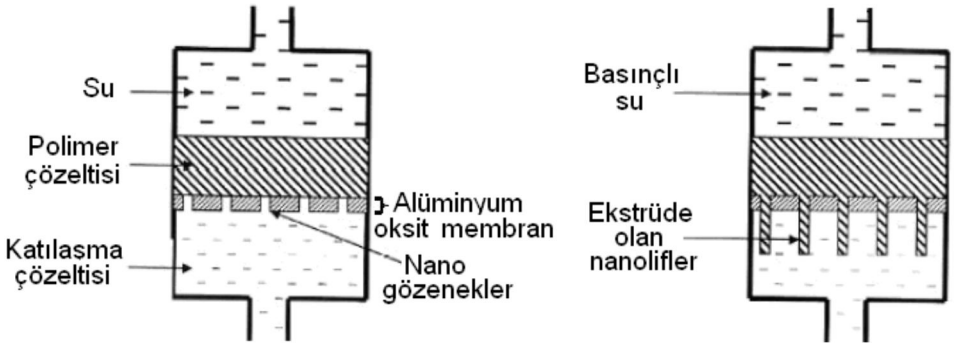


Şekil 4.4. Elyaf çekme yöntemiyle nanofiber üretimi (Üstündağ, 2009)

4.3.2. Kalıp sentezi

Kalıp sentezi (Template Seperation) yönteminde nanofiberler, nano gözenekli zarların gözeneklerinden geçirilen çeşitli özel malzemelerle elde edilirler. Membranlar 5-50 mm kalınlığında olup, silindirik gözeneklere sahiptir. Malzemeye ve gözeneğin kimyasal yapısına bağlı olarak, nano silindirler, nano boru (tüp) ya da fiberler şeklindedir (Jayaraman ve ark., 2004).

Kalıp sentezi, kütlesel üretime uygun değildir. Feng ve arkadaşları (2002), 513 nm çapında ve 10.7 μm boyunda PAN nanofiberleri sentezlenmişlerdir (Şekil 4.5). Bu çalışmada alüminyum oksit membran (kalıp) olarak kullanılmıştır. Kalıp içinde bir tarafta su ve polimer çözeltisi, diğer tarafta da katılaşma çözeltisi bulunur (Şekil 4.5a). Bu kalıpta su tarafına basınç uygulandığında hidrostatik etki sonucu polimer çözeltisi sıkışırarak alüminyum-oksit membrandaki gözeneklerden geçer, katılaşma çözeltisi içine ekstrüde olur. Burada katılaşan nanofiberler prosesin sona ermesiyle hazneden alınarak işlem tamamlanır (Şekil 4.5b) (Üstündağ, 2009).



Şekil 4.5. Kalıp sentezi metoduyla nanofiber üretimi (a) Nanofiber üretimi öncesi (b) Nanofiber üretimi sonrası (Üstündağ, 2009)

4.3.3. Elektro-eğirme

Elektro-eğirme yöntemi nanofiber üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir. Bölüm 5'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

4.3.4 Diğer üretim yöntemleri

Bu yöntemlerden başka fazlara ayırma ve moleküler boyutta birleşme üretim metodları da vardır. Fakat her iki yöntemin kütlesel üretime uygun olmadığı ve fiber çapı kontrol edilemediğinden bu bölümde yer verilmemiştir.

5. ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOFİBER ÜRETİMİ

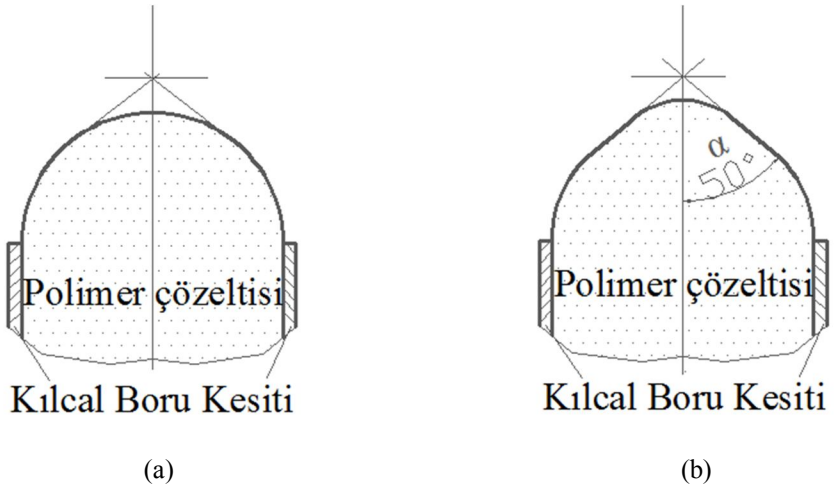
Elektro-eğirme polimerler, kompozitler ve seramikler gibi çok çeşitli materyallerden çok küçük fiberler oluşturmak için kullanılan basit ve etkili bir üretim tekniğidir. Bu teknik, elektriksel olarak yüklenmiş sıvı polimerin topraklanmış bir yüzey üzerinde sürekli fiber formunda konumlanması esasına dayanır (Andrady, 2008). Polimer esaslı nanofiber üretimi için en etkin yöntem elektro-eğirme yöntemidir. Elektro-eğirme, akışkanlar dinamiği, polimer kimyası, temel fizik, elektrik fiziği, makine ve tekstil mühendisliği disiplinlerini barındıran bir yöntemdir (Kozanoğlu 2006). Bu yöntemle pek çok polimerden çapları 3 nm 'den 1 μm ve üzerine kadar değişen kalınlıklarda sürekli nanofiberler elde edilmektedir (Huang ve ark., 2003).

Elektro-eğirme işlemi yeni bir teknoloji değildir. Bu yöntem 17. yüzyılda, William Gilbert'in manyetizma üzerine çalışmalarını sürdürürken tesadüfi bir şekilde elektro-manyetizmanın sıvılar üzerine etkisini gözlemlemesiyle ortaya çıkmıştır (Kataphinan, 2004). Yirminci yüzyılın başında, farklı çözeltileri inceleyen Zeleny, sıvının viskozitesi ile yüzey gerilimini yenmesi gereken, elektriksel gerilim arasında doğrudan bir ilişki olduğunu tespit etmiştir (Üstündağ, 2009) .

Elektro-eğirme yöntemiyle fiber üretimi ile ilgili önemli patentler, 1934 yılında Anton Formhals tarafından alınmıştır. Formhals'ın icadı, sıvılar üzerindeki elektrik alan kullanımı ile suni ve sentetik filament üretiminin bir tasarımıdır (Kozanoğlu, 2006).

1960'lı yıllarda Taylor tarafından, elektriklenmiş sıvıların temel teorik prensipleri açıklanmıştır. Taylor, iki sıvı arasındaki koni ara yüzün elektrik alan içerisinde dengede olduğu gösterilmiştir (Kozanoğlu, 2006).

Taylor tarafından geliştirilen teoride bir elektrik alan içindeki viskoz damladan ince fiberlerin oluşması, elektriksel kuvvetler tarafından yüklenen sıvı yüzeyindeki maksimum kararsızlıktan dolayı gerçekleştiği açıklanmıştır. Yüksek voltajlarda küresel bir damla oluşurak kritik gerilmede viskoz damlanın yarı küresel şekli bozulur ve jet oluşumundan önce koni şeklini alır. Koni ucu ile taban çizgisi arasında (α) 50° yarı dikey açı vardır (Şekil 5.1). Elektriksel kuvvetlerin etkisi altında, viskoz akışkanın yüzey kıvrımlığı değişir. Bu sırada yüzey gerilimi elektriksel kuvvetlere karşı koyan tek kuvvettir. Taylor'un çalışması, elektrik alan içerisindeki damlacığın davranışının anlaşılmasını sağlamış ve daha sonra geliştirilen teknikler için faydalı olmuştur (Kozanoğlu, 2006).



(a) (b)

Şekil 5.1. Taylor konisi oluşumu, (a) elektriksel yük yok iken damlacığın durumu, (b) elektrik yükü varken damlacağın durumu ve taylor konisi

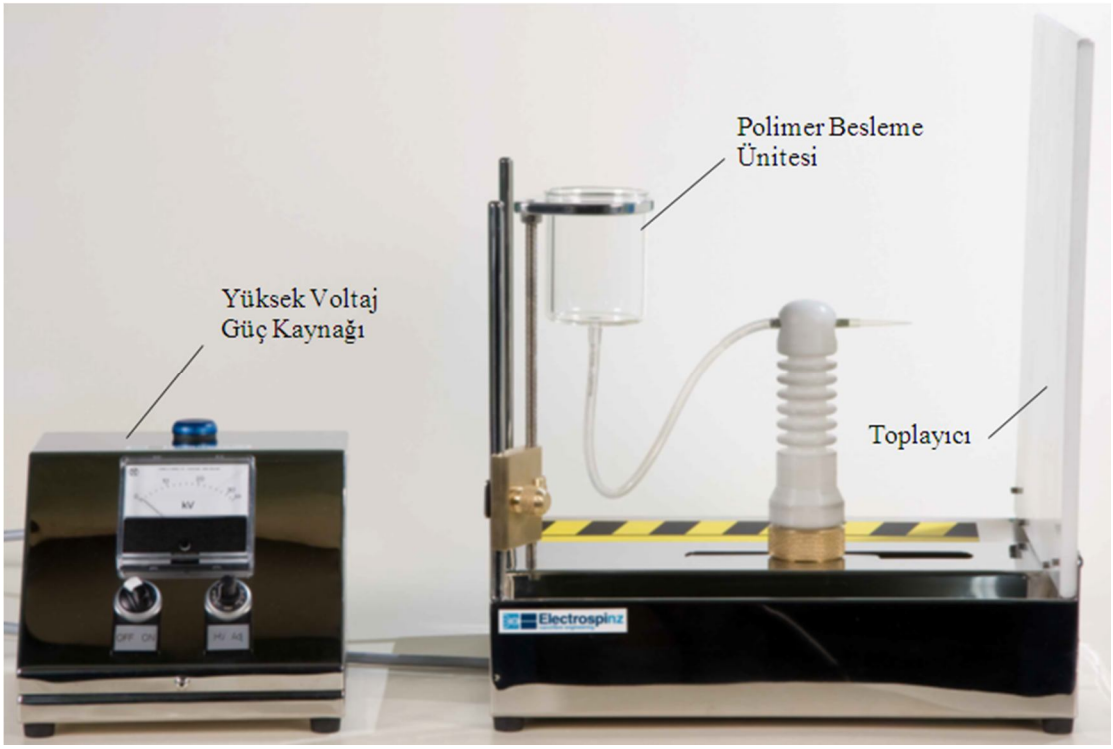
1966 yılında Simons, metal ızgaralar kullanarak polikarbonat, poliüretan gibi termoplastiklerden farklı şekillerde düzensiz fiber yoğunluklarında nanofiberli keçe üretimini gerçekleştirmiştir (Üstündağ, 2009).

5.1. Elektro-eğirme Üretim Yöntemi

Eğirme, ipliği burkup ince, mukavim, yönlenmiş uzun iplik elde etmek için kullanılan yöntemdir. Koyun, keçi gibi yün veren hayvanlardan elde edilen doğal fiberlerin hazırlık işlemleri yapıldıktan sonra, elle bükülerek uzun iplikçik yapılır. Bu iplikçikler daha sonra eğirgeç adı verilen bir alete sarılarak tekrar bükülür. Hem mukavemet kazanır, hem de uzun iplikçik elde edilmiş olur. Elektro-eğirme, eğirme işleminin elektrik potansiyel farkı vasıtasıyla yapılmasıdır. Uzun ve sürekli nanofiber üretilebilmesi, prosesin tekrarlanabilmesi nedeniyle üzerinde en çok çalışılan ve geliştirilen nanofiber üretim tekniğidir.

Elektro-eğirme deney cihazı genel olarak üç kısımdan oluşmaktadır (Şekil 5.2): Bunlar yüksek voltaj güç kaynağı, polimer besleme ünitesi ve toplayıcıdır. Yüksek voltaj elde etmek için genellikle, 1-100 kV ve 0.1-100 mA arasında AC/DC akım güç kaynağı kullanılır. Yüksek voltaj güç kaynağı, elektro-eğirme için gerekli olan kuvveti sağlamak ve prosesi sürdürebilmek için kullanılmaktadır. Besleme ünitesi, polimer çözeltisini belirli bir debide lüleye göndermek için kullanılır. Polimer çözeltisinin bulunduğu hazne ve ucunda lüleden (ince boru) oluşur. Lüle genellikle güç kaynağının negatif kutbuna bağlanır. Toplayıcı için genellikle düz plakalar kullanılır. Bununla beraber farklı amaçlar için (homojen nanofiber için tambur tip toplayıcı) farklı özellikte

toplayıcılar da kullanılmaktadır. Toplayıcı genellikle güç kaynağının pozitif kutbuna bağlanır ve topraklanır.



Şekil 5.2. Basit bir elektro-eğirme deney cihazı (Anonymous 2013,d)

5.2. Elektro-eğirme Prosesinin Modellenmesi

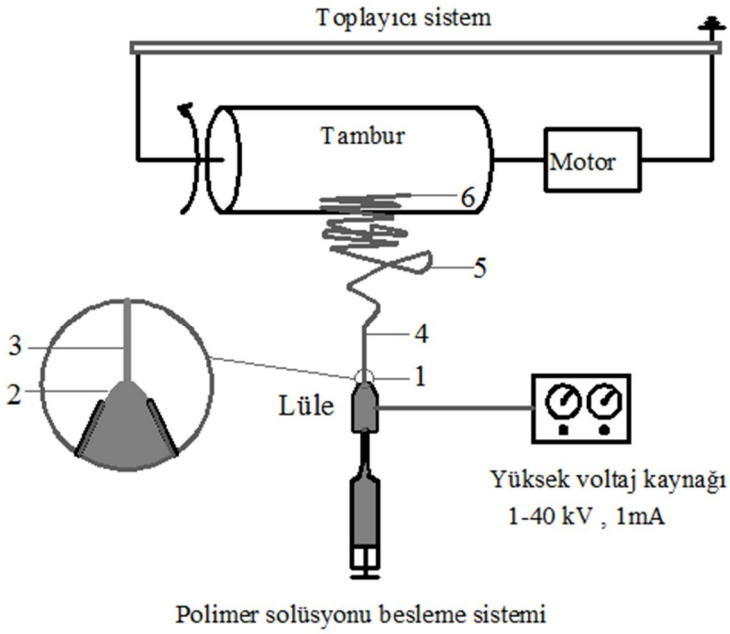
Elektro-eğirme prosesindeki aşamalar şu şekilde ifade edilebilir (Şekil 5.3):

1. Damlacık oluşumu,
2. Taylor konisi oluşumu,
3. Elektro-eğirme jetinin oluşumu,
4. Kararlı bölgede jetin uzaması,
5. Kararsız bölgenin oluşması (whipping instability)
6. Fiber formunda katılaşması

5.2.1. Damlacık oluşumu

Elektro-eğirme metodunun ilk aşamasında eriyik ya da çözelti formundaki sıvı polimer bir lüle ucundan çok düşük hızlarda beslenir. Herhangi bir elektrik alan uygulanmadığı durumda kılcal boru ucunda bir damlacık oluşur ve yer çekiminin etkisi

ile damlacık düşer. Bu durumda damlacığa etki eden sadece iki kuvvet vardır. Bunlardan biri sıvının yüzey gerilimi diğeri yer çekimi kuvvetidir. (Andrady 2008). Polimer beslemek için genellikle perküzyon pompası kullanılır. Perküzyon pompasında polimer çözeltisi besleme hızı mL/dak. veya mL/h şeklinde ayarlanır.



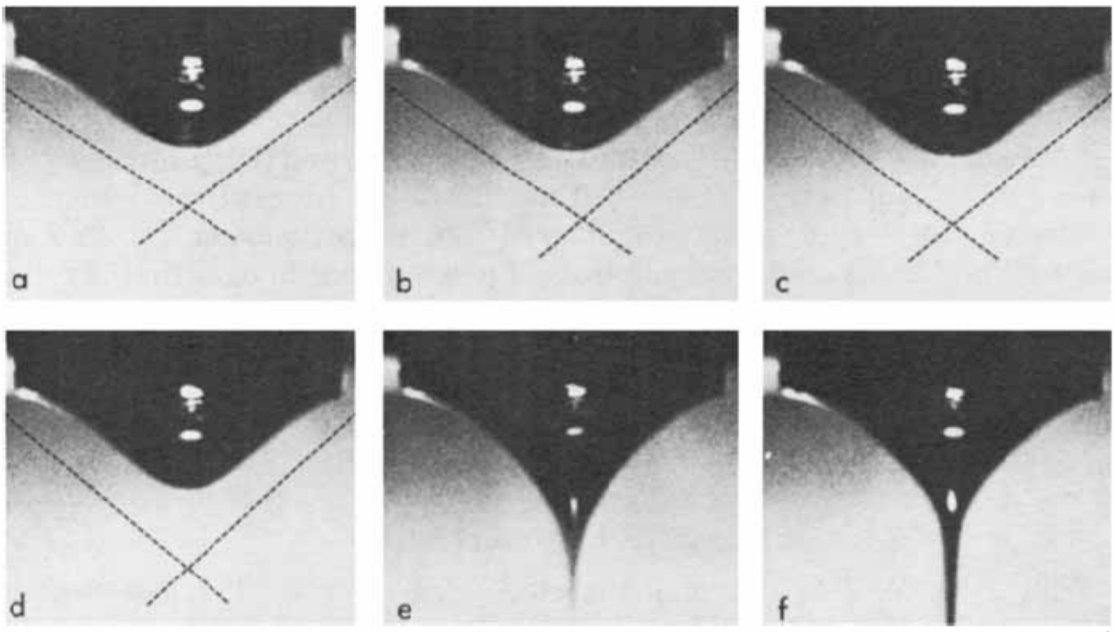
Şekil 5.3. Elektro-eğirme prosesinin aşamaları şematik şekli

5.2.2. Taylor konisi oluşumu

Kılcal boru ucunda asılı duran çözelti damlacığı, yüzey gerilimi kuvvetlerinin etkisi ile kritik bir voltaj değerine kadar küresel formda bulunur (Şekil 5.4a,b,c). Uygulanan voltaj kritik bir değere ulaştığı anda, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilimi ve yerçekimi kuvvetlerine eşitlenir. Bu noktada polimer damlası şekil değiştirerek koni biçimini alır, koni açısı 50°'dir (Şekil 5.4d). Bu koniye Taylor konisi denir (Kozanoğlu, 2006). Taylor, elektrik alan içindeki viskoz sıvının bu açıda konik formdayken yüzey gerilimi ile elektrostatik kuvvetlerin denge halinde olduğunu göstermiştir (Huang ve ark., 2003). Farklı çözelti ve eriyikler için bu değer farklı olabilir (Andrady, 2008).

5.2.3. Jet oluşumu

Polimer damlası Taylor konisi halini aldıktan sonra gerilimdeki çok küçük bir artışla birlikte koni ucundan bir jet fışkırır (Şekil 5.4e) (Kozanoğlu, 2006; Andrady, 2008).



Şekil 5.4. Artan voltajın etkisi ile polimer damlacığının taylor konisi formuna geçişi ve jet oluşumu (a),(b),(c),(d) voltajın artmasıyla lüle ucundaki damlacık formunun değişimi, (e) kritik voltaj seviyesinde iken polimer jetinin fışkırması, (f) kritik voltaj değerinden sonraki polimer jeti (Kozanoğlu, 2006)

5.2.4. Kararlı bölgede jetin uzaması

Bu durum Şekil 5.3'de (4) ile ifade edilmiştir. Polimer çözeltisine uygulanan voltaj, kritik voltaj değerini geçtiği anda aniden jet başlangıcı gerçekleşir (Şekil 5.4f). Oluşan polimer jetinin yüzeyindeki yüklerin coloumb itme kuvvetleri, jeti toplayıcıya doğru uzatan eksenel bir bileşene sahiptir. Yapılan akışkan hızı ölçümleri göstermiştir ki, Taylor konisinden uzaklaştıkça jet hızının yanı sıra jet hızının değişimi de artış göstermektedir. Yani Taylor konisinden baş gösteren jet, gittikçe hızlanarak bir müddet lineer bir yolda seyretmektedir. Bunun sonucu olarak jet çapı, jetteki uzama ve çözücünün buharlaşmaya başlamasına bağlı olarak hızla düşmektedir. Jetin incelmesi ile jetin birim alandaki yüzey yükü azalırken birim kütledeki yüzey alanı artmaktadır (Andrady, 2008).

5.2.5. Kararsız bölgenin oluşması

Whipping kararsızlığı da denen kararsız bölgenin oluşumu sırasında polimer jeti, izlediği kararlı yolun ardından kararsız bir bölgeye girer. Kararsız bölge, Şekil 5.3'te (5) numara ile gösterilmiştir. Kullanılan polimer çözeltisi veya eriyiğinin özelliğine ve sistem değişkenlerine bağlı olarak değişebilen üç kararsızlık hali mevcuttur. Jet, bu

kararsızlık hallerinden sadece birini gösterebileceği gibi üç kararsızlık halini de gösterebilir. Bu kararsızlık halleri; (i) klasik Rayleigh karasızlığı, (ii) eksenel simetrik elektrik alan akımı ve (iii) whipping kararsızlığıdır. Elektro-eğirme işleminde en çok görünen kararsızlık hali whipping'dir. Whipping oluşumunun nedeni, jet yüzeyindeki yüklerin karşılıklı olarak birbirlerini itmesi ile meydana gelen ve yüklerin bir arada olamamalarından dolayı jette merkezden radyal bir şekilde burulma oluşmasıdır. Jet toplayıcıya yaklaştığında ise ana jetten ayrılan küçük jetler meydana gelir. Bu küçük jetlerin oluşmasının nedeni ise radyal yüklerin birbirini itmesi sonucu ana jetten ayrılması olarak izah edilmiştir. Jet yeterince inceldiğinde ve viskoelastik kuvvetler yeterince sönümlendiğinde yeni whipping karasızlıkları oluşur. Bu karasızlık haline ikinci whipping karasızlığı denir (Kozanoğlu, 2006).

Kararsız bölgede yüklü polimer jetine altı kuvvet etki eder. Bunlardan bir kısmı damlacığın deforme olmasını ve jet oluşumunu desteklerken bir kısmı da tersi yönde çalışır, damlacığın akışına engel olur.

Whipping kararsızlığında jete etki eden kuvvetler;

a) Yer çekimi kuvveti (F_g): Çözeltinin yoğunluğuna bağlıdır (modellemelerde çoğunlukla ihmal edilir).

b) Elektrostatik kuvvet (F_E): Jetin uzamasını ve toplayıcıya doğru ilerlemesini sağlayan kuvvettir. Bu kuvvet, uygulanan elektrik alan ve materyal karakteristiği ile tanımlanır.

c) Coloumb itme kuvveti (F_C): Jetin yüzeyinde kararsızlığa ve spiral hareketlere sebep olur. Bu kuvvetin miktarı, polimerin ve çözücünün karakteristiklerine bağlıdır.

d) Viskoelastik kuvvetler (F_V): Jetin uzamasına ve ilerlemesine karşı yönde etki eden bir kuvvettir. Polimerin tipine, molekül ağırlığına ve çözücüye bağlıdır.

e) Yüzey gerilimi kuvvetleri (F_γ): polimer jetinin çekilmesine karşı yönde etki eder. Çözücü tipine, polimere ve katkı maddelerine bağlıdır.

f) Sürtünme kuvvetleri (F_F): Polimer jetinin yüzeyi ile onu çevreleyen hava veya gaz arasında oluşan sürtünme kuvvetleridir (Andrady, 2008).

Elektro-eğirme esnasında bütün bu kuvvetler dengede olup Denklem 5.1'de ifade edildiği gibidir. Burada tüm kuvvetler Denklemdeki gibi yazılır, yer çekimi kuvveti eşitliğin sağında, solunda olabilir, hatta hiç olmayabilir. Bu elektro-eğirmenin aşağıya veya yukarıya doğru yapıldığına veya yatay yapıldığında göre değişir. Şayet eğirme işlemi aşağıdan yukarıya doğru yapılıyorsa Denklem 5.1'deki gibi yazılır. Yatay

yapıldığında yer çekimine karşı bir kuvvet gerekmediğinden bu kuvvet denklemde yazılmaz.

$$\overrightarrow{F_C} + \overrightarrow{F_E} = \overrightarrow{F_F} + \overrightarrow{F_\gamma} + \overrightarrow{F_V} + \overrightarrow{F_g} \quad (5.1)$$

Yapılan hesaplamalar ve denemeler neticesinde, yüksek gerilme altında polimer jet hızının, toplayıcıya yakın yerlerde sesin havadaki yayılma hızı kadar olduğu tespit edilmiştir (340 m/s). Polimer jeti elektriksel kuvvet etkisiyle hızlanırken viskoz direnci de giderek artmaktadır ve viskoelastik kuvvetler, elektrostatik kuvvetlerden çok küçük miktarda büyük olduğu anda polimer jeti stabil olmayan bir harekete başlamaktadır. Bu durumda, oluşan hafif bir hava türbülansı bile salınıma neden olmaktadır (Kozanoğlu, 2006).

5.2.6. Fiber formunda katılaşma

Polimer jeti kararsız bölgede ilerlerken jet alanının inanılmaz derecede artmasıyla kütle hızları da çok artmakta ve bu esnada çözelti içerisindeki çözücünün buharlaşması gerçekleşmektedir. Jetin kararsızlık bölgesinden geçtiği süreç aynı zamanda çözücünün buharlaşma hızı ile kontrol edilir. Yüksek buharlaşma hızında bir çözücü kullanıldığında jetin uzama viskozitesi, deformasyonu sağlamak için fazla yüksek kalacak, whipping kararsızlığı kısa sürecek ve buna bağlı olarak daha kalın nanofiberler elde edilecektir. Kullanılan çözücünün uçuculuğu, fiber çapını kontrol etmede anahtar rol oynar. Uygun bir çözücünün seçimi, uygun proses parametrelerinde çok küçük nanofiberlerin elde edilmesini sağlar (Andrady, 2008).

Çözücünün buharlaşması ile topraklanmış toplayıcı üzerinde, birbiri üzerine rastgele konumlanmış katı nanofiberler oluşur.

5.3. Elektro-eğirme İşlemine Etki Eden Parametreler

Elektro-eğirme işleminde üretilen fiberlerin çapı, morfolojisi, konumlaması, dağılımı gibi istenen özellikleri sağlayabilmek için ancak proses parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir. Fakat prosese etki eden çok sayıda parametre olduğundan proses kontrolü güçtür.

İstenen özellikleri sağlayabilmek için kontrollü bir elektro-eğirme işlemi gerçekleştirilmelidir. Elektro-eğirme yöntemi, ucuz ve basit bir nanofiber üretim tekniği olarak avantaj sağlamasına karşın kontrol edilebilirliği oldukça güç bir prosestir. Çünkü prosese etki eden pek çok parametre bulunmaktadır (Cengiz ve ark., 2006).

Elektro-eğirme prosesine etki eden parametreler başlıca üç bölümde incelenebilir. Bunlar çözelti parametreleri, proses parametreleri ve ortam parametreleridir. Çözelti parametreleri polimer çözeltisinin özelliğiyle ilgilidir. Proses parametreleri elektro-eğirme cihazı ve deney parametreleriyle akından ilişkilidir (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Elektro-eğirme prosesine etki eden parametreler

Çözelti Parametreleri	Proses Parametreleri	Ortam Parametreleri
Molekül ağırlığı ve viskozite	Uygulanan voltaj	Rutubet
Yüzey gerilimi	Çözelti besleme hızı	Atmosfer tipi
Elektrik iletkenliği	Toplayıcı tipi	
	Lüle çapı	
	Toplayıcı-lüle mesafesi	

5.3.1. Çözelti parametreleri

Polimer çözeltisinin özellikleri, elektro-eğirme prosesini ve oluşan fiber özelliklerini etkileyen en önemli parametredir. Çözelti parametreleri, polimerin molekül ağırlığı, yüzey gerilimi, polimer çözeltisinin elektrik iletkenliği ve dielektrik özelliğidir.

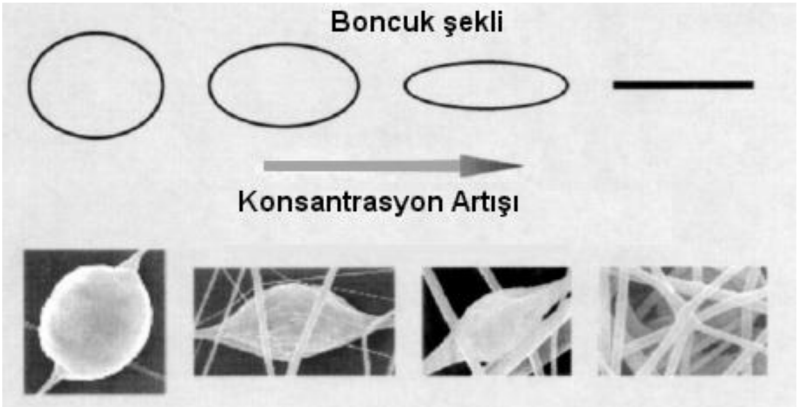
5.3.1.1. Molekül ağırlığı ve viskozite

Çözelti viskozitesini etkileyen faktörlerden biri, polimerin molekül ağırlığıdır. Aynı polimerin farklı molekül ağırlığındaki numuneleri çözüldüğünde genel olarak, yüksek molekül ağırlığına sahip polimerden elde edilen çözelti, düşük molekül ağırlığına sahip çözeltisinden daha yüksek viskoziteye sahiptir. Yani polimerin molekül ağırlığı arttıkça, çözeltinin viskozitesi de artar (Ramakrishna ve ark., 2005).

Elektro-eğirme prosesinde polimer jeti, lüle ucunda oluşan Taylor konisinden ayrıldığında toplayıcıya doğru ilerlerken elektrostatik kuvvetler, Coloumb itme kuvvetleri etkisi ile uzar ve gerilir. Çözelti gerildiğinde elektrikle hareket eden polimer jetinde kopmaların olmasını önleyen ve böylece sürekli bir çözelti jetinin oluşmasını sağlayan etken, molekül zincirlerinin karmaşıklığıdır. Yani, monomerik polimer

çözeltisinden elektro-eğirme ile nanofiber elde etmek mümkün değildir (Ramakrishna ve ark., 2005).

Çözeltinin viskozitesine etki eden diğer bir önemli faktör ise polimer konsantrasyonudur. Molekül ağırlığının artırılmasına benzer olarak, konsantrasyonun yükselmesi de polimer zincir karmaşıklığının artmasına ve böylece elektro-eğirme sürecinde jet sürekliliğinin sağlanmasına sebep olur (Ramakrishna ve ark., 2005). Konsantrasyondaki artışla, elde edilen nanofiberlerdeki boncuk oluşumu azalırken boncuk şekilleri de küresel formdan yassı forma doğru değişirler (Şekil 5.5) (Kozanoğlu, 2006). Ancak buna rağmen elektro-eğirme prosesi için minimum polimer zinciri karmaşıklığı ve dolayısıyla minimum viskozite gereklidir. Çok yüksek viskozite, çözeltinin düzeden pompalanmasını zorlaştıracaktır. Ayrıca çok yüksek viskozite, daha elektro-eğirme başlamadan çözeltinin lülenin ucunda kurumasına sebep olabilmektedir (Ramakrishna ve ark., 2005).



Şekil 5.5. Çözelti konsantrasyondaki artışla boncuk şekli arasındaki ilişki (Kozanoğlu, 2006)

Düşük viskozitelerde, düşük zincir karmaşıklığı vardır ve elektro-eğirme esnasında jet üzerinde yüzey gerilimi kuvvetlerinin etkisi baskındır. Bu nedenle sürekli bir jetin oluşmaması nedeniyle boncuk oluşumları görülebilir. Viskozitedeki artış polimerin zincir karmaşıklığını artırarak elektro-eğirme prosesinde sürekli jet oluşumunu sağlar (Üstündağ ve Karaca, 2009). Artan viskozite ile fiber çapları da artar. Bu durum muhtemelen çözeltinin jetteki yükler nedeniyle gerilmeye karşı direncinin artmasına bağlıdır (Ramakrishna ve ark., 2005).

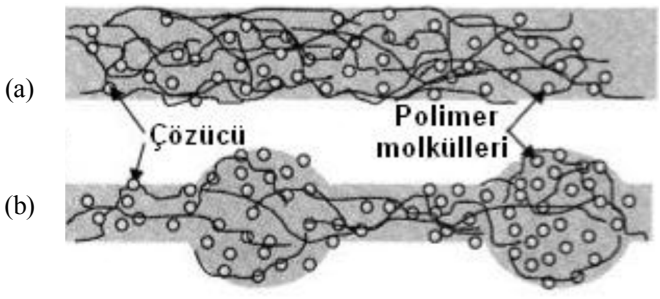
Yüksek viskozitenin diğer bir etkisi de küçük toplanma alanıdır. Artan viskozite, jetin whipping kararsızlığını önleyebilir. Bu durumda jetin izlediği yol azalır, oluşan fiberler daha küçük bir alana yayılır. Jetin izlediği yolun azalmasıyla, çözeltinin daha az

uzamasına ve daha büyük çaplarda fiberler oluşmasına sebep olur (Ramakrishna ve ark., 2005).

5.3.1.2. Yüzey gerilimi

Elektro-eğirmenin başlayabilmesi için, elektriksel olarak yüklenen çözeltinin, yüzey gerilimini yenmesi gerekir. Yüzey gerilimi, bir sıvının birim kütlesindeki yüzey alanını azaltma etkisine sahiptir. Yüzey gerilimine bağlı olarak serbest çözücü moleküllerinin konsantrasyonu yüksek olduğunda, çözücü moleküllerinin bir araya toplanma ve küresel bir şekil alma eğilimi artacaktır. Bu durumda, polimer jeti toplayıcı plakaya doğru ilerlerken yüzey gerilimi, jet boyunca boncuklar oluşmasına neden olabilir. Yüksek viskozite, çözücü ve polimer molekülleri arasında daha fazla etkileşim anlamına gelir ve böylece yüklerin etkisi ile çözelti gerildiğinde çözücü molekülleri, karmaşık polimer moleküllerine yayılmaya yönelecek ve bu şekilde yüzey geriliminin etkisi altında çözücü moleküllerinin bir araya toplanma eğilimi azalacaktır (Şekil 5.6) (Ramakrishna ve ark., 2005).

Düzgün nanofiberlerin oluşumunu desteklemek için elektro-eğirme çözeltisine etanol gibi düşük yüzey gerilimine sahip çözücüler ilave edilebilir. Yüzey gerilimini azaltmanın diğer bir yolu da, çözeltiye yüzey aktif madde ilave etmektir. Yüzey aktif madde ilavesi ile daha homojen fiberler elde edilebilir. Çözeltiye, ince toz halinde, çözünmeyen bir yüzey aktif madde ilave edildiğinde dahi, fiber morfolojisi geliştirilir (Ramakrishna ve ark., 2005).



Şekil 5.6. Viskozitenin çözeltisindeki polimer moleküllerine etkisi
(a) yüksek viskozite, (b) düşük viskozite (Ramakrishna ve ark., 2005).

5.3.1.3. Elektrik iletkenliği

Elektro-eğirme prosesinde çözelti, yüzeyindeki yüklerin itmesi sayesinde gerilir. Eğer çözeltinin iletkenliği artırılırsa, elektro-eğirme jetinde daha fazla yük taşınabilir. Çözeltinin iletkenliği, iyon ilavesi ile artırılabilir. Bunun dışında, pek çok ilaç ve protein, suda çözündüğünde iyon oluşturur. Eğer çözelti tamamen gerilmezse, boncuklanmalar oluşacaktır. Bu nedenle, çözeltiye çok az miktarda tuz ya da polielektrod ilave edildiğinde, çözeltinin taşıdığı yükler artacak ve çözeltinin gerilmesini artıracaktır. Sonuç olarak, düzgün fiberler oluşacaktır. Çözeltinin gerilmesinin artırılması, daha küçük çaplarda fiberler elde etmeyi sağlar. Ancak fiber çapındaki düşüşün bir limiti vardır. Çözelti gerilirken, yüklerin coloumb kuvvetine karşı, büyük bir viskoelastik kuvvet oluşacaktır (Ramakrishna ve ark., 2005).

İyon varlığı ile çözelti iletkenliği artırıldığında, elektro-eğirmenin oluşması için gereken kritik voltaj da düşer. Artan yüklerin diğer bir etkisi de, daha yüksek whipping kararsızlığıdır. Bunun sonucu olarak da fiberlerin toplanma alanı artar. Bu durumda jet yolu artacağından daha küçük fiberler elde edilir (Ramakrishna ve ark., 2005).

Elektrik iletkenliği her ne kadar elektro-eğirme prosesi için avantaj sağlasa da belirli bir sınırdan sonra prosesi güçleştiren hatta imkânsız kılan bir etkiye sahiptir. Çok yüksek iletkenlik değerlerinde elektro-eğirmede lüle ucunda bulunan damlacık yüzeyindeki yükleri muhafaza etmek oldukça güçleşir ve bu durum karakteristik koni oluşumunu etkiler. İletkenlik yükseldikçe klasik koni-jet modeli değişir ve çoklu-jet oluşumu görülebilir. Bu nedenle, saf alginat gibi iletkenliğin çok yüksek olduğu çözeltilerde koni ve jet oluşumu görülmez (Üstündağ ve Karaca, 2009).

5.3.2. Proses parametreleri

Elektro-eğirme prosesini etkileyen proses parametreleri, çözelti özelliğini etkileyen ikinci önemli parametre grubudur. Proses parametreleri uygulanan voltaj, çözelti besleme hızı, çözelti sıcaklığı, toplayıcı tipi, lüle çapı ve lüle-toplayıcı arası mesafedir.

5.3.2.1. Uygulanan voltaj

Voltaj uygulandığında, elde edilen elektrik alan, jetin gerilmesine ve hızlanmasına etki eder. Daha yüksek voltaj uygulandığında, jet içindeki coloumb

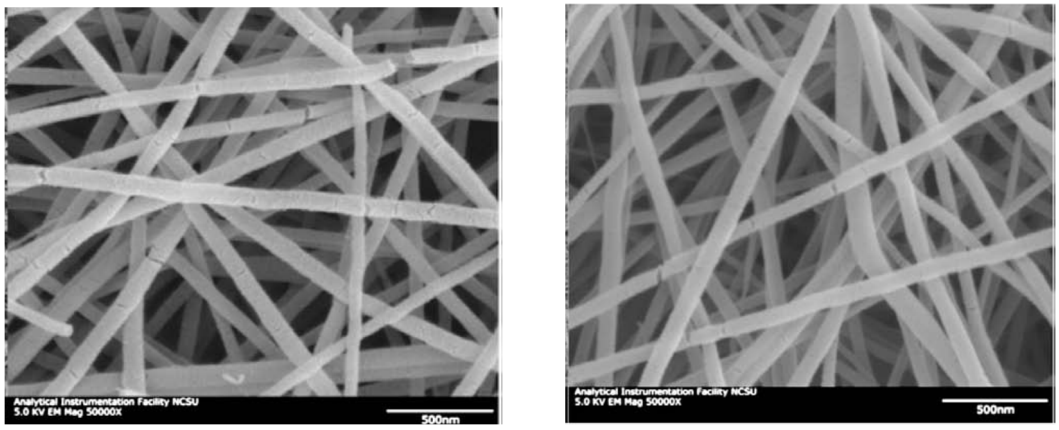
kuvvetlerinin de fazla olmasına bağlı olarak, çözelti daha fazla gerilecektir. Bu durum, fiber çapının azalmasını sağladığı gibi aynı zamanda çözücünün daha hızlı buharlaşmasına neden olarak daha kuru fiberlerin elde edilmesini sağlar. Düşük viskozitelerde çözelti kullanıldığında yüksek voltaj uygulanması, elektro-eğirme süresince ikincil jet oluşumunu sağlayabilir. Bu da, fiber çapında azalmaya neden olur. Fiber çapını etkileyebilecek bir diğer faktör de, elektro-eğirme jetinin uçuş süresi yani havada ilerleme süresidir. Uzun bir uçuş süresi, toplayıcıya ulaşmadan önce, fiberlerin gerilmesi ve uzaması için zaman sağlar (Ramakrishna ve ark., 2005).

Voltaj arttıkça jet üzerindeki elektrostatik itme kuvvetlerinin de artması sonucu elde edilen fiber çapı küçülür ve genel olarak boncuk oluşumu azalır (Ramakrishna ve ark., 2005). Ancak çok yüksek voltajlarda Taylor konisinin iğne içerisine geri çekilmesi ile jet kararsızlığında artış görülebilir ve bunun bir sonucu olarak da boncuk oluşumunda artış görülebilir (Deitzel ve ark., 2001). Belirli bir değere kadar voltaj artışı ile boncuk oluşumu azalırken boncuk şekilleri küresel formdan yassı forma gelirler. Ancak voltajın daha fazla artması ile boncuklar tekrar küresel forma yaklaşır. Yani uygulanan voltajın da bir üst limiti olmalıdır.

5.3.2.2. Çözelti besleme hızı

Besleme hızı, elektro-eğirme için kullanılabilir çözelti miktarını tanımlar. Taylor konisini kararlı tutmak için belirli bir gerilme ve besleme hızı söz konusudur. Besleme hızı arttığında, düzeden çekilen çözeltinin hacmi arttığından fiber çapında ya da boncuk boyutlarında artış gerçekleşir. Ancak, yüksek besleme hızına bağlı olarak fiber çapındaki artışın da bir limiti vardır (Ramakrishna ve ark., 2005).

Zhang ve ark. (2009)'un PA6 polimer çözeltisiyle, 10 μL/h, 15 μL/h besleme debisiyle yaptıkları çalışmalarda polimer debisi artmasıyla nanofiber çapının arttığını gözlemişlerdir (Şekil 5.7).



(a) (b)

Şekil 5.8. Elektro-eğirme metodu ile elde edilen PA6 nanofiberlerinde artan çözelti besleme hızına bağlı olarak fiber boyutlarındaki artış (a) 10 µL/h, (b) 15 µL/h (Zhang ve ark., 2009)

Lüle ucundan çekilen çözelti hacminin daha fazla olmasına bağlı olarak, jetin kuruması daha uzun zaman alır. Aynı uçuş süresinde toplanan fiberler içindeki çözücü, buharlaşmak için yeterli süreyi bulamaz. Buharlaşmadan kalan bir miktar çözücü, fiberler toplayıcı üzerinde konumlandıktan sonra buharlaşacağından fiberlerin birbiri ile temas ettiği noktalarda yapışmalar gerçekleşebilir. Bu nedenle çözelti besleme hızı, çözücünün buharlaşmak için yeterli zaman bulabileceği kadar düşük olmalıdır. Ancak, elektrostatik kuvvetlerle çözeltinin toplayıcıya çekilme hızı, kaynaktan beslenme hızından daha yüksek olursa koni stabilitesi bozulabilir ve bu da boncuk oluşumuna neden olur (Ramakrishna ve ark., 2005, Deitzel ve ark., 2001).

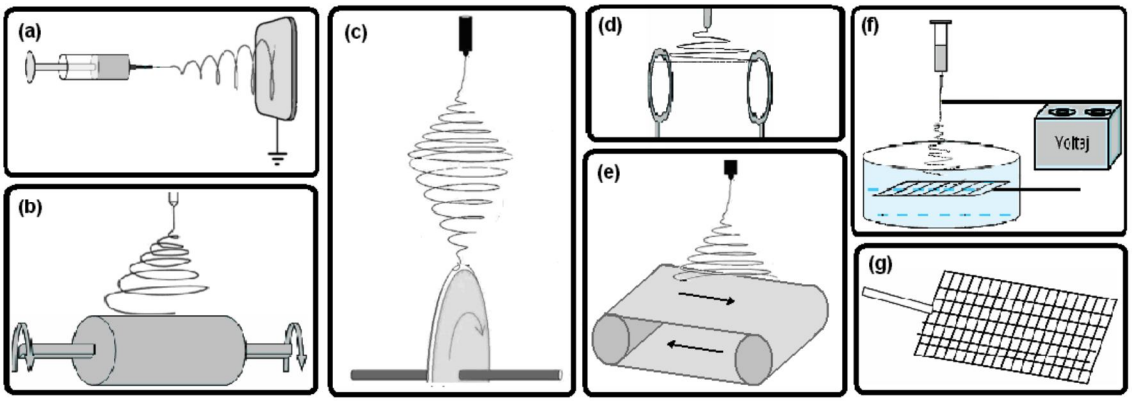
5.3.2.3. Çözelti sıcaklığı

Çözelti sıcaklığı, hem buharlaşma hızının artmasında, hem de çözelti viskozitesinin düşmesinde etkilidir. Düşük viskozitelerde coloumb kuvvetleri, çözelti jeti üzerinde daha fazla gerilme kuvveti yaratacağından daha düzgün ve ince fiberler elde etmek mümkün olacaktır. Ayrıca, çözelti sıcaklığının artması ile polimer moleküllerinin hareketliliği arttığından coloumb kuvvetlerinin çözelti jeti üzerindeki çekim etkisi daha fazla olmaktadır (Ramakrishna ve ark., 2005). Demir ve ark.(2002), PU nanofiberlerinin elektro-eğirme ile elde edilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, yüksek çözelti sıcaklığında elde edilen fiberlerin oda sıcaklığında elde edilen fiberlere nazaran daha düzgün ve homojen olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca yüksek çözelti sıcaklıklarında elektro-eğirme prosesinin daha hızlı gerçekleştiğini ve bu durumun

endüstriyel uygulamalarda avantaj sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Ancak enzim, protein gibi biyolojik materyallerin elektro-eğirme çözeltilerinde yüksek sıcaklık uygulamak, bu malzemelerde fonksiyon kaybına sebep olabilmektedir (Ramakrishna ve ark., 2005).

5.3.2.4. Toplayıcı tipi

Toplayıcı malzemesi kadar, şekli de elektro-eğirme ve oluşan nanofiberlerin yapısı üzerinde etkilidir. Yapılan çalışmalarda hareketli ve sabit pek çok farklı toplayıcı tasarımı uygulanmıştır. En sık kullanılan toplayıcı, alüminyum plakalardır. Bunun yanı sıra, metal ızgaralar, dönen tambur, dönen disk, taşıyıcı bant, üçgen çerçeve, paralel bilezik ve sıvı banyosu, elektro-eğirme ile oluşturulan nanofiberleri toplamak için kullanılan malzemeler arasındadır (Şekil 5.8) (Kozanoğlu, 2006).



Şekil 5.8. Elektro-eğirmede kullanılan bazı toplayıcı tipleri
(a) sabit plaka, (b) dönen tambur, (c) dönen disk, (d) paralel bilezikler, (e) taşıyıcı bant, (f) sıvı banyo, (g) metal ızgara (Üstündağ, 2009)

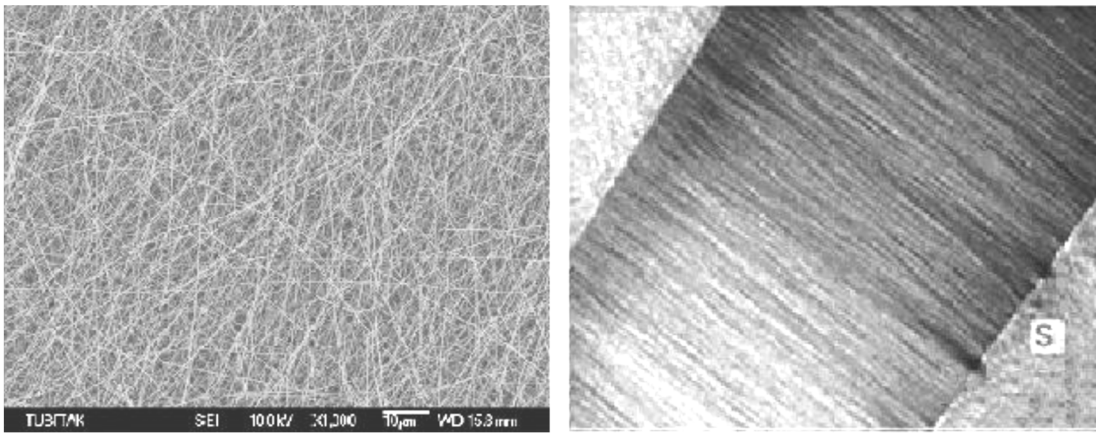
Elektro-eğirmenin başlayabilmesi için besleme ünitesi ile toplayıcı arasında bir elektrik alan olmalıdır. Pek çok elektro-eğirme düzeneğinde bu elektrik alanı sağlayabilmek için toplayıcı olarak alüminyum folyo gibi iletken bir malzeme kullanılır ve bu malzeme elektriksel olarak topraklanır. Böylece besleme ünitesi ile toplayıcı arasında kararlı bir potansiyel fark oluşur (Andrady, 2008).

Elektro-eğirme prosesinde oluşan fiberlerin toplayıcı üzerinde konumlanma şekli, elde edilen yüzeyin özellikleri üzerinde etkili bir faktördür. Sabit plaka üzerinde toplanan fiberler, birbiri üzerinde rastgele konumlanır (Şekil 5.9a). Bu rastgele konumlanma, elektro-eğirme yöntemi ile elde edilen nanofiberli yüzeyin kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Nanofiberlerin potansiyel kullanım alanlarını artırmak

için nanofiberlerin çeşitli örüntülerde hizalanması (Şekil 5.9b) ve bunun için de farklı toplayıcı tipleri kullanarak kontrollü nanofiber konumlanması sağlanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla dönen tambur veya disk, taşıyıcı bant gibi hareketli toplayıcılar kullanılabilirken, paralel bilezik veya çerçeveler gibi sabit toplayıcılar da kullanılabilmektedir. Hareketli toplayıcıların dönüş hızları da oluşan fiberlerin hizalanmasında önemli etkiye sahiptir (Ramakrishna ve ark., 2005).

5.3.2.5. Lüle çapı

Çözeltinin çekim bölgesine beslendiği lüle, düze, iğne olarak adlandırılan kılcal boruların iç çapı, elektro-eğirme prosesi üzerinde etkiye sahiptir. Lüle çapının küçük olması daha ince fiberlerin oluşmasını sağlar. Lülenin iç çapı küçüldükçe ucunda oluşan damlacık daha küçük çapta olacağından damlacığın yüzey gerilimi artar.



(a) (b)

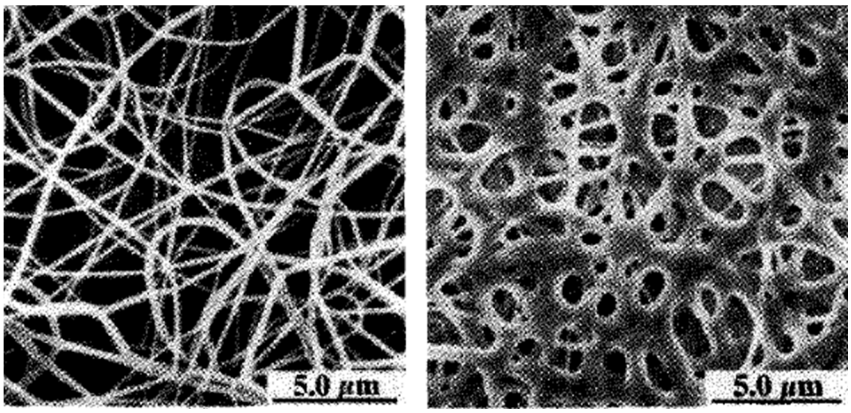
Şekil 5.9. Farklı toplayıcılarla üretilen nanofiberlerin birbirlerine göre pozisyonu
(a) sabit plaka üzerinde rastgele halde toplanmış nanofiberler, (b) paralel çerçeve üzerinde toplanan hizalanmış nanofiberler (Ramakrishna ve ark., 2005)

Bu durumda aynı miktarda voltaj altında jetin başlayabilmesi için daha fazla coloumb itme kuvveti gerekir ve jetin ivmesi düşer. Dolayısıyla jetin toplayıcıya ulaşmadan önce havada ilerlediği ve gerildiği süre uzayacağından daha ince fiberler oluşur. Ancak çok küçük düze çapları çözeltinin püskürtülmesini zorlaştırarak tıkanmalara neden olur ve boncuk oluşumunu artırır (Ramakrishna ve ark., 2005).

5.3.2.6. Toplayıcı ile lüle arasındaki mesafe

Elektro-eğirme işlemi toplayıcı ile lüle arasındaki bölgede gerçekleşir. Bu bölgede lüleden çıkan jet incelerek, çözücü buharlaşır.

Polimer jetinin toplayıcıya ulaşana kadar havada geçirdiği uçuş süresi ve elektrik alan kuvveti, elektro-eğirme prosesini ve oluşan fiberleri etkileyen faktörlerdir. Lüle ile toplayıcı arasındaki mesafe değiştirilerek hem uçuş süresi hem elektrik alan kuvveti değiştirilmiş olur. Ayrıca, toplayıcı ile lüle arasındaki mesafe azaltıldığında elektrik alan kuvveti artacak ve dolayısıyla jet hızı yükselecektir. Böylece, polimer jeti toplayıcıya daha erken ulaşacaktır. Serbest nanofiber oluşumu için jetin uçuş süresi, çözücünün buharlaşmasına yetecek kadar uzun olmalıdır. Mesafe oldukça kısaldığında bu süre azalacak, çözücünün tamamı buharlaşmadığı için fiberlerin temas noktalarında yapışmalar (Şekil 5.10) görülecektir (Ramakrishna ve ark., 2005).



(a) (b)

Şekil 5.10. PA6.6 ile yapılan deneyde mesafe farkının etkisi (a) 2 cm, (b) 0.5 cm (Ramakrishna ve ark., 2005)

Ramakrishna ve ark. (2005) elektro-eğirme mesafesinin küçük bir miktar değişmesiyle fiber çapını ve morfolojisini etkilemeyeceğini, mesafenin çok küçük olması durumunda elektro-eğirme yerine zerrecik oluşarak fiber yerine boncuklar meydana geldiğini söylemiştir. Ayutsede ve ark. (2005) mesafenin artmasıyla elektrostatik çekim gücünün azaldığını, jetin daha fazla uçuş zamanı bulacağını böylece daha ince parçalara ayrılacağını, böylece daha küçük çapa sahip nanofiberlerin oluştuğunu gözlemiştir. Lee ve arkadaşları (2004) ise, Ayutsede ve ekibinin tam tersi bir tezi savunarak, artan mesafe ile çekim gücünün azalacağını böylece daha büyük çapa sahip nanofiberlerin oluşacağını belirtmiştir (Ramakrishna ve ark., 2005)

5.3.3. Ortam parametreleri

Polimer jetinin bulunduğu ortamın nemliliği, atmosfer tipi ve basıncı, fiberlerin yapısı üzerinde etkili faktörlerdir. Ortamın yüksek nemi, özellikle uçucu bir çözücü ile hazırlanan çözeltilerin elektro-eğirmeden elde edilen fiberlerin morfolojisi üzerinde etkilidir. Polisülfon-THF polimer çözeltisi ile yapılan bir çalışmada, %50'nin altındaki bağıl nemde fiber yüzeylerinin düzgün olduğu, ancak nem miktarı artınca fiber yüzeyinde dairesel gözenekler oluştuğu ve rutubet miktarı arttıkça gözenek boyutlarının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca bağıl nem, çözücünün uçma hızını da belirler. Çok düşük bağıl nemde çözücü çok hızlı buharlaşabilmektedir. Hatta buharlaşma, çözelti henüz düzenin ucundayken gerçekleşebilmekte ve lüle ucunda katılaşma meydana gelmektedir. Bu durum tıkanmalara yol açar ve elektro-eğirmeyi engeller (Ramakrishna ve ark., 2005). Literatürde ortamın bağıl nemi ile oluşan fiber çapları arasındaki ilişkinin incelendiği çalışmalarda, nem arttıkça elde edilen fiber çaplarında da artış olduğu gözlemlenmiştir. Yani bağıl nemin artışı, jetin incelmesi için gereken elektrik alan kuvvetini azaltmaktadır (Kozanoğlu, 2006).

Elektro-eğirmenin gerçekleştiği ortamdaki havanın bileşimi de önemlidir. Çünkü bazı gazlar yüksek elektrik alan altında farklı davranışlar sergilerler. Örneğin helyum gazı, elektrik alanını bozar, elektro-eğirmeyi engeller. Ortamdaki hava basıncının azalması ile damla dışarıya doğru kolayca akacağından kararlı bir elektro-eğirme yapılamaz. Çok düşük basınçlarda damlacıkta kabarcıklar görülür, diğer yandan hava yetersizliğinden dolayı elektrik arkı olabilir (Ramakrishna ve ark., 2005).

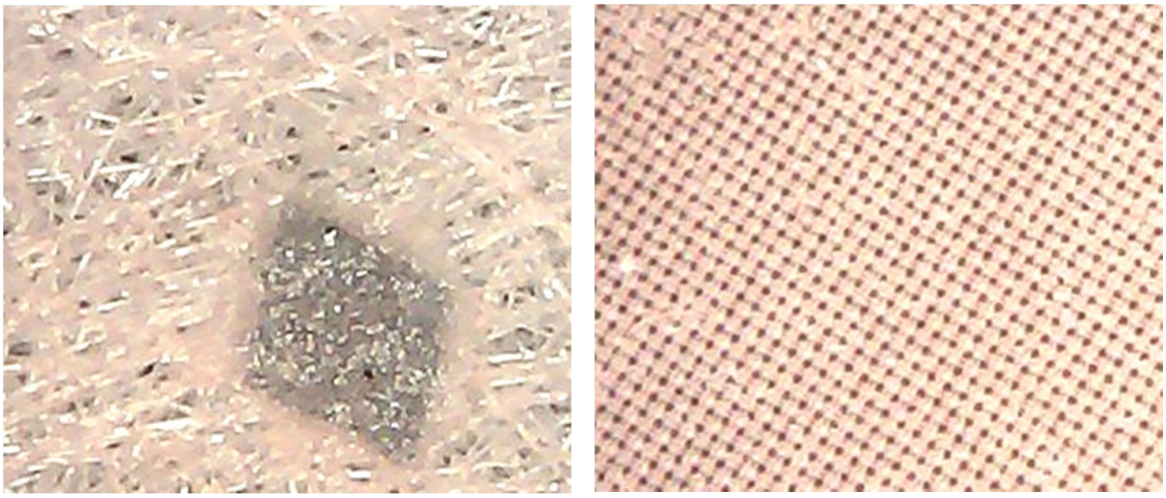
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalar iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, nanofiltre üretimi, ikincisi filtre performans testleridir. Birinci aşamada nanofiber tabaka, TPU polimer çözeltisi ve mikrofiltre altlıklar kullanılarak çok lüleli, döner toplayıcılı elektro-eğirme cihazında üretilmiştir. İkinci aşamada, performans test düzenekleri tasarlanarak, filtre numunelerinin basınç kaybı ve partikül yakalama deneyleri yapılmıştır.

6.1. Nanofiber Tabaka Üretiminde ve Filtre Testinde Kullanılan Malzemeler

6.1.1. Altlık

Altlık, nanofiberlerin kaplandığı mikrofiber filtre olarak tarif edilebilir. Elektro-eğirme deneylerinde iki farklı altlık kullanılmıştır (Şekil 6.1). Bunlar monofilament ve spunbond mikrofiber filtrelerdir.



(a) (b)

Şekil 6.1. Elektro-eğirmede kullanılan altlıkların mikroskop görüntüsü (350 büyütme) (a) PET spunbond mikrofiber filtre, (b) monofilament mikrofiber filtre

Nanofiber tabaka esnek ve ince olduğundan bir altlık üzerine kaplanması gerekir. Altlık, nanofiber tabakanın rijit bir şekilde durmasını sağlayarak ona mekanik destek sağlar. Mikrofiber filtreler, ucuz, kolay tedarik edilebilmesi ve mikro boyuttaki partikülleri tutması nedeniyle altlık olarak kullanılmıştır. Altlıkların özellikleri Çizelge

6.1'de gösterilmiştir. Burada $Ø_{ort}$ ortalama fiber çapıdır. Altlık malzemesi 1x1 m. ebatlarında Inovenso firmasından temin edilmiştir.

Çizelge 6.1. Altlık olarak kullanılan mikrofiber filtrelerin özellikleri

Numune no	Filtre ismi	Ağırlık (g/m²)	Filtre sınıfı	$Ø_{ort}$ (µm)
1, 2, 3, 4	PET Spunbond	85	G4	20
5	PP Monofilament	25	G2	60

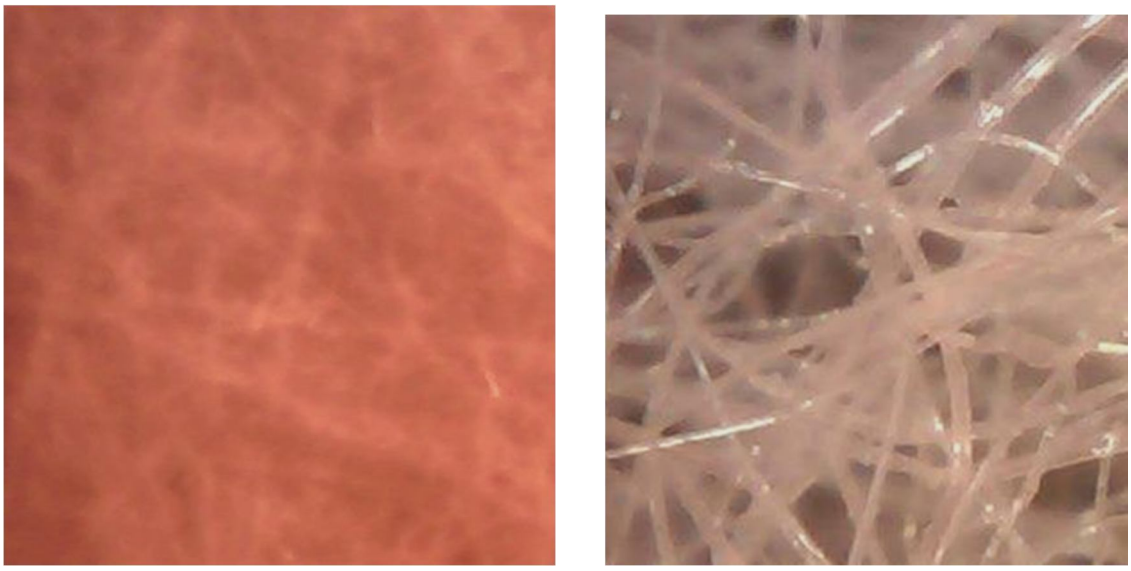
6.1.2. Kullanılan diğer filtreler

Elektro-eğirmede altlık olarak kullanılan mikrofiber filtrelerden başka, filtre performans testlerinde numune olarak ve ön filtreleme amacıyla mikrofiber filtreler kullanılmıştır. Altlık haricinde kullanılan mikrofiber filtrelerin özellikleri Çizelge 6.2'de sunulmuştur. Bu filtrelerin ilk dört tanesi performans deneylerinde numune olarak, PET elyaf filtre ise, deney numuneleri önünde kaba veya kümelenmiş haldeki nanopartiküllerin filtreye girmesini engellemek için kullanılmıştır. Ergitme üfleme metoduyla elde edilen yedinci numune diğer mikrofiber filtrelerle (8. ve 9. numuneler) karşılaştırmak için, sekizinci ve dokuzuncu numuneler altlığın filtreleme performansını tayin etmek amacıyla kullanılmıştır (Şekil 6.2). Mikrofiltreler 1x1 metre ebatlarında Inovenso firmasından temin edilmiştir.

Çizelge 6.2. Altlık haricinde kullanılan filtrelerin kullanılış amacı ve özellikleri

Numune no	Filtre ismi	Kullanılış amacı	Ağırlık (g/m²)	Filtre sınıfı	$Ø_{ort}$ (µm)
6	H 13 HEPA nanofiltre	Numune	85	H13	0.9
7	PP Ergitme-üfleme	Numune	110	F7	8
8	PET Spunbond	Numune	85	G4	20
9	PP Monofilament	Numune	25	G2	60
	PET Kaba (Elyaf)	Ön filtreleme	125	G2	50

Performans deneylerinde nanofiberlerden oluşan H13 sınıfı HEPA filtre kağıdı da numune olarak kullanılmıştır. H13 sınıfı HEPA filtre kağıdı ıslak yatırma yöntemiyle üretilmiş ve hiçbir işleme tabi tutmadan alındığı gibi kullanılmıştır. Herhangi bir nanofiber kaplanamamıştır. HEPA filtre kağıdı günümüzde ticari HEPA filtre olarak kullanılmaktadır. HEPA filtre kağıdı, bu çalışmada üretilen nanofiber tabakalı filtrelerle karşılaştırmak amacıyla kullanılmış olup, 3x1 m. ebatlarında Ulpatek firmasından tedarik edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.2. Performans testlerinde kullanılan mikrofiber filtrelerin mikroskop görüntüsü (350 büyütme) (a) ergitme-üfleme mikrofiber filtre (7. numune) (b) elyaf filtre

6.1.2. Termoplastik poliüretan

Elektro-eğirme işleminde polimer olarak polyester bazlı TPU kullanılmıştır. Inovenso firmasından tedarik edilen Elastollan 1085 A53 ticari isimli termoplastik poliüretanın teknik özellikleri Çizelge 6.3'de gösterilmiştir. TPU polimerinin kolayca tedarik edilmesi, basitçe çözeltisinin hazırlanması, elektro-eğrilebilmesi ve zehirli olmaması nedeniyle tercih edilmiştir (Daşdemir, 2006). Elastollan® -40 ile 120 °C arasında boyut kararlılığına sahiptir. Yağlara, yakıtlara, UV ışınlarına ve hidrolize dayanıklı, yüksek aşınma direncine, yüksek uzama miktarına, mukavemete ve yırtılma direncine sahiptir (Anonymous, 2012a).

6.1.3. Dimetilformamit

Kimyasal formulu ($HCON(CH_3)_2$) olan dimetilformamit (DMF), TPU gibi bazı polimerlerin çözülmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada, MERCK firmasının ürettiği %99.8'den daha saf olan DMF kullanılmış olup teknik özellikleri Çizelge 6.3'de sunulmuştur (Anonymous, 2012b).

Çizelge 6.3. TPU ve DMF özellikleri (Anonymous, 2012a,b)

Açıklama	TPU granül özellikleri	DMF solventinin özellikleri
Görünüş (20°C, 101.3kPa)	Saydam olmayan granül	Renksiz sıvı
Erime noktası sıcaklığı (°C)	170	-61
Kaynama noktası sıcaklığı (°C)	Kaynamaz, yanar	153
Yoğunluk (kg/m³)	1150	940
Zehirlilik durumu	Zehirli değil	Zehirli

6.1.4. Elektro-eğirme deney cihazı

Bu çalışmada, nanofiber üretimi için 12 lüleye sahip, silindirik toplayıcılı elektro-eğirme deney cihazı kullanılmıştır. Deney cihazı Inovenso marka NE 300 modeldir (Şekil 6.3). Deney cihazı başlıca üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar: Polimer solüsyonu besleme sistemi, yüksek voltaj güç kaynağı ve silindirik toplayıcıdır. Polimer besleme ünitesi, polimer çözeltisini ayarlanan debide lülelere göndermek; yüksek voltaj kaynağı, lüle ile silindirik toplayıcıya yüksek gerilim uygulayarak polimer çözeltisinin eğrilmesini sağlamak; silindirik toplayıcı ise üzerine sarılan altlığın yüzeyinde homojen yapıda nanofiber tabakası kaplamak amacıyla kullanılmıştır. Cihaz özellikleri Çizelge 6.4'deki gibidir.



Şekil 6.3. Elektro-eğirme deney cihazı (Anonim, 2012c)

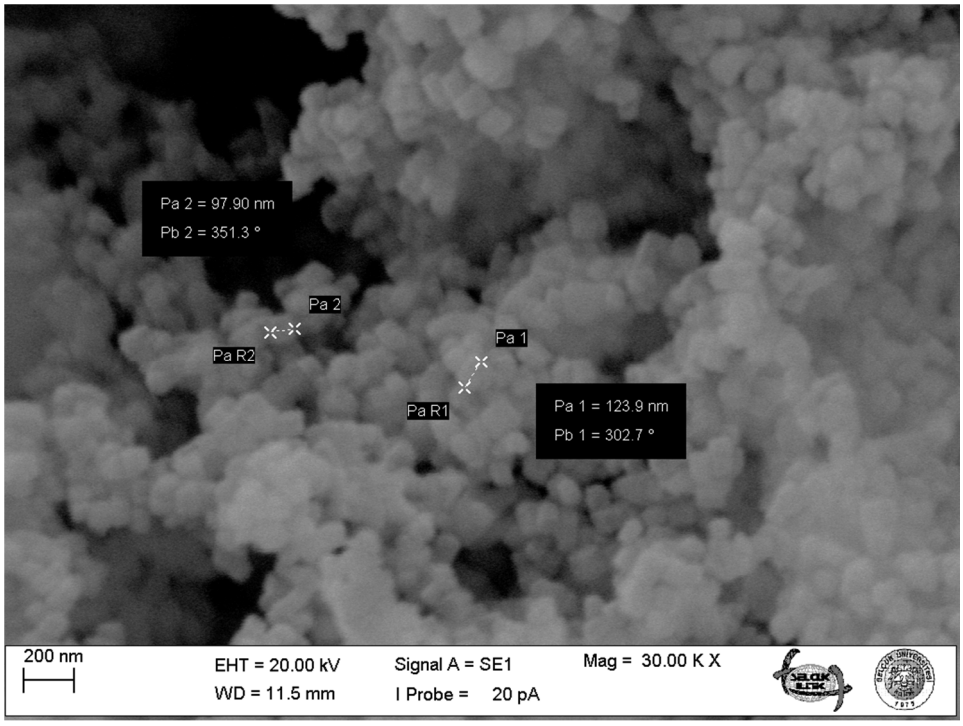
Çizelge 6.4. Kullanılan elektro-eğirme deney cihazının teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
Elektro-eğirme tipi	Aşağıdan yukarıya
Elektro eğirme mesafe aralığı	50-300mm
Toplayıcı tipi	Tambur
Toplayıcı boyutu	Çap: 120mm, Boy: 200mm
Toplayıcı malzemesi	Paslanmaz çelik
Lüle sayısı, malzemesi	12 adet, pirinç
Lüle iç çapı	0.8 mm
Voltaj aralığı	5-40 kV, 1 mA
Besleme pompası debisi	0-1000 mL/h

6.1.5. Filtre test materyalleri

Hassas Terazi: Filtre ağırlıkları ölçümünde, Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Nano Araştırmalar Laboratuarında bulunan ve 1/10,000 g hassasiyetindeki terazi kullanılmıştır.

$CaCO_3$ nanopartikül: 80-120 nm çapında, küresel formda, $CaCO_3$ partikülleri filtre partikül tutma testinde kullanılmıştır (Şekil 6.4). Zehirli olmaması, kolay tedarik edilmesi, ucuz olması nedeniyle tercih edilmiştir. Taian Globalbas Ltd. Şti'den temin edilmiştir. 2.7 g/cm^3 yoğunluğa ve en az %95 saflığa sahiptir (Anonymous 2013,c).



Şekil 6.4. $CaCO_3$ nanopartiküllerin SEM görüntüsü

Hava regülatörü: Filtre testinde, kompresörden gelen basınçlı havanın içinde bulunan su, yağ ve partikülleri tutan, sabit basınç sağlayan, Bosch Rexroth marka 0-10 bar ve 0-500 L/dak. aralığında çalışan hava regülatörü ve filtre kullanılmıştır. Simya hidrolik firmasından temin edilmiştir.

Anemometre: Anemometre performans deneylerinde kanal içindeki hava hızını, hava sıcaklığını ve bağıl nemi ölçmek için Meitav marka M4000MD model anemometre kullanılmıştır. Anemometre özellikleri Çizelge 6.5'de sunulmuştur.

Çizelge 6.5. Anemometre özellikleri (Anonymous 2013e)

Özellik	Sıcaklık	Nem	Hız
Sensör tipi	NTC Termistör	Elektronik direnç	Pervane
Ölçme aralığı	-5 °C ile +65 °C	% 10 Rh ile %95 Rh	0.1 ile 15 m/s
Doğruluk	± 1 °C	± 3 %	± 3 %

6.2. Nanofiber Filtre Üretimi

PAN, TPU, PVA, PA6 polimerleri çözülerek, tek lüleli elektro-eğirme deney cihazında alüminyum folyo üzerinde nanofiber üretilmeye çalışılmıştır. Kolay çözünmesi, su ile etkileşmemesi ve elektro-eğirme işlemine uygunluğu nedeniyle TPU kullanılmasına karar verilmiştir. Nanofiber kaplamak için en uygun altlık arayışında, yüzey tülü, karbon mikrofiber keçe, paslanmaz metal ızgara ve mikrofiber keçe kullanılmıştır. Bu altlıkların çoğu TPU nanofiber kaplansa da filtre olarak kullanmaya pek elverişli olmadığı görülmüştür. Gerek fiber kaplamadaki düzensizlik, gerekse elektro-eğirme prosesinin kararlı olmaması nedeniyle mikrofiber filtre altlıkları kullanılarak nanofiber filtre üretilmesi kararlaştırılmıştır. Bununla birlikte, tek lüle ile homojen nanofiber üretilemediğinden silindirik toplayıcılı elektro-eğirme cihazı kullanılmıştır.

6.2.1. Altlıkların hazırlanması

Nanofiber tabakanın kaplanacağı altlıklar, 380x200 mm ebatlarda mikrofiltrelerden kesilmiştir. Altlık olarak dört tane 85 g/m² PET spunbond mikrofiber filtre ile bir adet 25 g/m² PP monofilament mikrofiber filtre hazırlanmıştır. Altlıklar tek tek tartılarak ağırlıkları not edilmiştir (Çizelge 6.6).

6.2.2. TPU polimerinin çözünmesi

Elektro-eğirme deneyi için, ağırlıkça %15 polimer konsantrasyona sahip, 50 g ağırlığında TPU polimer çözeltisi hazırlanmıştır. Bunun için, 42.5 g DMF çözücüsü ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 110°C'ye kadar ısıtılmıştır. 7.5 g TPU granülü, ısıtılan DMF'nin içine yavaşça dökülerek TPU granüllerinin tamamen erimesi beklenmiştir. TPU granülleri eridikten sonra 50 mg (ağırlıkça % 0.1) sodyum klorür ilave edilerek ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda bir saat boyunca karıştırılmıştır. Daha sonra çözelti, oda sıcaklığında üstü kapalı bir şekilde soğumaya bırakılmıştır. TPU çözeltisi hazırlandıktan sonra bir gün bekletilmiştir.

6.2.3. Elektro-eğirme deneyi

Elektro-eğirme işleminin deney parametreleri Çizelge 6.6'da sunulmuştur. Buna göre, altlık ağırlığı daha önce 380x200 mm ebatlarda hazırlanan mikrofiltrelerin ağırlığı, konsantrasyon yüzdesi TPU'nun ağırlıkça oranı, β polimer besleme debisi, l toplayıcı ile kılcal boru arasındaki mesafe, C uygulanan voltaj, t_e deney süresidir.

Çizelge 6.6. Elektro-eğirme metoduyla altlık üzerinde nanofiber tabaka üretimindeki deney parametreleri

Numune No	Altlık malzemesi	Altlık ağırlığı (g)	β (mL/h)	l (m)	C (kV)	t_e (dak.)
1	PET Spunbond	6.47	3.0	0.21	28	4.8
2	PET Spunbond	6.52	2.8	0.23	32	6.6
3	PET Spunbond	6.51	2.4	0.19	28	7.2
4	PET Spunbond	6.45	2.1	0.21	28	7.8
5	PP Monofilament	1.85	2.5	0.21	28	7.2

Üçüncü numunenin nanofiber kaplanması için, 380x200 mm ebatlarında ve 6.51 gram olan PET spunbond filtre altlık, silindirik tamburun üzerine sarılarak izole bant ile yapıştırılmıştır. Daha önce hazırlanan çözeltinin bir kısmı, 50 mL'lik bir behere boşaltılarak 25 mL'lik şırıngaya çekilmiştir. Şırınga içinde havası alınan çözelti elektro-eğirme deney cihazındaki dozaj pompasına konmuştur. Bu şırıngaya polietilen hortum takılmıştır. Hortumun diğer ucu lülelere bağlı boruya takılarak silindirik toplayıcı ile lüle arasındaki mesafe 19 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Dozaj pompası, 28.8 mL/h debiye ayarlanarak çalıştırılmış, böylece çözelti lülelere gönderilmiştir. Deneye başlamadan önce lülelerin ağzındaki çözelti silinerek temizlenmiştir. Deney cihaz kapağı kapatılarak silindirik tambur çalıştırılmıştır. Polimer çözeltisinin lüle ucunda

toplanması beklenmiştir. Polimer çözeltisi toplanmaya başladığı anda elektro-eğirme cihazının güç kaynağı çalıştırılmıştır. 10 kV ile başlayan gerilme yetersiz geldiğinden Taylor konisi gözlenmemiştir. Manuel olarak yükseltilen gerilim, 27 kV'a ulaştığında Taylor konisi oluşmaya başlamış 29 kV'da ise eğirme başlamıştır. Bu sırada kronometre çalıştırılmış ve yaklaşık 6 dakika sonra deney cihazı durdurulmuştur. Altı dakikalık süre, dozaj pompasının saatteki debisi ve polimer çözeltisinin yoğunluğundan yola çıkılarak hesaplanmıştır. Altı dakika sonunda, filtre numunesi hassas terazide tartılmış ve 6.68 g ağırlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Nanofiber tabaka ağırlığı 0.17 g olduğundan numune, silindirik toplayıcıya bağlanmış ve elektro-eğirme işlemi tekrarlanmıştır. Yaklaşık 2 dakika sonunda filtre numunesi tartılmış ve 6.74 g ağırlığa sahip olduğu (altlığın nanofiber tabaka ağırlığı 0.23 g) tespit edilmiştir. Diğer dört altlık de benzer prosesler uygulanarak filtre numuneleri üretilmiştir.

6.3. Nanofiltre ve Mikrofiltrelerin Performans Testleri

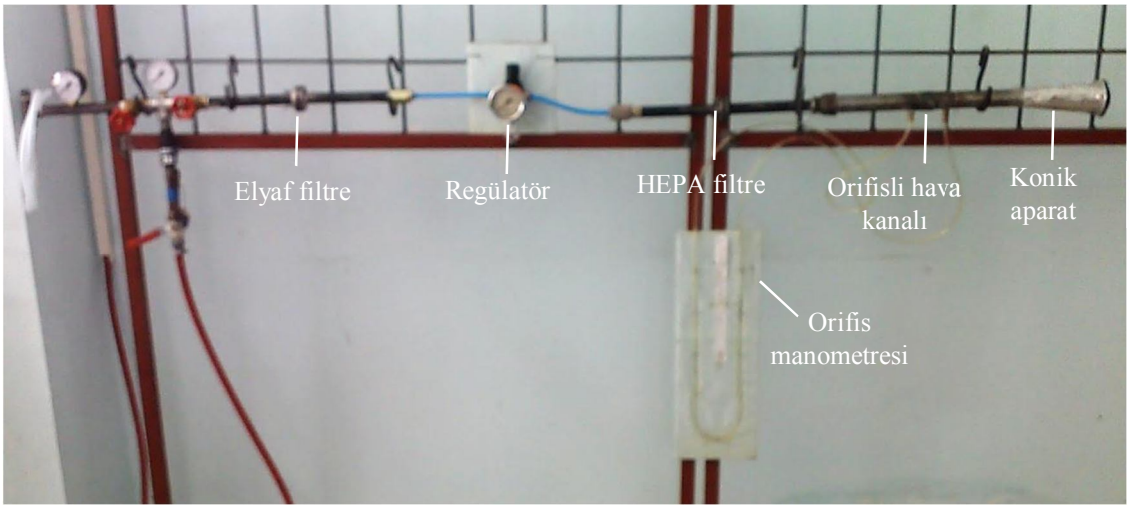
Liteartürde hava filtreleri performanslarının karşılaştırılması amacıyla genellikle iki test yapılmıştır. Bunlar, basınç kaybı ve partikül tutma etkinliği testleridir. Basınç kaybı testlerinde filtreye temiz hava gönderilerek oluşan basınç kaybı ölçülmüştür. Partikül tutma etkinliği testlerinde ise, nanopartiküllü hava filtreye gönderilmiş ve oluşan basınç kaybı ile yakalanan partikül miktarı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada basınç kaybı deneyleri 0.3, 0.8 ve 1.3 m/s alın hızlarında yapılmış ve meydana gelen basınç kaybı tespit edilmiştir. Partikül yakalama deneyleri ise 0.3 m/s alın hızında yapılarak oluşan basınç kaybı ve yakalanan nanopartikül miktarı ölçülmüştür. Partikül yakalama testleri, her beş dakikada bir yakalanan partikül miktarı ve basınç kaybı ölçülerek yapılmıştır. Nanofiber filtre performansı deney parametreleri Çizelge 6.7'de sunulmuştur.

Çizelge 6.7. Filtrelerin performans testleri deney parametreleri

Parametreler	Basınç kaybı deneyi	Partikül tutma deneyi
Alın hızı (m/s)	0.3, 0.8, 1.3	0.3
Ortalama partikül boyutu (nm)	-	100
Partikül şekli	-	Küresel
Test filtresi boyutu (mm)	Ø 42	Ø 42
Test süresi (dak.)	5	25

Hava kanalındaki alın hızını ölçmek için anemometre kullanılmıştır. Anemometre orifis çıkışına koni şeklinde galvaniz saçtan oluşan bir aparat vasıtasıyla monte edilmiştir. Ölçüm sonucu cihaz üzerinden okunmuştur. Anemometreyle kanaldaki hava hızı ölçümü deney düzeneği Şekil 6.5'de sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 6.5. Anemometre ile hava hızı ölçümü (a) deney seti, (b) deney setine anemometre bağlantısı

Anemometreyle hız ölçümünde sisteme ilaveten orifisli hava kanalı kullanılmıştır (Şekil 6.5a). Bunun nedeni, her deneyde anemometreye gereksinim duymamaktır. Şöyleki, anemometrede oluşan hava hızına karşılık gelen orifis fark basınç değeri referans alınarak performans deneyleri yapılmıştır. Yani, kanaldaki hava hızı 0.3 m/s iken orifiste oluşan basınç farkı 19 mmSS ölçülmüştür. Benzer şekilde 0.8 m/s ve 1.3 m/s hava hızlarında sırayla 96 mmSS ve 247 mmSS orifis fark basıncı oluşmuştur. Basunç kaybı ve partikül yakalama deneylerinde sözkonusu bu orifis fark basıncı değerleri kullanılmıştır.

0.3 m/s, 0.8 m/s ve 1.3 m/s alın hızına karşılık gelen hacimsel debi Denklem 6.1'deki eşitlikten yararlanarak hesaplanmıştır. Burada $\dot{V}$, hacimsel debi (m³/s); A, hava kanalı kesit alanı (m²); V, hava hızı (m/s)'dır.

$$\dot{V} = \mathrm{V}.\mathrm{A} \tag{6.1}$$

$$\dot{\mathrm{V}} = 0.3\ \frac{\pi.(0.027)^2}{4}$$

$\dot{V}_{0.3\ m/s}$= 1.718 10^{-4} m³/s hesaplanır. Aynı işlem 0.8 m/s ve 1.3 m/s alın hızı için yapılmış ve $\dot{V}_{0.8\ m/s}$= 4.580 10^{-4} m³/s, $\dot{V}_{1.3\ m/s}$= 5.725 10^{-4} m³/s hesaplanmıştır.

Kütlesel debi ise Denklem 6.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada $\dot{Q}$, kütlesel debi (kg/s); υ, havanın özgül hacmi (m^3/kg); $\dot{V}$, hacimsel debi (m^3/s) ve'dır.

$$\dot{Q}.\upsilon = \dot{V} \tag{6.2}$$

Havanın yoğunluğunu bulmak için kanal içindeki havanın sıcaklığı ve bağıl nemi anemometre ile ölçülmüş ve sırayla 25.6 °C, % 15.9 Rh değerleri elde edilmiştir. Atmosferik hava basıncı, sıcaklık ve bağıl nem kullanılarak psikrometrik diyagram vasıtasıyla özgül hacim hesaplanmıştır (Anonymous, 2013f). Buna göre υ = 0.966 m^3/kg'dır.

Denklem 6.2, 0.3 m/s akış hızına karşılık gelen kütlesel debi ($\dot{Q}_{0.3m/s}$)'yi bulmak için şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{Q}_{0.3m/s} = \dot{V}/\upsilon$$

$$\dot{Q}_{0.3\text{m/s}} = \frac{1.718*10^{-4}}{0.966}$$

$\dot{Q}_{0.3\ \text{m/s}}$= 1.78 10^{-4} kg/s hesaplanır. Aynı işlemler 0.8 m/s ve 1.3 m/s alın hızı için yapılmış ve $\dot{Q}_{0.8\ \text{m/s}}$ = 4.74 10^{-4} kg/s ve $\dot{Q}_{1.3\ \text{m/s}}$= 5.93 10^{-4} kg/s hesaplanmıştır.

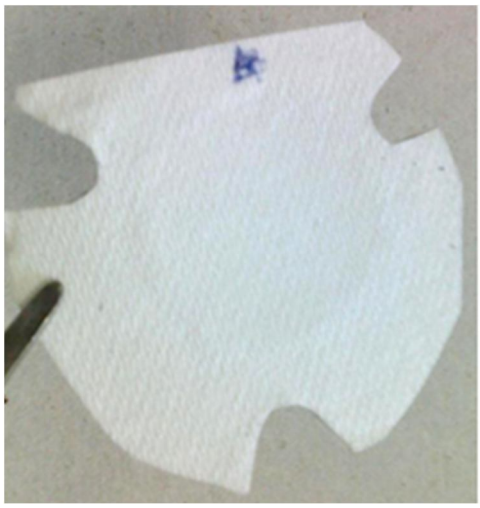
Orifisin giriş ve çıkışına bağlı manometrede akışkan olarak su kullanılmıştır. Suyun özgül ağırlığının düşük olması nedeniyle, hassas basınç farkı ölçülmesini sağlamıştır. Filtre test numunesi manometresinde ise cıvalı manometre kullanılmıştır. Cıvanın özgül ağırlığı yüksek olduğundan daha büyük basınçların ölçümüne olanak tanımıştır. Su kullanılan manometre ile cıvalı manometre arasında (Denklem 6.3)'deki gibi eşitlik söz konusudur:

760 mmHgS = 10000 mmSS (6.3)

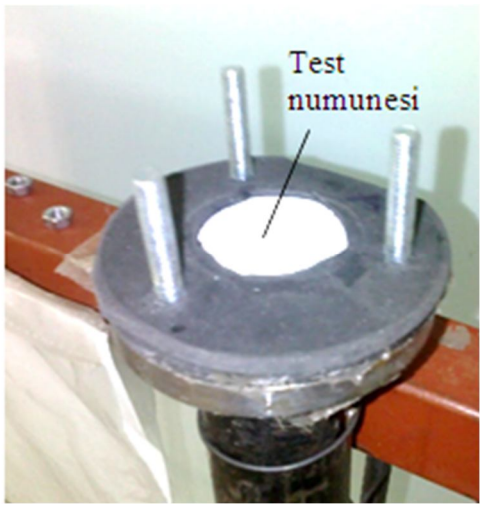
Deney düzeneğinde sızdırmazlık çok önemlidir. Çünkü deneylerde basınç ölçümünün çok hassas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, her iki deney düzeneği kurulduktan sonra, tüm boru ve parçaların birleşme yerlerinin sızdırmazlığının kontrol edilmesini sağlayan köpük testi uygulanmıştır. Köpük testi için su ve sıvı sabun alınarak bir pet bardak içinde iyice karıştırılmış ve köpük oluşturulmuştur. Deney düzeneğine hava verilerek, hava kanalları üzerine köpük uygulamıştır. Şayet köpükte bir şişme varsa vana kapatılarak sızdıran yer yapıştırılmıştır. Birkaç dakika sonra aynı işlem tekrarlanarak tüm düzeneğin sızdırmazlığı sağlanmıştır. Diğer yandan flanşların sızdırmazlığı için havalandırma kanallarında kullanılan NFAF ismi verilen poliüretan köpük contadan yararlanılmıştır. Flanşlar arası sızdırmazlığı sağlamak için flanşlara uygun contalar kesilerek yapıştırılmıştır.

6.3.1. Filtre numunelerinin hazırlanması

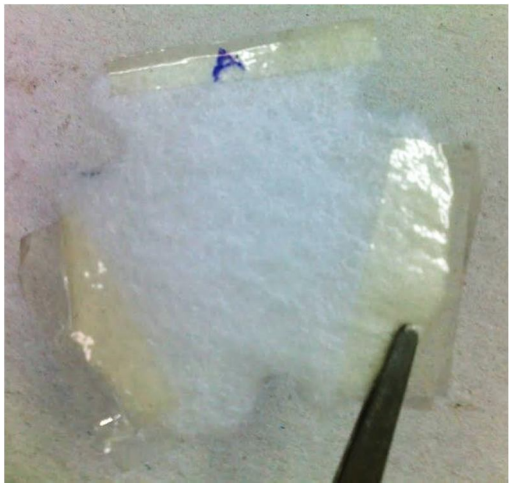
Filtre numuneleri ve elyaf filtreler flanşa bağlanacak şekilde bir şablon hazırlanarak kesilmiştir. Numuneler kesilirken homojenliğin sağlanması amacıyla, filtre kenarlarından en az 5 cm uzakta olmasına dikkat edilmiştir. Filtrelerin kolayca merkezlenmesi ve yırtılmaması için cıvatalara denk gelen köşeleri boşaltılmıştır (Şekil 6.6a). Ayrıca, filtre numunelerinin flanş dışına taşmaması sağlanmıştır (Şekil 6.6b). Elyaf filtrelerin kenarları izole bantla yapıştırılarak rijit hale getirilerek elyaf kaybı azaltılmıştır (Şekil 6.6c).



(a)



(b)



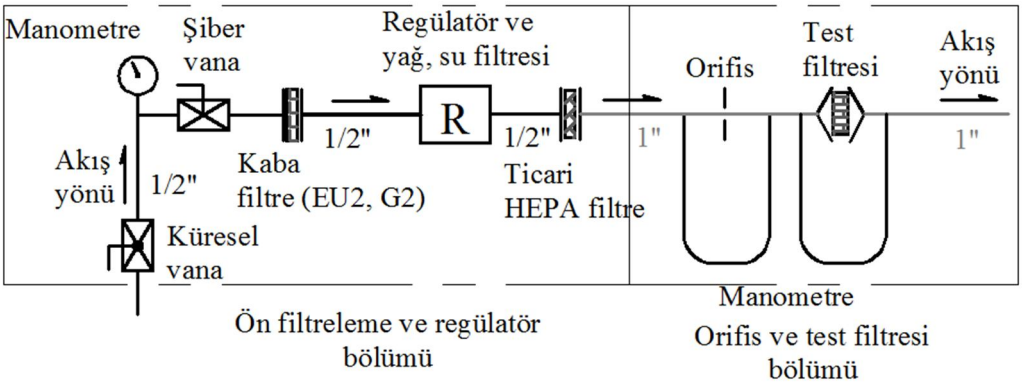
(c)

Şekil 6.6. Filtre performans deneylerinde kullanılan filtreler (a) test numunesi, (b) basınç deney cihazına yerleştirilen test numunesi, (c) kaba (elyaf) filtre

6.3.2. Basınç kaybı deneyleri

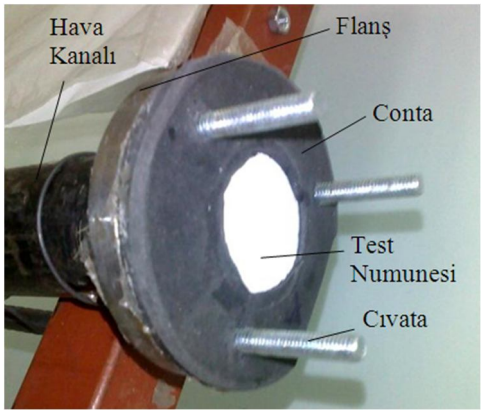
Filtrelerin yakaladığı partikül miktarı kadar, filtrasyon esnasındaki basınç kaybı da önemlidir. Çünkü filtre ömrü tayininde, filtrasyon sonunda kabul edilebilir basınç kaybı kullanılır. Örneğin G sınıfı filtrelerde basınç farkı 250 Pa, M ve F sınıfı filtrelerde 450 Pa, HEPA filtrelerde 600 Pa basınç kaybına ulaşıldığında filtrenin ömrünü doldurduğu kabul edilir. Bununla beraber basınç kaybı deneyi, test numunelerinin geçirgenliğini ve farklı hava hızlarında test numunelerindeki basınç kaybını tespit etmek amacıyla yapılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan basınç kaybı deney seti iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 6.7). Bunlar ön filtreleme ve regülatör sistemi, orifis ve test filtresi bölümüdür. Ön filtreleme ve regülatör sistemi, kaba filtre, regülatör ve H13 sınıfı HEPA filtre bölümlerinden oluşmaktadır. Bu bölümdeki kaba filtre büyük partiküllerin, regülatör sıvı partiküllerin (yağ ve su gibi), H13 sınıfı HEPA filtre ise küçük partiküllerin filtrelenmesi amacı ile kullanılmıştır. Ayrıca, sabit hava debisi elde etmek için regülatörden yararlanılmıştır. Orifis bölümü hava kanalındaki hızı ölçmek için tasarlanmıştır. Anemometreden ölçülen hava hızı 0.3, 0.8 ve 1.3 m/s olduğunda orifis manometresindeki basınç farkı sırayla 15, 96 ve 247 mmSS olduğu daha önce (6.3 bölümünde) görülmüştü.



Şekil 6.7. Basınç kaybı deney seti şematik şekli

Tüm filtre numuneleri orifisten sonra monte edilmiştir. Test filtresi manometresinde yüksek basınç kaybı olduğundan, cıvalı manometre kullanılmıştır. Test numunelerini ve diğer filtreleri deney cihazına bağlamak için flanşlardan yararlanılmıştır. Flanşlar borulara vidalanmış olup her iki flanş birbirine cıvatalarla monte edilmiştir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Filtre test numunesinin yerleşimi

Her deneyden önce tüm flanşların sızdırmazlığı kontrol edilmiş ve kaba (elyaf) filtre ile H13 sınıfı HEPA filtre değiştirilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Basınç kaybı deney seti

Deneye başlamadan önce test numunesi tartılmış ve kaba filtre, HEPA filtre, deney numunesi cihaza monte edilmiştir. Nanofiber tabakalı filtre deney setine bağlanırken havanın nanofiber tarafından girecek olmasına dikkat edilmiştir. Filtrelerin bağlandığı flanşlardan hava sızıntısı olmaması için filtre çevresinde çift tarafı yapışkan hava kanalı contası kullanılmıştır. Deney düzeneğinden 0.5 bar hava geçirilerek sızıntı kontrolü yapılmıştır. Daha sonra tüm vanalar kapatılmıştır. Hava girişindeki küresel ve şiber vana açılarak sisteme 2 bar hava verilmiştir. Kaba partiküllerden ayrılan hava, regülatörün yavaşça açılmasıyla HEPA filtreye girerek, çok küçük partiküllerden ve yağdan arındırılmıştır. Orifise giren temiz havanın fark basıncı 15 mmSS (alın hızı, 0.3 m/s) olacak şekilde manuel olarak basınç regülatöründen ayarlanmıştır. Beş dakika sonunda sistem rejime girdiğinde filtre numunesinde oluşan basınç farkı basınç ölçülerek not edilmiştir. Daha sonra deney seti girişindeki şiber vana kapatılarak ilk deney tamamlanmıştır. Aynı filtreyle ikinci alın hızında ölçüm için şiber vana yavaşça açılmış ve ardından regülatör orifis manometresinde 96 mmSS (0.8 m/s) olacak şekilde ayarlanarak beş dakika sonunda filtre numunesinde oluşan fark basınç not edilmiştir. Benzer işlemler, 247 mmSS (1.3 m/s) orifis fark basıncı olacak şekilde regülatör

ayarlanarak 5 dakika sonunda filtre numunesi manometresindeki basınç farkı not edilerek test tamamlanmıştır. Basınç kaybı deneyinden sonra tıkanma kontrolü amacıyla test numuneleri tartılmış ve herhangi bir kütle artışı olmadığı belirlenmiştir.

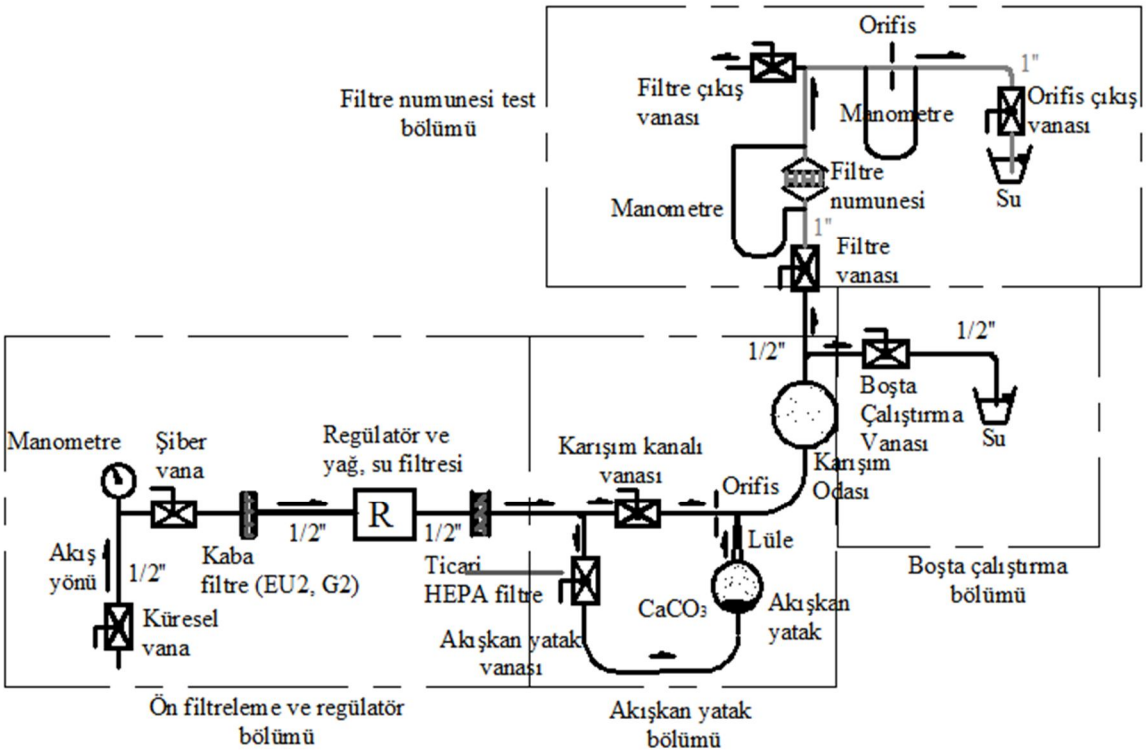
6.3.3. Partikül yakalama deneyleri

Bir hava filtresinden beklenen, çok sayıda küçük partikülü düşük basınç kaybı oluşturarak yakalamaktır. Zaten filtrelemenin amacı temiz, yani partikülsüz bir hava elde etmektir. Hava filtresinden beklenen bu özelliğin ölçülmesi amacıyla partikül yakalama deneyleri yapılmış ve yakalanan partikül miktarı ile oluşan basınç kaybı ölçülmüştür.

Partikül yakalama miktarının ölçülmesi amacıyla geliştirilen partikül yakalama deney cihazı dört bölümden oluşmaktadır (Şekil 6.10). Bunlardan ilki, ön filtreleme ve regülatör sistemi olup, basınç kaybı deney setindeki gibi partikül filtreleme ve hava debisini ayarlamak için kullanılmıştır. İkinci bölüm olan akışkan yatak vasıtasıyla, $CaCO_3$ nanopartikülleri uçurulup karışım odasına gönderilmiştir. Karışım odasında homojen bir karışım elde edilmiştir. Üçüncü bölümdeki boşta çalıştırma hattı, deney sisteminin rejime girmesi, deney setinin filtre numunesi söküp takarken sistemin aralıksız çalışması amacıyla tasarlanmıştır. Son bölüm olan filtre numunesi test bölümünde ise, filtreden geçen hava hızının ölçümü yapılarak filtrede oluşan basınç kaybı tespit edilmiştir. Filtrenin tutamadığı partiküller suya gönderilmiştir. Filtreden geçen partiküllerin miktarını ölçmek amacıyla siklon ve sıkıştırılmış elyaf filtre de kullanılmıştır.

Partikül yakalama deneyi süresince akışkan yatak sürekli açık kalmıştır (Şekil 6.10). Akışkan yatak, filtre test numuneleri tartılırken dahi boşta çalıştırma hattına partiküllü hava verilerek çalıştırılmıştır. Bu nedenle düzgün dağılımlı partikül konsantrasyonu elde edilmiştir.

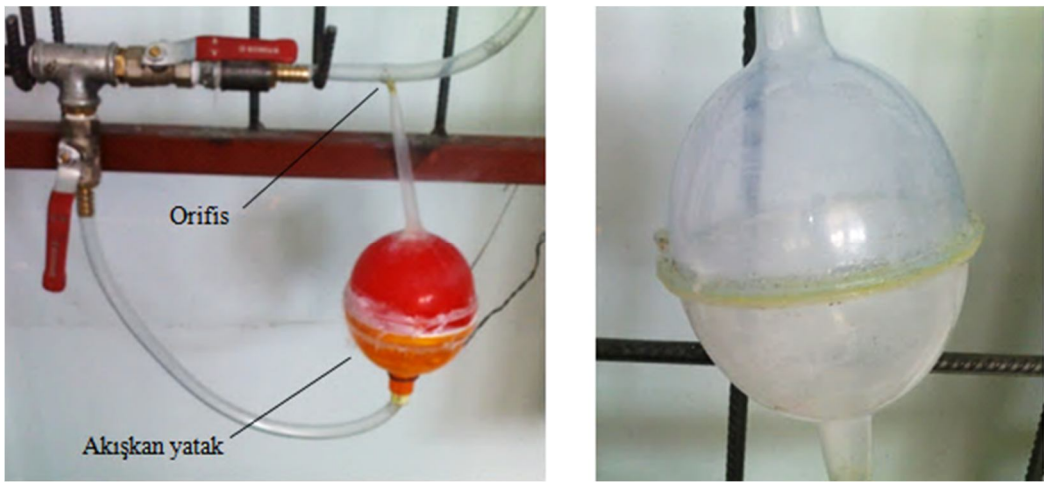
Akışkan yatak, belli boyutlardaki katı taneciklerin sıvı gibi davrandıkları duruma verilen isimdir. Yani basınçlı bir gazın, ortamı oluşturan katı tanecikler arasından geçmesiyle oluşur. Bu durumda katılar sıvı karakteristiği göstermeye başlar. Ayrıca taneciklerin element yapısı değişmeden, yoğunlukları azalır. Bu olaya yataklama adı verilir (Anonymous, 2012d).



Şekil 6.10. Partikül yakalama deney seti şematik şekli

Akışkan yataktan çıkan partiküllerin iyi karışması için şeffaf hortum içine bir orifis monte edilerek havanın, akışkan yatakla bağlantısı öncesinde hızlandırılması sağlanmıştır (Şekil 6.11a). Akışkan yatak olarak iki yarı küre bir plastik kap temin edilerek kaplardan birinin hava giriş kısmında küçük delikler açılmıştır. Bu deliklerin altına H13 sınıfı HEPA filtre konularak partiküllerin deliklerden aşağıya dökülmesi önlenmiştir. Hava giriş borusu, şeffaf hortumla sızdırmaz bir şekilde bağlanmıştır. Partiküllerin çıktığı üst kısım ise üstteki küresel kap delinerek bir pipet yerleştirilmiştir. Bu pipet havanın hızla aktığı orifisin hemen ucuna gelecek şekilde monte edilmiştir (Şekil 6.11a). Akışkan yatakla, çok küçük katı parçacıklar hava ile uçurularak nanopartikülü hava elde edilmiştir.

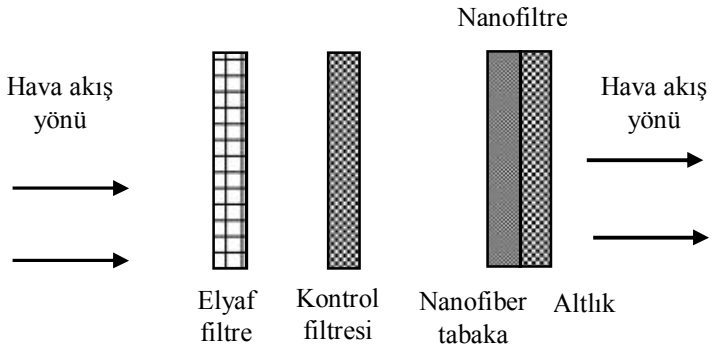
Karışım odası için, iki şeffaf huni alınarak alın alına yapıştırılmıştır. Hunilerin her iki ucu da şeffaf bir hortum vasıtasıyla monte edilerek sızdırmazlığın sağlanması için yapıştırılmıştır (Şekil 6.11b).



(a) (b)

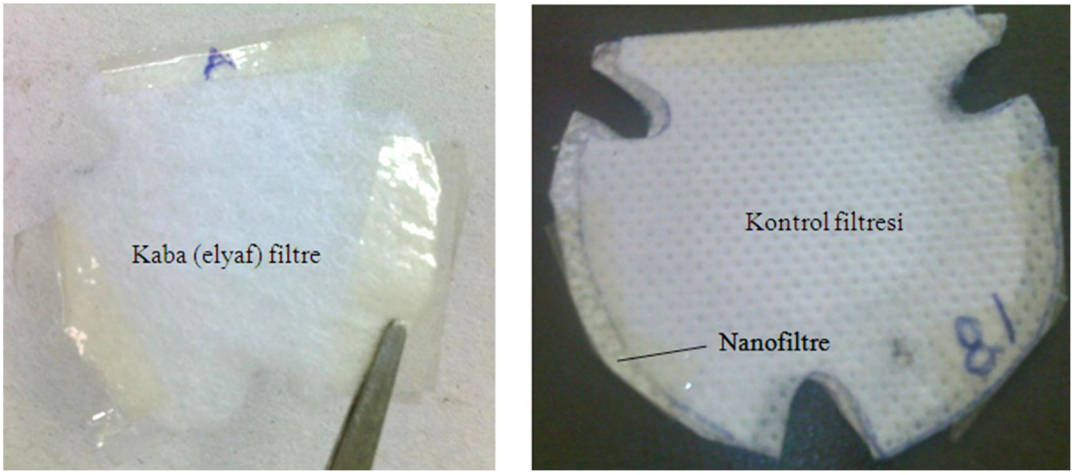
Şekil 6.11. Partikül yakalama deney cihazından görüntüler (a) akışkan yatak ve orifis (b) karışım odası

Partikül yakalama deneylerinde filtre numuneleri belli bir sırayla konmuştur Nanofiber tabakalı filtrelerin partikül tutma testlerinde, ilk sıraya elyaf filtre, sonra kontrol filtresi, son olarak da nanofiber tabaka kaplı altlık konmuştur (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Partikül testinde deney setine monte edilen filtrelerin yerleşim sırası şematik şekli

Buradaki elyaf filtrenin amacı, kümelenmiş halde gelmesi muhtemel $CaCO_3$ nanopartiküllerden nanofiber tabakayı korumaktır (Şekil 6.13a). Nanofiber tabaka ile altlığın oluşturduğu nanofiltre, kontrol filtresiyle yapıştırılmış nanofiber tabaka ortada kalmıştır (Şekil 6.13b). Diğer yandan nanofiber tabakanın tıkanmaması için nanopartiküller nanofiltreye altlıktan girip nanofiber tabakadan çıkmalıdır. Fakat bu durumda nanofiber tabaka yüksek basınç nedeniyle çok kısa sürede çatlamış ve çatlak büyüyerek filtre delinmiştir. Bu yüzden altlığın nanofiber tabakaya destek olması için nanofiber tabakadan sonra kullanılması gerekmiştir. İşte bu sebepten dolayı nanopartiküller nanofiber tabakadan önce kontrol filtresine girmesi gerekir ki filtre amacına ulaşsın.



Şekil 6.13. Partikül yakalama testinde filtrelerin yerleşim sırası (a) kaba (elyaf) filtre, (b) kontrol filtresi ve nanofiltre (nanofiber tabaka ve altlık)

H13 sınıfı HEPA filtre numunesi ve mikrofiber filtre numuneleri önüne sadece elyaf filtre konulmuş, kontrol filtresi kullanılmamıştır. Partiküllü hava, ilk önce elyaf filtre, sonra kontrol filtresi, en son nanofiber tabakaya girecek şekilde yerleştirilmiştir (Çizelge 6.8).

Çizelge 6.8. Partikül yakalama testinde filtre numunesi bölümüne konulan filtrelerin yerleşim sırası

Numune no	Ön Filtreleme	Kontrol filtresi	Test filtresi	Nanofiber tabaka ağırlığı (g/m^2)
1	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	2
2	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	2.5
3	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	3
4	Elyaf filtre	Spunbond	Nanofiber tabaka	3.2
5	Elyaf filtre	Monofilament	Nanofiber tabaka	4
6	Elyaf filtre	-	H13 HEPA filtre	
7	Elyaf filtre	-	Ergitme-Üfleme	
8	Elyaf filtre	-	Spunbond	
9	Elyaf filtre	-	Monofilament	

Birinci test numunesinin partikül yakalama deneyinde test numunesi yerleşmiş durumu Şekil 6.14'de sunulmuştur. Hava girişi tarafına elyaf filtre ardından kontrol filtresi ve son olarak da birinci nanofiltre konmuştur. Bu üç filtre flanşın üzerindeki conta içine yerleştirilerek üzerine ikinci bir conta ve flanş monte edilmiştir.

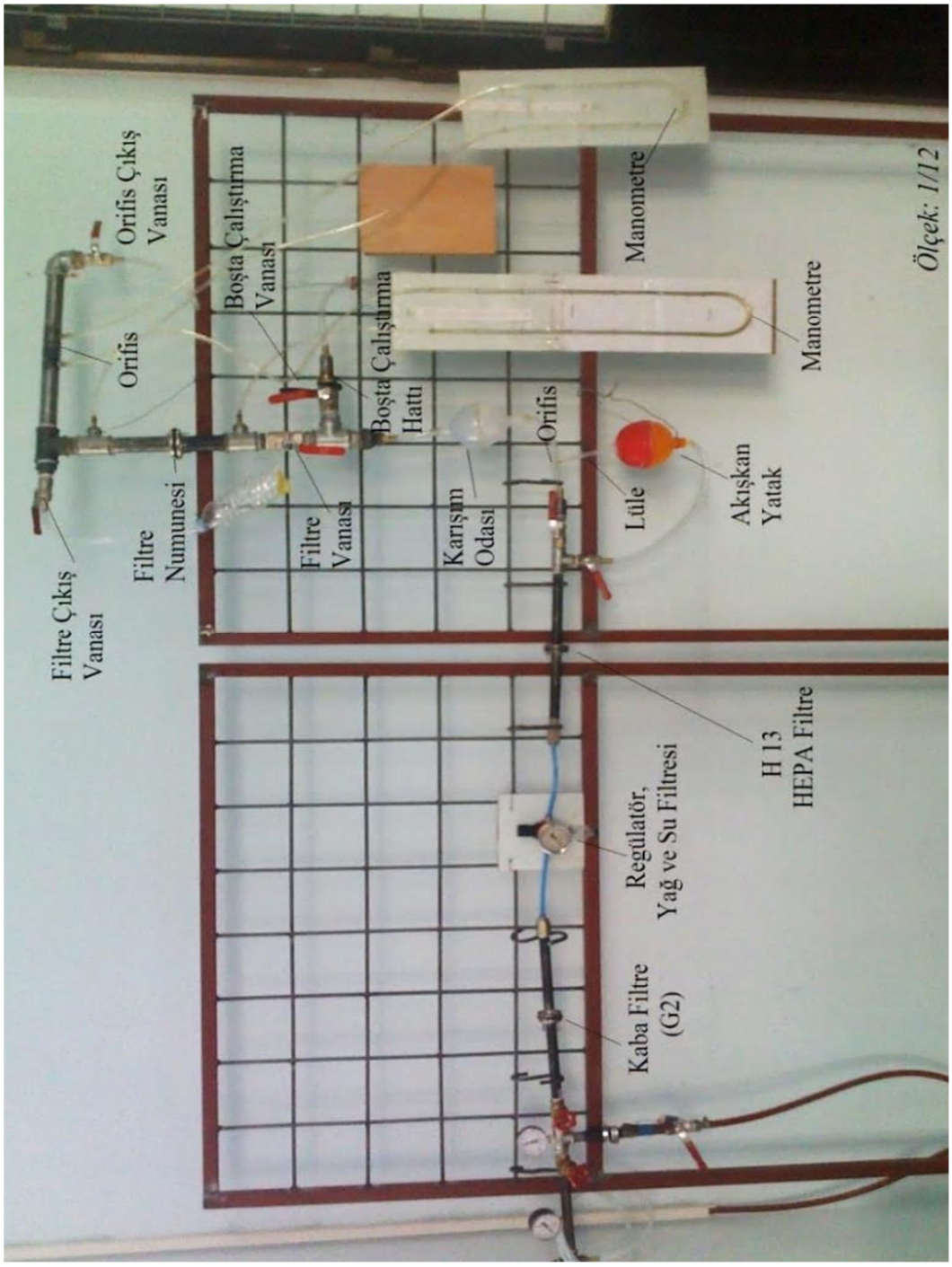


Şekil 6.14. Birinci nanofiltrenin (2 g/m^2) partikül yakalama deneyine başlamadan önce test cihazına yerleştirilmiş şekli

Partikül yakalama testlerinde nanofiber tabakadan önce hep aynı özellikte kontrol filtresi kullanıldığından nanopartikül filtrelemede altlığın önemi yoktur. Nitekim Leung ve arkadaşlarının (2010) yaptığı çalışmalarda altlığın filtrasyon etkinliğinin %2'den daha az olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, filtre numunelerinin partikül tutma verimi incelenirken altlığın filtrasyon etkinliği ihmal edilmiştir. Dolayısıyla mikrofiber filtrelerin kontrol filtresi olarak kullanılması filtrelemeye katkı sağlamıştır. Bu katkı miktarının tespit edilmesi için mikrofiber filtreler de basınç kaybı ve partikül yakalama testine tabi tutulmuştur.

Deneye başlamadan önce, akışkan yatak, karışım kanalı vanası, boşta çalıştırma hattı ve orifis çıkış vanası açılmış, diğeri kapatılmıştır (Şekil 6.15). Partikül yakalama deney düzeneği girişindeki küresel ve şiber vana hava basıncı 2-2.5 bar olacak şekilde yavaşça açılmıştır. Regülatör yavaşça açılarak, havanın akışkan yatak ve karışım kanalına girmesi sağlanmıştır. Karışım kanalında havayla karışan $CaCO_3$, karışım odasına girmiş ve burada homojen $CaCO_3$ nanopartiküllü hava elde edilmiştir. Homojen dağılımlı $CaCO_3$ nanopartiküller, boşta çalıştırma hattından suyun içine doğru ilerlemiştir. Bu şekilde deney sistemi, kararlı rejime geçmesi için 2-3 dak. çalıştırılmıştır. Sistem kararlı hale geçtikten sonra, regülatör yavaşça kısılarak, partikül boşatma vanası kapatılmıştır. Filtre vanası yavaşça açılarak filtre numunesine $CaCO_3$ nanopartikülleri gönderilmiştir. Hava debisi, orifis manometresindeki fark basıncı 15 mmSS olacak şekilde regülatör ayarlanmıştır. Kronometre çalıştırılmış, filtre numunesine bağlı manometreden basınç kaybı okunarak not edilmiştir. Ardından orifis çıkış vanası kapatılmış, filtre çıkış vanası açılmıştır. Beş dakika boyunca nanofiber filtre

numuneleri üzerine $CaCO_3$ nanopartiküller gönderilmiş, sonrasında filtre çıkış vanası kapatılarak orifis hattı vanası açılmış test numunesi basınç kaybı not edilmiştir. Partikül boşta çalıştırma vanası açılarak, filtre vanası kapatılmıştır. Sistem çalışmaya devam ederken kontrol filtresi ve filtre numunesi ile filtre çıkışında bulunan sıkıştırılmış elyaf filtreden veya siklondan geçen partikül miktarı hassas terazide birkaç defa tartılmış, ortalama ağırlıklar not edilmiştir. Böylece toplamda yirmi beş dakikalık filtre performans deneyinin ilk beş dakikalık kısmı bitirilmiştir. Bu şekilde ortalama beş defa filtre numuneleri partikül tutma testine tabi tutularak, oluşan ilave basınç kaybı ve partikül kazanımları not edilerek performans deneyleri tamamlanmıştır.

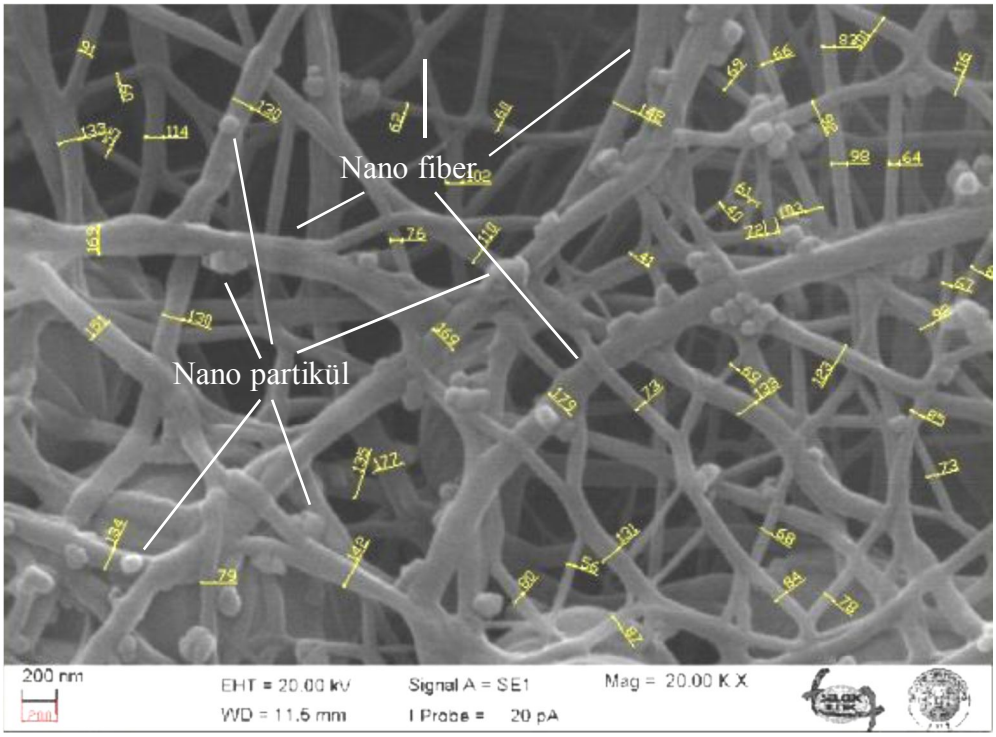


Şekil 6.15. Partikül yakalama deney seti

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

PAN, PVA, PA6 polimer çözeltilerinde kesintili jet oluşması nedeniyle yapılan çalışmalar yarıda kesilmiştir. Düz plakalı ve tek lüleli elektro-eğirme deney cihazı ile homojen nanofiber üretilemediğinden kullanılmamıştır. Yüzey tülünün ve karbon mikrofiber keçenin yeterince rijit olmaması nedeniyle; metal ızgara ise büyük gözenekli olduğundan altlık olarak kullanılmamıştır.

Elektro-eğirme ile nanofiber kaplanan filtreler performans testlerinden sonra SEM analizi yapılmıştır. Bunun için, nanofiberler 5 nm kalınlığında altın nanopartikül kaplanmış ve SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri kullanılarak filtre morfolojisi ile fiber çapları tespit edilmiştir (Şekil 7.1). Şekil 7.1'de nanofiber tabaka ve üzerindeki nanopartiküller görülmektedir. Beşinci nanofiber tabakalı filtrede yakalanan nanopartiküllerin genellikle kümelenmiş halde olduğu diğerlerinde yakalanan nanopartiküllerin ise tek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.1. 3 g/m^2 ağırlıkta kaplanan nanofiber tabakaya sahip filtredeki (3. numune) nanofiberlerin boyutları

7.1. Nanofiber Filtre Üretim Sonuçları

SEM analizi sonucu elde edilen görüntüler kullanılarak beş nanofiltre ve H13 sınıfı HEPA filtre numunesinde 50 farklı fiber ölçülmüştür. Daha sonra fiber ölçülerinin

aritmetik ortalaması alınarak fiber çapları hesaplanmıştır (Çizelge 7.1). Çizelgede $Ø_{min.}$ nanofiltrede en küçük fiber çapını, $Ø_{max.}$ en büyük fiber çapını, $Ø_{ort.}$ ortalama fiber çapını ifade etmektedir. Buna göre, elektro-eğirme ile üretilen nanofiberlerin 40-470 nm arasında olduğu belirlenmiştir. Standart sapma ise 25-92 nm arasındadır (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1. PET Spunbond altlık üzerine kaplanan nanofiberlerin boyutları

Numune No	Filtre ismi	Nanofiber tabaka ağırlığı (g/m^2)	$Ø_{min}$ (nm)	$Ø_{ort}$ (nm)	$Ø_{max}$ (nm)	Standart sapma
1	Nanofiber tabaka	2	67	200	470	92
2	Nanofiber tabaka	2.5	83	193	321	56
3	Nanofiber tabaka	3	40	98	178	36
4	Nanofiber tabaka	3.2	42	77	169	25
5	Nanofiber tabaka *	4	73	137	279	38

* PP Monofilament altlık üzerine kaplanmıştır.

Elektro-eğirme ile nanofiber üretiminde literatürle örtüşen sonuçlara ulaşılmıştır. Nitekim Zhang ve ark. (2009)'nın PA6 ile aynı polimer besleme debisi ve elektriksel gerilimle yaptıkları çalışmada 10 µl/dak.'da 82 nm ortalama nanofiber çapı ve 50 µl/dak.'da 97 nm ortalama nanofiber boyutu elde etmişlerdir. Düşük polimer besleme debisi ile daha ince ve homojen nanofiberlerin elde edildiğini, artan debiyle polimer jetinin kararsız hale gelmesinden dolayı büyük nanofiberlerin elde edildiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca yüksek elektriksel gerilim ve yüksek polimer besleme debisinin aynı anda uygulanmasıyla polimer jetinin kararsız hale geldiğini bunun da boncuk oluşumunu arttırdığını ve nanofiber çap dağılımını genişlettiğini tespit etmişlerdir. Yapılan bu çalışmada da polimer besleme debisinin artmasıyla büyük çaplı nanofiberler elde edilmiş olup ikinci numunede artan polimer besleme debisi ve elektriksel gerilimin polimer jetini kararsız hale getirerek iri nanofiberlerin oluştuğu tespit edilmiştir. Birinci ve ikinci numunede kararsız polimer jetinin nanofiber çap dağılımını genişlettiği standart sapma değerinin artmasından anlaşılmıştır (Çizelge 7.1).

Elektro-eğirme deney parametreleri Çizelge 7.2'de sunulmuştur. Burada β polimer besleme debisini, l lüle-toplayıcı arasındaki mesafeyi, C uygulanan elektrik gerilimini ve $Ø_{ort.}$ ortalama nanofiber çapını ifade etmektedir. Buna göre en ince nanofiberlerin en düşük polimer besleme debisiyle üretilen dördüncü numunede, en kalın nanofiberlerin ise en büyük polimer besleme debisine sahip birinci numunede olduğu SEM analiziyle tespit edilmiştir. Polimer besleme debisiyle nanofiber çapının orantılı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, nanofiber üretimindeki polimer

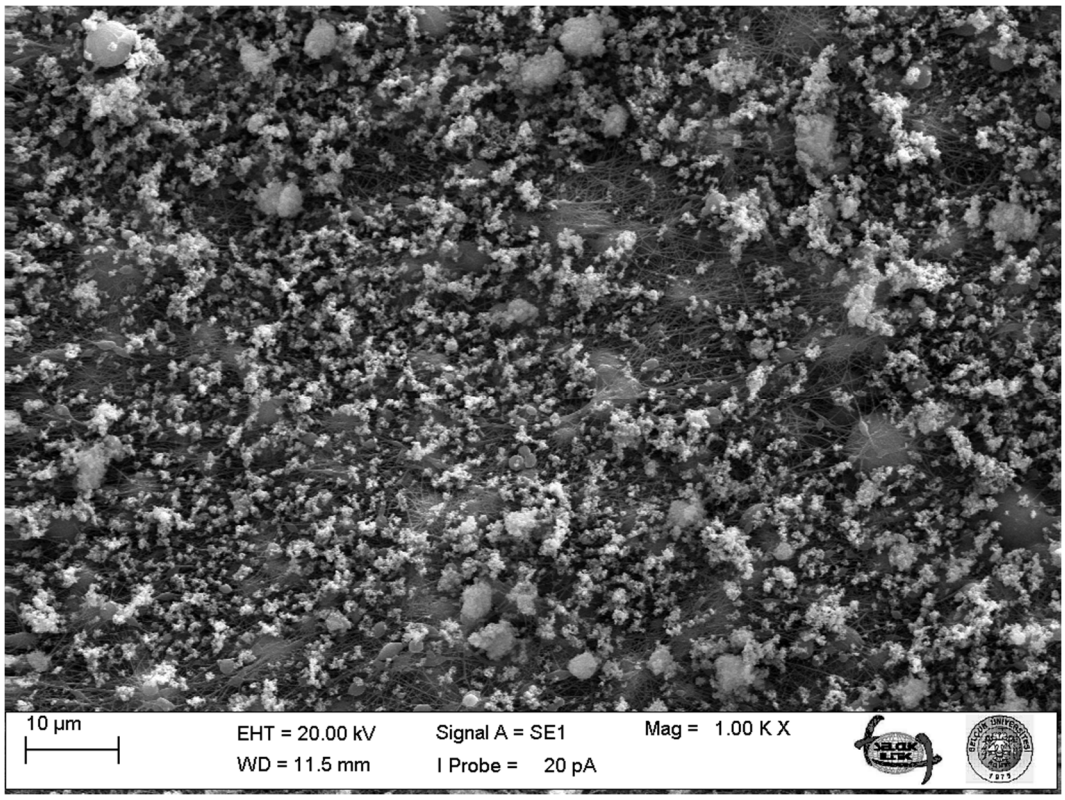
konsantrasyonun sabit, elektriksel gerilim ile elektro-eğirme mesafesinin aynı veya orantılı olmasıdır.

Çizelge 7.2. PET Spunbond altlığa kaplanan nanofiber tabaka üretimindeki elektro-eğirme deney parametreleri ve elde edilen ortalama nanofiber çapı

Numune No	Filtre ismi	Nanofiber tabaka ağırlığı (g/m^2)	β (mL/h)	l (cm)	C (kV)	$Ø_{ort}$ (nm)
1	Nanofiber tabaka	2	3	21	28	200
2	Nanofiber tabaka	2.5	2.8	23	32	193
3	Nanofiber tabaka	3	2.4	19	28	98
4	Nanofiber tabaka	3.2	2.1	21	28	77
5	Nanofiber tabaka *	4	2.5	21	28	137

* PP Monofilament altlık üzerine kaplanmıştır.

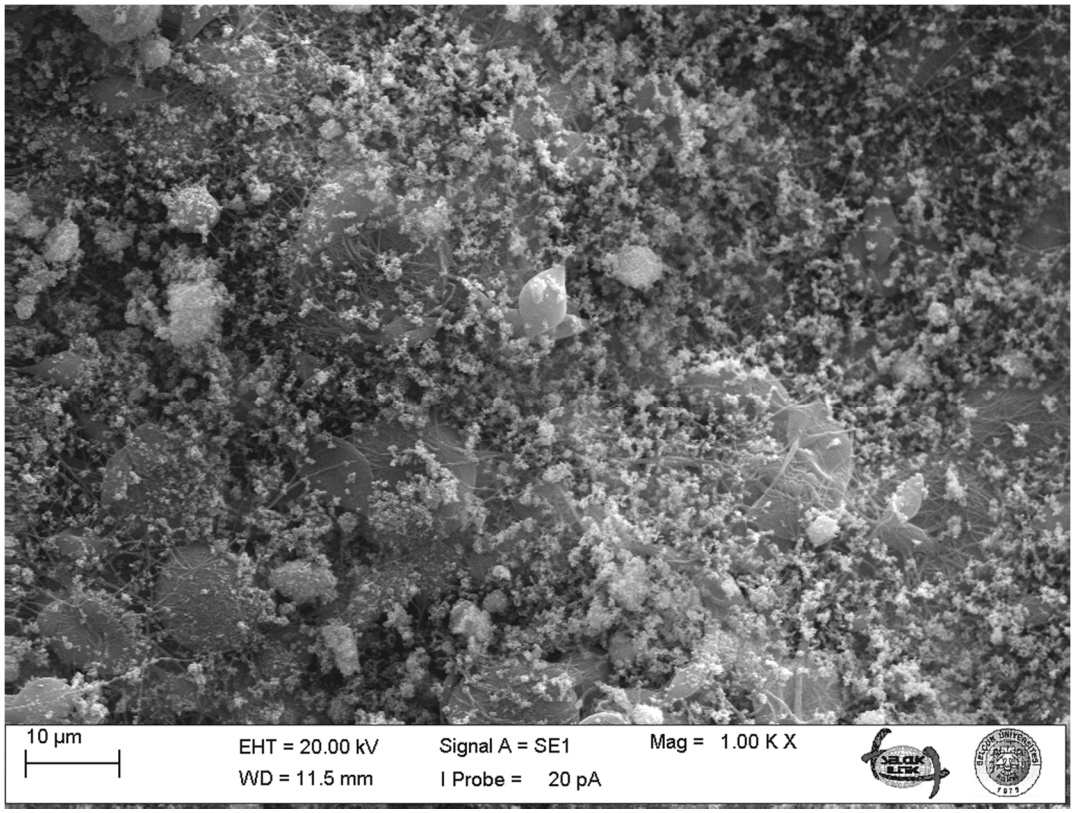
Dördüncü numune ile üçüncü numune aynı konsantrasyon ve elektriksel gerilmede farklı polimer besleme debisi ve elektro-eğirme mesafesinde üretilmiştir. Üçüncü numune üretiminde, dördüncü numuneye göre elektro-eğirme mesafesi 2 cm azalmış, polimer besleme debisi 0.3 mL/h artmıştır. Mesafenin azalması elektriksel çekim gücünü arttırmış fakat artan debi jeti kararsız hale getirdiğinden üçüncü numunede dördüncü numuneye göre daha büyük boyutta nanofiberler oluşmuştur. Ayrıca mesafenin azalması ve polimer besleme debisinin artmasıyla jet kısa sürede toplayıcıya ulaşmıştır. Bu nedenle yeterince kurumamış fiberler toplayıcıda yapışmıştır. İkinci numune, dördüncü numuneye göre, yüksek elektriksel gerilme, polimer besleme debisi ve elektro-eğirme mesafesinde üretilmiştir. İkinci numunede yüksek elektriksel gerilmeden ve artan polimer debisinden dolayı jet kararsız hale gelmiş ve dördüncü numuneden daha büyük nanofiberler üretilmiştir. Bu çalışmamızda, artan polimer debisi ile elektriksel gerilimin jet kararsızlığının arttığı Şekil 7.2 ve Şekil 7.3.a'daki SEM görüntüleri incelenerek görülebilir. Buna göre Şekil 7.2'de bulunan dördüncü nanofiber tabakadaki boncuklu yapının az olması ve standart sapmasının düşük olması polimer jetinin kararlı olduğunu, Şekil 7.3a'daki ikinci nanofiber tabakada büyük miktardaki boncuklu yapılar jetin kararsız olduğunu göstermektedir. Diğer yandan üçüncü numune üretimindeki polimer besleme debisi ve elektriksel gerilimin ikinci nanofiber tabaka üretimindekinden daha düşük olmasından kararlı bir yapı oluşmuştur (Şekil 7.3a,b). Nitekim Ramakrishna ve ark. (2005)'nın yaptıkları değerlendirmede, elektriksel gerilimin yüksek olması çözeltinin hızlanmasına böylece daha ince ve boncuksuz fiber üretilmesine olanak sağladığını, fakat polimer besleme debisinin artması ile bunun tam tersi etki oluşturduğunu ifade etmişlerdir.



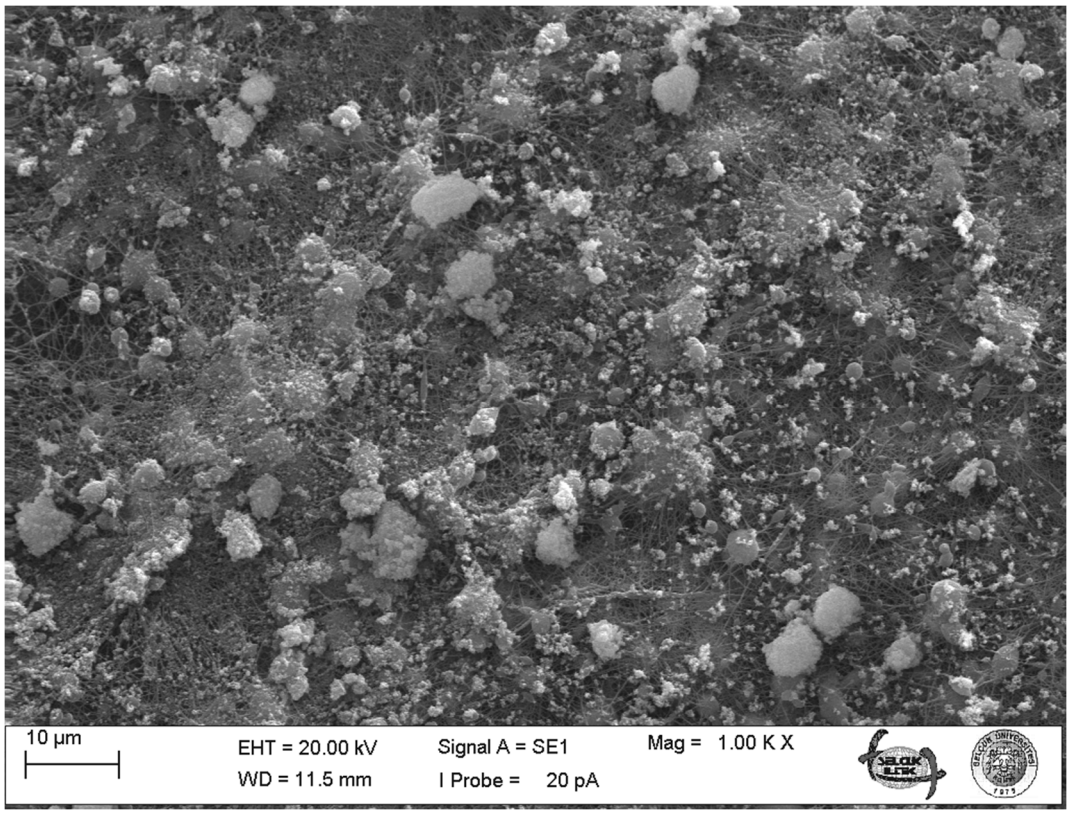
Şekil 7.2. Dördüncü nanofiber filtrenin (3.2 g/m^2) morfolojisi ve yakaladığı $CaCO_3$ nanopartiküller

Dördüncü numune ile birinci ve beşinci numune aynı konsantrasyonda, mesafede ve elektriksel gerilimde üretilmesine rağmen, dördüncü numunenin polimer besleme debisinin her iki numuneden düşük olması daha küçük boyutta nanofiberleri beraberinde getirmiştir.

Ramaknishna ve ark. (2005)'nın yaptıkları çalışmada mesafenin artmasının polimer jetinin havada uçuş süresini arttırdığından daha küçük çaplı fiber oluşacağını ifade etmişlerdir. Fakat yüksek miktarda gerilim ile jetin kararsız hale geleceğini ve bu nedenle boncuk oluşumunda bir artış görülebileceğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde çalışmamızda ikinci numunede büyük ve çok sayıda boncuklu yapı oluşmuştur (Şekil 7.3a). İkinci numune üretimindeki deney parametrelerinden polimer besleme debisi, lüle-toplayıcı arasındaki mesafe ve uygulanan gerilim üçüncü numuneye göre artmıştır. Üçüncü nanofiber tabaka üretimindeki mesafenin kısa ve polimer besleme debisinin küçük olması nedeniyle ikinci numuneye göre daha ince nanofiberler elde edilmiştir. Diğer yandan ikinci numune üretiminde elektriksel gerilimin yüksek olması, üçüncü numuneye göre daha büyük boncukları beraberinde getirmiştir (Şekil 7.3 a,b).



(a)

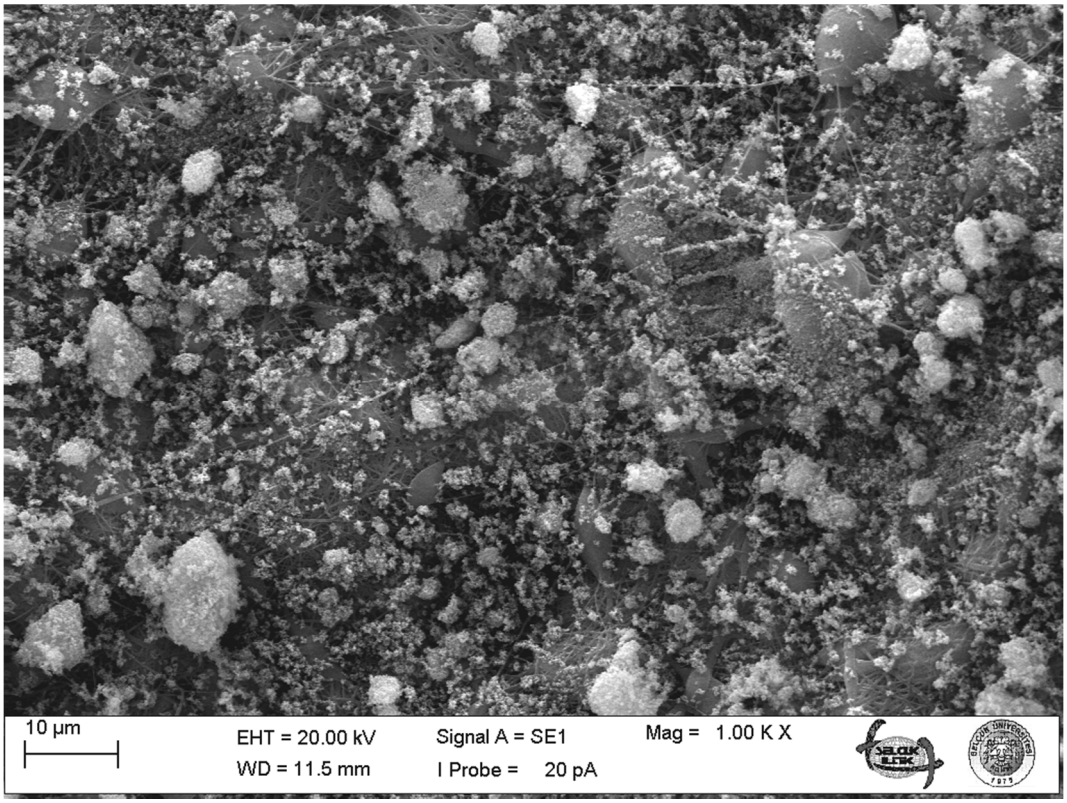


(b)

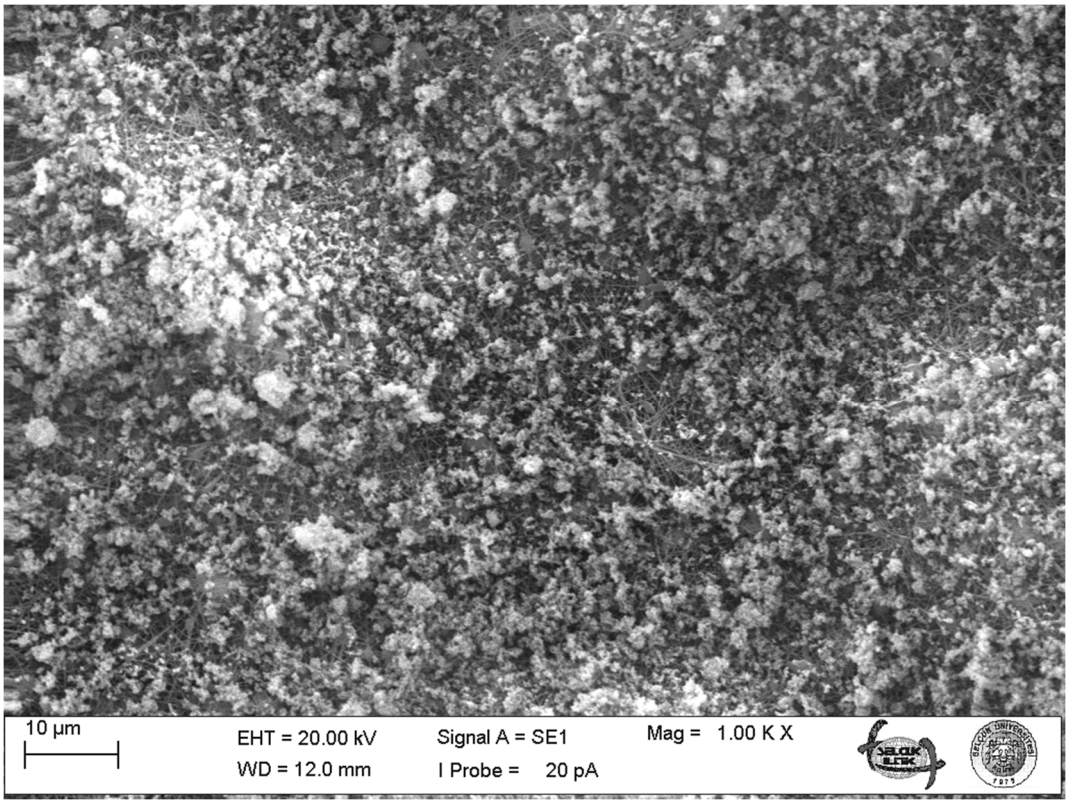
Şekil 7.3. Nanofiber tabakalı filtrelerin morfolojisi ve yakalanan $CaCO_3$ nanopartiküller, (a) ikinci numune (2.5 g/m^2), (b) üçüncü numune (3 g/m^2)

Birinci numune üretimindeki elektro-eğirme deney parametrelerinden polimer besleme debisi ve lüle-toplayıcı arasındaki mesafe üçüncü numuneye göre artmıştır. Birinci numunenin polimer besleme debisinin fazla olması nedeniyle üçüncü numuneye göre daha büyük nanofiberler elde edilmiştir.

Beşinci numune üretimindeki deney parametrelerinden polimer besleme debisi birinci numuneye göre azalmış, diğer parametreler değişmemiştir. Polimer besleme debisinin azalması, birinci numuneye göre daha küçük fiberlerin ve boncuklu yapının oluşmasına imkân vermiştir (Şekil 7.4a,b). Birinci numunenin polimer besleme debisinin beşinci numuneye göre artmasıyla daha fazla miktarda çözelti toplayıcıya giderek orada katılaşmış ve nispeten daha büyük boncuklu yapılar oluşmuştur.



(a)



(b)

Şekil 7.4 Nanofiber tabakalı filtrelerin morfolojisi ve yakalanan $CaCO_3$ nanopartiküller, (a) birinci numune (2 g/m^2), (b) beşinci numune (4 g/m^2)

7.2. Filtre Numuneleri Performansları

Filtre performans deney sonuçları, basınç kaybı ve partikül test sonuçları olmak üzere iki bölümde incelenmiştir.

7.2.1. Basınç kaybı deneyleri

Basınç kaybı deneyleri sonucunda literatüre uygun değerler bulunmuştur. Ahn ve ark. (2005), PA6 nanofiltreler ve HEPA filtre ile yaptıkları çalışmada basınç kaybının alın hızı ile doğru orantılı olduğunu ifade etmiştir. Zhang ve ark. (2009), farklı kalınlıkta olan filtrelerle çalışmalar yapmış ve filtre kalınlığı ile basınç kaybının orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Harlin ve ark. (2007) nanofiber kaplama miktarının artmasıyla filtre basınç kaybının artacağını tespit etmişlerdir. Basınç kaybı fiber çapı ile filtre (veya tabaka) kalınlığının bir fonksiyonu olduğu yapılan deneysel çalışmalarla görülmüştür. Ayrıca, tüm basınç kaybı testlerinin sonunda filtre numuneleri tartılarak partikül kazanımı olmadığı tespit edilmiştir.

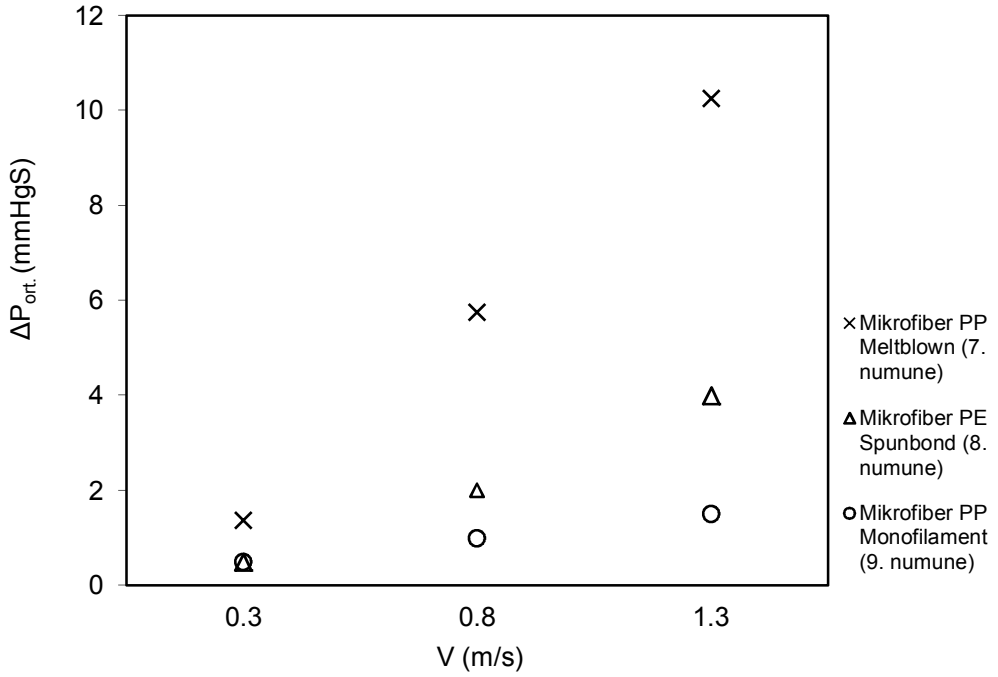
7.2.1.1 Mikrofiber filtrelerin basınç kaybı deneyleri

Spunbond ve monofilament mikrofiber filtrelerin basınç kaybı, hem altlık hem de kontrol filtresi olarak kullanıldığından önemlidir. Mikrofiber filtrelerde oluşan basınç kaybının nanofiber tabakanın basınç kaybına ne kadar katkı sağladığı tespit edilmiştir. Mikrofiber numunelerin basınç kaybı deney sonuçları Çizelge 7.3'de sunulmuştur. Burada $Ø_{ort.}$ filtreyi oluşturan ortalama mikrofiber çapı, V filtreden geçen temiz hava hızı, $\Delta P_{ort.}$ iki deneyde elde edilen basınç kaybı değerinin aritmetik ortalamasıdır.

Çizelge 7.3 Mikrofiber filtre numunelerinin özellikleri ve farklı alın hızlarında oluşan basınç kayıpları

Numune No	Numune ismi	Ağırlık (g/m^2)	$Ø_{ort.}$ (μm)	V (m/s)	$\Delta P_{ort.}$ (mmHgS)
7	PP Meltblown	110	8	0.3	1.38
				0.8	5.75
				1.3	10.25
8	PET Spunbond	85	20	0.3	0.75
				0.8	2
				1.3	4
9	PP Monofilament	25	60	0.3	0.5
				0.8	1
				1.3	1.5

Mikrofiber filtre numunelerinin basınç kaybının alın hızına bağlı olarak değişimi Şekil 7.5'de sunulmuştur. Burada yatay eksen alın hızı, dikey eksen filtrede oluşan ortalama basınç kaybıdır. Şekil 7.5'de artan alın hızıyla filtrede oluşan basınç kaybının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca fiber çapının azalması ve filtre kalınlığının yükselmesi ile basınç kaybının daha fazla arttığı tespit edilmiştir. Bu durum alın hızının artmasıyla daha belirgindir. Nitekim meltblown fiber çapının spunbond fiber çapından küçük olmasından dolayı basınç kaybı daha fazla artmıştır.



Şekil 7.5. Mikrofiber filtre numunelerinin basınç kaybının alın hızına bağlı olarak değişimi

Şekil 7.5'de yedinci numunenin basınç kaybının diğer mikrofiltrelere göre yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, PP ergitme-üfleme mikrofiltrenin sekizinci ve dokuzuncu numunelere göre fiber çapının dolayısıyla gözeneklerin küçük olmasıdır. Bununla birlikte, yedinci numune ağırlığının (110 g) diğerlerinden fazla olması ve kesit kalınlığının, sekizinci ve dokuzuncu numunelere göre büyük olması da basınç kaybının artmasına katkıda bulunmuştur.

Sekizinci PET spunbond mikrofiltre (aynı zamanda ilk dört nanofiber tabakanın altlığı ve kontrol filtresi) ile dokuzuncu PP monofilament mikrofiltrenin hem fiber çapları, hem de ağırlıkları farklıdır. PET spunbond mikrofiltre numunesinin fiber çapı (dolayısıyla gözenekliliği) küçük ve ağırlığının büyük olması nedeniyle daha fazla basınç kaybına sahip olduğu gözlenmiştir.

7.2.1.2 Nanofiber tabakalı filtrelerin basınç kaybı deneyleri

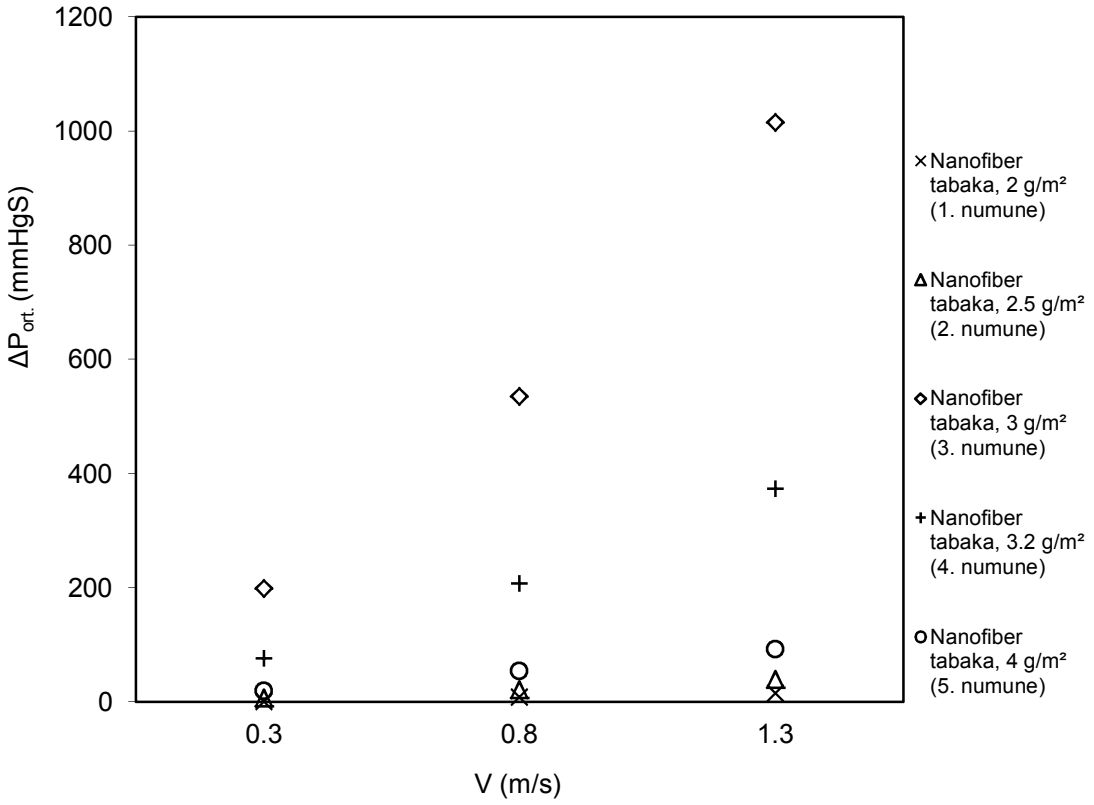
Çizelge 7.4'de nanofiber filtre numunelerinde farklı alın hızlarında oluşan basınç kayıpları verilmiştir. Çizelge 7.4'de $Ø_{ort.}$ ortalama nanofiber çapı, V filtreden geçen temiz hava hızı, $\Delta P_{ort.}$ iki deneyde elde edilen basınç kaybının aritmetik ortalamasıdır. Çizelge incelendiğinde, nanofiltrelerin mikrofiberlere göre daha büyük basınç kaybı gösterdiği görülmüştür. Bunda nanofiber boyutlarının küçük, dolayısıyla ufak gözeneklere sahip olmaları yani, havanın çok küçük nanofiberlerin arasından geçmekte zorlanması etkili olmuştur.

Çizelge 7.4. Nanofiltre numunelerin özellikleri ve farklı alın hızlarında oluşan basınç kayıpları

Numune No	Numune ismi	Ağırlık (g/m^2)	$Ø_{ort}$ (nm)	V (m/s)	$\Delta P_{ort.}$ (mmHgS)
1	Nanofiltre*	2	200	0.3	1.5
				0.8	9
				1.3	16
2	Nanofiltre*	2.5	193	0.3	7.5
				0.8	22.5
				1.3	40
3	Nanofiltre*	3	98	0.3	200
				0.8	536
				1.3	1016
4	Nanofiltre*	3.2	77	0.3	77.5
				0.8	208
				1.3	375
5	Nanofiltre**	4	137	0.3	20
				0.8	54.5
				1.3	93.5

* PET Spunbond altlık üzerine kaplanan nanofiberler ile kontrol filtresinden oluşmaktadır.
**PP Multiflament altlık üzerine kaplanan nanofiberler ile kontrol filtresinden oluşmaktadır.

Çizelge 7.4'te elde edilen veriler Şekil 7.6'da grafiksel olarak ifade edilmiştir. Burada, $\Delta P_{ort.}$ alın hızına karşılık gelen filtredeki basınç kaybı, V alın hızıdır. Zhang ve ark. (2009), Yun ve ark. (2010) filtrelerde alın hızının artmasıyla basınç kaybının arttığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada da benzer olarak, alın hızının yükselmesiyle basınç kaybının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 7.6). Bunun nedeni, alın hızının artmasıyla hava nanofiberler arasından geçmek için yeterli zamanı bulamamış, bu nedenle basınç farkı yükselmiştir.



Şekil 7.6. Altlık üzerine kaplanan nanofiber tabakalı nanofiltrelerde oluşan basınç kaybının alın hızına bağlı olarak değişimi

Üçüncü numune nanofiber çapının düşük olması nedeniyle küçük gözeneklere sahiptir. Üçüncü nanofiber numunenin küçük gözenekli ve nanofiber kaplama ağırlığının fazla olması nedeniyle hava direncinin (basınç farkının) diğer filtre numunelerinden oldukça yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.6). Diğer yandan nanofiber çapı küçük ve nanofiber kaplama ağırlığı büyük olan dördüncü numuneden daha fazla basınç kaybı görülmesinin nedeni, üçüncü numunedeki fiberlerin elektro-eğirme deneyinde kurumadan toplayıcıya ulaşması ve burada yapışarak hava geçişine engel teşkil etmesinden kaynaklanmıştır.

Dördüncü numune en küçük nanofiber çapına dolayısıyla en küçük gözeneğe sahiptir (Çizelge 7.4). Ayrıca ikinci ve birinci numunelere göre daha fazla miktarda nanofiber kaplandığından basınç kaybı her iki numuneden daha yüksektir. Beşinci numunede altlık olarak kullanılan PP monofilamentteki fiberler spunbond fiberden daha büyük olduğundan geçirgenliği daha fazladır. Bu nedenle nanofiber kaplama ağırlığı daha fazla olan beşinci numunenin nanofiber tabakanın daha iri gözenekli olması nedeniyle dördüncü numunede daha fazla basınç kaybı oluşmuştur. Dördüncü numunenin kontrol filtresinin (spunbond) daha küçük çaplı fiberlerden ve daha kalın

kesitten oluşması nanofiltreye giren hava hızını azaltarak, basınç kaybını arttırmıştır. Benzer şekilde dördüncü numune, altıncı numuneye göre daha küçük gözeneğe sahip olduğundan basınç kaybının da yüksek olduğu gözlenmiştir.

En yüksek nanofiber kaplama ağırlığına sahip (4 g/m^2) beşinci numune, fiber çapı dolayısıyla gözenek boyutu ikinci, birinci ve altıncı nanofiber filtrelerden küçüktür (Çizelge 7.4). Beşinci numunede oluşan basınç kaybı ikinci ve birinci numunedeki basınç kaybından yüksek olması beklenen bir durumdur. Çünkü beşinci numunenin gözenek boyutu ikinci ve birinci numunelerden daha küçüktür. Beşinci numunenin basınç kaybının altıncı numuneden küçük çıkmasının nedeni ise filtre kalınlığıdır.

İkinci numune 2.5 g/m^2 ağırlığında nanofiber kaplanmış en iri boncuklu yapıya sahip nanofiltredir. İri boncuklu yapı gözenekleri büyütmüş böylece basınç kaybı düşmüştür. İkinci numune birinci numuneye göre daha fazla miktarda nanofiber tabakadan oluştuğundan, ikinci numunede daha yüksek basınç kaybı meydana gelmiştir.

Nanofiber tabakalı numunelerinin içinde en az nanofiber kaplanan birinci numunedir. Birinci numune 2 g/m^2 ağırlığında nanofiber kaplamış ve ikinci numuneden daha küçük gözeneğe sahiptir. Fakat nanofiber kaplama ağırlığının az olması nedeniyle en düşük basınç kaybına sahip nanofiltre olmuştur. Bunun nedeni birinci numunenin daha az miktarda nanofiberden oluşması, dolayısıyla daha az hava-nanofiber çarpışmasının gerçekleşmesidir.

7.2.1.3 H13 HEPA filtrenin basınç kaybı deneyi

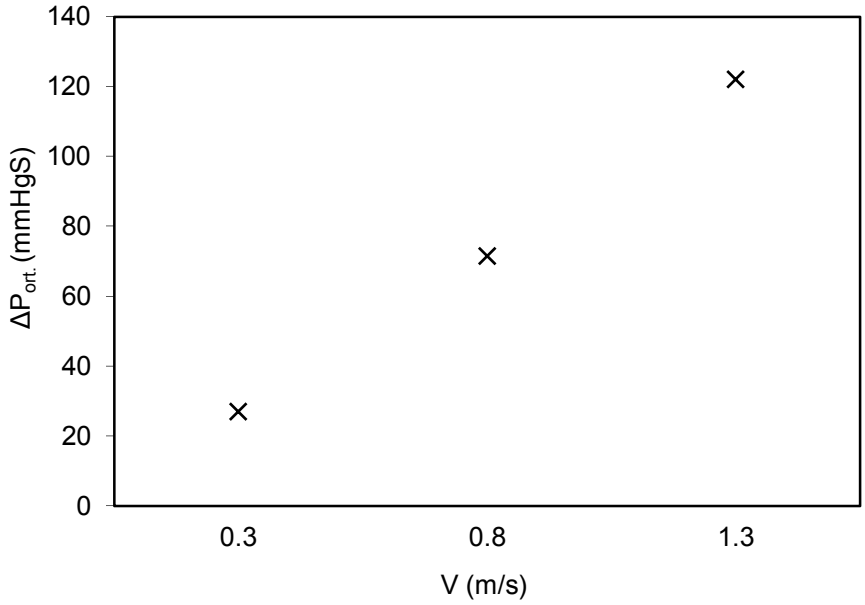
H13 sınıfı HEPA filtre basınç deneyleri sonucu Çizelge 7.5'de sunulmuştur.

Çizelge 7.5. H13 sınıfı HEPA filtre (6. numune) özellikleri ve farklı alın hızlarında oluşan basınç kayıpları

Numune No	Numune ismi	Ağırlık (g/m^2)	$Ø_{ort.}$ (nm)	V (m/s)	$\Delta P_{ort.}$ (mmHgS)
6	H13 sınıfı HEPA filtre	85	931	0.3	27
				0.8	71.5
				1.3	122

H13 sınıfı HEPA filtre tüm nanofiltre kesitlerinden daha kalın ve ağır olmasına rağmen nanofiber çapının büyük olması nedeniyle basınç kaybı nanofiltreler ile mikrofiltreler arasındadır. H13 HEPA filtre basınç kaybının mikrofiltrelerden büyük olmasının nedeni hem kalınlığının hem de fiber çapının küçük olması, nanofiltrelerden

küçük olmasının nedeni ise daha iri gözeneklere sahip olmasıdır. Nitekim Zhang ve ark. (2009) filtre kalınlığı ile basınç kaybının artacağını ifade etmişlerdir (Çizelge 7.5).



Şekil 7.7. H13 sınıfı HEPA filtrede oluşan basınç kaybının alın hızına bağlı olarak değişimi

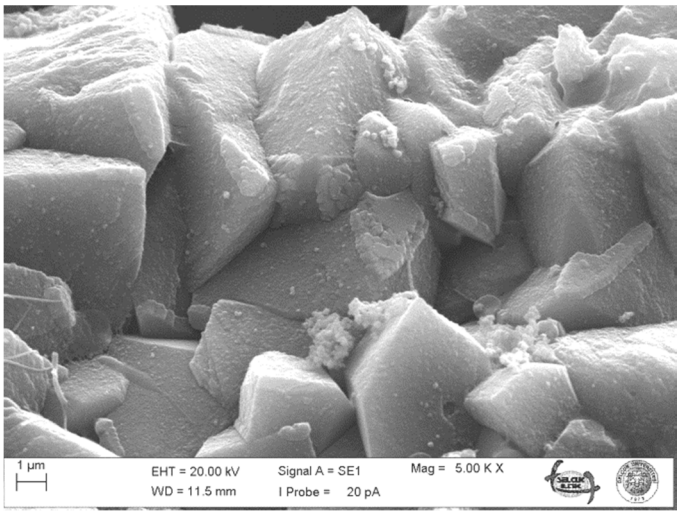
7.2.2. Partikül yakalama deneyleri

Ahn ve ark. (2006) alın hızının artmasıyla difüzyon mekanizmasının azalacağını fakat durdurma mekanizmasının artacağını, sonuçta küçük partiküllerin tutulmasının zorlaşacağını, büyük partiküllerin yakalanmasının kolaylaşacağını belirtmişlerdir. Harlin ve ark. (2007) fiberlerin filtreleme esnasında şişme miktarının nanofiber elastikiyeti, nano boyuttaki düğüm sayısına ve morfolojiye bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca nanofiber ağırlığının artmasıyla elastikliğin azalacağını ifade etmişlerdir. Heikkila ve ark. (2008), PA6 nanofiltrelerle 160-940 nm boyutundaki nanopartiküllerle yaptıkları çalışmada, artan nanofiber ağırlığı ile yakalanan partikül oranının artacağını söylemişlerdir.

Partikül testlerinde numunelerin, artan basınca ve filtre malzemesinin özelliğine bağlı olarak esnediği tespit edilmiştir. Esneme ile filtre gözenekleri büyüyerek hava akışı artmış, böylece partikül tutma mekanizması devam etmiştir. Esneme miktarı, uygulanan basınca, filtreyi oluşturan fiberlerin rijitliğine, filtre kesit kalınlığına ve nanofiber çapına bağlı olarak değişmiştir. Altıncı numune (H13 HEPA filtre), tüm numunelerden fazla esneyerek kalıcı olarak şekil değiştirmiştir. Bu durum, H13 HEPA filtrenin büyük gözeneklere, kalın kesite sahip olmasından kaynaklanmıştır. Filtrenin

şişmesinin iyi tarafı, tıkanma olayının uzun bir süre gerçekleşmeyeceğidir. Kötü tarafı ise, filtrede basınç dalgalanmasıyla mikro boyutta kırılmalara yola açabileceğidir. Eğer filtreyi oluşturan fiberler yeterince esnek değilse mikro çatlaklar oluşur. Artan basınçla çatlaklar büyüyerek filtre basınca karşı koyamaz hale gelir. Ardından fiberler kritik bir basınçta kırılarak filtre yırtılır ve ömrünü tamamlar. Bu durum istenmez. Bu nedenle filtreyi oluşturan fiberlerin tok olması yani yeterince mukavim ve sünek olması gerekir.

Filtrede tutulamayan $CaCO_3$ nanopartikül miktarının saptanması amacıyla farklı metotlar denenmiştir. Bu amaçla su, sıvı yağ, siklon, sıkıştırılmış elyaf keçe kullanılmıştır. İlk yapılan çalışmada filtreden çıkan partiküller suyun içine gönderilmiştir. Suyun sürekli buharlaşması ve $CaCO_3$ ile reaksiyona girerek kalsiyum bikarbonat $Ca(HCO_3)_2$ oluşturması nedeniyle sonuç alınamamıştır (Şekil 7.8). Nanofiltreden çıkan partiküllerin tespiti için ikinci olarak, buharlaşmadığından ve $CaCO_3$ ile reaksiyona girmediğinden sıvı yağ kullanılmıştır. Sıvı yağ nanopartiküllü havanın yağı süpürmesi sonucu (yağın havaya yapışmasından dolayı) filtreden geçen nanopartikül miktarı tespit edilememiştir. Siklon ve elyaf keçe kullanılarak yapılan deneyler de, filtrenin tutamadığı nanopartiküllerin miktar ve ağırlık olarak çok küçük olmasından dolayı sonuç alınamamıştır. Dolayısıyla, çok küçük miktardaki nanopartiküllerin hassas terazide tartılmasının mümkün olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 7.8. Filtreden çıkan $CaCO_3$ nanopartiküllerinin $Ca(HCO_3)_2$ bileşiği oluşturmuş hali

Partikül tutma testlerinde filtrenin partikül yakalamasından dolayı basınç kaybı genellikle artmıştır. Bunun nedeni tutulan nanopartiküllerin gözenekleri tıkayarak filtre geçirgenliğini azaltmasıdır. Bu nedenle partikül tutma testleri incelenirken basınç kaybı

ile tutulan partikül miktarı arasındaki grafikler sunulmuştur. Ayrıca filtrenin partikül tutma miktarının zamana bağlı değişimi de incelenmiştir. Çünkü filtreden asıl beklenen partikülleri yakalamasıdır.

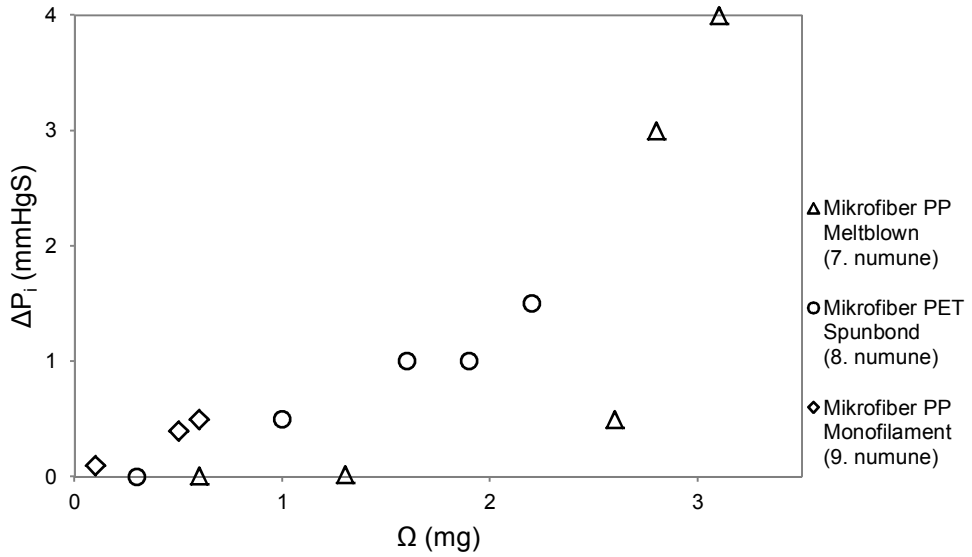
7.2.2.1. Mikrofiber filtrelerin partikül yakalama testleri

Mikrofiber filtreler hem altlık hem de kontrol filtresi olarak kullanılmıştır. Altlık olarak kullanılması sadece basınç kaybını arttırmış, nanofiber tabaka arkasında kaldığından nanopartikül yakalamaya katkıda bulunmamıştır. Fakat kontrol filtresi hem basınç kaybı arttırmaya hem de nanopartikül tutmaya katkı sağlamıştır. Kontrol filtresinin bu özelliğinden dolayı mikrofiltrelerin partikül yakalama testi önem arz etmektedir. Mikrofiberlerin partikül yakalama test sonuçları Çizelge 7.6'da sunulmuştur. Burada $Ø_{ort.}$ ortalama nanofiber çapını, $\Delta P_{ort.}$ partikül testine başlangıçtaki basınç kaybını, ΔP_i partikül yakalandıktan sonra oluşan basınç kaybını, Ω birim zamanda yakalanan partikül miktarını, t_p partikül deney süresini ifade etmektedir.

Çizelge 7.6. Mikrofiber filtre özellikleri ve 0.3 m/s'deki partikül tutma deneyi sonuçları

No	Filtre Özelliği	Ağırlık (g/m^2)	$Ø_{ort.}$ (μm)	$\Delta P_{ort.}$ (mmHgS)	ΔP_i (mmHgS)	Ω (mg)	t_p (dak.)
7	PP Meltblown mikrofiber	110	8	1.4	0	0.6	5
					0	1.3	10
					0.5	2.6	15
					3	2.8	20
					4	3.1	25
8	PET Spunbond mikrofiber	85	20	0.75	0	0.3	5
					0.5	1	10
					1	1.6	15
					1	1.9	20
					1.5	2.2	25
9	PP Monofilament mikrofiber	25	60	0.5	0.1	0.1	10
					0.4	0.5	20
					0.5	0.6	25

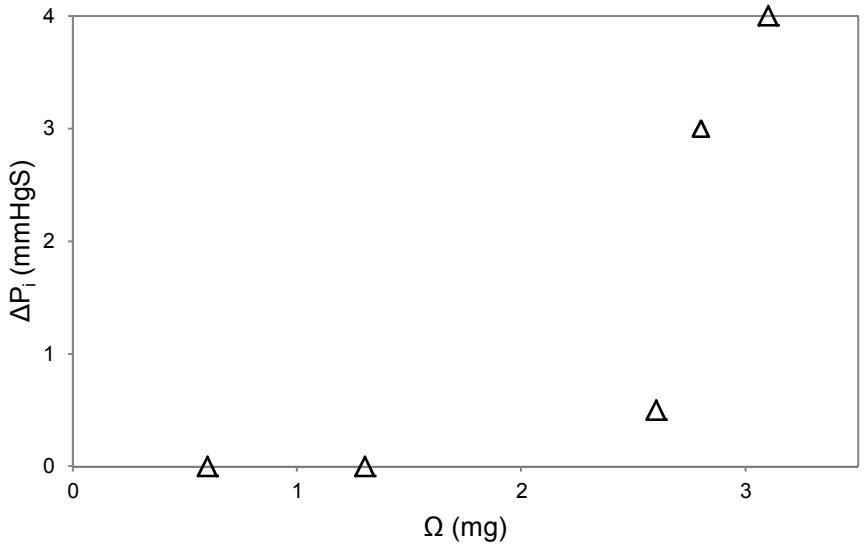
Partikül tutma deneyleri sonucunda Şekil 7.9'daki partikül tutma miktarıyla basınç kaybı değişimini gösteren grafik çizilmiştir. Burada ΔP_i her beş dakikada mikrofiltrede oluşan basınç kaybını, Ω her beş dakikada mikrofiltrenin tuttuğu partikül miktarını belirtmektedir.



Şekil 7.9. Mikrofiber numunelerin yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

Mikrofiber filtrelerde partikül tutulmasıyla gözenekler nanopartiküller dolmuş, basınç kaybı artmıştır (Şekil 7.9). Fiber çapına, gözenek boyutuna ve filtre kalınlığına göre yakalanan partikül miktarı ve basınç kaybı değişmiştir.

Şekil 7.10'da en çok basınç kaybı oluşan ve partikül yakalayan 7. numunenin basınç kaybı ile tutulan partikül miktarını gösteren grafik sunulmuştur.



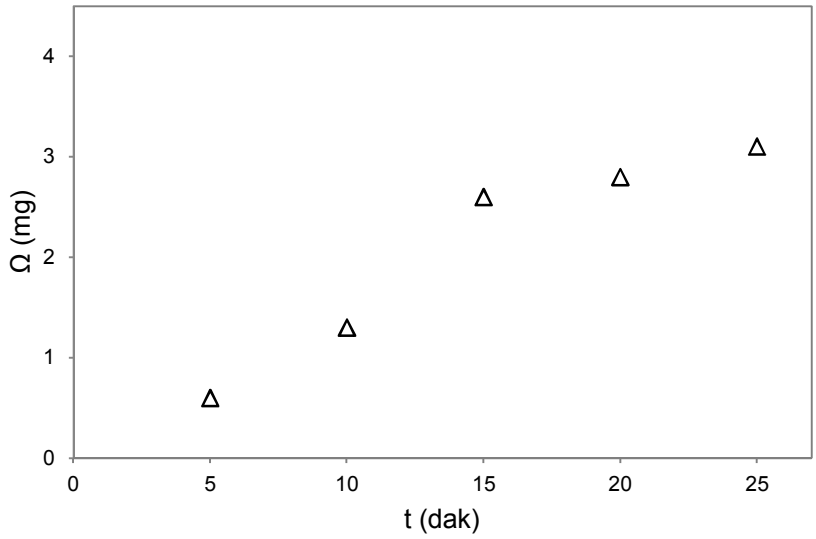
Şekil 7.10. Meltblown mikrofiber filtrenin (7. numune) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

Meltblown mikrofiberlerin ortalama fiber çapı ve ağırlığı diğer mikrofiberlerden fazla olduğundan, en çok partikülü yedinci numune yakalamıştır. Benzer şekilde spunbond filtre, monofilament fiber çapından daha küçük ve filtre kesit kalınlığı daha

büyük olduğundan monofilament filtreye göre daha fazla partikül yakalamıştır. Nitekim Heikkila ve ark. (2008), artan nanofiber ağırlığı ile yakalanan partikül oranının artacağını ifade etmişlerdir.

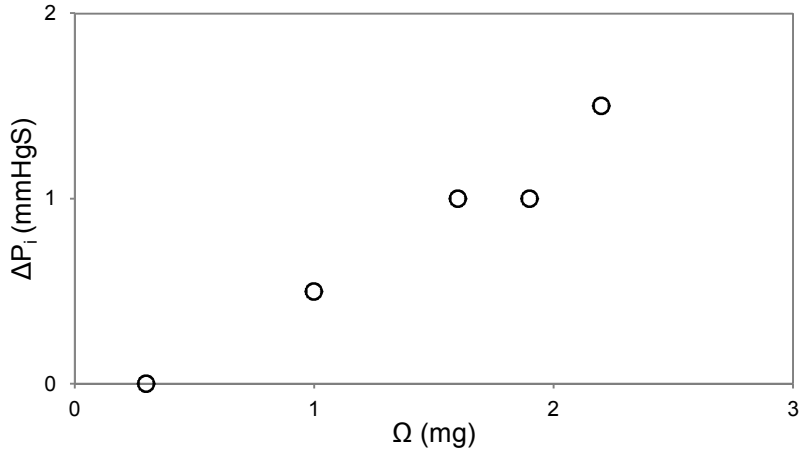
Mikrofiber filtrelerin partikül yakalama deneylerinde, 1.4 mmHgS ile teste başlayan ve ilk 10 dakikada basınç kaybı oluşmadan 1.3 mg nanopartikül yakalayan 7. numune, şişmeye başlayarak 15. dakikada 0.5 mmHgS basınç kaybına karşılık 2.6 mg, 20. dakikada 3 mmHgS basınç kaybına karşılık 2.8 mg nanopartikül yakalamıştır (Şekil 7.10). 20. dakikadan sonra şişmenin etkisiyle gözenekleri açılan 7. numune 25. dakika sonunda 3.1 mg nanopartikül yakalayarak deney tamamlanmıştır (Şekil 7.10). Yedinci numune 15-20. dakikalar arasında yüksek basınç kaybı oluşmasına karşılık fazla nanopartikül yakalamamıştır yani tıkanmıştır. Tıkanmanın etkisiyle basınç kaybı aniden yükselmiş ve 20. dakikadan sonra gözenekler bir miktar açılarak tıkanma azalmıştır. Tıkanmanın çok kısa bir sürede olmasının nedeni 7. numunenin fiber çapının küçük ve kesit kalınlığının büyük olmasındandır.

Şekil 7.11'de meltblown mikrofiber filtrenin zamanla partikül yakalama miktarının değişimi gösterilmiştir. Buna göre 10-15. dakikalar arasında fazla miktarda partikül yakalandığından 15. dakikadan sonra tıkanma oluşmuştur. Bu, Şekil 7.10'da 15-20. dakikalar arasında ani basınç artışı olmasından anlaşılmaktadır. Meltblown mikrofiber filtre tıkanma süresince de (15-20 dakika arası) bir miktar partikül yakalamıştır.



Şekil 7.11. Meltblown mikrofiber filtrenin (7. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

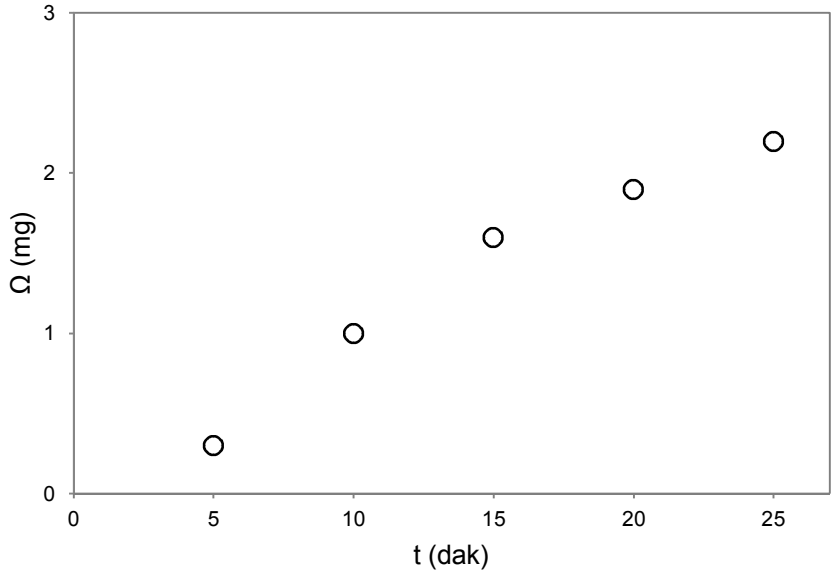
İlk dört nanofiber tabakalı filtrelerin altlığı ve kontrol filtresi olarak kullanılan 8. numunenin basınç kaybının yakalanan partikül miktarına göre değişimi (Şekil 7.12)'de sunulmuştur. Buna göre sekizinci numune her deneyde bir miktar nanopartikül yakalamış, ani basınç kaybı yükselişi olmamış ve tıkanma gerçekleşmemiştir.



Şekil 7.12. Spunbond mikrofiber filtrenin (8. numune) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

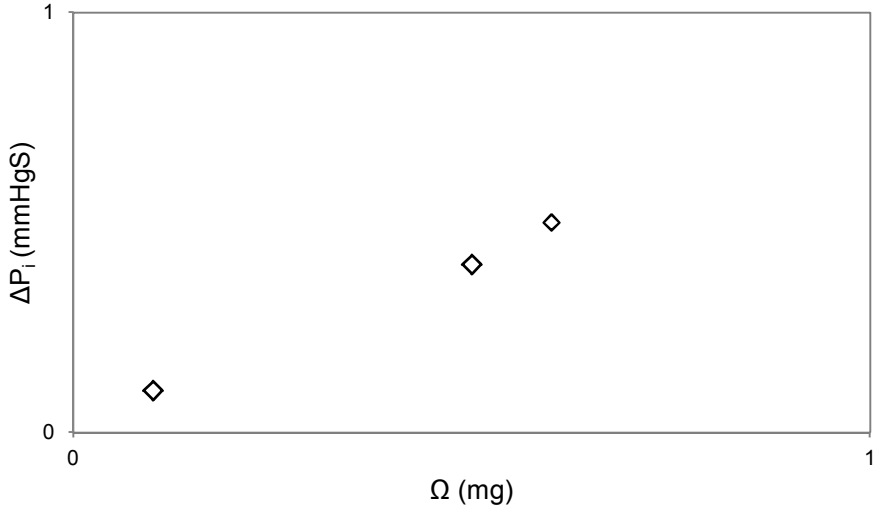
Deneye 0.75 mmHgS basınç kaybı ile başlamış ve nanopartikül yakalanmasıyla basınç kaybı yükselmiştir. 15-20. dakikalar arasında basınç kaybı artmış tutulan nanopartikül miktarı artmıştır (Şekil 7.12). Bunun nedeni ilk 15 dakika boyunca filtre bir miktar şişmiş ve 7. numuneye nispeten kesit kalınlığının ince olmasından dolayı esnemiş ve gözenekleri büyümüştür. Sonuçta 25 dakika sonunda 1.5 mmHgS basınç kaybı oluşarak 2.2 mg nanopartikül yakalamıştır.

Şekil 7.13'de spunbond mikrofiltrenin yakaladığı partikülün zamana bağlı değişimi verilmiştir. Burada yatay eksen zamanı, dikey eksen yakalanan partikül miktarını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi spunbond mikrofiltre nanopartikülleri sürekli yakalamıştır (Şekil 7.13). Hem nanopartikülleri sürekli yakalaması hem de düşük basınç kaybı oluşturması nedeniyle spunbond mikrofiltre altlık ve kontrol filtresi olarak kullanılmıştır.

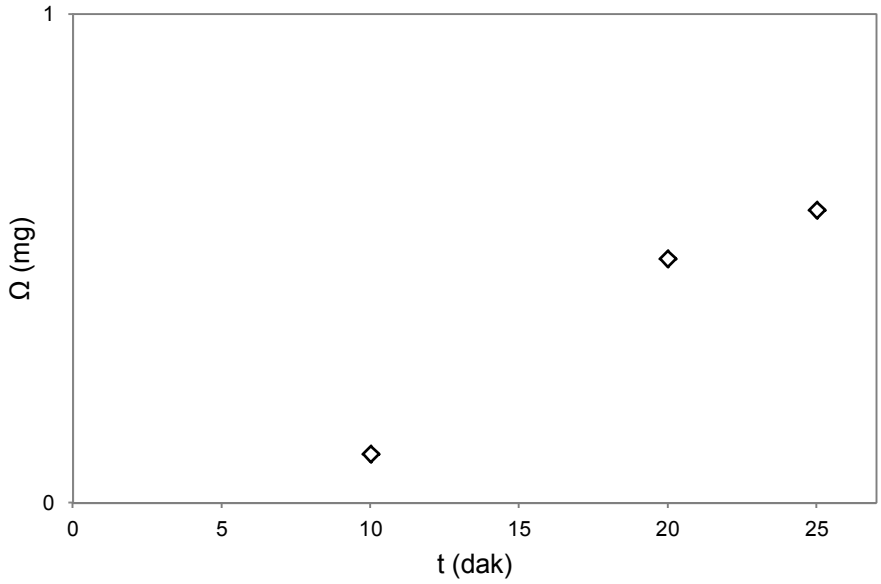


Şekil 7.13. Spunbond mikrofiber filtrenin (8. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

PP monofilament mikrofiltrede hemen hemen hiç basınç kaybı olmaksızın 0.6 mg nanopartikül yakalamıştır (Şekil 7.14). 9. numunede basınç kaybı olmamasının nedeni, filtre gözeneklerinin iri olması ve filtrenin ince olması nedeniyle gözeneklerin devamlı açık olmasıdır. Yani nanopartiküller gözenek tarafından değil mikrofiber tarafından tutulmaktadır. Bu nedenle bu tür filtrelerde tutulabilecek miktar sınırlıdır (Şekil 7.15).



Şekil 7.14. Monofilament mikrofiber filtrenin (9. numune) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi



Şekil 7.15. Monofilament mikrofiber filtrenin (9. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

7.2.2.1. Nanofiber tabakalı filtrelerin partikül yakalama testleri

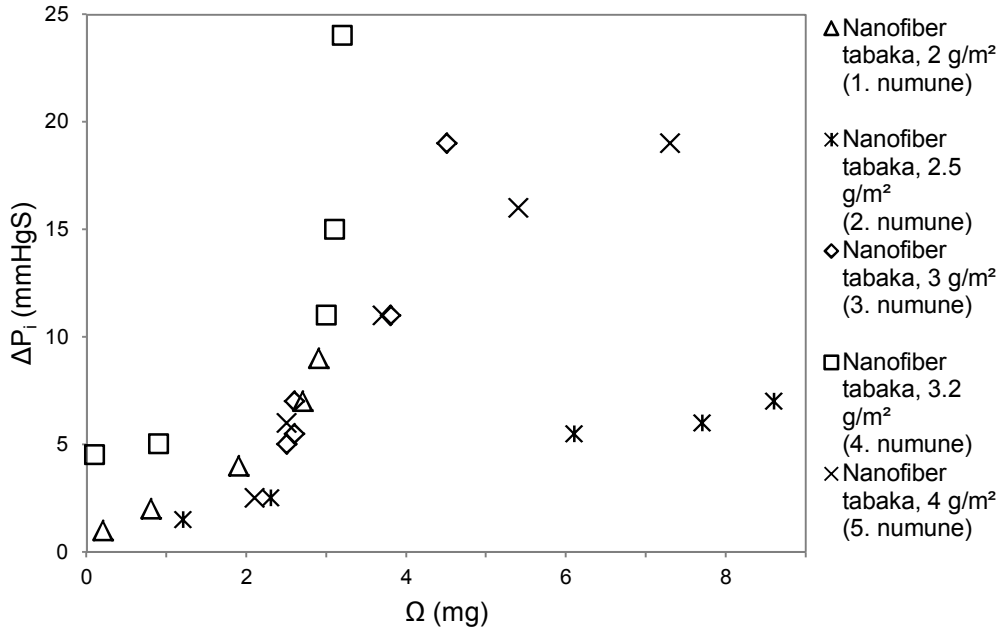
Altlıkların üzerine kaplanan nanofiber tabaka ile kontrol filtresinin oluşturduğu nanofiltrelerin 0.3 m/s alın hızındaki partikül tutma testi sonuçları Çizelge 7.7'de sunulmuştur. Bu çizelgedeki ilk dört numunede PET Spunbond altlık ve kontrol filtresi arasında nanofiber tabakadan oluşmaktadır. Beşinci numune ise PP monofilament altlık ve kontrol filtresi kullanılmıştır. Çizelge 7.7'de, $Ø_{ort.}$ ortalama nanofiber çapını, $\Delta P_{ort.}$ partikül testine başlangıçtaki basınç kaybını, ΔP_i partikül yakalandıktan sonra oluşan basınç kaybını, Ω birim zamanda yakalanan partikül miktarını, t_p partikül deney süresini ifade etmektedir.

Altlıkların üzerine kaplanan nanofiber tabaka ile kontrol filtresinin oluşturduğu nanofiltrelerin partikül tutma testinde oluşan basınç kaybının tutulan partiküle bağlı değişimi Şekil 7.16'da sunulmuştur. Burada yatay eksen tutulan nanopartikül miktarı, dikey eksen basınç kaybıdır. Bu grafikte eğim, filtrelerin partikül tutma performansını göstermektedir. Eğim ne kadar küçükse filtre, o derece ideale yaklaşır. Eğimin dikleşmesi filtrenin tıkanması anlamına gelir ki, filtrenin dolduğu anlaşılarak değiştirilmesi gerekir.

Çizelge 7.7. PET Spunbond altlık üzerine kaplanan nanofiber tabaka özellikleri ve 0.3 m/s'deki partikül yakalama deneyi sonuçları

Numune no	Numune ismi	Ağırlık (g/m^2)	$Ø_{ort.}$ (nm)	$\Delta P_{ort.}$ (mmHgS)	ΔP_i (mmHgS)	Ω (mg)	t_p (dak.)
1	Nanofiber tabaka	2	200	1.5	1	0.2	5
					2	0.8	10
					4	1.9	15
					7	2.7	20
					9	2.9	25
2	Nanofiber tabaka	2.5	193	7.5	1.5	1.2	5
					2.5	2.3	10
					5.5	6.1	15
					6	7.7	20
					7	8.6	25
3	Nanofiber tabaka	3	98	200	5	2.5	5
					5.5	2.6	10
					7	2.6	15
					11	3.8	20
					19	4.5	25
4	Nanofiber tabaka	3.2	77	77.5	4.5	0.1	5
					5	0.9	10
					11	3	15
					15	3.1	20
					24	3.2	25
5	Nanofiber tabaka*	4	137	20	2.5	2.1	5
					6	2.5	10
					11	3.7	15
					16	5.4	20
					19	7.3	25

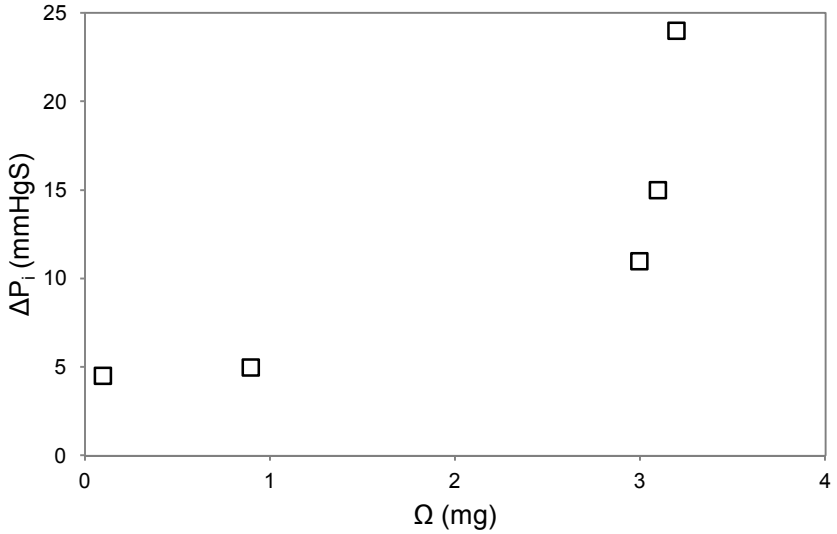
* PP Multiflament mikrofiber altlık ve kontrol filtresi kullanılmıştır.



Şekil 7.16. Nanofiltrelerin yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

Şekil 7.16 incelendiğinde nanofiber tabakalı filtrelerde mikrofiber filtrelere göre daha yüksek basınç kaybı oluşarak daha fazla miktarda partikül yakaladığı görülmüştür. Birinci ve dördüncü numunelerde ilerleyen süreyle eğimin arttığı yani filtrenin tıkandığı görülmüştür. Filtrenin tıkanması partikül kazanımı olmaksızın basıncın artmasından anlaşılmıştır. Partikül testi sonunda üçüncü, dördüncü ve beşinci filtrede oluşan basınç kaybı da, diğer filtrelere göre yüksektir. Birinci numune, nanofiber tabaka kesit kalınlığı küçük olduğundan bir mikrofiber filtre gibi davranmış, küçük basınç kaybı ile az miktarda partikül tutmuştur. Partikül yakalama deneylerinde en iyi performansı düşük basınç kaybı ile en çok partikülü tutan ikinci numune göstermiştir.

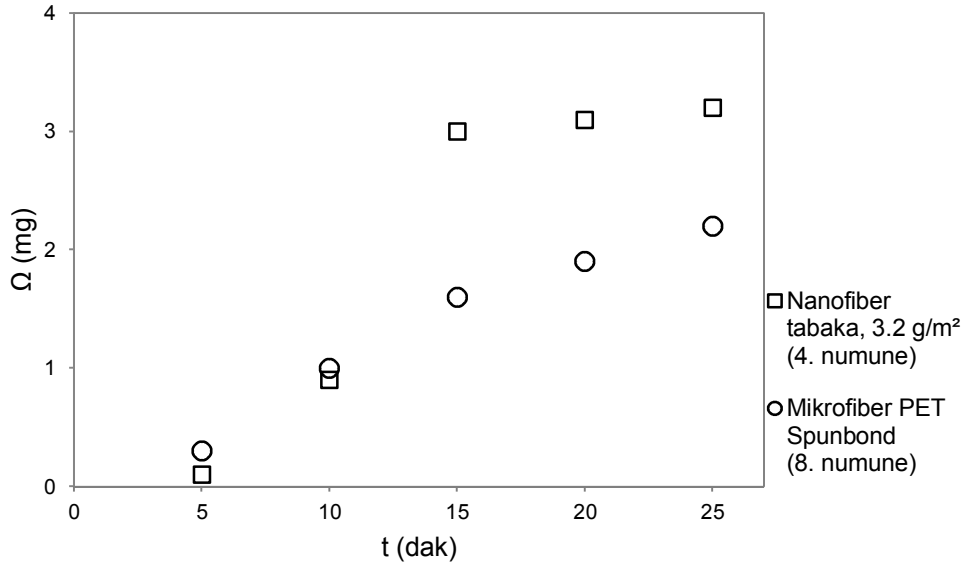
Dördüncü numunenin partikül tutma performansı Şekil 7.17'de gösterilmiştir. Filtrede oluşan basınç kaybı hızlı bir şekilde artmış daha sonra basınç kaybı artışı yavaşlamış 10. dakikadan sonra tekrar hızlı bir sıçrama göstermiştir. Daha sonra 15 ve 25. dakikalar arasında kayda değer bir partikül tutmayarak deneyi 3.2 mg partikülü 24 mmHgS basınç kaybı oluşturarak yakalamıştır. Dördüncü numune kısa sürede tıkanmıştır. Bu, 15. dakika sonunda partikül miktarı artışı olmayıp basıncın hızlı yükselmesinden anlaşılmıştır. Filtrenin kısa sürede tıkanmasında iki unsur etkili olmuştur. Bunlar çok küçük nanofiber çapına sahip olması (77 nm) ve nanofiber ağırlığının fazla olmasıdır. Her iki unsur hava geçirgenliğini azaltmış ve nanofiberlerin yeterince esneyememesini beraberinde getirmiştir. Her ne kadar orta büyüklükte boncuklar olsa da dördüncü numunenin tıkanmasını engelleyememiştir.



Şekil 7.17. Dördüncü nanofiltrenin (3.2 g/m^2) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

Dördüncü nanofiber tabaka spunbond mikrofiltre üzerine en çok miktarda (ağırlıkta) kaplanan numunedir. Dolayısıyla üzerine kaplandığı altlığın yakaladığı

partikül miktarını arttırmıştır. Şekil 7.18'de hem altlığın hem de üzerine kaplanan nanofiber tabakanın zamana bağlı tuttuğu partikül miktarı sunulmuştur. Buna göre 5. ve 10. dakikalarda tutulan partikül miktarı her iki filtrede değişmemiş, sonraki zamanlarda nanofiltre tabakası yaklaşık 1 mg daha fazla partikül yakalamıştır (Şekil 7.18).

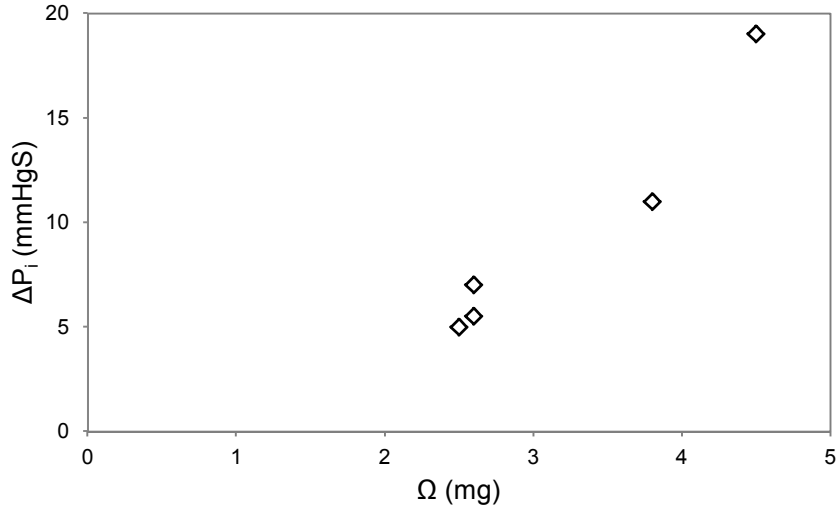


Şekil 7.18. Dördüncü nanofiltre ile altlığın (8. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

Nanopartikülün ilk 10 dakikada mikrofiltreye göre aynı miktarda partikül yakalamış olmasının nedeni kaplama ağırlığının ve nanofiber çapının büyük olmasıdır. Yani ilk 10 dakikada nanofiltre geçirgen değildir. Onuncu dakikadan sonra nanofiltre az miktarda şişmiş ve gözenekler açılarak bir miktar nanopartikülü tutabilmiştir. Daha sonra kayda değer miktarda partikül yakalayamayarak deneyi tamamlamıştır.

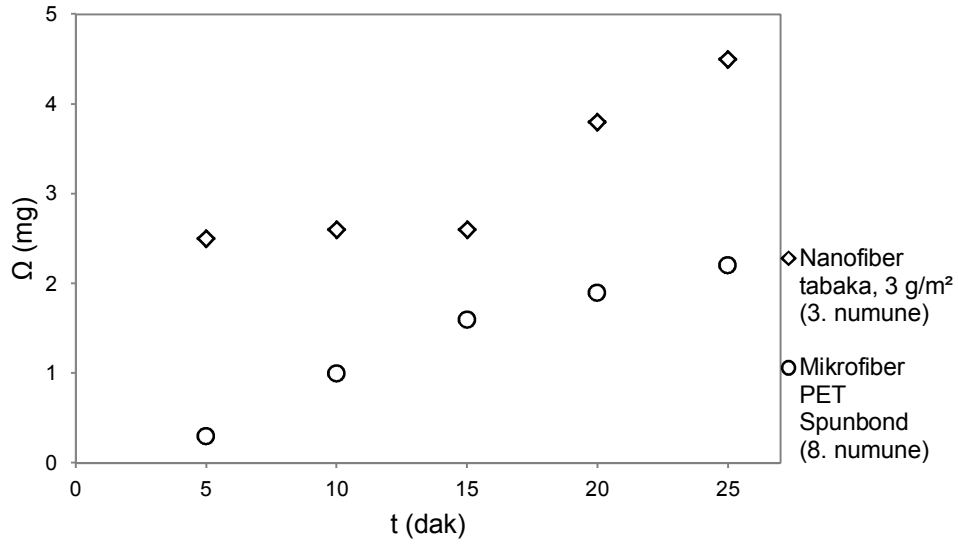
Üçüncü numune, dördüncü numuneden sonra en yoğun nanofiber kaplanan (3 g/m^2) ve küçük nanofibere sahip (98 nm) nanofiltredir. Bununla birlikte nanofiberlerin üretimi esnasında çözücünün havada iken tam buharlaşmaması nedeniyle fiberlerin bir kısmı yapışmıştır. Bu üç nedenden dolayı deneyin 5-15. dakikalar arasında tıkanmıştır (Şekil 7.19). İlk 5 dakika içinde 2.5 mg nanopartikülü 5 mmHgS basınç kaybı oluşarak tutan üçüncü nanofiltre daha sonra tıkanmış ve 15. dakikaya kadar şişerek 7 mmHgS basınca ulaşmıştır. Bu sırada az miktarda nanopartikül yakalayabilmiştir. On beşinci dakikadan sonra nanofiltre artan basıncın etkisiyle gözenekleri açılmış ve partikül tutmaya başlamıştır. 20. dakika itibariyle 11 mmHgS basınç farkında 3.8 mg nanopartikül tutmuştur. Yirmi ve yirmi beşinci dakika arasında 0.7 mg nanopartikülü 8

mmHgS gibi yüksek bir basınç kaybı ile partikül yakalayarak tıkanmaya yakın bir pozisyonda deneyi tamamlamıştır.



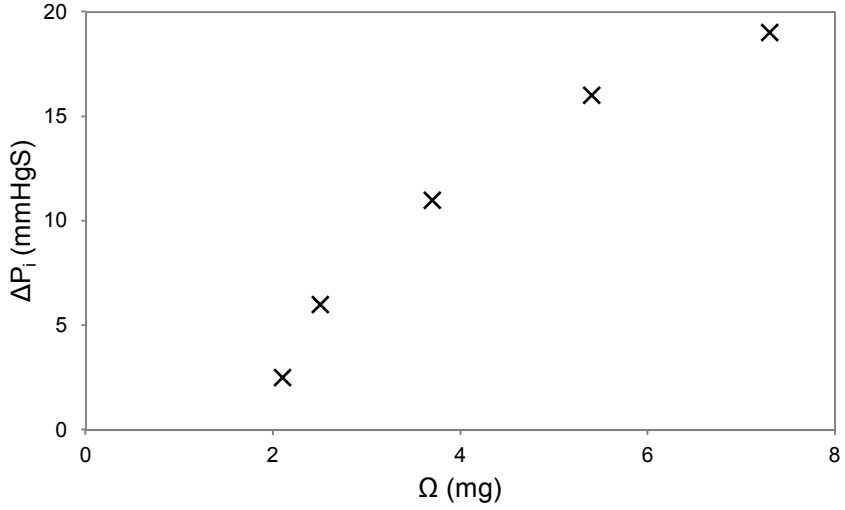
Şekil 7.19. Üçüncü nanofiltrenin (3 g/m^2) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

Üçüncü nanofiber filtrenin yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi Şekil 7.20'de sunulmuştur. Üçüncü nanofiltrenin altlık malzemesi olan 8. numunenin yakaladığı partikül miktarı zamanla artmıştır. Fakat nanofiber tabaka 5-15. dakikalar arasında tıkandığından partikül yakalayamadığından yakalanan partikül miktarı her iki filtrenin de birbirine yaklaşmıştır. Daha sonra üçüncü nanofiber tabaka şişerek gözenekleri açılmış ve yeniden partikül yakalamaya başlamıştır. Deney sonunda nanofiber tabaka altlıktan 2.3 mg daha fazla nanopartikül yakalamıştır.



Şekil 7.20. Üçüncü nanofiltre ile altlığın (8. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

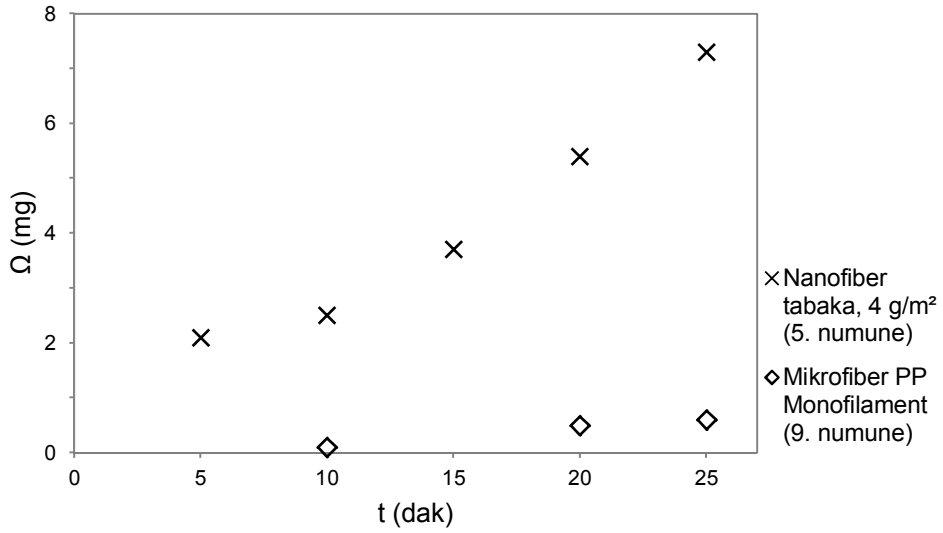
Monofilament altlık kullanılan, en fazla nanofiber kaplanan (4 g/m^2) ve 137 nm çapındaki nanofiberlerden oluşan beşinci numune, 20 mmHgS basınç kaybı ile partikül tutma testine başlamış, 19 mmHgS ilave basınç kaybı oluşturarak 7.3 mg partikül yakalamıştır (Şekil 7.21). Beşinci numune kararlı ve tıkanmaz bir tavır sergilemiştir. Beşinci numunenin önündeki kontrol filtresi monofilament mikrofiltredir. Monofilament filtre spunbond mikrofiber filtreye göre daha iri gözenekli olduğundan, kümelenmiş $CaCO_3$ nanopartiküller bir ön filtrelemeye maruz kalmadan direkt beşinci nanofiltreye ulaşmıştır. Beşinci nanofiltre gözeneklerinden daha küçük boyuttaki $CaCO_3$ nanopartiküller, nanofiber yüzeyinde birikerek kek filtrasyonu oluşturmuştur. Kek filtrasyonu oluşumu, kontrol filtresi ile nanofiltre arasında yoğun miktarda partikül birikmesi şeklinde gözlenmiştir. Duran ve Öneş (1993)'ün yaptığı çalışmada, kek filtrasyonunda filtrenin temizleme zorunluluğu olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca beşinci numunede, nanofiber tabaka kalınlığı fazla olduğundan şişme miktarı az olmuştur. Nanofiber tabakanın az da olsa esnemesi filtrenin kendi kendini temizlenmesine olanak tanımamıştır. Fakat nanofiltrenin tartılması esnasında oluşan sarsıntı ve hareketten dolayı nanopartiküller yüzeyden ayrılmış, böylece bir nevi temizlenmiştir. Bu nedenle kek filtrasyonu her proseste pek azalmadan devam etmiştir. Beşinci numune küçük bir basınç farkı oluşturarak nanopartikül yakalamaya devam etmiştir (Şekil 7.21).



Şekil 7.21. Beşinci nanofiltrenin (4 g/m^2) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

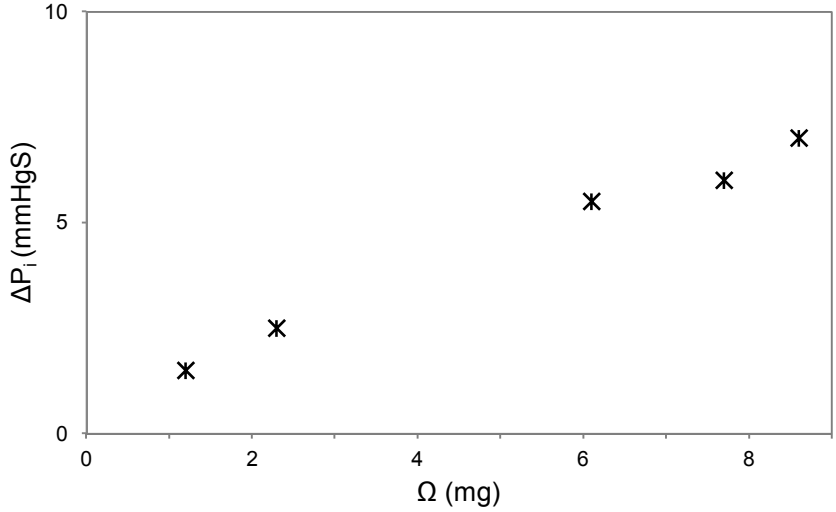
Şekil 7.22'de beşinci numunenin zamana bağlı yakaladığı partikül miktarı sunulmuştur. Beşinci nanofiber tabakanın altlığı olan monofilament mikrofiber filtre çok küçük miktarda nanopartikül yakalamasına karşın nanofiber tabakanın yoğun bir şekilde (4 g/m^2) kaplanmasıyla 6.7 mg daha fazla nanopartikülü yakalamıştır. Beşinci

numunenin bu kadar fazla miktarda nanopartikül yakalamasının nedeni yüzeyinde kek filtrasyonu oluşmasıdır. Kek filtrasyonuyla kümelenmiş haldeki nanopartiküller yüzeyde birikerek daha küçük partikülleri filtrelemiştir.



Şekil 7.22. Beşinci nanofiltre ile altlığın (9. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

İkinci numune, ortalama 193 nm fiber çapına ve 2.5 g/m² ağırlığa sahiptir. İkinci numune partikül tutma testine, 7.5 mmHgS ile başlayıp, test sonunda 7 mmHgS ilave basınç kaybı oluşturarak 8.6 mg partikül yakalamıştır (Şekil 7.23).

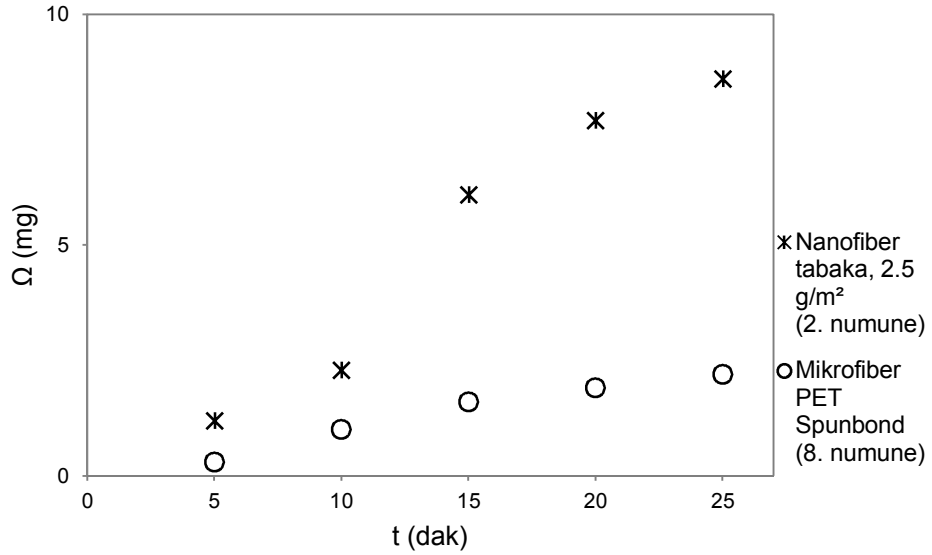


Şekil 7.23. İkinci nanofiltrenin (2.5 g/m^2) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

İkinci numunenin diğer nanofiber numunelere göre, fiber çapı ve ağırlığı orta seviyede, basınç farkı ortalamanın altındadır. İkinci numune en yüksek performansa sahip nanofiberdir. En az basınç kaybıyla en fazla partikül yakalanmıştır. İkinci

numune, optimum nanofiber ağırlığından, optimum nanofiber çapından, optimum morfolojiden (büyük boncuklu yapı) dolayı en iyi performansı sergilemiştir. İkinci numune, büyük boncuklu yapısından dolayı devamlı geçirgen, 193 nm gibi küçük nanofiber çapından dolayı 80-120 nm çapındaki $CaCO_3$ için optimum gözenek boyutuna, düşük nanofiber ağırlığından dolayı yeterince esnek bir yapıya sahiptir.

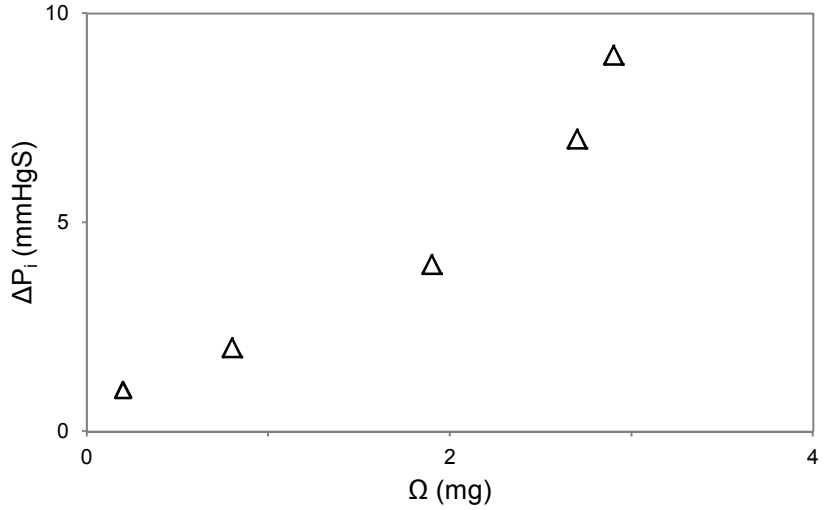
İkinci nanofiber tabakanın partikül yakalama miktarıyla zamanın değişimi Şekil 7.24'de sunulmuştur. İkinci nanofiber numune hiç tıkanmamıştır. Spunbond mikrofiber filtre altlıktan oluşan ikinci nanofiber tabakanın yakaladığı partikül miktarı diğer nanofiltrelere göre hızlı yükselmiştir. Bilhassa 10-15. dakikalar arasında çok sayıda 3.8 mg nanopartikül yakalamıştır. Bunun sebebi, yakalanan partiküller nanofiltre tabakanın orantılı olarak şişmesidir. Tabaka şişerek filtre geçirgenliğini devam ettirmiştir. İkinci nanofiber tabakanın partikül yakalama mekanizmasını arttıran şekilde şişmesi, nanofiber tabakanın az kaplanması, nanofiber boyutu nedeniyledir. İkinci numune deney sonunda altlıktan 6.4 mg daha fazla nanopartikül yakalamıştır.



Şekil 7.24. İkinci nanofiltre ile altlığın (8. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

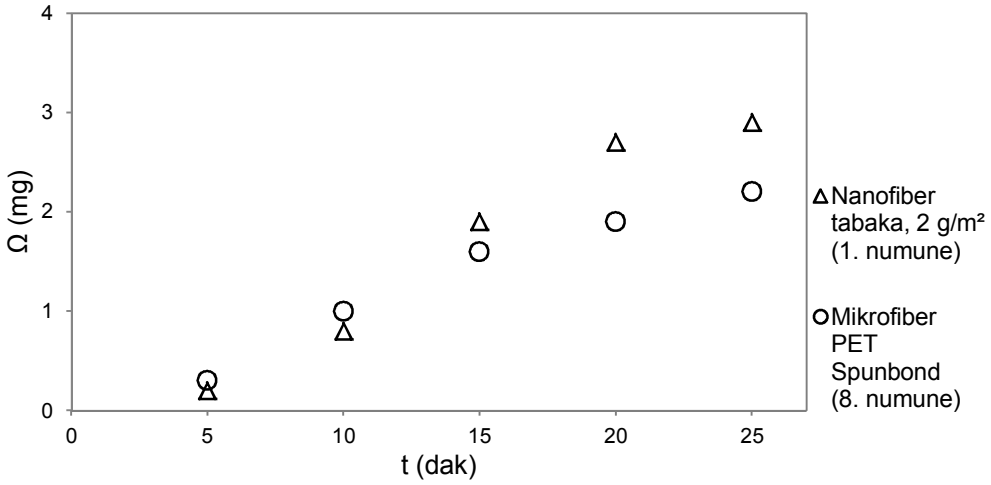
Birinci numune, nanofiber kaplanan filtrelerin içinde en az nanofiber ağırlığına (2 mg) sahiptir. Fiber çapı diğer nanofiltrelere nazaran orta düzeydedir (200 nm). Fakat partikül tutma testine başladığı sırada basınç kaybı çok küçük olup, meltblown mikrofiber numunenin basınç kaybına hemen hemen eşittir. Birinci numunenin partikül tutma testi sonunda 9 mmHgS ilave basınç kaybı oluşmuş ve 2.9 mg partikül yakalamıştır (Şekil 7.25). Birinci numune, nanofiber ağırlığının küçük olması, iri

boncuklu yapıya sahip olması nedeniyle az partikül yakalanmış, fakat hiç tıkanmamıştır. Nispeten az miktarda nanofiber kaplanan bu numune, bir mikrofiltre gibi davranmıştır.



Şekil 7.25. Birinci nanofiltrenin (2 g/m^2) yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

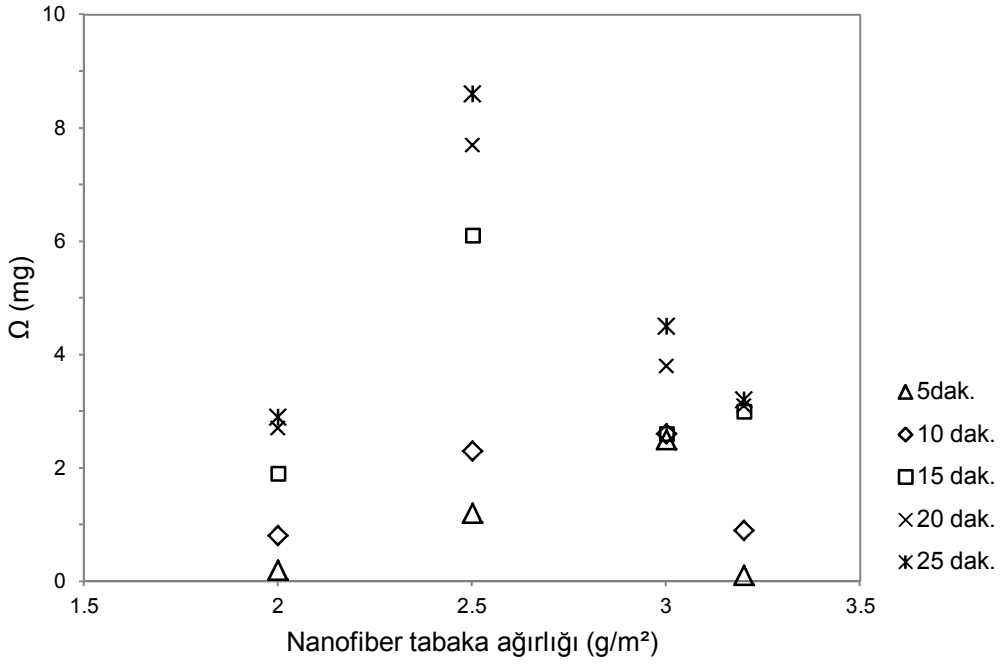
Birinci nanofiber tabakalı numunenin yakaladığı nanopartikül miktarının zamana bağlı değişimi Şekil 7.26'da gösterilmiştir. Burada 15. dakikaya kadar nanofiber tabakanın yakaladığı nanopartikül miktarı ile altlığın yakaladığı nanopartikül miktarı aynıdır. On beşinci dakikadan sonra nanofiber tabakanın yakaladığı partikül miktarı altlığın yakaladığı partikül miktarına göre bir miktar arttıysa da deney sonunda aradaki fark 0.6 mg'ı geçememiştir. Bunun sebebi düşük ağırlıkta nanofiber kaplanan tabakada az miktarda nanofiber olduğundan yeterli filtreleme olmayışındandır. Aynı boyuttaki fiberlerden oluşan iki farklı fiber ağında, kaplama ağırlığı fazla olan tabaka daha kalındır.



Şekil 7.26. Birinci nanofiltre ile altlığın (8. numune) yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

Farklı boyuttaki fiberlerden oluşan fiber tabakaları için böyle bir genelleme yapmak doğru olmaz. Çünkü fiber boyutunun değişmesiyle gözenek boyutu farklılaşır. Mesela fiber çapı arttığında gözenek boyutunun artması ile aynı fiber kaplama ağırlığında daha kalın tabakalar elde edilir.

Yapılan bu çalışmada nanofiber tabaka kalınlığının değişmesiyle yakalanan partikül miktarı zamanla değişmiştir. İlk dört nanofiltrede altlık ve kontrol filtresi aynı kalmış sadece nanofiber kaplama ağırlığı değişmiştir. Bu nedenle nanofiber kaplama ağırlığının yakalanan partiküle göre değişimini incelerken ilk dört nanofiber tabaka esas alınmıştır. Birinci, ikinci, üçüncü ve dördüncü nanofiltrelerde yakalanan partikül miktarının nanofiber tabaka ağırlığına göre değişimi Şekil 7.27'de sunulmuştur. Burada yatay eksen nanofiber tabaka kaplama ağırlığı ve dikey eksen yakalanan nanopartikül miktarıdır. Şekil 7.27, her nanofiltrenin aynı deney süresi sonunda (örneğin 5 dak. 10dak. vs.) yakaladığı nanopartikül miktarları alınarak oluşturulmuştur. Bu numunelerdeki ortalama nanofiber çapı 77-200 nm. arasında değiştiğinden nanofiber boyutlarının birbirine yakın olduğu varsayılabilir. Bu varsayımdan yola çıkarak nanofiber kaplama ağırlığının artmasıyla nanofiber tabaka kalınlığının artacağı ifade edilebilir.



Şekil 7.27. Nanofiltrelerde yakalanan nanopartikül miktarı ile nanofiber tabaka ağırlığı değişimi

Şekil 7.27 incelendiğinde beşinci dakika sonunda en az nanopartikülü 3.2 g/m^2 nanofiber kaplama ağırlığına sahip 4. nanofiber, ardından 2 g/m^2 kaplama ağırlığına sahip 1. nanofiber, üçüncü olarak 2.5 g/m^2 kaplama ağırlığındaki 2. nanofiber, en çok miktarda nanopartikülü ise 3 g/m^2 kaplanan 3. nanofiber yakalamıştır. Şekil dikkatlice incelendiğinde en çok nanopartikülün 2.5 g/m^2 nanofiber tabaka ağırlığına sahip 2. nanofiber tarafından yakalandığı, en az nanopartikülün ise 2 g/m^2 nanofiber ağırlığına sahip 1. nanofiber tarafından yakalandığı görülmüştür. Birinci nanofiber tabakanın az miktarda kaplanmasıyla ince bir tabaka elde edilmiş bu nedenle fazla nanopartikül yakalanamamıştır. Nanofiber kaplama ağırlığının artmasıyla kritik bir değere kadar yakalanan nanopartikül miktarı artmış daha sonra hızlı bir şekilde azalmıştır. Bunun nedeni nanopartikül ağırlığının artmasıyla nanofiber tabaka kalınlaşmış ve filtre geçirgenliği azaldığı için yakalanan nanopartikül miktarı azalmıştır. Elde edilen bu sonuç daha önce ifade ettiğimiz varsayımın doğru olduğunu göstermektedir. Aynı tabaka ağırlığındaki nanofiberlerin boyutları birbirine yakın ise tabakaların kalınlığı aynıdır. Benzer boyuttaki nanofiberlerin tabaka ağırlığı arttıkça kalınlık da artar.

7.2.2.3. H13 HEPA filtre partikül yakalama testi

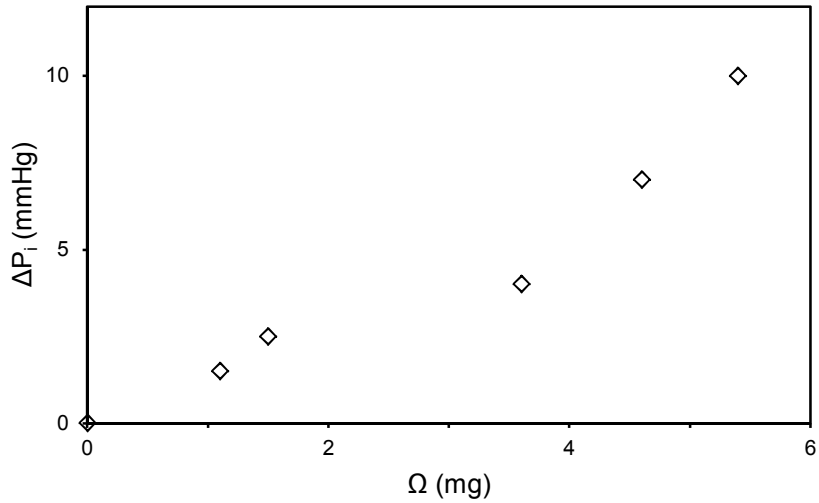
H13 HEPA filtre özellikleri ve partikül yakalama deney sonuçları Çizelge 7.8'de sunulmuştur. Burada ağırlık H13 HEPA numunesinin ağırlığını, $Ø_{ort.}$ ortalama nanofiber çapını, $\Delta P_{ort.}$ partikül testine başlangıçtaki basınç kaybını, ΔP_i partikül yakalandıktan sonra oluşan basınç kaybını, Ω birim zamanda yakalanan partikül miktarını, t_p partikül deney süresini ifade etmektedir.

Çizelge 7.8. H13 HEPA filtrenin özellikleri ve 0.3 m/s'deki partikül yakalama deneyi sonuçları

Numune no	Numune ismi	Ağırlık (g/m^2)	$Ø_{ort.}$ (nm)	$\Delta P_{ort.}$ (mmHgS)	ΔP_i (mmHgS)	Ω (mg)	t_p (dak.)
6	H13 sınıfı HEPA	85	931	27	1.5	1.1	5
					2.5	1.5	10
					4	3.6	15
					7	4.6	20
					10	5.4	25

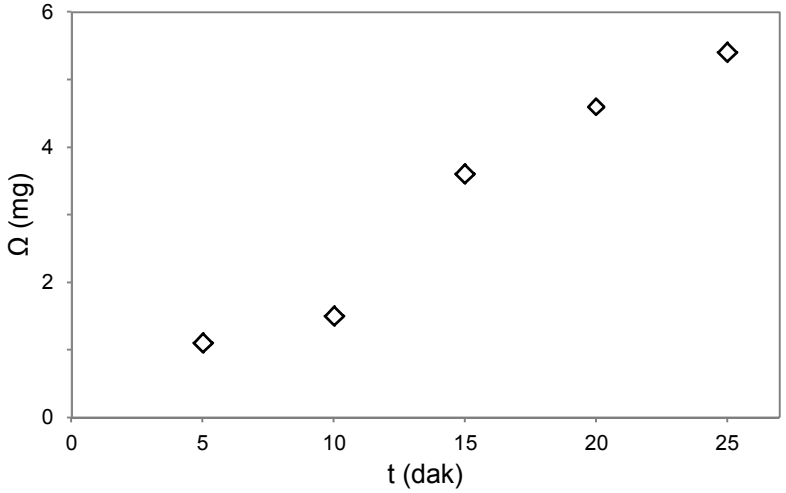
H13 sınıfı HEPA filtre, partikül deneyine başlamadan önce 27 mmHgS basınç kaybına sahiptir. H13 sınıfı HEPA filtre ile yapılan deneylerde, tıkanma gözlenmemiş, kararlı bir filtreleme meydana gelmiştir (Şekil 7.27). Gerek düşük basınçta yüksek partikül yakalaması, gerekse hiç tıkanmaması onu etkin bir filtre kılmıştır. Her ne kadar

büyük nanofiber boyutuna (931 nm) ve fiberlerde lokal çatlaklara sahip olsa da H13 filtre, cam elyaf filtre reçinesinin esnek olması ve kesit kalınlığının büyük olması sebebiyle 5.4 g nanopartikülü 10 mmHgS basınç farkı oluşturarak yakalamıştır. Deneyin 10. dakikası ile 15. dakikası arası aynı 2. nanofiber tabalı numunede olduğu gibi şişme meydana gelerek 2.1 mg nanopartikülü 1.5 mmHgS oluşturarak yakalamıştır.



Şekil 7.27. H13 sınıfı HEPA filtrenin yakaladığı partikül miktarı ile basınç kaybı değişimi

Şekil 7.28'de H13 HEPA filtrenin yakaladığı nanopartikül miktarının zamana bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 7.28. H13 HEPA filtrenin yakaladığı partikül miktarının zamana göre değişimi

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, altlık adı verilen mikrofiltrelerin üzerinde farklı parametrelerde elektro-eğirme yöntemiyle nanofiber tabakalar üretilmiştir. Elektro-eğirme deney parametrelerinin üretilen nanofiberlerin üzerinde nasıl bir etki oluşturduğu araştırılmıştır. Nanofiber tabakaların filtrasyon performans testleri yapılarak mikrofiltrelerin partikül tutma performansını ne kadar ve hangi şartlarda arttırdığı incelenmiştir.

Elektro-eğirme yöntemiyle 25-65 g/m² ağırlığa sahip ve G2-G4 sınıfı altlıkların üzerinde, ağırlıkça %15 konsantrasyonlu TPU-DMF çözeltisi, polimer besleme debisi 21-30 mL/h, uygulanan elektriksel gerilim 28-32 kV, lüle-silindirik toplayıcı arasındaki mesafe 19-23 cm deney parametreleri kullanılarak nanofiberler elde edilmiştir. Elektro-eğirme deneyinde nanofiberlerin homojen dağılıma sahip olması için silindirik toplayıcı, prosesin hızlı ilerlemesi için 12 lüle kullanılmıştır. Nanofiltre üretiminde 2-4 g/m² ağırlığında ve 77-200 nm fiber çapına sahip genellikle boncuklu yapılar elde edilmiştir. Filtre test cihazlarının çok pahalı olması ve ödünç kullanımına kısa süreli izin verilmesinden dolayı performans test cihazları ekip çalışmasıyla tasarlandı. Üretilen nanofiltreler, H13 HEPA filtre, G2 ve G4 sınıfı mikrofiltrelerin aralarındaki farkı görebilmek amacıyla performans testleri yapılmıştır. Performans testleri basınç kaybı ve partikül testlerinden oluşmaktadır. Basınç kaybı testinde, filtreye temiz hava gönderilerek filtrelerde oluşan basınç kaybı ölçülmüştür. Partikül tutma testinde ise, partiküllü hava kullanılarak zamana ve basınca bağlı tutulan partikül miktarı belirlenmiştir. Basınç kaybı testi, 0.3 m/s, 0.8 m/s ve 1.3 m/s; partikül tutma testi 0.3 m/s alın hızlarında yapılmıştır. Partikül olarak suyu uçurulmuş 80 nm ile 120 nm boyut aralığında küresel formda $CaCO_3$ nanopartiküller kullanılmıştır. $CaCO_3$ nanopartikülleri uçurmak amacıyla akışkan yataktan faydalanılmıştır. Akışkan yatakla $CaCO_3$ nanopartikülleri kolayca uçurularak havayla karıştırılmış ve filtre numunelerine gönderilmiştir. Partikül tutma testi, filtrenin tutulan partikül karşısında basınç kaybı değişimini, dolayısıyla filtrenin nasıl davrandığını göstermiştir. Performans deneyleri sonucunda üretilen nanofiltrelerden en yüksek basınç kaybının 1,034 mmHgS ile birinci numunede 1.3 m/s alın hızında, en düşük basınç kaybının ise 8 mmHgS ile ikinci numunenin 0.3 m/s alın hızında meydana geldiği belirlenmiştir. Partikül tutma testinde ise dördüncü numune tıkanmış, birinci ile üçüncü numune tıkanmaya çok meyilli olduğu tespit edilmiş, beşinci, altıncı ve ikinci numuneler iyi bir performans

sergilemiştir. En iyi performansı ikinci numune sergilemiş olup partikül tutma testine 7.5 mmHgS basınçta başlamış, ilave 7 mmHgS basınç oluşturarak 8.6 mg nanopartiküllü yakalamıştır. Beşinci numune, 20 mmHgS basınç farkı ile partikül tutma testine başlamış, 19 mmHgS ilave basınç oluşarak 7.3 mg partikülü yakalayarak ikinci iyi performansı sergilemiştir. H13 sınıfı HEPA filtre ise partikül tutma testine 27 mmHgS basınçta başlayarak 10mmHgS ilave basınç kaybında 5.6 mg nanopartikül yakalayarak üçüncü performansı sergilemiştir.

Nanofiberlerden oluşan nanofiltre üretimi için en uygun yöntem elektro-eğirmedir. TPU nanofiber, spunbond ve monofilament altlıkların üzerine kolaylıkla kaplanabilmiştir. TPU nanofiber ile spunbond altlıklar uyumlu bir davranış sergilemiş, nanofiber tabaka mikrofiltre yüzeyinden ayrılmadan filtrelemeyi sürdürmüştür.

Bu çalışmada, artan polimer debisi ve elektriksel gerilme ile jet kararsızlığının arttığı görülmüştür. Bu nedenle bilhassa yüksek gerilme ile çalışılmamalıdır. Aksi takdirde yoğun ve büyük boncuklu nanofiber elde edilir. Diğer bir elektro-eğirme deney parametresi olan polimer besleme debisinin artmasıyla nanofiber çapı büyümüştür. Fakat polimer besleme debisinin kritik bir değerden sonra artması polimer jetini kararsız hale getirmiş ve boncuklanma miktarı ve boncuk boyutları artmıştır.

Elektro-eğirmede aynı polimer konsantrasyonunda üretilen nanofiber tabakaları oluşturan nanofiberlerin boyutları birbirine yakın ise tabakaların kalınlığı aynıdır. Birbirine yakın boyuttaki nanofiberlerin tabaka ağırlığı arttıkça tabaka kalınlığı artar, azaldıkça, tabaka kalınlığı azalır. Nanofiber çapı farklı olan tabakalarda böyle bir genelleme yapılamaz. Nanofiber tabaka kalınlığı nanofiber çapına ve tabaka ağırlığına bağlıdır.

Literatürde olduğu gibi, nanofiltrelerde yakalanan partikül miktarı ve basınç kaybı, mikrofiltrelere göre daha yüksektir. Fiberlerin dolayısıyla gözeneklerin küçülmesi nedeniyle hava akışı zorlaştırmıştır. Ayrıca filtrelerde alın hızının artmasıyla, hava fiberlere hızla çarptığından hızı azalmış bu nedenle basınç kaybı yükselmiştir.

Filtre performans testleri için kurulumu, işletmesi basit ve ucuz bir deney seti kurulmuştur. Partikül tutma deneylerinde nanopartikül olarak toksin olmayan $CaCO_3$ kullanılmış, bunu uçurmada ise akışkan yataktan faydalanılmıştır. Kurulan bu deney seti farklı filtrelerin basınç kaybını ve partikül yakalama performanslarını karşılaştırmada oldukça başarılı olmuştur.

Filtre performans deneylerinde dördüncü nanofiltrede olduğu gibi, nanofiber kesit alanı (nanofiber tabaka kalınlığı) arttıkça, nanopartiküllerin filtreden geçeceği yol

uzamış ve kısa bir süre sonra tıkanma gerçekleşmiştir. Tıkanma sonucu basınç çok hızlı bir şekilde artmış, yakalanan partikül miktarı pek değişmemiştir. Bununla birlikte, az miktarda nanofiber kaplanan üçüncü nanofiltre performansının çok fazla arttırmadığı görülmüştür. Bu yüzden, nanofiber kaplama ağırlığının gereğinden az veya fazla olmaması gerekir. Az kaplanan nanofiber tabakanın filtre performansına katkı sağlamadığı, çok kaplanan nanofiber tabakanın ise, tıkanarak ömrünü kısa sürede doldurduğu, optimum filtrelemenin, orta dereceli nanofiber çapında (200 nm) ve kaplama ağırlığında (2.5 g) olduğu tespit edilmiştir.

Genel olarak küçük çaptaki nanofiberlerden oluşan nanofiltreler ince tabaka halinde, büyük çapa sahip nanofiberlerin oluşturduğu nanofiltreler kalın tabaka halinde kaplanarak kullanılması filtreleme performansını yükseltmiştir. Nitekim büyük çapa sahip H13 sınıfı HEPA filtrenin kalın olması ve 200 nm çapa sahip ikinci numunenin orta kalın olması durumlarında filtreleme performanslarının yükselttiği görülmüştür.

Nanofiber içindeki boncuklu yapı, filtreleme kalitesini genellikle olumlu yönde etkilemiştir. Etkin filtrasyon için, nanofiber tabakasının büyük (5-8 μm) ve düzgün dağılımlı boncuklu yapıya sahip olması gerekir. Nitekim bu durum ikincinin partikül tutma testinde görülmüştür. Fakat nanofiltrenin büyük boncuklu olması yüksek performans için yeterli değildir. Bunun yanında nanofiberlerin optimum kalınlıkta kaplanmış olması gerekir.

Spunbond altlıklar, elektro-eğirme yöntemiyle TPU nanofiltre üretiminde en iyi performansı sağlamıştır. Bu, spunbond altlığın rijit, mukavim ve yüzeyinin pürüzlü olmasından kaynaklanmıştır. Bu nedenle herhangi bir katlama yapılmaksızın düz bir konstrüksiyonda iken 1 atm'den daha yüksek basınçlara dayanmış ve nanofiltre tabakayı bırakmamıştır. Spunbond mikrofiltre nanofiltre ile iyi uyum sağlamış ve kolay kolay birbirinden ayrılmamıştır.

Birinci nanofiber tabakanın az miktarda kaplanmasıyla ince bir tabaka elde edilmiş bu nedenle fazla nanopartikül yakalanamamıştır. Nanofiber kaplama ağırlığının artmasıyla kritik bir değere kadar yakalanan nanopartikül miktarı artmış daha sonra hızlı bir şekilde azalmıştır. Bunun nedeni nanopartikül ağırlığının artmasıyla nanofiber tabaka kalınlaşmış ve filtre geçirgenliği azaldığı için yakalanan nanopartikül miktarı azalmıştır.

Filtrenin şişmesi performansı arttırıcı bir rol oynamıştır. Filtrelerin şişmesiyle gözenekler açılmış basınç kaybı biraz düşerken yakalanan partikül miktarı artmıştır. Filtrenin şişmesi ile oluşabilecek mikro çatlaklardan korunmak için nanofiberlerin

yeterince mukavim ve sünek olması gerekir. Bunun için nanofiber kaplama kalınlığının orta seviyede olması gerekir. Ayrıca nanofiberi oluşturan polimerin oldukça mukavemetli ve sünek olması gerekir. Aksi halde nanofiberler yırtılarak ömrünü kısa bir sürede tamamlar.

Nanofiber tabaka tarafından tutulamayan, nanofiltreden geçen $CaCO_3$ nanopartiküllerinin miktarı su, sıvı yağ, siklon ve sıkıştırılmış keçe kullanılarak belirlenememiştir. Filtreden geçen partikül boyutunun tespit edilememesi, filtreden geçen partikül boyutunun dolayısıyla miktarının çok az olmasıdır. Az miktardaki nanopartikül hassas terazide tartılamamıştır.

Nanofiber tabaka altlıklara kaplandıktan sonra altlık arkada kalacak şekilde konulmalıdır. Nanofiltre önüne kalın kesitli ve küçük çaplı (mikro seviyede) kontrol filtresi konması filtrenin filtreleme performansını arttırıcı bir rol oynamıştır. Bunun nedeni, kalın ve küçük çaplı bir mikrofiltreden çıkan nanopartikül yavaşlayarak ve bir kısmı tutularak nanofiltreye girmesidir.

Partikül tutma testiden sonra filtre numunelerini düzleştirecek, partikülleri dökülecek şekilde konulmamasına özen gösterilmelidir. Bunun için her bir numune yeterli büyüklükte bir kaba ayrı ayrı konmalıdır.

Elektro-eğirme prosesinde her ne kadar döner tambur üzerine nanofiber kaplanmış olsa da homojen bir nanofiltre elde edilememiştir. Homojen bir nanofiltre elde etmek için birkaç altlık üzerinde nanofiber tabakalar üretilerek kompozit filtreler oluşturulabilir.

Deney cihazında kullanılan vanalar yavaşça açılıp kapatılmalıdır. Aksi halde, manometrelerin içindeki akışkanlar havayla dışarı kaçabilir, filtreler patlayabilir, ani basınç artışından sızdırmazlık azalabilir.

Filtrelerin takıldığı flanşlarda cıvata-somun bağlantısı kullanılmıştır. Deney esnasında cıvataları söküp takmak zahmetli ve zaman alıcı bir yöntem olduğundan, flanşların yeterince büyük olması, cıvataların flanşlara kaynak edilmesi ve kelebek somun kullanılması tavsiye edilebilir.

KAYNAKLAR

Adanur, S., 1995, Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles, *Technomic Publishing Co. Inc*., Chapter 8.0, *Filtration Textiles*, 275-294

Ahn, Y.C., Park, S.K., Kim, G.T., Hwang, Y.J., Lee, C.G., Shin, H.S., Lee, J.K., 2005, Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers, *Current Applied Physics*, 6, 1030-1035

Andrady, A.L., 2008, Science and Technology of Polymer Nanofibers, Wiley Pres., New Jersey, 403 p

Anonymous, 2012a, http://www.basf.com/group/corporate/en/literature-document:/Brand+Elastollan-Brochure--Elastollan+Thermoplastic+polyurethane +elastomers+TPU-English.pdf, [Ziyaret tarihi: 10/11/2012]

Anonymous, 2012b, http://www.merckmillipore.com/chemicals/n-n-dimethylformamide /MDA_CHEM-103034/p_xrOb.s1LJOMAAAEWveAfVhTl?WFSimpleSearch_ NameOrID=DMF&BackButtonText=search+results, [Ziyaret tarihi: 19/11/2012]

Anonim, 2012c, http://www.inovenso.com/products/laboratory-electrospinning-equipments/#!prettyPhoto[gallery]/5/ [Ziyaret tarihi: 19/11/2012]

Anonim, 2012d, http://www.bilimfeneri.gen.tr/kitaplik/pdf/debi_olcumu.pdf [Ziyaret tarihi: 19/11/2012]

Anonymous, 2012e, http://tr.wikipedia.org/wiki/Ak%C4%B1%C5%9Fkan_yatak [Ziyaret tarihi: 19/11/2012]

Anonymous, 2013a, http://trade.indiamart.com/details.mp?offer=3995899848 ve http:// ruishen.en.hisupplier.com/product-411205-Plain-Weave-Polyester-Fabric.html [Ziyaret tarihi: 18/04/2013]

Anonymous, 2013b, http://www.insulationsupplies.com/images/PICS/insulweb.jpg [Ziyaret tarihi: 09/05/2013]

Anonymous, 2013c, http://www.alibaba.com/product-gs/662852213/ Nano_ Precipitated_Calcium_Carbonate.html [Ziyaret tarihi: 09/05/2013]

Anonymous, 2013d, http://www.electrospinz.co.nz/ES1aManualG.pdf [Ziyaret tarihi: 16/05/2013]

Anonymous, 2013e, http://www.meitavtec.com/datasheet/M4000MD-rev1.pdf [Ziyaret tarihi: 14/08/2013]

Anonymous, 2013f, http://www.sugartech.co.za/psychro/ [Ziyaret tarihi: 14/08/2013]

Cengiz, F., Krucinska, I. ,Göktepe, F., Glinscinska, E., Chrzannowski, M., 2006, Elektro Lif Çekim (Electrospinning) Yönteminde Proses Parametrelerinin Nanolif Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, *Tekstil Maraton*, 4:20-25

Daşdemir, M., 2006, Electrospinning of Thermoplastic Polyuretan (TPU) for producing Nanofibers, M. Sc. Thesis, *Gaziantep University Graduate school of Natural & Applied Science*, Gaziantep, 1-107

Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J., Harris, D., Becktan, N.C., 2001, The Effect of Processing Variables on the Morphology of Electrospun Nanofibers and Textiles, Polymer, (42), 261–272

Demir, M.M., Yılgör, İ., Yılgör, E., Erman, B., 2002. Electrospinning of Polyurethane Fibers, *Polymer*, 43(11), 3303-3309

Doğan, G., 2006, Kuru hava filtrasyonunda kullanılan keçelerin performansı üzerine bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Türkiye

Duran, K., Öneş, A.M., 1993, Nonwovenların Filtrasyonda Kullanımı, Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi, V.5, 337-342

Elaftherakis, J, 1999, Filtration Technology - Optimizing the Design Process, *Fluid Engineering Science*, V.56, pp 3549-3561

Epps, H. H., Leonas, K. K., 2000, Pore Size and Air Permeability of Four Nonwoven Fabrics*, International Nonwovens Journal*, V.9: 2

Feng, L., Li, S., Li, H., Zhai, J., Song, Y., Jiang, L., Zhu, D., 2002, SuperHydrophobic Surface of Aligned Polyacrylonitrile Nanofibers, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 41

Frank, K. K., 2004, From Textile to Geotextiles, Seminar in Honour of Prof. Robert Koerner, Drexel University, Philadelphia, USA

Grafe, T., Graham, K., 2002, Polymeric Nanofibers and nanofiber Webs: A New Class of Nonwovens, INTC 2002: International Nonwovens Technical Conference Joint INDA – TAPPI Conference), Atlanta, Georgia

Graham, K., Grafe, T., Knauf, P., McDonald, B., 2002. Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications, *Fifteenth Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society*, Galveston, Texas, USA, 1-6

Gustavsson, J., 2003, EN 779:2002 New European Test Method for air filters, *Filtration and Seperation*, Vol. 3, 22-26

Hardman, E., 2000, Handbook of Technical Textiles, Edited by Horrocks, A.R., Anand, S.C., Woodhead Publishing, *Textiles in Filtration*, 317-357

Harlin, A., Heikkila, P., Silila, A., Peltola, M., 2007, Electrospun PA-66 Coating on Textile Surfaces, *Textile Resource Journal*, Vol 77 (11), 864 870

Heikkila, P., Taipale, A., Lehtimaki, M., Harlin, A., 2008, Electrospinning of Polyamides With Different Chain Compositions for Filtration Application, Polymer Enngineering and Science, (48), 6, 1168

Hutten, I.M., 2007, Handbook of Nonwoven Filter Media, *Elsevier Science& Technology Books*, USA, 1- 473

Huang, Z.M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S., 2003, A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites Science and Technology,* (63) 2223–2253

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, *Seperation and Purification Tecnology*, (71) 30-37

Jayaraman, K., Kotaki, M., Zhang, Y., Mo, X., Ramakrishna, S., 2004, Recent Advances in polymer nanofibers, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 52–65

Kataphinan W., 2004, Electrospinning and Potential Applications, PhD Thesis, *The Graduate Faculty Of The University Of Akron*, USA

Khil, M.S., Cha, D.I.,Kim, H.Y.,Kim, I.S., Bhattarai, N., 2003. Electrospun Nanofibrous Poliurethane Membrane as Wound Dressing, *J Biomed Mater Res Pt Appl Biomater*, (2), 675-679

Ko, F., 2004, Nanofiber Technology: Bridging the Gap between Nano and Macro World, *NATO ASI on Nanoengineeered Nanofibrous Materials*, Kluwer Academic Publishers, Drexel-USA, 1-18

Kozanoğlu, G.S., 2006, Elektrospinning Yöntemiyle Nanofiber Üretim Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, *ITU Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-148

Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.E., Lim, T.C., Ma, Z., 2005, An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, *World Scientific Publishing Co.,* Singapore, 1-381

Süpüren, G., Kanat, Z.E., Çay, A.,Kırcı, T., Gülümser, T.,Tarakçıoğlu, I., 2007, Nano Lifler, Tekstil ve Konfeksiyon, 2, 83-89

TS ISO 5011 (Türk Standardı), 2002, İçten Yanmalı Motorlar ve Kompresörler için Giriş Hava Filtreleri-Performans Deneyleri

Üstündağ, G.C, 2009, Electrospinning Yöntemiyle Biyomedikal Kullanıma Yönelik Yüzey Üretimi ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 1-181

Üstündağ, G.C., Karaca, E., 2009, Poli(Vinil Alkol)/Sodyum Alginat Karışımlarından Elektro Çekim Yöntemi İle Elde Edilen Nanolif Yüzeylerin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(1)

Vaughn, E., Ramachandran, G., 2002, Fiberglass Synthetic Air Filtration Media, *International Nonwovens Journal*, 11: 3, 41-51

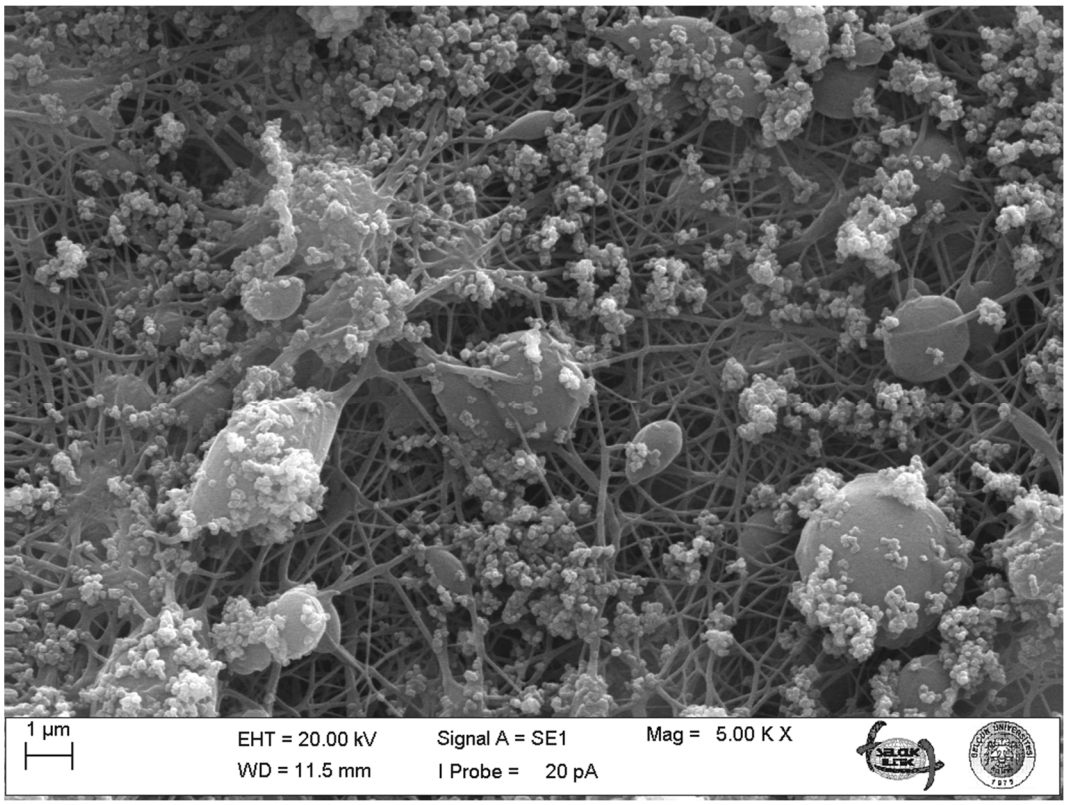
Yang, Z.Z., Lin, J.H., Tsai, I.S., 2002, Particle Filtration with an Electret of Nonwoven polypropylene fabric, *Textile Research Journal*, 72 (12) pp. 1099–1104

Yun, K.M., Suryamas, A.B., Iskandar, F., Bao, L., Niinuma, H., Okuyama, K., 2010, Morphology optimization of polymer nanofiber for application in aerosol particle filtration, *Seperation and Purification Technology*, 10,1016

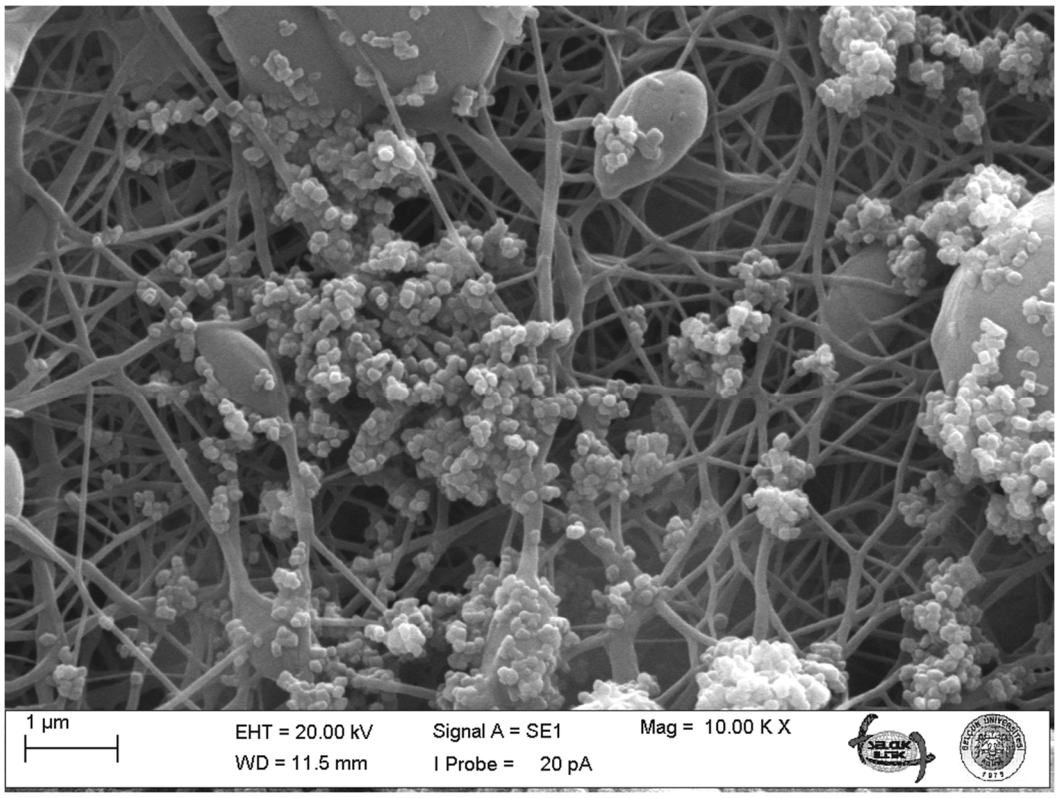
Zhang, S., Shim W.,S., Kim, J., 2009, Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency, *Material and Design*, 30, 3659-3666

EKLER

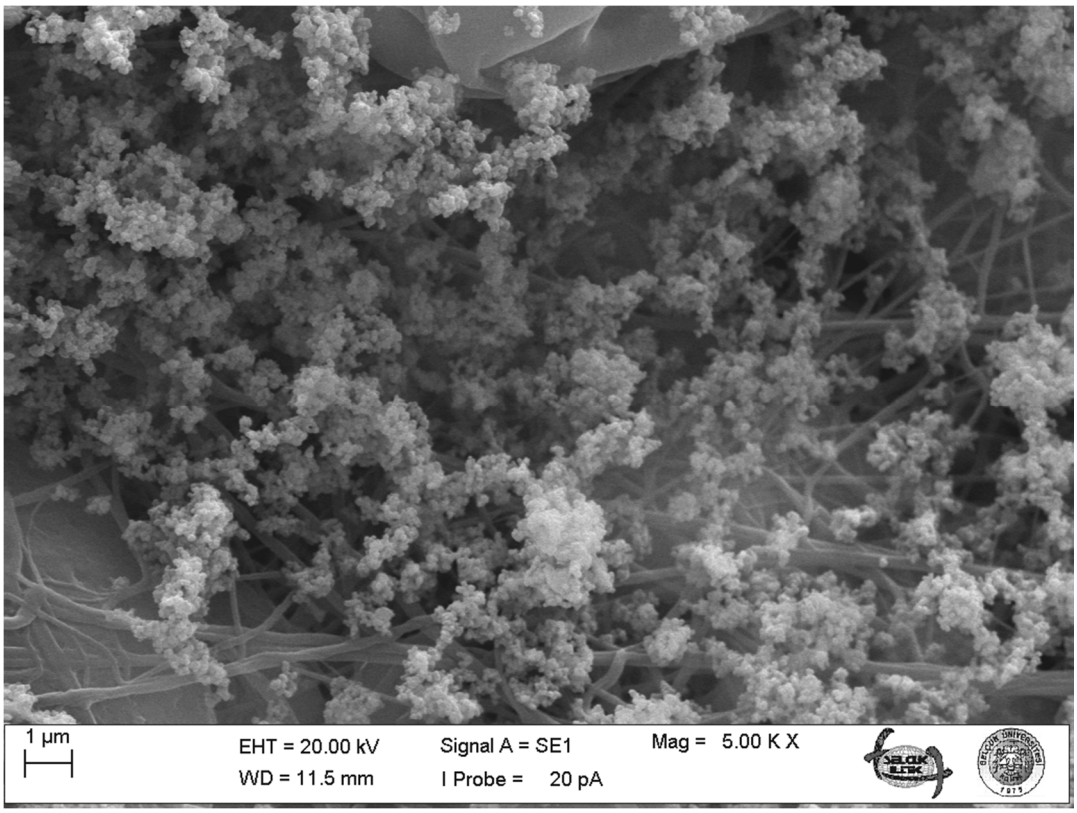
EK-1.A PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 2 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabaka kaplanmasıyla elde edilen nanofiltrenin (1. Numune) SEM görüntüsü



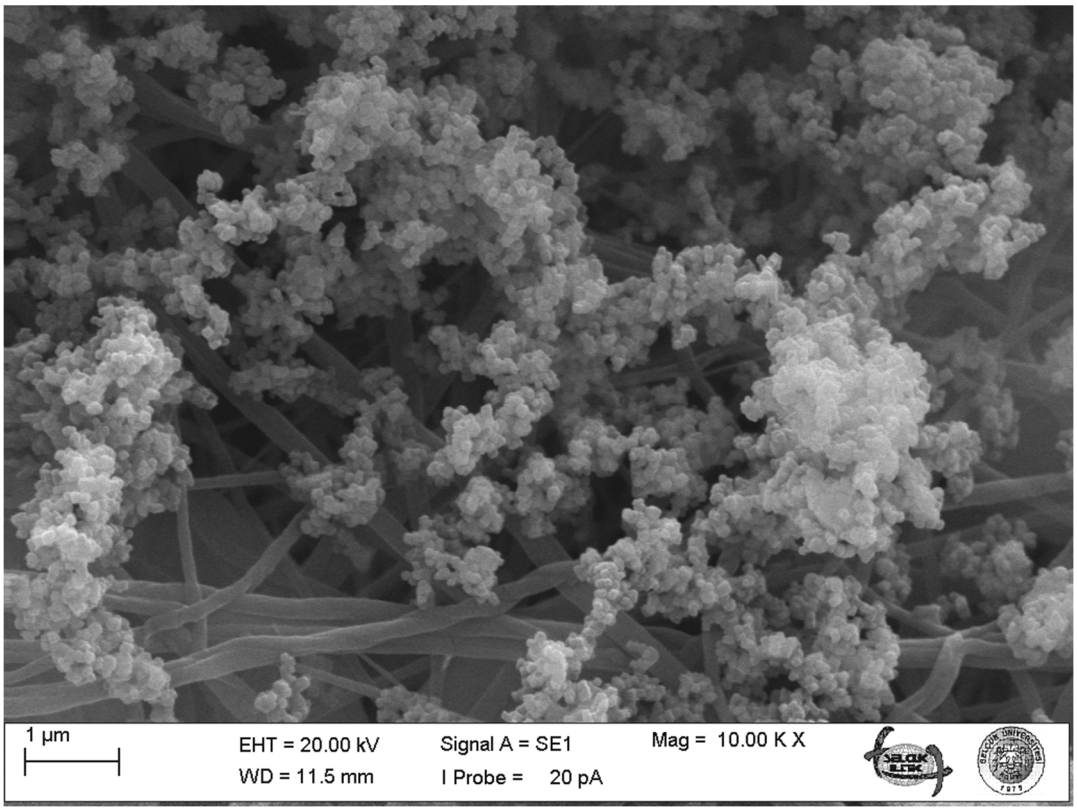
EK-1.B PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 2 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabaka kaplanmasıyla elde edilen nanofiltrenin (1. Numune) SEM görüntüsü



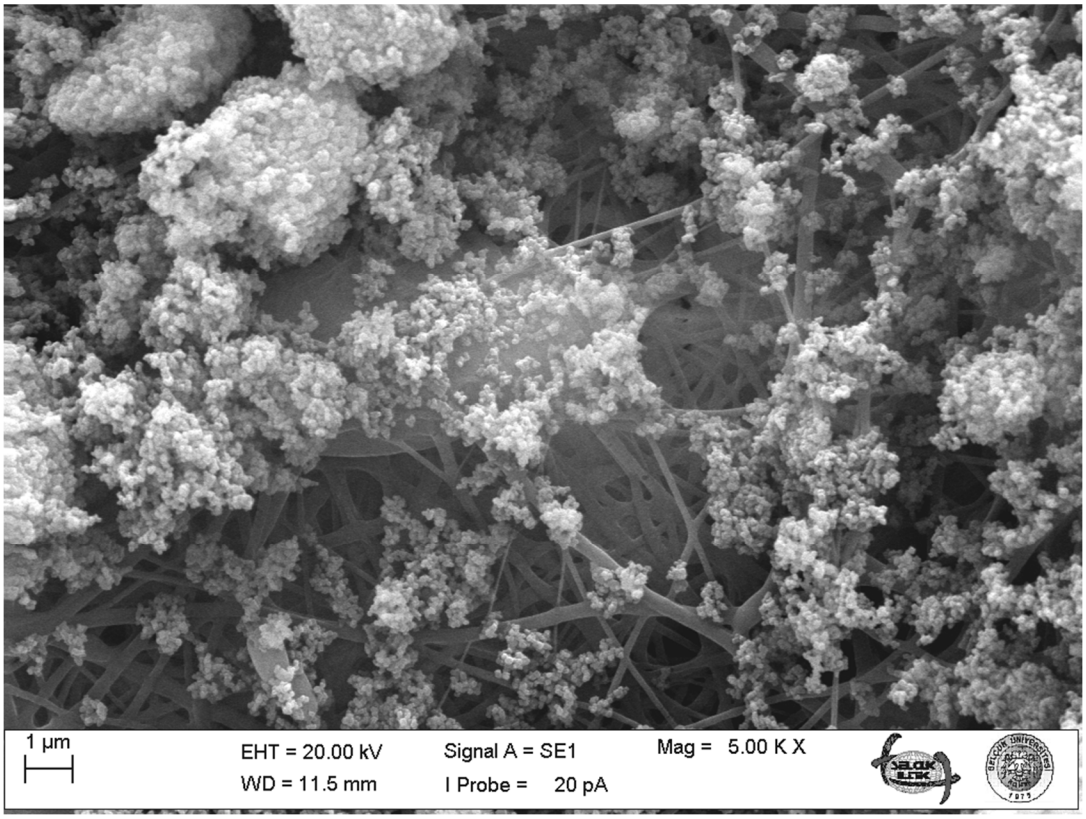
EK-2.A PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 2.5 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabaka kaplanmasıyla elde edilen nanofiltrenin (2. Numune) SEM görüntüsü



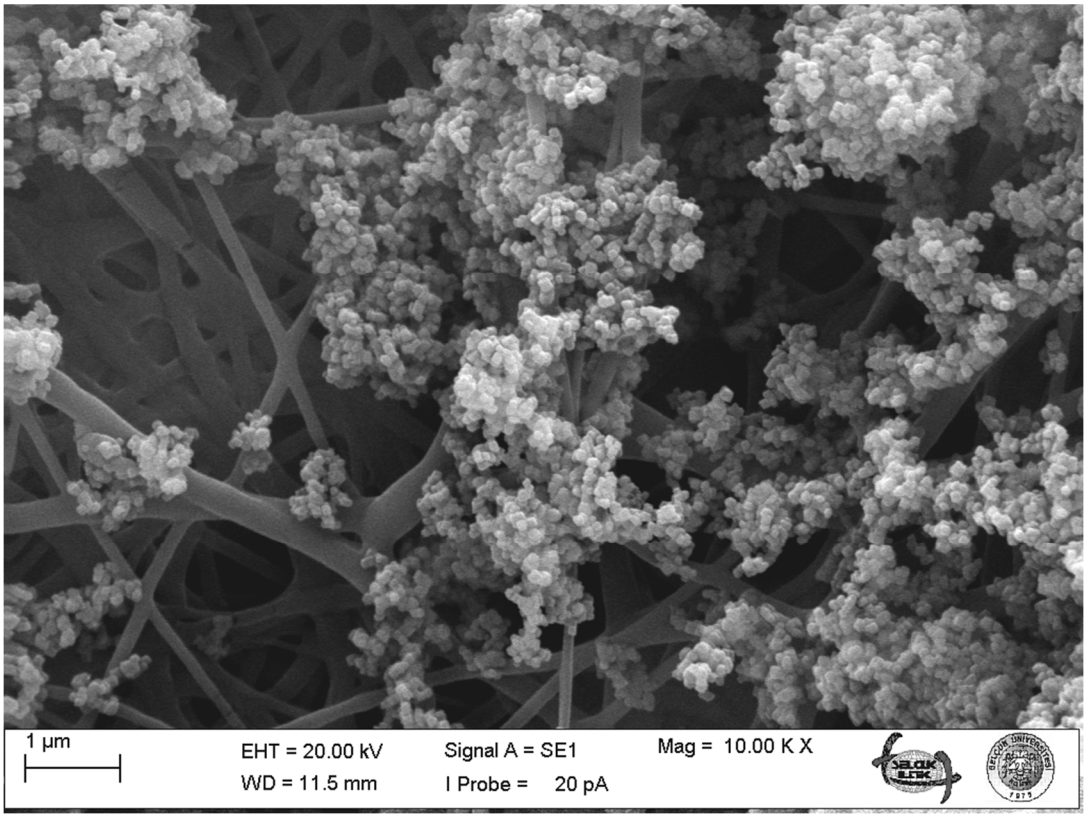
EK-2.B PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 2.5 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabakanın (2. Numune) SEM görüntüsü



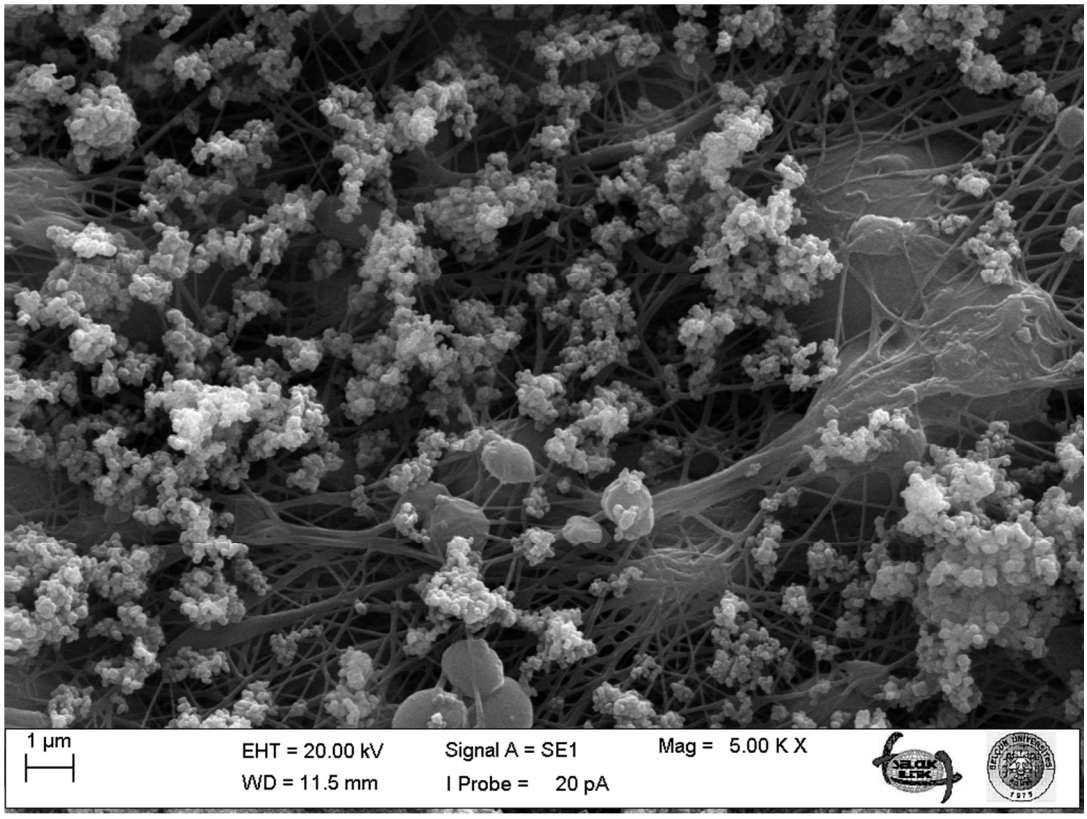
EK-3.A PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 3 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabaka kaplanmasıyla elde edilen nanofiltrenin (3. numune) SEM görüntüsü



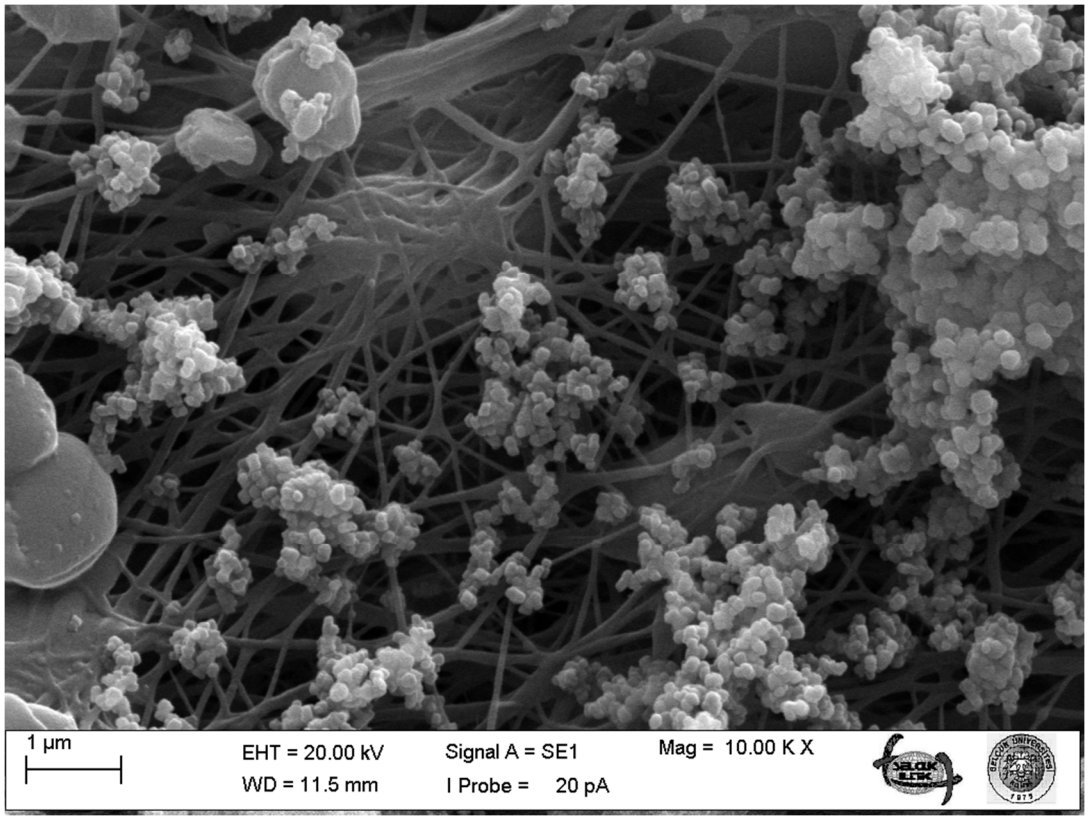
EK-3.B PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 3 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabaka kaplanmasıyla elde edilen nanofiltrenin (3. numune) SEM görüntüsü



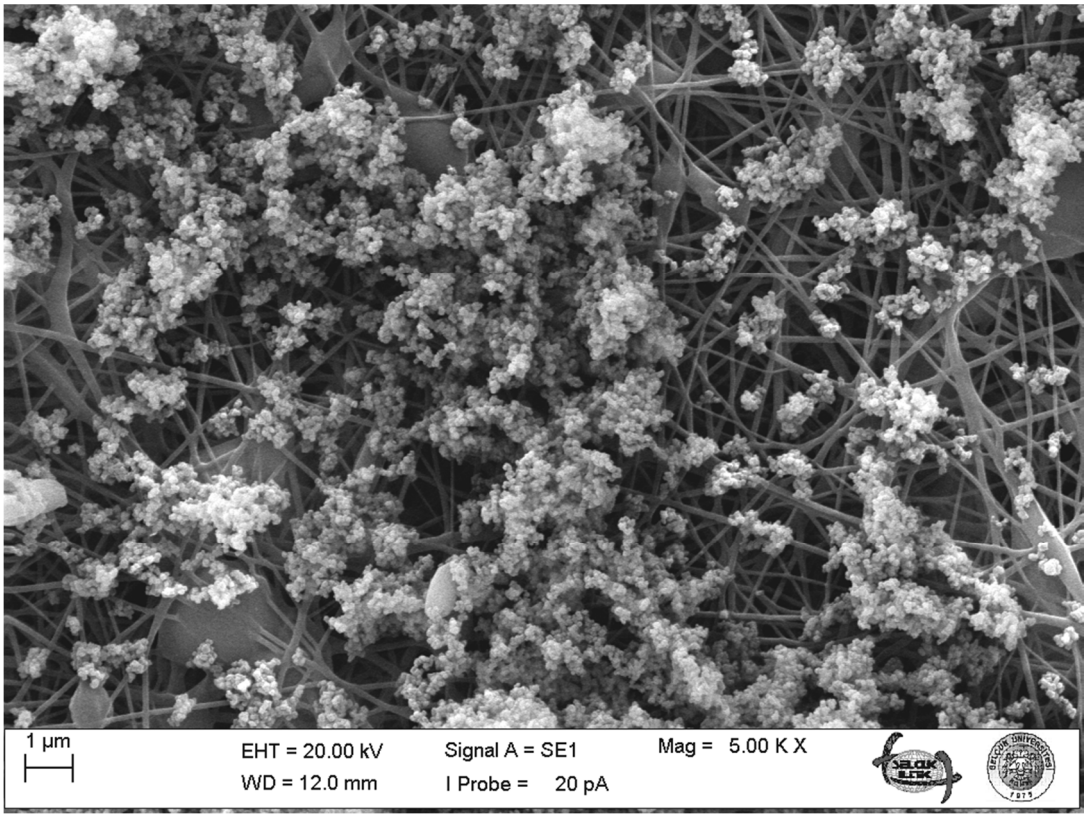
EK-4.A PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 3.2 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabakanın (4. numune) SEM görüntüsü



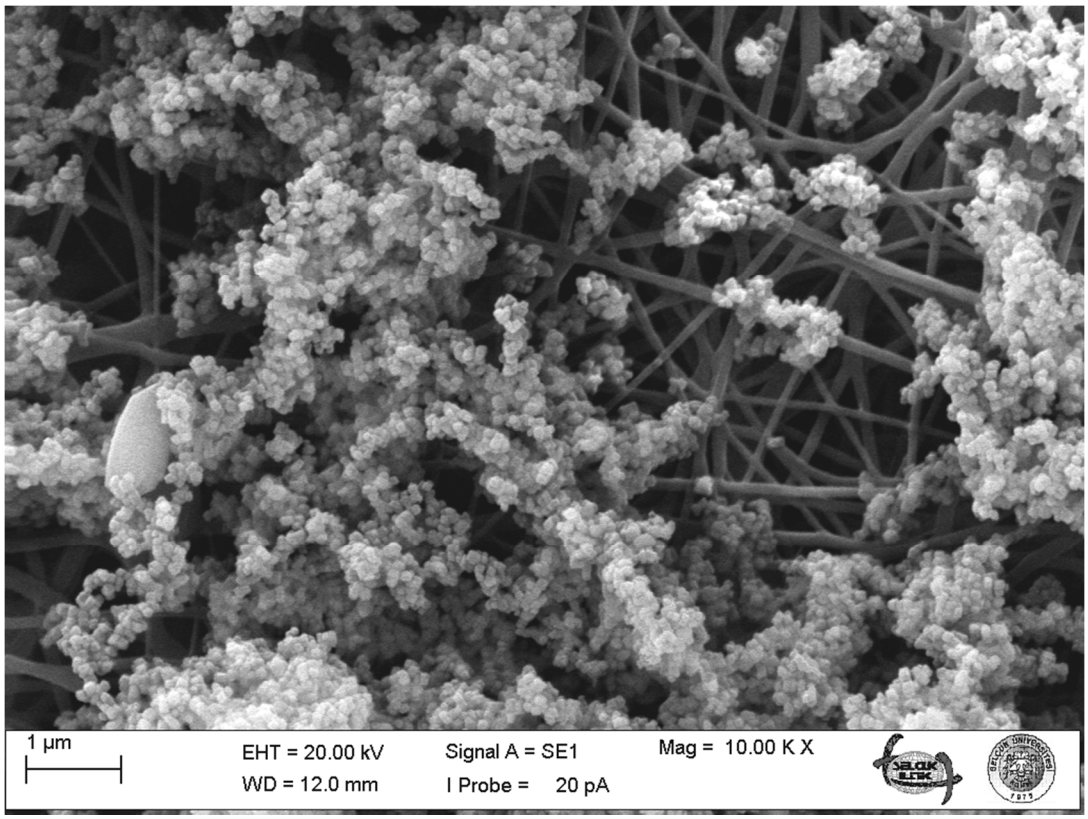
EK-4.B PET Spunbond altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 3.2 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabakanın (4. numune) SEM görüntüsü



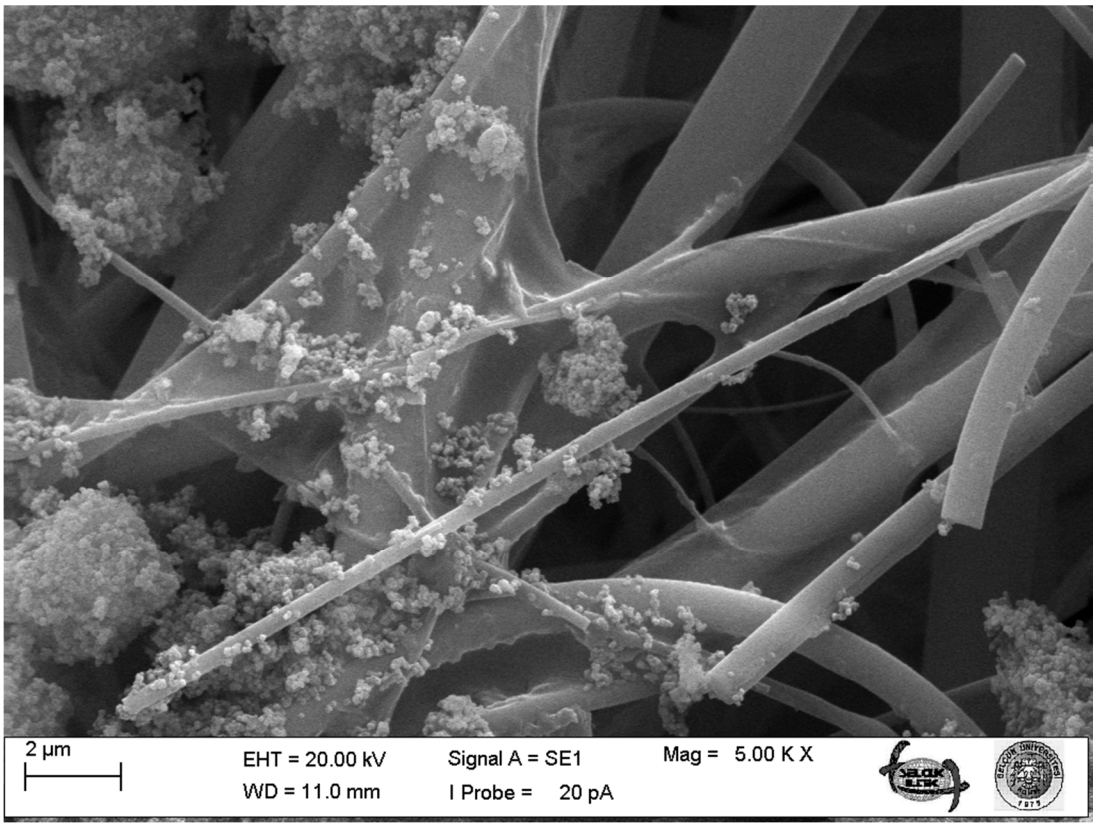
EK-5.A PP Monoflament altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 4 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabakanın oluşturduğu nanofiltrenin (5. numune) SEM görüntüsü



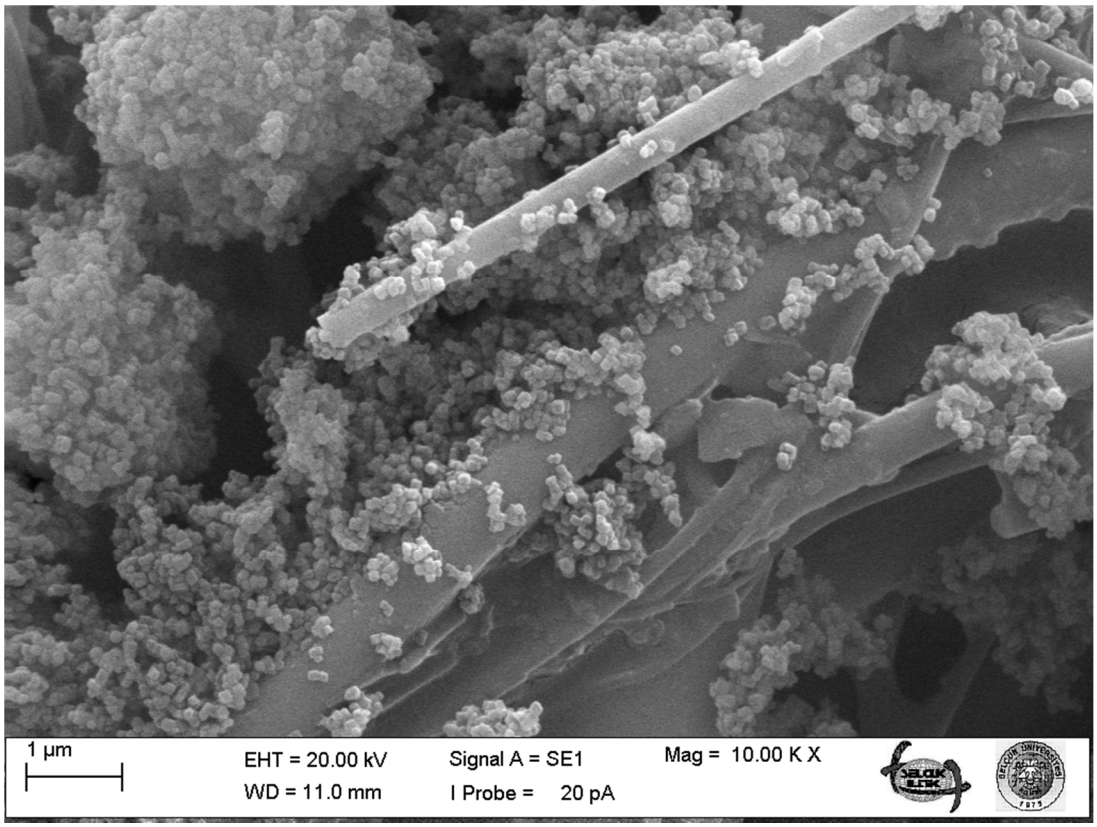
EK-5.B PP Monoflament altlık üzerine % 15 konsantrasyonla 4 g/m^2 ağırlıkta TPU nanofiber tabakanın oluşturduğu nanofiltrenin (5. numune) SEM görüntüsü



EK-6.A H13 sınıfı HEPA filtre kağıdının (6. numune) SEM görüntüsü



EK-6.B H13 sınıfı HEPA filtre kağıdının (6. numune) SEM görüntüsü



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet SELBES
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya
Telefon : 5308754718
Faks : 3322214266
e-mail : zmselbes@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Ticaret Meslek Lisesi, Meram, Konya	1996
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi Müh.Mim. Fak., Makine Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya	2001
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuklu, Konya	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2002-2006	Koneks Piston & Liner A.Ş.	Üretim Müdürü
2006-	Adese Alışveriş Merkezleri A.Ş.	Makine Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Talaşlı İmalat, Kalite Kontrol, ISO 9000, Mekanik Tesisat (Yangın, Havalandırma, Doğalgaz, Sıhhi tesisat, Kalorifer tesisatı), Çevresel Gürültü Kontrolu,

YABANCI DİLLER

İngilizce, Orta düzey