



Santrifüj üretim ve çözeltiden üfleme yöntemleri ile PVDF tabanlı hava filtresi üretimi ve karakterizasyonu üzerine karşılaştırmalı bir çalışma

A comparative study on the production and characterization of PVDF-based air filters by centrifugal spinning and solution blowing methods

Mehmet Durmuş Çalışır^{1*}

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye.
mehmetdurmus.calisir@erdogan.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 22.09.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 10.01.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 11.12.2024

doi: 10.5505/pajes.2025.37279
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, santrifüj üretim (CS) ve çözeltiden üfleme (SB) yöntemleri ile PVDF liflerinin üretimi ve karşılaştırmalı karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. CS yöntemiyle üretilen örneklerde daha pürüzsüz, kalın ve düzgün liflerden oluşan kusursuz yüzeyler elde edilirken, SB yöntemiyle ince ve kıvrımlı lifler ve yoğun lif demeti içeren yüzeyler elde edilmiştir. Ortalama lif çapları CS yöntemiyle üretilen lifler için $0.827 \pm 0.365 \mu\text{m}$, SB yöntemiyle elde edilen lifler içinse $0.356 \pm 0.168 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Her iki üretim yönteminde de elde edilen PVDF liflerinin büyük oranda β ve az miktarda α fazında olduğu tespit edilmiştir. Aynı miktarda çözelti kullanılarak yapılan üretimlerde benzer kalınlıkta lifli yüzeyler elde edilirken, CS örneğinde yüzeylerin gramajı yaklaşık yarı oranda az olmuştur. İnce lifler ve kalın lif demetleri barındıran SB örneği daha kompakt yapıya sahiptir. Bu nedenle aynı kalınlıklardaki örneklerin filtrasyon verimleri SB için daha yüksek çıkmıştır. Aynı gramajdaki yüzeylerinse benzer hava filtrasyon verimi gösterdiği saptanmıştır. Bu sonuçlar, her iki yöntemin de PVDF liflerinin üretimine uygun olduğunu, CS yöntemiyle daha kalın fakat kusursuz lif üretiminin sağlandığını, üretim yöntemlerinin lif kristal yapısında önemli bir değişim oluşturmadığını göstermektedir. Ayrıca lif çapının, morfolojisinin ve yüzey gramajının filtrasyon performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. SB yüzeyinin daha kompakt yapısı yüksek filtrasyon verimi sağlamıştır.

Anahtar kelimeler: PVDF, Santrifüj üretim, Çözeltiden üfleme, Nanolif, Hava filtrasyonu.

Abstract

In this study, PVDF fibers were produced using centrifugal spinning (CS) and solution blowing (SB) methods, and their comparative characterization has been carried out. While defect-free mats composed of smoother, thicker and more uniform fibers were obtained with the CS method, mats containing fine and crimped fibers and highly entangled fiber bundles were produced with the SB method. The average fiber diameters were measured as $0.827 \pm 0.365 \mu\text{m}$ for fibers produced by CS and $0.356 \pm 0.168 \mu\text{m}$ for those obtained by SB. It was determined that the PVDF fibers produced by both methods predominantly exhibited the β -phase with a small amount of the α -phase. In the production where the same amount of solution was used, fiber mats of similar thickness were obtained, while the basis weight of the mats produced by the CS method was approximately half that of the SB samples. The SB samples, containing both thin fibers and thick fiber bundles, exhibited a more compact structure. Therefore, the filtration efficiency of the samples with the same thickness was higher for SB. However, mats with the same basis weight showed similar filtration efficiency. These results indicate that both methods are suitable to produce PVDF fibers. The CS method enables the production of thicker but defect-free fibers, and the production methods do not significantly affect the fiber's crystalline structure. Additionally, fiber diameter, morphology, and basis weight of the mats significantly influence filtration performance. The compact structure of the fibrous mat from SB resulted in a higher filtration efficiency.

Keywords: PVDF, Centrifugal spinning, Solution blowing, Nanofiber, Air filtration.

1 Giriş

Hava kirliliği ve havada taşınan partikül maddeler, son yıllarda önemli bir çevresel ve sağlık sorunu haline gelerek, etkin hava filtrasyon teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Hava filtreleri, havada asılı bulunan partikülleri yakalayarak ortam havasını temizleyen önemli sistemlerdir. Bu filtreler, genellikle lifli yüzeyler veya gözenekli membranlar şeklinde tasarlanır ve yakaladığı partiküllerin boyutuna bağlı olarak filtrasyon performansına göre sınıflandırılır [1],[2]. Lifli hava filtreleri, havadaki büyük partikülleri genellikle mekanik bariyerler oluşturarak hapsederken, daha küçük partiküllerin yakalanması için yüzey yükleri ve elektrostatik etkileşimler gibi faktörlerden yararlanır.

Yüksek yüzey alanı/hacim oranına ve gözenekli bir yapıya sahip nanolifli yüzeyler, ince partiküllerin yakalanmasında son

derece etkili hava filtreleri olarak öne çıkmaktadır [3]. Elektro-üretim (elektrospinning), nanolif üretiminde bilinen en eski üretim yöntemi olmakla beraber bu yöntemde lif üretim hızı düşüktür [4],[5]. Santrifüj üretim (Centrifugal Spinning, CS) ve çözeltiden üfleme (Solution Blowing, SB), farklı lif çaplarında yüksek üretim kapasitesi ile dokusuz lifli yüzeyleri üretme yeteneği sağlayan iki umut verici yöntemdir [6].

Filtrasyon uygulamalarında kullanılan çeşitli malzemeler arasında, mükemmel mekanik özellikleri, kimyasal direnci ve piezoelektrik özellikleri nedeniyle poliviniliden florür (PVDF) büyük ilgi görmektedir [7]-[10]. PVDF nanoliflerin yüksek dielektrik sabiti ve piezoelektrik özellikleri, onları elektrostatik yük depolayarak havadaki ince partikülleri etkin bir şekilde yakalayabilen elektret filtreler olarak kullanıma uygun hale getirir [11],[12]. PVDF, farklı kristalin fazlar (α , β , γ , δ ve ϵ) oluşturabilmesiyle bilinmekte olup, bu fazlar arasında β fazı

*Yazışılan yazar/Corresponding author

piezoelektrik performansın artırılmasına yönelik uygulamalar için en çok tercih edilen fazdır [13].

Bu çalışmada, PVDF nano/mikrolifleri, CS ve SB yöntemleri kullanılarak üretilmiş, üretilen lifli yüzeyler morfoloji, kristal yapı ve partikül filtrasyonu açılarından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı lif oluşum mekanizmalarına dayanan iki yöntemde ortak parametreler (aynı çözelti, iğne çapı, çözelti besleme hızı, ortam parametreleri (sıcaklık, nem)) kullanılarak, liflerin özelliklerinde oluşan farkların sadece üretim yönteminden kaynaklanması sağlanmıştır. İki yenilikçi yöntemin bir polimer üzerinden aynı anda ve aynı şartlar altında karşılaştırılıyor olması çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlar, lif üretim teknikleri, lif özellikleri ve filtrasyon verimi arasındaki ilişkinin anlaşılmasına katkı sağlamakta ve hava filtrasyon yüzeylerinin tasarımı için değerli bilgiler sunmaktadır.

2 Malzeme ve yöntem

2.1 Malzemeler

PVDF (Molekül Ağırlığı: 477,000 g/mol) tozları, Arkema Chemicals'dan (Kynar Flex 2801-00) temin edilmiştir. Dimetil sülfoksit (DMSO, %99.8 saflık, Merck) ve aseton (%99.5 saflık, ISOLab) çözücü olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça %12 PVDF çözeltileri, %30/70 ağırlık oranında bir aseton/DMSO karışımı içinde 70 °C'de manyetik karıştırıcı ile 8 sa. boyunca karıştırılarak hazırlanmıştır.

2.2 Yöntem

SB (AerospinnerL1.0) ve CS (NanocentrinoL1.0) cihazları Areka Group Advanced Technologies (Türkiye)'den temin edilmiştir. SB ve CS numuneleri için kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir. CS yönteminde besleme hızı üretim başlığı (spinneret) üzerinde iki adet iğne olduğundan ve iğne başına miktar değerini sabit tutmak için SB'nin 2 katı olarak ayarlanmıştır. Lifli yüzeylerin gramajları ve kalınlıkları, üretim süreleri ile Denklem (1) kullanılarak ayarlanmıştır. Burada, *BW* gramaj (g/m², gsm), *A* alan, *FR* besleme hızı ve *c* çözelti konsantrasyonudur.

$$t = \frac{60 * BW * A}{FR * c} \quad (1)$$

Tablo 1. PVDF liflerinin üretiminde kullanılan parametreler.

Table 1. Parameters used in the production of PVDF fibers.

Parametre	CS	SB
Besleme hızı (ml/h)	10	5
Hava basıncı (bar)	-	2
Kolektör ile nozul arasındaki mesafe (cm)	26	34
Çözelti konsantrasyonu (%ağ.)	12	
İğne tipi (iç çap, mm)	21G (0.514)	

2.3 Karakterizasyon

Hazırlanan tüm çözeltilerin viskoziteleri, döner viskozimetre (Fungilab, α Serisi) ile 315.4 mPa.s olarak ölçülmüştür. Lifli yapıların morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM, TESCAN VEGA 3) kullanılarak incelenmiştir. SEM analizi öncesinde, numunelerin iletkenliğini sağlamak için yüzeylerine 10 nm kalınlığında altın/paladyum kaplama yapılmıştır. Ortalama lif çapları (AFD) ve standart sapmalar, 5kX büyütülmüş SEM görüntülerinden ImageJ programı kullanılarak ölçülmüştür. Üretilen örneklerin kalınlıkları Loyka 5318 kalınlık komparatörü cihazı ile alınan 25 ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmış, gramajları ise 6 dijit hassas

terazi ile ölçülmüştür. Aynı miktarda çözelti kullanılarak üretilen yüzeylerin kalınlıkları ve gramajları SB yüzeyleri için $41.2 \pm 12.4 \mu\text{m}$ ve 1.56 gsm, CS yüzeyleri içinse $40.7 \pm 8.8 \mu\text{m}$ ve 0.788 gsm olarak ölçülmüştür.

Örneklerin hava geçirgenlik değerleri Airtest II (Prowhite) test cihazı ile ASTM D737 standartlarına kullanılarak 125 Pa hava basıncı ve 22 ± 2 °C sabit ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Aynı kalınlıktaki örnekler için hava geçirgenlik değerleri SB yüzeylerinde 34.2 ± 1.47 , CS yüzeylerinde ise 59 ± 5.1 cfm (cubic feet per minute) olarak ölçülmüştür. Filtrasyon performansları ise otomatik filtre test cihazı (8130A modeli, TSI Inc.) ile analiz edilmiştir. Etkin alanı 100 cm² olan nanolifli yüzeyler ağırlıkça %2 NaCl çözeltisinden elde edilen ve $0.26 \pm 0.07 \mu\text{m}$ çapındaki NaCl aerosollerine karşı 15.83 cm/s yüzey hızıyla test edilmiştir. Filtrasyon verimliliği (η) ise Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

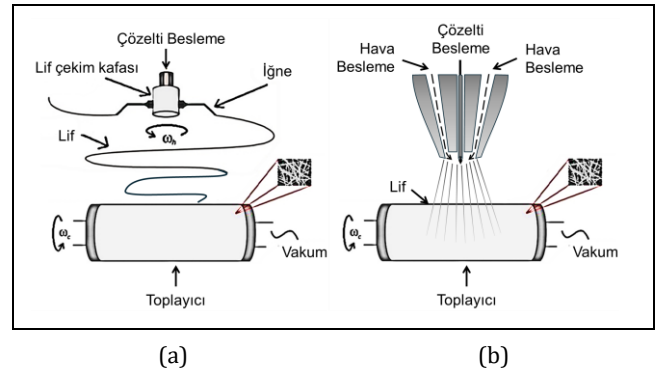
$$\eta = 1 - C_a/C_y \quad (2)$$

Burada, C_a numune sonrası, C_y ise numune öncesi akıştaki parçacık konsantrasyonunu temsil eder. Filtre numunesinin kalitesini hem η 'ni hem de ΔP 'yi dikkate alarak değerlendiren kalite faktörünün (QF) matematiksel ifadesi ise Denklem (3) ile verilmiştir.

$$QF = -\frac{\ln(1 - \eta)}{\Delta P} \quad (3)$$

3 Bulgular ve tartışma

CS ve SB yöntemlerinde lif oluşum mekanizmaları Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. CS yönteminde, polimer çözeltisi dönen bir lif üretim başlığına beslenir ve merkezkaç kuvvetlerinin etkisiyle gerilerek inceltirilir. Polimer jeli içindeki çözücü, vakumlu toplayıcıya ulaşmadan önce buharlaşır ve lifler toplayıcıda birikir [14]. SB yönteminde ise, polimer çözeltisi koaksiyel bir nozuldan geçirilir. Çözelti, nozulun ucunda sıkıştırılmış hava ile temas eder ve hava tarafından oluşturulan kesme etkisiyle vakum toplayıcısına doğru gerilerek polimer jeli oluşur. Benzer şekilde polimer jeli içindeki çözücü, vakumlu toplayıcıya ulaşmadan önce buharlaşıp ve toplayıcı üzerinde lifli bir yüzey elde edilir [15].



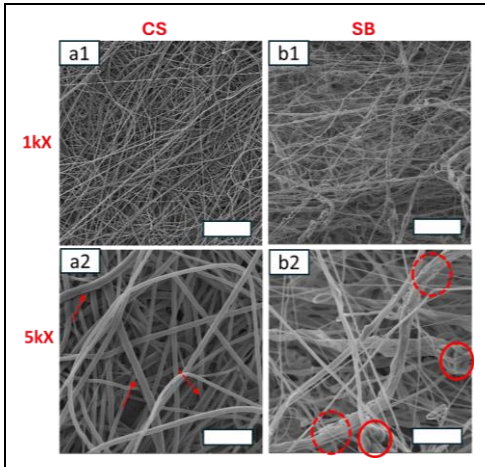
Şekil 1(a): Santrifüj üretim (CS) ve (b): Çözelti üfleme (SB) yöntemlerinde lif oluşum mekanizmalarının şematik çizimi.

Figure 1(a): Schematic illustration of the fiber formation mechanisms in centrifugal spinning (CS) and (b): Solution blowing (SB) methods.

Üretim esnasında, SB yönteminde üflenen çözeltinin büyük kısmı toplayıcıda lif formunda homojen bir şekilde biriktiği, CS yönteminde ise biriken lif miktarı arttıkça toplayıcı üzerindeki

lif dağılım homojenliğinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni, tambur üzerinde toplanan lif miktarındaki artışın vakumlu toplayıcının emiş kapasitesini düşürmesidir. Bu durum, ayrıca üretim başlıından çıkan liflerin havada daha uzun süre kalmasına, dolanıp bükülerek kalın lifler halinde toplayıcıda toplanmasına yol açmıştır. Bu dolanmış lifler mümkün oldukça toplayıcıya sarılmadan ortamdan uzaklaştırılmıştır. Bu uygulama da Denklem 1'e göre belirlenen sürelerde beklenenden daha az gramajda numune üretilmesine neden olmuştur. Devam eden süreçlerde yapılan ölçümler ise dolanık lif demetlerinin olmadığı bölgelerden yapılmıştır.

Şekil 2'de PVDF örneklerinin SEM görüntüleri ve çap dağılım histogramları verilmiştir. CS ve SB yöntemleriyle üretilen PVDF örneklerinin 1kX büyütülmüş SEM görüntülerinde, tamamen birbirine geçmiş lifli yapılar başarılı bir şekilde elde edilmiştir. 5kX büyütmedeki SEM görüntülerine göre, CS yüzeylerinde herhangi bir damlacık/boncuk ya da lif demeti gözlemlenmezken, SB yüzeylerinde çok sayıda damlacık (kırmızı/sürekli daireler) ve lif demetleri (kırmızı/kesikli dairelerle) tespit edilmiştir. SB yüzeyinin lif/demet oranı yaklaşık olarak 1 olarak yorumlanmıştır. Ayrıca CS lifleri daha doğrusal iken, SB lifleri daha kıvrımlıdır. Çözelti esaslı üretim yöntemlerinde çözelti konsantrasyonunun lif ve yüzeylerin morfolojileri üzerindeki etkisi büyüktür [6]. Güngör ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, polimer çözeltisi konsantrasyonunun SB yöntemiyle üretilen yüzeylerdeki kusur miktarını doğrudan etkilediği, düşük konsantrasyonların damlacık/boncuk gibi hatalara neden olduğu ve yüksek konsantrasyonların da lif demeti oluşumunu artırdığı rapor edilmiştir [16].



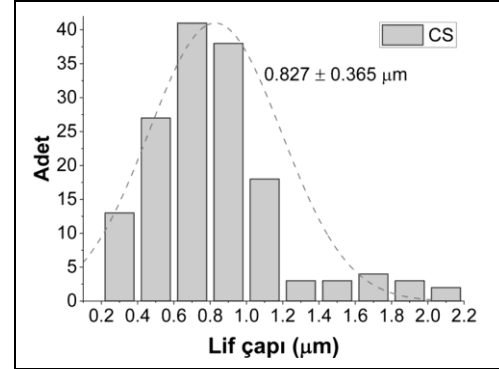
Şekil 2. CS ve SB yöntemleri ile üretilen PVDF numunelerinin (a1), (b1): 1 kX; (a2), (b2): 5 kX büyütme SEM görüntüleri.

Figure 2. SEM images of PVDF samples produced by CS and SB methods at (a1), (b1): 1 kX; (a2), (b2): 5 kX magnification.

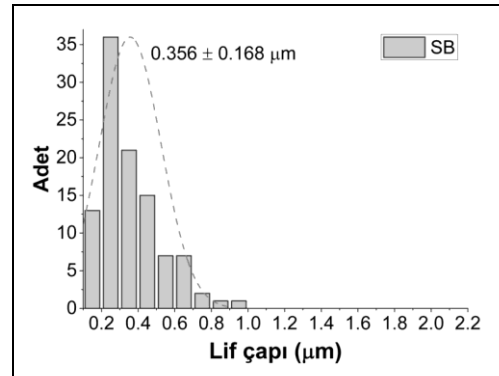
CS örneklerindeki münferit liflerin ortalama çapı $0.827 \pm 0.365 \mu\text{m}$ olarak ölçülürken, SB örneklerinde bu değer $0.356 \pm 0.168 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir (Şekil 3). Değişim katsayısı (coefficient of variation-CV), SB örneği için %47, CS için ise %43 olarak hesaplanmıştır. Bu da SB'deki lif çaplarının, ortalama etrafında CS'ye göre daha geniş bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Diğer yandan, SB örneklerindeki lif demetlerinin çap dağılımı $1.743 \pm 0.712 \mu\text{m}$ iken, CS örneklerinde en kalın lif çapı $1.800 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.

Şekil 4'te yüksek büyütme SEM görüntülerinde CS ile üretilen liflerin pürüzsüze yakın ve daha doğrusal, SB yöntemiyle

üretilen liflerin ise daha pürüzlü ve kıvrımlı bir morfoloji sergilediği daha net görülmektedir. Her iki yöntemle üretilen PVDF liflerinde, tekil lifler silindirik morfolojiye sahiptir.



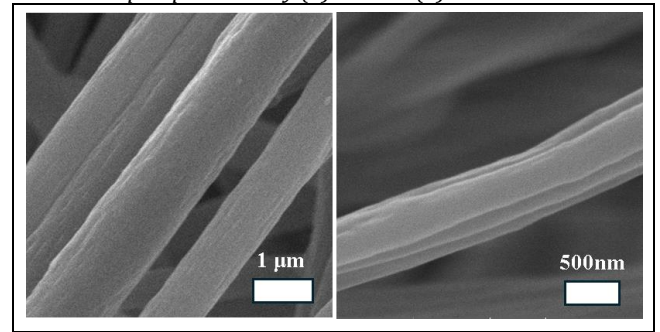
(a)



(b)

Şekil 3(a): CS ve (b): SB yöntemleri ile üretilen PVDF numunelerinin lif çapı dağılım histogramları.

Figure 3. Fiber diameter distribution histograms of PVDF samples produced by (a): CS and (b): SB methods.



(a)

(b)

Şekil 4(a): CS ve (b): SB örneklerinin yüksek büyütme SEM görüntüleri.

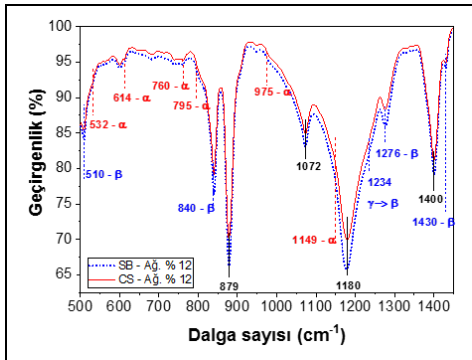
Figure 4. High-magnification SEM images of (a): CS and (b): SB samples.

CS'de elde edilen daha yüksek lif çapları ve SB'de gözlenen daha fazla lif demeti, her iki yöntemde kullanılan çözeltinin konsantrasyonunun biraz daha düşük tutulması durumunda daha kusursuz ve daha ince lifli yapılar elde edilebileceğini işaret etmektedir. Ayrıca, lifleri daha da inceltmek için CS'de ultra yüksek dönüş hızları ve daha ince iğne çaplarının kullanımı önerilebilir. SB'de ise daha kusursuz yapıların üretilmesi için daha yüksek buharlaşma sıcaklığına sahip çözücülerin kullanımı, nozul-toplayıcı arasındaki mesafe

artırılması veya daha düşük hava basınçları kullanılması tavsiye edilebilir. Ancak çözeltinin reolojik özelliklerinin lif oluşumuna uygun kalması gerekmektedir ki bu da yukarıda belirtilen parametrelerin değişim sınırlarını kısıtlamaktadır. Dolayısıyla SB metodunda tamamen kusursuz bir lifli yüzey üretimi zordur.

PVDF'nin piezoelektrik özelliğinin keşfinden bu yana, kristal yapıları ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir [13], [17]. Moleküler zincirlerin üretim sürecindeki konformasyonuna bağlı olarak α , β ve γ fazları yaygın bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu fazlar arasında, β fazı, polimer zinciri boyunca elektronegatif flor grupları ile elektropozitif hidrojen gruplarının karşılıklı olarak düzenlendiği bir yapıya sahiptir ve piezoelektrik etkinin en yüksek olduğu fazdır. Bu özellik, PVDF'nin birçok uygulamasının yanı sıra hava filtresi olarak kullanımında elektret özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir [17]. PVDF nanoliflerinin faz yapısının incelenmesinde FTIR analizi önemli bir araçtır. Cai ve arkadaşlarının PVDF üzerinde gerçekleştirdiği detaylı FTIR incelemesine göre, α fazına ait karakteristik bantlar sırasıyla 410, 489, 532, 614, 763, 795, 854, 975, 1149, 1209, 1383 ve 1423 cm^{-1} ; β fazına ait bantlar 445, 473 ve 1275 cm^{-1} ve γ fazına ait bantlar ise 431, 482, 811 ve 1234 cm^{-1} civarında tespit edilmiştir [13].

Şekil 5'te verilen CS ve SB numunelerinin FTIR spektrumlarına göre, her iki örnek benzer bantlarda pikler sergilemiştir. Özellikle 1430, 1276, 840 ve 510 cm^{-1} 'de gözlemlenen şiddetli pikler ile 614 ve 760 cm^{-1} 'deki zayıf pikler, yapıların ağırlıklı olarak β fazı içerdiğini ve az miktarda α fazı bulundurduğunu işaret etmektedir. Özellikle 614/763 cm^{-1} civarında herhangi bir pik olmaksızın, 1275 cm^{-1} civarında net ve şiddetli bir pikin varlığı, yapının β fazı ağırlıklı olduğunu göstermektedir. γ fazı için 1234 cm^{-1} ve 811 cm^{-1} 'de herhangi bir pikin olmayışından yapının γ fazı içermediği anlaşılmaktadır. Ayrıca, ince nanoliflerin yüzey alanının yüksek olması, FTIR spektrumunda daha şiddetli piklerin görülmesine yol açmıştır. Bu, liflerin daha fazla dipol etkileşimi sergileyerek IR ışınlarını daha etkin bir şekilde absorbe ettiğini düşündürmektedir. Sonuç olarak iki farklı üretim yöntemi ve lif oluşum mekanizmaları elde edilen lifli yüzeylerin morfolojisinde büyük etki sahibi iken faz formasyonunda herhangi bir etki göstermemiştir.

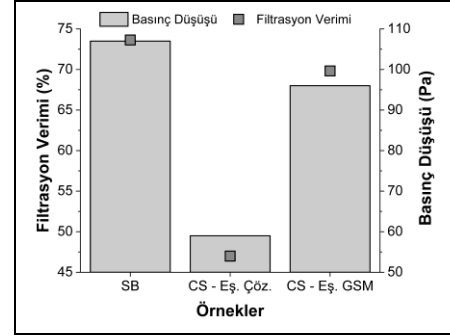


Şekil 5. CS ve SB ile üretilen PVDF liflerinin FTIR spektrumu.

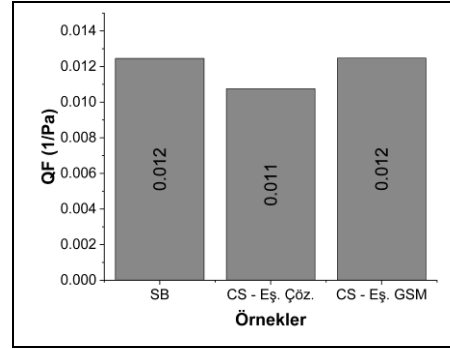
Figure 5. FTIR spectrum of PVDF fibers produced by CS and SB.

CS ve SB örneklerinin $0.26 \pm 0.07 \mu\text{m}$ NaCl aerosol partiküllerine karşı filtrasyon verimlilik ölçümlerinin sonuçlarına Şekil 6'te yer verilmiştir. SB örneğinin yapısındaki nanoliflerin neden olduğu küçük gözenek boyutları ve kompakt yüzey yapısından ötürü η ve ΔP 'si yüksektir. SB yüzeylerin filtrasyon verimi 107 Pa basınç düşüşü ile %73.63 olarak ölçülmüştür. Aynı kalınlıkta üretilen CS örneği kalın lifli ve

hacimli yapısı nedeniyle düşük η (%46.99) ve ΔP (96 Pa) göstermiştir. Öte yandan aynı gramajda SB ve CS (96 Pa, %69.82) örnekleri benzer filtrasyon performansını sergilemiştir. Eşit gramajdaki yüzeyler 0.012 QF değeri göstermiştir. Ancak CS yüzeyleri bu QF değerini aynı gramaj fakat daha kalın ve hacimli yüzey ile sağlamaktadır. Filtre alanının kısıtlı olduğu uygulamalarda SB yüzeylerin kullanımı faydalı olacaktır.



(a)



(b)

Şekil 6. PVDF örneklerin. (a): Filtrasyon verimlilikleri ve basınç düşüş değerleri ile (b): Kalite faktörleri.

Figure 6(a): Filtration efficiencies and pressure drop values, and (b): Quality factors of PVDF samples.

4 Sonuçlar

CS ve SB yöntemleri ile üretilen PVDF lifli yüzeylerin morfoloji, kristal yapısı ve partikül filtrasyon performanslarının karşılaştırmalı olarak incelendiği bu çalışmada yöntemlerin özellikle morfoloji ve filtre performansı üzerinde önemli etki sahibi olduğu görülmüştür. CS ile yöntemle üretilen lifler $0.827 \pm 0.365 \mu\text{m}$, SB yöntemiyle elde edilen lifler $0.356 \pm 0.168 \mu\text{m}$ çaplarındadır. Her iki üretim yönteminde de elde edilen PVDF lifleri büyük oranda β ve az miktarda α fazı barındırdığı görülmüştür. İnce lifler ve kalın lif demetleri barındıran SB örneği daha kompakt yapıya sahiptir. Aynı kalınlıklardaki örneklerde SB yüzeyleri daha yüksek filtrasyon değeri sağlamıştır. Bu sonuçlar, lif çapının ve yüzey kalınlığının filtrasyon performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Kalın liflerden oluşan CS yüzeylerin düşük yoğunlukta olmaları nedeniyle ancak yeterli kalınlık değerinde ince liflerden ve lif demetlerinden oluşan kompakt SB yüzeyinin filtrasyon verimine yaklaşmaktadır.

5 Conclusions

In this study, which compares the morphology, crystalline structure, and particle filtration performance of PVDF fibrous

mats produced by CS and SB methods, it was observed that these techniques significantly impact morphology and filtration performance. The fibers produced by the CS method have a diameter of $0.827 \pm 0.365 \mu\text{m}$, while those obtained through the SB method have a diameter of $0.356 \pm 0.168 \mu\text{m}$. PVDF fibers produced by both methods predominantly exhibit the β phase, with a small amount of the α phase present. The SB sample, containing fine fibers and thick fiber bundles, has a more compact structure. For samples of the same thickness, SB mats demonstrated higher filtration efficiency. These results indicate that fiber diameter and mat thickness greatly influence filtration performance. Due to the lower density of the thick fibers in CS mats, they can only approach the filtration efficiency of the compact SB mat, which consists of fine fibers and fiber bundles, when the CS mat achieves a sufficient thickness.

6 Teşekkür

Gerçekleştirilen çalışmanın üretim ve ölçümü aşamasındaki katkılarından dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Tekstil Makina ve Malzemeleri Araştırma Geliştirme Merkezi (TEMAG Lab)'a teşekkür ederim.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada fikrin oluşturulması, tasarımın yapılması, literatürün taranması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan malzemelerin temin edilmesi, sonuçların incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi işlemlerinin hepsi Mehmet Durmuş Çalışır tarafından gerçekleştirilmiştir.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

- [1] ASHRAE. "Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size". https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-52-2-2017?product_id=1942059 (20.09. 2024).
- [2] Cecala AB, Organiscak JA, Noll JD, Zimmer JA. "Comparison of MERV 16 and HEPA filters for cab filtration of underground mining equipment". *Mining Engineering*, 68, 50-58, 2016.
- [3] Toptas A, Calisir M, Kilic A. "Optimization of electro-blown PVDF nanofibrous mats for air filter applications". *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 11, 199-206, 2024.
- [4] Tetik GD, Jumageldiyeva E, Tayyar AE. "Production of nanofiber textile surfaces with β -arbutin via electrospinning method". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 27(7), 788-793, 2021.
- [5] İkiz Y. "Effect of process parameters on morphology of electrospun PVA nanofibers". *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 15(3), 363-369, 2009.
- [6] Stojanovska E, Canbay E, Serife Pampal E, Calisir MD, Agha O, Polat Y, Simsek R, Gundogdu SNA, Akgul Y, Kilic A. "A review on non-electro nanofibre spinning techniques". *RSC Advances*, 6, 83783-83801, 2016.
- [7] Eticha A, Toptas A, Akgul Y, Kilic A. "Electrically assisted solution blow spinning of PVDF/TPU nanofibrous mats for air filtration applications". *Turkish Journal of Chemistry*, 47, 47-53, 2023.
- [8] Liu ZL, Zhang W. "Electrospun PVDF nanofibrous membranes effectively capturing PM2.5 and releasing negative ions". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 409, 012010, 2018.
- [9] Bui TT, Shin MK, Jee SY, Long DX, Hong J, Kim M-G. "Ferroelectric PVDF nanofiber membrane for high-efficiency PM0.3 air filtration with low air flow resistance". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 640, 128418, 2022.
- [10] Nakashima R, Watanabe K, Lee Y, Kim BS, Kim IS. "Mechanical properties of poly(vinylidene fluoride) nanofiber filaments prepared by electrospinning and twisting". *Advances in Polymer Technology*, 32, E44-52, 2013.
- [11] Toptas A, Calisir MD, Gungor M, Kilic A. "Enhancing filtration performance of submicron particle filter media through bimodal structural design". *Polymer Engineering & Science*, 64(2), 901-912, 2024.
- [12] Toptas A, Calisir MD, Kilic A. "Production of ultrafine PVDF nanofiber-/nanonet-based air filters via the electroblowing technique by employing PEG as a pore-forming agent". *ACS Omega*, 8, 38557-38565, 2023.
- [13] Cai X, Lei T, Sun D, Lin L. "A critical analysis of the α , β and γ phases in poly(vinylidene fluoride) using FTIR". *RSC Advances*, 7, 15382-15389, 2017.
- [14] Tepekiran BN, Calisir MD, Polat Y, Akgul Y, Kilic A. "Centrifugally spun silica (SiO₂) nanofibers for high-temperature air filtration". *Aerosol Science and Technology*, 53, 921-932, 2019.
- [15] Polat Y, Pampal ES, Stojanovska E, Simsek R, Hassanin A, Kilic A, Demir A, Safak Y. "Solution blowing of thermoplastic polyurethane nanofibers: A facile method to produce flexible porous materials". *Journal of Applied Polymer Science*, 133(9), 43025, 2016.
- [16] Gungor M, Calisir MD, Kilic A. "Solution-Blown PA6- and PVDF-Based nanofibrous composite mats for aerosol filtration". *Fibers and Polymers*, 24, 1603-1612, 2023.
- [17] Ruan L, Yao X, Chang Y, Zhou L, Qin G, Zhang X. "Properties and applications of the β phase poly(vinylidene fluoride)". *Polymers (Basel)*, 10, 228, 2018.