

## İğne Çapı ve Besleme Hızının Elektro Çekim Tekniğiyle Üretilmiş Poliakrilonitril Nanoliflerinin Morfolojisine Etkisi

Halil İbrahim İÇOĞLU\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Gaziantep

Geliş tarihi: 17.07.2019

Kabul tarihi: 20.12.2019

### Öz

Elektro çekim tekniği, sahip olduğu avantajlar sayesinde nanolif üretiminde en çok kullanılan ve araştırılan yöntemdir. Üretilen nanolif morfolojisi üzerinde etkili olan elektro çekim parametrelerinde, bazı parametreler (viskozite, yüzey gerilimi vb.) birinci dereceden önemliken bazıları (voltaj, çözelti besleme hızı vb.) da ikinci derece öneme sahiptir. Çeşitli polimerler için özellikle iğne çapı ve ortalama nanolif çapı arasında birbirinden farklı ilişkilerin gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, poliakrilonitril (PAN) polimeri için dört farklı iğne çapı ve dört farklı çözelti besleme hızı kullanılarak elektro çekim tekniğiyle üretilen nanoliflerin morfolojisi incelenmiştir. Üretilen nanoliflerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak, bir görüntü analiz programı yardımıyla ortalama nanolif çapları ve varyasyonları ölçülmüştür. Sonuç olarak iğne çapındaki ve çözelti besleme hızındaki artışın ortalama nanolif çaplarında artışa neden olduğu görülmüştür. Bununla beraber kalın iğnelerde daha düşük nanolif çap varyasyonu elde edilmiştir. Özellikle 60 µL/min besleme hızı için iğne çapı artışının boncuklanmayı artırdığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektro çekim, Nanolif, Poliakrilonitril, İğne çapı, Besleme hızı

### Effect of Needle Diameter and Flow Rate on Electrospun Polyacrylonitrile Nanofiber Morphology

### Abstract

Due to the advantageous properties, electrospinning is the most common method in nanofiber production. While some electrospinning parameters (viscosity, surface tension etc.) are fundamentally important on nanofiber morphology, the others (applied voltage, feed rate etc.) are also important. Different relationships between needle diameter and average nanofiber diameter for various polymers have been mentioned in the literature. In this study, the effect of needle diameter and flow rate on morphology of electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofibers are investigated. Scanning electron microscopy (SEM) is used for determination of morphology and also an image processing software is used for determination of average diameter and standard deviation of PAN nanofibers. The results show that, average nanofiber diameter increases with increasing of needle diameter and flow rate. Also, lower nanofiber diameter deviation is obtained in larger diameter needles. Also it is seen that, bead formation increases with increasing of needle diameter for especially 60 µL/min of feed rate value.

**Keywords:** Electrospin, Nanofiber, Polyacrylonitrile, Needle diameter, Flow rate

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Halil İbrahim İÇOĞLU, [icoglu@gantep.edu.tr](mailto:icoglu@gantep.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Nanolifler, nanometre boyutunda çapa sahip olup, bundan dolayı başta yüksek yüzey alanı olmak üzere birçok avantajlı özelliklere sahiptir. Bu nedenle nanolifler, filtrasyon, doku mühendisliği, ilaç salınımı vb. potansiyel uygulama alanlarına sahiptirler [1-3]. Farklı yöntemlerle nanoliflerin üretilmesinin mümkün olmasına rağmen, elektro çekim tekniğiyle nanolif üretilmesi, sistemin basitliği, düşük maliyetli olması, tekrarlanabilirliği ve endüstriyel ölçekte üretime uygunluğu açısından ön plana çıkmaktadır [4,5]. Elektro çekim yöntemi en basit haliyle; bir yüksek voltaj güç kaynağı, bir toplayıcı ve bir çözelti besleme sistemi ile kapılar uçtan(iğne) oluşmaktadır [6].

Poliakrilonitril (PAN) polimeri sahip olduğu özelliklerden dolayı tekstil endüstrisinde birçok alanda kullanılmasının yanı sıra nanolif formunda filtrasyon ve biyomedikal gibi alanlarda da kullanılma potansiyeline sahiptirler [7,8].

Elektro çekim yönteminde üretilen nanoliflerin morfolojisi üzerinde etkisi olan parametreler, üç grup altında toplanabilir. Bunlar, polimer/çözelti parametreleri (viskozite, yüzey gerilimi, iletkenlik vb.), işlem parametreleri (uygulanan voltaj, iğne ucu-toplayıcı arası mesafe, iğne çapı, çözelti besleme hızı vb.) ve çevresel parametrelerdir (ortam sıcaklığı ve nemi vb.) [9].

Polimer/çözelti ve işlem parametreleri konusunda birçok polimer için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak, özellikle işlem parametreleri ele alındığında ise iğne çapı üzerine odaklanılarak yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür [10-13]. Bu çalışmaların haricinde iğne çapı ve çözelti besleme hızının da incelendiği genel elektro çekim parametrelerinin incelendiği çalışmalara da rastlanılmıştır [14-22].

Macossay ve arkadaşları polimetil metakrilat (PMMA) polimeri için yaptıkları çalışmalarında, iğne çapı ile nanolif inceliği arasında ilişki olmadığını ancak, iğne çapının artmasının nanolif çap varyasyonunu azalttığını belirtmişlerdir [10]. Ancak He ve arkadaşları polietilen oksit (PEO)

polimeriyle yaptıkları çalışmalarında, iğne çapının artmasının nanolif çapını artırdığını belirtmişlerdir [11]. Benzer ilişki Abunahel ve arkadaşları ile Kızıldağ ve arkadaşları yaptıkları iğne çapı çalışmalarında da görülmüştür [12,13].

Mo ve arkadaşları P(LLA-CL) polimeri için yaptıkları çalışmalarında iğne çapındaki artışın, boncuk oluşumuna ve tıkanmaya neden olduğunu belirtmişlerdir [14]. Çeşitli polimerler için genel elektrospin parametrelerinin incelendiği çalışmalarda ortalama nanolif çapının, iğne çapının artışıyla arttığı belirtilmiştir [15-18]. Ancak, Sencadas ve arkadaşları yaptıkları çalışmada iğne çapının artışının nanolif çapına belirli bir etkisinin olmadığını, sadece nanolif çap varyasyonunu azalttığını belirtmişlerdir [19]. Zhao ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada, iğne çapındaki artışın hem ortalama nanolif çapını artırdığını hem de nanolif çap varyasyonunu artırdığını belirtmişlerdir [20]. Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ise iğne çapındaki artışın, ortalama nanolif çaplarını önce azaltıp sonra artırdığını görmüşlerdir [21].

Çözelti besleme hızının artmasının, üretilen nanoliflerin çaplarını artırdığı, aynı zamanda boncuk oluşumuna neden olduğu yönde çeşitli çalışmalar mevcuttur [19,22]. Bununla beraber, çözelti besleme hızının ortalama nanolif çapını etkilemediği yönünde de çalışmalara rastlanılmıştır [17,23].

Mevcut literatür incelendiğinde özellikle iğne çapı ve ortalama nanolif çapı arasında birbirinden farklı ilişkilerin gözlemlendiği tespit edilmiştir. Mevcut literatüre katkı sunmak adına bu çalışmada, PAN polimeri için iğne çapı ve çözelti besleme hızının üretilen nanoliflerin morfolojisine etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Çalışmada kullanılan Poliakrilonitril (PAN) polimeri (Mw 150.000) AKSA Akrylic firmasından temin edilmiştir. Elektro çekim çözeltisinin hazırlanmasında çözücü olarak

kullanılan dimetil formamid (DMF) Sigma Aldrich firmasından satın alınmıştır. PAN/DMF çözeltisi, ağırlıkça %12'lik konsantrasyonda bir manyetik karıştırıcı ile 90 °C'de 3 saat boyunca karıştırılarak hazırlanmıştır.

## 2.2. Metot

Çalışmada kullanılan elektro çekim deney düzeneği; iki adet yüksek voltaj güç kaynağı (+50 kV ve -50 kV, Gamma High Voltage®), şırınga pompası (New Era®/NE1000) ve sabit bakır toplayıcı plaka temel bileşenlerinden oluşmaktadır. Deney düzeneği kapalı ve yalıtımlı olup, düzenekte ayrıca sıcaklık ve nem kontrol üniteleri de bulunmaktadır. Çalışma sırasında tüm fanlar devre dışı bırakılmıştır. Nanolifler, alüminyum folyo üzerinde oluşturulmuştur.

Elektro çekim işleminde; uygulanan voltaj, iğne ucu-toplayıcı arası mesafe, ortam sıcaklığı ve rölatif nem sırasıyla, 26 kV, 13 cm, 25 °C ve %40 olarak sabit tutulmuştur. Bu değerler; kesiksiz ve stabil PAN nanolif üretimi gözlemlendiği için seçilmiştir [9]. Çalışmada iğne çapının ve çözelti besleme hızının nanolif morfolojisi üzerine etkilerini görmek için, 4 farklı iğne ve 4 farklı besleme hızı kullanılmıştır (Çizelge 1).

**Çizelge 1.** Çalışmada incelenen parametreler

Parametre		Değer
İğne	Numara	22G - 21G - 20G - 18G
	İç çap (mm)	0,41 - 0,51 - 0,60 - 0,83
Besleme hızı (µL/min)		15 - 30 - 45 - 60

Çalışmada kullanılacak PAN/DMF çözeltisinin viskozitesi, yüzey gerilimi ve elektriksel iletkenliği sırasıyla, Brookfield DV-III Ultra reometre cihazı, Attention Theta optik tensiyometre cihazı ve Orion 4 Star Plus iletkenlik ölçüm cihazı ile tespit edilmiştir.

Çizelge 1'de verilen elektro çekim işlem parametrelerine göre toplamda 16 farklı nanolif numunesi üretilmiştir. Üretilen PAN nanoliflerinin morfolojilerinin incelenmesi amacıyla,

JEOL JSM-6390LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Nanolif çaplarının belirlenmesinde ImageJ yazılımı kullanılmış ve her görüntüden 50 ölçüm alınarak ortalama ve standart sapmaları hesaplanmıştır.

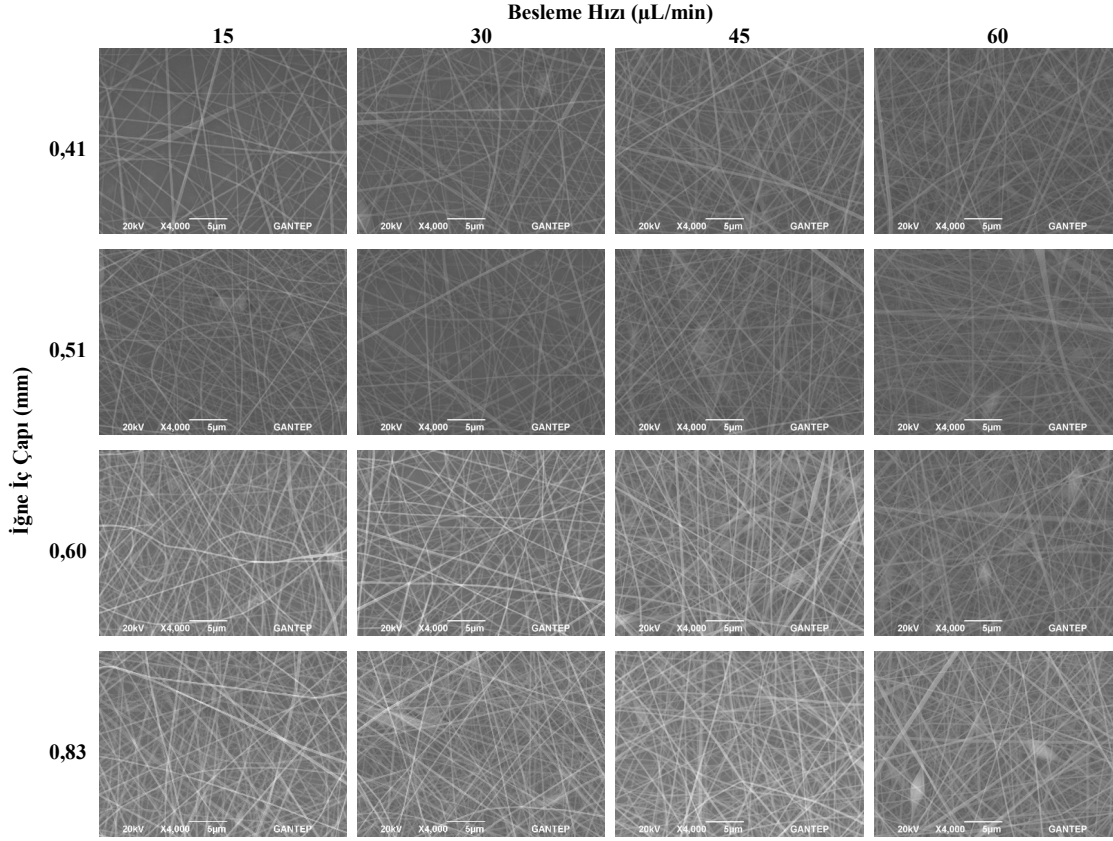
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Hazırlanan ağırlıkça %12'lik PAN/DMF çözeltisinin yüzey gerilimi, iletkenlik ve viskozite (25 °C'de) değerleri sırasıyla; 39,18 mN/m, 73,4 µS/cm ve 896 cP olarak tespit edilmiştir.

Dört farklı çözelti besleme hızı ve dört farklı iğne çapı kullanılarak üretilen PAN nanoliflerine ait alınan SEM görüntüleri toplu olarak Şekil 1'de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde tüm iğne çapları ve besleme hızları için PAN nanoliflerinin üretildiğini ve bu liflerin genel olarak dairesel formda oldukları tespit edilmiştir. Ayrıca besleme hızı artışının özellikle kalın çaplı iğnelerde bir miktar boncuklanmaya neden olduğu görülmüştür. Benzer durum, önceki çalışmalarda da görülmüştür [19,22]. Özellikle 60 µL/min besleme hızı için iğne çapı artışının boncuklanmayı artırdığı SEM görüntülerinden görülmektedir. Çapı geniş iğnelerde tıkanma ve boncuk oluşumu Mo ve arkadaşları yaptığı çalışmada da gözlemlenmiştir [14]. Çözelti besleme hızının artması aynı birim yük için çekilecek polimer çözeltisi miktarının artması demektir. Aynı şekilde iğne çapının artışı, iğne ucunda oluşan damlanın daha geniş çaplı olması demektir. Bunun sonucunda, hava ile etkileşimin artması oluşan jetin stabilitesinde bozulmaya neden olabilir. Böylelikle boncuk oluşumunun arttığı söylenebilir. Bu durumu önlemek için kalın çaplı iğnelerde jetin stabilitesini sağlamak adına viskozitesi daha yüksek çözeltiler kullanılırsa, boncuk oluşumu önlenebilir.

Çizelge 2'de farklı çözelti besleme hızları ve iğne çaplarında üretilen PAN nanolif numunelerine ait ölçülen ortalama çaplar ve standart sapmaları yer almaktadır. Ortalama nanolif çapları incelendiğinde en düşük değere, 15 µL/min ve 0,41 mm iğne iç çapı değerlerinde ulaşıldığı görülmektedir.

*İğne Çapı ve Besleme Hızının Elektrospin Tekniğiyle Üretilmiş Poliakrilonitril Nanoliflerinin Morfolojisine Etkisi*



**Şekil 1.** Farklı iğne çapı ve besleme hızlarında üretilen PAN nanoliflerinin SEM görüntüleri

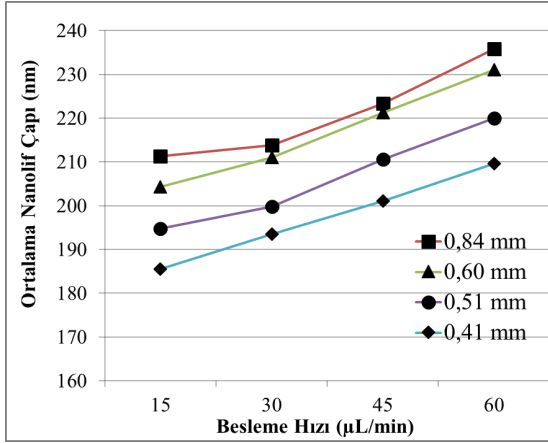
Nanolif çap varyasyonu incelendiğinde ise en düşük varyasyon değerlerinin, 0,84 mm iç çapındaki iğnede (en kalın iğne); en yüksek varyasyon değerlerinin 0,41 mm iç çapındaki iğnede (en ince iğne) elde edildiği görülmektedir. Çözelti besleme hızının ise nanolif çap varyasyonu

üzerinde belirli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Şekil 2’de çözelti besleme hızına göre ortalama nanolif çapındaki değişimler dört farklı iğne çapı için grafik olarak verilmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı iğne çaplarında ve besleme hızlarında üretilen PAN nanoliflerine ait ortalama çaplar ve standart sapmaları (nm)

İğne İç Çapı (mm)	Besleme Hızı ( $\mu\text{L}/\text{min}$ )			
	15	30	45	60
0,41	186 $\pm$ 37	193 $\pm$ 38	201 $\pm$ 43	210 $\pm$ 45
0,51	195 $\pm$ 34	200 $\pm$ 35	211 $\pm$ 38	220 $\pm$ 36
0,60	204 $\pm$ 29	211 $\pm$ 31	221 $\pm$ 30	231 $\pm$ 28
0,84	211 $\pm$ 26	214 $\pm$ 27	223 $\pm$ 25	236 $\pm$ 25



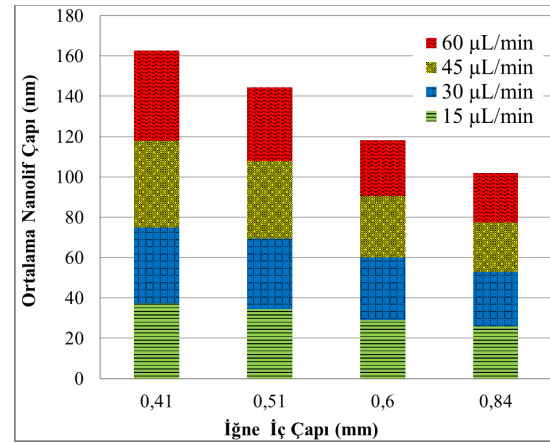
Şekil 2. Besleme hızına göre ortalama nanolif çapı değişim grafiği

Besleme hızındaki artışın ortalama nanolif çaplarını, tüm iğne çapları için artırdığı görülmektedir. Bu durum önceki çalışmaların çoğuyla benzer çıkmıştır [19,22]. Çözelti besleme hızının artışı aynı voltaj değeri için, elektro çekime tabi tutulacak birim çözelti miktarının artması anlamına gelir. Bu da verilen çekimin, düşük besleme hızlarına göre daha az olmasına neden olur ve nanoliflerin kalınlaşmasını sağlar. Literatürde karşılaşılan ve bizim çalışmamıza zıt sonuçların bulunduğu bazı çalışmalarda, besleme hızının nanolif çapına etki etmediği belirtilmiştir. Bu durumun nedeninin her iki çalışmada da düşük viskoziteli çözeltiler kullanılmasından kaynaklandığı söylenebilir [17,23].

PAN nanolifleri için, iğne çaplarındaki artışın, tüm besleme hızları için nanolif çaplarını artırdığı görülmektedir. Bu durum literatürdeki bazı çalışmalarla benzerlik göstermektedir [11-13,15-18]. İğne çapındaki artışın, üretilen nanolifleri kalınlaştırması farklı mekanizmalarla açıklanabilir. İlk olarak, iğne çapındaki artış daha büyük çaplı damla oluşumuna neden olur. Damlanın büyümesinin yüzey geriliminin azalmasına neden olacağı bilinmektedir [20]. Aynı voltaj değeri için düşük yüzey gerilimi demek, jet oluşum hızının artması ve toplayıcıya ulaşma süresinin kısalması anlamına gelir. Bu da çekimin azalması dolayısıyla da nanoliflerin kalınlaşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, aynı besleme hızı için iğne çapının

azalması, iğne içindeki çözeltinin hızının ve buna bağlı kayma hızının artmasına neden olacak ve bu durum viskoziteyi azaltacaktır [11]. Viskozitenin azalmasıyla da üretilen nanoliflerin incelmeleri sonucu ortaya çıkmıştır. Son olarak, iğne çapının artması damlanın büyümesi demektir ve bu da hava ile etkileşim halinde olan çözelti miktarının daha fazla olması ve dolayısıyla daha hızlı buharlaşma ve katılaşma görülmesi demektir. Bu durum, iğne çapının artmasıyla tıkanma probleminin artması konusuyla ilişkilendirilebilir [14]. Hızlı katılaşan jet fazla çekime uğramaz ve bu durum da kalın çaplarda nanoliflerin oluşumuna neden olabilir.

Şekil 3'te iğne çaplarına göre nanolif çapı varyasyonlarındaki değişim dört farklı çözelti besleme hızı için grafik olarak verilmiştir.



Şekil 3. İğne çaplarına göre nanolif çapı varyasyonlarındaki değişim grafiği

PAN nanolifleri için iğne çapının artması, ortalama nanolif çaplarındaki standart sapma değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Bu da kalın iğnelere elde edilen nanoliflerin daha homojen bir çap dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç Macossay ve arkadaşları ile Sencadas ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarla benzerlik göstermektedir [10,19]. Çap varyasyonunun ince iğnelere daha çok görülmesinin sebebinin, aynı besleme hızı için yüzey geriliminin ve iğne ucu çıkış hızının dahayüksek olmasıyla ilişkili olduğu söylenebilir. PAN nanolifleri için çözelti besleme

hızı ile nanolif çap varyasyonu arasında net bir ilişki görülmemiştir.

#### 4. SONUÇ

Çalışma kapsamında, PAN polimeri kullanılarak iğne çapı ve çözelti besleme hızının üretilen nanoliflerin morfolojisine etkilerinin belirlenmesi araştırılmıştır. Dört farklı iğne çapı ve dört farklı çözelti besleme hızı kullanılarak PAN/DMF çözeltisi elektro çekim tekniğiyle nanoliflere dönüştürülmüş ve bu nanoliflerin morfolojilerinin tespit edilmesi için SEM cihazı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, hem iğne çapındaki artışın ve hem de çözelti besleme hızındaki artışın ortalama nanolif çaplarını artırdığı tespit edilmiştir. Bununla beraber, iğne çapının artması, ortalama nanolif çaplarındaki standart sapma değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Ayrıca besleme hızı artışının kalın çaplı iğnelerde bir miktar boncuklanmaya neden olduğu görülmüştür. Özellikle 60 µL/min besleme hızı için iğne çapı artışının boncuklanmayı artırdığı da gözlemlenmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Huang, Z.M., Zhang, Y.Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S., 2003. A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and their Applications in Nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223-2253.
2. Gibson, P.W., Lee, C., Ko, F., Reneker, D., 2007. Application of Nanofiber Technology to Nonwoven Thermal Insulation, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2(2), 32-40.
3. Rutledge, G.C., Fridrikh, S.V., 2007. Formation of Fibers by Electrospinning, *Advanced Drug Delivery Reviews*, 59(14), 1384-1391.
4. Baumgarten, P.K., 1971. Electrostatic Spinning of Acrylic Microfibers, *Journal of Colloid and Interface Science*, 36(1), 71-79.
5. Doshi, J., Reneker, D.H., 1995. Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers, *Journal of Electrostatics*, 35(2-3), 151-160.
6. Formhals, A. 194. US Patent, 1, 975 504.
7. Sawhney, A.P.S., Condon, B., Singh, K.V., Pang, S.S., Li, G., Hui, D., 2008. Modern Applications of Nanotechnology in Textiles, *Textile Research Journal*, 78(8), 731-739.
8. Qian, L., Hinestroza, J.P., 2004. Application of Nanotechnology for High Performance Textiles. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 4(1), 1-7.
9. Kirecci, A., Özkoç, Ü., İçoğlu, H.İ., 2012. Determination of Optimal Production Parameters for Polyacrylonitrile Nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 124(6), 4961-4968.
10. Macossay, J., Marruffo, A., Rincon, R., Eubanks, T., Kuang, A., 2007. Effect of Needle Diameter on Nanofiber Diameter and Thermal Properties of Electrospun Poly (Methyl Methacrylate), *Polymers for Advanced Technologies*, 18(3), 180-183.
11. He, H., Kara, Y., Molnar, K., 2018. Effect of Needle Characteristic on Fibrous PEO Produced by Electrospinning, *Resolution and Discovery*, 1-5.
12. Abunahel, B.M., Azman, N.Z.N., Jamil, M., 2018. Effect of Needle Diameter on the Morphological Structure of Electrospun n-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Epoxy-PVA Nanofiber Mats, *Chemical and Materials Engineering*, 12(6), 296-299.
13. Kizildag, N., Beceren, Y., Kazanci, M., Cukul, D., 2012. Effect of Needle Diameter on Diameter of Electrospun Silk Fibroin Nanofibers, *RMUTP International Conference: Textiles and Fashion*, Bangkok, Thailand.
14. Mo, X.M., Xu, C.Y., Kotaki, M.E.A., Ramakrishna, S., 2004. Electrospun P (LLA-CL) Nanofiber: A Biomimetic Extracellular Matrix for Smooth Muscle Cell and Endothelial Cell Proliferation, *Biomaterials*, 25(10), 1883-1890.
15. Shahabadi, S.M.S., Kheradmand, A., Montazeri, V., Ziaee, H., 2015. Effects of Process and Ambient Parameters on Diameter and Morphology of Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers, *Polymer Science Series A*, 57(2), 155-167.
16. Heikkilä, P., Harlin, A., 2008. Parameter Study of Electrospinning of Polyamide-6, *European Polymer Journal*, 44(10), 3067-3079.

17. Sencadas, V., Correia, D. M., Areias, A., Botelho, G., Fonseca, A. M., Neves, I. C., Mendez, S. L., 2012. Determination of the Parameters Affecting Electrospun Chitosan Fiber Size Distribution and Morphology, *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1295-1301.
18. Kuchi, C., Harish, G. S., Reddy, P. S., 2018. Effect of Polymer Concentration, Needle Diameter and Annealing Temperature on TiO<sub>2</sub>-PVP composite nanofibers synthesized by electrospinning technique, *Ceramics International*, 44(5), 5266-5272.
19. Sencadas, V., Ribeiro, C., Nunes-Pereira, J., Correia, V., Lanceros-Méndez, S., 2012. Fiber Average Size and Distribution Dependence on the Electrospinning Parameters of Poly (Vinylidene Fluoride-trifluoroethylene) Membranes for Biomedical Applications, *Applied Physics A*, 109(3), 685-691.
20. Zhao, S., Wu, X., Wang, L., Huang, Y., 2004. Electrospinning of Ethyl-cyanoethyl Cellulose/tetrahydrofuran Solutions, *Journal of Applied Polymer Science*, 91(1), 242-246.
21. Wang, C., Zhang, W., Huang, Z.H., Yan, E.Y., Su, Y.H., 2006. Effect of Concentration, Voltage, Take-over Distance and Diameter of Pinhead on Precursory Poly (Phenylene Vinylene) Electrospinning, *Pigment & Resin Technology*, 35(5), 278-283.
22. Park, J.Y., Lee, I.H., Bea, G.N., 2008. Optimization of the Electrospinning Conditions for Preparation of Nanofibers from Polyvinylacetate (PVAc) in Ethanol Solvent, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14(6), 707-713.
23. Tan, S.H., Inai, R., Kotaki, M., Ramakrishna, S., 2005. Systematic Parameter Study for Ultra-fine Fiber Fabrication Via Electrospinning Process, *Polymer*, 46(16), 6128-6134.

