

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SELÜLOZ NANOKRİSTAL VE FOTOKATALİZÖR KATKISIYLA ÜRETİLEN
NANOLİF HAVA FİLTRELER İLE İÇ ORTAM HAVASINDA BULUNAN
UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN GİDERİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ESRA BÜYÜKADA KESİCİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı

ŞUBAT 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SELÜLOZ NANOKRİSTAL VE FOTOKATALİZÖR KATKISIYLA ÜRETİLEN
NANOLİF HAVA FİLTRELER İLE İÇ ORTAM HAVASINDA BULUNAN
UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN GİDERİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ESRA BÜYÜKADA KESİCİ
501181716**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Derya Yüksel İMER

ŞUBAT 2021

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501181716 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Esra BÜYÜKADA KESİCİ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SELÜLOZ NANOKRİSTAL VE FOTOKATALİZÖR KATKISIYLA ÜRETİLEN NANOLİF HAVA FİLTRELER İLE İÇ ORTAM HAVASINDA BULUNAN UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN GİDERİMİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Derya Yüksel İMER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kadir ALP**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Elif ÖZEN CANSOY
Piri Reis Üniversitesi

Teslim Tarihi : 20 Ocak 2021
Savunma Tarihi : 11 Şubat 2021





Canım eşime ve aileme,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamın oluşumunda, araştırmalarımın yürütülmesi ve deney sürecinde her zaman değerli bilgileriyle tez sürecime ışık tutan, sonsuz sabırla yanımda olan, karakteri ve akademik çizgisizle örnek aldığım, güler yüzü ve samimiyetiyle verdiği tüm destek için değerli danışmanım Doç. Dr. Derya Yüksel İmer'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Engin bilgi birikimi ve tecrübeleriyle tez sürecimde her zaman destek olan, sabırla tüm süreci takip eden ve değerli bilgileriyle yönlendiren Prof. Dr. Kadir Alp'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında değerli bilgilerini benimle paylaşan, yol gösteren ve desteğini bir an olsun eksik etmeyen sevgili hocam Doç. Dr. C.Elif Özen Cansoy'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımı yürütürken yardımları eksik etmeyen ve tez sürecimi kolaylaştıran değerli arkadaşlarım Elifnur Gezmiş Yavuz ve Dila Aydın'a teşekkür ederim.

Tez kapsamında yapılan nanolif üretimi ve performans testleri için Tekstil Makina ve Malzemeleri Araştırma Geliştirme Merkezi'nin kapılarını açan, tecrübeleriyle tez sürecime yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Ali Kılıç'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmaların büyük çoğunluğuna ev sahipliği yapan İTÜ Çevre Mühendisliği laboratuvarı ve çalışanlarına; destek tabakasının temini için MOGUL'a; SEM analizi için Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünden Ahmet Nazım ve Arş. Gör. Memnune Kardeş ve FTIR analizi için Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden Gizem Başaran Dindaş'a; mekanik dayanım testi için Piri Reis Üniversitesi Deniz Teknolojileri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı'ndan Doç. Dr. Gülşen Akın Evingür'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Tezin yapıtaşı olan Selüloz Nanokristal malzemesinin üretimi ve temini için Dr. Soydan Özcan ve Dr. Kai Li'ye sonsuz teşekkür ederim.

Fotokatalitik mekanizmayı teze entegre etmemde yardımcı olan, değerli bilgileri ve tecrübesi ile beni aydınlatan Gebze Teknik Üniversitesi'den değerli hocam Prof. Dr. Cengiz Yatmaz ve Prof.Dr.Koray Öztürk'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın tüm evrelerinde, başarılarım ya da başarısızlıklarımda koşulsuz yanımda olduğunu bildiğim, seçimlerimi sorgulamadan yol gösteren, karakteri ile örnek aldığım canım kardeşim Elif Büyükkada Yüksel'e, sevgili eşi Mehmet Yüksel'e ve güzel kızları Bahar Yüksel'e koşulsuz sevgileri ve destekleri için teşekkür ederim. Hayatta verdiğim tüm kararlarda arkamda olan, maddi ve manevi tüm desteğiyle beni bu günlere getiren canım babam Salih Yılmaz Büyükkada'ya teşekkür ederim. Sevgi, saygı ve aile kavramlarını bana öğreten, ilk öğretmenim, en yakın arkadaşım, sonsuz

desteğini her zaman hissettiren canım annem Muhterem Büyükada'ya sonsuz sevgisi ve sabrıyla beni bu günlere getirdiği için teşekkür ederim.  ocukluğumun kahramanı, ilk arkadaşı, sırdaşı, eğitimin, saygılı ve ahlaklı bir insan olmanın önemini bana öğreten canım babannem Beyhan Büyükada'ya içimi ısıtan sevgisiyle beni yetiştirdiği için sonsuz teşekkür ederim.

Yanımda olduğunu ve koşulsuz sevgisini her zaman hissettiğim, sonsuz desteği ve farklı bakış açısıyla beni geliştiren, iyi ya da kötü günlerimde tüm nazımı çeken, hayatın değerini ve her koşulda umudun varlığını bana hatırlatan sevgili e im Eray Kesici'ye teşekkür ederim.

Bu tez T B TAK 118Y412 numaralı proje kapsamında yapılmıştır. Bu tez  T  BAP Birimi (MYL-2019-42060 kodlu proje) tarafından desteklenmiştir. Maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

 ubat 2021

Esra BÜYÜKADA KES C 

 evre Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Önemi	2
1.2 Tezin Kapsamı	3
2. LİTERATÜR.....	5
2.1 İç Ortam Hava Kalitesi ve Standartları	5
2.2 UOB Kaynakları ve Örneklem Yöntemi.....	7
2.3 İç Ortam Havasında UOB Giderimi için Yenilikçi Yöntemler	10
2.4 Elektroğirme Yöntemi ile Nanolif Filtre Üretimi	17
3. MATERYAL VE METOT.....	21
3.1 Kullanılan Kimyasal Malzemeler	21
3.2 Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi	22
3.3 Nanolif Filtre Üretimi için Polimer Çözeltilerin Hazırlanması	23
3.3.1 Saf polimer çözeltilerinin hazırlanması	23
3.3.2 Kompozit polimer çözeltilerinin hazırlanması	24
3.4 Nanolif Filtreler için Elektroğirme Yöntemi ile Üretimi	28
3.5 Üretilen Nanolif Filtrelerin Yapısal Analizi	29
3.5.1 SEM-EDS analizi ile yüzey morfolojisi ve nanolif çapının belirlenmesi	29
3.5.2 FTIR analizi	30
3.5.3 Mekanik dayanım özelliklerinin belirlenmesi	31
3.6 Üretilen Nanolif Filtrelere Uygulanan Performans Testleri	33
3.6.1 Hava geçirgenliği testi	33
3.6.2 Su buharı geçişi testi	33
3.6.3 Toluen adsorpsiyon ve oksidasyon testleri	34
3.6.4 Filtre verimliliği testi	39
4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI	41
4.1 Üretilen Nanolif Filtrelerin Yapısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	41
4.1.1 Nanolif çapı ve SEM-EDS sonuçları	41
4.1.2 FTIR analizi sonuçları	52
4.1.3 Mekanik dayanım testi sonuçları	54
4.2 Üretilen Nanolif Filtrelere Uygulanan Performans Testleri	59

4.2.1	Hava geçirgenliği testi sonuçları.....	59
4.2.2	Su buharı geğişi testi sonuçları	64
4.2.3	Toluen adsorpsiyonu ve oksidasyonu testi sonuçları.....	68
4.2.4	Filtre verimliliği testi sonuçları.....	77
5.	GENEL DEĞERLENDİRME	81
6.	KAYNAKLAR	83
	ÖZGEÇMİŞ.....	89



KISALTMALAR

AA	: Asetik Asit
AK	: Aktif Karbon
AKF	: Aktif Karbon Fiber
ASHRAE:	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers / Amerikan Isıtma Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Birliği
CEN	: Avrupa Standartlar Komitesi
DB	: Değerlik Bandı
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
DMF	: Dimetil Formamid
EPA	: Environmental Protection Agency / Çevre Koruma Ajansı
FA	: Formik Asit
FTIR	: Fourier-transform kızılötesi spektroskopisi
GAK	: Granüler Aktif Karbon
GC-MS	: Gaz Kromatografisi-Kütle Spektrometresi
HBS	: Hasta Bina Sendromu
ISO	: International Organization for Standardization / Uluslararası Standardizasyon Örgütü
İB	: İletim Bandı
KNT	: Karbon nanotüp
PA6	: Poliamit 6
PAH	: Polisiklik aromatik hidrokarbonlar
PAN	: Poliakrilonitril
PM	: Partikül Madde
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SNF	: Selüloz Nanofiber
SNK	: Selüloz Nanokristal
TUOB	: Toplam Uçucu Organik Bileşik
UOB	: Uçucu Organik Bileşik

WHO : Dünya Sağlık Örgütü
YUOB : Yarı Uçucu Organik Bileşik



SEMBOLLER

CdS	: Kadmiyum sülfür
CO	: Karbon monooksit
CO₂	: Karbondioksit
d_{pore}	: Por çapı
NO_x	: Azot oksitler
-OH	: Hidroksil
PM_{2.5}	: 2,5 mikron ve daha küçük partikül madde
S/N	: Signal/Noise – Sinyal/Gürültü
SiO₂	: Silisyum dioksit
TiO₂	: Titanyum dioksit
WO₃	: Tungsten trioksit
ZnO	: Çinko oksit



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çeşitli ülkelerde yapılmış UOB ölçüm çalışma sonuçları (Babaroğlu, 2015).	9
Çizelge 2.2 : Fotokatalitik oksidasyon yöntemi ve farklı fotokatalizörler ile yapılmış UOB'lerin giderim çalışmaları.	16
Çizelge 3.1 : Deneylerde kullanılan kimyasalların marka ve kodları.	21
Çizelge 3.2 : PAN, SNK ve TiO ₂ /ZnO ile üretilen nanolif filtrelerin set düzeni ve içerikleri.	25
Çizelge 3.3 : PA6 ve SNK ile üretilen nanolif filtrelerin set düzeni ve içerikleri.	27
Çizelge 3.4 : PA6, SNK ve TiO ₂ ile üretilen nanolif filtrelerin set düzeni ve içerikleri.	28
Çizelge 4.1 : SNK-PAN nanoliflerine ait nanolif çapı değerleri.	42
Çizelge 4.2 : SEM-EDS analizleri gerçekleştirilen nanoliflerin kompozisyonu ve analiz edilen bileşenler.	44
Çizelge 4.3 : PA6-SNK nanoliflerine ait nanolif çapı değerleri.	46
Çizelge 4.4 : PA6-SNK-TiO ₂ nanoliflerine ait nanolif çapı değerleri.	49
Çizelge 4.5 : SEM-EDS analizleri gerçekleştirilen nanoliflerin kompozisyonu ve analiz edilen bileşenler.	51
Çizelge 4.6 : SNK, TiO ₂ ve ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve mekanik dayanım değerleri.	56
Çizelge 4.7 : SNK katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve mekanik dayanım değerleri.	57
Çizelge 4.8 : SNK ve TiO ₂ katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve mekanik dayanım değerleri.	59
Çizelge 4.9 : SNK-TiO ₂ ve SNK-ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.	60
Çizelge 4.10 : SNK katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.	62
Çizelge 4.11 : SNK ve TiO ₂ katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.	63
Çizelge 4.12 : SNK-TiO ₂ ve SNK-ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve su buharı geçişi değerleri.	65
Çizelge 4.13 : SNK katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve su buharı geçişi değerleri.	66
Çizelge 4.14 : SNK ve TiO ₂ katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.	67
Çizelge 4.15 : PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları, adsorpsiyon ve oksidasyon verimleri.	69

Çizelge 4.16 : SNK ve TiO ₂ katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve adsorpsiyon verimleri.	73
Çizelge 4.17 : EN779:2012 standardına göre filtre sınıflandırması.	77
Çizelge 4.18 : SNK, TiO ₂ ve ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve filtre verimliliği sonuçları.....	78
Çizelge 4.19 : Yüksek verimli filtrelerle ait hedef değerleri (EN1822-1).	79
Çizelge 4.20 : SNK-TiO ₂ nanokatıılı PA6 nanolif setine ait filtre verimliliği testi sonuçları.	80
Çizelge 5.1 : Üretilen nanoliflere ait yapısal analiz ve performans testi sonuçları. ..	81



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : İç ortamda UOB giderim mekanizması.....	3
Şekil 1.2 : Tezin sistematığı.....	4
Şekil 2.1 : Ortak iç mekan UOB'leri ve kaynakları (Stefanov, 2015).	8
Şekil 2.2 : UOB örneklemede kullanılan cihaz ve malzemeler; Pompa (a), Kalibratör (b), Aktif karbon tüpleri (c).	10
Şekil 2.3 : Nanolif filtre ile UOB adsorpsiyonunun temel prensibi.	13
Şekil 2.4 : Elektroeğirme düzeneği.....	17
Şekil 2.5 : Uygulanan elektrik alanın Taylor koni oluşumuna etkisi (Bhattarai vd., 2019).	20
Şekil 3.1 : Minitab 16 Yazılımı (a), örnek Taguchi S/N ana etki grafiği (b).....	22
Şekil 3.2 : Saf PAN polimer çözeltisi (a), SNK-TiO ₂ nanokatıllı PAN polimer çözeltileri (b) ve SNK-ZnO nanokatıllı PAN polimer çözeltileri (c). .	26
Şekil 3.4 : Saf PA6 polimer çözeltisi (a), SNK-TiO ₂ nanokatıllı PA6 polimer çözeltileri (b).....	28
Şekil 3.5 : Elektroeğirme çalışma prensibi (a), elektroeğirme cihazı (b).	29
Şekil 3.6 : SEM Cihazı (a), örnek SEM görüntüsü (b), Image J yazılım görüntüsü (c), örnek nanolif çapı dağılım grafiği (d).	30
Şekil 3.7 : Perkin Elmer Spectrum 100 spektrofotometre cihazı (a), fonksiyonel grup spektrumları (b).....	31
Şekil 3.8 : Instron 3345 Çekme-Basma Cihazı (a), Gerilme-Uzama eğrisi (b).	32
Şekil 3.9 : Hava Geçirgenliği cihazı.	33
Şekil 3.10 : Su buharı geçişi test ekipmanı.....	34
Şekil 3.11 : Filtrasyon düzeneği-1'e ait tolüen kalibrasyon grafiği.....	35
Şekil 3.12 : Filtrasyon düzeneği-1.	35
Şekil 3.13 : Filtrasyon düzeneği-2'e ait tolüen kalibrasyon grafiği.....	36
Şekil 3.14 : 1 µL tolüen enjeksiyonu ln(C ₀ /C) grafiği.....	37
Şekil 3.15 : Filtrasyon düzeneği-2.	38
Şekil 3.16 : GC-MS cihazı.....	38
Şekil 3.17 : Filtre verimliliği örnek test raporu.	40
Şekil 4.1 : SNK-PAN nanoliflerine ait nanolif çapı dağılımları ve SEM görüntüsü (a) ve Taguchi S/N ana etki grafiği SNK-TiO ₂ (b), SNK-ZnO (c).....	44
Şekil 4.2 : PAN nanoliflerine ait SEM-EDS grafiği.....	45
Şekil 4.3 : PA6-SNK nanoliflerine ait nanolif çapı Taguchi S/N ana etki grafiği.....	47
Şekil 4.4 : PA6-SNK nanoliflerine ait nanolif çapı dağılımları ve SEM görüntüsü.	48
Şekil 4.5 : PA6-SNK-TiO ₂ nanoliflerine ait nanolif çapı dağılımları ve SEM görüntüsü (a) ve Taguchi S/N ana etki grafiği (b).	50
Şekil 4.6 : PA6 nanoliflerine ait SEM-EDS grafiği.....	51
Şekil 4.7 : Saf PAN, TiO ₂ ve SNK-TiO ₂ nanokatıllı PAN nanoliflere ait FTIR spektrumları.	52

Şekil 4.8 : Saf PAN, ZnO ve SNK-ZnO nanokatlı PAN nanoliflere ait FTIR spektrumları.	53
Şekil 4.9 : Saf PA6, TiO ₂ ve SNK-TiO ₂ nanokatlı PA6 nanoliflere ait FTIR spektrumları.	53
Şekil 4.10 : PAN nanoliflerine ait Stress-Strain grafiğı, (a) PAN+SNK+TiO ₂ (b) PAN+SNK+ZnO.	55
Şekil 4.11 : SNK katlı PA6 nanoliflerine ait Stress-Strain grafiğı.	57
Şekil 4.12 : SNK-TiO ₂ katlı PA6 nanoliflerine ait Stress-Strain grafiğı.	58
Şekil 4.13 : PAN nanoliflerinin hava geçirgenliğı değerlerine ait Taguchi S/N ana etki grafiğı, (a) SNK-TiO ₂ , (a) SNK-ZnO.	61
Şekil 4.14 : SNK katlı PA6 nanoliflerine ait hava geçirgenliğı değerlerinin Taguchi S/N ana etki grafiğı.	62
Şekil 4.15 : SNK-TiO ₂ katlı PA6 nanoliflerine ait hava geçirgenliğı değerlerinin Taguchi S/N ana etki grafiğı.	64
Şekil 4.16 : PAN nanoliflerinin su buharı geğışi değerlerine ait Taguchi S/N ana etki grafiğı, (a) SNK-TiO ₂ , (a) SNK-ZnO.	66
Şekil 4.17 : SNK nanokatlı PA6 nanoliflere ait su buharı geğışi Taguchi S/N ana etki grafiğı.	67
Şekil 4.18 : SNK-TiO ₂ nanokatlı PA6 nanoliflere ait su buharı geğışi Taguchi S/N ana etki grafiğı.	68
Şekil 4.19 : PAN nanoliflerin zamana bağı adsorpsiyon grafikleri (lnC ₀ /C-zaman) (a) PAN+TiO ₂ nanolifler, (b) PAN+SNK+TiO ₂ nanolifler, (c) PAN+ZnO nanolifler, (d) PAN+SNK+ZnO nanolifler.	70
Şekil 4.20 : PA6 nanoliflerin zamana bağı adsorpsiyon grafikleri (lnC/C ₀ -Zaman) (a) %13 polimer oranında SNK-PA6 nanolifleri, (b) %17 polimer oranında SNK-PA6 nanolifleri.	71
Şekil 4.21 : PA6 nanoliflerin zamana bağı adsorpsiyon grafikleri (lnC ₀ /C-Zaman) (a) PA6+TiO ₂ nanolifler, (b) PA6+SNK+TiO ₂ nanolifler.	72
Şekil 4.22 : PAN-SNK nanoliflerin zamana bağı oksidasyon grafikleri, PAN-TiO ₂ (a), PAN-SNK-TiO ₂ (b).	74
Şekil 4.23 : PAN-SNK nanoliflerin zamana bağı oksidasyon grafikleri, PAN-ZnO (a), PAN-SNK-ZnO (b).	75
Şekil 4.24 : PA6-SNK nanoliflerin zamana bağı oksidasyon grafikleri, PA6-TiO ₂ (a), PA6-SNK-TiO ₂ (b).	76
Şekil 4.25 : Tez kapsamında nanolifler hakkında elde edilen bulgular ve nedenleri.	82

SELÜLOZ NANOKRİSTAL VE FOTOKATALİZÖR KATKISIYLA ÜRETİLEN NANOLİF HAVA FİLTRELER İLE İÇ ORTAM HAVASINDA BULUNAN UÇUCU ORGANİK BİLEŞİKLERİN GİDERİMİ

ÖZET

İnsanlar günlük hayatın büyük çoğunluğunu (%80- 90'ını) konut, işyeri ve okul gibi binalar ve uzun yol taşıma araçları (otobüs, uçak, tren vb.) gibi kapalı iç ortam havasında geçirmektedir. Bu nedenle, iç ortam havası, en az dış hava kalitesi kadar, insan sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İç ortam hava kalitesi, dış havanın girişinin kontrol edildiği ve iç hava sirkülasyonunun uygulandığı yapılardaki hava kalitesi olarak tanımlanabilmektedir. Sanayinin gelişmesi ile sıcaklık kayıplarını önlemek için yeni binalarda dış havaya karşı daha fazla izole edilmeye başlanmış, iç ortamdaki hava değişimindeki azalma iç havanın kalitesinin dış havadan daha kötü hale gelmesine yol açmıştır. Son yıllarda, iç ortam hava kalitesi ile ilgili yapılan çalışmalarda bazı parametrelerden kaynaklı olarak o hacimde zamanını geçiren insanlarda kısa ve uzun vadeli sağlık sorunlarının olduğu tespit edilmiştir. Özellikle kronikleşen bazı hastalık belirtilerinin iç ortam havası ile birebir bağlantılı olduğu belirlenmiş ve bu sağlık sorunları “Hasta Bina Sendromu” terimi altında toplanmıştır. Kötü iç hava kalitesi olan binalarda uzun süre kalan kişiler, kirletici kaynakların yoğunluğuna bağlı olarak etkilenebilmektedir. Çeşitli sağlık sorunlarına neden olan bu yapılara “hasta binalar” denir. Hasta bina sendromunun yaygın belirtileri; göz, burun ve boğazda tahriş, baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı, kusma, fiziksel ve zihinsel yorgunluk, hafıza kaybı, konsantrasyon eksikliği, deride gözlenen tahriş, kızarıklık, ağrı, kaşıntı ve kuruluk olabilmektedir. Hasta bina sendromuna neden olan iç ortam kirleticilerinden biri olan Uçucu Organik Bileşikler (UOB) konsantrasyonları düşük olmasına rağmen (ppb değerlerinde) uzun süreli maruziyet kronik eğilime sebep olmaktadır. Tezin konusu; iç ortam havasında bulunan ve hasta bina sendromunun temel nedenlerinden olan UOB’lerin adsorpsiyon ve oksidasyon mekanizmalarıyla yenilikçi kompozit nanolif filtre malzemeleri ile gideriminin incelenmesidir. Kompozit nanolif filtrelerin üretiminde elektroçürme yöntemi kullanılmış ve farklı polimerler (poliamid6-PA6 ve poliakrilonitril-PAN), adsorpsiyonu sağlayan nanoadsorbent olarak selüloz nanokristal (SNK) ve oksidasyonu gerçekleştiren farklı nanofotokatalizörler (TiO₂ ve ZnO) kullanılarak farklı içerikte nanofil hava filtreleri geliştirilmiştir. Tez kapsamında, hazırlanan kompozit nanolif filtrelerin üretimi, karakterizasyonu, performans testleri ve filtre tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tezin önemi, literatürde kısıtlı çalışma alanına sahip olmuş ve genelde izleme çalışmalarına rastlanılan ama insan sağlığı için çok fazla öneme sahip olan iç ortam kirleticilerinin giderilmesi için filtrasyon teknolojilerinin uygulanabilirliğinin ayrıntılı incelenmesi, filtre malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin kirletici maddeye özel geliştirmesi, bu aşamaların bir deneysel sistematik içerisinde kurgulanması ve yönetilmesidir. Neticede adsorpsiyon+fotokatalitik oksidasyon mekanizmalarının eş zamanlı olarak filtrasyon teknolojisinde uygulanması, UOB gideriminin sağlanması ve filtre malzemesinin günlük hayatta kullanılabilecek düzeyde ticari bir ürüne dönüşme potansiyelinin incelenmesidir.



REMOVAL OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS FROM INDOOR AIR WITH NANOFIBER AIR FILTER PRODUCED WITH CELLULOSE NANOCRYSTAL AND PHOTOCATALYST ADDITIVES

SUMMARY

People spend most of their daily life (80-90%) in buildings such as houses, workplaces and schools, and long-distance transport vehicles (buses, planes, trains, etc.). Therefore, indoor air has an important impact on human health as much as outdoor air quality. Indoor air quality can be defined as the air quality in buildings where the intake of external air is controlled and where internal air circulation is applied. With the development of the industry, new buildings are more isolated against the outside air in order to prevent heat losses, and the decrease in indoor air exchange causes deterioration of indoor air quality. In recent studies on indoor air quality, it has been determined that people who spend their time in that volume have short and long-term health problems due to some parameters. It has been determined that some chronic disease symptoms are directly related to indoor air and these health problems are gathered under the term "Sick Building Syndrome". People staying in buildings with poor indoor air quality for a long time may be affected depending on the intensity of the pollutant sources. These structures, which cause various health problems, are called "sick buildings". Common symptoms of sick building syndrome can be observed; irritation of the eyes, nose and throat, headache, dizziness, nausea, vomiting, physical and mental fatigue, memory loss, lack of concentration, skin irritation, redness, pain, itching and dryness.

Although volatile organic compounds (VOC) concentrations, one of the indoor pollutants, are low (in ppb values), it causes a chronic tendency in long-term exposure. In general, three methods are recommended for removing VOC and similar pollutants; these are source control, ventilation and the use of air cleaners (Lee et al., 2002; Li et al., 2001); however, these methods have some disadvantages. Source control is difficult to achieve in many places. Increasing ventilation can carry more pollutants from the outside environment (Jones, 1999). VOCs are different from each other in terms of size and volatility. These unique physical and chemical properties of the compounds gain importance in the selection of the removal method (Kadam et al., 2018).

The subject of the thesis is to examine the removal of VOCs in the indoor air with innovative composite nanofiber filter materials by simultaneous adsorption and oxidation mechanisms. Adsorption takes place by physically capturing the VOC vapor in the air with adsorbents. Therefore, the specific surface area and pore volume of the adsorbent are crucial properties for a smooth and sustainable adsorption process. In the studies, VOCs in indoor environment are given as total volatile organic compounds (TVOC) values. As a result of the measurements made in 179 houses, it was observed

that TVOC values ranged between 200-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Berry et al., 1996). The concentration of VOCs is very low in indoor air, so it is difficult to adsorb indoor air pollutants in the air stream on conventional adsorbents. As examined in recent studies, contaminated air can exit the system without interacting with the adsorbent in the commonly used fixed bed column adsorption, and polymer nanofiber materials can be used instead to prevent this situation (Khajeh et al., 2013). Nanofiber materials having irregular pores, fiber structure, and high surface area increase the possibility of interaction with VOCs. In order to increase the interaction between low-concentration pollutants and the adsorbent, adsorption processes are carried out with nano-sized materials instead of micro-sized adsorbents. Cellulose nanocrystals (CNCs) were used to increase surface area and improve adsorption in nanofiber materials produced within the scope of this thesis.

Cellulose nanocrystals (CNCs) are rigid rod-like particles composed of crystalline cellulose chain segments. Compared to cellulose with larger amorphous fractions, these nanocrystals exhibit high specific strength, high surface area and unique liquid crystal properties (George & Sabapathi, 2015; Lu et al., 2014). Since CNCs increase the adsorption performance with their high active surface area that interacts with pollutants, they enable to produce low cost and energy efficient composite filters. In some studies, CNC is used as a nano adsorbent for VOC adsorption in nanofiber structures.

Photocatalytic oxidation is a process used for air purification in recent years and it is an oxidation method in which organic pollutants are effectively removed in the presence of UV light and semiconductor photocatalyst. Some metal oxide semiconductors such as titanium dioxide (TiO_2), zinc oxide (ZnO), tungsten trioxide (WO_3) and cadmium sulfide (CdS) are used as photocatalysts in the photocatalytic oxidation reaction. The most commonly used are TiO_2 and ZnO . In a study in which the photocatalytic activity of many metal oxides in the gas phase was measured, it was stated that the order of efficiency in the degradation of hydrocarbons was TiO_2 (anatase) > ZnO > WO_3 (Ollis, 2000). Among these, TiO_2 is widely used due to its many advantageous properties; it is cheap, reliable, has high stability and photocatalytic efficiency and can provide the oxidation of indoor pollutants even at normal ambient temperature and does not require chemical additives (Yu & Brouwers, 2009).

Electrospinning method is used to produce nanofiber filters with different content. Nanofiber air filters with different content have been developed by using different polymers (polyamide6-PA6 and polyacrylonitrile-PAN), cellulose nanocrystal (CNC) as the nanoadsorbent providing adsorption, and different nanophotocatalysts (TiO_2 and ZnO) that perform the oxidation.

Within the scope of the thesis, the production, characterization, performance tests and filter design studies of the prepared composite nanofiber filters were carried out. The importance of the thesis is the detailed examination of the applicability of filtration technologies for the removal of indoor pollutants, determination of filter material properties and the development of these properties specific to indoor pollutants which are very important for human health and have limited field of study in the literature. As a result, the simultaneous application of adsorption + photocatalytic oxidation mechanisms in filtration technology, providing VOC removal and examining the

potential of the filter material to turn into a commercial product that can be used in daily life.

The results of the structural analysis and performance test applied to nanofiber filters produced within the scope of the thesis are shown in Table 5.1. Structural analysis results of nanofiber filters produced with different polymers and different nanoadditive rates are compatible with the literature. Results of performance tests are also compatible with the literature. The adsorption efficiency of nanofiber filters varies 20 - 50%. Generally, nanofiber filters produced with PAN polymer have higher efficiency than nanofiber filters produced with PA6 polymer. Considering all the results, innovative nanofiber filter materials that are produced with sustainable materials have an important potential in improving indoor air quality.

Table 5.1: Structural analysis and performance test results of fabricated nanofibers.

		P1/N1/F1	P1/N1/F2	P2-13/N/F1	P2-17/N/F1	P2/N1/F1
Structural Analysis	Nanofiber Diameter (nm)	305.6 ± 43.4 – 430.8 ± 61.9	305.6 ± 43.4 – 456.9 ± 83.9	62.55 ± 7.5 – 74.0 ± 12.6	105.4 ± 19.9 – 131.0 ± 26.1	143.3 ± 20.5 – 198.1 ± 35.5
	Tensile Strength	0.34 ± 0.07 – 2.34 ± 0.24	1.30 ± 0.09 – 3.61 ± 0.87	1.28 – 5.89	3.75 – 5.23	2.49 ± 0.49 – 7.90 ± 2.43
	Elasticity Modulus	4.42 ± 1.08 – 24.84 ± 1.07	14.97 ± 1.51 – 42.08 ± 6.31	49.52 – 136.93	61.66 – 112.22	17.52 ± 1.03 – 36.55 ± 1.13
	Air Permeability (mm/sn)	66.5 ± 16.4 – 140.5 ± 8.4	68.7 ± 4.2 – 140.5 ± 8.4	25.60 ± 1.03 – 34.60 ± 5.35	28.72 ± 1.64 – 35.44 ± 1.68	11.4 ± 0.8 – 24.8 ± 1.5
Performance Tests	Water Vapor Transmission (g/m ² /sa)	217.9 – 258.9	189.5 – 258.9	123.15 – 506.30	97.89 – 157.90	85.26 – 121.57
	Toluene Adsorption (%)	34.8 – 48.6	39.9 – 48.6	20 - 50	20 - 50	20.0 – 39.4
	Toluene Oxidation (%)	0.2 – 5.4	0.3 – 2.6	-	-	0.9 – 5.6
	Particle Filtration Efficiency (%)	63.8 – 83.4	57.3 – 82.0	-	-	99.9614-99.9992
	Pressure Drop (kPa)	0.109 – 0.178	0.097 -0.182	-	-	0.801 – 1.623



1. GİRİŞ

İnsanlar günlük hayatın büyük çoğunluğunu (%80- 90'ını) konut, işyeri ve okul gibi binalar ve uzun yol taşıma araçları (otobüs, uçak, tren vb.) gibi kapalı iç ortam havasında geçirmektedir. Bu nedenle, iç ortam havası, en az dış hava kalitesi kadar, insan sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İç ortam hava kalitesi, dış havanın girişinin kontrol edildiği ve iç hava sirkülasyonunun uygulandığı yapılardaki hava kalitesi olarak tanımlanabilmektedir. Havalandırma, hijyen ve sanitasyon ekipmanlarının eksikliği/yetersizliği ile oluşan toz parçacıklarının varlığı/muhtevası, nem içeriğindeki bozulmalar, küf oluşum potansiyeli, iç ortam sıcaklığındaki dengesizlikler, uçucu organik bileşiklerin (UOB) varlığı/miktarı iç ortam havasının kalitesini bozan parametreleri ifade etmektedir (Sarigiannis vd., 2018).

İç ortam hava kalitesinin insan sağlığı ile ilişkisinin incelendiği çalışmalarda, çok iyi izole edilmiş, havalandırılmayan alanlarda alerji yapan maddelerin miktarının izole edilmeyen yerlere göre %200'den daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı çalışmada Amerika'da bulunan evlerin %60'ının iç ortam havası açısından tehlikeli olduğu ve dış ortamdaki kirletici miktarının 2 ila 5 katının iç ortam havasında bulunduğu gözlenmiştir. Bu kirletici düzeylerinden dolayı 20 yılda astım vakalarının %160 arttığı da belirtilmiştir (USA EPA, 2003).

Son yıllarda, iç ortam hava kalitesi ile ilgili yapılan çalışmalarda bazı parametrelerden kaynaklı olarak o hacimde zamanını geçiren insanlarda kısa ve uzun vadeli sağlık sorunlarının olduğu tespit edilmiştir. Özellikle kronikleşen bazı hastalık belirtilerinin iç ortam havası ile birebir bağlantılı olduğu belirlenmiş ve bu sağlık sorunları "Hasta Bina Sendromu" terimi altında toplanmıştır. Hasta bina sendromu (HBS) terimi, üst solunum yolu tahriş edici semptomlar, baş ağrıları, yorgunluk ve deri döküntüleri gibi spesifik olmayan şikayetleri ifade eder ve bu belirtiler genellikle iç ortam havasında bulunulduğu sürece devam etmektedir (Ross vd., 1997; Norback & Edling, 1991).

Hasta bina sendromunu azaltıcı veya önleyici faaliyetler altında iç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesi için birçok teknoloji geliştirmektedir. Özellikle iç ortam hava kalitesini arttırmada filtrasyon teknolojilerinin uygulanabilirliği ve farklı filtre malzemelerinin kirleticiye özel geliştirilmesi bu tezin temel amacını oluşturmaktadır. Tezin konusu; iç ortam havasında bulunan ve hasta bina sendromunun temel nedenlerinden olan UOB'lerin adsorpsiyon ve oksidasyon mekanizmalarıyla yenilikçi kompozit nanolif filtre malzemeleri ile gideriminin incelenmesidir. Kompozit nanolif

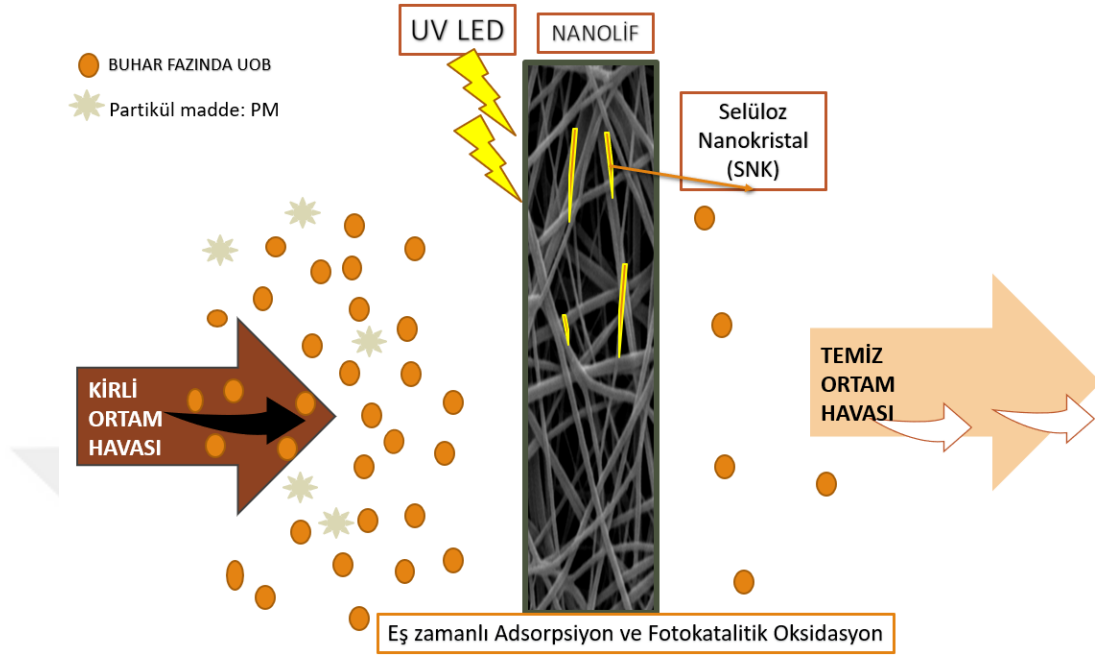
filtrelerin üretiminde elektroegirme yöntemi kullanılmış ve farklı polimerler (poliamid6-PA6 ve poliakrilonitril-PAN), adsorpsiyonu sağlayan nanoadsorbent olarak selüloz nanokristal (SNK) ve oksidasyonu gerçekleştiren farklı nanofotokatalizörler (TiO_2 ve ZnO) kullanılarak farklı içerikte nanofil hava filtreleri geliştirilmiştir. Tez kapsamında, hazırlanan kompozit nanolif filtrelerin üretimi, karakterizasyonu, performans testleri ve filtre tasarımı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tezin özgün değeri, iç ortam havasını iyileştirme için kullanılan filtrasyon teknolojilerinin ana bileşeni olan filtrenin sürdürülebilir ve yüksek performanslı malzemeler ile üretimi, bunun için daha önce kullanılmamış malzemeler ve yöntemler ile deneysel sistematğin oluşturulması ve neticede yüksek adsorpsiyon kapasitesine, hava geçirgenliğine, fotokatalitik oksidasyon özelliğine ve yüksek mekanik dayanıma sahip kompozit nanolif filtrelerin geliştirilmesi ve UOB gideriminde uzun süreli olarak kullanılmasıdır.

1.1 Tezin Amacı ve Önemi

UOB'lerin iç ortam havasından giderilmesi hakkında yapılan literatür çalışmalarında, yaşam süremizin büyük çoğunluğunu geçirdiğimiz iç ortam havasının iyileşmesi ve iç ortam hava kirleticilerinin giderilmesi için herhangi bir toksik yan ürüne neden olmayan, verimliliği yüksek ve sürdürülebilir malzemelere ihtiyaç olduğu görülmektedir. Tezin amacı, iç ortam havasında düşük konsantrasyonda bulunan ama sağlığa etkileri çok yüksek olan UOB'lerin giderimi için eş zamanlı adsorpsiyon ve fotokatalitik oksidasyon prosesini yönetmek ve bunu filtrasyon teknolojisi ile birleştirmek, bu yöntem ile UOB'leri hedef değerlere indirmek ve bu giderimi sağlayacak filtreleri yenilikçi yöntemler ve malzemeler ile geliştirmektir. Tez kapsamında üretilen nanolif filtrelerin iç ortam havasında UOB'in giderim mekanizması Şekil 1.1'de verilmiştir.

Tezin önemi, literatürde kısıtlı çalışma alanına sahip olmuş ve genelde izleme çalışmalarına rastladığımız ama insan sağlığı için çok fazla öneme sahip olan iç ortam kirleticilerinin giderilmesi için filtrasyon teknolojilerinin uygulanabilirliğinin ayrıntılı incelenmesi, filtre malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin kirletici maddeye özel geliştirmesi, bu aşamaların bir deneysel sistematik içerisinde kurgulanması ve yönetilmesi, neticede adsorpsiyon+fotokatalitik oksidasyon mekanizmalarının eş zamanlı olarak filtrasyon teknolojisinde uygulanması, UOB

gideriminin sağlanması ve filtre malzemesinin günlük hayatta kullanılabilecek düzeyde ticari bir ürüne dönüşme potansiyelinin incelenmesidir.



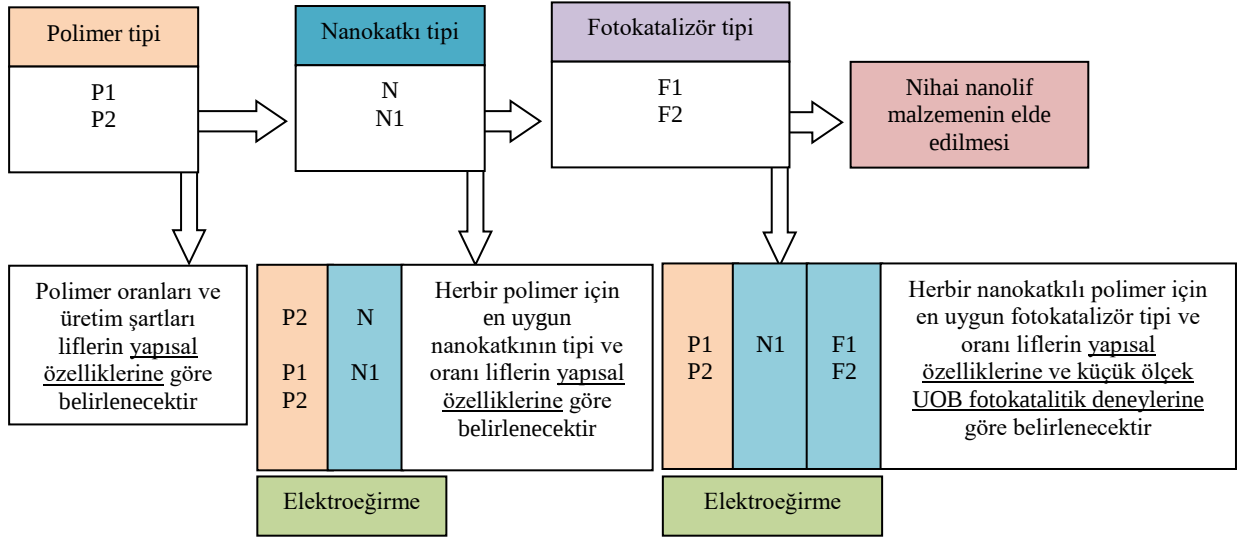
Şekil 1.1 : İç ortamda UOB giderim mekanizması.

1.2 Tezin Kapsamı

Tez kapsamında, üretilen kompozit nanolif filtrelerin değişkenleri Şekil 1.2’de verilmiştir. Bu tez ile UOB’lerin giderimi için adsorpsiyon ve fotokatalitik oksidasyonun aynı ortamda gerçekleşeceği bir malzemenin geliştirilerek bunun modüler bir filtre sisteminde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Tez kapsamında, elektroegirme yöntemiyle maliyeti düşük selüloz nanokristal (SNK) ve fotokatalizörler (TiO_2/ZnO) katkıların kullanılmış ve bu malzemelerin ana polimerler ile (poliakrilonitril-PAN, poliamid-PA) olan ilişkisinin deneysel matris içerisinde incelenerek böylece en iyi polimer+nanokatki seçimi yapılmıştır.

Nihai nanolif filtresini elde etmek için üretilen nanolif filtrelerin yapısal özellikleri ve performans testi sonuçları değerlendirilmiştir. Yapısal özellikler ayrıca nanolif üretimi şartlarının belirlenmesinde rol almıştır.



Şekil 1.2 : Tezin sistematığı.

2. LİTERATÜR

2.1 İç Ortam Hava Kalitesi ve Standartları

İç ortam hava kalitesi, dış havanın girişinin kontrol edildiği ve iç hava sirkülasyonunun uygulandığı yapılardaki hava kalitesi olarak tanımlanabilir. Sanayinin gelişmesi ile sıcaklık kayıplarını önlemek için yeni binalarda dış havaya karşı daha fazla izole edilmeye başlanmış, iç ortamdaki hava değişimindeki azalma iç havanın kalitesinin dış havadan daha kötü hale gelmesine yol açmıştır. Bu konuda yapılan çalışmalarda, düşük iç hava kalitesinin çeşitli solunum yolu hastalıklarına (ör. astım), alerjik hastalıklara (ör. aşırı duyarlı pnömoni) ve kansere neden olabileceği belirtilmektedir (Simoni vd., 2002; Payne-Sturges vd., 2004; Habil, vd., 2015).

Hasta bina sendromunun (HBS) kapsamı, zayıf iç hava kalitesi nedeniyle meydana gelen olumsuz sağlık sorunlarını kapsamaktadır. HBS, nedenleri veya kaynaklar henüz tam olarak doğrulanmadığı için sendrom olarak adlandırılır. Kötü iç hava kalitesi olan binalarda uzun süre kalan kişiler, kirletici kaynakların yoğunluğuna bağlı olarak çeşitli semptomlardan etkilenebilir. Sorun yaratan bu yapılara “hasta binalar” denir. HBS'nin iç mekanlarda geniş bir yelpazede kişisel semptomlara neden olduğu varsayılmaktadır (Mentese vd., 2020). Hasta bina sendromunun yaygın belirtileri;

- Göz, burun ve boğazda tahriş
- Baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı, kusma
- Fiziksel ve zihinsel yorgunluk, hafıza kaybı, konsantrasyon eksikliği
- Deride gözlenen tahriş, kızarıklık, ağrı, kaşıntı ve kuruluk
- Nedeni belli olmayan aşırı duyarlılık reaksiyonları
- Koku ve tat duyusunda değişiklikler

HBS tek bir faktörden veya birden fazla faktörün kombinasyonundan kaynaklanabilmektedir. Bu faktörler yetersiz havalandırma, uygun olmayan nem, ışık, ve sıcaklık değerleri, iç mekanlarda bulunabilen kimyasal kirleticiler ve dış havada bulunabilen kimyasal ve biyolojik kirleticilerdir (Dünya Sağlık örgütü (WHO), 1989). Konut ortamlarında izlenen en yaygın iç mekan hava kirleticileri partikül madde (PM), formaldehit, uçucu organik bileşikler (UOB), yarı uçucu organik bileşikler (YUOB), karbondioksit (CO₂) ve özellikle ısıtma / pişirme amacıyla kullanılan katı yakıtlı evlerde ise karbon monoksittir (CO) (Mentese vd., 2020). İç ortam hava kalitesinin

iyileştirilmesi, insan sağlığının korunmasına ve hastalıkların neden olduğu iş kaybının azaltılmasına ve tıbbi tedavilerin neden olduğu ekonomik kayıpların önlenmesine yardımcı olmaktadır.

Çok çeşitli iç mekan kirleticileri arasında Uçucu Organik Bileşikler (UOB), birçok farklı ortamda bulunabilmeleri ve insan sağlığı üzerinde kanıtlanmış olumsuz etkileri nedeniyle en çok çalışılan bileşendir (Wolkoff & Nielsen, 2001).

İç ortamda UOB konsantrasyonları düşük olmasına rağmen (ppb değerlerinde) uzun süreli maruziyet kronik eğilime sebep olmaktadır. UOB'lere uzun süreli maruz kalma, cilt tahrişine, baş dönmesine ve yorgunluğun yanı sıra akciğer fonksiyonunda hasara yol açabilmektedir (Yoon vd., 2010).

İç Ortam Hava Kalitesi Standartları

Amerikan Isıtma Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Birliği'nin (ASHRAE) oluşturduğu iç mekan hava kalitesi standartları;

- **ASHRAE 62.1-2019:** Kabul Edilebilir İç Hava Kalitesi için Havalandırma (ASHRAE, 2019)
- **ASHRAE 55-2017:** Yaşam Alanları İçin Isıl Çevresel Şartlar (ASHRAE, 2017)

ASHRAE 62.1-2019 standardı insanların solunum bölgesinde kişi başı gerekli minimum havalandırma miktarlarını tanımlamakta ve bu miktarı belirlerken kişinin bulunduğu ortama bağlı endüstriyel kabuller yapmaktadır. Örneğin kişinin solunum bölgesinde ihtiyacı olan hava miktarı hastane ya da anaokul ortamında farklı değerlere sahip olmaktadır.

ASHRAE 55-2017 standardı ise seçilmiş ortamlarda ayarlanması gereken sıcaklık ve nem için kabul edilir şartlarını sunmaktadır. Bu standartın değerleri genelde duyuşal analiz ile belirlenmektedir

Uluslararası Standardizasyon Örgütü'nün (ISO) genel havalandırma sistemleri için kullanılan hava filtreleri, kirletici miktarlarının analizi ve kaynaklarının azaltılmasına yönelik konuları kapsayan ve UOB'ler özelinde uygulanan bazı standartları mevcuttur. Bunlar;

- **ISO 16890** - Genel Havalandırma için Hava Filtreleri
- **ISO 16000-5: 2007** UOB İçin Örnekleme Stratejisi

- **ISO 16000-9: 2006** Yapı Ürünlerinden Ve Mobilyalardan Kaynaklanan UOB Emisyonunun Belirlenmesi
- **ISO 16000-6: 2011** İç Mekan Ve Test Odası Havasında Uçucu Organik Bileşiklerin Tenax TA Sorbentinde Aktif Örnekleme, Termal Desorpsiyon Ve MS / FID Kullanarak Gaz Kromatografisi İle Belirlenmesi
- **ISO 16000-24: 2018** UOB Konsantrasyonlarının Sorptif Yapı Malzemeleri İle Azalmasının Değerlendirilmesi İçin Performans Testi

EN779 yerine yeni hazırlanan *ISO 16890 Genel Havalandırma için Hava Filtreleri* standardı ile filtre kullanıcılarının ihtiyaçlarına göre filtre tercihleri çok daha hassas yapılabilmektedir. EN779 standartında partikül madde değerlendirmesi sadece 0,4 µm boyutunda yapılırken, ISO 16890 standardı ile partikül maddeler daha hassas bir şekilde 0,3 µm-10 µm arasında değerlendirilebilmektedir.

Ayrıca Avrupa Standartlar Komitesi'nin (CEN) hazırladığı bir standartta şu şekildedir;

- **CR 1752, 2002:** Binaların Havalandırması: İç Ortam için Tasarım Kriterleri

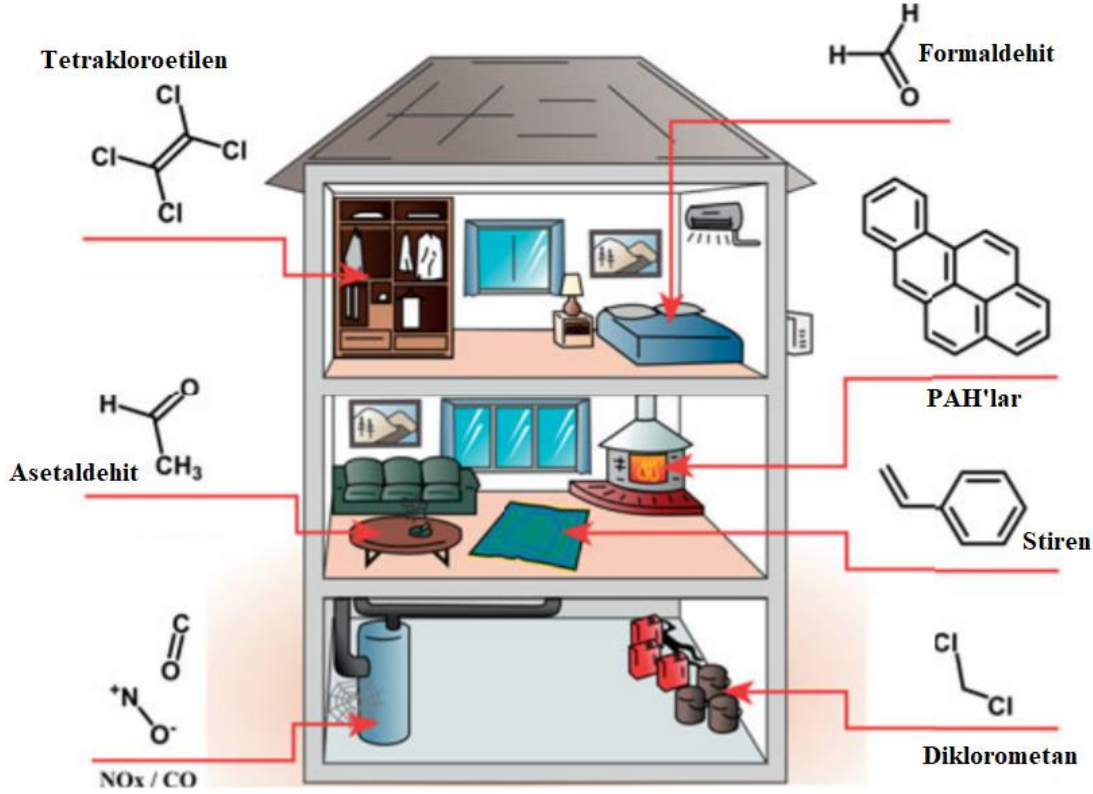
Bu standart, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin tasarımı, işletmeye alınması, çalışması ve kontrolü için bina içi ortamların kalitesine açıklık getiren metotları ve kuralları kapsamaktadır.

2.2 UOB Kaynakları ve Örnekleme Yöntemi

Uçucu organik bileşikler grubu, kaynama noktaları yaklaşık 50°C ile 260°C arasında olan organik bileşikler olarak tanımlanmaktadır (WHO, 1989). Bu aralık, sağlık etkileri açısından değil, örnekleme ve analitik yetenekler nedeniyle belirtilmektedir (Wolkoff vd., 1997). Düşük kaynama noktalarına sahip olmaları nedeniyle UOB'ler sürekli buharlaşma eğilimindedir. UOB'ler iç ortamlarda her yerde bulunmaktadır. Bazı iç ortam UOB'leri, belirli dış mekan inorganik bileşiklerle (örneğin ozon) birlikte açık havada da bulunabilmektedir. İç ortam kirliliğine katkıda bulunan başlıca kaynaklar, insan faaliyetleri, bina ürün emisyonları ve dış havanın sızmasıdır. Yeni veya yenilenmiş binalar için, bina ürünlerinden kaynaklanan birincil uçucu organik bileşik emisyonu (örneğin çözücüler) genellikle birkaç aya kadar bir süre boyunca baskın olmaktadır (Wolkoff & Nielsen, 2001).

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, UOB'ler günlük hayatta sıklıkla karşılaştığımız çeşitli kaynakları olabilmektedir. Örneğin; tetrakloroetilen kuru temizleme işleminde

kullanılan kimyasallardan, asetaldehit sigara dumanından, azot oksitler ve karbon monoksit merkezi ısıtmadan, diklorometilen ev kimyasallarından, stiren sentetik tekstillerden, polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) şöminelerden ve formaldehit mobilya boya ve verniklerinden kaynaklı olarak iç ortam havasında görülebilmektedir.



Şekil 2.1 : Ortak iç mekan UOB'leri ve kaynakları (Stefanov, 2015).

Çizelge 2.1'de çeşitli ülkelerin anaokullarında yapılmış UOB ölçümlerinin değerlendirildiği çalışma sonuçları görülmektedir. Bu çalışmaya göre ülkemizdeki UOB konsantrasyonları çalışmada verilen diğer ülkelere göre oldukça yüksektir. Yapılan araştırmada bileşik bazlı konsantrasyona sahip değil ise iç ortamda bulunan UOB'ler, toplam uçucu organik bileşiklerin (TUOB) değerleri şeklinde verilmiştir. İç ortam hava kalitesinde UOB'lerin sınır değerleri EPA (Çevre Koruma Ajansı) ve WHO (Dünya Sağlık Örgütü) tarafından belirlenmiş olmasına rağmen ülkemizde halen UOB'ler için sınır değer yoktur.

Çizelge 2.1 : Çeşitli ülkelerde yapılmış UOB ölçüm çalışma sonuçları (Babaroğlu, 2015).

Okullar/Bölgeler	Bileşikler	Sonuçlar
		Ortalama derişim ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	Benzen	0,09
64 derslik Michigan	UOB	Toluen 2,8
		α – pinen 1,4
		Limonen 1,4
3 okul, Batı Avusturalya	UOB	10 UOB saptanmış ve maksimum TUOB derişimi $94 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Benzen	0,6
5 derslik, Minnesota	UOB	Etilbenzen 0,6
		Toluen 2,9
		p/m-ksilen 2,3
Avrupada çeşitli okullar	TUOB	100-1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Toluen	3,1
	Benzen	17,7
10 derslik, Hong Kong	UOB	Etilbenzen 4,2
		p/m-ksilen 3,3
		o-ksilen 1,7
96 derslik, İsviçre	UOB	Yaygın UOB'ler; benzen, toluen, ksilenler. Ortalama TUOB derişimi $35,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
6 derslik, İsviçre	UOB	Ortalama TUOB derişimi $70-180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Benzen	7,5
3 okul, Kocaeli/Türkiye	UOB	Toluen 55,1
		Etilbenzen 11,1
		Ksilenler 15,4

İç Ortam Havaında UOB Örneklemesi

UOB ölçümü için öncelikle örnekleme yapılması için pompalar (Şekil 2.2-a), tüpler (Şekil 2.2-c) ve doğrulama yapılması için birinci sınıf bir kalibratör (Şekil 2.2-b) gerekmektedir. Ölçümde kullanılacak aktif karbon tüpleri, kişiye özel maruziyet miktarını ölçmek için kişinin solunum alanına yakın, ortamda ölçüm yapmak için tüpler kaynağa yakın konumlandırılmalıdır. TS ISO 16200 standardına uygun olarak, ölçümler 50-200 ml/dk çekiş hızıyla 10 L'lik hacim örneklenmelidir. Kişisel maruziyet ölçümlerinde ise TS EN 689 kriterleri göz önüne alınarak maruziyetin ¼ kadar sürede örnekleme yapılması gerekmektedir. Örnekleme tamamlandıktan sonra tüplerin ağzı kapatılır ve +4 °C muhafaza edilerek numune kabul birimine analiz için teslim edilmektedir.



Şekil 2.2 : UOB örneklemede kullanılan cihaz ve malzemeler; Pompa (a), Kalibratör (b), Aktif karbon tüpleri (c).

2.3 İç Ortam Havaında UOB Giderimi için Yenilikçi Yöntemler

Genel olarak, UOB ve benzeri kirleticilerin giderilmesinde ve iç ortam hava kalitesini iyileştirmesi için üç yöntem önerilmektedir; bunlar, kaynak kontrolü, havalandırma ve hava temizleyicilerin kullanımıdır (Lee vd., 2002; Li vd., 2001). Bu yöntemlerin bazı dezavantajları vardır. Kaynak kontrolünü pek çok yerde başarmak zordur. Hava değişimini artırmak dış ortamdaki daha fazla kirletici taşıyabilmektedir (Jones, 1999). UOB'ler boyut ve uçuculuk özellikleri bakımından birbirinden farklıdır. Bileşiklerin bu benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri, uzaklaştırma yönteminin seçiminde önem kazanmaktadır (Kadam vd., 2018).

Uçucu organik bileşiklerin giderimini iki temel başlık altında inceleyebiliriz; bunlar bozunma ve uzaklaştırma yöntemleridir. Bozunma yöntemi ile UOB giderimini bio-filtrasyon ve oksidasyon olarak ikiye ayırmaktadır. Bio-filtrasyon, mikroorganizmalar kullanılarak UOB'lerin CO₂ ve biyokütleye dönüştürüldüğü yöntemdir. Bu yöntemin etkinliği hedef UOB'nin parçalanabilirliğine bağlıdır ve yan ürün oluşumuna neden

olabilir (Kalender, 2009). Oksidasyon yöntemi ise termal oksidasyon ve fotokatalitik oksidasyon olarak ayrılmaktadır. Termal oksidasyon yanma sonucu açığa çıkan ısı vasıtasıyla UOB'lerin ekonomik bir şekilde bozunmasını sağlar. Ancak bu yöntem 1000°C'ye yakın işletme sıcaklığına ihtiyaç duyar ve bu işletme sıcaklığı yüksek miktarda NO_x oluşumuna neden olur. Fotokatalitik oksidasyon literatürde UOB giderimi için en çok çalışılan yöntemdir, bu yöntem ile UV ışık varlığında UOB'leri CO₂'ye kadar bozunmaktadır. UOB'lerin uzaklaştırma yöntemi ile giderimine ise absorpsiyon, adsorpsiyon, kondenzasyon ve membran ayırma yöntemleri örnek verilebilir. Bu başlık altındaki en avantajlı yöntem olan adsorpsiyonun temel prensibi kullanılan adsorbent üzerinde hedef kirleticinin fiziksel tutunmasıdır. Diğer bozunma ve uzaklaştırma temelli yöntemlere göre düşük konsantrasyonlardaki başarısı ile öne çıkar. Bu tez kapsamında adsorpsiyon ve fotokatalitik oksidasyon mekanizmalarının eş zamanlı çalışabileceği bir nanolif filtre yapısı üretilmiş ve UOB'lerin giderimi incelenmiştir. Bu sebeple aşağıda özellikle bu iki yöntemin detayları verilmiştir.

Adsorpsiyon

Uçucu organik bileşiklerin giderilmesinde hava temizleyicileri için farklı teknolojiler kullanılsa da literatürde adsorpsiyon işleminin en yaygın ve ideal teknoloji olduğu gözlemlenmiştir. Adsorpsiyon, maliyet etkinliği, kullanım kolaylığı ve düşük enerji kullanımı nedeniyle tercih edilmektedir. Adsorpsiyon prensibi, diğer karmaşık giderme yöntemlerine kıyasla oldukça basittir. Adsorpsiyon, yüksek spesifik yüzey alanına sahip adsorbanlar ile havadaki UOB buharını fiziksel olarak yakalamasıyla gerçekleşir. Bu nedenle, adsorbanın spesifik yüzey alanı ve gözenek hacmi, düzgün ve sürdürülebilir bir adsorpsiyon işlemi için çok önemli özelliklerdir.

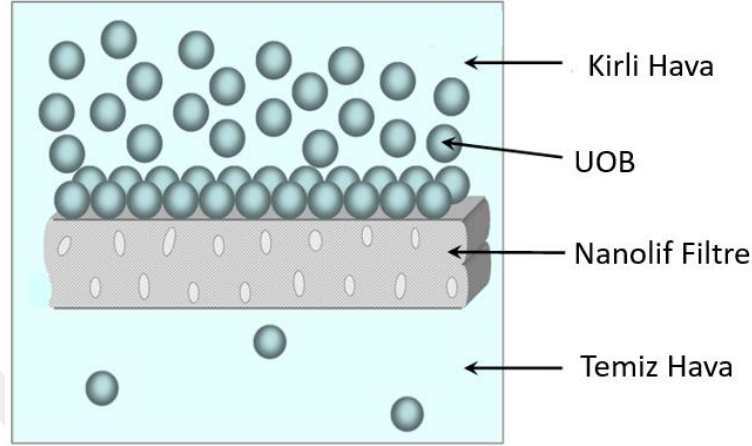
Carter vd. (2011), aktif karbon fiberin (AKF) ve iki granüler aktif karbonun (GAK) adsorpsiyon kapasitelerini farklı spesifik yüzey alanlarıyla karşılaştırmıştır. Daha yüksek spesifik yüzey alanına (1084 m²/g) sahip olan AKF, en iyi adsorpsiyon kapasitesine (422,90 mg/g) ulaşmıştır (Carter vd., 2011). Küçük çaplı mikro gözenekler (AK) ($d_{pore} < 0,7$ nm), daha büyük mikro gözeneklerle (GAK) ($d_{pore} < 2$ nm) karşılaştırıldığında, UOB adsorpsiyonunda daha iyi performans göstermiştir. Bu çalışmada, 34 g benzen/100 g AK ve 64 g toluen/100 g AK adsorpsiyon kapasitelerine ulaşılmıştır. (Lillo-Ródenas vd., 2011). İdeal bir adsorbanın yüksek adsorpsiyon kapasitesi, hidrofobiklik, yüksek termal ve hidrotermal stabilite ve kolay rejenerasyon gibi özelliklere sahip olması beklenmektedir (Yang vd., 2019).

Adsorbanlar temel olarak inorganik, organik ve inorganik-organik hibrit adsorbanlar olarak sınıflandırılabilir. Aktif karbonlar, zeolitler, silika jeller ve killeri gibi inorganik adsorbanlar, UOB giderimi için endüstriyel ölçekli adsorpsiyon işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, aktif karbon (AK), yüksek adsorpsiyon kapasitesi, doğası gereği bol olması ve düşük maliyeti nedeniyle UOBlerin adsorpsiyonu için tercih edilmektedir. Bununla birlikte, aktif karbonun dezavantajı aynı anda su buharını adsorbe etmesinden dolayı UOB'lerin adsorpsiyon kapasitesinin zamanla azalmasıdır (Alcañiz-Monge vd., 2001).

Ayrıca, aktif karbonun büyük mikro gözenekleri UOB moleküllerinin adsorban gözeneklerine difüzyonunu önleyebilmektedir (Kitagawa vd., 2004; Zhang vd., 2017). Aktif karbon gibi geleneksel adsorbanlar, özelliklerinden dolayı UOB adsorpsiyonu için yaygın olarak tercih edilmelerine rağmen, toz veya granüler formları adsorbanın işlenmesini ve yeniden kullanılabilirliğini sınırlar ve aynı zamanda tüm iç mekan hava kirlleticilerine karşı etkili değildir. Öte yandan, elektroegirme yöntemi ile üretilen nanolifler bu kirleticiler için mükemmel bir filtre ortamı sağlamaktadır. Son yıllardaki çalışmalar ve bu tezin konusunu da içeren nanolif filtreler, UOB'leri iyi adsorbe edebilen etkili adsorban materyaller oluşturmak için nanomalzemeler ile modifiye edilebilmektedir (Kadam vd., 2018; Matulevicius vd., 2016; Thavasi vd., 2008).

Yapılan araştırmalarda çoğunlukla iç ortamda bulunan UOB'ler, toplam uçucu organik bileşiklerin (TUOB) değerleri şeklinde verilmiştir. 179 evde yapılan ölçümler sonucunda, TUOB değerlerinin 200-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aralığında seyrettiği görülmüştür (Berry vd., 1996). UOB'lerin konsantrasyonu iç ortam havasında çok düşüktür, bu nedenle, hava akışı içerisinde adsorbana doğru kütle transferi azalmakta ve adsorpsiyon verimi düşmektedir. Yeni çalışmalarda araştırıldığı gibi, özellikle sabit yataklı kolon adsorpsiyonunda gözlemlenen kirli havanın adsorban ile etkileşime girmeden sürüklenmesini önlemek için polimer nanolif malzemeler kullanılabilmektedir (Khajeh vd., 2013). Şekil 2.3'te nanolif yapılarda UOB adsorpsiyonun temel prensibi görülmektedir. Nanolif malzemelerin düzensiz boşluklara ve lif yapısı ile yüksek yüzey alanına sahip olması UOB'ler ile etkileşim olasılığını arttırmaktadır. Son zamanlarda düşük konsantrasyonlu kirleticiler ile yüksek aktif alana sahip adsorban arasındaki etkileşimi arttırmak için mikro boyutlu adsorbanlar yerine nano boyutlu malzemelerle adsorpsiyon işlemleri gerçekleştirilmektedir. Mevcut çalışmalarda, nano adsorbentler, nano-silika, karbon

nanotüp (KNT) ve grafen oksit gibi kompozit nanolif yapıların üretiminde kullanılmaktadır (Choi vd., 2012; Wadhawan vd., 2020). Aşağıda tez kapsamında nanoadsorbent olarak kullanılan selüloz nanokristal (SNK) ile ilgili bilgiler verilmektedir.



Şekil 2.3 : Nanolif filtre ile UOB adsorpsiyonunun temel prensibi.

Selüloz Nanokristal (SNK)

SNK'lar, kristalin selüloz zincir bölümlerinden oluşan sert çubuk benzeri parçacıklardır. Daha büyük amorf fraksiyonlara sahip selüloz ile karşılaştırıldığında, bu nanokristaller yüksek özgül mukavemet, yüksek yüzey alanı ve benzersiz sıvı kristal özellikleri sergilemektedir (George & Sabapathi, 2015; Lu vd., 2014). SNK'lar hidrofilitir ancak yüzeylerini yüksek performanslı nanokompozitlerin üretimi için işlevselleştirerek hidrofobik polimer matrislerle kullanılabilir (Habibi vd., 2010). SNK iyi mekanik özellikleri yanı sıra yüksek nem tutma özelliğine sahiptir. Doğal olarak oluşan selüloz elyaflarından elde edilen SNK'lar doğada biyolojik olarak parçalanabilir ve yenilenebilir ve bu nedenle çoğu uygulama için sürdürülebilir ve çevre dostu bir malzeme görevi görmektedirler (Dong vd., 2019). Ticari olarak işlenebilir güçlü malzemedir ve ağ yapısı oluşturma özelliği vardır. SNK'lar genellikle birkaç yüz nm uzunluğunda ve 100 nm'den düşük genişlikte kısa çubuk şekline sahiptir (George & Sabapathi, 2015). SNK'lar, kirleticilerle etkileşime giren yüksek aktif yüzey alanı ile adsorpsiyon performansını artırdığı için düşük maliyetli ve enerji verimli kompozit filtreler üretmeyi sağlamaktadır. Bazı çalışmalarda nanolif yapılarda UOB adsorpsiyonu için nano adsorbent olarak SNK kullanılmıştır. Fan vd. (2019) SNK ile yüksek filtrasyon verimi ve düşük basınç düşüşüne sahip hava filtreleri üretmişlerdir. Bu çalışmada partikül maddenin (PM) ve hedef kimyasal gazların

(formaldehit, karbon monoksit) uzaklaştırılmasına odaklanılmış ve % 94-99 aralığında yüksek PM tutma performansı elde edilmiş ve formaldehit ve karbon monoksit giderimi değerleride sırasıyla %88,30 ve %60,71 olarak bulunmuştur (Fan vd., 2019). Başka bir çalışmada Zhao vd. (2019), hedef hava kirleticileri adsorbe edebilmek için paslanmaz çelik boşluklu yapı üzerinde selüloz nanolif (SNF)/bakır nitrat tabakası üretmişlerdir. Oluşturdukları selüloz nanolif (SNF)/bakır nitrat tabakasına sahip gözenekli yapı ile 47,71 mg/g formaldehit adsorpsiyon kapasitesine ve %95 PM_{2.5} tutma etkinliğine ulaşmışlardır (Zhao vd., 2019).

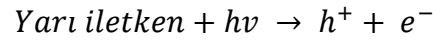
Fotokatalitik Oksidasyon

Fotokatalitik oksidasyon son yıllarda su veya hava arıtımı için kullanılan bir proses olup UV ışığı ve yarı iletken fotokatalizör varlığında organik kirleticilerin etkili bir şekilde giderildiği oksidasyon yöntemidir.

Bir çok metal oksidin yarı iletken olduğu bilinmektedir. Titanyum dioksit (TiO₂), çinko oksit (ZnO), tungsten trioksit (WO₃) ve kadmiyum sülfür (CdS) gibi bazı metal oksit yarı iletkenleri, fotokatalitik oksidasyon reaksiyonunda fotokatalizör olarak kullanılmaktadır. En yaygın kullanılanlar TiO₂ ve ZnO'dur. Çok sayıda metal oksitin gaz fazındaki fotokatalitik aktivitesinin ölçüldüğü bir çalışmada, hidrokarbonların parçalanmasında etkinlik sırasının TiO₂ (anataz)>ZnO>WO₃ olduğu belirtilmektedir (Ollis, 2000). Bunların arasında TiO₂, birçok avantajlı özelliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır; ucuz, güvenilir, yüksek kararlılığa ve fotokatalitik verime sahiptir ve normal ortam sıcaklığında bile iç ortam kirleticilerin oksidasyonunu sağlayabilmektedir ve kimyasal katkı gerektirmemektedir (Yu & Brouwers, 2009).

Fotolizde, TiO₂'nin H₂O₂ ve O₃ olmadan OH radikallerini oluşturabildiği bulunmuştur. TiO₂'nin fotokatalizör olarak tercih edilmesindeki faktörler arasında: TiO₂'nin kimyasal ve fotokimyasal kararlılığı, zehirsiz olması, valans bant boşluğunun kuvvetli oksitleyici özelliğe sahip olması ve ucuz olması sayılabilmektedir. TiO₂, 3,2 eV'luk band aralığı enerjisine sahip olan ve 400 nm'den küçük dalga boylarında UV ışınlanması ile aktive edilen bir yarı iletkenidir. UV ışınlanması sırasında, TiO₂ yüzeyinde kimyasal reaksiyonları başlatma kapasitesine sahip elektronlar ve boşluklar oluşmaktadır. Fotokatalitik bozunmada, ışık kaynağı olarak UV lambalarının yanı sıra güneş ışığından da yararlanılabilmektedir (Diler, 2010).

Fotokatalitik sistemlerde bir yarı iletken olan katalizör aracılığı ile fotonların ışık enerjisini elektrokimyasal enerjiye transferi gerçekleşir. Bir yarı iletken, elektronlar ile dolu olan bir değerlik bandına (DB) ve boş enerji düzeylerini içeren bir iletkenlik bandına (İB) sahiptir. Yarı iletken en az bant boşluğu enerjisi kadar veya daha fazla enerjili bir foton ($h\nu$) ile temas ettiğinde, değerlik bandındaki bir elektron iletkenlik bandına geçer. Elektronun uyarılması sonucu iletkenlik bandında elektron fazlalığı (e^-) değerlik bandında ise elektron boşluğu (h^+ DB) oluşur (Tompkins, 2001). Oluşan boşluklar tıpkı elektronlar gibi parçacık özelliği gösterir. Bu elektron boşlukları ve uyarılan elektronlar aşağıda gösterilen ışık ile etkileşme sonucu meydana gelen redoks reaksiyonlarında beraber yer alırlar (Ohtani, 2008; Benli, 2014).



Fotokatalitik reaksiyon, katalizör yüzeyinde gerçekleşen reaksiyonda, reaktantın katalizör yüzeyinde adsorplanması ile başlayıp, parçalanma olayı sona erinceye kadar devam eder. Bir fotokatalizör yüzeyinde gerçekleşecek olan reaksiyonlar şu şekilde sıralanabilir:

- Fotokatalizörün foton absorpsiyonu sonucu uyarılması,
- Reaktantın sıvı fazdan katalizör yüzeyine transferi ile adsorpsiyonu,
- Adsorpsiyon fazında yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonlarının gerçekleşmesi,
- Fotokatalizör yüzeyinden kataliz sonucu oluşan ürün veya ürünlerin desorpsiyonu (Benli, 2014).

Fotokatalitik oksidasyon verimliliği reaksiyon hızı ile doğru orantılıdır. Ortamın nem seviyesi, ışık şiddeti, kirletici konsantrasyonu ve akış hızı gibi reaktörün özellikleri reaksiyon hızını etkileyen parametrelerdir (Yu vd., 2009). Fotokatalizör yüzeyinde adsorbe olmuş su molekülleri yüzeyde bulunan elektron boşluğu ile tepkimeye girerek $-OH$ (hidroksil) gruplarını oluşturur ve bu ürünler kirletici moleküllerini okside ederler. Fotokatalitik oksidasyon reaksiyonunun hidroksil radikallerinin üretimine bağlı olduğu belirtilmektedir (Tompkins, 2001; Park vd., 1999). Fotokatalitik

bozunma reaksiyonu su buharı yokluğunda yavaşlamaktadır (Ao & Lee, 2004; Kim & Hang, 2002). Ancak aynı zamanda fazla su buharı olduğunda ise su buharı fotokatalizör yüzeyinde kirletici adsorpsiyonuna rakip olur ve bu durumda da fotokatalitik bozunma yavaşlamaktadır (Obee & Hay, 1997). Çizelge 2.2’de farklı fotokatalizörler ve kirleticilerin fotokatalitik oksidasyon prosesi ile giderim çalışmaları görülmektedir.

Çizelge 2.2 : Fotokatalitik oksidasyon yöntemi ve farklı fotokatalizörler ile yapılmış UOB’lerin giderim çalışmaları.

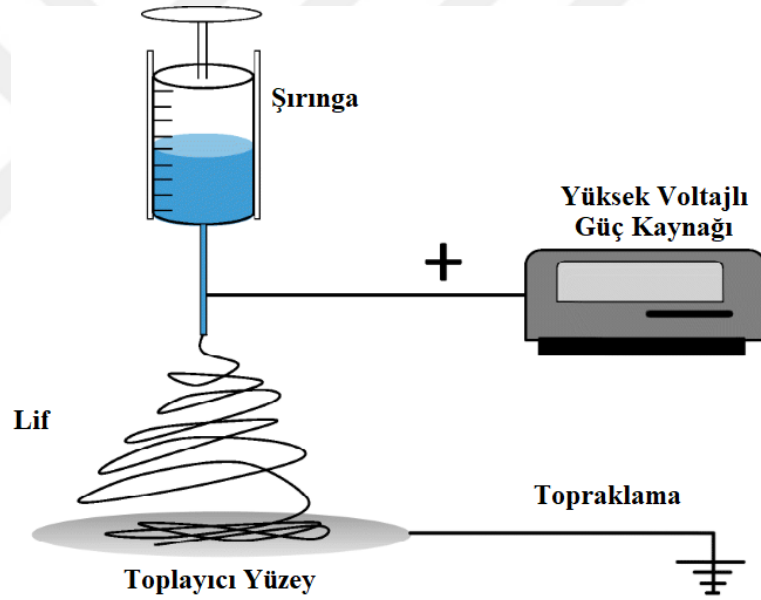
Fotokatalizör Tipi	UOB	Giderim Verimi (%)	Kaynak
Grafen oksit/TiO ₂	Etanol ve benzen	95	Andryushina & Stroyuk, (2014)
TiO ₂ /SiO ₂	Etilen	92,3	Lui vd., (2013)
Mezoporoz TiO ₂	Benzen	80	He vd., (2014)
TiO ₂ + Aktif Karbon	Toluen	98	Razaee vd.,(2008)
Grafen Oksit / ZnO	Benzen	87	Jafari vd., (2018)

Chuang vd., (2014) yaptıkları çalışmada, iç ortam havasında bulunan uçucu organik bileşikler arasından aseton kirleticisinin giderimi için hava filtresi malzemesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada asetonun uzaklaştırılması için en iyi operasyonel koşullar, 100 saniyelik bir tutma süresi, 254 nm’lik ultraviyole (UV) ışık kaynağıydı. Başlangıç konsantrasyonu 250 ppm’dir ve bu koşullar altında TiO₂ destek tabakası ile % 99 aseton giderme verimi elde edilmiştir (Chuang vd., 2014).

2.4 Elektroeğirme Yöntemi ile Nanolif Filtre Üretimi

Elektroeğirme, bir polimer çözeltisinin veya eriyiğın, yüksek potansiyelli bir elektrik alanı kullanılarak daha küçük çaplı liflere dönüştürülebildiğı bir işlem olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntem ile birkaç mikrondan 100 nm'e kadar değişen lif çaplarına ve düzensiz boşluk dağılımına sahip gözenekli yapılar elde edilebilmektedir.

Elektroeğirme lifleri küçük gözenek boyutuna ve yüksek yüzey alanına sahiptir. Elektroeğirme yönteminin en önemli avantajı basit ve kolay uygulanabilir olmasıdır. Elektroeğirme için kullanılan sistem, pozitif veya negatif yüke sahip yüksek voltajlı (5-40 kV) bir güç kaynağı, polimer çözeltisini şırınga ucuna taşımak için kullanılan şırınga pompası ve alüminyum gibi iletken bir toplayıcıdan oluşmaktadır (Subbiah vd., 2005). Toplayıcı yüzey düz plaka veya döner tambur gibi ihtiyaca göre herhangi bir şekilde yapılabilmektedir. Basit bir elektroeğirme düzeneğı Şekil 2.4'te görölmektedir.



Şekil 2.4 : Elektroeğirme düzeneğı.

Elektroeğirme yöntemi ile nanolif filtre üretimini etkileyen parametreler üç farklı başlık altında incelenebilir;

(i) Çözelti Parametreleri

- Polimer konsantrasyonu
- Polimerin moleküler ağırlığı
- Polimer çözeltisinin viskozitesi
- Polimer çözeltisinin iletkenliğı
- Polimer çözeltisinin yüzey gerilimi

(ii) Proses Parametreleri

- Voltaj
- Polimer çözeltisi besleme hızı
- Kollektör tipi
- Uç-kollektör (toplayıcı yüzey) mesafesi

(iii) Çevresel Parametreler

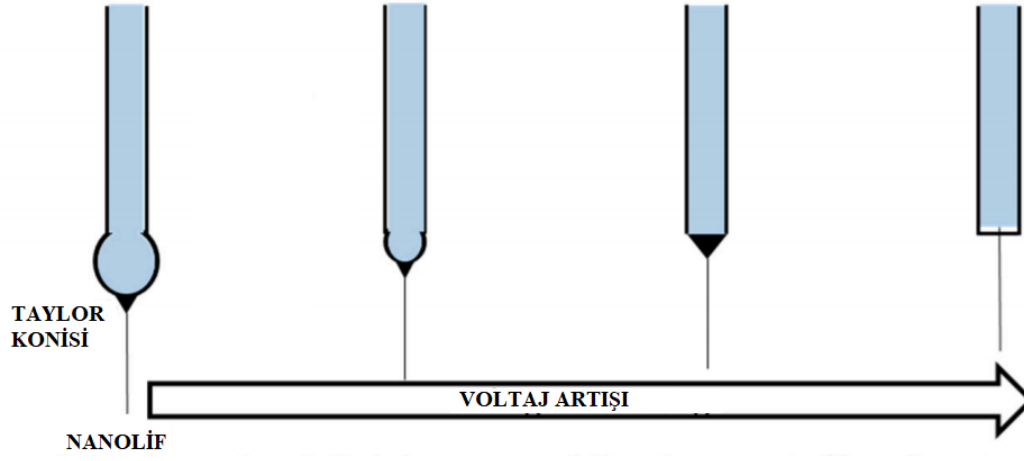
- Sıcaklık
- Nem oranı
- Son iyileştirme uygulaması

Elektroegirme yöntemi ile nanolif filtre üretiminde boncuk oluşumu homojen yapıyı bozan en önemli üretim sorunlarından biridir ve bunu engellemek, liflerin şekil ve boyutunda homojenliği sağlamak için polimer çözeltisinin konsantrasyonu optimize edilmelidir. Çözelti konsantrasyonunun gerekenden düşük olması nanolif kalitesini azaltmaktadır ve boncuk oluşumu görülmektedir, aynı şekilde yüksek çözelti konsantrasyonu da homojen olmayan ve büyük çapa sahip nanolif oluşumuna neden olmaktadır. Polimer çözeltisinin konsantrasyonunun, polimerin spiral bir yörünge oluşturmasına izin verecek kadar yüksek olması gerekir fakat polimer konsantrasyonu arttıkça artacak olan çözelti viskozitesi elektrik alanının neden olduğu polimer hareketini engelleyecek seviyeye çıkmamalıdır. Çözelti viskozitesi çözücü buharlaşmadan önce şırınga ucunda damlacıklar halinde çökmesini önleyecek kadar yüksek olmalıdır. Şırınga iğnesi ile toplayıcı yüzey arasındaki mesafenin azalması morfolojik değişikliklere sebep olmaktadır. Mesafeyi arttırmak veya elektrik alanını azaltmak, çözelti içindeki polimerin konsantrasyonundan bağımsız olarak boncuk yoğunluğunu azaltmaktadır (Deitzel vd., 2001).

Silindirik yapıda homojen lifler elde edebilmek için önemli olan diğer parametre de molekül ağırlığıdır ve polimer çözeltisinin viskozite değeriyle ilişkilendirilmektedir. Düşük molekül ağırlığına sahip polimerlerle hazırlanan çözeltiler genellikle düşük viskozite değerine sahip olmaktadır ve bu durum da boncuk oluşumuna ve kesintili lif oluşumuna neden olmaktadır. Yüksek molekül ağırlığına sahip polimerler ile düşük olanlara göre daha homojen lifler üretilebilmektedir ancak viskozite değerine dikkat edilmelidir. Viskozite değeri 1-200 P aralığında olduğunda homojen, silindirik ve pürüzsüz lifler üretilebilirken, bu değer üstündeki viskoziteler sistemin iğne uçlarının tıkanmasına ve lif oluşumunun zorlaşmasına neden olmaktadır.

Çözeltilinin iletkenliğinin artması daha ince lif üretmesini ve liflerin mekanik dayanımının artmasını sağlamaktadır. İletkenliğin artışıyla çözeltinin elektrik alan altındaki etkisi artmaktadır ve bu şekilde daha uzun lif oluşumu görülmektedir, düşük iletkenlik değerinde ise lif uzaması yeterli düzeyde olmamaktadır ve bu da boncuk oluşumuna neden olmaktadır. Düşük iletkenlik değerinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için polimer çözeltisine tuz ilavesi yapılarak iletkenlik değeri iyileştirilebilmektedir. Yüzey gerilimi pürüzsüz nanolif üretimi için önemli bir parametredir ve polimer çözeltisinde kullanılan çözücüye göre farklılık göstermektedir. Yüksek yüzey gerilimi boncuk oluşumuna neden olurken, düşük yüzey gerilimi pürüzsüz nanolifler elde etmeyi sağlamaktadır.

Uygulanan voltaj, besleme hızı, kolektör ve iğne-kolektör mesafesi elektroëirme düzeneğindeki proses parametreleridir. Besleme hızı polimer çözeltisinin şırınga pompa yardımıyla şırınga ucundan toplayıcı yüzeye iletiildiği miktardır. Besleme hızı polimerin türü, polimer çözeltisinin konsantrasyonu dikkate alınarak belirlenmelidir. Besleme hızı polimer çözeltisinin buharlaşma süresini etkilemektedir. Elektroëirme düzeneğinde genellikle besleme hızı olarak 1 ml/sa ve altındaki değerler kullanılmaktadır. Besleme hızındaki artış boncuk oluşumuna neden olabilir, aynı zamanda düşük besleme hızı da kesikli nanolif üretimine neden olmaktadır. Elektroëirme yöntemi ile nanolif üretimi gerçekleşebilmesi için şırınga ucundan çıkan polimer çözeltisinin eşik gerilimini aşması gerekmektedir. Nanolif üretiminde uygulanan voltaj genellikle 5 – 40 kV aralığında değişmektedir. Uygulanan voltaj değeri Taylor Konisi'nden nanolif oluşturacak kadar olmalıdır. Şekil 2.5'te uygulanan elektrik alanın Taylor koni oluşumuna etkisi görülmektedir. Düşük elektrik alanında, iğne ucunda asılı damla oluşturmaktadır ve ardından uçta bir koni oluşturmaktadır. Uygulanan voltaj kademeli olarak artırıldığında, iğne ucunda sadece bir koni oluşana kadar damla boyutu azalmaktadır. Voltaj daha da arttırılırsa, iğnenin kör ucunda görünür bir Taylor konisi oluşturmadaan iğnenin içinden lif oluşumu başlamaktadır. Ayrıca, yüksek voltajlarda boncuk oluşumunda artış görülmektedir (Bhattarai vd., 2019).



Şekil 2.5 : Uygulanan elektrik alanın Taylor koni oluşumuna etkisi
(Bhattarai vd., 2019).

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Kullanılan Kimyasal Malzemeler

Deneyler sırasında kullanılan çözücü, polimer ve nanokatıkların marka ve kodları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kullanılan kimyasallarda ekstra saflaştırma işlemi yapılmamıştır.

Çizelge 3.1 : Deneylerde kullanılan kimyasalların marka ve kodları.

Kimyasal Adı	Marka	Kod
Etanol	Merck	1.00983.2511
Formik asit (98-100%)	Merck	1.00263.2500
Metanol	Merck	106007.2500
Asetik Asit (100%)	Merck	100056.2500
Poliamid- 6 (PA6)	BASF	ULTRAMID B24
Poliakrilonitril (PAN)	Sigma-Aldrich	25014-41-9
N, N-Dimetilformamid (DMF)	Merck	1.03034.2500
Titanyum(IV) oksit, anataz	Sigma-Aldrich	248576
Çinko oksit (ZnO)	Sigma-Aldrich	96479
Selüloz nanokristal (SNK)	Nanografi	NG01NC0101
Selüloz nanokristal (SNK)*	Özel Üretim	-
Destek Tabakası	Mogul-Polyester Spunbound	Pointbond-50 gr/m ³
Destek Tabakası	Mogul-Polyester Spunbound	PET-13 gr/m ³

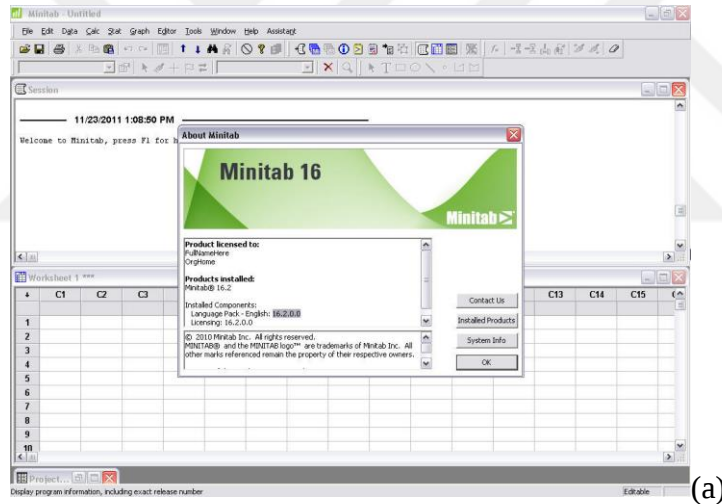
* SNK, ABD-Oak Ridge National Lab.’da selülozik madde geliştiren araştırma grubu tarafından deneme amaçlı gönderilmiştir.

PA6’nın molekül ağırlığı yaklaşık olarak 145.000 g/mol ve PAN’ın molekül ağırlığı 150.000 g/mol’dir. PA6 polimeri için kullanılan destek tabakası 50 gr/m³ birim ağırlığa sahiptir ve %100 polipropilendir (PP). PAN polimeri için kullanılan destek tabakası 13 gr/m³ birim ağırlığa sahiptir ve %100 polietilen terephthalattır (PET).

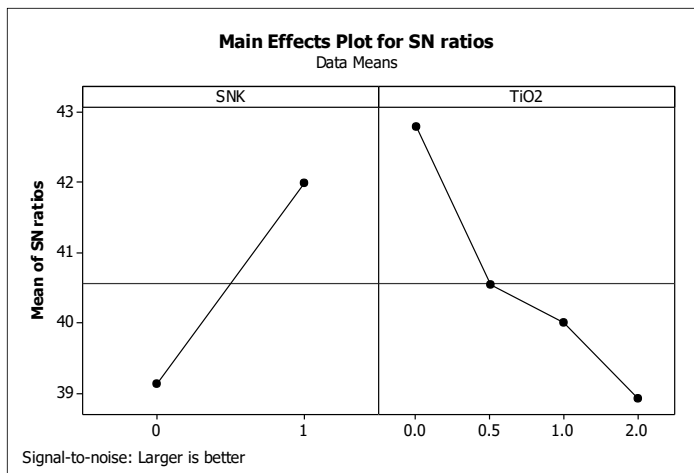
3.2 Taguchi Deneysel Tasarım Yöntemi

Taguchi Metodu bir deneysel tasarım tekniğidir; bu teknik ile cihazdan, operatörden ya da çevre koşullarından kaynaklanan kontrol edilemeyen faktörlerin etkileri minimize edilmektedir.

Bu tekniğin temel amacı minimum deney sayısı ya da üretim düzeni ile temsil edici sonuçlar elde etmektir. Taguchi Metodu akademik çalışmalarda zamanın ve sarf malzemelerin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu teknik ile tezde elektroçirme üretiminde nanokatıkların etkilerini görebilmek için Minitab 16 yazılımı kullanılmıştır. Yazılım kullanılarak üretilen nanolif filtrelerin karakterizasyon ve performans testi sonuçları değerlendirilmiştir. Yazılım değerlendirme sonucunda her numune için Sinyal/Gürültü (S/N) değeri hesaplanmaktadır. Bu değer ile analizde sunulan değişkenlerin test sonuçlarına etkisi Taguchi S/N ana etki grafiğinde görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.1 : Minitab 16 Yazılımı (a), örnek Taguchi S/N ana etki grafiği (b).

3.3 Nanolif Filtre Üretimi için Polimer Çözeltilerin Hazırlanması

Elektroeğirme yöntemiyle üretilen nanolif filtreler şu şekilde kodlandı; P1 ve P2 kodları polimer tiplerini göstermekte olup P1 kodu PAN polimerini P2 kodu ise PA6 polimerini ifade etmektedir. Nanokatki tipinde N kodu Türkiye’den temin edilen selüloz nanokristali ve N1 kodu ise Amerika’dan temin edilen selüloz nanokristali göstermektedir. Fotokatalizör tipinde ise F1 kodu TiO_2 ve F2 kodu ise ZnO ’yu belirtmektedir.

3.3.1 Saf polimer çözeltilerinin hazırlanması

PAN polimeri Dimetilformamid (DMF) çözücüsünde ağırlıkça %9’luk olacak şekilde tartılmış ve 2 sa. süreyle 45 °C sıcaklıkta manyetik karıştırıcıda karıştırılarak hazırlanmıştır. Saf PAN polimer P1 olarak kodlanmıştır. Şekil 3.2-a’da saf PAN polimer çözeltisinin hazırlanmış hali gösterilmektedir.

Türkiye’den temin edilen SNK ile hazırlanan PA6 polimer setinde, PA-6 polimer çözeltileri sırasıyla ağırlıkça %13 ve %17 olarak değişen polimer oranlarında hazırlanmış ve saf polimer çözeltileri P2-13 ve P2-17 olarak kodlanmıştır (Şekil 3.3). Bu çözeltilerde çözücü olarak formik asit (FA) kullanılmıştır ve çözelti hazırlanmıştır. Diğer PA6 setinden farklı olarak, çözücü olarak asetik asitin (AA) kullanılmamasının nedeni asetik asitin SNK için düzenlenen malzeme güvenlik bilgi formunda uyumsuz bir bileşik olarak belirtilmesidir.

Amerika’dan temin edilen SNK ile hazırlanan PA6 polimer setinde, saf PA6 çözeltisi için PA6 polimeri, AA:FA (2:1) oranındaki çözücü karışımı içerisinde ağırlıkça %15’lik olacak şekilde tartılmış ve PA6 polimeri çözücü üzerine eklendikten sonra diğer PA6 setiyle benzer şekilde hazırlanmıştır. Şekil 3.4-a’da %15 polimer oranına sahip PA6 çözeltisi görülmektedir.

3.3.2 Kompozit polimer çözeltilerinin hazırlanması

PAN, SNK ve TiO_2/ZnO içeren nanolif filtrelerinin set düzeni Çizelge 3.2’de verilmiştir. Kompozit nanolif üretimi için, PAN polimer çözeltileri içerisine nanokatki malzemeleri çözeltiye göre ağırlıkça yüzde oranlarında hesaplanarak katılmıştır. SNK ve fotokatalizör (TiO_2 ve ZnO) nanomalzemeler DMF çözücüsünde Hielscher marka UP200St model sonikasyon cihazıyla 20 dk. süreyle homojen dağıtılmış ve devamında %9 polimer oranı sağlayacak şekilde PAN polimeri eklenmiş ve saf PAN çözeltisine benzer şekilde hazırlanmıştır. Farklı oranlarda nanokatki ve fotokatalizör malzeme içeren SNK- TiO_2 nanokatki polimer çözeltileri Şekil 3.2-b’de ve SNK- ZnO nanokatki polimer çözeltileri ise Şekil 3.2-c’de verilmiştir.

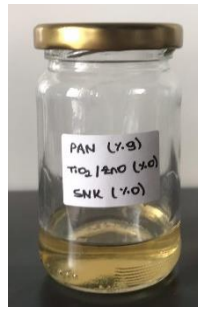
SNK- TiO_2 ve SNK- ZnO nanokatki üretilen PAN nanolif setleri P1/N1/F1 ve P1/N1/F2 kodu ile verilmiştir. SNK çözeltiye göre ağırlıkça %1 oranında sabit tutulmuş, TiO_2 çözeltiye göre ağırlıkça %0,5-1-2 oranlarında, ZnO ise %0,1-0,3-0,5 değiştirilerek kullanılmıştır.

TiO_2 ve ZnO fotokatalizörleri farklı partikül boyutlarına sahip olduğu için polimer çözeltisi içinde farklı oranlarda çalışılmıştır. ZnO (0,5-5 μm) fotokatalizörü TiO_2 (0,1-1 μm) fotokatalizörüne göre daha büyük partikül çapına sahiptir, partikül boyutundaki artış polimer çözeltisinin viskozitesini artmasına neden olmaktadır. Benzer viskoziteye sahip polimer çözeltileri elde etmek için ZnO miktarı TiO_2 ’a göre daha düşük aralıkta tutulmuştur.

SNK oranının tercih edilmesinde tez kapsamında ilk olarak PA6-SNK seti yapılmıştır ve farklı SNK oranlarının (%1-1,5-2) etkisi incelenmiştir. Bu oranlarda SNK üretimi ve üretilen nanoliflere yapılan testler sonucunda %1 oranında pozitif etkinin maksimum olduğu görülmüş. Bu nedenle, üretilen diğer PAN-SNK- TiO_2 , PAN-SNK- ZnO ve PA6-SNK- TiO_2 setlerinde SNK sabit tutulmuş ve fotokatalizör miktarı değiştirilerek, fotokatalizör oranlarındaki değişimin etkisi daha açık görülmesi sağlanmıştır.

Çizelge 3.2 : PAN, SNK ve TiO₂/ZnO ile üretilen nanolif filtrelerin set düzeni ve içerikleri.

Filtre Adı	SNK miktarı (%)	Fotokatalizör	
		Türü	Miktarı (%)
P1	-	-	-
P1/F1-1	-	TiO ₂	0,5
P1/F1-2			1
P1/F1-3			2
P1/F2-1	-	ZnO	0,1
P1/F2-2			0,3
P1/F2-3			0,5
P1/N1	1		-
P1/N1/F1-1	1	TiO ₂	0,5
P1/N1/F1-1			1
P1/N1/F1-3			2
P1/N1/F2-1	1	ZnO	0,1
P1/N1/F2-1			0,3
P1/N1/F2-3			0,5



(a)



(b)

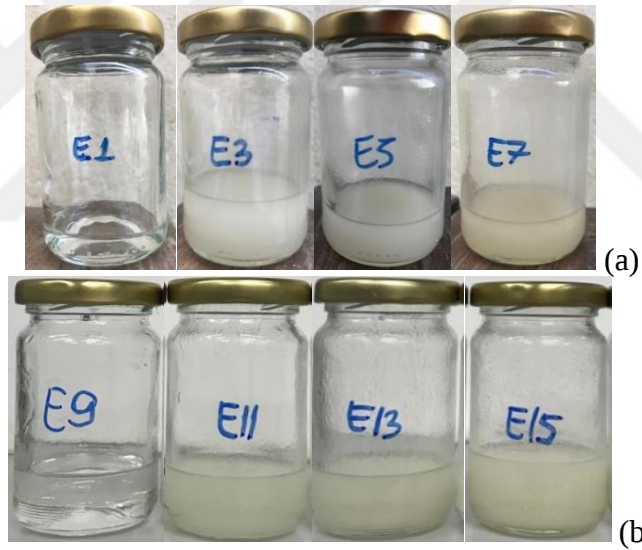


Şekil 3.2 : Saf PAN polimer çözeltisi (a), SNK-TiO₂ nanokatlı PAN polimer çözeltileri (b) ve SNK-ZnO nanokatlı PAN polimer çözeltileri (c).

SNK-PA6 kompozit nanolif çözeltileri için SNK miktarı ağırlıkça %1, 1,5 ve 2 olarak eklenmiştir. PA6 ve SNK içeren nanolif filtrelerinin set düzeni Çizelge 3.3'te verilmiştir. Kompozit nanolif çözeltilerinin hazırlanması sırasında farklı oranlar için SNK miktarları hesaplanmış ve formik asit içerisinde yukarı belirtilen şekilde sonike edilmiştir. SNK'nın formik asit içinde tamamen dağılmasından sonra, karışıma ağırlıkça %13 ve %17 için hesaplanan PA6 ilave edilmiş ve çözeltiler hazırlanmıştır. Farklı oranlarda nano katkı içeren kompozit çözeltilere ait fotoğraflar Şekil 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : PA6 ve SNK ile üretilen nanolif filtrelerin set düzeni ve içerikleri.

Filtre Adı	Polimer Miktarı (%)	SNK miktarı (%)
P2-13	13	-
P2-13/N-1		1
P2-13/N-2	13	1,5
P2-13/N-3		2
P2-17	17	-
P2-17/N-1		1
P2-17/N-2	17	1,5
P2-17/N-3		2



Şekil 3.3 : Saf PA6 ve SNK nanokatlı PA6 nanolif çözeltileri (a) %13 polimer oranına sahip nanolifler, (b) %17 polimer oranına sahip nanolifler.

PA6 polimer çözeltileri içerisinde SNK ve TiO_2 nanokatlı malzemeleri, çözeltiye göre ağırlıkça yüzde oranlarında hesaplanarak katılmış ve PA6+SNK setinde olduğu gibi kompozit çözeltiler hazırlanmıştır. PA6, SNK ve TiO_2 içeren nanolif filtrelerinin set düzeni Çizelge 3.4’te verilmiştir. Farklı oranlarda nano katkı ve fotokatalizör malzeme içeren kompozit çözeltilere ait fotoğraflar Şekil 3.4-b’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : PA6, SNK ve TiO₂ ile üretilen nanolif filtrelerin set düzeni ve içerikleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	TiO ₂ Miktarı (%)
P2-15	-	-
P2-15/F1-1		0,5
P2-15/F1-2	-	1
P2-15/F1-3		2
P2-15/N1	1	-
P2-15/N1/F1-1		0,5
P2-15/N1/F1-1	1	1
P2-15/N1/F1-3		2

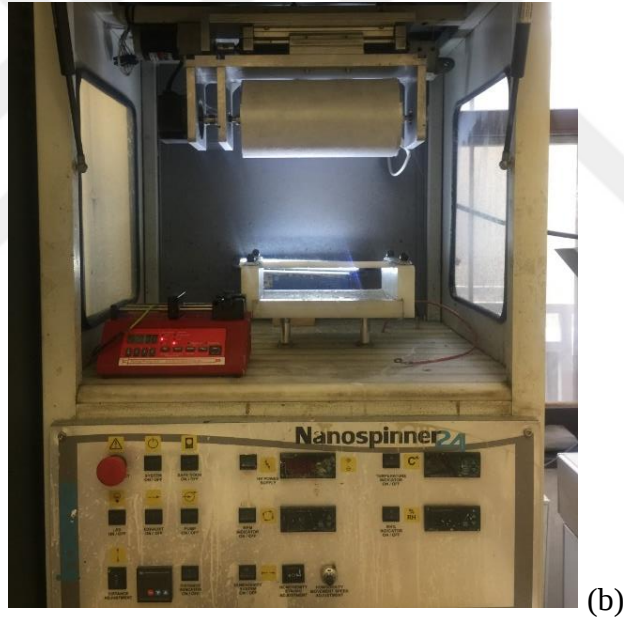
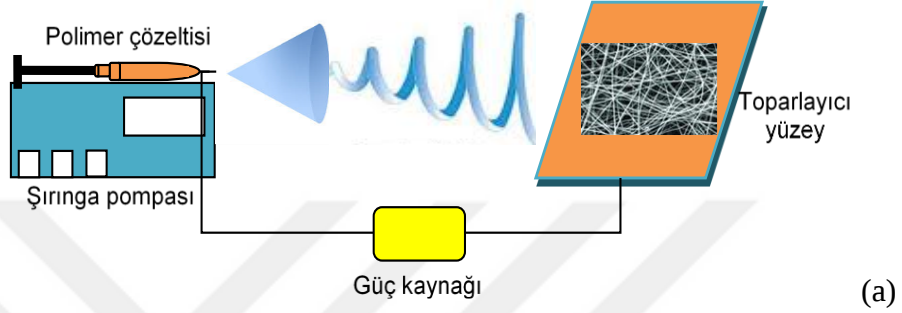


Şekil 3.4 : Saf PA6 polimer çözeltisi (a), SNK-TiO₂ nanokatıllı PA6 polimer çözeltileri (b).

3.4 Nanolif Filtreler için Elektroeğirme Yöntemi ile Üretimi

Elektroeğirme cihazı temel olarak yüksek gerilim güç kaynağı, polimer çözeltisi içeren metal uçlu şırınga ve topraklanmış kolektörden oluşmaktadır (Şekil 3.5-a). Hazırlanan polimer çözeltisi şırınga içerisine doldurulduktan sonra şırınga pompası vasıtasıyla yüksek gerilimin uygulandığı metal uca doğru beslenmektedir. Elektroeğirme cihazı içerisinde oluşturulan elektrik alan sayesinde polimer çözeltisi yüzey gerilimini aşar ve iğne ucundan toparlayıcı yüzeye doğru püskürtülmüştür. Püskürtülen polimer

çözültisi iğne ucunda Taylor konisi oluşturur ve topraklanmış toplayıcı yüzey üzerinde kararsız bir salınım yapar. Polimer çözültisindeki çözücü toparlayıcı yüzeye ulaşana kadar buharlaşmıştır ve katılaşmış polimer yüzey üzerinde lif tabaka oluşturmuştur. Şekil 3.5-b’de görülen, İTÜ-Tekstil Mühendisliği TEMAG laboratuvarında bulunan elektroegirme cihazı nanolif filtre üretiminde kullanılmıştır. Üretim sırasında uç-kolektör mesafesi 15-20 cm, voltaj 15-25 kV değerlerinde ve üretim süresi 60 dk’da sabit tutulmuş, besleme hızı 1,0-1,5 ml/sa arasında çalışılmıştır.



Şekil 3.5 : Elektroegirme çalışma prensibi (a), elektroegirme cihazı (b).

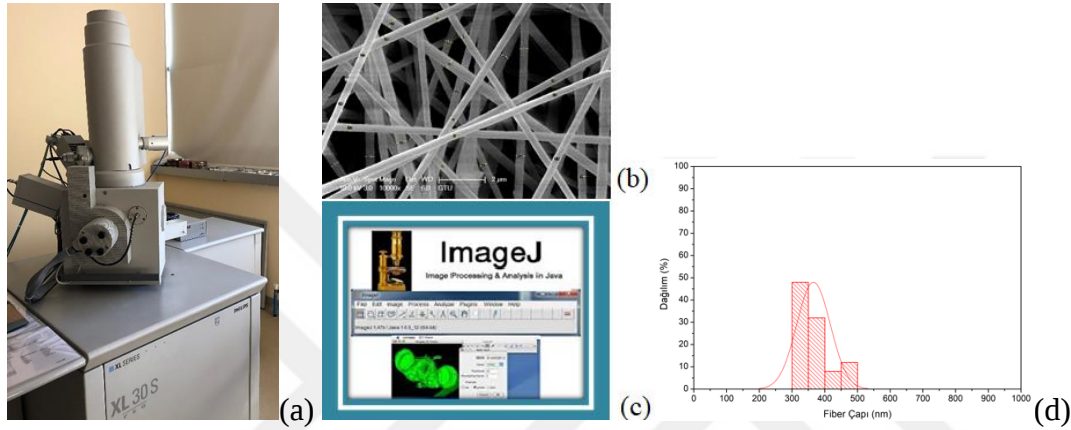
3.5 Üretilen Nanolif Filtrelerin Yapısal Analizi

3.5.1 SEM-EDS analizi ile yüzey morfolojisi ve nanolif çapının belirlenmesi

Nanolif filtrelerin yüzey yapılarını ve nanolif çaplarının belirlenmesi için, Gebze Teknik Üniversitesi-Malzeme Mühendisliğin bölümünde bulunan Philips XL30SFEG Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Nanolif filtre numunelerin analiz edildiği cihaz Şekil 3.6-a’da görülmektedir. Numuneler analiz edilmeden önce yüksek vakum altında (3.7×10^{-6}) mbar altın ile kaplanmıştır. Analiz sonucunda belirlenen

büyütme değerlerinde (2000x, 5000x, 10000x ve 20000x), Şekil 3.6-b’inde görülen örnek SEM görüntüsü gibi görüntüler elde edilmiştir.

Nanolif çaplarının belirlenmesi için SEM görüntüleri Şekil 3.6-c’inde görülen Image J adlı görüntü analiz programı kullanılmıştır. Bu program ile SEM görüntüsünde belirtilen ölçek yazılıma tanıtılmıştır ve 50 farklı noktadan nanolif çapı belirlenmiştir. Belirlenen nanolif çapları program hafızasından excel dosyasına aktarılır ve ortalama nanolif çap değerleri, standart sapmaları hesaplanmıştır, nanolif çapı dağılım grafikleri (Şekil 3.6-d) oluşturulmuştur.



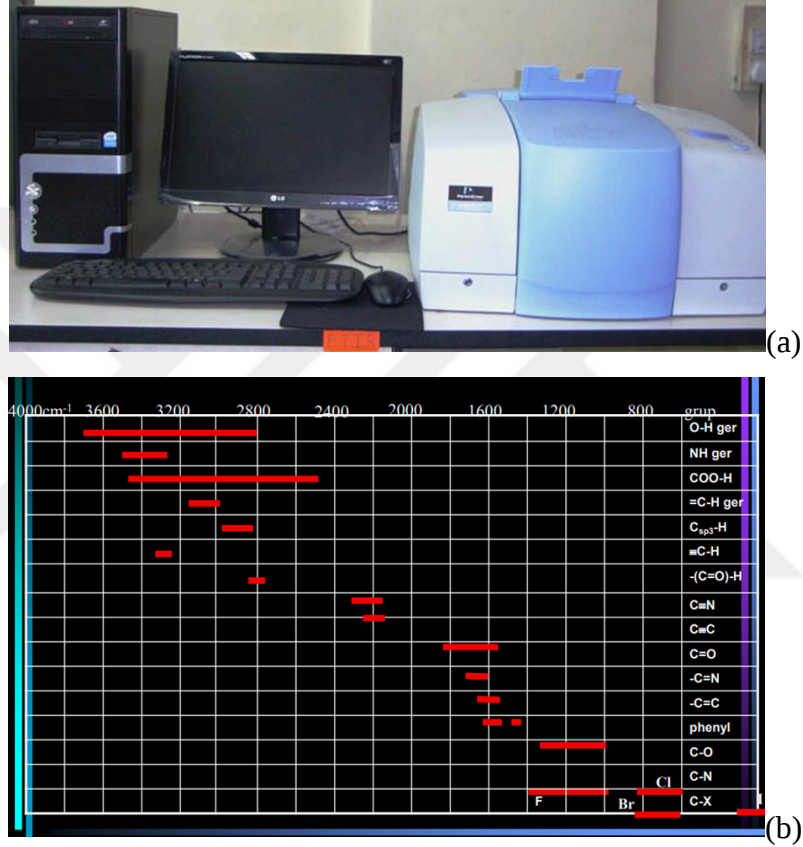
Şekil 3.6 : SEM Cihazı (a), örnek SEM görüntüsü (b), Image J yazılım görüntüsü (c), örnek nanolif çapı dağılım grafiği (d).

Nanoliflerin lif çapları ve morfolojik görüntüleri için SEM analizi, içerdiği nanokatılları tespit etmek içinde SEM-EDS analizi yapılmıştır. SEM ölçümleri 15 kV, 250 büyütmede ve 126,1 çözünürlükte gerçekleştirilmiştir. SEM-EDS ölçümlerinde SNK ve Ti/Zn eklentili nanoliflerde Ti ve Zn bileşenleri analiz edilmiştir. SEM-EDS analizleri yapılan nanoliflerin kompozisyonları ve SEM-EDS de tespit edilen temel bileşenler Çizelge 4.2 ve 4.5’te sunulmuştur.

3.5.2 FTIR analizi

FTIR spektrumu, maddenin atomları arasındaki bağların titreşimi tarafından üretilen frekanslara karşılık gelen absorpsiyon tepe noktalarını göstermektedir (Lin & Wang, 2012). Maddelerin benzersiz bir spektrumu vardır ve özellikle 2000 cm^{-1} 'den sonraki kısım daha ayrıntılıdır; bu nedenle bu bölge "parmak izi bölgesi" olarak adlandırılmaktadır. FTIR analizi sonucunda toplanan veriler, farklı moleküler bağlardan kaynaklanan farklı titreşim frekanslarını temsil eder (Ergin vd., 2013). FTIR

analizi ile, moleküler bağ karakterizasyonu yapılır ve bu sayede numunenin organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar ortaya çıkar, FTIR spektrumlarında görülen fonksiyonel gruplar Şekil 3.7-b’de görülmektedir. FTIR analizi ayrıca iki bileşiğin arasındaki farklılıkları, bağ durumunu, bağ yerlerini ve yapının aromatik ya da alifatik olup olmadığını belirtmektedir. Spesifik bölgedeki ($500 - 4000 \text{ cm}^{-1}$) üretilen nanolif filtrelerin FTIR analizi için GTÜ-Kimya bölümünde bulunan Perkin Elmer Spectrum 100 spektrofotometre cihazı (Şekil 3.7-a) kullanılmıştır.



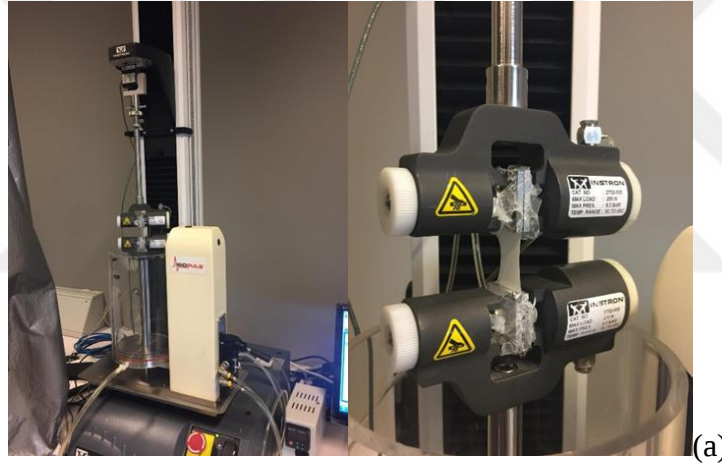
Şekil 3.7 : Perkin Elmer Spectrum 100 spektrofotometre cihazı (a), fonksiyonel grup spektrumları (b).

3.5.3 Mekanik dayanım özelliklerinin belirlenmesi

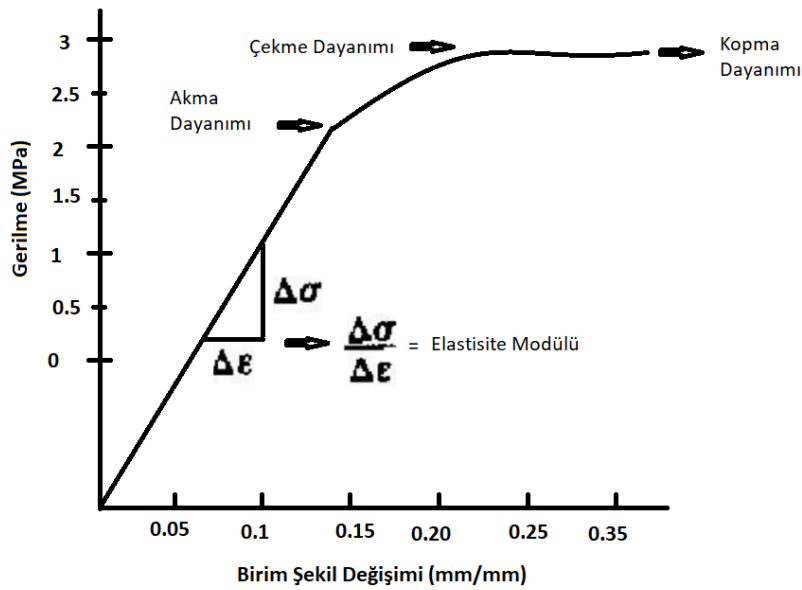
Çekme deneyi, belirli bir çekme hızında ve sabit sıcaklıkta nanolif numunenin tek ekseninde koparıncaya kadar numunenin çekilmesidir. Çekme deneyi sırasında uygulanan kuvvet ile meydana gelen uzama program tarafından kaydedilmiştir. Çekme deneyi yapılacak filtrelerden, numune 2 x 5 cm boyutlarında hazırlanmıştır. Numune tüm filtreyi temsil edeceği için hazırlandığı bölge çok önemlidir. Mekanik dayanım testinde, Şekil 3.8-a’da PRU Laboratuvarında bulunan Instron marka 3345 model çekme-basma cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerin tamamı oda sıcaklığında, yük hücresi 500N değerinde sabit tutularak yapılmıştır.

Çekme deneyi sonucunda, nanolif filtreye ait süre (sn), uzama (mm), yükleme (N), birim şekil değişimi-uzama (Tensile strain, mm/mm) ve çekme gerilimi (Tensile strength, MPa) verileri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak Uzama/Gerilme (Strain/Stress) grafiği çizilmektedir. Şekil 3.8-b’de görüldüğü gibi elastik deformasyon bölgesinde artan gerilme ile birlikte malzemenin uzama değeri doğrusaldır. Bu bölgede malzemeye uygulanan kuvvet kaldırılırsa, uzama sıfırlanır yani malzemede kalıcı değişim olmamaktadır. Grafiğin bu bölgesindeki eğim malzemenin “Elastisite (Esneklik) Modülü(E)” olarak tanımlanmaktadır.

Gerilme-Uzama eğrisinin tepe noktasından sonra numunenin boyun verdiği kısmın kesit alanı azalır ve gerilme azalmaya başlamaktadır. Deney numunenin kopmasıyla biter, çekme veya kopmanın gerçekleştiği noktadaki gerilme değerine “çekme veya kopma dayanımı (Tensile Strength)” olarak isimlendirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.8 : Instron 3345 Çekme-Basma Cihazı (a), Gerilme-Uzama eğrisi (b).

3.6 Üretilen Nanolif Filtrelere Uygulanan Performans Testleri

3.6.1 Hava geçirgenliği testi

Hava geçirgenliği testi TS 391 EN ISO 9237 standardına uygun olarak İTÜ Tekstil Mühendisliği Temag'da bulunan ProWhite AirTest II hava geçirgenliği cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.9). Hava geçirgenliği ölçümleri tüm numunelerde 20 cm²'lik test başlığı ile gerçekleştirilmiştir. Numune test başlığının altına sabitlenir ve belirlenen vakum basıncında test başlığındaki açıklıktan hava çekilmeye başlar. Sonuçların numuneyi temsil etmesi için 5 farklı noktadan mm/s biriminde ölçüm yapılmıştır.



Şekil 3.9 : Hava Geçirgenliği cihazı.

3.6.2 Su buharı geçişi testi

Su buharı geçişi testi, ASTM E96 standardına göre hazırlanmış birim zamanda su buharı geçiş hızının test edildiği bir analiz yöntemidir. Şekil 3.10'da görülen düzenek başlığı çıkartılır ve üretilen nanolif filtreler düzeneğin üst kısmındaki açıklığa yerleştirilir. Düzenek içinde suyun sıcaklığı deney boyunca sabit kalması için, deney ısıtıcı üzerinde gerçekleştirilir. Numune yerleştirildikten sonra deney başlangıcı ve deney sonunda düzenek tartılır. Deney süresi 1 saat olarak sabit tutulmuştur. İki tartım arasındaki fark nanolif filtre direncini aşabilen su buharı miktarını vermektedir. Bir saat sonundaki tartım farkı düzeneğe bulunan efektif alana bölünür ve su buharı geçişi değeri g/m²/sa birimiyle ifade edilir. Bu analiz sonucunda nanolif malzemenin kalınlığı ve hidrofilik özelliği hakkında yorum yapılabilir.



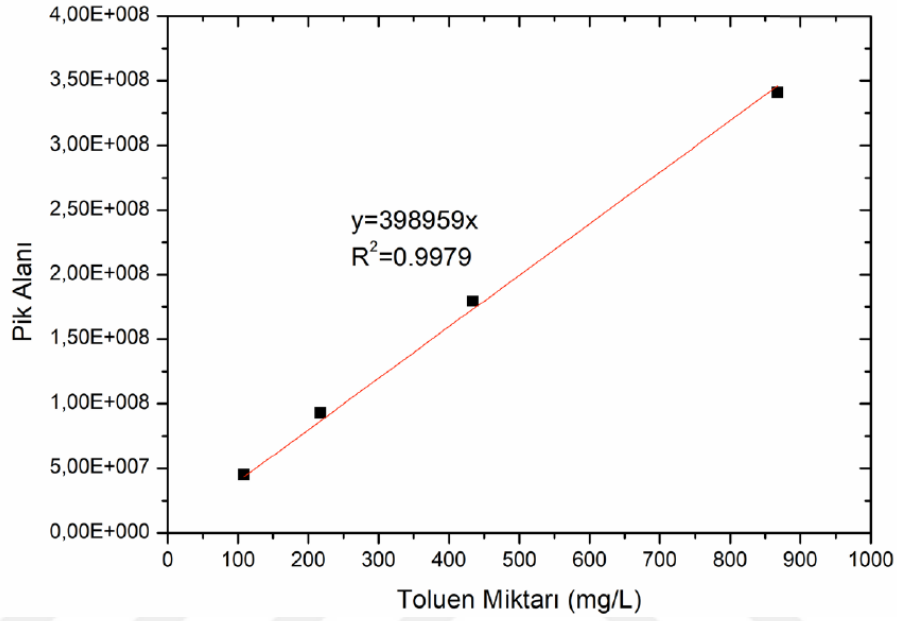
Şekil 3.10 : Su buharı geçişi test ekipmanı.

3.6.3 Toluen adsorpsiyon ve oksidasyon testleri

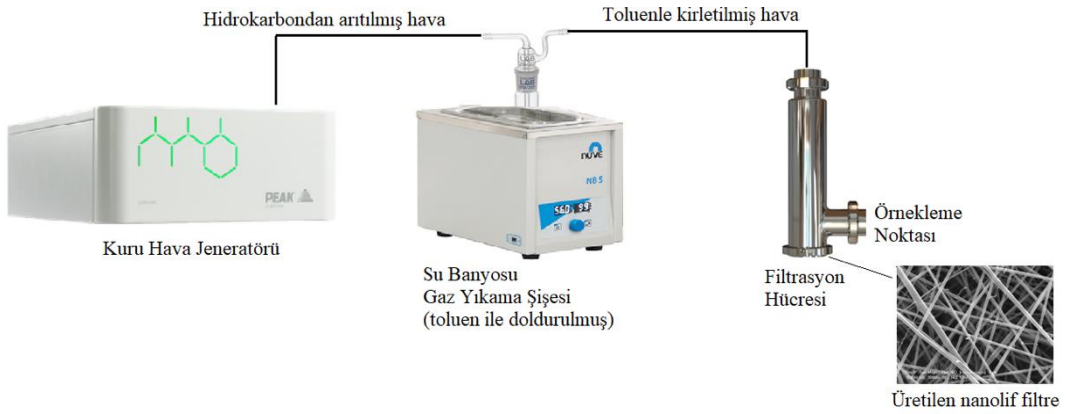
Toluen adsorpsiyon testi için iki farklı düzende çalışılmıştır. Şekil 3.12’de görülen ilk düzende toluen adsorpsiyon testi hava geçirmez bir filtrasyon hücresinde gerçekleştirilmiştir. Deney seti dört bileşenden oluşmaktadır. Birinci bileşen PEAK marka CO₂ ve hidrokarbonla saflaştırılmış kuru hava jeneratörüdür ve hava akışını 1,5 L / dk sabit tutar, ikinci bileşen ise su banyosunda konumlandırılan ve gelen sabit havanın toluen buharını sürüklediği gaz yıkama şişesidir. Adsorpsiyon testi sırasında tüm malzemelerin testlerinde su banyosunun sıcaklığı 40°C’de tutulmuştur. Üçüncü bileşen nanolif filtreleri yerleştirildiği filtrasyon hücresidir. Filtrasyon hücresi iç hacmi 300 ml olan çelik, sızdırmaz bir hücredir. Bu hücrenin alt kapak kısmına üretilen nanolif filtrelerin yerleşeceği 14,6 cm² efektif alana sahip bir bölme bulunmaktadır. Dördüncü bileşen örneklem noktasıdır. Toluenin tüm hatlarda yoğunlaşmasını önlemek için sıcaklık ısıtıcı ile 40°C’de sabit tutuldu. Schlumberger - Gallus 2000 marka debi ölçer cihazı ile sürekli hava akımı ile toluenin filtrasyon hücresi çıkışında kontrol edilmiştir.

Bu deney düzeneğinde ilk olarak sıvı metanol ve sıvı toluen karışımları ile standart çözeltiler hazırlanmış ve GC-MS’te metanol ve toluen piklerinin çıkış zamanları kontrol edilmiştir. Standart çözeltileri hazırlamak için 10 ml metanol içerisine 10 µl toluen eklenmiştir, seri olarak yarı yarıya seyreltme yaparak toplamda 4 standart çözelti elde edilmiştir. Bu çözeltilerin toluen kütlesi sırasıyla 8.67, 4.34, 2.17, 1.09 mg’dır ve bu çözeltilerin GC-MS’te verdiği alan kullanılarak toluen konsantrasyonuna karşı kalibrasyon grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.11). Bu deney düzeneğinde

Türkiye’den temin edilen SNK ile hazırlanan nanolif filtre seti (PA6-SNK) test edilmiştir. Adsorpsiyon döngüsünde sürekli ve yüksek konsantrasyonda (%0,6-0,7 v/v) toluen beslemesinde 1 saat deney süresinde çalışılarak maksimum adsorpsiyon kapasitesi belirlenmiştir. Deney süresince 15 dakika aralıklarla reaktör çıkışından numune alınmıştır. Giderim verimi için zamana bağlı C/C_0 grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.11 : Filtrasyon düzeneği-1’e ait toluen kalibrasyon grafiği.

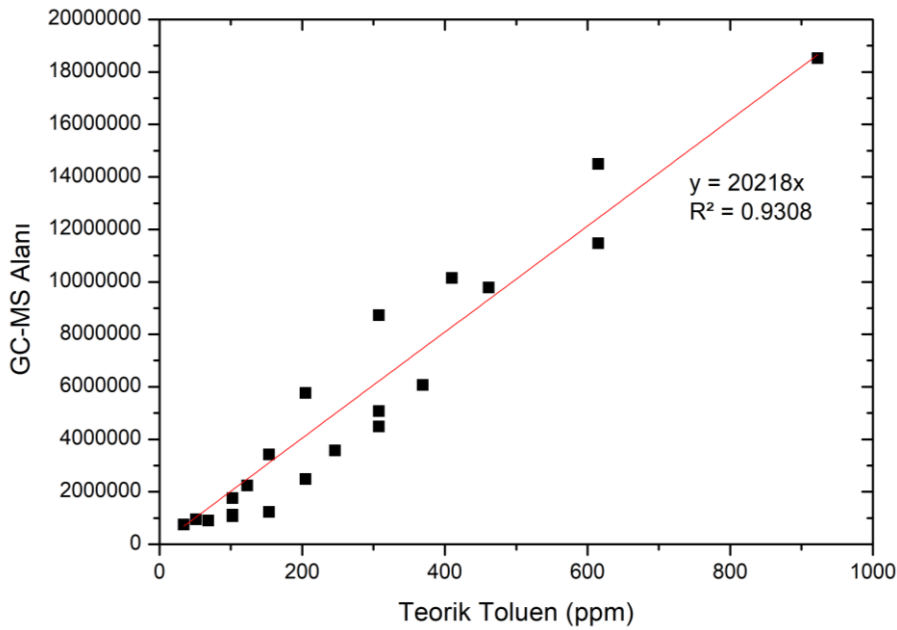


Şekil 3.12 : Filtrasyon düzeneği-1.

Adsorpsiyon testinin yapıldığı ikinci düzenekte de hava sızdırmazlığı sağlanmış ve modifiye edilmiş bir filtrasyon hücresinde gerçekleştirilmiştir. Nanolif filtrelerin adsorpsiyon ve oksidasyon testi için Şekil 3.15’te görülen sistem oluşturulmuştur. İlk bileşen sürekli ve sabit hava akışını sağlayan PEAK marka CO₂ ve hidrokarbondan arıtılmış kuru hava jeneratörü, ikinci bileşen gelen hava akışının ayarlandığı kütle akış

ölçer (MFC), üçüncü bileşen adsorpsiyon ve oksidasyonun bir arada ölçümünün sağlandığı filtrasyon hücresi, dördüncü bileşen online ve sürekli olarak ölçüm yapabilen ve MFC'ye bağlı olarak çalışan CO₂ dedektörü, beşinci bileşen tolueni buhar fazında tutmak ve yoğunlaşmasını engellemek için kullanılan ısıtıcı ve altıncı bileşen CO₂ sinyallerinin toplandığı bilgisayardır. Bu düzenek, hem adsorpsiyon hem de oksidasyon deneyleri için kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. Bu düzenekte gerçek iç ortam havasında bulunabilecek toluen konsantrasyonunda çalışmak için enjeksiyon yöntemiyle besleme yapılmıştır. Sistemde toluen enjeksiyonu yapabilmek için filtrasyon hücresinin kapak kısmında bulunan T bağlantıya enjeksiyon şırıngası bağlanmıştır.

Nanolif filtreler test edilmeden önce oluşturulan sistemin davranışını anlamak ve toluen kalibrasyon grafiği oluşturabilmek için filtrasyon hücresine numune yerleştirilmeden 1 µL, 2 µL ve 3 µL toluen enjekte edilerek numune alınmıştır. Bu numunelerin GC-MS analiz sonuçları ve teorik toluen değerleri kullanılarak toluen kalibrasyon grafiği (Şekil 3.13'deki) çizilmiştir. Bu grafiğin eğimi kullanılarak deney süresince alınmış olan tüm numunelerin toluen konsantrasyonları hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.13 : Filtrasyon düzeneği-2'e ait toluen kalibrasyon grafiği.

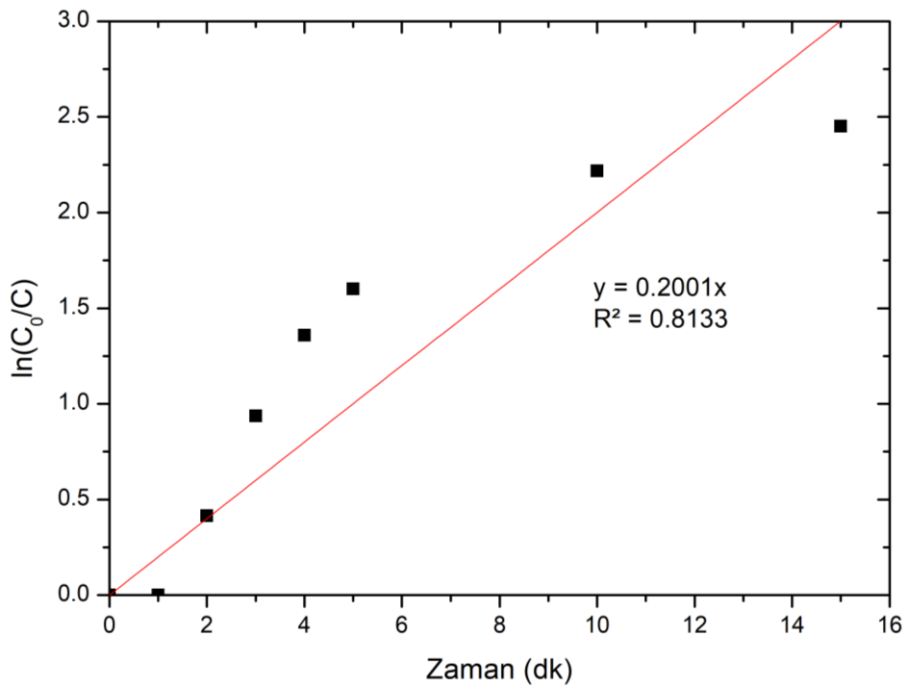
Her deney başlangıcında sisteme nanolif yerleştirilmeden 1 µL enjeksiyon yapılmış ve sistemin tekrarlanabilirliği kontrol edilmiştir. Tekrarlanan 1 µL enjeksiyonların GC-MS alanları Şekil 3.13'deki toluen kalibrasyon denkleminde hesaplanarak Şekil 3.14'te görülen 1 µL enjeksiyona ait ortalama değerlerin $\ln(C_0/C)$ grafiği

oluşturulmuştur. Adsorpsiyon deneylerinde ilk olarak reaktör kontrol amacıyla izlenmiş, daha sonra farklı dizilimlerde nanolifler yerleştirilerek aynı koşullarda adsorpsiyon deneyleri yapılmıştır. Tüm nanolif filtreler sırasıyla filtrasyon hücresine yerleştirilmiş ve 1 µL toluen enjekte edilerek adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney süresince alınan numunelerin toluen konsantrasyonları Şekil 3.13'teki denklem kullanılarak hesaplanmış ve süreye bağlı olarak reaktör çıkışında GC-MS'te toluen ölçümleri $\ln(C_0/C)$ değerleri elde edilmiştir. Bu doğruların eğiminden elde edilen eğim değerlerinden Fava ve Pierpaoli (2015) çalışmasında belirtilen yaklaşım ile nanolif filtrelerin adsorpsiyon verimleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır (Fava & Pierpaoli, 2015).

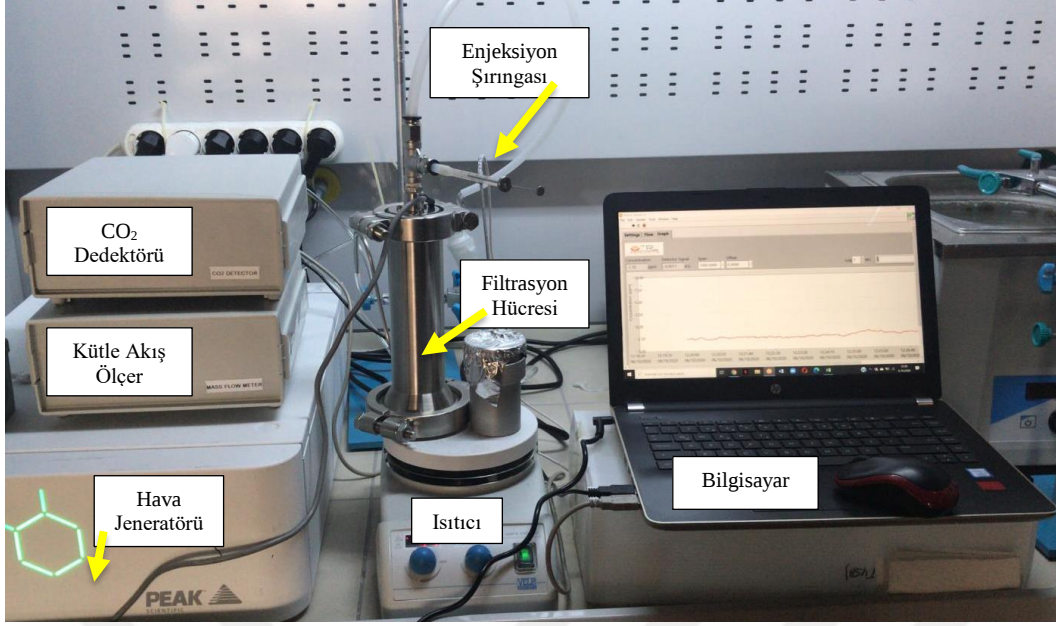
$$\frac{dC(t)}{dt} = k \cdot C(t) \quad (1)$$

$$R = \frac{k_{\text{nanolif}} - k_{\text{kontrol}}}{k_{\text{nanolif}}} \times 100 \quad (2)$$

Sisteme ilk enjeksiyon yapıldığındaki toluen konsantrasyonu ortalama %0,0432 (v/v) (432 ppm) olup 15 dakikalık deney süresi içerisinde yeniden enjeksiyon yapılmamış, toluen konsantrasyonunun filtrasyon hücresi içerisinde seyrelmeden kaynaklı ortalama %0,0037 (v/v) (37 ppm) değerine düştüğü görülmüştür. Tüm adsorpsiyon ve oksidasyon deneyleri için bu şartlar kontrol deneyi olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.14 : 1 µL toluen enjeksiyonu $\ln(C_0/C)$ grafiği.



Şekil 3.15 : Filtrasyon düzeneği-2.

Numune alma noktasında GC-MS vialleri kullanılarak ve gerekli sızdırmazlık sağlanarak 1 dk metanolde gerekli gaz akışı biriktirilmiş ve analizler GC-MS'de yapılmıştır. Metanolde biriktirme yöntemi zamana dayalı örnekleme için uygunluğu ve yüksek tekrarlanabilirliği özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Olası bir toluen kaybından dolayı numune şişeleri gecikmeden buzdolabına yerleştirilmiştir ve Agilent 7890A Agilent Gaz Kromatografi cihazı ile 2 uL enjekte edilerek ölçülmüştür. GC-MS'de HP-5MS (uzunluk: 30m, çap: 0.25 mm, film kalınlığı: 0.25 um) kolon kullanılmıştır (Şekil 3.16). Fırının başlangıç sıcaklığı 40 ° C'ye ayarlanmış ve 3 dakika bu sıcaklıkta kalmıştır. Fırın dakikada 10 ° C artışla 80 ° C'ye ulaşmıştır ve bu sıcaklıkta 1 dakika tutulmuştur. Son olarak dakikada 50°C yükselmiştir, 180°C'ye ulaşmış ve bu sıcaklıkta 3 dakika tutulmuştur. MS cihazı tarama modunda çalıştırılmıştır ve Wiley kütüphanesinin veri tabanı kullanıldı. Enjeksiyon sırasında, giriş sıcaklığı 280 ° C'ye ayarlandı ve 1:10 Split modu seçilmiştir.



Şekil 3.16 : GC-MS cihazı.

Oksidasyon düzeneğinde adsorpsiyon düzeneğine ek olarak filtrasyon hücresi çıkışı CO₂ dedektörüne bağlanmıştır. Filtrasyon hücresinin kapağında bulunan 3 adet 3 W'luk (0,885 mW/cm²) LED lambalar oksidasyon deneyi başlatılmadan 1 saat önce açıldı ve yerleştirilen nanolif filtrede bulunan fotokatalizör malzemenin aktifleşmesi sağlanmıştır. 1 saat sonunda filtrasyon hücresi çıkışı CO₂ dedektörüne bağlanmış, adsorpsiyondaki akışta (380 ml/dk) 1 µL toluen enjeksiyonu yapılmıştır. Enjeksiyon itibariyle 1 saat boyunca CO₂ ölçümü alınmış ve toplanan veriler kaydedilmiştir.

$$S_{CO_2} (\%) = \frac{\text{Üretilen } CO_2}{\text{Teorik } CO_2} \times 100 = \frac{[CO_2] \times 100}{7 \times [toluen]_i \times C_t}$$

S_{CO_2} : Oksidasyon Verimi (%)

$[CO_2]$: Fotokatalitik oksidasyon süresince üretilen CO₂ (ppm)

$[toluen]_i$: Giriş toluen konsantrasyonu (ppm)

C_t : Toluen giderimi Verimi

Toluen giderim verimi oksidasyon testi sonucunda üretilen CO₂ değerinin teorik CO₂ üretim değerine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Oksidasyonda, toluenin tam mineralizasyon sonucunda giriş toluen konsantrasyonunun 7 katı kadar CO₂ üretilmektedir. Bu hesap nanolif malzemenin deney süresince adsorbe ettiği toluen verimine göre hesaplanmıştır.

3.6.4 Filtre verimliliği testi

Filtre verimliliği testi filtre kartuşlarının, filtrelerin ve solunum maskelerinin yüksek hassasiyetle (%99,9999'a kadar) partikül madde penetrasyon değerini, filtre verimliliğini ve basınç düşüşünü analiz eden bir test sistemidir. Ayarlanabilir aerosol üretimi ile belirlenen boyutlara sahip aerosol ile belirli akış değerlerinde ölçüm yapılmaktadır.

Üretilen filtrelerin hava filtrasyonunda kullanılabilirliğini test etmek amacıyla partikül madde filtreleme verimliliği ve basınç düşüşü değerleri standart yöntemler (EN143 standardı) ile İTÜ-TEMAG'da bulunan TSI Otomatik Filtre Test Cihazı-Model 8130A ile ölçülmüştür. Testler 0,3 µm boyutunda NaCl aerosolü kullanılarak ,

95 L/dk akış koşulunda gerçekleştirilmiştir. Ölçüme ait örnek raporlama Şekil 3.17’de sunulmuştur. Test sonucunda her bir nanolifin basınç düşüşü değeri ve nüfuz etme (diğer ifade ile aerosol tutunum verimi) yüzdesi verilmektedir.

Tekstil Makina ve Malzemeleri Araştırma Laboratuvarı
İstanbul Teknik Üniversitesi, Gümüşsuyu Kampüsü, 34437 İstanbul
Tel: 0212.293 1300/2534 Faks: 0212 245 0360
e-mail: aikilic@itu.edu.tr URL: <http://www.temag.itu.edu.tr>

İTÜ

ÜRÜN DEĞERLENDİRME RAPORU PRODUCT VALIDATION REPORT	Belge Tarihi / Document Date	04.03.2020
	Belge No / Document Number	T322
	Company / Firma	
	Contact / İletişim	Derya İMER

Test Standard: NaCl, 0.3 µm, 5.3 cm/sec, 95 l/min

Cihaz/Equipment: TSI 8130a

1. Numune-Yeni E25

BASINÇ / PRESSURE (kPa)	1.623
NÜFUZİYET / PENETRATION (%)	0.00619

2. Numune-Yeni E26

BASINÇ / PRESSURE (kPa)	1.513
NÜFUZİYET / PENETRATION (%)	0.00159

3. Numune-Yeni E28

BASINÇ / PRESSURE (kPa)	1.428
NÜFUZİYET / PENETRATION (%)	0.03857

Şekil 3.17 : Filtre verimliliği örnek test raporu.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

4.1 Üretilen Nanolif Filtrelerin Yapısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.1.1 Nanolif çapı ve SEM-EDS sonuçları

Bu bölümde PAN-SNK-TiO₂, PAN-SNK-ZnO, PA6-SNK ve PA6-SNK-TiO₂ nanolif setlerine ait hesaplanan nanolif çapları ve SEM-EDS analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Hesaplanan nanolif çapları kullanarak nanolif çap dağılım grafiklerine ulaşılmıştır. Ayrıca bu bölümde, SEM-EDS analizi sonucunda ölçülen çözeltilerde bulunan nanokatklara ait temel bileşenlerin değerleri verilmiştir.

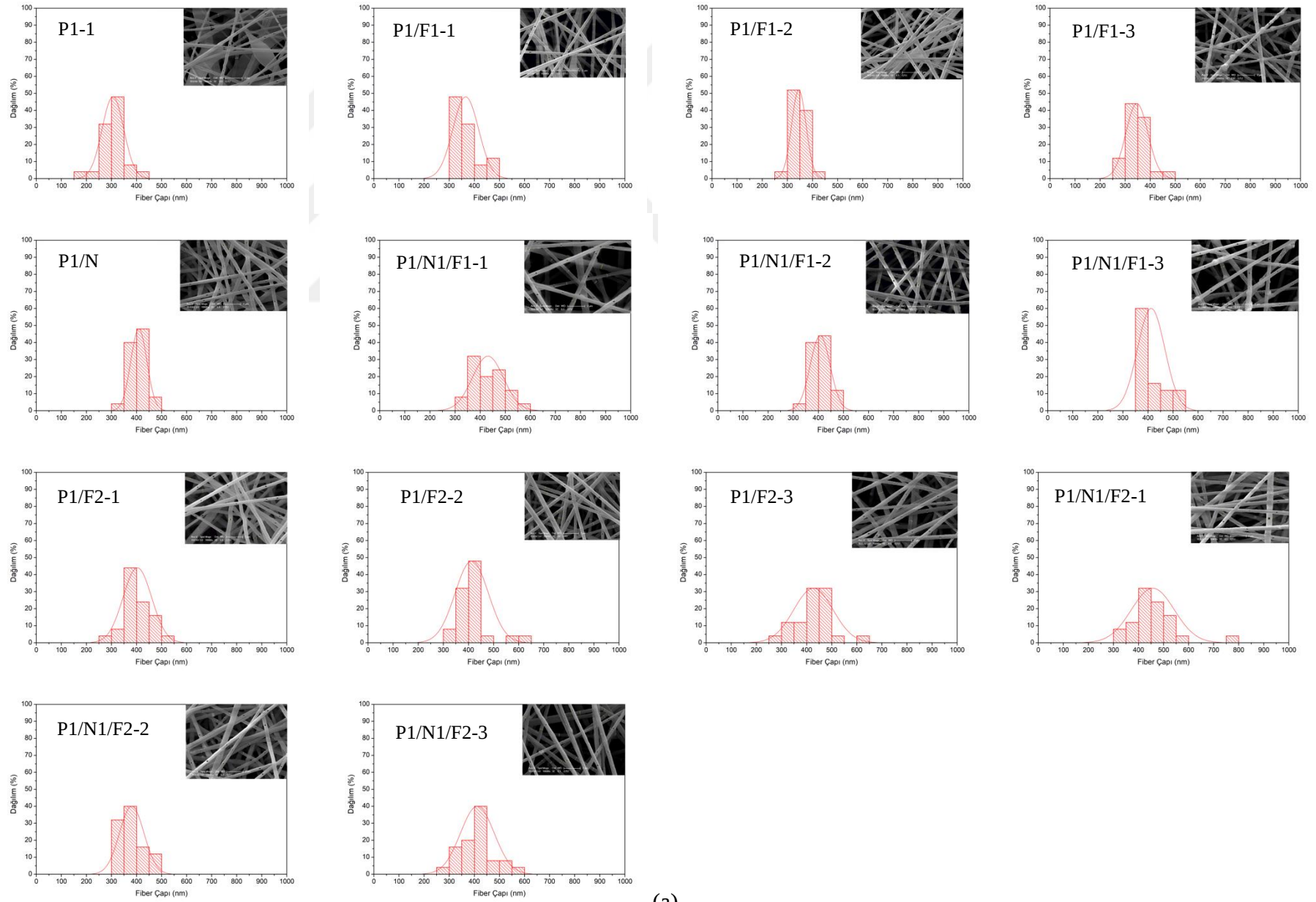
SNK-TiO₂ ve SNK-ZnO nanokatklı PAN nanolif setlerine ait SEM görüntüleri ve nanolif çapı dağılımları Şekil 4.1-a'da görülmektedir. Saf PAN nanolif filtreye ait ortalama nanolif çapı $305,6 \pm 43,4$ nm olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.1). SNK-TiO₂ nanokatklı sette nanolif çapı ortalamaları $305,6 \pm 43,4$ nm ile $430,8 \pm 61,9$ nm arasında değişmektedir. SNK-ZnO nanokatklı sette ise nanolif çapı ortalamaları $305,6 \pm 43,4$ nm ile $456,9 \pm 83,9$ nm arasında değişmektedir. Liu vd.(2015), %10 oranında PAN polimeri içeren hava filtresi çalışmasında lif çaplarını 200-600 nm aralığında ölçmüştür (Liu vd., 2015). PAN polimerine ait numunelerde ölçülen nanolif çapları literatürde uyumlu olduğu görülmüştür.

Nanokatki oranlarının değişimin nanolif çapına etkisini de Şekil 4.1-b ve c'de bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK eklentisi ile nanolif çapları artmıştır. Peres vd., (2019) yaptığı çalışmada, ağırlıkça %11 PAN polimerine sahip saf nanolifin ortalama çapı 570 nm iken ağırlıkça %3 SNK eklentisi ile nanoliflerin çapının 692 nm'ye yükseldiği gözlemlenmiştir (Peres vd., 2019).

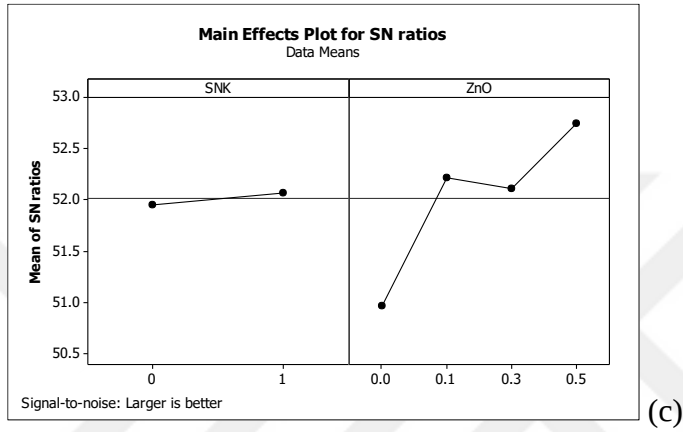
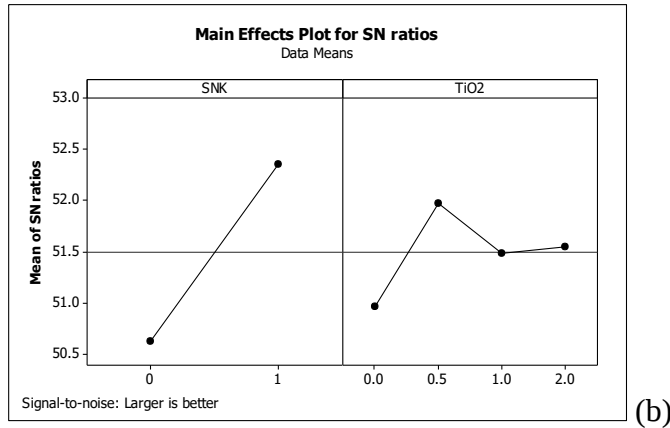
Saf PAN nanolif filtreyle karşılaştırıldığında, tüm TiO₂ oranlarında nanolif çapında artış görülmüştür, özellikle %0,5 oranında en yüksek artış göstermiştir. Bode-aluko vd., (2021) yaptığı çalışmada, ağırlıkça %8 PAN'a sahip saf nanolifin çap değerleri 70-230 nm arasında değişmekte iken TiO₂ eklemesi ile üretilen nanolifin çap değerleri 110-340 nm aralığına yükselmiştir (Bode-aluko vd., 2021). ZnO nanokatki oranındaki artış ile nanolif çapları artış göstermiştir.

Çizelge 4.1 : SNK-PAN nanoliflerine ait nanolif çapı değerleri.

Filtre Adı	SNK miktarı (%)	Fotokatalizör		Nanolif Çapı (nm)
		Türü	Miktarı (%)	
P1-1	-	-	-	305,6 ± 43,4
P1/F1-1	-	TiO ₂	0,5	365,6 ± 51,1
P1/F1-2			1	345,7 ± 28,9
P1/F1-3			2	346,6 ± 44,1
P1/F2-1	-	ZnO	0,1	412,9 ± 65,0
P1/F2-2			0,3	427,1 ± 78,2
P1/F2-3			0,5	456,9 ± 83,9
P1/N1	1	-	-	409,1 ± 32,2
P1/N1/F1-1	1	TiO ₂	0,5	430,8 ± 61,9
P1/N1/F1-1			1	407,3 ± 39,7
P1/N1/F1-3			2	412,7 ± 54,6
P1/N1/F2-1		ZnO	0,1	403,1 ± 57,0
P1/N1/F2-1			0,3	380,7 ± 48,8
P1/N1/F2-3			0,5	412,1 ± 67,2



(a)

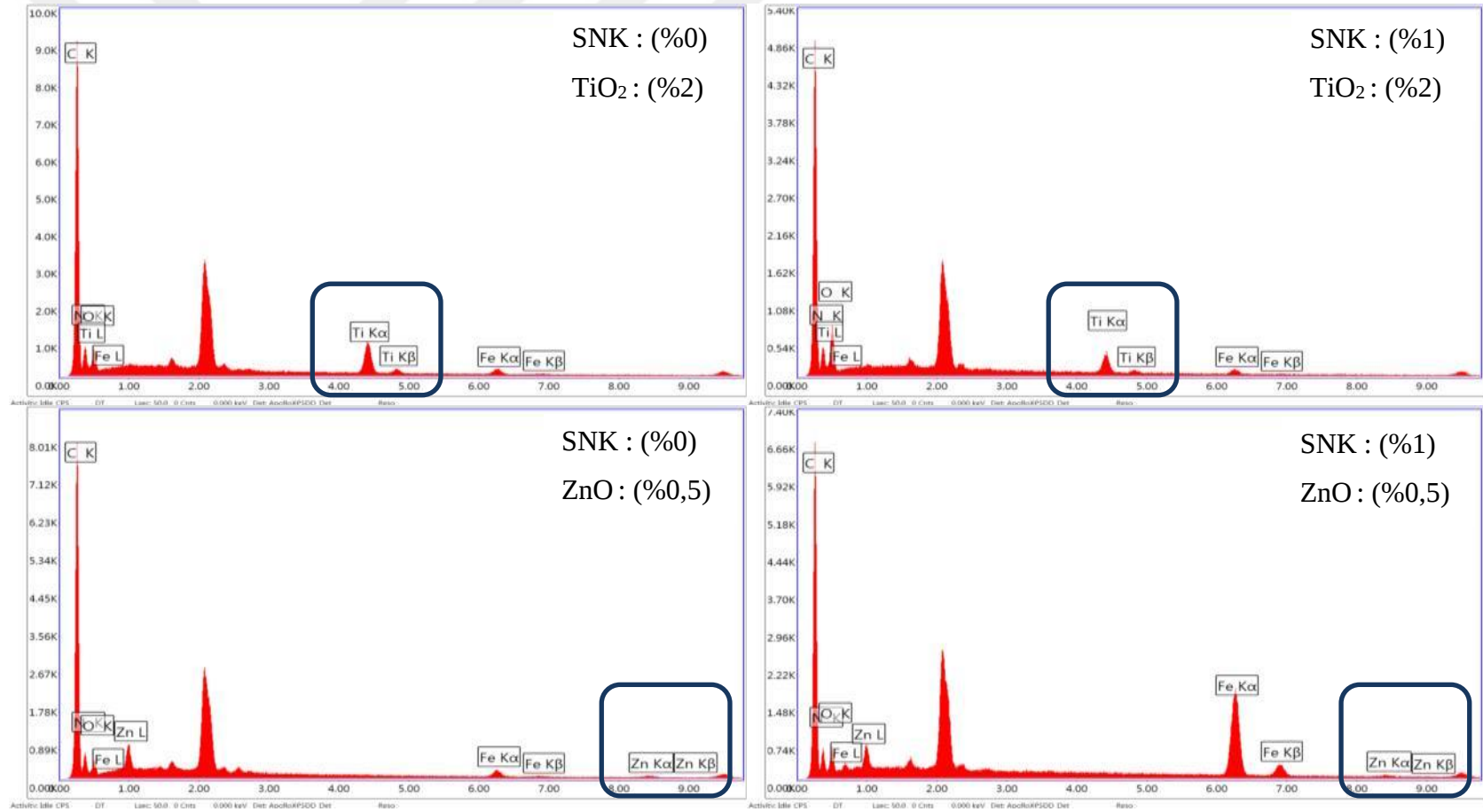


Şekil 4.1 : SNK-PAN nanoliflerine ait nanolif çapı dağılımları ve SEM görüntüsü (a) ve Taguchi S/N ana etki grafiği SNK-TiO₂ (b), SNK-ZnO (c).

PAN ile üretilen nanoliflere SNK olduğu ve olmadığı durumda TiO₂ (%2) ve ZnO (%0,5) nanokatıların en yüksek oranlarında analiz yapılmıştır. TiO₂ ve ZnO nanokatıları için analiz edilen temel bileşenlerin değerleri Çizelge 4.2’de sunulmuştur. TiO₂ nanokatı miktarı % ağırlık olarak SNK olmayan numunelerde daha yüksek çıkmıştır, aynı durum ZnO nanokatılı numuneler için de geçerli olmuştur. SNK-PAN nanolif filtrelerin SEM-EDS ölçüm grafikleri Şekil 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : SEM-EDS analizleri gerçekleştirilen nanoliflerin kompozisyonu ve analiz edilen bileşenler.

Filtre Adı	Polimer türü	Nanoadsorbent türü/miktarı	Fotokatalizör türü/miktarı	Analiz edilen temel bileşenler
P1/F1-3	PAN	-	TiO ₂ , %2	Ti, %8,77
P1/N1/F1-3		SNK, %1	TiO ₂ , %2	Ti, %5,38
P1/F2-3		-	ZnO, %0,5	Zn, %4,98
P1/N1/F2-3		SNK, %1	ZnO, %0,5	Zn, %2,64



Şekil 4.2 : PAN nanoliflerine ait SEM-EDS grafiği.

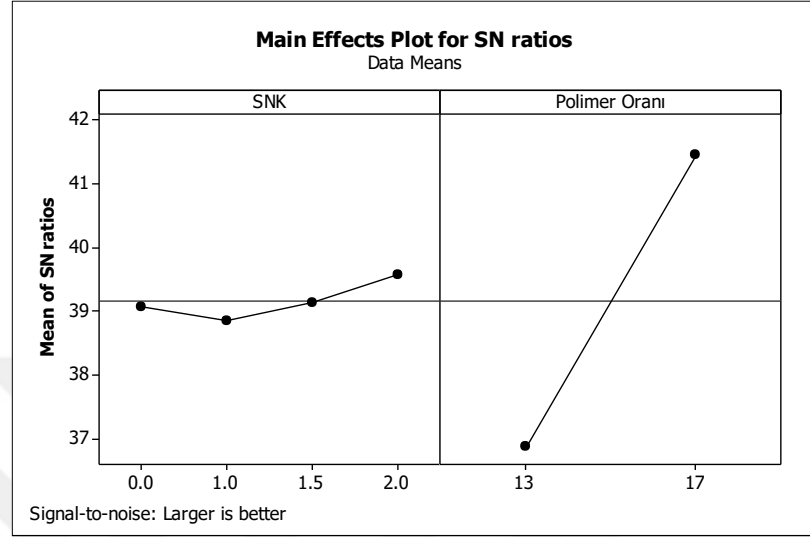
Dört farklı SNK ve iki farklı polimer konsantrasyonu içeren PA6 kompozit nanoliflerin temsili SEM görüntüleri Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Ağırlıkça %17 polimer konsantrasyonuna sahip nanolifler pürüzsüz bir yüzeye ve homojen kalınlığa sahiptir. Nanolif çapı değerleri Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere ağırlıkça %13 polimer konsantrasyonunda 50-100 nm aralığında, ağırlıkça %17 polimer konsantrasyonunda 50-150 nm aralığındadır. Ağırlıkça %13 oranındaki saf PA-6 (P2-13) filtrelerinin ortalama lif çapları, ağırlıkça %17 oranındaki saf PA-6 (P2-17) filtrelerinin ortalama lif çapları göre oldukça düşüktür. Nanolifler arasındaki SNK oranının artmasıyla, nanolif çapları ağırlıkça %17 polimer oranında $109,38 \pm 13,57$ nm'den (P2-17) $131,03 \pm 26,15$ nm'ye (P2-17/N1-2) yükselmiştir. Ağırlıkça %13 polimer oranında, polimer çözeltisindeki SNK miktarının arttırılması, liflerin çapını önemli ölçüde etkilememiş ve hazırlanan filtrelerin kalınlığı, ağırlıkça % 17 polimer çözeltisinden hazırlananlara göre daha ince olmuştur.

Çizelge 4.3 : PA6-SNK nanoliflerine ait nanolif çapı değerleri.

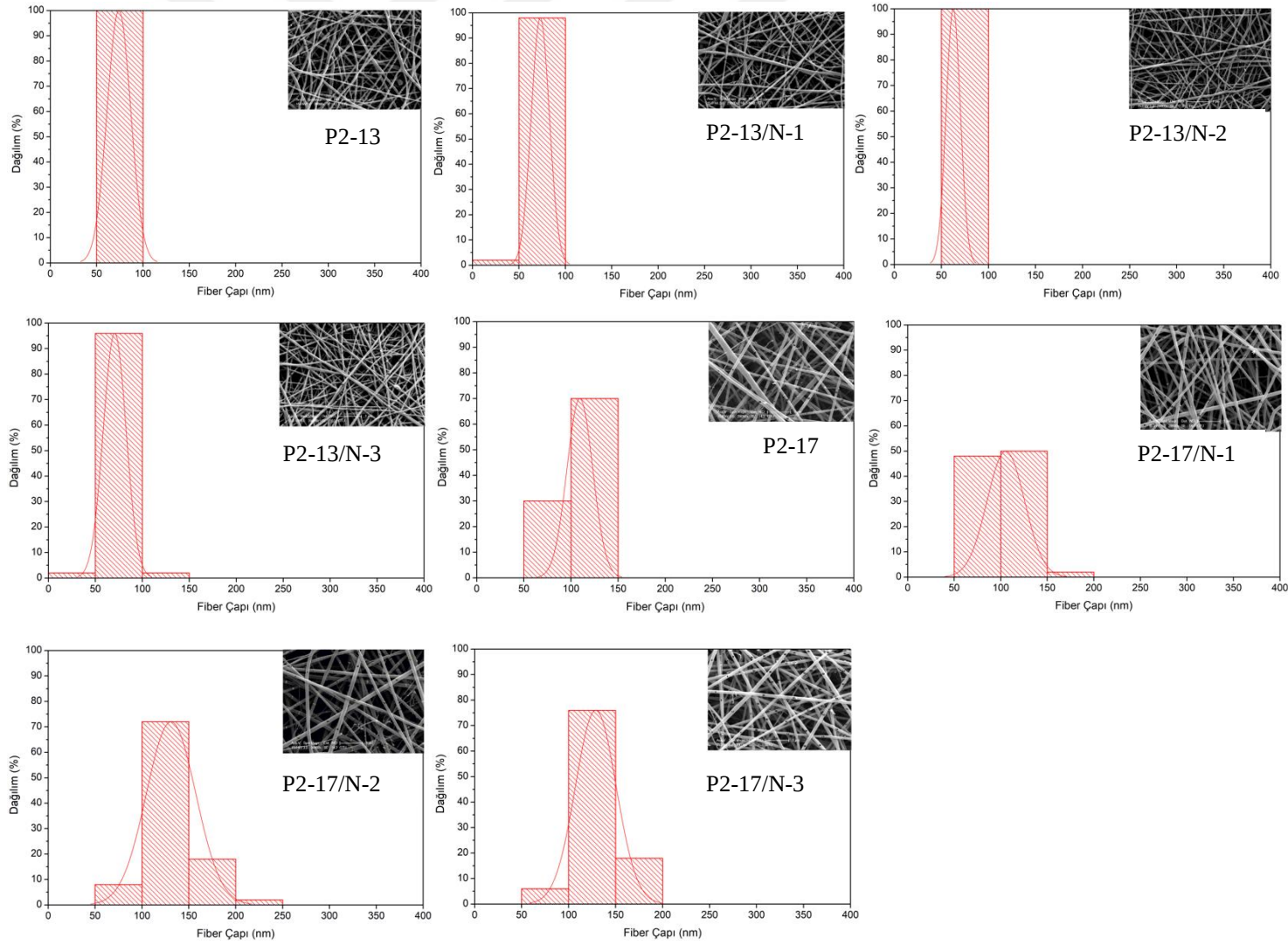
Filtre Adı	Polimer Miktarı (%)	SNK Miktarı (%)	Nanolif Çapı (nm)
P2-13	13	-	$74,0 \pm 12,6$
P2-13/N-1		1	$73,0 \pm 9,7$
P2-13/N-2	13	1,5	$62,5 \pm 7,5$
P2-13/N1-3		2	$70,5 \pm 12,0$
P2-17	17	-	$109,4 \pm 13,6$
P2-17/N-1		1	$105,4 \pm 19,9$
P2-17/N-2	17	1,5	$131,0 \pm 26,1$
P2-17/N-3		2	$128,9 \pm 21,5$

Sobolciak vd., (2017) SNK ve ko-poliamid (PA-6,12) içeren nanolifler üretmiş ve çözeltideki ko-poliamid oranı ağırlıkça %18'de sabit tutulup, SNK oranı ağırlıkça %0 ila 5 arasında değiştirilmiştir. Saf polimer nanolife (883 ± 180 nm) kıyasla polimer çözeltisindeki SNK oranının artmasıyla (%1 SNK) lif çapları 1060 ± 160 nm

değerlerine çıkmıştır. SNK ilavesi ile elektroēirme çöztisinin viskozitesinde artış olması nedeniyle lif çaplarının kalınlaşmasının beklenen bir sonuç olduğunu belirtmişlerdir (Sobolčiak vd., 2017).



Şekil 4.3 : PA6-SNK nanoliflerine ait nanolif çapı Taguchi S/N ana etki grafiğı.



Şekil 4.4 : PA6-SNK nanoliflerine ait nanolif çapı dağılımları ve SEM görüntüsü.

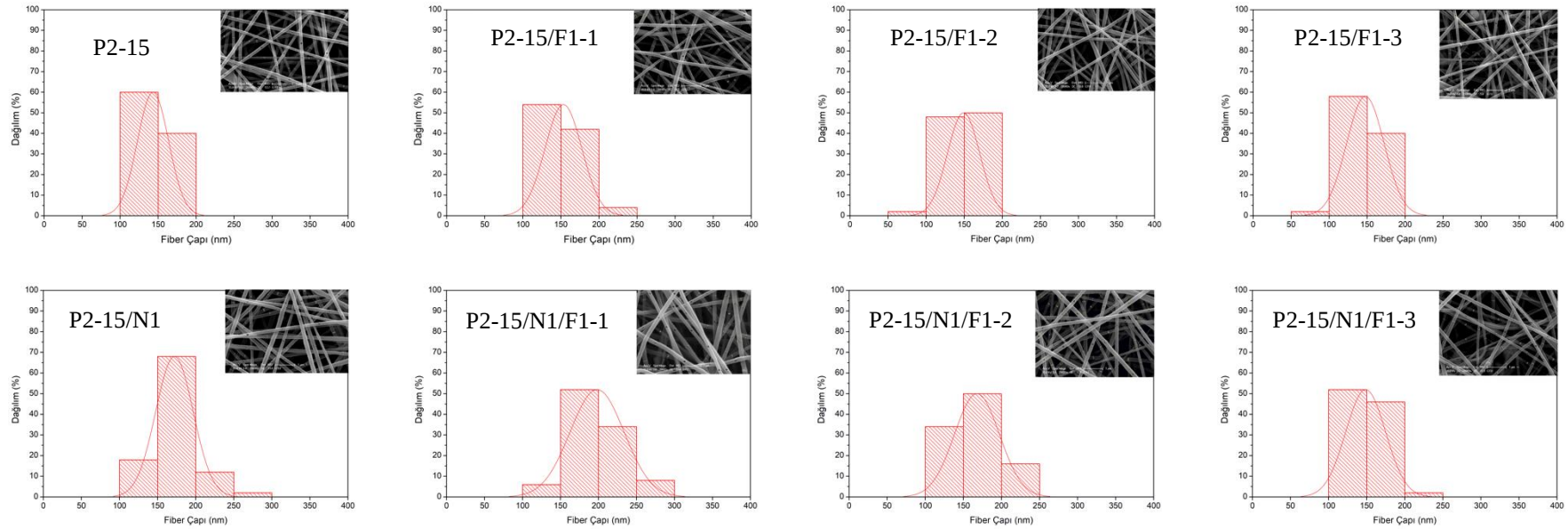
SNK-TiO₂ nanokatırlı PA6 nanolif setine ait SEM görüntüleri ve nanolif çapı dağılımları Şekil 4.5-a'da görülmektedir. Saf PA6 nanolif filtreye ait ortalama hava geçirgenliği değeri $143,3 \pm 20,5$ nm olarak ölçülmüştür. Nanolif çapı değerleri Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere ağırlıkça %15 polimer oranında 140-200 nm aralığındadır.

TiO₂ eklenmesiyle lif çapları çok fazla değişim göstermemiş, %1 SNK eklenmesiyle lif çapı $172,1 \pm 24,7$ nm değerine çıkmıştır. Nanokatı oranlarının değişiminin lif çapına etkisi de Şekil 4.5-b'de bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK eklentisi ile lif çapları artmıştır.

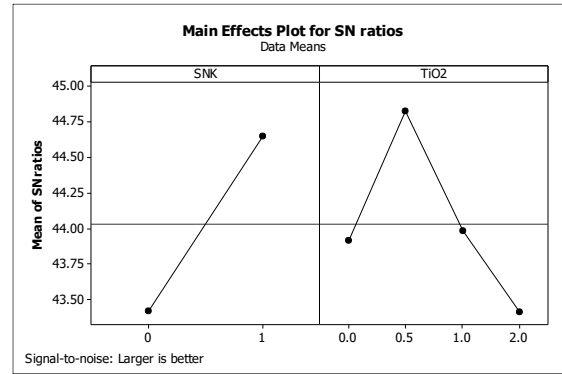
Çizelge 4.4 : PA6-SNK-TiO₂ nanoliflerine ait nanolif çapı değerleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	TiO ₂ Miktarı (%)	Nanolif Çapı (nm)
P2-15	-	-	$143,3 \pm 20,5$
P2-15/F1-1	-	0,5	$153,3 \pm 24,1$
P2-15/F1-2	-	1	$149,1 \pm 21,2$
P2-15/F1-3	-	2	$147,6 \pm 24,7$
P2-15/N1	1	-	$172,1 \pm 24,7$
P2-15/N1/F1-1	-	0,5	$198,1 \pm 35,5$
P2-15/N1/F1-1	1	1	$167,8 \pm 29,5$
P2-15/N1/F1-3	-	2	$148,6 \pm 26,1$

Sobolčiak vd., (2017) yaptığı çalışmada farklı bir polimer oranında (ağırlıkça %18) PA6,12 çözeltisiyle nanolif üretimi yapmak için sırasıyla % 0-0,2-0,5,1-2,5-5 SNK nanokatısı eklenerek nanolif üretimi yapılmış, üretilen saf nanolif çapı ortalaması 883 nm iken SNK eklenti miktarı arttıkça bu değer 1060 nm'ye kadar yükselmiştir (Sobolčiak vd., 2017). Bu sette fiber çapı ortalamaları $143,3 \pm 20,5$ nm ile $198,1 \pm 35,5$ nm arasında değişmektedir. TiO₂ nanokatısı %0,5 oranında lif çapını arttırmışken, %1 ve %2 oranlarında saf PA6 nanolif numunesine göre lif çaplarının azaldığı görülmektedir.



(a)



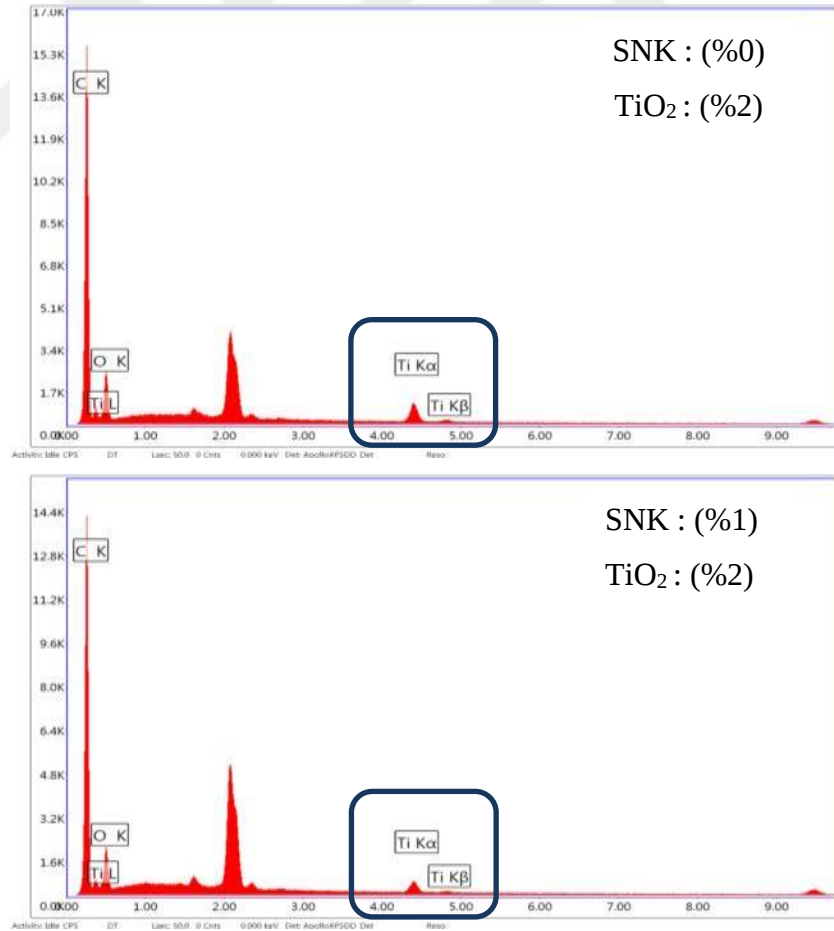
(b)

Şekil 4.5 : PA6-SNK-TiO₂ nanoliflerine ait nanolif çapı dağılımları ve SEM görüntüsü (a) ve Taguchi S/N ana etki grafiği (b).

PA6 ile üretilen nanoliflerde SNK olduğu ve olmadığı durumda TiO_2 (%2) ve ZnO (%0,5) nanokatıkların en yüksek oranlarında analiz yapılmıştır. TiO_2 ve ZnO nanokatıkları için analiz edilen temel bileşenlerin değerleri Çizelge 4.5’de sunulmuştur. TiO_2 nanokatık miktarı % ağırlık olarak SNK olmayan numunede olan numuneye göre daha yüksek çıkmıştır. SNK-PA6 nanolif filtrelerin SEM-EDS ölçüm grafikleri Şekil 4.6’de görülmektedir.

Çizelge 4.5 : SEM-EDS analizleri gerçekleştirilen nanoliflerin kompozisyonu ve analiz edilen bileşenler.

Filtre Adı	Polimer türü	Nanoadsorbent türü/miktarı	Fotokatalizör türü/miktarı	Analiz edilen temel bileşenler
P2-15/F1-3	PA6	-	TiO_2 , %2	Ti, %6,83
P2-15/N1/F1-3		SNK, %1	TiO_2 , %2	Ti, %4,36

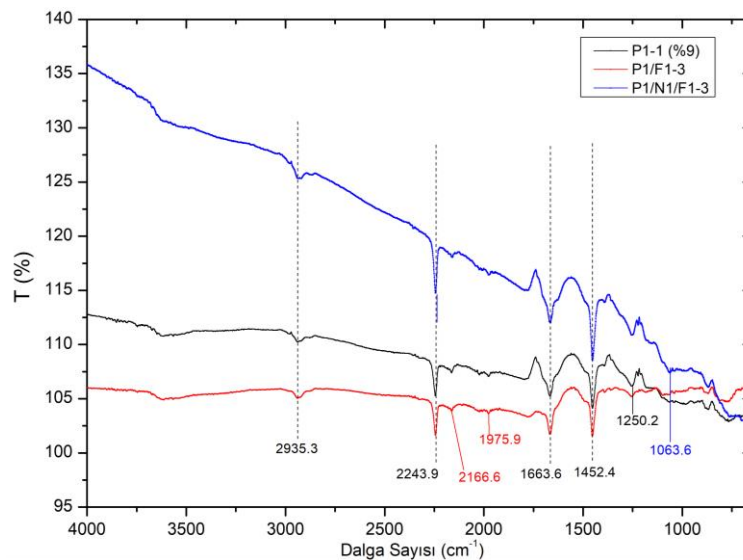


Şekil 4.6 : PA6 nanoliflerine ait SEM-EDS grafiği.

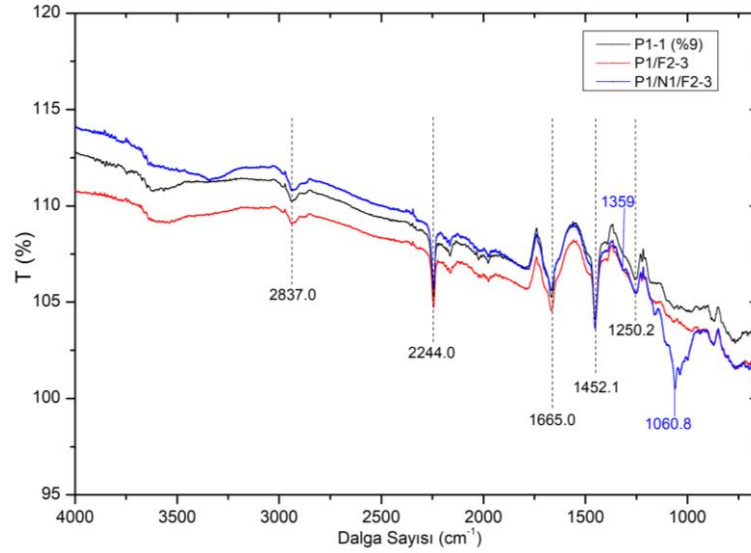
4.1.2 FTIR analizi sonuçları

Bu bölümde PAN-SNK-TiO₂, PAN-SNK-ZnO, PA6-SNK ve PA6-SNK-TiO₂ nanolif setlerine ait Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da görülen FTIR testi sonuçları değerlendirilmiştir. Nanoliflere ait FTIR analizi sonucunda toplanan veriler, farklı moleküler bağlardan kaynaklanan farklı titreşim frekansları değerlendirilmiştir.

Üretilen PAN nanoliflerin FTIR ile belirlenen organik bağ yapıları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir. PAN polimerine ait bağlar FTIR spektrumunda 2930-2940 cm⁻¹ piklerinde PAN polimerine ait metilen (CH₂) bağı tüm nanolif numunelerinde görülmüştür. 2243 ve 1452 cm⁻¹ pikleride PAN polimerinin nitril (-C≡N) bağlarını göstermektedir ve yine tüm nanolif numunelerinde gözlemlenmiştir (Liu vd., 2020). 1640-1665 aralığındaki pikin amid yapısındaki C=O grubuna ait olduğu literatürde belirtilmektedir ve bu gruptaki değişikliklerin polimer yapısına yapılan katkıların sonucunda değiştiği açıklanmaktadır (Liu vd., 2020); Chokki vd., 2019; Kudryashov vd., 2020). Pragathiswaran vd. (2020), ve Xing vd., (2020)’nin yaptıkları çalışmalarda 1060 cm⁻¹’de SNK’nın varlığını gösteren spesifik pik görülmüştür (Pragathiswaran vd., 2020; Xing vd., 2020). Pragathiswaran vd. (2020), yaptıkları çalışmada 1360 ve 1060 cm⁻¹’de simetrik- asimetrik Zn-O-Zn titreşim bandı gözlemlenmiş, bizim çalışmamızda da SNK+ZnO eklentili PAN nanoliflerde 1060,8 cm⁻¹ hem SNK hem de ZnO’ya ait spesifik pikin üst üste geldiği görülmüştür (Pragathiswaran vd., 2020).

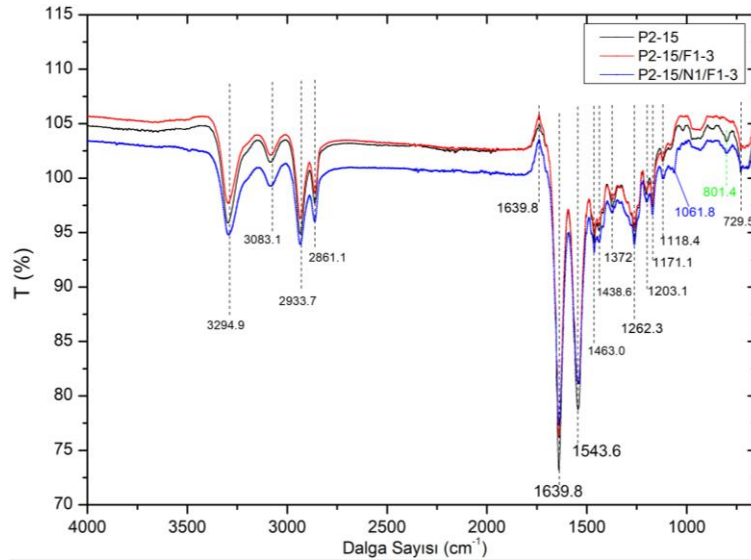


Şekil 4.7 : Saf PAN, TiO₂ ve SNK-TiO₂ nanokatlı PAN nanoliflere ait FTIR spektrumları.



Şekil 4.8 : Saf PAN, ZnO ve SNK-ZnO nanokatlı PAN nanoliflere ait FTIR spektrumları.

SNK ve SNK-TiO₂ nanokatlı PA6 nanoliflerine ait FTIR spektrumları Şekil 4.9’da verilmiştir. FTIR spektrumunda görülen PA6 polimerinin sahip olduğu bağ grupları 2933,7 ve 2861,1 cm⁻¹ pikleri CH bağı, 1463 cm⁻¹ piki CH₂ bağı, 1639,8 cm⁻¹, 1543,6 cm⁻¹ ve 1262,3 cm⁻¹ pikleri amid grubuna ait olduğu literatürde belirtilmektedir (Oh vd., 2005). Pragathiswaran vd. (2020), ve Xing vd., (2020)’nin yaptıkları çalışmalarda 1060 cm⁻¹’de SNK’nın varlığını gösteren spesifik pik görülmüştür (Pragathiswaran vd., 2020; Xing vd., 2020).



Şekil 4.9 : Saf PA6, TiO₂ ve SNK-TiO₂ nanokatlı PA6 nanoliflere ait FTIR spektrumları.

4.1.3 Mekanik dayanım testi sonuçları

Bu bölümde PAN-SNK-TiO₂, PAN-SNK-ZnO, PA6-SNK ve PA6-SNK-TiO₂ setlerine ait Çizelge 4.6, 4.7 ve 4.8’de görülen mekanik dayanım testi sonuçları ve Stress-Strain grafikleri Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de değerlendirilmiştir.

Üretilen PAN nanoliflerine ait çekme deneyi sonuçları (şekil değişimi-uzama ve gerilme verileri) kullanılarak oluşturulan Stress-Strain grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir. Bu grafik kullanılarak nanolif filtreler için çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır.

Saf PAN polimerinin çekme dayanımı ve elastisite modülü, standart sapmaları dikkate alındığında, sırasıyla 1,47 MPa ve 14,97 MPa değerlerinde yaklaşık eşit çıkmıştır. Deneysel sonuçlarımız, Liu vd., (2015) çalışmasında rapor edilen çekme dayanımı değeri (3,65 MPa) ile uyumludur (Liu vd., 2015).

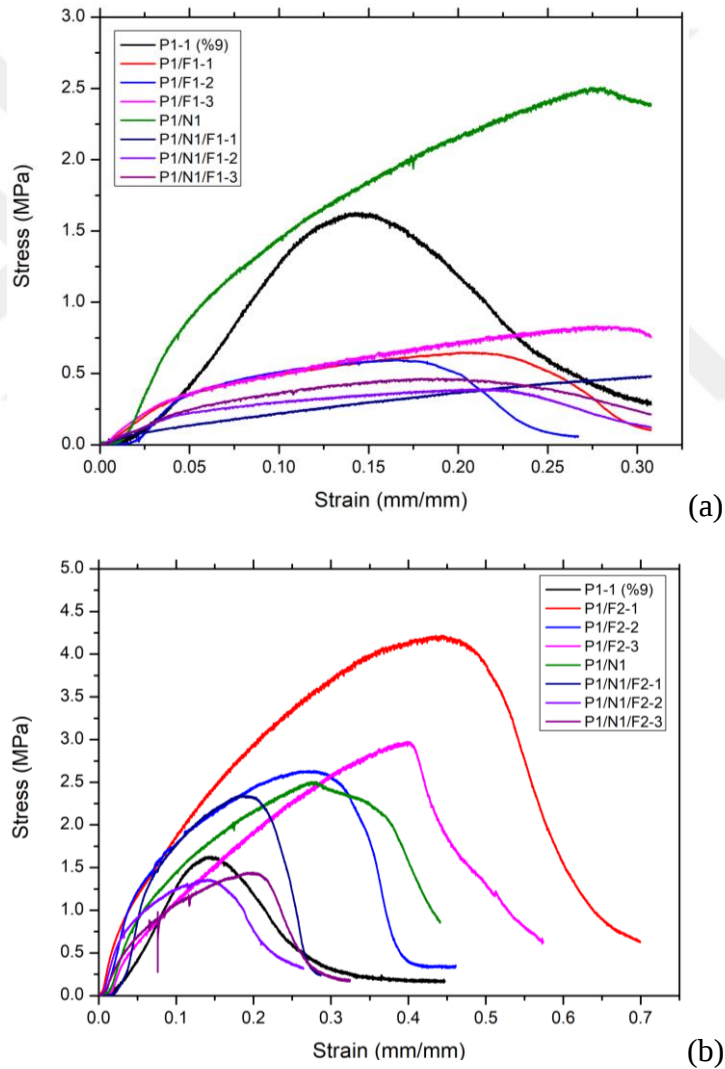
PAN polimerine TiO₂ nanokatki eklenmesi ile saf PAN polimerine göre, PAN-TiO₂ nanokompozit nanoliflerin hem elastisite modülü hem de çekme dayanımı değerlerinde azalma meydana geldiği ancak TiO₂ miktarındaki artışın nanokompozit nanoliflerin çekme dayanımlarında artışa neden olurken, elastisite modüllerinin önce arttığı ancak %2 TiO₂ oranında azaldığı Çizelge 4.6’da görülmektedir.

Saf PAN polimerine kıyasla, çekme dayanımında TiO₂ eklenmesiyle meydana gelen azalmanın sebebi, metal oksit (TiO₂) nanoeklentilerin nanolif yapısı içerisinde aglomere olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da nanoparçacık ve polimer arasındaki zayıf etkileşim nedeniyle nanoeklenti ve polimer arasında aktarılan metal iyon miktarının engellenmesine neden olabilmektedir. Ayrıca metal oksit nanopartiküllerinin aglomerasyonu PAN polimer zincirlerini bozarak nanoliflerin sertliğini azaltmaktadır. Nanolif membranların mekanik davranışları, yapıyı oluşturan her bir nanolifin iç yapısının fiziksel özelliklerine (nanolif çapı dağılımı, nanolif oryantasyonu ve porozitesi) oldukça bağlıdır (Alharbi vd., 2020).

PAN polimerine SNK katkısı eklenmesiyle hem çekme dayanımı hem de elastisite modülü değerlerinde artış gözlenmektedir (Çizelge 4.6). Ancak, PAN-TiO₂ ve PAN-ZnO nanokompozit nanolif sonuçlarına benzer şekilde, PAN-SNK nanokompozit nanoliflerine TiO₂ ve ZnO metal oksitlerinin eklenmesi hem çekme dayanımı hem de elastisite modülünde azalmaya neden olmaktadır. Bu azalma, PAN-TiO₂

nanokompozit liflerine benzer şekilde, metal oksit nanoeklentilerin nanolif yapısı içerisinde aglomere olmasından kaynaklı olabilir (Alharbi vd., 2020).

PAN polimerine ZnO nanokatki eklenmesi ile saf PAN polimerine göre, PAN-ZnO nanokompozit liflerin hem elastisite modülü hem de çekme dayanımı değerlerinde artış meydana gelmektedir (Çizelge 4.6). PAN-ZnO nanokompozit liflerin çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri kıyaslandığında, ZnO miktarındaki artışın hem çekme dayanımı hem de elastisite modülü değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu azalma, PAN-TiO₂ nanokompozit liflerine benzer şekilde, metal oksit nanoeklentilerin nanolif yapısı içerisinde aglomere olmasından kaynaklıdır (Alharbi vd., 2020).



Şekil 4.10 : PAN nanoliflerine ait Stress-Strain grafiği, (a) PAN+SNK+TiO₂
(b) PAN+SNK+ZnO.

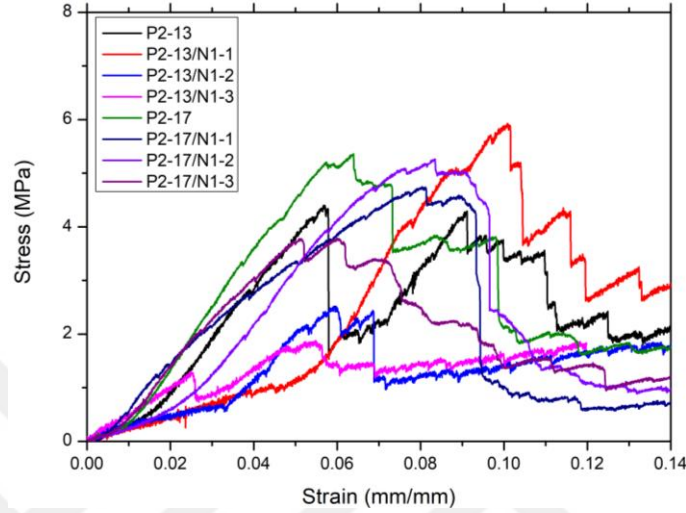
Çizelge 4.6 : SNK, TiO₂ ve ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve mekanik dayanım değerleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	Fotokatalizör Türü	Miktarı (%)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)
P1-1	-	-	-	1,47 ± 0,27	14,97 ± 1,51
P1/F1-1	-	TiO ₂	0,5	0,54 ± 0,16	7,92 ± 1,53
P1/F1-2			1	0,58 ± 0,02	11,14 ± 3,95
P1/F1-3			2	0,75 ± 0,12	9,16 ± 0,76
P1/F2-1	-	ZnO	0,1	3,61 ± 0,87	29,84 ± 10,49
P1/F2-2			0,3	2,39 ± 0,35	22,14 ± 17,73
P1/F2-3			0,5	2,92 ± 0,08	23,67 ± 3,73
P1/N1	1	TiO ₂	-	2,34 ± 0,24	24,84 ± 1,07
P1/N1/F1-1	1		0,5	0,49 ± 0,04	4,42 ± 1,08
P1/N1/F1-1			1	0,34 ± 0,07	4,56 ± 1,75
P1/N1/F1-3			2	0,41 ± 0,08	5,05 ± 0,77
P1/N1/F2-1	1	ZnO	0,1	2,48 ± 0,19	42,08 ± 6,31
P1/N1/F2-1			0,3	1,30 ± 0,09	24,95 ± 3,47
P1/N1/F2-3			0,5	1,55 ± 0,14	15,63 ± 2,26

Üretilen SNK nanokatlı PA6 nanoliflerine ait çekme deneyi sonuçları (şekil değişimi-uzama ve gerilme verileri) kullanılarak oluşturulan Stress-Strain grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir. Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi, %13 polimer oranına sahip saf PA6 nanolifine ait çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 4,32 MPa ve 102,73 MPa olarak ve %17 polimer oranına sahip saf PA6’da ise sırasıyla 4,78 MPa ve 112,22 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerler literatür verileriyle uyumludur (Mannarino & Rutledge, 2012).

%13 polimer oranındaki saf PA6 polimerine kıyasla, %1 SNK nanokatlı nanolifi TS değeri 5,89 MPa’ya ve elastisite modülü ise 136,93 MPa’ya yükselmiştir. %17 polimer oranındaki ise saf PA6 polimerine kıyasla, %1 SNK nanokatlısıyla önemli bir değişim

görülmezken, %1,5 SNK nanokatksıyla TS değeri 5,23 MPa değerine yükselmiştir. Sobolčiak ve vd. (2017) çalışmasında, kompozit nanoliflerdeki SNK oranı ağırlıkça %0,5-5 arasında değişmektedir. Çalışmada SNK oranlarında ağırlıkça %1 ile ağırlıkça %1,5 arasında çekme dayanımında artış tespit edilmiştir. Ağırlıkça %2 SNK oranından sonra, çekme dayanımı azalmıştır (Sobolčiak vd., 2017).



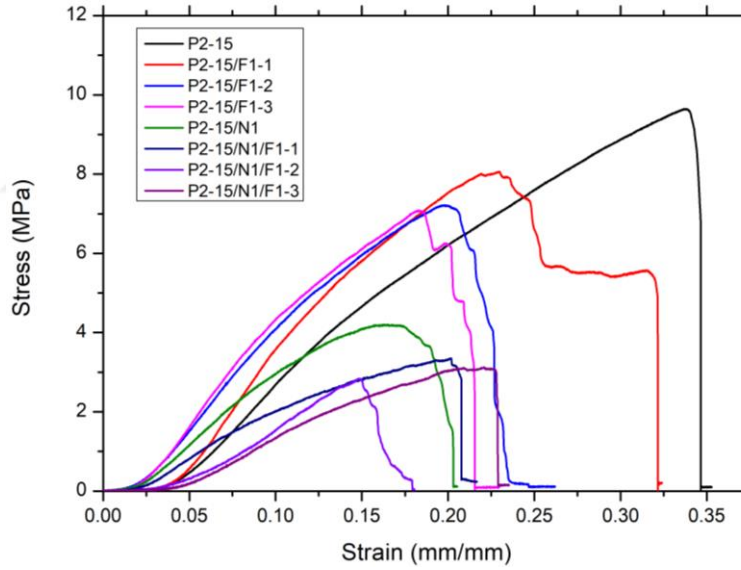
Şekil 4.11 : SNK katkılı PA6 nanoliflerine ait Stress-Strain grafiği.

Çizelge 4.7 : SNK katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve mekanik dayanım değerleri.

Filtre Adı	Polimer Miktarı (%)	SNK Miktarı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
P2-13	13	-	4,32	102,73
P2-13/N1-1		1	5,89	136,93
P2-13/N1-2	13	1,5	2,52	76,58
P2-13/N1-3		2	1,28	49,52
P2-17	17	-	4,78	112,22
P2-17/N1-1		1	4,73	61,66
P2-17/N1-2	17	1,5	5,23	101,74
P2-17/N1-3		2	3,75	84,35

Üretilen SNK-TiO₂ nanokatlı PA6 nanoliflerine ait çekme deneyi sonuçları (şekil değişimi-uzama ve gerilme verileri) kullanılarak oluşturulan Stress-Strain grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir. Saf PA6 nanolifine ait çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri sırasıyla 7,90 MPa ve 33,44 MPa olarak hesaplanmıştır ve bu değerler literatür verileriyle uyumludur (Mannarino & Rutledge, 2012).

Saf PA6 polimerine kıyasla, TiO₂ eklenmesi ile çekme dayanımı değerleri azalırken, elastisite modülü %0,5 ve %1 TiO₂ oranlarında azaldığı, %2 TiO₂ oranında artış gösterdiği bulunmuştur. PAN-TiO₂ nanokompozitlerine benzer görülen bu davranışın sebebinin yine metal oksitlerin polimer çözeltisi içerisindeki aglomerasyonu olduğu söylenebilmektedir (Alharbi vd., 2020). PA6 polimerine SNK eklentisi katılması ile mekanik dayanımın saf polimere göre hem çekme dayanımı hem de elastisite modülü değerlerinde azalmaya neden olduğu Çizelge 4.8’de görülmektedir. PA6–SNK nanokompozit fiberler yapısına TiO₂ eklenmesi, mekanik özelliklerin yine azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.12 : SNK-TiO₂ katkı PA6 nanoliflerine ait Stress-Strain grafiği.

Çizelge 4.8 : SNK ve TiO₂ katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve mekanik dayanım değerleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	TiO ₂ Miktarı (%)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)
P2-15	-	-	7,90 ± 2,43	33,44 ± 11,50
P2-15/F1-1		0,5	7,67 ± 0,56	30,01 ± 8,91
P2-15/F1-2	-	1	6,87 ± 0,50	29,41 ± 3,56
P2-15/F1-3		2	6,82 ± 0,38	36,55 ± 1,13
P2-15/N1	1	-	4,71 ± 1,57	29,79 ± 5,92
P2-15/N1/F1-1		0,5	3,38 ± 0,37	17,52 ± 1,03
P2-15/N1/F1-1	1	1	2,49 ± 0,49	23,69 ± 5,56
P2-15/N1/F1-3		2	3,07 ± 0,10	19,57 ± 2,94

4.2 Üretilen Nanolif Filtrelere Uygulanan Performans Testleri

Bu bölümde PAN ve PA6 polimerlerine ait setlerin tüm hava geçirgenliği testi sonuçları Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11’de verilmiştir. Nanokatki oranlarının değişiminin hava geçirgenliği değerlerine etkisi de Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15’te bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir.

4.2.1 Hava geçirgenliği testi sonuçları

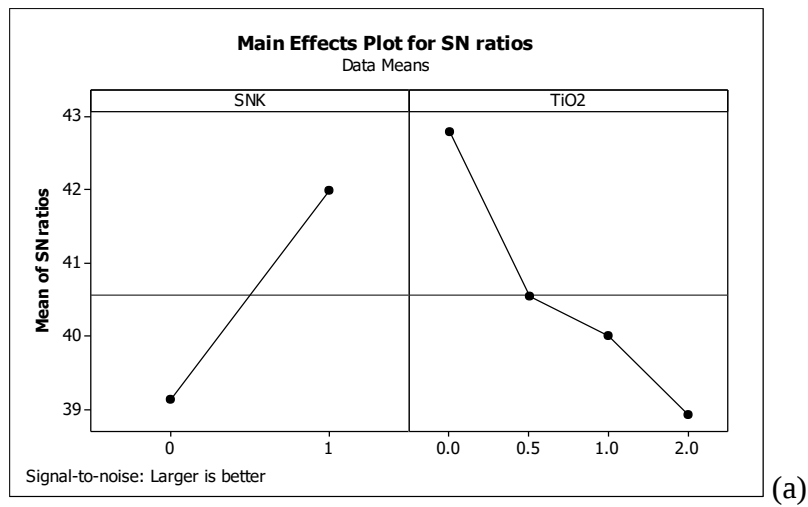
SNK-TiO₂ ve SNK-ZnO nanokatki PAN nanolif setine ait hava geçirgenliği değerleri Çizelge 4.9’da görülmektedir. Saf PAN nanolif filtreye ait ortalama hava geçirgenliği değeri 135,2 ± 11,0 mm/sn olarak ölçülmüştür. TiO₂ nanokatki oranlarının değişiminin hava geçirgenliği değerlerine etkisi de Şekil 4.13-a’da bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK eklentisi ile hava geçirgenliği değeri artmıştır. Bu sette hava geçirgenliği ortalamaları 66,5 ± 16,4 mm/sn ile 140,5 ± 8,4 mm/sn arasında değişmektedir. TiO₂ nanokatki oranı arttıkça hava geçirgenliği değerleri azalmıştır.

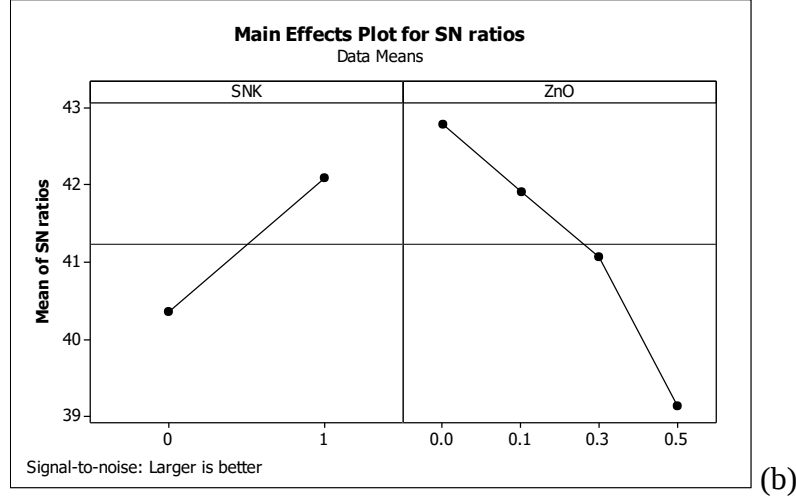
ZnO nanokatki oranlarının değişiminin hava geçirgenliği değerlerine etkisi Şekil 4.13-b’de bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK eklentisi ile hava geçirgenliği değeri artmıştır. Bu sette hava geçirgenliği ortalamaları 68,8 ±

4,2 mm/sn ile $140,5 \pm 8,4$ mm/sn arasında değişmektedir. ZnO nanokatki oranı arttıkça ise hava geçirgenliği değerleri azalmıştır.

Çizelge 4.9 : SNK-TiO₂ ve SNK-ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	Fotokatalizör		Hava Geçirgenliği (mm/sn)
		Türü	Miktarı (%)	
P1-1	-	-	-	$135,2 \pm 11,0$
P1/F1-1	-	TiO ₂	0,5	$89,0 \pm 13,1$
P1/F1-2			1	$84,3 \pm 6,7$
P1/F1-3			2	$66,5 \pm 16,4$
P1/F2-1	-	ZnO	0,1	$119,5 \pm 28,7$
P1/F2-2			0,3	$106,0 \pm 3,2$
P1/F2-3			0,5	$68,7 \pm 4,2$
P1/N1	1	-	-	$140,5 \pm 8,4$
P1/N1/F1-1	1	TiO ₂	0,5	$127,6 \pm 6,1$
P1/N1/F1-1			1	$118,8 \pm 1,5$
P1/N1/F1-3			2	$117,7 \pm 16,1$
P1/N1/F2-1	1	ZnO	0,1	$129,8 \pm 7,3$
P1/N1/F2-1			0,3	$120,7 \pm 20,6$
P1/N1/F2-3			0,5	$119,3 \pm 12,9$





Şekil 4.13 : PAN nanoliflerinin hava geçirgenliği değerlerine ait Taguchi S/N ana etki grafiği, (a) SNK-TiO₂, (a) SNK-ZnO.

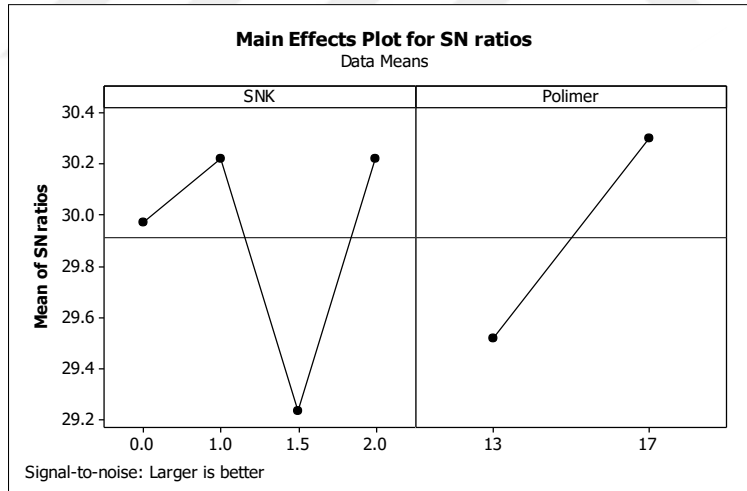
SNK nanokatklı PA6 nanolif setine ait hava geçirgenliği değerleri Çizelge 4.10'da görülmektedir. Nanokatklı oranlarının değişiminin hava geçirgenliği değerlerine etkisi de Şekil 4.14'te bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir.

%13 polimer oranındaki saf PA6 nanolif filtreye ait ortalama hava geçirgenliği değeri $34,60 \pm 5,35$ mm/sn, %17 polimer oranındaki saf PA6 nanolifin değeri ise $28,72 \pm 1,64$ mm/sn olarak hesaplanmıştır. Polat vd., (2014) tarafından yürütülen çalışmada, elektroegirme yöntemiyle üretilen poliamit 6 (ağırlıkça %10) nanolif filtrelerini, aynı çalışma prensibine sahip cihazla hava geçirgenliği testi gerçekleştirilmiştir. Saf polimer hava filtresi için hava geçirgenliği değeri 19 mm/sn olarak bulunmuştur. Ağırlıkça polimer oranındaki farklılıklar dikkate alındığında, hava geçirgenliği için de benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir (Polat vd., 2014). Benzer başka bir çalışmada Vitchuli vd., (2011), PA6 ile üretilen nanolifin 100 Pa basınçta hava geçirgenliği yaklaşık 15 mm/sn olarak ölçülmüştür (Vitchuli vd., 2011).

Taguchi ana etki analizine göre %13 polimer oranında SNK nanokatksının artışı ile hava geçirgenliği değeri azalmıştır. %17 polimer oranında SNK nanokatksının artışı ile hava geçirgenliği değeri artmıştır. %13 polimer oranında hava geçirgenliği ortalamaları $25,60 \pm 1,03$ - $34,60 \pm 5,35$ mm/sn arasında değişmektedir. %17 polimer oranında hava geçirgenliği ortalamaları $28,72 \pm 1,64$ - $35,44 \pm 1,68$ mm/sn arasında değişmektedir.

Çizelge 4.10 : SNK katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.

Filtre Adı	Polimer Miktarı (%)	SNK Miktarı (%)	Hava Geçirgenliği (mm/sn)
P2-13	13	-	34,60 ± 5,35
P2-13/N-1		1	30,52 ± 1,18
P2-13/N-2	13	1,5	25,60 ± 1,03
P2-13/N-3		2	29,68 ± 2,08
P2-17	17	-	28,72 ± 1,64
P2-17/N-1		1	34,48 ± 1,00
P2-17/N-2	17	1,5	32,76 ± 1,31
P2-17/N-3		2	35,44 ± 1,68

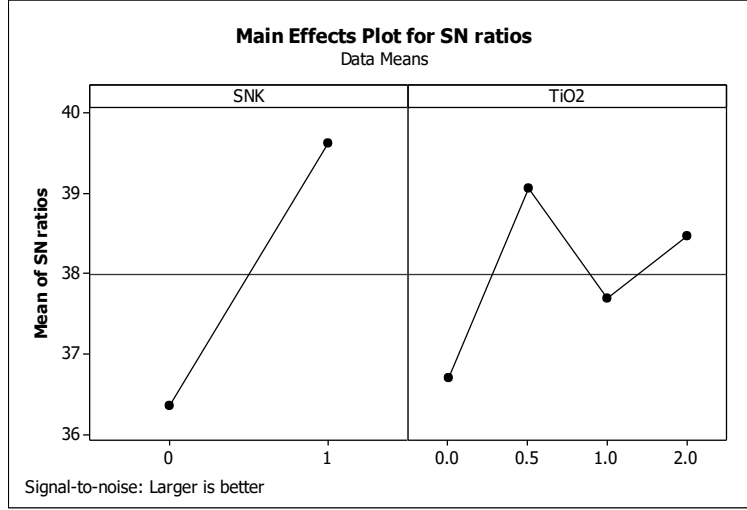


Şekil 4.14 : SNK katkılı PA6 nanoliflerine ait hava geçirgenliği değerlerinin Taguchi S/N ana etki grafiği.

SNK-TiO₂ nanokatlı PA6 nanolif setine ait hava geçirgenliği değerleri Çizelge 4.11’de görölmektedir. Nanokatlı oranlarının değişiminin hava geçirgenliği değerlerine etkisini de Şekil 4.15’te bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Saf PA6 nanolif filtreye ait ortalama hava geçirgenliği değeri $14,8 \pm 2,96$ mm/sn olarak ölçölmüştür. SNK nanokatlı PA6 setinde anlatıldığı gibi, saf PA6 nanolif filtrenin hava geçirgenliğinde Polat vd., (2014) ve Vitchuli vd., (2011) çalışmalarına benzer sonuçlar elde edilmiştir (Polat vd., 2014; Vitchuli vd., 2011). Taguchi ana etki analizine göre genel olarak SNK eklentisi ile hava geçirgenliği değerleri artmıştır. Bu sette hava geçirgenliği ortalamaları $11,4 \pm 0,8$ - $24,8 \pm 1,5$ mm/sn arasında değişmektedir. Saf PA6 nanolif numunesine göre TiO₂ nanokatlı oranı arttıkça hava geçirgenliği değerleri azalmıştır fakat SNK eklentisi olan nanolif numunelerde TiO₂ nanokatlı oranı arttıkça hava geçirgenliği değerleri artmıştır.

Çizelge 4.11 : SNK ve TiO₂ katlı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	TiO ₂ Miktarı (%)	Hava Geçirgenliği (mm/sn)
P2-15	-	-	$14,8 \pm 3,0$
P2-15/F1-1		0,5	$13,6 \pm 3,5$
P2-15/F1-2	-	1	$13,1 \pm 1,5$
P2-15/F1-3		2	$11,4 \pm 0,8$
P2-15/N1	1	-	$12,7 \pm 2,9$
P2-15/N1/F1-1		0,5	$23,7 \pm 2,1$
P2-15/N1/F1-1	1	1	$18,0 \pm 2,8$
P2-15/N1/F1-3		2	$24,8 \pm 1,5$



Şekil 4.15 : SNK-TiO₂ katkılı PA6 nanoliflerine ait hava geçirgenliği değerlerinin Taguchi S/N ana etki grafiği.

4.2.2 Su buharı geçişi testi sonuçları

Bu bölümde PAN ve PA6 polimerlerine ait setlerin su buharı geçiş testi sonuçları Çizelge 4.12, 4.13 ve 4.14'te verilmiştir. Nanokatki oranlarının değişiminin su buharı geçişi değerlerine etkisini de Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'de bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir.

SNK-TiO₂ nanokatki PAN nanolif setine ait su buharı geçişi değerleri Çizelge 4.12'de görülmektedir. SNK-TiO₂ nanokatki oranlarının değişiminin su buharı geçişi etkisi de Şekil 4.16-a'da bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK ve TiO₂ nanokatki oranındaki artış ile su buharı geçişi azalmıştır. SNK-ZnO nanokatki oranlarının değişiminin su buharı geçişi etkisi Şekil 4.16-b'de bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK ve ZnO nanokatki oranlarındaki artış ile su buharı geçişi azalmıştır.

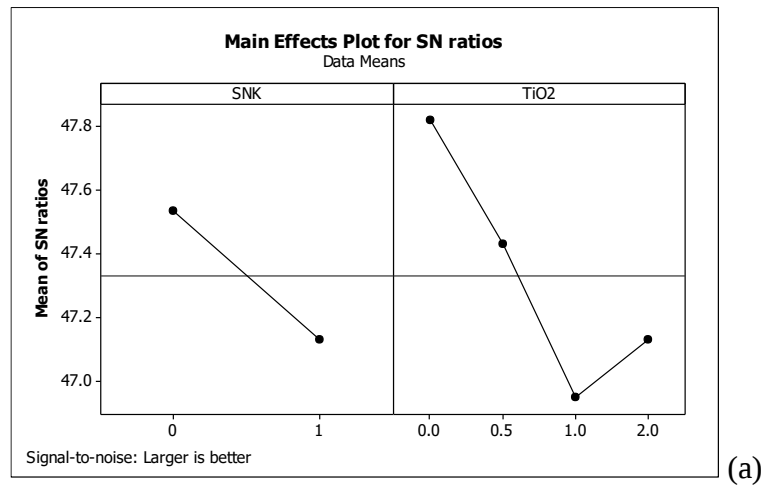
Su buharı geçişi ölçümü için su buharının tutulması ve malzemenin difüzyon özelliği önem arz eder (Sängerlaub vd., 2018), Calvino vd., (2020), hidrofilik SNK'nın nanokompozitlere eklenmesinin, nanokompozit polimer matrislerinde su tutunumunda artışa neden olduğunu belirtilmiştir (Calvino vd., 2020). P1/N1/F1 setine ait su buharı geçişi değerleri 217,9 – 258,9 gr/m²/sa aralığında ve P1/N1/F2 setine ait su buharı geçişi değerleri ise 189,5 – 258,9 gr/m²/sa aralığında ölçülmüştür.

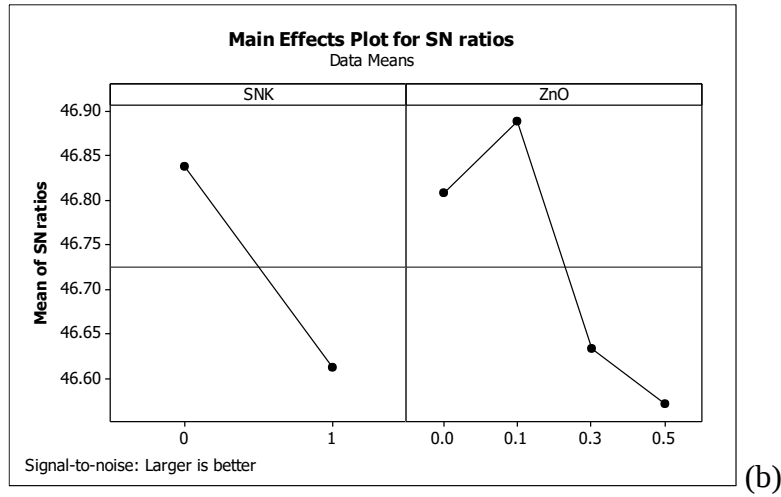
Su buharı geçişi deneyinin sonuçlarına göre PAN nanoliflerine ait su buharı geçişi değerleri SNK eklentisi ile azalmıştır, bunun nedeni Larissa vd., (2019) çalışmasında görüldüğü gibi; SNK molekülleri su buharı moleküllerini nanolif yapı içinde tutar ve

su buharının filtrenin dışına difüzyonunu engeller bu da SNK eklentisinin su buharı geçişi değerinde azalmaya neden olmaktadır (Larissa vd., 2019).

Çizelge 4.12 : SNK-TiO₂ ve SNK-ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve su buharı geçişi değerleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	Fotokatalizör		Su Buharı Geçişi (g/m ² /sa)
		Türü	Miktarı (%)	
P1-1	-	-	-	258,93
P1/F1-1	-	TiO ₂	0,5	236,82
P1/F1-2			1	227,35
P1/F1-3			2	230,51
P1/F2-1	-	ZnO	0,1	224,19
P1/F2-2			0,3	213,14
P1/F2-3			0,5	208,40
P1/N1	1	-	-	233,67
P1/N1/F1-1	1	TiO ₂	0,5	233,67
P1/N1/F1-1			1	217,88
P1/N1/F1-3			2	204,19
P1/N1/F2-1	1	ZnO	0,1	217,88
P1/N1/F2-1			0,3	198,93
P1/N1/F2-3			0,5	189,46



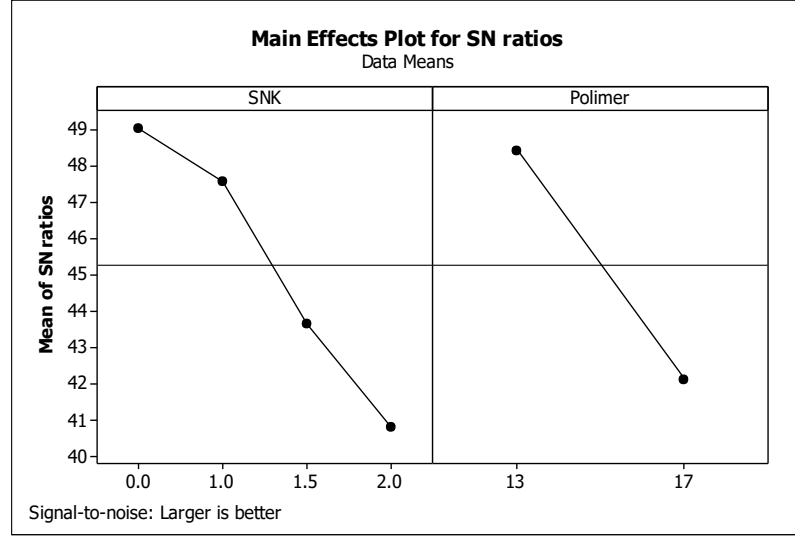


Şekil 4.16 : PAN nanoliflerinin su buharı geçişi değerlerine ait Taguchi S/N ana etki grafiği, (a) SNK-TiO₂, (a) SNK-ZnO.

SNK nanokatlı PA6 nanolif setine ait su buharı geçişi değerleri Çizelge 4.13'te görülmektedir. SNK nanokatlı ile su buharı geçişi etkisini de Şekil 4.17'de bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK nanokatlı ile su buharı geçişi azalmıştır. SNK nanokatlı PA6 setine ait su buharı geçişi değerleri 97,89 – 506,30 gr/m²/sa aralığında ölçülmüştür. PAN polimeri ile üretilen set ile benzer şekilde, PA6 setinin su buharı geçişi değerleri de SNK eklentisi ile azalmıştır (Larissa vd., 2019).

Çizelge 4.13 : SNK katlı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve su buharı geçişi değerleri.

Filtre Adı	Polimer Miktarı (%)	SNK Miktarı (%)	Su Buharı Geçişi (g/m ² /sa)
P2-13	13	-	506,30
P2-13/N-1		1	419,97
P2-13/N-2	13	1,5	183,14
P2-13/N-3		2	123,15
P2-17	17	-	157,90
P2-17/N-1		1	135,78
P2-17/N-2	17	1,5	126,30
P2-17/N-3		2	97,89

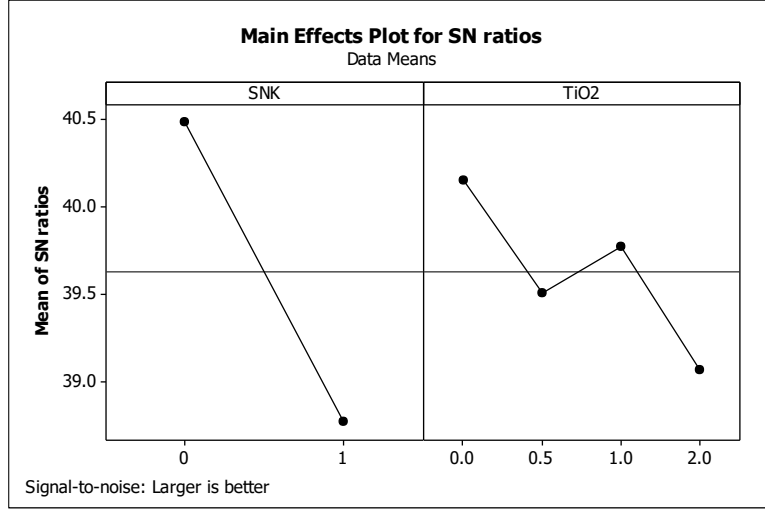


Şekil 4.17 : SNK nanokatlı PA6 nanoliflere ait su buharı geçişi Taguchi S/N ana etki grafiği.

SNK-TiO₂ nanokatlı PA6 nanolif setine ait su buharı geçişi değerleri Çizelge 4.14'te görölmektedir. SNK-TiO₂ nanokatlı oranlarının değişiminin su buharı geçişi etkisi Şekil 4.8'de bulunan Taguchi Ana Etki grafiğinde verilmiştir. Bu grafiğe göre SNK ve TiO₂ nanokatlı oranındaki artış ile su buharı geçişi azalmıştır. SNK-TiO₂ nanokatlı PA6 setine ait su buharı geçişi değerleri 85,26 – 121,57 gr/m²/sa aralığında ölçölmüştür. PAN polimeri ile üretilen set ile benzer şekilde, PA6+SNK+TiO₂ setinin su buharı geçişi değerleri de SNK eklentisi ile azalmıştır (Larissa vd., 2019).

Çizelge 4.14 : SNK ve TiO₂ katlı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve hava geçirgenliği değerleri.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	TiO ₂ Miktarı (%)	Su Buharı Geçişi (g/m ² /sa)
P2-15	-	-	121,57
P2-15/F1-1		0,5	101,04
P2-15/F1-2	-	1	107,36
P2-15/F1-3		2	94,73
P2-15/N1	1	-	85,26
P2-15/N1/F1-1		0,5	88,41
P2-15/N1/F1-2	1	1	88,41
P2-15/N1/F1-3		2	85,26



Şekil 4.18 : SNK-TiO₂ nanokatırlı PA6 nanoliflere ait su buharı geişı Taguchi S/N ana etki grafiğı.

4.2.3 Toluen adsorpsiyonu ve oksidasyonu testi sonuçları

Bu bölümde PAN ve PA6 polimerlerine ait nanoliflerin adsorpsiyon testi sonucu hesaplanan grafikleri (Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21) ve adsorpsiyon verimleri (Çizelge 4.15 ve 4.16) verilmektedir.

SNK-TiO₂ ve SNK-ZnO nanokatırları ile üretilen PAN nanolif filtrelerin adsorpsiyon grafikleri zamana karşı $\ln C_0/C$ grafiğı Şekil 4.19-a ve 4.19-d arasında ve adsorpsiyon verimi Çizelge 4.15’te verilmiştir. PAN polimeri ile üretilmiş nanoliflerin adsorpsiyon verimi ortalama %42,1 değerinde ölçülmüştür. TiO₂ eklenmesiyle adsorpsiyon verimi %0,5 TiO₂ eklentisiyle artmış, artan TiO₂ oranlarında azalmış ve saf polimere göre daha düşük olmuştur. ZnO katkısının %0,1 oranında adsorpsiyon kapasitesi azalmış daha sonra artan ZnO oranlarında artmıştır. SNK katkılı nanolifler incelendiğinde saf nanolife göre SNK eklenmesi adsorpsiyon kapasitesi değerini artmıştır. PAN+SNK içeren nanoliflere TiO₂ eklenmesiyle adsorpsiyon kapasitesi SNK içermeyen PAN+TiO₂’li sete göre azalmış, ZnO eklenmesiyle önemli bir değışiklik görülmemiştir.

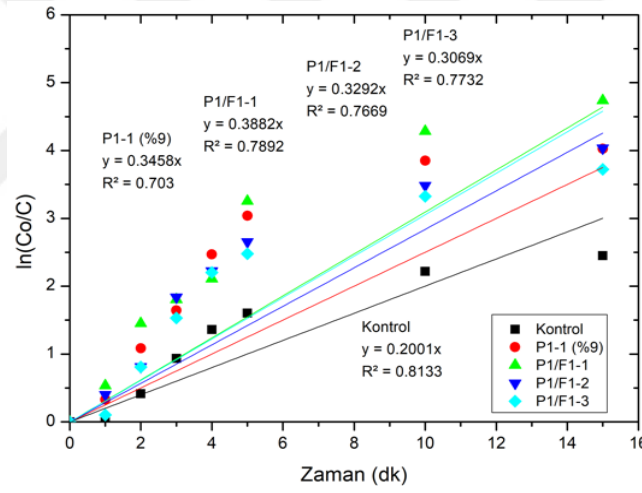
PAN polimerine ait oksidasyon verimleri Çizelge 4.15’te verilmiştir. SNK-TiO₂ nanokatırları ile üretilen PAN nanolif filtrelerin oksidasyon verimi %0,2 – 5,4 aralığında değışmektedir. SNK-ZnO nanokatırları ile üretilen PAN nanolif filtrelerin oksidasyon verimi %0,3 – 2,6 aralığında değışmektedir. Oksidasyon deneyinde CO₂ ölçümünün akışta yapılması, kullanılan UV-LED lambanın ışık şiddetinin normal

mobil sistemlere yakın düşük seçilmesi ve uygulanan filtrenin alanın küçük olması oksidasyon verimlerinin genel olarak düşük olmasına neden olmuştur.

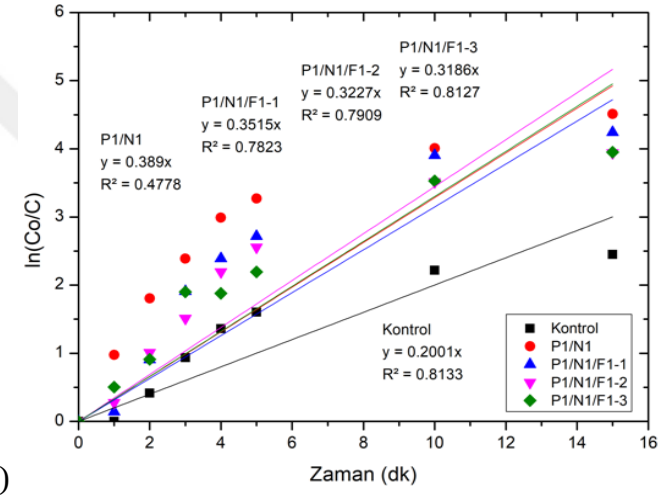
Oksidasyon testinde üretilen SNK-TiO₂ katkılı PAN nanoliflerde CO₂ miktarı TiO₂ katkılı nanoliflere göre daha düşük çıkmıştır. Benzer olarak, SNK-ZnO katkılı PAN nanoliflerde de sadece ZnO katkılı nanoliflere göre daha düşük oksidasyon görülmüştür. PAN nanoliflerinin tamamında TiO₂/ZnO katkısındaki artış ile üretilen CO₂ miktarı artmaktadır.

Çizelge 4.15 : PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları, adsorpsiyon ve oksidasyon verimleri.

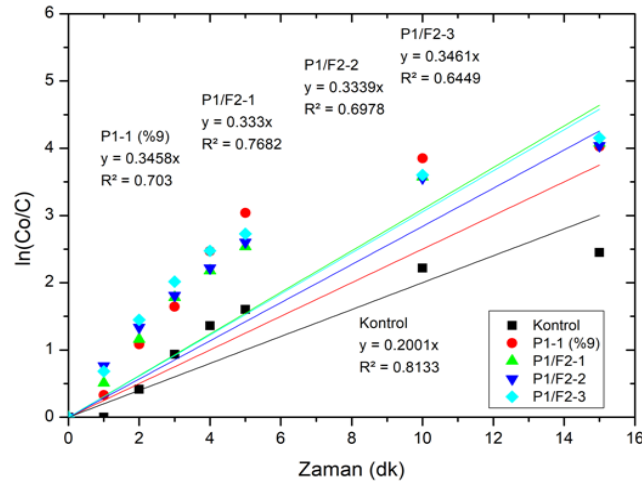
Filtre Adı	SNK	Fotokatalizör		Adsorpsiyon	Oksidasyon
	Miktarı (%)	Türü	Miktarı (%)	Verimi (%)	Verimi (%)
P1-1	-	-	-	42,1	-
P1/F1-1	-	TiO ₂	0,5	48,5	0,2
P1/F1-2			1	39,2	1,3
P1/F1-3			2	34,8	5,4
P1/F2-1		ZnO	0,1	39,9	0,3
P1/F2-2	0,3		40,1	0,3	
P1/F2-3	0,5		42,2	2,6	
P1/N1	1		-	48,6	-
P1/N1/F1-1	1	TiO ₂	0,5	43,1	0,6
P1/N1/F1-1			1	38,0	0,3
P1/N1/F1-3			2	37,2	3,7
P1/N1/F2-1		ZnO	0,1	40,5	1,5
P1/N1/F2-1	0,3		45,9	2,0	
P1/N1/F2-3	0,5		42,2	1,5	



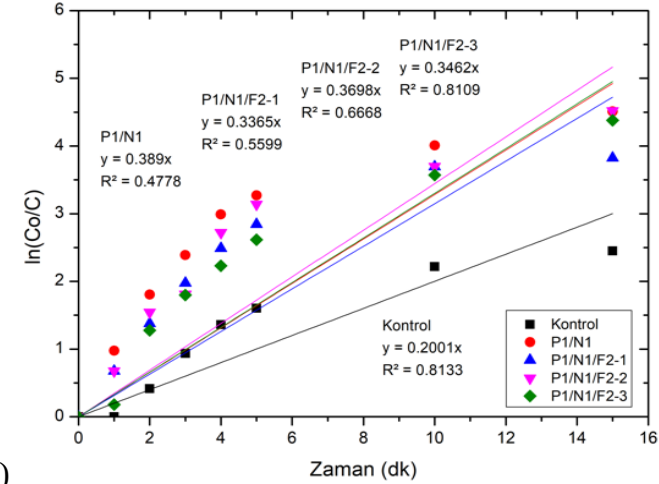
(a)



(b)



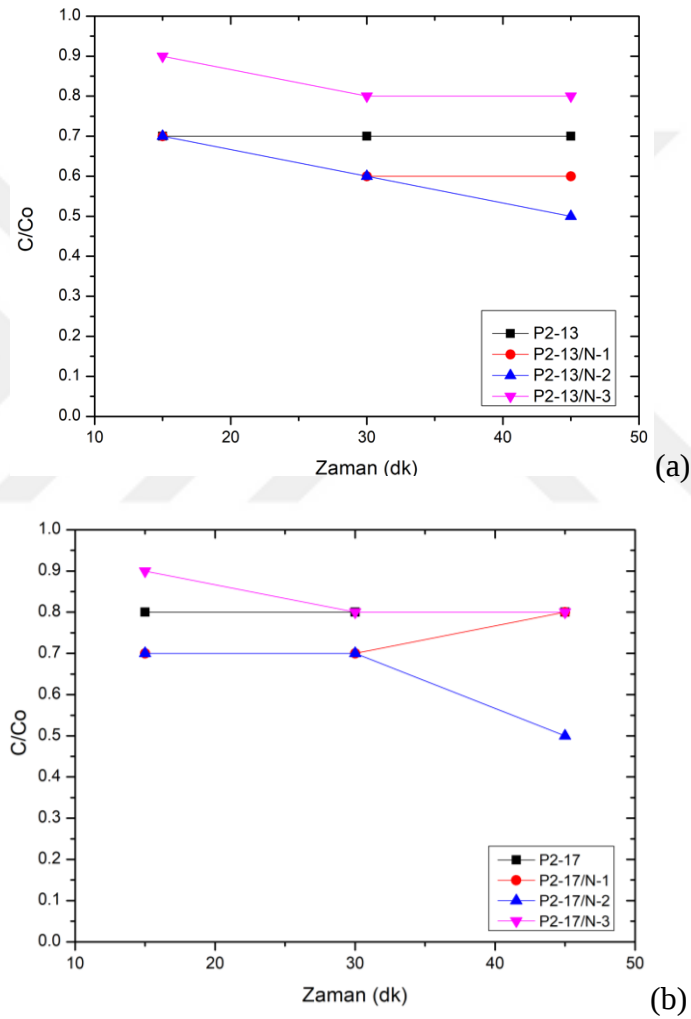
(c)



(d)

Şekil 4.19 : PAN nanoliflerin zamana bağlı adsorpsiyon grafikleri ($\ln C_0/C$ -zaman) (a) PAN+TiO₂ nanolifler, (b) PAN+SNK+TiO₂ nanolifler, (c) PAN+ZnO nanolifler, (d) PAN+SNK+ZnO nanolifler.

Kompozit SNK nanokatlı ağırlıkça %13 ve %17 polimer oranlarında PA6 nanoliflerin tolueen adsorpsiyon grafikleri Şekil 4.20’de verilmiştir. Adsorpsiyon döngüsünde, tolueenle kirletilmiş hava akımının filtre çıkışından her 15 dakikada bir numune alınmıştır. Belirli akışta ve zamana bağılı adsorpsiyon verimleri (C / C_0) hesaplanmıştır. Akış süresi 45 dakika tutulmuştur çünkü yapılan ön testlere göre 45 dakika ile 60 dakika arasında önemli bir fark gözlenmemiştir. Adsorpsiyon test sistemindeki yüksek hava akış hızı ve küçük filtre alanı nedeniyle kısa sürede kararlı duruma ulaşılmıştır.

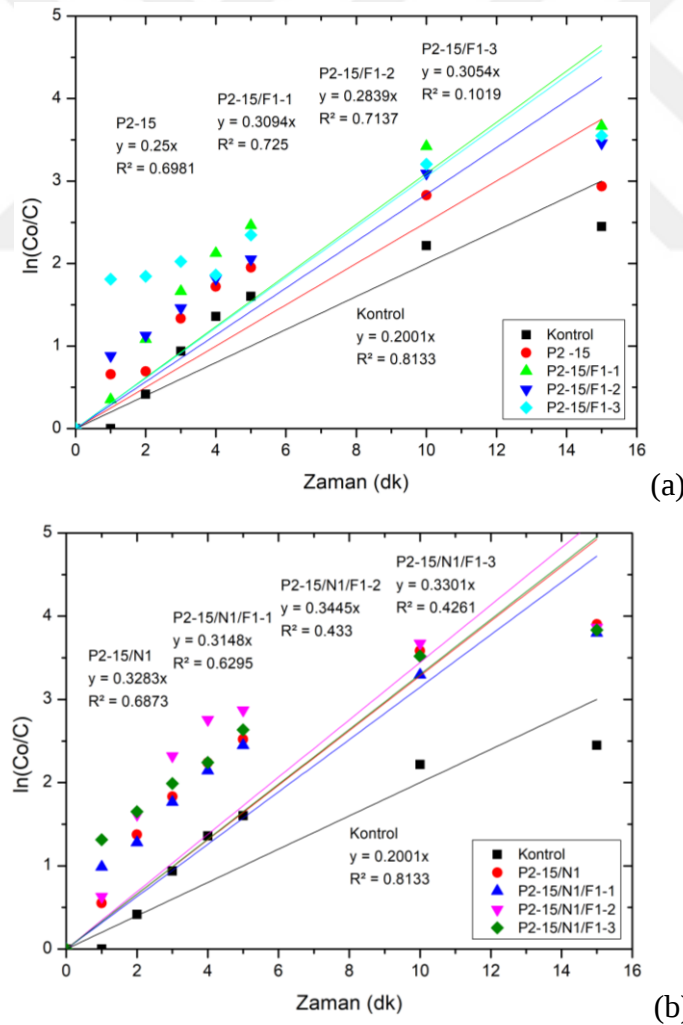


Şekil 4.20 : PA6 nanoliflerin zamana bağılı adsorpsiyon grafikleri ($\ln C/C_0$ -Zaman)
 (a) %13 polimer oranında SNK-PA6 nanolifleri,
 (b) %17 polimer oranında SNK-PA6 nanolifleri.

SNK oranı her iki polimer konsantrasyonunda arttıkça, tolueen adsorpsiyon verimliliği artmıştır ancak ağırlıkça %2 SNK oranında (P2-17/N1-3) tolueen adsorpsiyon verimliliği, saf polimer nanolif (P2-17) ile karşılaştırıldığında değişmemiştir. Her iki

polimer oranında ağırlıkça %1,5 SNK oranında (P2-13/N1-2 ve P2-17/N1-2) nanoliflerde adsorpsiyon döngüsünün verimliliği %50'e ulaşmıştır, diğer SNK oranlarında üretilen nanoliflerden çok daha yüksektir.

PA6+SNK+TiO₂ nanolif filtrelerin adsorpsiyon grafikleri zamana karşı $\ln(C_0/C)$ grafiği Şekil 4.21-a ve 4.21-b'de verilmiş ve adsorpsiyon verimi Çizelge 4.16'da sunulmuştur. PA6 polimeri ile üretilmiş nanoliflerin adsorpsiyon verimi ortalama %20 değerinde ölçülmüştür. TiO₂ eklenmesiyle adsorpsiyon kapasitesi TiO₂ eklentisiyle yaklaşık %15 oranında artmıştır. SNK katkılı nanolifler incelendiğinde saf nanolife göre SNK eklenmesi adsorpsiyon kapasitesi değerini arttırmış %39,1 değerine çıkmıştır. PA6+SNK içeren nanoliflere TiO₂ eklenmesiyle adsorpsiyon kapasitesi SNK içermeyen PA6+TiO₂'li sete göre artmıştır. PA6 nanoliflerin adsorpsiyon kapasiteleri yüksek polimer konsantrasyonu kullanılmasına rağmen PAN nanoliflerden daha düşük olmuştur.



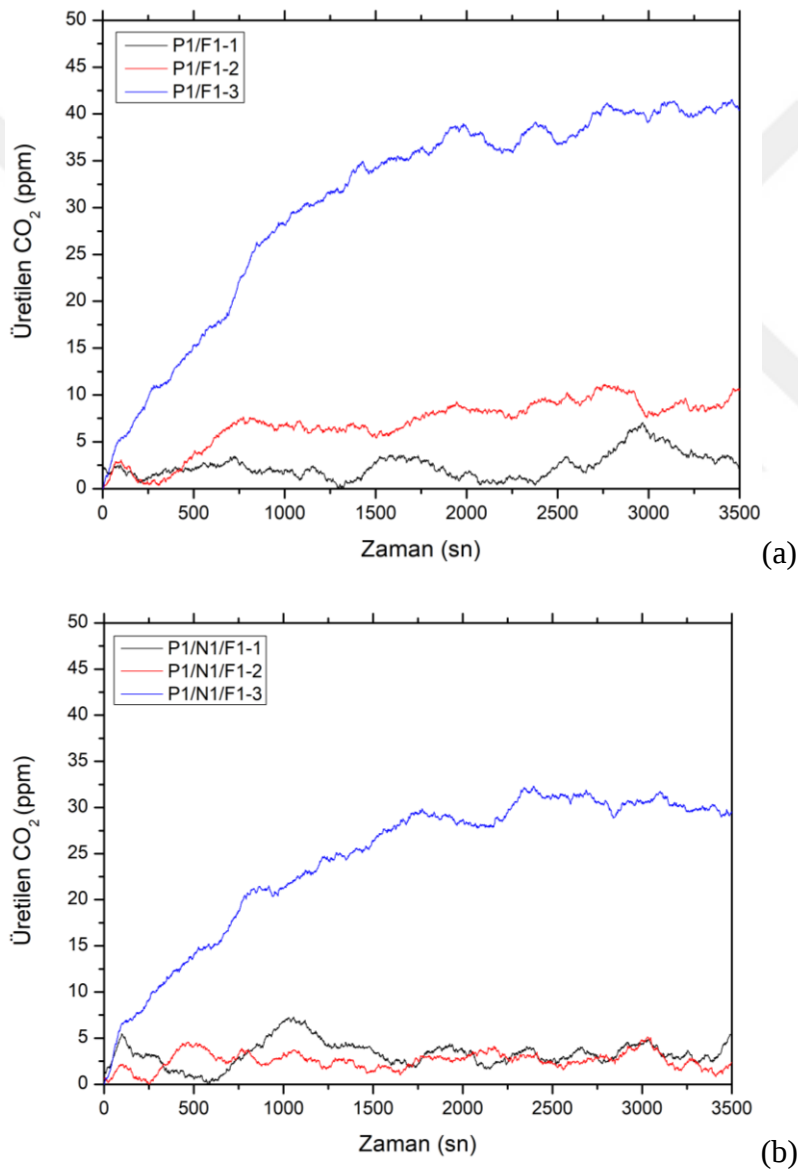
Şekil 4.21 : PA6 nanoliflerin zamana bağlı adsorpsiyon grafikleri ($\ln C_0/C$ -Zaman)
(a) PA6+TiO₂ nanolifler, (b) PA6+SNK+TiO₂ nanolifler.

PA6 polimerine ait oksidasyon verimleri Çizelge 4.16’da verilmiştir. SNK-TiO₂ nanokatıkları ile üretilen PA6 nanolif filtrelerin oksidasyon verimi %0,9 – 5,6 aralığında değişmektedir. Oksidasyon testinde üretilen CO₂ miktarı SNK-TiO₂ katkılı nanoliflerde sadece TiO₂ katkılı nanoliflere göre daha yüksektir. PA6 nanoliflerinin tamamında TiO₂ katkısındaki artış ile üretilen CO₂ miktarı artmaktadır.

Çizelge 4.16 : SNK ve TiO₂ katkılı PA6 polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve adsorpsiyon verimleri.

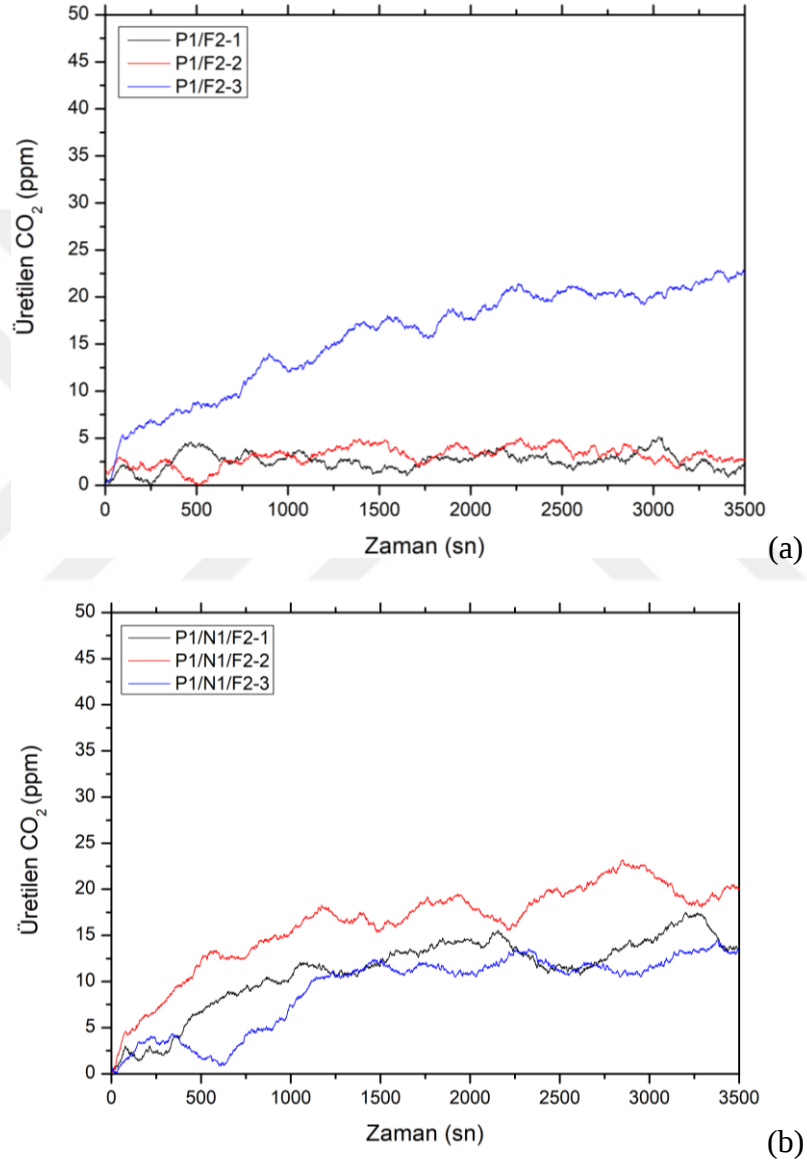
Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	TiO ₂ Miktarı (%)	Adsorpsiyon Verimi (%)	Oksidasyon Verimi (%)
P2-15	-	-	20,0	-
P2-15/F1-1		0,5	35,3	0,9
P2-15/F1-2	-	1	34,5	1,9
P2-15/F1-3		2	34,5	2,2
P2-15/N1	1	-	39,1	-
P2-15/N1/F1-1		0,5	36,4	1,6
P2-15/N1/F1-2	1	1	39,1	1,6
P2-15/N1/F1-3		2	39,4	5,6

Şekil 4.22’de oksidasyon testi sonucunda nanolif filtrelerin zamana bağlı CO₂ üretimi grafikleri görülmektedir. PAN-TiO₂ setinde TiO₂ miktarındaki artış ile oksidasyon testinde üretilen CO₂ miktarı artmıştır (Şekil 4.22-a). Maksimum CO₂ üretimi P1/F1-3 nanolif filtresinde gerçekleşmiştir ve yaklaşık 40 ppm’e ulaşmıştır. SNK eklentisi ile PAN-TiO₂ setine benzer trend göstermiştir ancak yalnız TiO₂ eklentisinin olduğu ve en yüksek oranda olduğu nanolifte (P1/F1-3) SNK eklentili olana göre daha yüksek CO₂ üretimi olmuştur. SNK ve TiO₂ eklentili sette maksimum CO₂ üretimine P1/N1/F1-3 nanaolif filtresinde gerçekleşmiştir ve yaklaşık 30 ppm’e ulaşmıştır (Şekil 4.22-b).



Şekil 4.22 : PAN-SNK nanoliflerin zamana bağlı oksidasyon grafikleri, PAN-TiO₂ (a), PAN-SNK-TiO₂ (b).

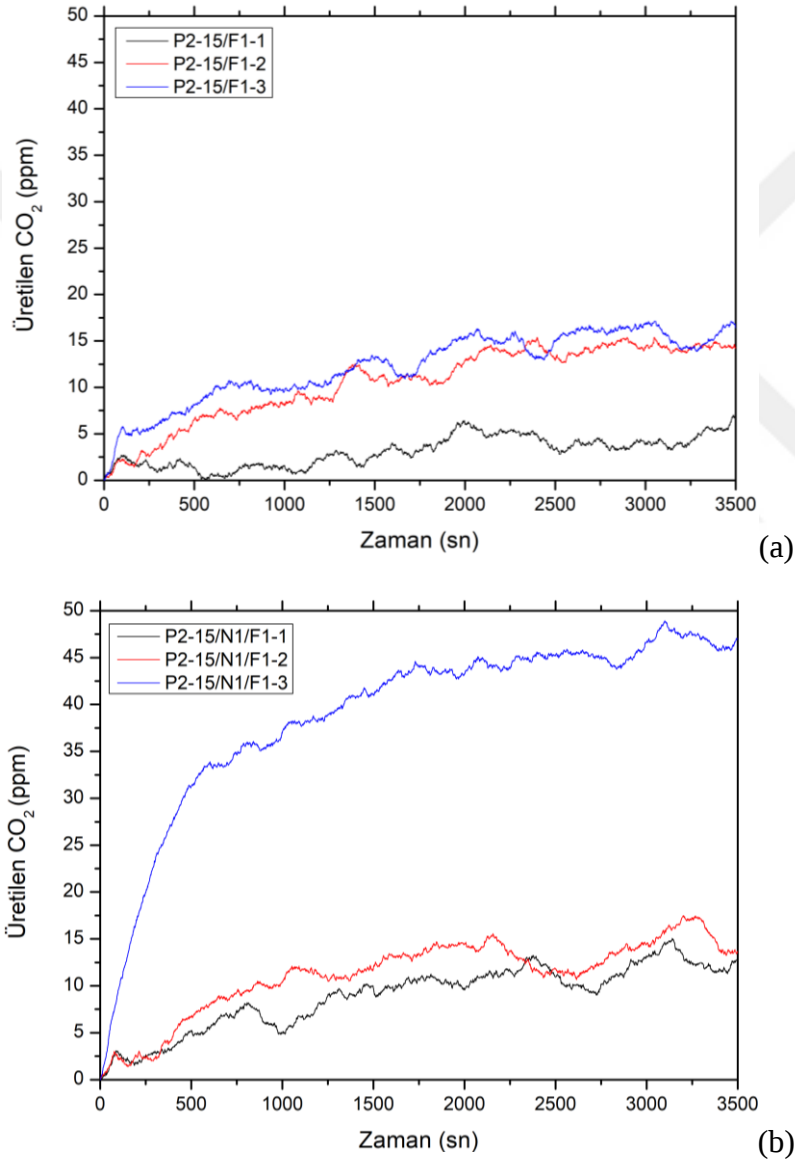
Şekil 4.23'te oksidasyon testi sonucunda nanolif filtrelerin zamana bağlı CO₂ üretimi grafikleri görülmektedir. PAN-ZnO setinde ZnO miktarındaki artış ile oksidasyon testinde üretilen CO₂ miktarı artmıştır (Şekil 4.23-b). Maksimum CO₂ üretimi P1/F2-3 nanolif filtresinde gerçekleşmiştir ve yaklaşık 20 ppm'e ulaşmıştır. SNK eklentisi ile PAN-ZnO setine benzer trend göstermiştir ancak ZnO'nun en yüksek oranında artış görülmemiştir. Maksimum CO₂ üretimine P1/N1/F1-2 nanaolif filtresinde gerçekleşmiştir ve yaklaşık 20 ppm'e ulaşmıştır (Şekil 4.23-b).



Şekil 4.23 : PAN-SNK nanoliflerin zamana bağlı oksidasyon grafikleri, PAN-ZnO (a), PAN-SNK-ZnO (b).

Şekil 4.24'te oksidasyon testi sonucunda nanolif filtrelerin zamana bağlı CO₂ üretim grafikleri görülmektedir. PA6-TiO₂ setinde TiO₂ miktarındaki artış ile oksidasyon

testinde üretilen CO₂ miktarı artmıştır (Şekil 4.24-a). Maksimum CO₂ üretimi P2-15/F1-3 nanolif filtresinde gerçekleşmiştir ve yaklaşık 15 ppm'e ulaşmıştır. SNK eklentisi ile PA6-TiO₂ setine benzer trend göstermiştir ancak PAN nanolif setinden farklı olarak SNK eklentisiyle üretilen CO₂ miktarı artmıştır. SNK eklentisi ile TiO₂ değerinin en yüksek olduğu nanolif filtresinde (P2-15/N1/F1-3) TiO₂ eklentisinin tek olduğu nanolife göre daha yüksek CO₂ üretimi görülmüştür. SNK ve TiO₂ eklentili sette maksimum CO₂ üretimine P2-15/N1/F1-3 nanolif filtresinde gerçekleşmiştir ve yaklaşık 45 ppm'e ulaşmıştır (Şekil 4.24-b).



Şekil 4.24 : PA6-SNK nanoliflerin zamana bağlı oksidasyon grafikleri, PA6-TiO₂ (a), PA6-SNK-TiO₂ (b).

4.2.4 Filtre verimliliği testi sonuçları

Bu bölümde PAN ve PA6 polimerlerine ait setlerin tüm filtre verimliliği testi sonuçları Çizelge 4.18 ve 4.20’de verilmiştir.

Yüksek verimlilik sınıfını sağlayamayan filtreler için EN779:2012 Genel havalandırma için partikül hava filtreleri - Filtreleme performansının belirlenmesi standardı gözönüne alınmıştır. Revizyondan önce G ve F gruplarından oluşan EN779:2002 standardı, G, M ve F gruplarından oluşacak şekilde 2012 yılında EN779:2012 kodu ile revize edilmiştir. Revize olan EN779:2012 standardına ait kalite değerleri Çizelge 4.17’de verilmiştir. Bu filtreler aynı zamanda $\leq 0,25$ kPa basınç düşüşü değerini de sağlamalıdır. PAN nanolif filtreler EN779:2012 standardına göre değerlendirilirken, filtre verimlilik testinde uygulanan testte NaCl, 0,3 μm , 15,8 cm/sn, 95 l/dk şartları göz önünde tutulmuştur. Buna göre PAN nanolif filtreler bu tabloda (Çizelge 4.17’de) ortalama çapı 0,3 μm olan partiküllerin hedef değerlerine göre değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.17 : EN779:2012 standardına göre filtre sınıflandırması.

Filtre Grubu	Sınıfı	0,1 μm	0,3 μm	0,5 μm
Kaba	G1	-	-	-
	G2	-	-	-
	G3	-	-	0-5
	G4	-	0-5	5-15
Orta	M5	0-10	5-15	15-30
	M6	5-15	10-25	20-40
	F7	25-35	45-60	60-75
İnce	F8	35-45	65-75	80-90
	F9	45-60	75-85	90-95

Bu test kapsamında SNK, TiO₂ ve ZnO katkılı PAN polimeri setlerine ait filtre verimliliği testi sonuçları Çizelge 4.18’de verilmiştir. Test sonuçlarına göre, P1/F1-2, P1/F1-3, P1/F2-1, P1/F2-2 ve P1/F2-3 nanolif filtreleri F9 filtrelerin hedef değerlerine ulaşmıştır, P1/N1, P1/F1-1, P1/N1/F1-1, P1/N1/F1-2, P1/N1/F1-3, P1/N1/F2-1 ve P1/N1/F2-3 nanolif filtreleri F8 filtrelerin hedef değerlerine ulaşmıştır, P1-1 ve P1/N1/F2-2 nanolif filtreleri F7 filtrelerin hedef değerlerine ulaşmıştır. Bu iki sete ait tüm nanolif filtreler her ne kadar yüksek verimliliğe sahip filtrelerin partikül tutma verimini sağlayamamış olsa da bu filtrelerin sahip olduğu düşük basınç düşüşü değerlerine ($\leq 0,25$ kPa) ulaşmıştır.

Çizelge 4.18 : SNK, TiO₂ ve ZnO katkılı PAN polimeri ile üretilen nanoliflerin kompozisyonları ve filtre verimliliği sonuçları.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	Fotokatalizör		Basınç Düşüşü (kPa)	Partikül Tutma Verimi (%)
		Türü	Miktarı (%)		
P1-1	-	-	-	0,109	63,8
P1/F1-1	-	TiO ₂	0,5	0,109	68,0
P1/F1-2			1	0,130	75,2
P1/F1-3			2	0,178	83,4
P1/F2-1		ZnO	0,1	0,182	82,0
P1/F2-2	0,3		0,162	77,4	
P1/F2-3	0,5		0,163	75,3	
P1/N1	1	TiO ₂	-	0,129	72,2
P1/N1/F1-1	1		0,5	0,120	70,6
P1/N1/F1-2			1	0,117	70,8
P1/N1/F1-3			2	0,109	71,6
P1/N1/F2-1	ZnO	0,1	0,120	71,9	
P1/N1/F2-2		0,3	0,097	57,3	
P1/N1/F2-3		0,5	0,137	73,8	

Yüksek verimliliğe sahip filtreler, verimli hava filtreleri (EPA), yüksek verimli hava filtreleri (HEPA) ve çok düşük penetrasyona sahip hava filtreleri (ULPA-filtreler) olarak EN1822-1 standartlarına göre sınıflandırılmış ve test edilmiştir.

Çizelge 4.19 : Yüksek verimli filtrelere ait hedef değerleri (EN1822-1).

Filtre Sınıfı	Verim (%)	Nüfuziyet (%)
E10	≥ 85	≤ 15
E11	≥ 95	≤ 5
E12	$\geq 99,5$	$\leq 0,5$
H13	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$
H14	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$
U15	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$
U16	$\geq 99,99995$	$\leq 0,00005$
U17	$\geq 99,999995$	$\leq 0,000005$

Bu test kapsamında SNK katkısı ile üretilmiş PA6 nanoliflerin filtre verimliliği test sonuçları ve nüfuziyet yüzdeleri Çizelge 4.20’de verilmiştir. PA6 nanolif filtreler yüksek verimli filtrelere ait olan EN1822-1 standardına (Çizelge 4.19) göre değerlendirilmiş ve filtre verimlilik testinde ölçüm şartları NaCl, 0,3 μm , 5,3 cm/sn, 95 l/dk değerlerinde tutulmuştur. PA6 polimeri ile üretilen tüm filtrelerin nüfuziyet değerleri HEPA13 (CEN EN 1822, nüfuziyet $\leq 0,05$; basınç düşüşü: 0,25 kPa) standardındaki filtrelerin hedef değerlerine ulaşmıştır. PA6-SNK-TiO₂ setine ait filtre verimliliği testi sonuçlarına göre P2-15/N1/F1-2, P2-15/N1 ve P2-15/F1-2 nanolif filtreleri HEPA14 (H14) filtrelerin partikül tutma verimine ulaşırken; P2-15/N1/F1-3, P2-15, P2-15/N1/F1-1, P2-15/F1-3 ve P2-15/F1-1 nanolif filtreleri HEPA13 (H13) filtrelerin partikül tutma verimine ulaşmıştır. Ancak bu sete ait tüm nanolif filtreler aynı standartta bulunan basınç düşüşü değerini ($\leq 0,25$ kPa) sağlayamamıştır.

Çizelge 4.20 : SNK-TiO₂ nanokatırlı PA6 nanolif setine ait filtre verimliliği testi sonuçları.

Filtre Adı	SNK Miktarı (%)	TiO ₂ Miktarı (%)	Basınç Düşüşü (kPa)	Partikül Tutma Verimi (%)
P2-15	-	-	1,623	99,9938
P2-15/F1-1		0,5	1,428	99,9614
P2-15/F1-2	-	1	1,513	99,9984
P2-15/F1-3		2	1,304	99,9758
P2-15/N1	1	-	1,309	99,9985
P2-15/N1/F1-1		0,5	0,801	99,9883
P2-15/N1/F1-1	1	1	1,239	99,9992
P2-15/N1/F1-3		2	1,052	99,9939

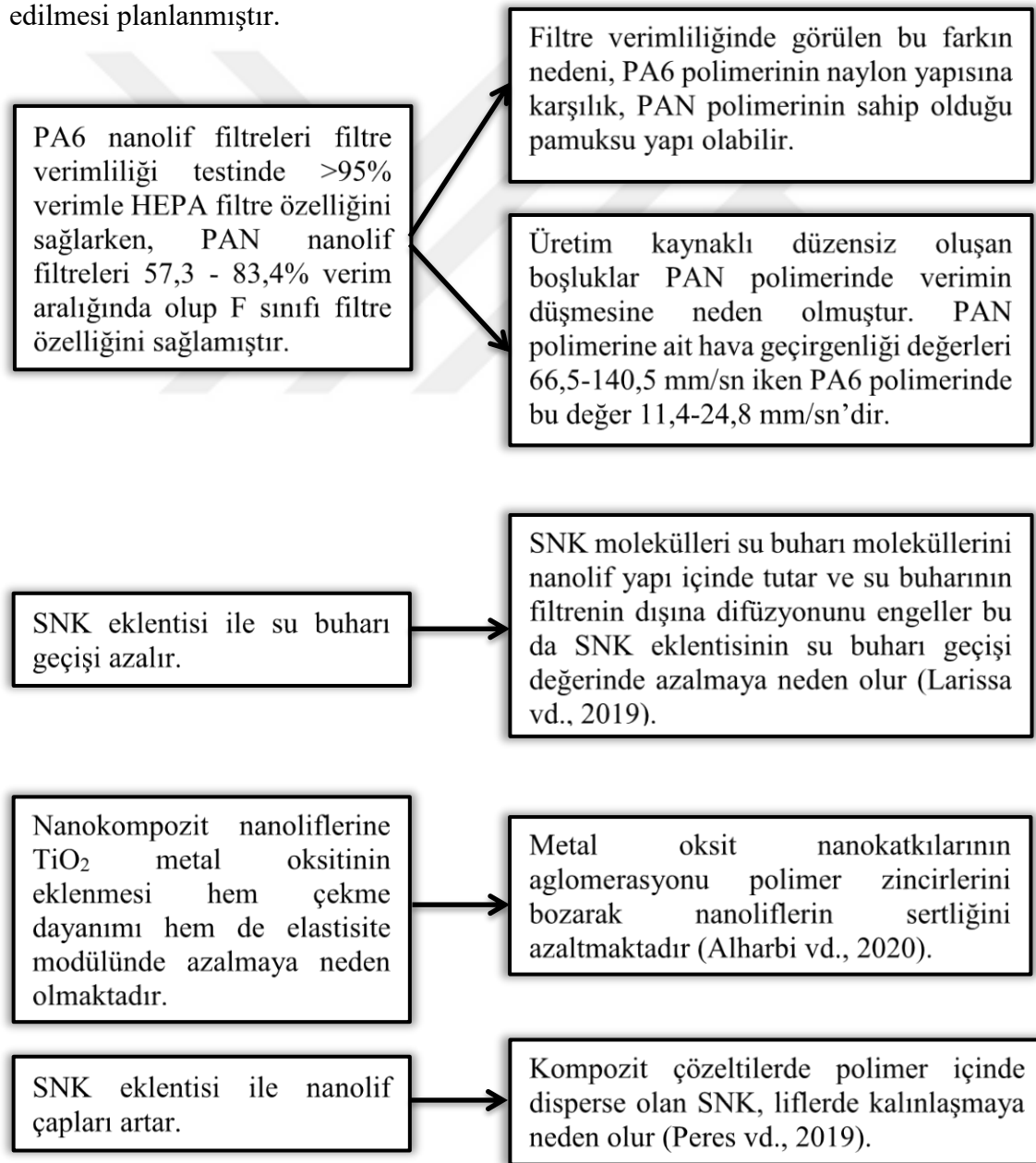
5. GENEL DEĞERLENDİRME

Tez kapsamında üretilen nanolif filtreler üzerine uygulanan yapısal analiz ve performans testi sonuçları Çizelge 5.1’de görülmektedir. Farklı polimerler ve farklı eklenti oranlarıyla üretilen nanolif filtrelerin yapısal analiz sonuçları literatür ile uyumludur. Üretilen nanolif filtrelerin performans testlerinde de literatürle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Nanolif filtrelerin adsorpsiyon verimleri % 20 – 50 aralığında, oksidasyon verimleri ise %0,2 – 5,6 aralığında değişmektedir. Oksidasyon deneyinde CO₂ ölçümünün akışta yapılması ve uygulanan filtrenin alanın küçük olması oksidasyon verimlerinin genel olarak düşük olmasına neden olmuştur. Oksidasyon verimlerini geliştirmek amaçlı üretilen nanolif filtreler ilerleyen dönemde hava sirkülasyonu ile çalışan büyük ölçek sistemlerde denenecektir.

Çizelge 5.1 : Üretilen nanoliflere ait yapısal analiz ve performans testi sonuçları.

		P1/N1/F1	P1/N1/F2	P2-13/N/F1	P2-17/N/F1	P2/N1/F1
Yapısal Analiz	Nanolif Çapı (nm)	305,6 ± 43,4 -	305,6 ± 43,4 -	62,55 ± 7,5 -	105,4 ± 19,9 -	143,3 ± 20,5 -
		430,8 ± 61,9	456,9 ± 83,9	74,0 ± 12,6	131,0 ± 26,1	198,1 ± 35,5
	Çekme Dayanımı	0,34 ± 0,07 -	1,30 ± 0,09 -	1,28 - 5,89	3,75 - 5,23	2,49 ± 0,49 -
		2,34 ± 0,24	3,61 ± 0,87			7,90 ± 2,43
	Elastisite Modülü	4,42 ± 1,08 -	14,97 ± 1,51 -	49,52 -	61,66 -	17,52 ± 1,03 -
		24,84 ± 1,07	42,08 ± 6,31	136,93	112,22	36,55 ± 1,13
Performans Testleri	Hava Geçirgenliği (mm/sn)	66,5 ± 16,4 -	68,7 ± 4,2 -	25,60 ± 1,03 -	28,72 ± 1,64 -	11,4 ± 0,8 -
		140,5 ± 8,4	140,5 ± 8,4	34,60 ± 5,35	35,44 ± 1,68	24,8 ± 1,5
	Su Buharı Geçiş (g/m²/sa)	217,9 – 258,9	189,5 – 258,9	123,15 - 506,30	97,89 - 157,90	85,26 – 121,57
	Toluen Adsorpsiyon (%)	34,8 - 48,6	39,9 - 48,6	20 - 50	20 - 50	20,0 - 39,4
	Toluen Oksidasyonu (%)	0,2 – 5,4	0,3 – 2,6	-	-	0,9 – 5,6
	PM Tutma Verimi (%)	63,8 - 83,4	57,3 - 82,0	-	-	99,9614- 99,9992
	Basınç Düşüşü (kPa)	0,109 - 0,178	0,097 - 0,182	-	-	0,801 - 1,623

Genel olarak, PAN polimeri ile üretilen nanolif filtrelerde PA6 polimeri ile üretilenlere göre daha yüksek verimlere ulaşılmıştır. Tüm sonuçlar göz önünde tutulduğunda, sürdürülebilir malzemelerle üretimin gerçekleştiği yenilikçi nanolif filtre malzemeler iç ortam hava kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir potansiyele sahiptir. Bu filtrelerin uzun dönemde özellikle hayatımızın vazgeçilmez bir bileşeni olacak mobil hava temizleyici sistemlerinde ucuz, güvenilir ve verimli malzemeler olarak kullanılma potansiyeli bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiş sistematik, kontrollü ve tekrar deneyler ile kanıtlanmıştır. Farklı polimerle olan uyumluluğu nedeniyle de özellikle selüloz nanokristallerin nanolif üretimlerinde çok verimli malzemeler oldukları görülmüş ve bununla ilgili çalışmalara tez çalışması sonrasında da devam edilmesi planlanmıştır.



Şekil 4.25 : Tez kapsamında nanolifler hakkında elde edilen bulgular ve nedenleri.

6. KAYNAKLAR

- Alcañiz-Monge, J., Linares-Solano, A., & Rand, B. (2001). Water adsorption on activated carbons: Study of water adsorption in micro- and mesopores. *Journal of Physical Chemistry B*, 105(33), 7998–8006. <https://doi.org/10.1021/jp010674b>
- Alharbi, H. F., Haddad, M. Y., Aijaz, M. O., & Assaifan, A. K. (2020). Electrospun Bilayer PAN / Chitosan Nanofiber Membranes Incorporated with Metal Oxide Nanoparticles for Heavy Metal Ion Adsorption. *Coatings*, 10(285), 1–19. <https://doi.org/10.3390/coatings10030285>
- ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *ASHRAE Inc.*, 2017, 66.
- ASHRAE. (2019). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019 : Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. *ASHRAE Inc.*, 2019.
- Babaroğlu, A. (2015). Anaokullarında iç ortam hava kalitesi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 23(150), 5–12.
- Benli, Y. (2014). Gümüş İle Doplamış Nano-TiO₂' in Özelliklerinin İncelenmesi (Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; Vol. 85). <https://doi.org/10.1016/J.Bbapap.2013.06.007>
- Bhattarai, R. S., Bachu, R. D., Boddu, S. H. S., & Bhaduri, S. (2019). Biomedical applications of electrospun nanofibers: Drug and nanoparticle delivery. *Pharmaceutics*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11010005>
- Bode-aluko, C. A., Pereao, O., Kyaw, H. H., Al-naamani, L., Al-abri, M. Z., Tay, M., ... Dobretsov, S. (2021). Photocatalytic and antifouling properties of electrospun TiO₂ polyacrylonitrile composite nanofibers under visible light. *Materials Science & Engineering B*, 264(February 2020), 114913. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114913>
- Calvino, C., Macke, N., Kato, R., & Rowan, S. J. (2020). Development , processing and applications of bio-sourced cellulose nanocrystal composites. *Progress in Polymer Science*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2020.101221>
- Carter, E. M., Katz, L. E., Speitel, G. E., & Ramirez, D. (2011). Gas-phase formaldehyde adsorption isotherm studies on activated carbon: Correlations of adsorption capacity to surface functional group density. *Environmental Science and Technology*, 45(15), 6498–6503. <https://doi.org/10.1021/es104286d>
- Choi, J., Park, D. W., & Shim, S. E. (2012). Electrospun PEDOT:PSS/carbon nanotubes/PVP nanofibers as chemiresistors for aromatic volatile organic compounds. *Synthetic Metals*, 162(17–18), 1513–1518. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2012.06.028>
- Chokki, J., Darracq, G., Poelt, P., Baron, J., Gallard, H., Joyeux, M., & Teychené, B. (2019). Investigation of Poly(ethersulfone)/Polyvinylpyrrolidone ultrafiltration membrane degradation by contact with sodium hypochlorite through FTIR mapping and two-dimensional correlation spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 161, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.017>

- Chuang, Y. H., Hong, G. B., & Chang, C. T. (2014). Study on particulates and volatile organic compounds removal with TiO₂ nonwoven filter prepared by electrospinning. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 64(6), 738–742. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.889614>
- Deitzel, J. M., Kleinmeyer, J., Harris, D., & Beck Tan, N. C. (2001). The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles. *Polymer*, 42(1), 261–272. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00250-0](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00250-0)
- Diler, E. (2010). Sulu Ortamda Bulunan Azo Boyar Maddelerinin Fotokatalitik Oksidasyon Yöntemi ile Parçalanması ve Kinetik Parametrelerinin Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ergin, Ç., Ilkit, M., Gök, Y., Özel, M. Z., Çon, A. H., Kabay, N., ... Döğen, A. (2013). Fourier transform infrared spectral evaluation for the differentiation of clinically relevant Trichophyton species. *Journal of Microbiological Methods*, 93(3), 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2013.03.011>
- Fan, X., Wang, Y., Zhong, W. H., & Pan, S. (2019). Hierarchically Structured All-biomass Air Filters with High Filtration Efficiency and Low Air Pressure Drop Based on Pickering Emulsion. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(15), 14266–14274. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b21116>
- Fava, G., & Pierpaoli, M. (2015). Volatile Organic Compounds Removal in a Hybrid Photocatalytic-Electrostatic Reactor. *American Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(2), 14–17.
- George, J., & Sabapathi, S. N. (2015). Cellulose nanocrystals: Synthesis, functional properties, and applications. *Nanotechnology, Science and Applications*, 8, 45–54. <https://doi.org/10.2147/NSA.S64386>
- Habibi, Y., Lucia, L. A., & Rojas, O. J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479–3500. <https://doi.org/10.1021/cr900339w>
- Habil, M., Massey, D. D., & Taneja, A. (2015). Exposure from particle and ionic contamination to children in schools of India. *Atmospheric Pollution Research*, 6(4), 719–725. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.080>
- ISO International Organization for Standardization. ISO 16000-5, (2007). Indoor air — Part 5: Sampling strategy for volatile organic compounds (VOCs).
- ISO International Organization for Standardization. ISO 16000-6, (2011). Indoor air — Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS or MS-FID.
- ISO International Organization for Standardization. ISO 16000-9, (2006). Indoor air — Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing — Emission test chamber method.
- ISO International Organization for Standardization. ISO 16000-24, (2018). Indoor air — Part 24: Performance test for evaluating the reduction of volatile organic compound concentrations by sorptive building materials.
- ISO International Organization for Standardization. ISO 16890-1: Air filters for general ventilation - Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM)

- Jafari, A. J., Kalantary, R. R., Esrafil, A., & Arfaeinia, H. (2018). Synthesis of silica-functionalized graphene oxide/ZnO coated on fiberglass and its application in photocatalytic removal of gaseous benzene. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.015>
- Jones, A. P. (1999). Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, 33, 4535–4564. [https://doi.org/10.1016/S1474-8177\(02\)80006-7](https://doi.org/10.1016/S1474-8177(02)80006-7)
- Kadam, V. V., Wang, L., & Padhye, R. (2018). Electrospun nanofibre materials to filter air pollutants – A review. *Journal of Industrial Textiles*, 47(8), 2253–2280. <https://doi.org/10.1177/1528083716676812>
- Kalender M.(2009). Gaz Akımlarındaki Uçucu Organik Bileşiklerin Kuru Sorbent Enjeksiyon Tekniği İle Giderilmesi.
- Khajeh, M., Laurent, S., & Dastafkan, K. (2013). Nanoadsorbents : Classification , Preparation , and Applications (with Emphasis on Aqueous Media). *Chemical Reviews*, 113(10), 7728–7768. <https://doi.org/10.1021/cr400086v>
- Kitagawa, S., Kitaura, R., & Noro, S. I. (2004). Functional porous coordination polymers. *Angewandte Chemie - International Edition*, 43(18), 2334–2375. <https://doi.org/10.1002/anie.200300610>
- Kudryashov, M., Logunov, A., Gogova, D., Mashin, A., & De Filpo, G. (2020). Ag/PVP/PAN nanocomposites with triangular nanoprisms of silver synthesized by UV-induced polymerization: Morphology manipulation and optical properties tuning. *Optical Materials*, 101(November 2019), 109746. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109746>
- Larissa, T., Stieven, L., Patrúlea, V., Jordan, O., Borchard, G., Guimarães, R., ... Paula, A. (2019). Enhanced water uptake of PHBV scaffolds with functionalized cellulose nanocrystals. *Polymer Testing*, 79(July), 106079. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106079>
- Lee, S. C., Li, W. M., & Ao, C. H. (2002). Investigation of indoor air quality at residential homes in Hong Kong - Case study. *Atmospheric Environment*, 36(2), 225–237. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00435-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00435-6)
- Li, W. M., Lee, S. C., & Chan, L. Y. (2001). Indoor air quality at nine shopping malls in Hong Kong. *Science of the Total Environment*, 273(1–3), 27–40. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00833-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00833-0)
- Lillo-Ródenas, M. A., Cazorla-Amorós, D., & Linares-Solano, A. (2011). Benzene and toluene adsorption at low concentration on activated carbon fibres. *Adsorption*, 17, 473–481. <https://doi.org/10.1007/s10450-010-9301-7>
- Lin, S. Y., & Wang, S. L. (2012). Advances in simultaneous DSC-FTIR microspectroscopy for rapid solid-state chemical stability studies: Some dipeptide drugs as examples. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64(5), 461–478. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.01.009>
- Liu, Q., Xu, N., Fan, L., Ding, A., & Dong, Q. (2020). Polyacrylonitrile (PAN)/TiO₂ mixed matrix membrane synthesis by thermally induced self-crosslinking for thermal and organic-solvent resistant filtration. *Chemical Engineering Science*, 228, 115993. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115993>
- Liu, Y., Park, M., Ding, B., Kim, J., El-newehy, M., Al-deyab, S. S., & Kim, H.

- (2015). Facile Electrospun Polyacrylonitrile / poly (acrylic acid) Nanofibrous Membranes for High Efficiency Particulate Air Filtration. *Fibers and Polymers*, 16(3), 629–633. <https://doi.org/10.1007/s12221-015-0629-1>
- Lu, Y., Tekinalp, H. L., Eberle, C. C., Peter, W., Naskar, A. K., & Ozcan, S. (2014). Nanocellulose in polymer composites and biomedical applications. *Tappi Journal*, 13(6), 47–54. <https://doi.org/10.32964/tj13.6.47>
- Mannarino, M. M., & Rutledge, G. C. (2012). Mechanical and tribological properties of electrospun PA 6(3)T fiber mats. *Polymer*, 53(14), 3017–3025. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2012.04.039>
- Matulevicius, J., Kliucininkas, L., Prasauskas, T., Buivydiene, D., & Martuzevicius, D. (2016). The comparative study of aerosol filtration by electrospun polyamide, polyvinyl acetate, polyacrylonitrile and cellulose acetate nanofiber media. *Journal of Aerosol Science*, 92, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.10.006>
- Mentese, S., Mirici, N. A., Elbir, T., Palaz, E., Mumcuoğlu, D. T., Cotuker, O., ... Otkun, M. T. (2020). A long-term multi-parametric monitoring study: Indoor air quality (IAQ) and the sources of the pollutants, prevalence of sick building syndrome (SBS) symptoms, and respiratory health indicators. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2270–2281. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.016>
- Norback, D., & Edling, C. (1991). Environmental, occupational, and personal factors related to the prevalence of sick building syndrome in the general population. *British Journal of Industrial Medicine*, 48(7), 451–462. <https://doi.org/10.1136/oem.48.7.451>
- Oh, S. Y., Il Yoo, D., Shin, Y., Hwan, C. K., Hak, Y. K., Yong, S. C., ... Ji, Y. H. (2005). Crystalline structure analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide by means of X-ray diffraction and FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Research*, 340(15), 2376–2391. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2005.08.007>
- Payne-Sturges, D. C., Burke, T. A., Breyse, P., Diener-West, M., & Buckley, T. J. (2004). Personal exposure meets risk assessment: A comparison of measured and modeled exposures and risks in an urban community. *Environmental Health Perspectives*, 112(5), 589–598. <https://doi.org/10.1289/ehp.6496>
- Peres, B. U., Vidotti, H. A., de Carvalho, L. D., Manso, A. P., Ko, F., & Carvalho, R. M. (2019). Nanocrystalline cellulose as a reinforcing agent for electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofibers. *Journal of Oral Biosciences*, 61(1), 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.09.002>
- Polat, Y., Atakan, R., & Demir, A. (2014). Design of polyamide nanofiber air filter media with glass particles. *International Conference of Applied Research on Textile*, (January 2019).
- Pragathiswaran, C., Smitha, C., Barabadi, H., Al-Ansari, M. M., Al-Humaid, L. A., & Saravanan, M. (2020). TiO₂@ZnO nanocomposites decorated with gold nanoparticles: Synthesis, characterization and their antifungal, antibacterial, anti-inflammatory and anticancer activities. *Inorganic Chemistry Communications*, 121(June), 108210. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.108210>

- Ross, C. P., Ross, J. S., & Asseiro, K. (1997). Sick Building Syndrome. *Journal of Orthomolecular Medicine*, 12(1), 23–27.
- Sängerlaub, S., Schmid, M., & Müller, K. (2018). Comparison of water vapour transmission rates of monolayer films determined by water vapour sorption and permeation experiments. *Food Packaging and Shelf Life*, 17(May), 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.06.004>
- Sarigiannis, D. A., Gotti, A., & Karakitsios, S. P. (2018). Indoor air and public health. In *Management of Emerging Public Health Issues and Risks: Multidisciplinary Approaches to the Changing Environment*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813290-6.00001-9>
- Simoni, M., Carrozzi, L., Baldacci, S., Scognamiglio, A., Pedè, F. di, Sapigni, T., & Viegi, G. (2002). The Po river Delta (North Italy) indoor epidemiological study: Effects of pollutant exposure on acute respiratory symptoms and respiratory function in adults. *Archives of Environmental Health*, 57(2), 130–136. <https://doi.org/10.1080/00039890209602928>
- Sobolčiak, P., Tanvir, A., Popelka, A., Moffat, J., Mahmoud, K. A., & Krupa, I. (2017). The preparation, properties and applications of electrospun co-polyamide 6,12 membranes modified by cellulose nanocrystals. *Materials and Design*, 132, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.056>
- Stefanov, B. (2015). Photocatalytic TiO₂ thin films for air cleaning: Effect of facet orientation, chemical functionalization, and reaction conditions. In *Science and Technology*. Retrieved from <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:862338/FULLTEXT01.pdf>
- Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S., & Ramkumar, S. S. (2005). Electrospinning of nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 96(2), 557–569. <https://doi.org/10.1002/app.21481>
- Thavasi, V., Singh, G., & Ramakrishna, S. (2008). Electrospun nanofibers in energy and environmental applications. *Energy and Environmental Science*, 1(2), 205–221. <https://doi.org/10.1039/b809074m>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2003). *Indoor air quality and student performance*. EPA/402/K-03/006. Washington, DC.
- Vitchuli, N., Shi, Q., Nowak, J., Kay, K., Caldwell, J. M., Breidt, F., ... Zhang, X. (2011). Multifunctional ZnO/Nylon6 nanofiber mats by an electrospinning-electrospraying hybrid process for use in protective applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 12(5). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/5/055004>
- Wadhawan, S., Jain, A., Nayyar, J., & Mehta, S. K. (2020). Role of nanomaterials as adsorbents in heavy metal ion removal from waste water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 33(October 2019), 101038. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101038>
- Wolkoff, P. (1997). Are we measuring the relevant indoor pollutants? *Indoor Air*, 7(2), 92–106. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.t01-2-00003.x>
- Wolkoff, Peder, & Nielsen, G. D. (2001). Organic compounds in indoor air-their relevance for perceived indoor air quality? *Atmospheric Environment*, 35(26), 4407–4417. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00244-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00244-8)

- Xing, L., Hu, C., Zhang, W., Guan, L., & Gu, J. (2020). Transition of cellulose supramolecular structure during concentrated acid treatment and its implication for cellulose nanocrystal yield. *Carbohydrate Polymers*, 229(October 2019), 115539. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115539>
- Yang, C., Miao, G., Pi, Y., Xia, Q., Wu, J., Li, Z., & Xiao, J. (2019). Abatement of various types of VOCs by adsorption/catalytic oxidation: A review. *Chemical Engineering Journal*, 370(March), 1128–1153. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.232>
- Yoon, H. I., Hong, Y. C., Cho, S. H., Kim, H., Kim, Y. H., Sohn, J. R., ... Cheong, H. K. (2010). Exposure to volatile organic compounds and loss of pulmonary function in the elderly. *European Respiratory Journal*, 36(6), 1270–1276. <https://doi.org/10.1183/09031936.00153509>
- Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2009). Indoor air purification using heterogeneous photocatalytic oxidation. Part I: Experimental study. *Applied Catalysis B: Environmental*, 92(3–4), 454–461. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2009.09.004>
- Zhang, X., Gao, B., Creamer, A. E., Cao, C., & Li, Y. (2017). Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 338, 102–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.013>
- Zhao, X., Chen, L., Guo, Y., Ma, X., Li, Z., Ying, W., & Peng, X. (2019). Porous cellulose nanofiber stringed HKUST-1 polyhedron membrane for air purification. *Applied Materials Today*, 14, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.11.012>

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : ESRA BÜYÜKADA KESİCİ

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

Lise : 2013, Beşiktaş Anadolu Lisesi

Lisans : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM

- **TÜBİTAK – Bursiyer**

Ekim 2018 – Şubat 2019

Yüksek Alkali Özelliğe Sahip Endüstriyel Atıksularda Kimyasal Madde ve Su Geri Kazanımı İçin Seramik Membran Üretimi ve Uygulaması

- **TÜBİTAK – Bursiyer**

Mart 2019 – Halen

İç Ortam Havasında Bulunan Uçucu Organik Bileşiklerin (UOB) Giderimi İçin Yenilikçi Yaklaşımlar ile Polimerik Nanolif ve Ağ Yapılı Seramik Fotokatalizör Filtre Sistemlerinin Geliştirilmesi

YAYINLAR:

Buyukada-Kesici, E., Gezmis-Yavuz, E., Aydin, D., Cansoy, C. E., Alp, K., & Koseoglu-Imer, D. Y. (2021). Design and fabrication of nano-engineered electrospun filter media with cellulose nanocrystal for toluene adsorption from indoor air. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 264(November 2020), 114953.
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114953>