

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANTRİFÜJ EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOLİF YAPILI DOKUSUZ KUMAŞ
ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI VE FİLTRASYON
ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa KURTULUŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ
Eş Danışman: Yard. Doç. Dr. Ali KILIÇ**

AĞUSTOS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SANTRİFÜJ EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOLİF YAPILI DOKUSUZ KUMAŞ
ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI VE FİLTRASYON
ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mustafa KURTULUŞ
(503121310)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ
Eş Danışman: Yard. Doç. Dr. Ali KILIÇ**

AĞUSTOS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121310 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Mustafa KURTULUŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SANTRİFÜJ EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOLİF YAPILI DOKUSUZ KUMAŞ ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI VE FİLTRASYON ÖZELLİKLERİ**”başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Yard. Doç. Dr. AliKILIÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yard. Doç. Dr. Ramazan Murat TABANLI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Paşa YAYLA
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **27 Ağustos 2015**

Pek kıymetli aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda değerli vaktini bana ayırarak, bilgi, görüş ve tecrübelerini paylaştıkları için pek kıymetli hocalarım Prof. Dr. Şafak Yılmaz ve Yard. Doç. Dr. Ali Kılıç' a teşekkürü bir borç bilirim.

Yine çalışmalarımda maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen mesai arkadaşlarım TEMAG laboratuvarı araştırmacılarına canı gönülden teşekkür ederim.

Ağustos 2015

Mustafa Kurtuluş
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Hipotez.....	2
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	5
2.1 Mevcut Nanolif Üretim Teknikleri.....	5
2.1.1 Elektroüretim (Electrospinning).....	6
2.1.2 Eriyikten üfleme (Melt blowing).....	7
2.1.3 Çözeltilerden üfleme (Solution blowing).....	8
2.1.4 Çift bileşenli lif eğirme (Bicomponent fiber spinning).....	9
2.1.5 Faz ayrıştırma (Phase separation).....	9
2.1.6 Kalıba sentezleme (Template synthesis).....	10
2.1.7 Kendinden bağlı (Self assembly).....	11
2.2 Santrifüj Eğirme (Centrifugal Spinning).....	12
2.2.1 Santrifüj eğirme sonucu elde edilen nanolif yapısı.....	13
2.2.2 Santrifüj eğirme sistemi aparatları.....	14
2.2.2.1 Dönüş hareketi yapan rotor.....	15
2.2.2.2 Nanolif toplama düzeneği.....	15
2.2.3 Santrifüj eğirmeyi etkileyen faktörler.....	18
2.2.3.1 Malzeme özellikleri.....	18
2.2.3.2 İşlem parametreleri.....	21
2.2.4 Santrifüj eğirmede elde edilen nanolif tipleri.....	25
2.2.4.1 Polimer nanolifler.....	25
2.2.4.2 Karbon nanolifler.....	26
2.2.4.3 Seramik nanolifler.....	26
2.2.5 Santrifüj eğirme nanolif uygulamaları.....	27
3. SANTRİFÜJ EĞİRME SİSTEMİ TASARIMI.....	29
3.1 Giriş.....	29
3.2 Sistem Elemanları.....	29
3.2.1 Rotor.....	29
3.2.2 Motor.....	30
3.2.3 Toplayıcı.....	31
3.2.4 Düzeler.....	32

4. TERMOPLASTİK POLİÜRETAN ÇÖZELTİSİ İLE NANOLİF ÜRETİMİ VE SİSTEM PARAMETRELERİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ	35
4.1 Giriş	35
4.2 Malzemeler ve Yöntem	35
4.3 Sonuçlar ve Yorum.....	35
4.3.1 Çözelti derişiminin etkisi	36
4.3.2 İlave katkı etkisi	40
4.3.3 Devir hızının etkisi.....	43
4.3.4 Düze çapının etkisi.....	45
4.3.5 Düze toplayıcı arası mesafenin etkisi.....	46
5. FİLTASYON ÖZELLİKLERİ.....	49
5.1 Hava Geçirgenlik Testi.....	49
5.2 Su Geçirgenlik ve Filtrasyon Testleri.....	50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ.....	65

KISALTMALAR

Be	: Berry Sayısı
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
DMF	: Dimetilformamid
KNL	: Karbon nanolifler
PA6	: Poliamid 6
PAA	: Poliakrilik asit
PAN	: Poliakrilonitril
PBT	: Polibütlen tereftalat
PCL	: Polikaprolakton
PEO	: Polietilen oksit
PES	: Polieter sulfon
PLA	: Polilaktik asit
PLLA	: Poli L laktik asit
PMMA	: Polimetil metakrilat
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PTFE	: Politetrafluoroetilen
PU	: Poliüretan
PVA	: Polivinil alkol
PVDF	: Poliviniliden florid
PVP	: Polivinilpirolidon
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
TiO₂	: Titanya
TPU	: Termoplastik poliüretan
ZiO₂	: Zirkonya

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çözeltiden üfleme yöntemine etki eden değişkenler.....	9
Çizelge 2.2 : Santrifüj eğirme yöntemi değişkenleri.	18
Çizelge 2.3 : Sıcaklık ve viskozitenin ortalama lif çapına etkisi.	19
Çizelge 2.4 : Derişimin ortalama lif çapına etkisi.	20
Çizelge 2.5 : Çeşitli bileşimlerle yapılan üretimler için döner disk hızının ortalama lif çapına etkisi.	23
Çizelge 2.6 : Lif çapı için istatistik özeti.	23
Çizelge 2.7 : Düze çapının nanolif çapına etkisi.	24
Çizelge 2.8 : Düze-Toplayıcı Mesafesinin Lif çapına etkisi.	24
Çizelge 2.9 : Rotor ve sıcaklığın ortalama lif çapına etkisi.	25
Çizelge 3.1 : Devir hızı test sonuçları.....	30
Çizelge 4.1 : Değişen TPU oranına bağlı olarak yüzey gerilim değerleri.	36
Çizelge 4.2 : Değişen TPU oranına bağlı olarak viskozite değerleri.....	37
Çizelge 4.3 : Etil asetat katkısına bağlı olarak çözelti yüzey gerilim değerleri.....	40
Çizelge 4.4 : Etil asetat katkısına bağlı olarak çözelti viskozite değerleri.	41
Çizelge 5.1 : Hava geçirgenlik deney sonuçları.	50
Çizelge 5.2 : Kaplamalı ve kaplamasız kumaşların sabit basınçtaki su akı değerleri	52
Çizelge 5.3 : Parçacık sayımı deney sonuçları.	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektroüretimin şematik gösterimi.	6
Şekil 2.2 : Eriyikten elektroüretim sisteminin şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.3 : Eriyikten üfleminin şematik gösterimi.	8
Şekil 2.4 : Çözeltiden üfleme metodunun şematik gösterimi.	8
Şekil 2.5 : Çift bileşenli lif eğirme kesitleri.....	9
Şekil 2.6 : Faz ayrıştırma yöntemi.	10
Şekil 2.7 : Kalıba sentezleme yöntemi.	11
Şekil 2.8 : Kendinden bağlı yöntemi.	11
Şekil 2.9 : Weitz ve arkadaşlarının kullandığı santrifüj eğirme sisteminin şematik görünümü.....	13
Şekil 2.10 : Lozano ve arkadaşlarının tasarladığı rotor.	13
Şekil 2.11 : A) Santrifüj eğirme sistem genel elemanları B) Sıvı jet üzerindeki kuvvetler.....	14
Şekil 2.12 : Şırıngalı rotor tasarımı.....	15
Şekil 2.13 : Hazne şeklindeki rotor tasarımı.....	15
Şekil 2.14 : Metal ya da plastik silindirik toplayıcı.	16
Şekil 2.15 : Dikme parçalar kullanılarak yapılan toplayıcı.	16
Şekil 2.16 : Hareketli düz yüzey şeklindeki toplayıcı.	17
Şekil 2.17 : Vakumlu toplayıcı.	17
Şekil 2.18 : Hava jetli toplayıcı.	17
Şekil 2.19 : Havuzlu toplayıcı.	18
Şekil 2.20 : V. R. Giri Dev ve ekibinin A) 100% PCL, B) 100%, PVP C) 70:30 PCL/PVP farklı konsantrasyonlarda ürettiği numunelerin SEM görüntüsü.	20
Şekil 2.21 : T. O'Haire ve ekibinin santrifüj eğirme cihazı.	22
Şekil 2.22 : J. Ellison ve ekibinin düzeneğinin şematik gösterimi.	25
Şekil 3.1 : Rotor.....	29
Şekil 3.2 : A) Motor B) Sürücü.	30
Şekil 3.3 : A) Lazer takometre B) Devir hızı tespit düzeneği.	30
Şekil 3.4 : Ek hava ünitesi teknik resmi.	31
Şekil 3.5 : Ek hava ünitesi imalatı.	32
Şekil 3.6 : Ek hava ünitesi.	32
Şekil 3.7 : Düze.	33
Şekil 4.1 : Değişen TPU oranına bağlı olarak yüzey gerilim grafiği.....	36
Şekil 4.2 : Değişen TPU oranına bağlı olarak viskozite grafiği.	37
Şekil 4.3 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden %5 TPU içeren çözelti ile elde edilmiş SEM görüntüsü.	38
Şekil 4.4 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden %10 TPU içeren çözelti ile elde edilmiş SEM görüntüsü.	38

Şekil 4.5 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden A) %15 TPU B) %20 TPU içeren çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.....	39
Şekil 4.6 : Farklı derişimlerden elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.	39
Şekil 4.7 : Sabit %15 TPU çözeltisi ve değışen etil asetat değerlerinde yüzey gerilimi değerleri.	41
Şekil 4.8 : Sabit %15 TPU çözeltisi ve değışen etil asetat değerlerinde viskozite değerleri.	41
Şekil 4.9 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden, %15 TPU çözeltisine A) %5 etil asetat B) %10 etil asetat C) %15 etil asetat D) %20 etil asetat ilavesi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.	42
Şekil 4.10 : Farklı ilave katkıları elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.	43
Şekil 4.11 : 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden A) 3000 dev/dak B) 4500 dev/dak C) 6000 dev/dak D) 7500 dev/dak E) 9000 dev/dak hızlarda %15 TPU çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.	44
Şekil 4.12 : Farklı devir hızlarında elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.	45
Şekil 4.13 : Farklı çaplardaki düze kullanımında elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.....	46
Şekil 4.14 : 6000 dev/dak, 15 cm mesafeden A) 0.3 mm B) 0.5 mm C) 1 mm çaplarındaki düze kullanımı ile %15 TPU çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.....	47
Şekil 4.15 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze kullanımı ve A) 15 cm B) 30 cm mesafelerden %15 TPU çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.....	48
Şekil 4.16 : Farklı mesafe ölçülerinde elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı. .	48
Şekil 5.1 : Hava geçirgenlik deney cihazı.....	49
Şekil 5.2 : Su geçirgenlik deney düzeneği.	51
Şekil 5.3 : Damıtık suyun A) Kaplamasız B) Kaplanmış kumaş kullanımı sonucundaki su akı değerleri.	52
Şekil 5.4 : Parçacık sayımı deney cihazı.....	53

SANTRİFÜJ EĞİRME YÖNTEMİYLE NANOLİF YAPILI DOKUSUZ KUMAŞ ÜRETİMİNİN OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI VE FİLTASYON ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Nanolifli yapılar çok küçük gözenekli yapıları, yüksek yüzey alanları gibi özelliklerden dolayı tekstil, kompozit ve enerji uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır [1–5]. Günümüzde nanolif üretiminde kullanılan ve üzerinde en çok araştırma yapılan geleneksel yöntem elektroüretim yöntemidir [6]. Ancak yöntemin düşük üretim hızı ve yüksek voltaj gerektirmesi gibi gerekçeler yüzünden endüstride kullanımı kısıtlıdır. Eriyikten üfleme yöntemi yüksek üretim hızına müsait olmasına rağmen, nano seviyede lif üretimi konusunda sınırlı olduğundan ve yüksek sıcaklıklarda hava kullanımı gerektirdiğinden dezavantajlıdır [7]. Çözeltiden üfleme yöntemi sadece polimer derişiminin miktarına bağılı olarak çözeltilerle çalışabiliyor oluşundan ötürü kısıtlıdır [8]. Diğer yöntemler olan çift bileşenli lif eğirme, faz ayrıştırma, kalıba sentezleme ve kendinden bağılı yöntemlerin de malzeme ve işleyişlerinden dolayı kısıtlamalar içermesi akademik ve endüstriyel çevreleri yeni bir yöntem arayışına itmiştir. Mevcut yöntemlerin kısıtlarını ortadan kaldıracak bir yöntemin varlığı endüstri ve akademik çevreler için önemli bir gelişme olacaktır. Santrifüj eğirme yöntemi kurulumu ve çalıştırılması basit, üretim hızının diğer yöntemlere nazaran yüksek oluşu gibi özellikleriyle nanolif üretiminde önemli bir alternatif üretim yöntemidir.

Bu tez çalışmasında geleneksel lif üretim tekniklerine göre yüksek üretim hızı ve nispeten düşük maliyetiyle öne çıkan santrifüj eğirme yönteminin optimizasyon çalışmaları ve bu yöntemin kullanılmasıyla üretilen nanolif yapıları dokusuz kumaşların filtrasyon özellikleri araştırılmıştır.

İlk aşamada santrifüj eğirme sistemi için gerekli makina-teçhizat tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Sistemin tasarım aşamasında çeşitli CAD programları kullanılarak katı modellemeler ve imalatı için uygun teknik resimler oluşturulmuştur. Deney düzeneği kurularak nano ölçekli lifler ile dokusuz kumaş yapıları elde edilmiştir. Çeşitli sistem

parametreleri uygulanarak, değişikliklerin lif yapısı üzerindeki etkisi incelenmiş, optimum parametrelere ulaşılması hedeflenmiştir. Çalışmada dokusuz kumaş üretimi için termoplastik poliüretan (TPU) içeren çözeltiler kullanılmıştır.

İkinci aşamada optimum parametreler kullanılarak dokusuz kumaş numuneleri elde edilmiş ve bunların hava ve su geçirgenlik özellikleri ile su filtrasyon performansları incelenmiştir. Bu yenilikçi yöntem ile yapılan çalışmalar neticesinde hava ve su filtreleri üretilebileceği görölmüştür.

PRODUCTION AND OPTIMIZATION OF NANOFIBROUS NONWOVEN WEBS VIA CENTRIFUGAL SPINNING AND THEIR FILTRATION PROPERTIES

SUMMARY

Nanofibrous nonwovens are important engineering materials in textile, composite and energy sectors because of their low fiber diameter, micro- nano porous structure and high surface area to volume [1–5]. Electrospinning is the most widely used traditional method for the production of nanofibers [6]. Low production rate and high voltage requirement are drawbacks of electrospinning, limiting its industrial scalability. Although meltblowing might be a productive alternative, it is not easy to produce nano scale fibers. Also, it requires compressed hot air and applicable to limited number of materials [7]. Solution blowing might be an alternative where the disadvantage is related its dependency on solution concentration [8].

As an alternative centrifugal spinning has many important advantages over the other nanofiber production methods such as simple working principle, availability to produce fibers from polymer melts and solutions, independency from high voltage, high production rate, and low cost. Also, this method is suitable for processing polymeric and ceramic nanofibers. The diameter and morphology of the fibers are dependent on solution viscosity, surface tension, molecular structure, molecular weight, concentration while rotational speed of and diameter of the rotor, nozzle diameter and working distance between rotor and collector are process parameters.

In this study, effective system, process and material parameters of centrifugal spinning were investigated. Moreover filtration properties of centrifugally spun nonwoven webs were analyzed. After a short review on recent literature, a proper spinning system was designed and manufactured using some CAD programmes to make solid models and related technical drawings. An aluminum rotor with 50 ml volume and 220 g weight was used, where a 2.2 kw (3 hp) spindle motor was selected as driving force for the rotor. The spindle has 18000 rpm rotational capacity, but maximum speed was kept 10000 rpm because of safety precautions.

Nozzle diameter was seen to be critical on the morphology of fibers. Different type of nozzles with 0.3, 0.5 and 1.0 μm diameter were designed and manufactured to be used in this study.

In the literature several types of collection systems were mentioned for centrifugal spinning. In my study a steel mesh conveyor was used to collect the fibers. A vacuum manifold was used just behind the conveyor to make the collection more effective.

Nanofibers and nanofibrous nonwoven webs were produced with experimental centrifugal spinning setup in Mechanical Engineering Laboratories of ITU. Firstly, effect of solution concentration was examined. A critical viscosity value must be achieved to obtain fibers continuously. The fiber production was not successful from solutions at 5wt.% and 10wt.% concentration, while 15wt.% and 20wt.% concentrations were suitable to produce fibers. Average fiber diameter also increased slightly with the increasing concentration of polymer solution. Besides ethyl acetate was added to solution to improve the vapor pressure of the solvent. The results showed that additive addition reduces droplet concentration on webs. In addition, the increase in the additive amount increased the average fiber diameter slightly. Effect of rotational speed was also investigated to see how it changes the fiber production. Between 3000 and 6000 rpm, the increase in rotational speed increased the fiber diameter significantly, because polymer solution feeding amount also increased. Comparing 6000 and 9000 rpm rotational speeds, it was seen that average fiber diameter decreased within that values which is thought to be due the fact that centrifugal forces are more effective than polymer solution flow rate, which attenuates the fibers effectively at high rotational speeds.

3 types of nozzles were examined in this study. Generally, average fiber diameter of produced nonwoven webs with 0.3 and 0.5 mm diameter nozzles were found to be same. When 1 mm diameter nozzle was used, it was seen that fiber diameter was increased notably. Finally, effect of the working distance between nozzle and collector was investigated after spinning from 2 distances. It was seen that working distance doesn't have a significant effect on fiber diameter.

After optimization of various process, material and system parameters nanofibrous nonwoven webs were produced according to investigated parameters. Air

permeability, water flux, pressure and particle retention efficiency of produced samples were investigated according to standards.

To investigate filtration and barrier properties initially air permeability of polypropylene (PP) spunbond nonwoven was measured which is the standard substrate we used throughout the study. Same spunbond nonwovens was used as a support material since nanofibers are not strong enough to resist huge pressures during tests. Nanofiber production was optimized with following parameters: 9000 rpm rotational speed, 0.3 mm nozzle diameter, 30 cm nozzle-collector distance, 1 hour duration. It was seen that the air permeability decreased nearly 70% after nanofiber coating. The average fiber diameter should be further minimized to reach slip flow regime, where air molecules slip over the fibers due to low Knudsen number. This will improve potential of those nonwovens to be used in air filtration applications.

Later on, water permeability tests were performed where water flux through nanofiber coated samples and normal spunbond nonwovens were determined at various pressure values. Water filtration tests were conducted under 0.9 psi pressure for nanofiber coated and normal nonwoven webs. The standard PS latex particles were added to distilled water. For 1, 5 and 10 μm particles containing water samples it was seen that water flux values were decreased because of retention of particles around fibers. It was seen that samples have similar water permeability with same pressures. Water flux through nanofiber coated sample became easier, because of hydrophilic property of TPU material and lower solidity of centrifugal spinning compared to electrospinning. Contaminated and filtered water were tested using particle counter device to see the effect of nanofibrous layer on water filtration. According to results normal spunbond nonwoven has poor performance for 1 and 5 μm particles, while it has 60% filtration efficiency for 10 μm particles. Nanofibrous coated web has 70% filtration efficiency for 1 μm particles. For 5 and 10 μm particles, it has filtration efficiency more than 90%. These values shows that nanofibrous webs can be alternative for water filtration applications.

It is clearly seen that centrifugal spinning method has a big potential to be a powerful system for fiber production in nanoscale. In addition to this, the researches on this method will increase to proof that these fibers can be used for many applications, especially in filtration area.

1. GİRİŞ

Nanolifler; doku mühendisliği, filtrasyon, koruyucu giyim, kompozitler, pil separatörleri ve enerji depolaması gibi alanlarda kullanılan önemli bir malzeme sınıfıdır. Nanolif üretimi için en çok kullanılan yöntem elektroüretimdir [9–12]. Yayınlanan makale sayısı bakımından başı çeken bu yöntemde (Web of ScienceTM adlı sitenin verilerine göre sadece 2014 yılında 2500 den fazla makale yayınlanmıştır). Genel olarak çalışmalar işlemin kendisi, elde edilen nanoliflerin nitelendirilmesi ve nanoliflerin çeşitli uygulamalardaki kullanımına yöneliktir. Elektroüretimin akademik alandaki popülaritesine rağmen düşük sayılabilecek üretim oranı yüzünden endüstriyel kullanımı kısıtlıdır [13].

Bununla beraber nanolif üretimi konusunda eriyikten üfleme (melt blowing) [7], çözeltiden üfleme (solution blowing) [14], çift bileşenli lif eğirme (bicomponent fiber spinning) [15], [16], faz ayırıştırma (phase separation) [17], kalıba sentezleme (template synthesis) [18–21], kendinden bağlı (self-assembly) [22–25] gibi yöntemler de mevcuttur. Fakat bu yöntemler için malzeme çeşitliliği kısıtlıdır ve bu durum uygulamalar için bir engel teşkil etmektedir [17], [18], [22].

Bu nedenle, bahsi geçen kısıtlamaları ortadan kaldıracak yeni bir nanolif üretim yöntemi önemli bir gelişme olacaktır. Son zamanlarda santrifüj eğirme yöntemi yüksek hız ve düşük maliyette nanolif üretebilme kapasite ve uygulanabilirliğiyle dikkat çekmektedir.

Santrifüj eğirme sisteminde polimer çözelti ya da eriyik dönen bir rotora beslenir. Devir hızı kritik bir değere ulaştığında, merkezkaç kuvveti çözelti ya da eriyiğin yüzey gerilimini yener ve rotora bağlı düzelerden sıvı jetler çıkar. Sonrasında merkezkaç kuvvetinin etkisiyle jetler uzamaya başlar ve kuruyan nanolifler halini alıp toplayıcı yüzeyinde biriktirilerek, çeşitli uygulamalar için kullanılmak üzere yüzeyler elde edilmiş olur [13].

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında termoplastik poliüretan (TPU) kullanımıyla santrifüj eğirme yöntemi parametrelerinin optimize ederek nanolif yapılar elde edilmeye çalışılmıştır.

Diğer yöntemlere kıyasla santrifüj eğirme birçok önemli avantaja sahiptir; sistemin çalışma prensibinin basit olması, yüksek elektrik akımı kullanımı gerektirmemesi, polimer çözelti ve eriyiklerle çalışılabilmesi, yüksek üretim oranı ve düşük maliyeti bunlardan birkaçıdır. Aynı zamanda yöntem polimer, karbon, seramik vb nanolif üretimine uygundur. Nanoliflerin yapısı ve çapları; viskozite, yüzey gerilimi, moleküler yapı, moleküler ağırlık, çözelti derişimi ve katkıları gibi akışkan özellikleri ve dönüş hızı, rotor çapı, düze çapı, düze toplayıcı arası mesafe gibi işlem parametrelerinin ayarlanmasıyla kontrol edilebilir.

Bu çalışmada nanolif üretimi yanısıra sistem parametreleri optimize edilerek, filtrasyon uygulamalarına uygun nitelikte kumaş üretimi hedeflenmiştir. Bu kumaşlar ekonomik ve stratejik açıdan öneme sahip filtrasyon uygulamalarında kullanılabileceklerdir. Dünya genelinde yaşanan birçok salgın vb. vakalar hava filtrasyonu ve azalan temiz su kaynaklarına bağlı olarak su filtrasyonunun önemi her geçen gün artmaktadır. 3M, AAF, Hollingsworth–Vose, Ahlstorm gibi sınırlı sayıda firma nano seviyede filtre kağıdı üretilip bu sektöre hükmetmektedirler. Bu ve benzeri çalışmalar bu yöndeki dışa bağımlı durumu değiştirmek açısından da önemli olacaktır.

1.2 Hipotez

Başta, en çok kullanılan ve hakkında en çok araştırma yapılan elektroüretim olmak üzere geleneksel lif üretim yöntemleri çeşitli dezavantaj ve kısıtlamalardan dolayı endüstride kısıtlı ölçülerde kullanım imkanı bulabilmiştir. Bu durumu ortadan kaldıracak yenilikçi bir yöntem akademik ve endüstri çevrelerinde dengeleri değiştirip yoğun ilgi çekecektir. Yöntemin barındırdığı potansiyeli düşünürsek santrifüj eğirme sistemi akademik ve endüstriyel çevrelerde geniş bir araştırma ve geliştirme alanına sahiptir.

Bu alışma kapsamında santrifüj eğirme sistemi kullanılarak nano seviyede lif üretimi yapılarak hava ve su filtrasyonunda kullanıma uygun dokusuz kumaş üretimi yapılabileceği düşünölmektedir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Literatür çalışmasında öncelikli olarak mevcut nanolif üretim teknikleri açıklanmış ve ardından santrifüj eğirme yöntemi üzerine derleme yapılmıştır.

2.1 Mevcut Nanolif Üretim Teknikleri

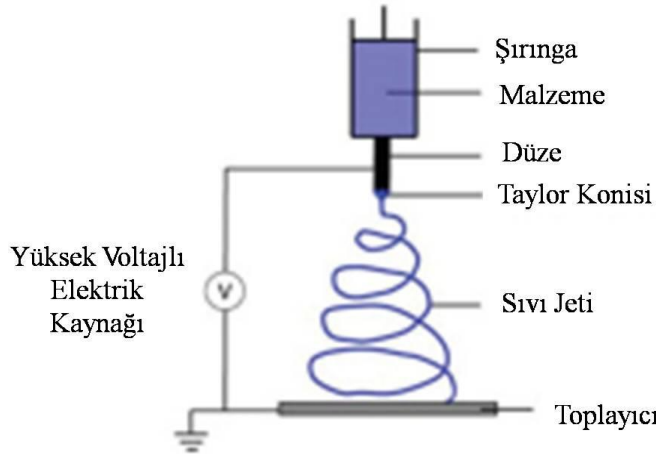
Geleneksel nanolif üretim teknikleri; elektroüretim (electrospinning), eriyikten üfleme (melt blowing), solution blowing (çözelti üfleme), çift bileşenli lif eğirme (bicomponent fiber spinning), faz ayırıştırma (phase separation), kalıba sentezleme (template synthesis), kendinden bağlı (self-assembly) yöntemleridir. Elektroüretim en çok çalışma yapılan yöntem olmasıyla beraber, endüstride yaygın olarak kullanılmasında ana engel yüksek maliyet ve düşük üretim oranıdır. Basit tek şıngalı bir elektroüretim işlemi saatte 1 ila 100 mg arasında nanolif üretebilir [26–31]. Laboratuvar ölçekli elektroüretim cihazlarının kurulumu basit, düşük maliyetli ve akademik çalışmalar için uygundur fakat seri üretim için ekipmanlar çok daha pahalı ve karmaşıktır [13].

Elektroüretim yöntemiyle nanolif üretimi için birçok malzeme kullanılabilir. Fakat diğer yöntemler için bu durum daha kısıtlı bir hal alır. Örnek vermek gerekirse eriyikten üfleme, 1µm den büyük çaptaki lif üretiminde yüksek üretim kapasitesine ve endüstride geniş bir kullanım alanına sahip bir yöntemdir [13]. Ancak konu nano seviyede üretime gelince yöntem polibütilen tereftalat (PBT), polipropilen (PP) polistiren (PS) [7] gibi birkaç polimer kullanımıyla kısıtlanır. Çözeltiden üfleme genel manada iyi sonuçlar vermekle beraber, sistemin yapısından dolayı üretim hızı ve miktarı açısından kısıtlıdır denebilir [14]. Çift bileşenli lif eğirmede ise nano seviyede lif üretimi için reolojik özellikleri eşlenik iki farklı polimeri bir araya getirme durumu olduğundan malzeme seçimi ister istemez kısıtlayıcı bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektroüretime kıyasla eriyikten üfleme ve çift bileşenli lif eğirme maliyet anlamında daha da pahalı yöntemlerdir. Faz ayırıştırma ise birçok adımdan oluştuğundan dolayı sadece polilaktik asit (PLA), poliglikolit gibi

polimerler bu yöntemde sonuç vermektedir [17]. Kalıba sentezlemede gözenekli kalıpların oyuklu kanallarına polimerin doldurulmasıyla nanolif elde edildiğinden dolayı bu yöntemde uzun nanolifler elde etmek mümkün olmamaktadır [19–21]. Kendinden bağlı yöntemde ise hidrojen bağı gibi zayıf etkileşimlerin etkisiyle birbirlerine bağlanan küçük moleküllerin hidrojenleri oluşturmasıyla nanolif üretilir [22–24]. Şu anda bu yöntem harici bir uyarıcı ya da kendilerini bağlayabilen küçük aktif moleküllerin (vancomycin, dipeptides ve glucosamine vb) kullanımıyla nanolif üretilbildiğinden dolayı kısıtlıdır.

2.1.1 Elektroüretim (Electrospinning)

Elektroüretim basit ve mekanik olmayan bir nanolif üretim tekniğidir. Şekil 2.1’ de görüldüğü üzere tipik tek düze içeren bir elektroüretim sistemi; şırınga, metal düze, güç ünitesi ve bir toplayıcıdan meydana gelir. İşlem sırasında şırıngada bulunan akışkan ile toplayıcı arasında yüksek gerilimli bir elektrik akımı uygulanır. Akımın gerilimi kritik bir değere ulaştığında elektrik yüklenmiş akışkan konik damlacık oluşturur ve sonrasında bu damlacık sıvı jet formuna geçip uzama eğilimi gösterir. Jet çapı, mikro boyutlardan nano boyutlara kadar farklılık gösterebilir. Jetler lif formunda toplayıcıda biriktirilir [11].



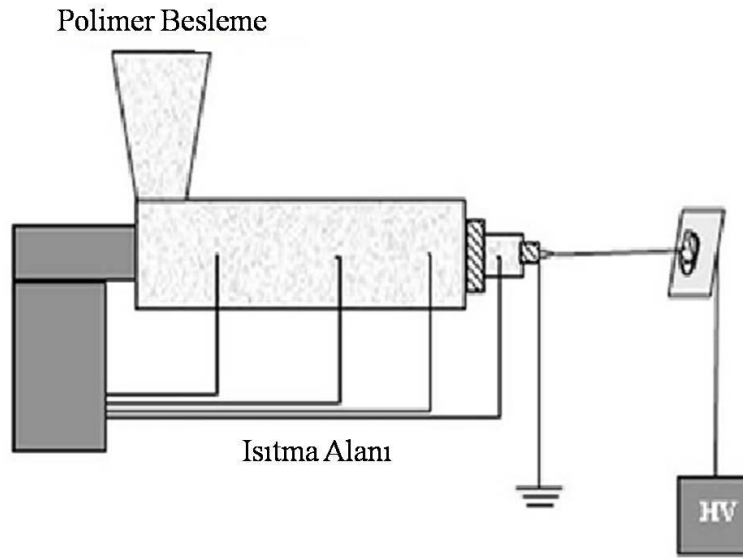
Şekil 2.1 : Elektroüretimin şematik gösterimi [13].

Elektroüretim ile üretilen liflerin çap ve morfolojileri bazı işlem parametrelerine bağlıdır:

- i. Reolojik davranışları, iletkenlik, yüzey gerilimi, polimer molekül ağırlığı ve çözelti derişimi gibi içerik özellikleri,

ii. Elektrik alan kuvveti, çözelti akış oranı, düze çapı, düze-toplayıcı mesafesi ve toplayıcının hareketi gibi uygulama parametrelerine dayalı durumlardır [11], [32–33].

Polimer çözeltileri gibi polimer eriyikleri de elektroüretim işleminde kullanılmaktadırlar. Şekil 2.2’de şematik gösterimi verilen bu yöntemde granül halindeki polimer önce eritilir ve eritme işlemin ardından elektrik alana maruz bırakılarak lif formuna getirilir toplanır [34].



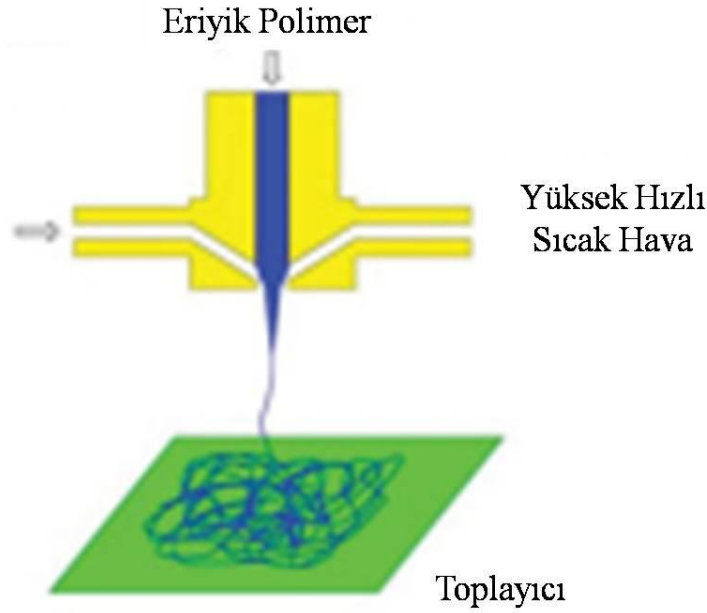
Şekil 2.2 : Eriyikten elektroüretim sisteminin şematik gösterimi [34].

2.1.2 Eriyikten üfleme (Melt blowing)

Eriyikten üfleme 1950’li yıllarda Amerika’da bulunan Naval Araştırma Laboratuvarı’nda geliştirilmiştir. Lif ve dokusuz kumaş üretiminde önde gelen tekniklerden biridir. Çeşitli polimerlerle çalışmaya uygun olan bu yöntem tek adımlı ve basit bir yöntemdir. Genel uygulamada eriyikten üflemeden üretilen liflerin çap değerleri 1µm den büyüktür [35], [36]. Bununla beraber bazı malzemelerin kullanımı ve kontrollü uygulama koşullarında nano seviyede lif üretimi de mümkün olmaktadır [7].

Şekil 2.3’ de görüldüğü gibi işlem ilk olarak polimerin eritilmesi ile başlar ve polimer jetler birden çok düzeden aynı anda püskürtülür. Bunu liflerin çaplarını hızlıca küçülten yüksek hacimli sıcak hava akımı eşlik eder. Lifler doğal olarak rastgele yönlenmiş dokusuz kumaş formunu alır. Eriyikten üfleme nanoliflerin

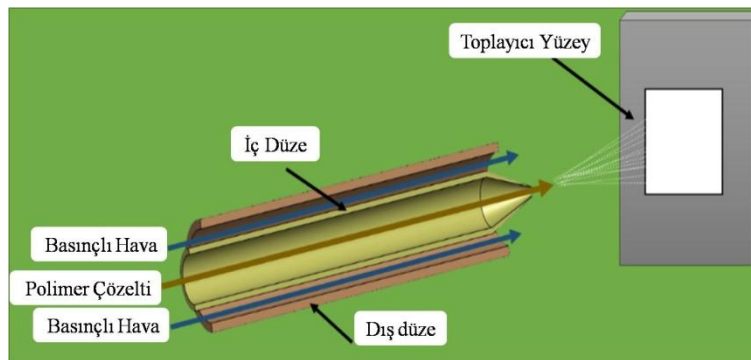
yapıları hava ve polimer eriyiğın akış oranı, sıcaklığı, polimer eriyiğın içerik özellikleri, düze geometrisi gibi parametrelerin ayarlanmasıyla değıştirilebilir [13].



Şekil 2.3 : Eriyikten üfleminin şematik gösterimi [13].

2.1.3 Çözeltiden üfleme (Solution blowing)

Şekil 2.4’ de şematik gösterimi verilen yöntemde polimer çözeltisine basınçlı hava üflenerek nanolif üretiminin yapıldığı bir yöntemdir. Bu yöntem ile eriyikten üfleme yöntemine nazaran daha düşük çaplara sahip nanolifler elde etmek mümkündür [8]. Ayrıca polimeri eritilmesi ve sıcak hava temini için harcanan enerji de düşünüldüğünde bu yöntem nispeten düşük maliyete sahiptir. Bu avantajlarına rağmen çözelti ile çalışıldığı için çözeltinin uzaklaşmasıyla malzemenin belirli bir yüzdesi ancak son ürün olarak kullanılabilir ve üretim hızı kısıtlıdır.



Şekil 2.4 : Çözeltiden üfleme metodunun şematik gösterimi.

Yöntemin malzeme ve işlem parametreleri Çizelge 2.1’ deki gibidir.

Çizelge 2.1 : Çözeltiden üfleme yöntemine etki eden değişkenler [8].

Malzeme Değişkenleri	İşlem Değişkenleri
Çözelti konsantrasyonu, Çözeltinin viskozitesi	Hava basıncı, düze-toplayıcı mesafesi, düze çapları ve çözelti besleme debisi

2.1.4 Çift bileşenli lif eğirme (Bicomponent fiber spinning)

Yöntem farklı bileşenleri ayırarak ya da bileşeni oluşturan liflerden birini uzaklaştırarak nanolif üretimine dayanır. Böylece lif kesitinde birbirine karışmamış iki polimer yapı oluşur. Nanolif üretimi için bileşenlerden biri nano seviyede kesite sahip olmalıdır [15–16]. Şekil 2.5’ de en çok görülen kesit tipleri olan denizdeki adalar (islands in the sea), pasta dilimi (segmented pie), kek dilimi (hollow segmented pie) gösterilmektedir [37]. Denizdeki adalar tipi kesite baktığımızda, bir bileşenden oluşan birden çok tekil lifçikler (adalar), diğer polimer bileşen tarafından oluşturulmuş bir matris (deniz) tarafından sarılır. Dilimlenmiş pasta kesitinde iki polimer bileşen lifin uzunluğu boyunca yan yana dizili şekilde yer alırken, kek dilimi kesitte ayrıca lif merkezinde bir delik bulunur. Çift bileşenli lifler iki eriyik polimerin bir ekstrüder yardımıyla istenilen kesiti verecek şekilde tasarlanmış bir düzenin içinde geçirilerek elde edilir [38]. Üretimin ardından bileşenlerden biri ayrılarak ya da uzaklaştırılarak nanolif elde edilir.

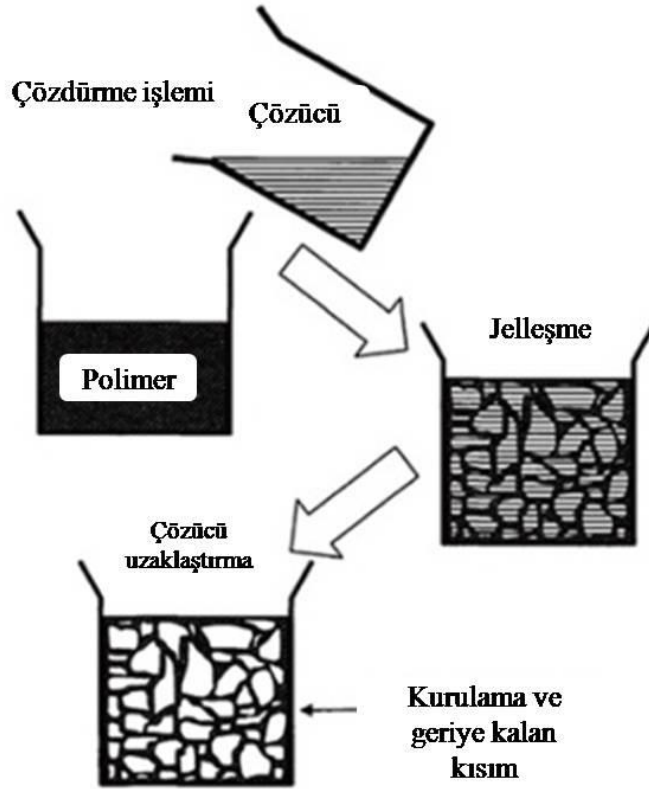


Şekil 2.5 : Çift bileşenli lif eğirme kesitleri [13].

2.1.5 Faz ayrıştırma (Phase separation)

Tipik bir faz ayrıştırma işlemi polimer çözülmesi, jelleşme, faz ayrıştırma, çözücü uzaklaştırma ve kurulama aşamalarından oluşur [17]. Şekil 2.6’ da görüldüğü üzere, ilk etapta polimer oda veya daha yüksek bir sıcaklıkta homojen bir çözelti elde edilene kadar çözündürülür. Sonrasında çözelti jelleşme sıcaklığına getirilir. Bu sıcaklıkta polimer çözelti jel kıvamına gelir ve nanolif içeren bir matris yapısı

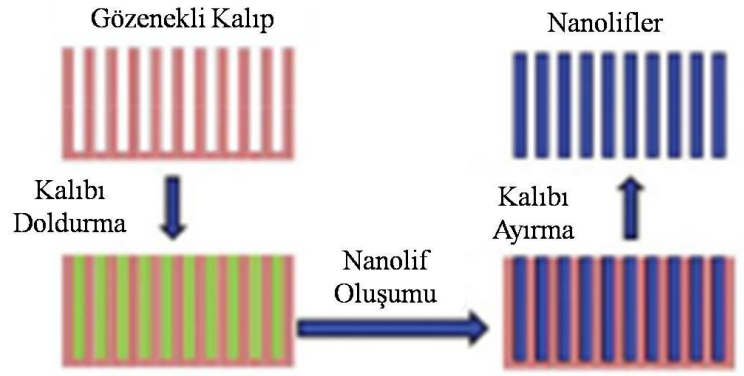
oluşturmak için faz ayrıştırılır. Çözücü uzaklaştırıp matris kurutulduktan sonra nanolifler üretilmiş olur.



Şekil 2.6 : Faz ayrıştırma yöntemi [39].

2.1.6 Kalıba sentezleme (Template synthesis)

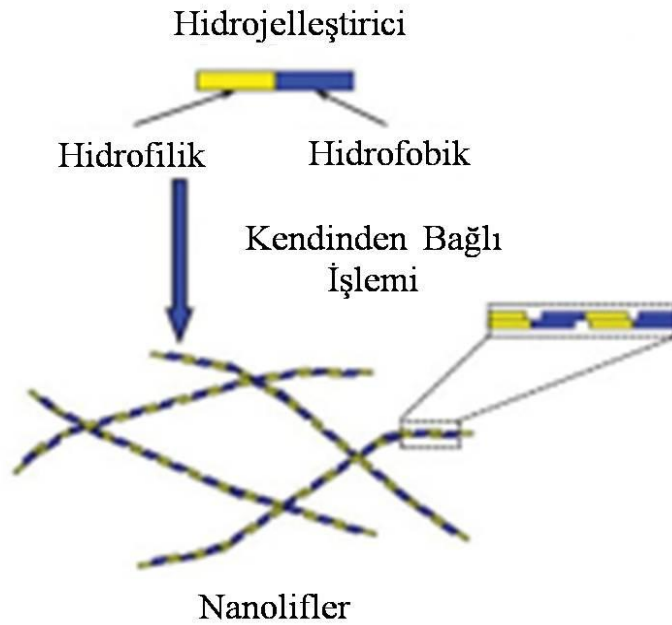
Kalıba sentezleme yönteminde, boşluklu seramik ya da polimer kalıpların oyuklu kanallarında nanolif üretimi yapılır [18–21], [40]. Şekil 2.7’ de gösterildiği üzere ilk adımda boşluklu kalıba monomerler doldurulur. Sonrasında bu monomerlerden kimyasal ya da elektrokimyasal yollarla polimer nanolifler üretilir. Kalıbı çözerek ayırıp uzaklaştırdıktan sonra nanolifler elde edilmiş olur. Bu yöntemle üretilen nanoliflerin sentezlenen polimerlerin kanallarının iç yüzeylerinde oluştuklarından oyuklu bir yapıya sahip olurlar. Monomerleri kullanmakla beraber, nanolifler polimer çözeltilerden doğrudan da üretilebilir. Bu yöntemde polimer çözelti oyuklu kanalların içine beslenir ve çözücünün uzaklaştırılmasından sonra nanolif şeklinde katılaşması sağlanır.



Şekil 2.7 : Kalıba sentezleme yöntemi [13].

2.1.7 Kendinden bağlı (Self assembly)

Kendinden bağlı yaklaşımda nanolifler, küçük moleküllerin kendi aralarındaki etkileşiminin faydalanılarak beraberce kullanılmasının sonucu üretilir. Küçük moleküllerin kimyasal yapılarına bakarak nanolifleri bağlamak için farklı mekanizmalar uygulanabilir. Kullanılan genel mekanizmalardan bir tanesi hidrojel oluşturmaya dayanır. Şekil 2.8’ de görüldüğü gibi bu birbirinin içine geçmiş iki fazın oluşturduğu bir durumu ifade eder. Bu fazlardan ilki sıvı fazdır ve tipik sudur. İkincisi ise katı fazdır ve hidrojelleştirici moleküllerin kendilerini bağlamaları sonucu oluşan nanolif ağıdır [15–18]. Hidrojellerden sıvı fazın uzaklaştırılmasıyla kuru nanolifler elde edilir.



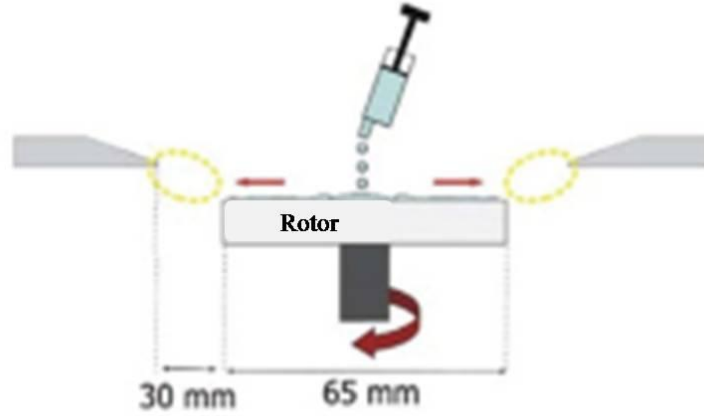
Şekil 2.8 : Kendinden bağlı yöntemi [13].

2.2 Santrifüj Eğirme (Centrifugal Spinning)

Santrifüj eğirme aslında endüstri için yeni bir yöntem değildir. Cam elyaf üretimi uygulamalarında yaklaşık yarım yüzyıldır kullanılmaktadır. Eritilmiş cam, metalden yapılmış yüzeyinde binden fazla delik açılmış bir rotora beslenir. Camı ergimiş halde tutabilmek için rotor sıcaklığı 900-1100 °C derece dolaylarında sabitlenir. Rotor 2000 ila 3000 dev/dak arasında değişen değerlerde çalıştırılır. Devrin etkisiyle oluşan merkezkaç kuvveti erimiş camı rotor iç yüzeyine sürükler ve açılan deliklerden malzeme dışarı çıkar. Cam akışını inceltmek için yüksek hızda hava (ya da başka gazlar veya buhar) kullanılır. Böylece çapı 1 µm ve altı, uzunlukları bir kaç cm civarında olan lifler elde edilir. Lifler şekil aldıkları sırada üzerlerine bir yapıştırıcı malzeme spreylenebilir. Sonrasında rotor altındaki yönlendirici davlumbaz içerisinden yol alarak bir konveyör bant üzerinde toplanır. Cam lifi yüzey konveyör bant vasıtasıyla bir fırına taşınır. Bu fırında yapıştırıcı kurutulup, kurlenir. Akabinde farklı kullanımlar için istenilen ölçülerde kesilir. Santrifüj eğirme ile cam lifi üretimi endüstride yaygın olmakla beraber, rotor ve düze çapı, cam viskozitesi, akış oranı ve akış hava sıcaklığı gibi değerlere bağlı çalışmalar literatürde bulunmamaktadır [13].

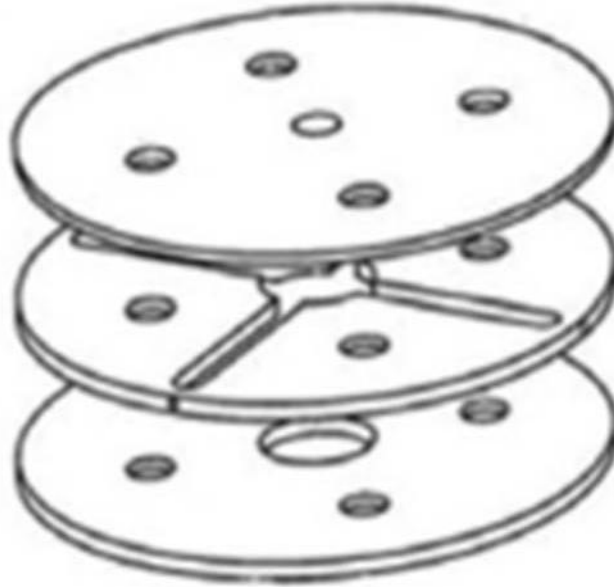
Santrifüj eğirme cam elyaf üretiminde yoğun şekilde kullanılmasına rağmen polimerden lif üretiminde kullanımı yeni sayılır. 90'lı yıllarda BASF Aktiengesellschaft, Owens Corning Fiberglas Technology ve Akzo Nobel NV firmaları santrifüj eğirme ile polimerden lif üretimi konusunda çalışmalar yapıp patentler yayınladılar [41–43]. Yakın zamanda FibeRio Technology Corporation firması santrifüj eğirme ile çalışan seri üretime uygun cihazlar (Cyclone FE 1.1 M/S ve Cyclone FS 1.1) üretti. Bu makinelerin temeli University of Texas' ta Lozano ve Sarkar tarafından geliştirilen Forcespinning® isimli, patentli teknolojiye dayanmaktadır [44].

2008 yılında Şekil 2.9' de şematik görünümü verilmiş Weitz ve arkadaşlarının [45] kullandığı sistemde %5 lik derişime sahip klorobenzende çözünmüş PMMA çözeltisi, dönen bir diskin üzerine damlatılarak 3000 dev/dak da 25 nm ortalama çap değerlerinde nanolif elde edilmiştir.



Şekil 2.9 : Weitz ve arkadaşlarının kullandığı santrifüj eğirme sisteminin şematik görünümü [45].

2010 Lozano ve arkadaşları [46] Şekil 2.10’ da görüldüğü gibi üç parçalı bir rotor tasarlayarak 3000 ila 5000 dev/dak aralığında polietilen oksitten (PEO) 300 nm ye varan çap ölçülerinde nanolifler elde etmişlerdir.

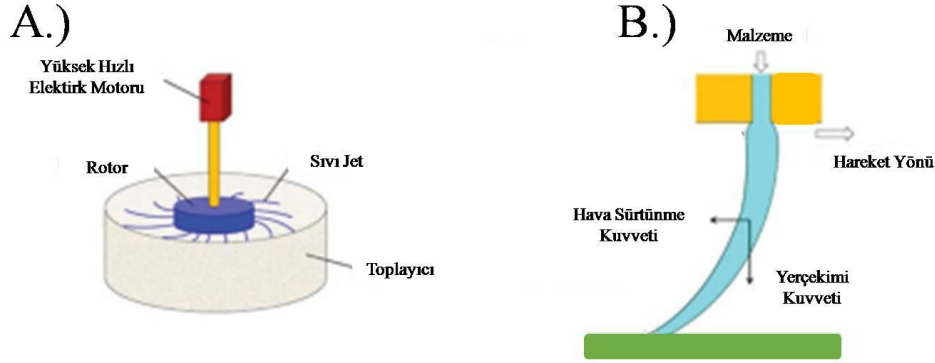


Şekil 2.10 : Lozano ve arkadaşlarının tasarladığı rotor [46].

2.2.1 Santrifüj eğirme sonucu elde edilen nanolif yapısı

Şekilde gösterildiği üzere dönen dış yüzeyinde delikler bulunan bir rotorun içine akışkan doldurulur. Devir hızı kritik bir değere ulaştığında, merkezkaç kuvveti akışkanın yüzey gerilimini yener ve rotor deliklerinden çıkarak jetler meydana gelir.

Merkezkaç ile hava sürtünme kuvvetleri beraber jetleri uzatarak nano seviyede lif şeklini verirler. Ayrıca yüzey gerilimi, yerçekimi kuvveti ve reolojik kuvvet gibi etkenler de nanolif yapısını etkilemektedir. Uzayan jetler toplayıcı yüzeyde toplanarak kumaş formunda biriktirilmiş olur.



Şekil 2.11 : A) Santrifüj eğirme sistem genel elemanları B) Sıvı jet üzerindeki kuvvetler [13].

Santrifüj eğirmenin özelliklerinden biri de yüksek üretim hızıdır. İki düzeli basit bir santrifüj eğirme sisteminin ortalama üretim hızı 50 g/sa'tır [47]. Genelde akademik çalışmalarda bu kadar yüksek üretim oranlarına ihtiyaç duyulmamakla beraber, bu durum endüstride dengeleri değiştiren bir unsur olabilir.

Santrifüj eğirme ile nanolif üretim işlemini anlamak için araştırmacılar çeşitli simülasyon ve modellemeler üzerinde çalıştılar. Örnek olarak, Badrossamay ve arkadaşları nanolif yapı rejimlerini karakterize etmek ve lif yarıçapları için teorik bir önerme adına yarı analitik yarı sayısal, ölçeklenebilir bir eşitlik oluşturdular [48]. Taslak, viskozite, açısal hız, düze çapı ve toplayıcıya olan mesafesi gibi parametrelerin nanoliflerin morfolojik yapısını ve kalitesini kontrol etmedeki rolünü anlamaya yöneliktir.

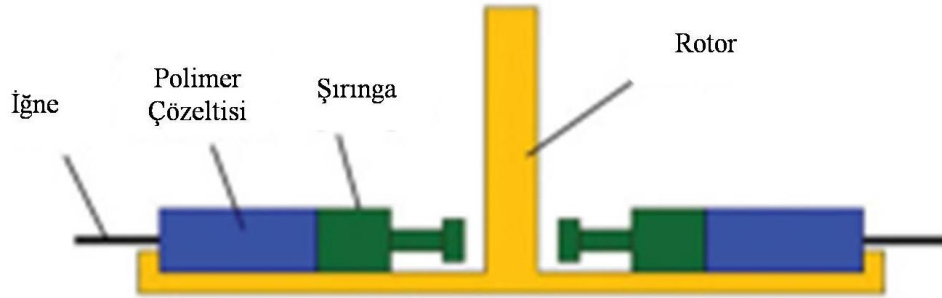
2.2.2 Santrifüj eğirme sistemi aparatları

Santrifüj eğirme sistemleri genel olarak iki bileşenden meydana gelir:

- i. Dönüş hareketi yapan rotor
- ii. Nanolif toplama düzeneği

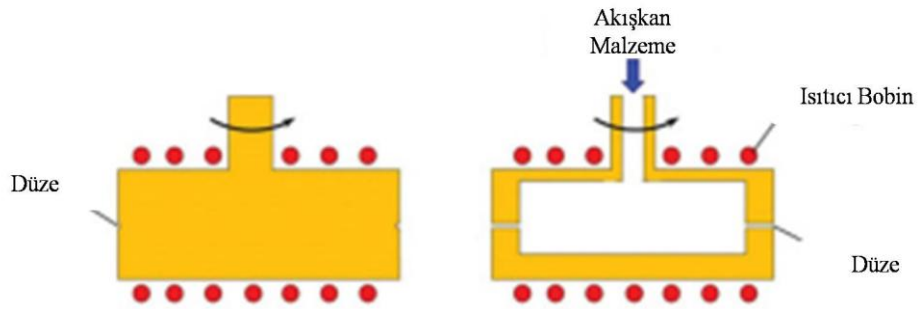
2.2.2.1 Dönüş hareketi yapan rotor

Şekil 2.12’ de görüldüğü üzere içi akışkan dolu aynı ölçülerdeki 2 adet şırınga dönen bir rotorun üzerine sabitlenir. Yüksek devir hızlarında oluşan merkezkaç kuvveti etkisiyle iğne uçlarında akışkan jetler oluşur. Yöntemin dikkat edilmesi gereken tarafı her iki şırıngadaki malzeme miktarının aynı olmasını sağlayacak şekilde çalıştırmaktır [13].



Şekil 2.12 : Şırıngalı rotor tasarımı [13].

Şekil 2.13’ deki sistemde ise karşılıklı iki deliği olan silindirik bir kap gözükmektedir. Bu deliklerin çapı ve uzunlukları lif çapını kontrol etme açısından önemlidir. Bu sistemde çözelti şeklindeki polimerlerden doğrudan nanolif elde edilebilmekle beraber, erimiş polimerden nanolif elde etmek için sisteme bazı ısıtıcı elemanlar da eklenmelidir. Birden fazla düze kullanılarak üretim miktarı arttırılabilir [13].

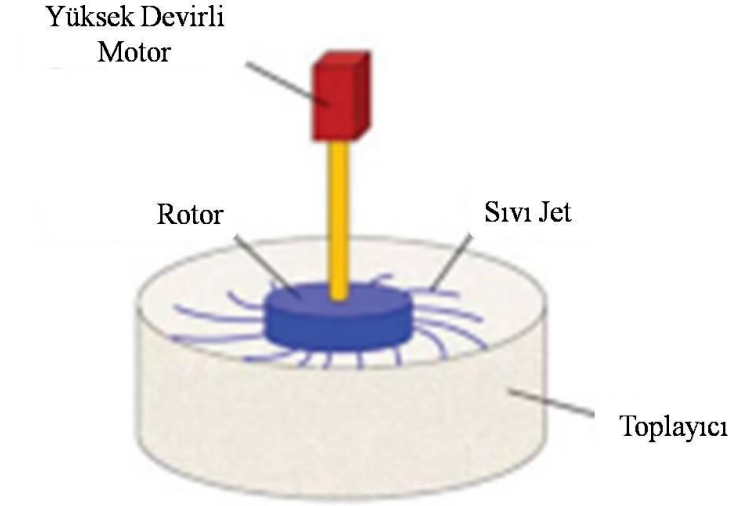


Şekil 2.13 : Hazne şeklindeki rotor tasarımı [13].

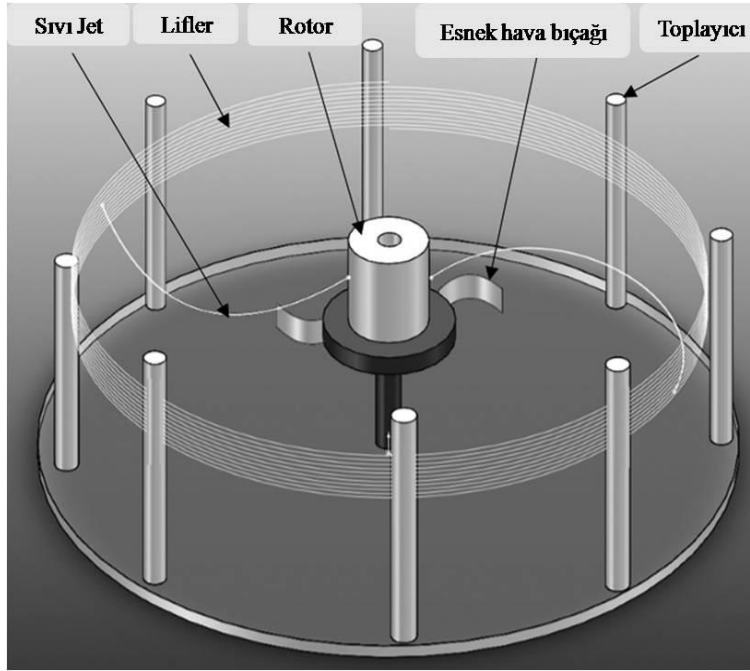
2.2.2.2 Nanolif toplama düzeneği

Nanolif toplama açısından çeşitli toplayıcı düzenekleri tasarlanmıştır. Şekil 2.14’ de görüldüğü üzere nanolifler rotor etrafında oluşturulan metal veya plastik bir silindirin

iç yüzeyine ya da Şekil 2.15’ de görüldüğü gibi etrafına yerleştirilen dikme parçaların arasında toplanmıştır. Düze ile toplayıcı iç yüzey arasındaki mesafe nanolif yapısına etkiyen faktörlerden biridir. Düzenek yığın şekilde toplamaya uygundur. Ayrıca bu şekildeki bir düzende liflerin eş yönlü toplanma imkânında sağlar. Bu da doğal olarak lif yönü doğrultusunda ilave mekanik özellikler kazandırabilir [13].

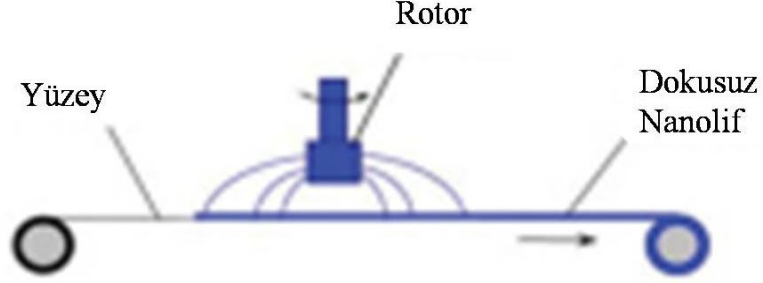


Şekil 2.14 : Metal ya da plastik silindirik toplayıcı [13].



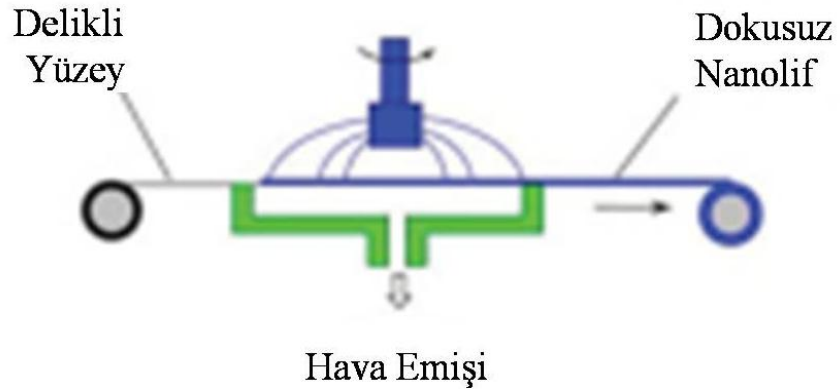
Şekil 2.15 : Dikme parçalar kullanılarak yapılan toplayıcı [6].

Sürekli bir üretim sağlamak için dönen rotorun altına Şekil 2.16’ daki gibi hareketli bir yüzey yerleştirmek başka bir toplama yöntemidir. Bu durumda yerçekimi nanoliflerin yüzey üzerinde toplanır ve dokusuz yüzeyler elde edilmesini sağlar [13].



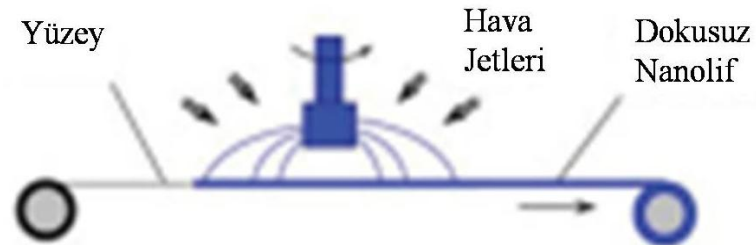
Şekil 2.16 : Hareketli düz yüzey şeklindeki toplayıcı [13].

Yukarıda sisteme ilaveten Şekil 2.17’ de görüldüğü üzere toplayıcı yüzey arkasında bir vakum etkisi oluşturarak lifleri toplamaya yardımcı olunabilir [13].



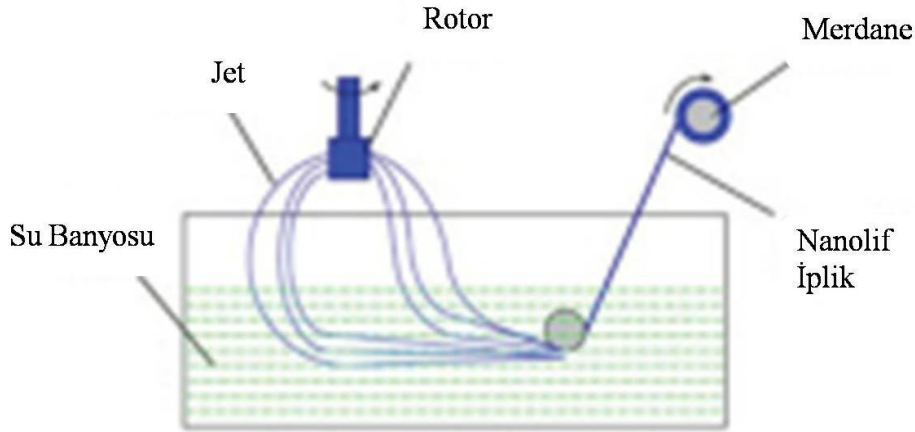
Şekil 2.17 : Vakumlu toplayıcı [13].

Ya da rotor Şekil 2.18’ de görüldüğü gibi arkasından toplayıcıya doğru hava üflenerek nanolifler yönlendirilebilir [13].



Şekil 2.18 : Hava jetli toplayıcı [13].

Son alternatif olarak da Şekil 2.19’ da görüldüğü üzere nanolifler bir su havuzunda dönen bir silindirin etrafında toplanarak sürekli nanolif iplikler şeklinde toplanır [13].



Şekil 2.19 : Havuzlu toplayıcı [13].

2.2.3 Santrifüj eğirmeyi etkileyen faktörler

Santrifüj eğirme sisteminde nanolif yapısı birçok işlem parametresine bağlıdır ve genel olarak bunlar iki başlık altında toplanabilir:

- Malzeme özellikleri
- İşlem parametreleri

Bu iki başlığı da polimerin kullanım durumuna göre yani eriyik veya çözelti halinde olmasına göre Çizelge 2.2’ deki gibi özetleyebiliriz.

Çizelge 2.2 : Santrifüj eğirme yöntemi değişkenleri.

	Eriyik Durum	Çözelti Durumu
İşlem Değişkenleri	Dönüş hızı, rotor çapı, düze çapı, düze-toplayıcı arası mesafe, sıcaklık	Dönüş hızı, rotor çapı, düze çapı, düze-toplayıcı arası mesafe
Malzeme değişkenleri	Viskozite	Viskozite ve yüzey gerilimi

2.2.3.1 Malzeme özellikleri

Nanolif yapısına etkileyen birçok faktör bulunmakla beraber en önemlileri viskozite, yüzey gerilimi, moleküler yapı, çözelti derişimi, çözücü yapısı ve ilave katkılardır denebilir. Bu özelliklerin hepsi aynı derecede nanolif yapısına etki etmez. Viskozite ve yüzey gerilimi baskın özellikler olmakla beraber diğer özellikler bu iki faktörün

çeşitli değerlerde ayarlanabilmesine imkân tanır. Bu durum eriyik polimerler içinde aynıdır (yukarıda bahsi geçen çözelti derişimi ve çözücü yapısı faktörleri hariç).

Viskozite

Eriyik polimer kullanımında viskozite, moleküler yapı, moleküler ağırlık ve işletme sıcaklığı değerlerinin ayarlanmasıyla kontrol edilmektedir. N.E. Zendar' ın yaptığı çalışmada sıcaklığın artmasıyla eriyik haldeki polikaprolakton polimerinin viskozite değeri düşüş göstermiştir. Dolayısıyla da Çizelge 2.3' de görüldüğü gibi 200 °C' de lif çapı düşmüştür. Ancak 200 °C' nin üzerinde ise viskozite değerinin çok düşük değerlere ulaşmasıyla liflerin çapı ve aynı zamanda standart sapma değeri de büyümüştür [49].

Çizelge 2.3 : Sıcaklık ve viskozitenin ortalama lif çapına etkisi [49].

Sıcaklık (°C)	Viskozite (Pa.s⁻¹)	Lif Çapı (µm)
120	158.1	9.67 ± 4.9
140	130.4	8.80 ± 3.1
200	43.3	7.05 ± 1.1
250	17.8	12.82 ± 8.4

Çözelti şeklindeki kullanımda ise eriyik sıcaklığının yerine çözelti derişiminin ayarlanması devreye girmektedir. Derişimi ayarlamanın yanı sıra, viskozite ve nanolif çapına etkisi bilinen Berry sayısını (Be) kullanmak da faydalı olabilir. Be, çözelti viskozitesi (intrinsic viscosity) ile çözelti derişiminin çarpımı sonucu elde edilen birimsiz bir sayıdır ve elektroüretim ile nanolif üretmede lif yapısını kontrol etmede kullanılır [50–51]. Bu sayı aynı zamanda santrifüj eğirme çalışmalarında da kullanılabilir. Santrifüj eğirmede nanolif elde etmek için kritik bir Be değeri aşılmalıdır. Bu kritik değerde çözelti ve viskozite yeterli seviyede yüksek olmalı, polimer zincirler de yeterli derecede karmaşıklık içermelidir. Ters bir durumda ise yani Be değeri kritik noktanın altında kalırsa lif oluşumu başlamayacaktır. K. Parker ve ekibinin PLA polimeri çözeltileri ile nanolif ürettikleri çalışmada çözeltilerdeki PLA miktarının değişimi viskozite değerlerinde değişime sebep olmuştur. Dolayısıyla da ağırlıkça %8 ve %10 PLA içeren çözeltilerin her ikisi ile de lif üretimi mümkün olup, %10'luk çözeltiliden yapılan üretimde lif çaplarında artış görülmüştür. Ağırlıkça %6 PLA içeren çözelti ile yapılan üretimde ise lif oluşumunun yanında damlacıkların da oluştuğu görülmüştür. Ağırlıkça PLA miktarının %4'e düşürülmesiyle ise sadece damlacıklar toplayıcıda birikmiştir [52].

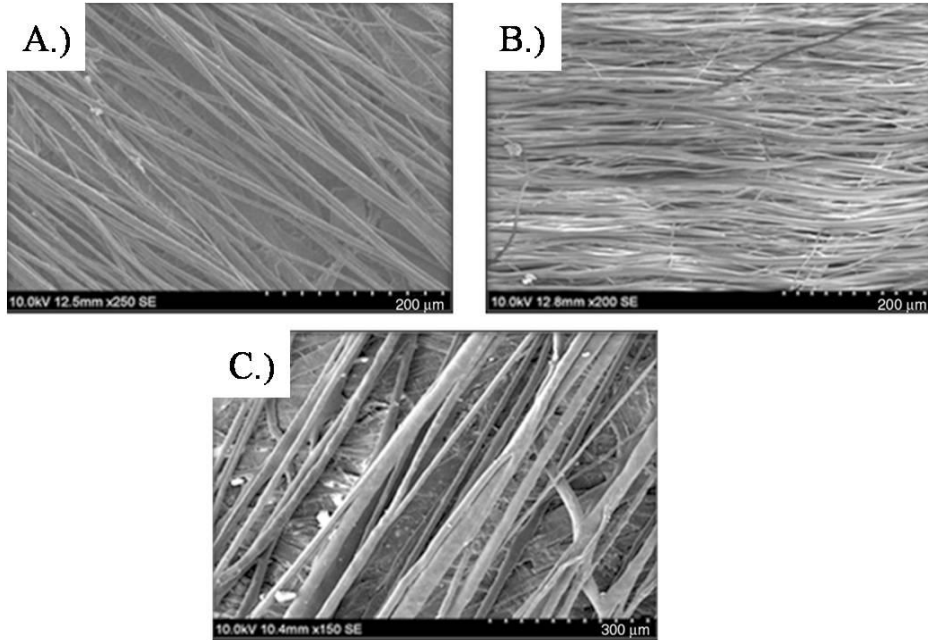
Benzer bir çalışmayı Lu ve ekibi PAN çözeltisi kullanarak yapmış olup %10 luk derişimin altındaki %2 ve %4 lük değerlerde sadece damlacık yapıları, %6 ve %8 lik derişimlerde ise az miktarda lif oluştuğunu gözlemlemişlerdir. %10 ve üstü değerlerde ise lif oluşumunun başladığını ve %10 luk değer için kritik değer olduğunu bulmuşlardır [6].

V.R. Giri Dev ekibinin PVP-PCL karışımından oluşan polimer çözeltileriyle yaptıkları üretimde ise karışımındaki artan PVP miktarı ile viskozite artmış ve bunun sonucunda Çizelge 2.4’de gösterildiği nanolif çapında artış gözlemlenmiştir [53].

Çizelge 2.4 : Derişimin ortalama lif çapına etkisi [53].

PCL/PVP Karışım Oranı (%)	Ortalama Lif Çapı (nm)
100/0	311
70/30	352
50/50	619
30/70	726
0/100	823

Üretilen numunelerdeki lif çapı artışı Şekil 2.20’ de görülen SEM görüntülerinden de anlaşılabilmektedir [53].



Şekil 2.20 : V. R. Giri Dev ve ekibinin A) 100% PCL, B) 100%, PVP C) 70:30 PCL/PVP farklı konsantrasyonlarda ürettiği numunelerin SEM görüntüsü [53].

Hammami ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, santrifüj eğirme parametrelerini incelemiş ve varyans analizlerine tabi tutmuşlardır. Ulaştıkları netice itibariyle

viskozitenin lif oluşumu ve çap değerlerine etki eden en önemli faktör oldukları sonucuna varmışlardır [54].

Yüzey Gerilimi

Yüzey gerilimi geleneksel eğirme sistemlerinin işleminde önemli bir değişken olup, nanolif yapısı üzerinde önemli etkisi vardır. Polimer yüzey alanını kısıtlayarak sıvı jetlerin kürelere dönüşmesini sağlayarak etkide bulunur. Santrifüj eğirme sırasında yüzey gerilimi, merkezkaç kuvveti ve reolojik kuvvet elde edilecek ürünün yapısını etkileyecek şekilde birlikte rol oynarlar. Merkezkaç kuvveti sıvı jetin oluşmasına ve yüzey alanının büyümesine, reolojik kuvvet ise şekildeki hızlı değişimlere karşı gelerek düzgün yüzeyli lif yapılarının oluşumuna yardım eder. Moleküler yapının, moleküler ağırlığın ve çözücü tipinin çeşitli ayarlamalarıyla yüzey gerilimini kontrol etmek pratikte mümkündür. Ayrıca daha kolay olması açısından çözeltiye başka çözücüler ya da katkıları eklenerek de yüzey gerilimi ayarlanabilir [13].

2.2.3.2 İşlem parametreleri

Çizelge 2.2’ de gösterildiği üzere dönüş hızı, rotor çapı, düze çapı, düze toplayıcı arası mesafe ve sıcaklık gibi işlem parametreleri de malzeme özelliklerinin yanında nanolif yapısına etkide bulunur.

Dönüş Hızı

Rotor dönüş hızı merkezkaç ve hava sürtünme kuvvetlerini etkilediğinden, en önemli işlem parametrelerinden biridir. Merkezkaç ve hava sürtünme kuvvetleri sıvı jetleri uzamasını sağlayarak nanolif haline dönüşmesini sağlar. Çalışan bir sistemde akışkan düze üzerine ulaştığında üstüne etkiyen merkezkaç kuvveti:

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

Formülü ile hesaplanır. Bu formülde m akışkan kütlesi, ω rotor dönüş hızı ve D ise rotor çapıdır.

Akışkanın düzeden sıvı jet olarak çıkması için devir hızının oluşturacağı merkezkaç kuvveti kritik bir değere ulaşmış, yüzey gerilimini yenmesi gerekir. Farklı akışkanlar farklı viskozite ve yüzey gerilimi değerlerine sahip olduğundan gerekli olan

merkezkaç kuvveti de farklı olacaktır. Literatüre baktığımızda genel olarak dönüş hızı 3000 ila 12000 dev/dak aralığında değiştiği görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus da yukarıdaki formülden yola çıktığımızda kullanılan rotor çaplarının dikkate alınması gerektiğidir [52], [55].

Sıvı jet düzeden fırladığı andan itibaren havanın sürtünme kuvveti devreye girecektir ve formülü şu şekildedir:

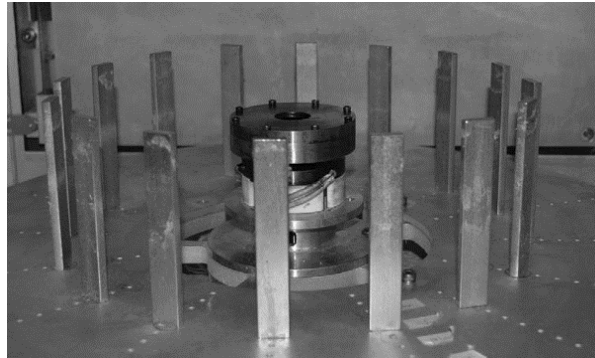
$$F_{\text{sürtünme}} = \pi C_p A \omega^2 D^2 / 2 \quad (2.2)$$

Bu formülde C sürtünme katsayısı, ρ havanın özgül ağırlığı, A jetin kesit alanı, ω jetin dönüş hızı ve D ise jetin izlediği yolun çember çapıdır.

Sıvı jet düzeden ayrılıp toplayıcıya doğru yol alırken kademeli bir şekilde dönüş hızı azalacaktır. Artan dönüş hızı veya rotor çapı merkezkaç ve doğal olarak sürtünme kuvvetini arttıracak bu da sıvı jetin uzamasını ve uzayan jetin de çapının daralmasına sebep olacaktır [13].

Fakat şu da bilinmelidir ki dönüş hızının çok yüksek olduğu durumlarda jetlerin toplayıcıya ulaşması gereken süre azalacaktır. Bu, jetlerin uzama ve çözücünün buharlaşması (çözelti uygulamalarında) için gereken zamanın altında bir değere ulaşırsa lif oluşumu elde edilmeyebilir. Ayrıca yüksek hızlar yüksek miktarda malzeme akışı demek olduğundan, bu durum lif çaplarının artmasına da sebep olabilir. Bu durumda önemli olan en küçük lif çapını elde etmek için uygun olan dönüş hızını belirlemektir.

Konu üzerine T.O'Haire ve arkadaşları yaptıkları çalışmada polipropileni hem eriyik halde hem de dekalın ile çözerek elde ettikleri çözeltiyi Şekil 2.21' de görülen santrifüj eğirme sistemine beslemiş ve devir hızının etkisini incelemişlerdir [56].



Şekil 2.21 : T. O'Haire ve ekibinin santrifüj eğirme cihazı [56].

Çizelge 2.5' de görüldüğü gibi çözelti ile yapılan üretimlerde dönüş hızının artmasıyla lif çaplarında düşüş gözlemlenmiştir. Polimer eriyiği ile yapılan üretimde ise hızın artması lif çapını önce düşürürken daha sonra arttırmıştır [56].

Çizelge 2.5 : Çeşitli bileşimlerle yapılan üretimler için döner disk hızının ortalama lif çapına etkisi [56].

Bileşen	Döner disk hızı (devir/dk)	Lif Çapı (µm)
Eriyik	13000	1.87
	14000	1.05
	16000	1.75
Tek Duvarlı karbon nanotüp içeren çözelti	13000	1.82
	14000	1.28
	16000	1.07
Çok Duvarlı karbon nanotüp içeren çözelti	13000	2.61
	14000	2.07
	16000	0.91

Dönüş hızının büyük etkilere sebep olmadığına dair çalışmalar da mevcuttur. Hammami ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı derişimlerdeki PA6 çözeltilerinin farklı dönüş hızlarındaki elde edilen sonuçları Çizelge 2.6' da görüldüğü üzere karşılaştırmalı vermişlerdir. Kendi değerlendirmelerinde dönüş hızının lif çapına büyük etkileri olmadığı sonucuna varmışlardır [54].

Çizelge 2.6 : Lif çapı için istatistik özeti [54].

Derişim (%)	Rotor Hızı (dev/dak)	Ortalama çap (µm)	Asgari çap (µm)	Azami çap (µm)	Mikron altı lifler (%)
15	4000	0.224	0.123	0.533	100
	6000	0.233	0.088	0.643	100
	9000	0.188	0.067	0.487	100
20	4000	0.435	0.097	1.511	96
	6000	0.617	0.178	1.823	89
	9000	0.448	0.113	1.316	99
25	4000	0.751	0.268	1.929	76
	6000	0.825	0.267	4.415	76
	9000	0.801	0.297	2.80	82

Düze Çapı

Düze çapını ayarlayarak da nanolif yapısının kontrolü sağlanabilir. Çapın küçültülmesi düzeden çıkacak malzeme miktarını azaltacak bu da doğal olarak lif çapının azalmasına yol açacaktır. Bununla birlikte düze çapının çok küçük seçilmesi sıvı jetin deliklerden fırlamasını olanaksız kılabilir.

Zhang ve arkadaşları düze çapının etkisini incelemek amacıyla %14' lük PAN çözeltisiyle 10 cm düze-toplayıcı mesafesinde 3 farklı düze kullanarak üretim yapmışlardır. Çizelge 2.7' de görüldüğü gibi düze çapının daralmasıyla ortalama lif çapı düşüş göstermiştir [6].

Çizelge 2.7 : Düze çapının nanolif çapına etkisi [6].

Düze Çapı (mm)	Ortalama Nanolif Çapı (nm)
1	895
0.8	807
0.4	665

Düze Toplayıcı Arası Mesafe

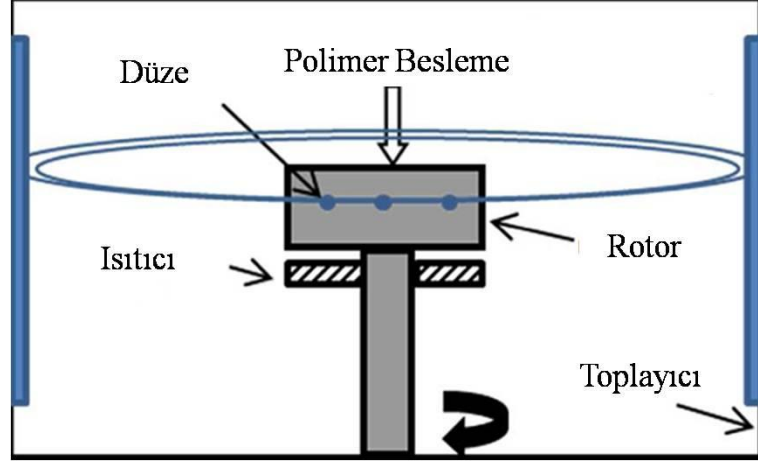
Düze toplayıcı arası mesafe sıvı jetin uçuş zamanına direk etki eden başka bir faktördür. Yöntemde kullanılmak üzere çözelti seçildiğinde, oluşan jetteki çözücünün buharlaşması için gereken süreyi sağlama adına asgari bir mesafe gerekir. Bu mesafenin artışı, jetin daha uzun bir yol alıp, daha fazla uzayıp çapın daralmasını sağlar. Fakat bu değişimler diğer işlem parametrelerine göre daha az etki gösterir. Örnek olarak X. Zhang ve ekibinin PAN çözeltisi ile yaptıkları çalışma verilebilir. Çizelge 2.8' de görüldüğü gibidüze ile toplayıcı arası mesafe artışı ile lif çapında dikkat çekmeyecek bir azalma olmuştur [6].

Çizelge 2.8 : Düze-Toplayıcı Mesafesinin Lif çapına etkisi [6].

Düze -Toplayıcı Mesafesi(cm)	Ortalama Nanolif Çapı (nm)
10	665
20	658
30	647

Sıcaklık

J.Ellison ve arkadaşları eriyik haldeki polibütillen tetralat ile santrifüj eğirme metodu ile nanolif üretimi gerçekleştirmişlerdir. Şekil 2.22' de şematik gösterimi verilen cihaz ile çalışmışlardır [57].



Şekil 2.22 : J. Ellison ve ekibinin düzeneğinin şematik gösterimi [57].

Sıcaklık ve döner disk hızı parametrelerinin nanolif çapı üzerine etkilerini Çizelge 2.9’ da görüldüğü gibi değerleri değiştirerek incelemişlerdir. Sonuç olarak en düşük nanolif çapına en yüksek sıcaklık değerinde ulaşmışlardır. Aynı sıcaklık değerleri için hızın artması nanolif çapında sıcaklığın etkisi kadar büyük düşüşlere sebep olmamıştır [57].

Çizelge 2.9 : Rotor ve sıcaklığın ortalama lif çapına etkisi [57].

Numune	Rotor Hızı (devir/dk)	Sıcaklık (°C)	Ortalama Lif Çapı (µm)
A	10000	300	1,35
B	12000	300	1,31
C	15000	300	1,38
D	12000	280	1,64
E	12000	320	1,17

2.2.4 Santrifüj eğirmede elde edilen nanolif tipleri

Genel olarak yöntem polimerlerden nanolif üretiminde kullanılmakla beraber karbon ve seramik gibi diğer malzemelerden de üretim yapılabilmektedir.

2.2.4.1 Polimer nanolifler

Santrifüj eğirme ile polimer nanolifler, polimer çözeltilerden ya da eriyikten üretilebilir. Mikro/nano seviyede olmak üzere polimerden lif üretiminde birçok başarılı çalışma yapılmıştır. Bu polimerler: PEO [46], [52], [58], [59], PLA [52], [60], PS [61], PAA [52], PVDF [62], PMMA [45] ve PCL [55] şeklindedir.

Santrifüj eğirme araştırmalarının çoğu polimer çözelti ve polimer eriyikten nanolif elde etmeye odaklıdır. Huttunen ve Kellomaki [63] pamuk şekeri mantığıyla çalışan bir makine kullanarak PLA eriyiğinden nanolif üretme yoluna gitmişlerdir. Fakat makinede kullanılan düzelerin çapları geniş ve dönüş hızının düşük olmasından dolayı üretilen lifler makro boyutlarda olmuşlardır. Yakın zamanda Forcespinning® metoduyla Lozano ve Ellison sırasıyla eriyik PP ve PBT den nanolif ürettirler. Eriyikten üretmek zararlı çözücülerini kullanımına ortadan kaldırmış, personel ve çevreyi olası zararlı etkilere korumuştur. Ayrıca eriyikten üretim santrifüj eğirmeyi ticari ürünleri üretmede kolaylık sağladığından daha da ilgi çekici hale getirmektedir [13].

2.2.4.2 Karbon nanolifler

Karbon nanolifler (KNL) sıklıkla PAN, polimid gibi öncül polimerlerden hazırlanan nanoliflerin ısıtılmasına tabi tutulmasının akabinde elde edilir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda KNL elde etmede elektroüretimin iyi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Bu kapsamda öncül polimerlerin kullanımıyla nanolifler elde edilir ve akabinde iki aşamalı bir ısıtılmasına tabi tutulur. Isıtılmasının ilk adımında havada stabilize edilen nanolifler ardından durgun havada karbürlenir [64]. Santrifüj eğirme elektroüretimine alternatif olarak bu aşamada kullanılabilmektedir. Zhang' in [13] yaptığı çalışmada PAN/PMMA nanolifleri 800 °C argon gazı ile karbonize edilmiştir. Karbonizasyon işlemi sırasında PAN polimeri karbona dönüşürken, PMMA ise gözenekli bir yapı oluşturur. Bu gözenekli karbon nanolifler hafif bir kütleye, geniş bir yüzey alanına, iyi elektrik iletkenliğine ve mükemmel seviyede emme kapasitesine sahiptir. Böylece uzay teknolojisi, yarı iletken, metal işleme, enerji dönüşümü ve depolama gibi uygulamalarda kullanım imkânı sağlarlar.

2.2.4.3 Seramik nanolifler

Santrifüj eğirme sistemi ile üretilen nanoliflerin ısıtılarak toz haline getirilmesiyle seramik nanolifler üretilir. Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [65] titanyum tetraklorit öncül kullanılarak TiO₂ nanolifleri üretmişlerdir. Santrifüj işleminden önce titanyum tetrakloritin içine aseton katılarak poliaseton-titanyuma dönüşmesi sağlanır. Santrifüj eğirme işleminden sonra öncül nanolifler 700 °C de

ısıtılarak TiO_2 nanolifleri elde edilir. Liu ve arkadaşları ayrıca zirkonilkloroit öncülünü kullanarak santrifüj eğirmede ZrO_2 nanolifleri elde etmişlerdir [66].

2.2.5 Santrifüj eğirme nanolif uygulamaları

Yöntem genel olarak diğer geleneksel yöntemlerin kullanılmasıyla üretilen nanoliflerin kullanım alanlarıyla aynıdır. Bununla birlikte yöntemin en çok kullanıldığı alan doku mühendisliğidir. Badrossamay ve arkadaşları yöntemi PLA nanolif yapısı hazırlamak için kullandılar [52]. Bu kapsamda daha önce hazırlanmış lifçik yapılarının üstüne yeni doğan bir farenin kas dokularını ektiler. Bu hücrelerin kendiliğinden sınırlandığı ve lif boyunca hizalandığı görüldü. Ayrıca oluşan çok hücreli yapılar lif boyunca oluşmaya devam ederek anizotropik özellikte kas yapısı oluşturduğu anlaşıldı. Çalışmaları santrifüj eğirmenin anizotropik, geri dönüştürülebilir özellikte nanolif yapıların oluşturulmasında basit ve kolay bir yol olduğunu gösterdi.

Başka bir çalışmada Ren ve arkadaşları PVP ve PLLA kompozit liflerden elde edilen doku mühendislik yapılarının santrifüj eğirme ile üretilebilirliğini araştırdılar [60]. Yapılan çalışmalarda gerekli nitelikte PLLA nanolif yapıları elde edilmiştir. Benzer olarak Wang ve arkadaşları santrifüj eğirme ile üretilen polilaktikglikolik asit ve PS nanolifleri hücre kültür yapıları olarak kullanmışlardır [61].

Son zamanlarda yapılan araştırmalar daha ziyade santrifüj eğirme yönteminin elektroüretime alternatif olarak başta doku mühendisliği olmak üzere, filtrasyon, koruyucu elbise, kompozit, havacılık, yarı iletken, enerji dönüşümü ve depolama gibi uygulamalarda kullanılmasına yöneliktir [13].

3. SANTRİFÜJ EĞİRME SİSTEMİ TASARIMI

3.1 Giriş

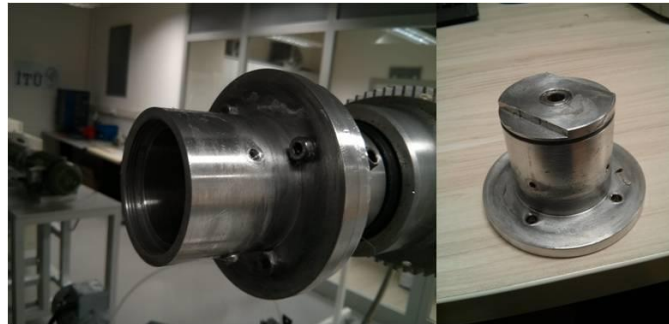
İncelenen farklı çalışmalarda çeşitli şekil ve boyutlarda tasarlanıp imal edilen santrifüj eğirme elemanları mevcuttur. Rotor tasarımında genel olarak hafiflik ön plana çıkmaktadır. Çünkü artan kütle döndürme hareketini sağlayacak elektrik motoruna ek yükler bindirmektedir. Toplayıcı tasarımlarında ise mümkün olan en fazla miktarda lif elde etmeye yönelik yaklaşımlar mevcuttur. Düzeler de parametrik çalışmaları çeşitlendirmek ve daha ince lifler elde etmeye yönelik olmak üzere çeşitli çap değerlerinde imal edilip kullanılmaktadır.

3.2 Sistem Elemanları

Deneyisel çalışmanın yapıldığı santrifüj eğirme sisteminin elemanlarını 4 temel başlıkta inceleyip tanıtmak mümkündür.

3.2.1 Rotor

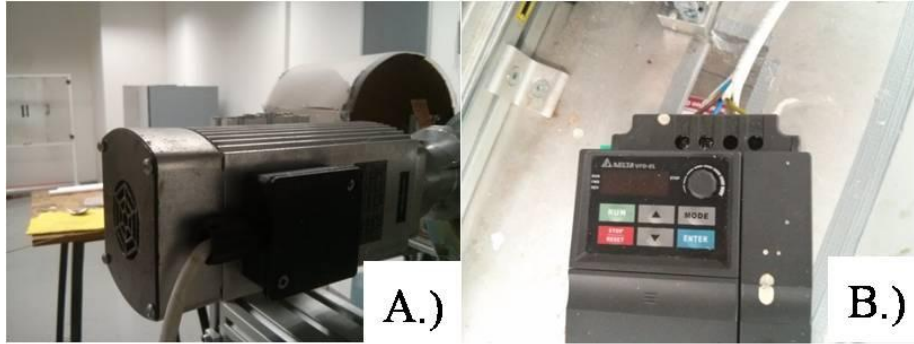
Sistemde kullanılan rotor, 55 mm çapında 46 mm derinliğindedir ve kapağı ile beraber ağırlığı 220 gramdır. Şekil 3.1’ de görüldüğü üzere, alüminyumdan imal edilmiş olup hacmi 50 ml’ dir. Üzerine 4 adet düze takılabilmektedir. Çözelti halindeki polimer, rotora ön tarafından beslenmektedir. Beslemenin yapıldığı bu kısımda, şırınga hortumunu sabitlemek için kullanılan bir adet yüksek hız rulmanı bulunmaktadır.



Şekil 3.1 : Rotor.

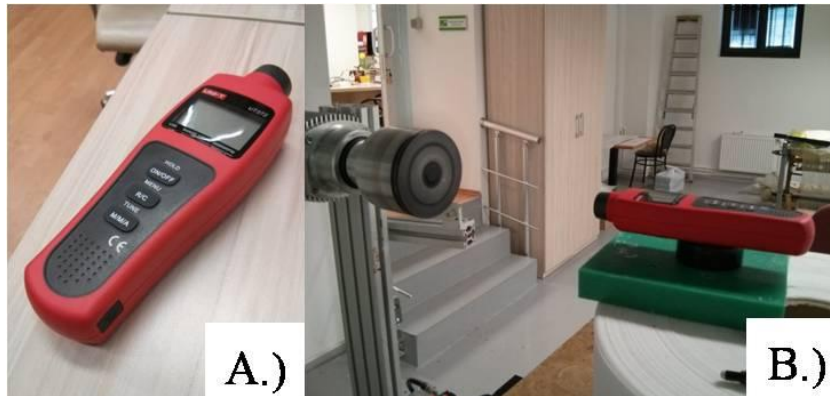
3.2.2 Motor

Sistemde tahrik hareketini sağlayan Arel firmasına ait 2.2 kw (3 hp) gücünde 300 hz frekansta çalışan bir ‘spindle’ motor mevcuttur. Kapasite olarak 18000 dev/dak olmakla beraber, güvenlik unsurları da göz önüne alınarak 10000 dev/dak civarına kadar çıkılabilmektedir. Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi motorun farklı devirlerde çalışmasını sağlayan Delta marka VFD-EL model bir sürücü bulunmaktadır.



Şekil 3.2 : A) Motor B) Sürücü.

Şekil 3.3’ de görüldüğü gibi mevcut sürücü ekranında görünen değere karşılık gelen birim başına düşen devir değerini tespit etmek için UNI-T marka lazer takometre kullanılarak bir test düzeneği oluşturulup, ölçümler yapılmıştır.



Şekil 3.3 : A) Lazer takometre B) Devir hızı tespit düzeneği.

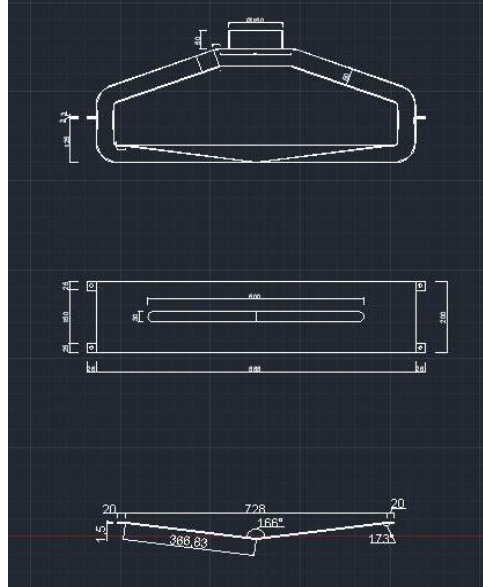
Çizelge 3.1 : Devir hızı test sonuçları.

Ekranda Okunan Değer	Devir (dev/dak)
5	302
6	363
7	421
8	478
9	540
10	601
20	1197

Çizelge 3.1’ de görüldüğü gibi yapılan ölçümler sonucunda, ekranda değişen her birime 60 dev/dak’ lık bir değerin karşılık geldiği anlaşılmıştır.

3.2.3 Toplayıcı

Santrifüj eğirme sistemlerinde çok farklı toplayıcı düzenekler bulunmakla beraber mevcut sistemimizde çelikten üretilmiş bir konveyör bant ve bu düzeneğinin arkasına ek bir hava emiş ünitesi yerleştirilmiştir. Ek hava ünitesi ile alakalı ilk etapta bir tasarım çalışması yapılmış, sonrasında bir model oluşturulmuş, başarılı olduğu gözlemlenmiş ve üretime alınmıştır. Mevcut toplayıcı sistem üzerinden alınan ölçülere ve hava emme fanının kapasitesine uygun şekilde ünitenin ölçülendirilmesi yapıp imalata verilmek üzere Şekil 3.4’ deki gibi teknik resimleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.4 : Ek hava ünitesi teknik resmi.

Daha sonrasında 1,5 mm kalınlığında çelik sac kullanılarak Şekil 3.5’ de görülen parçanın üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.5 : Ek hava ünitesi imalatı.

İmal edilen ünite mevcut sisteme monte edilmiştir. Ayrıca Şekil 3.6’ da görüldüğü gibi toplayıcı sistem üzerine boru ilavesi yapılarak hava emme fanı çıkışı mevcut havalandırma sistemine entegre edilmiştir.



Şekil 3.6 : Ek hava ünitesi.

3.2.4 Düzeler

Santrifüj yönteminde düzeler, hem lif yapısına etkisi bakımından hem de parametrik çalışma açısından önemli bir elemandır. Sistemde kullanılmak üzere çapları sırasıyla 0.3, 0.5 ve 1.0 mm olacak şekilde 3 farklı düzenin tasarımları ve imatları yapılmıştır. Şekil 3.7’ de görüldüğü gibi kullanılan malzeme paslanmaz çelik olup rotora bağlantısı için M4 diş açılmıştır.



Şekil 3.7 : Düze.

4. TERMOPLASTİK POLİÜRETAN ÇÖZELTİSİ İLE NANOLİF ÜRETİMİ VE SİSTEM PARAMETRELERİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

4.1 Giriş

Termoplastik poliüretan (TPU) geniş bir kullanım alanına sahip bir polimer çeşidi olup; elastiklik, mikroorganizmalara ve aşınmaya karşı direnç ve mükemmel hidrolitik denge gibi birçok özelliğe sahiptir [67]. Bu özelliklerinden dolayı otomotiv ve ayakkabı sanayi, biyomedikal malzemeler, yapıştırıcı uygulamaları gibi birçok endüstriyel alanda kullanımı sözkonusudur [68].

Santrifüj eğirme sistemi çalışmalarında buraya kadar bahsedildiği üzere birden fazla üretim değişkeni mevcuttur. Çalışmada her parametre üzerinden değişikliklere gidilerek etkileri anlaşılmaya çalışılmıştır.

4.2 Malzemeler ve Yöntem

Deneylerde kullanılan TPU polimeri, BASF şirketine ait Elastollan C95 A adlı ürün olup 1.21 g/cm^3 özgül ağırlığa, $225 \text{ }^\circ\text{C}$ erime sıcaklığına sahiptir. Polyester bazlı olup, yüksek gerilme dayanımına, çok iyi ölçülerde sönümleme ve elastiklik özelliklere, iyi bir aşınma performansına sahiptir. Çözücü olarak ZAG firmasına ait %99 luk saflıkta 73.09 gr/mol molekül ağırlığına ve 0.94 gr/cm^3 özgül ağırlığa sahip DMF kullanılmıştır. İlave çözücü olarak seçtiğimiz etil asetat da yine ZAG firmasına ait olup; %99 saflıkta, 0.9 gr/cm^3 özgül ve 88.11 gr/mol moleküler ağırlığındadır. Çözeltiler manyetik bir karıştırıcı kullanılarak $70 \text{ }^\circ\text{C}$ de 24 saatte hazırlanmıştır. SEM görüntüleri ise Carl Zeiss EVO MA10 cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Her bir numuneden 100 adet ölçüm alınarak ortalama lif çapları tespit edilmiştir. Yüzey gerilimi değerleri Dataphysics DCAT 11EC cihazı, viskozite ölçümleri ise Fungilab ALPHA cihazı kullanılarak tespit edilmiştir.

4.3 Sonuçlar ve Yorum

Deneyler sonucu elde edilen veriler 5 ana başlık altında toplanmış olup, grafik ve çizelgeler kullanılarak da anlatım desteklenmiştir.

4.3.1 Çözelti derişiminin etkisi

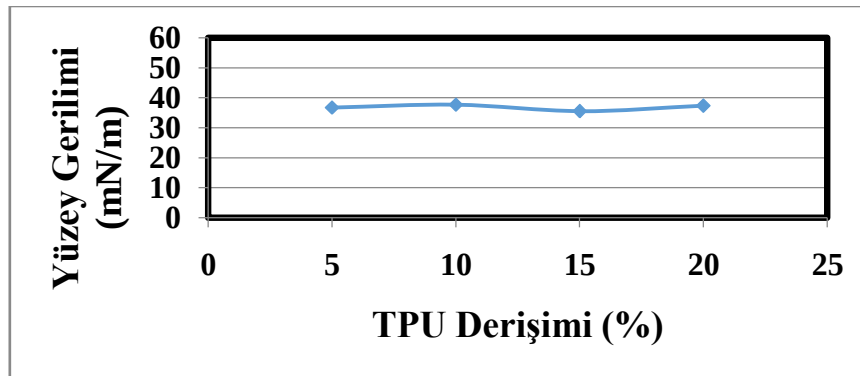
Çözelti derişimdeki değışikliklerin lif oluşumu ve yapısına etkisini anlama adına oluşturduğumuz deney düzeneğinde, 6000 dev/dak devir hızı, 0.5 mm düze çapı, 150 mm düze toplayıcı arası mesafe değeri sabit tutulmuş olup, sırasıyla %5, %10, %15 ve %20 derişim oranlarında TPU çözeltileri kullanılmıştır.

Santrifüj eğirme sisteminde derişimin etkisini anlamak adına çözelti özellikleri olan yüzey gerilimi ve viskozite parametreleri karşımıza çıkmaktadır. Bu iki özellik hem işlemin başlangıç aşamasında hem de işlem sonucu elde edilen lif yapısını anlamada rol oynayan faktörlerdir.

Çizelge 4.1’ de sayısal, Şekil 4.1’ de grafik olarak görüldüğü üzere ürettiğimiz çözeltilerin yüzey gerilimi değeri karşılaştırıldığında değışen derişim oranına nazaran yüzey gerilimi değeri ciddi değışimler oluşmamaktadır. Bu da yüzey gerilimi parametresinin daha ziyade işlem başlangıcına etkisi olduğu anlamına gelmektedir. Düze deliğine ulaşan polimer merkezkaç kuvvetinin etkisiyle dışarı doğru savrulurken yenmesi gereken olan faktör yüzey gerilimidir. Değişik derişimler için yakın değeri veren yüzey gerilimini yenip işleme başlamak için benzer devir hızları kullanımının yeterli olacağı sonucu ortaya çıkar.

Çizelge 4.1 : Değişen TPU oranına bağlı olarak yüzey gerilim değeri.

Çözelti	Yüzey Gerilimi (mN/m)
% 5 TPU	36.78
% 10 TPU	37.74
% 15 TPU	35.55
% 20 TPU	37.38

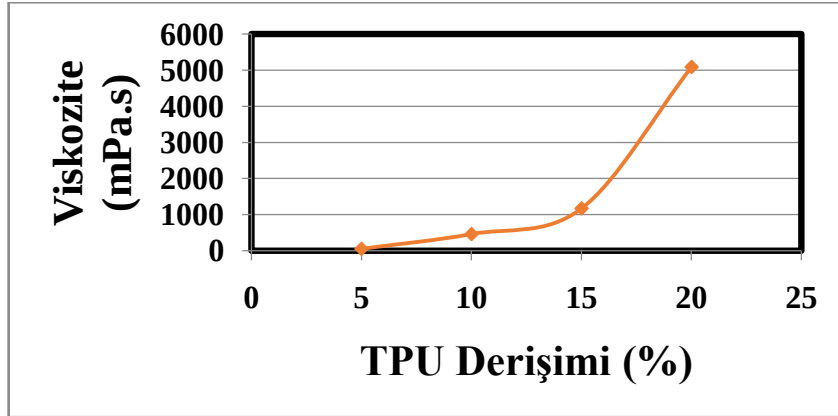


Şekil 4.1 : Değişen TPU oranına bağlı olarak yüzey gerilim grafiği.

Çizelge 4.2’ de sayısal, Şekil 4.2’ de grafik olarak görüldüğü gibi viskozite değerleri karşılaştırmasında ise artan TPU oranına bağlı olarak viskozite değerinin arttığı gözlemlenmiştir. %5-10 ile %15-20 arasında geçişlerde ise değerin hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle % 10’ luk derişim Zhang ve arkadaşlarının [6] makalesinde belirtildiği gibi lif oluşumunun başlaması için gerekli kritik viskozite eşiği gibi durmaktadır. Ayrıca anlaşılan bir diğer konuda viskozite değeri işlem sırasında damla ya da lif oluşumunu etkileyen en önemli faktördür. Tüm çözeltiler arasında benzer yüzey gerilimi değerleri olması ve değişen viskozite değerlerine bağlı olarak lif oluşumu gözlenmesi bunun kanıtıdır denenebilir.

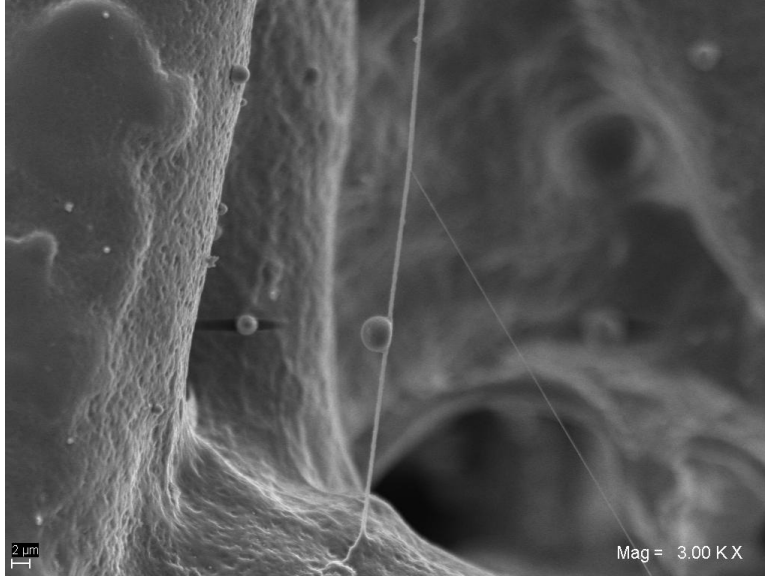
Çizelge 4.2 : Değişen TPU oranına bağlı olarak viskozite değerleri.

Çözelti	Viskozite (mPa.s)
% 5 TPU	52.74
% 10 TPU	461.86
% 15 TPU	1170.96
% 20 TPU	5087.28

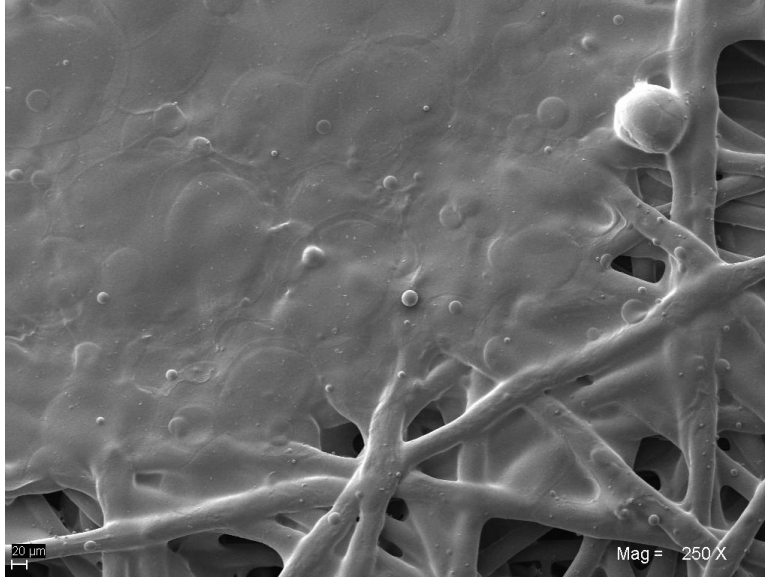


Şekil 4.2 : Değişen TPU oranına bağlı olarak viskozite grafiği.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ deki SEM görüntüleri incelendiğinde %5 ve %10’ luk derişime sahip numunelerde ciddi bir lif oluşumu gözlenmemiştir. Bunun sebebi yukarıda bahsi geçtiği gibi %5 ve %10’ luk derişime sahip çözeltilerin düşük viskozite değerlerine sahip oluşu ve düzeden çıkan jetlerin lif formunu alamayıp damla şeklinde toplayıcıya ulaşmalarıdır.

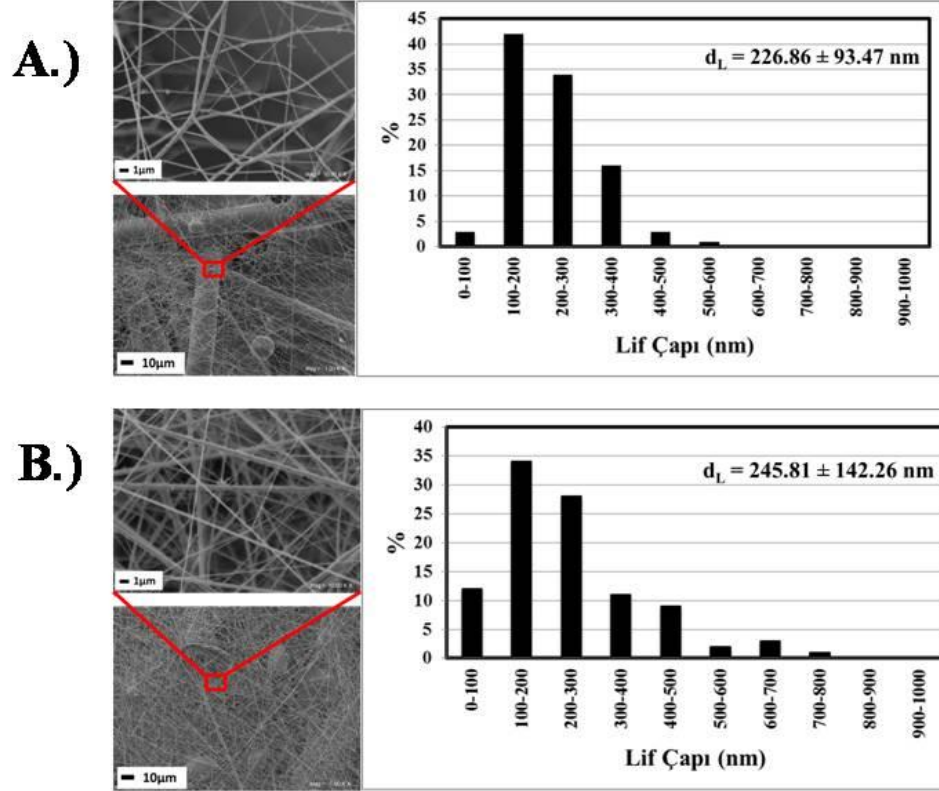


Şekil 4.3 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden %5 TPU içeren çözelti ile elde edilmiş SEM görüntüsü.



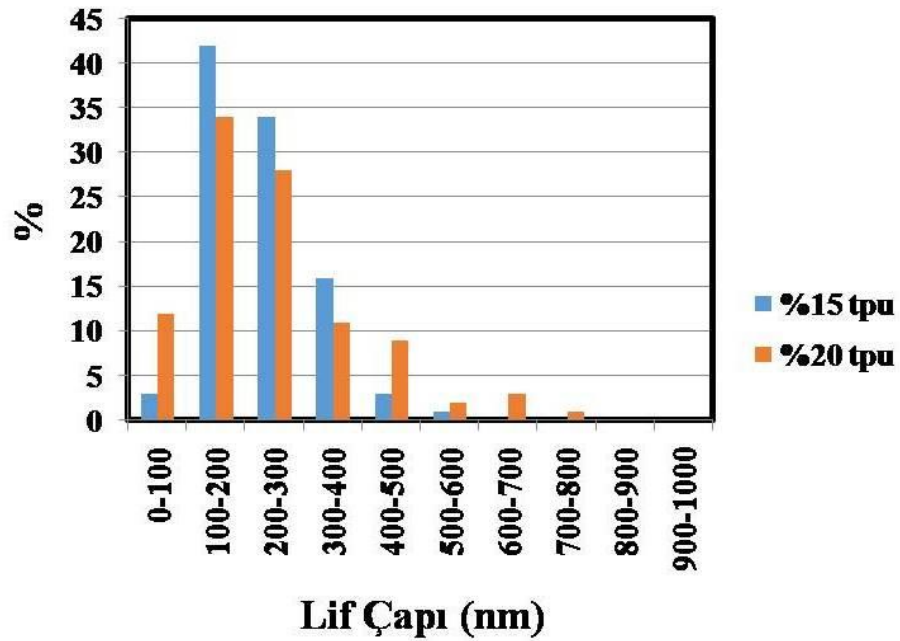
Şekil 4.4 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden %10 TPU içeren çözelti ile elde edilmiş SEM görüntüsü.

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi %15 ve %20’ lik çözeltilerde ise kararlı bir lif oluşumu gözlemlenmektedir.

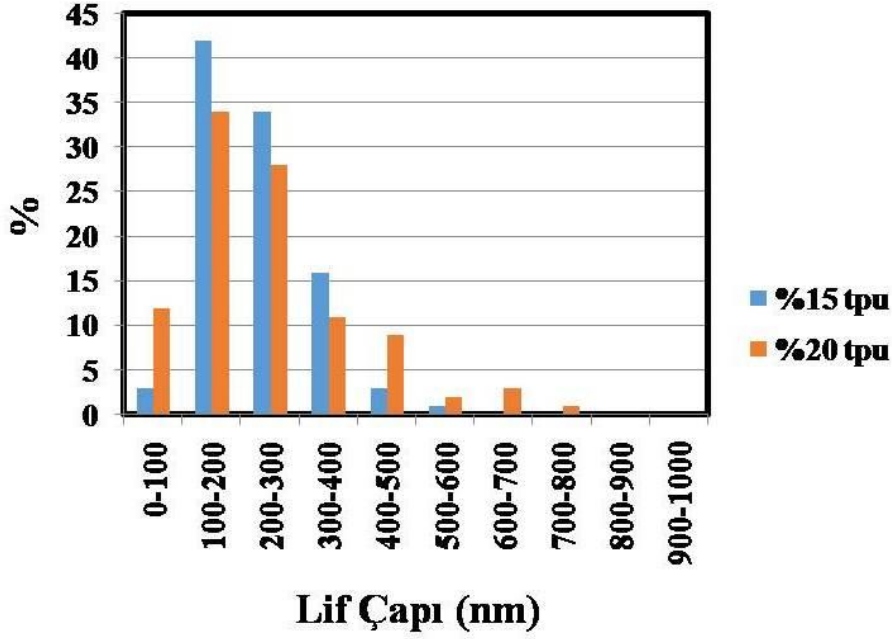


Şekil 4.5 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden A) %15 TPU B) %20 TPU içeren çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.

Her iki yapıda da liflerle beraber buharlaşamayan çözücünden dolayı oluşan damla yapılar mevcuttur.



Şekil 4.6 : Farklı derişimlerden elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.



Şekil 4.6’ daki görüldüğü üzere lif çaplarının genel bir karşılaştırılması yapıldığında %15’ lik derişime sahip çözeltinin %20’ ye nazaran az da olsa daha ince lif oluşturduğu gözlemlenmiştir.

4.3.2 İlave katkı etkisi

İlave çözücü genel olarak çözeltinin buharlaşma özelliklerini iyileştirmek adına kullanılır.

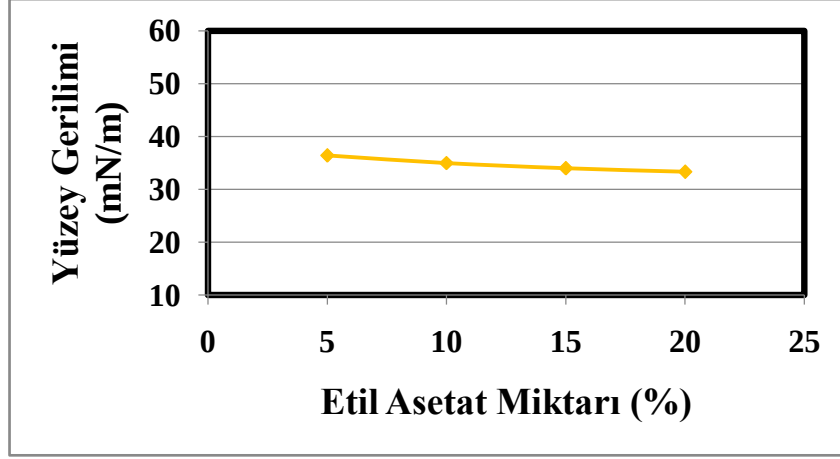
Çizelge 4.3’ deki gibi %15’ lik sabit TPU çözeltisi baz alınarak %5, %10, %15 ve %20’ lik oranlarda çözücü ilavesi katkıları yapılmış, 15 cm mesafede, 0.5 mm çaplı düze ile 6000 dev/dak da deneyler icra edilmiş ve etkileri incelenmiştir.

İlk etapta yüzey gerilimi ve viskozite değerleri incelenmiş olup,

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7’ de görüldüğü üzere ilave çözücünün artan oranlara bağlı olarak yüzey gerilimine az da olsa düşüş eğilimi gösterdiği anlaşılmıştır.

Çizelge 4.3 : Etil asetat katkısına bağlı olarak çözelti yüzey gerilim değerleri.

Çözelti	Yüzey Gerilimi (mN/m)
% 15 TPU + %5 Etil Asetat	36.416
% 15 TPU + %10 Etil Asetat	34.998
% 15 TPU + %15 Etil Asetat	33.990
% 15 TPU + %20 Etil Asetat	33.338

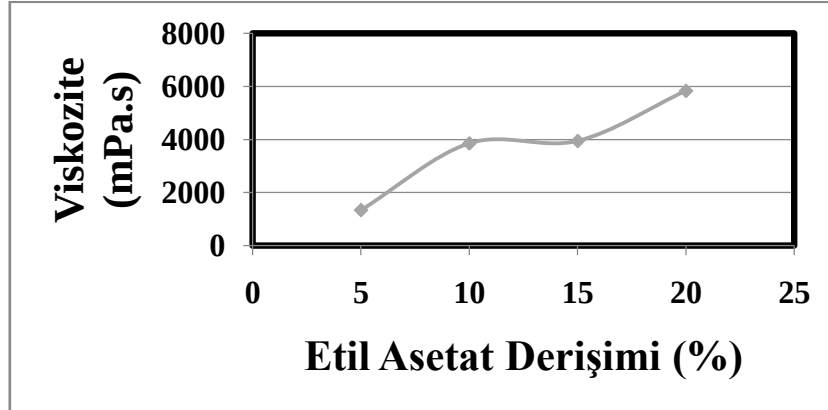


Şekil 4.7 : Sabit %15 TPU çözeltisi ve değişen etil asetat değerlerinde yüzey gerilimi değerleri.

Şekil 4.7 ve Çizelge 4.4’ de görüldüğü üzere viskozite değerlerinde ise artan etil asetat miktarına bağlı olarak viskozite değerlerinde artış tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4 : Etil asetat katkısına bağlı olarak çözelti viskozite değerleri.

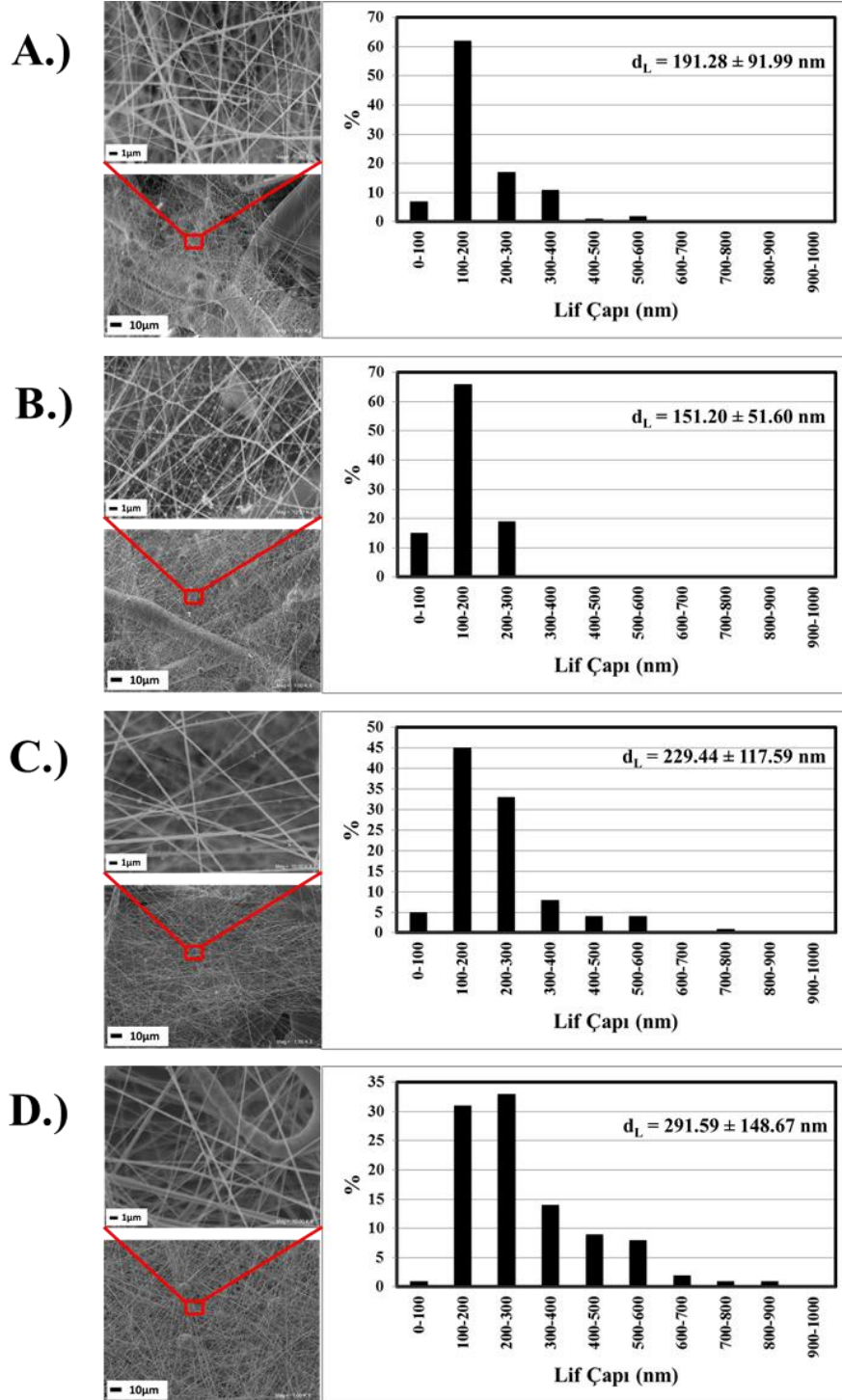
Çözelti	Viskozite (mPa.s)
% 15 TPU + %5 Etil Asetat	1344.48
% 15 TPU + %10 Etil Asetat	3857.96
% 15 TPU + %15 Etil Asetat	3947.56
% 15 TPU + %20 Etil Asetat	5836.54



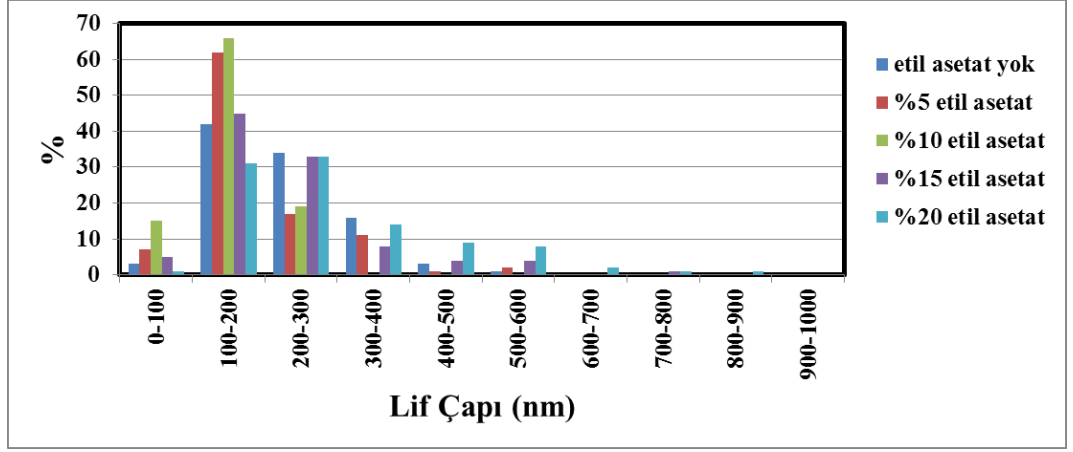
Şekil 4.8 : Sabit %15 TPU çözeltisi ve değişen etil asetat değerlerinde viskozite değerleri.

Burada dikkat çekici nokta Şekil 4.8’ de görüldüğü üzere %10 ve %15 arasındaki çözücü miktarları arasındaki viskozite değerleri arasındaki değişimin az olmasıdır. Bu durum Hansen ve Hildebrand çözünürlük parametreleri [69] ile açıklanabilir ki bu husus tezin kapsamına girmediğinden değinilmemiştir.

Şekil 4.9’ da görülen SEM görüntüleri incelendiğinde artan etil asetat miktarına bağlı olarak yapıda daha az damla oluşumu gözlemlendiği fakat bununla birlikte Şekil 4.10’ daki gibi lif çapı değerlerinde küçük miktarlarda da olsa artış olduğu anlaşılmıştır.



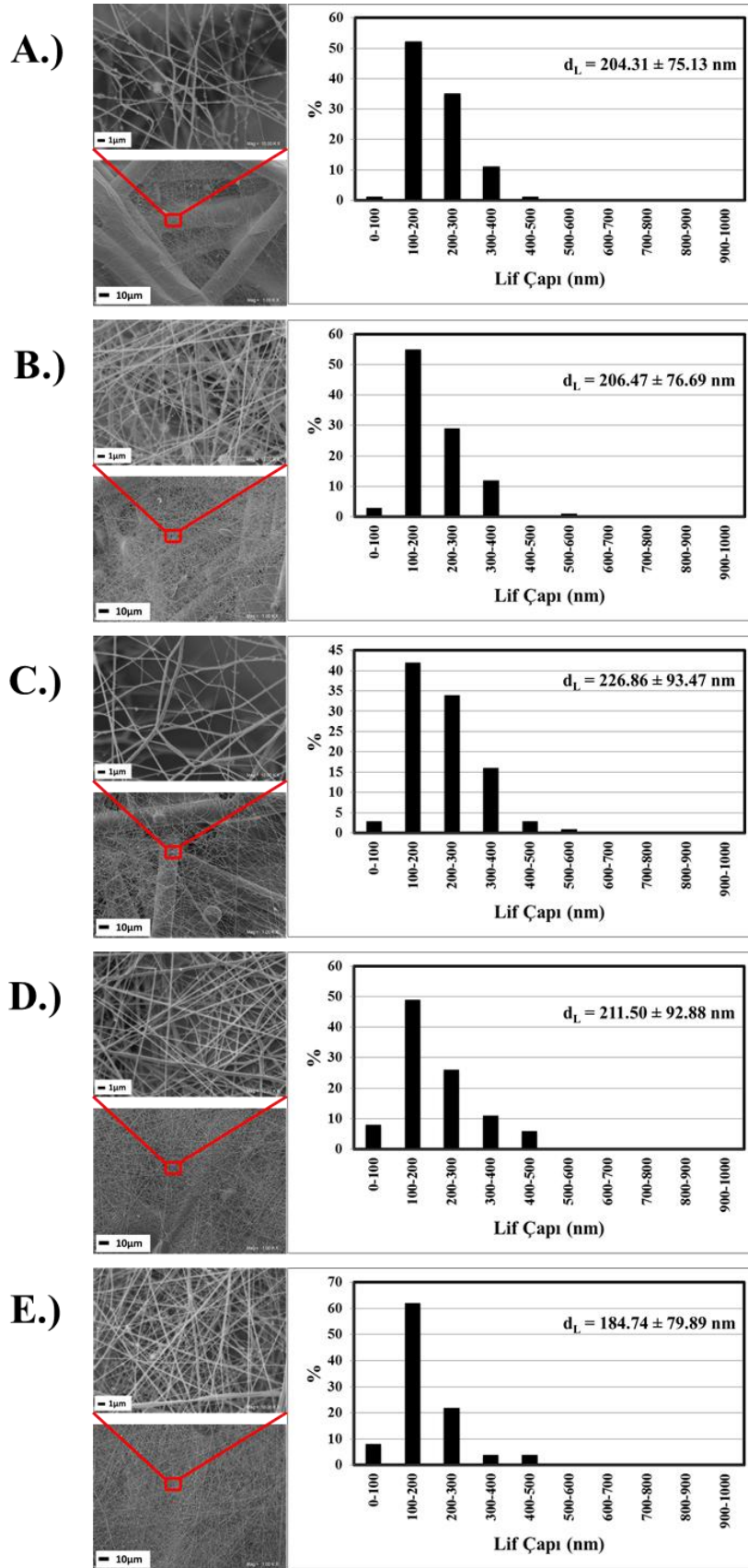
Şekil 4.9 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden, %15 TPU çözeltisine A) %5 etil asetat B) %10 etil asetat C) %15 etil asetat D) %20 etil asetat ilavesi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.



Şekil 4.10 : Farklı ilave katkıları elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.

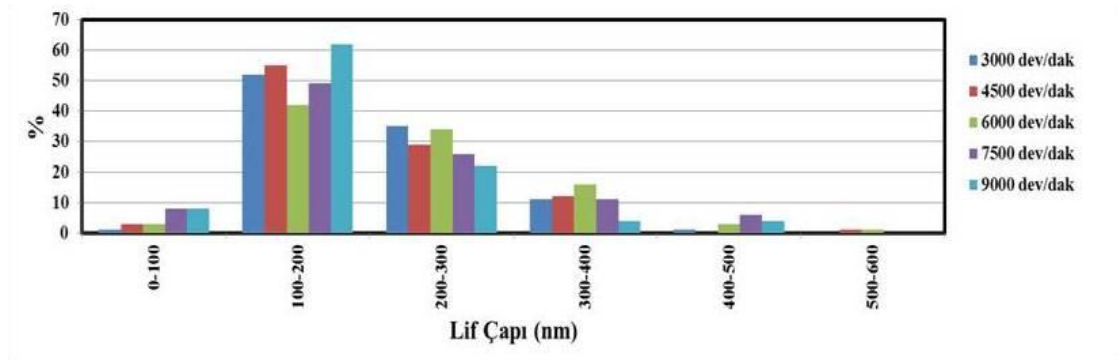
4.3.3 Devir hızının etkisi

Santrifüj eğirme yönteminde diğer önemli bir parametrede rotor devir hızıdır. Genel olarak yapılan çalışmalarda artan devir hızına bağlı olarak artan merkezkaç kuvvetinin etkisiyle jetlerin daha fazla uzama sergilediği ve incelendiği anlaşılmıştır. Ayrıca artan devir hızı ile beraber damla yapılarının azaldığı ve var olanların da daha küçük boyutlarda olduğu tespit edilmiştir. Sistem, %15 TPU çözeltisi, 15 cm mesafeden, 0.5 mm nozzle kullanılarak 3000, 4500, 6000, 7500 ve 9000 dev/dak hızlarda çalıştırılıp numuneler elde edilmiştir. Şekil 4.11’ de görüldüğü üzere üretilen numunelerin genel olarak lif çapı ölçülerinin yakın değerlerde seyrettiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.11 : 0.5 mm düze ve 15 cm mesafeden A) 3000 dev/dak B) 4500 dev/dak C) 6000 dev/dak D) 7500 dev/dak E) 9000 dev/dak hızlarda %15 TPU çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.

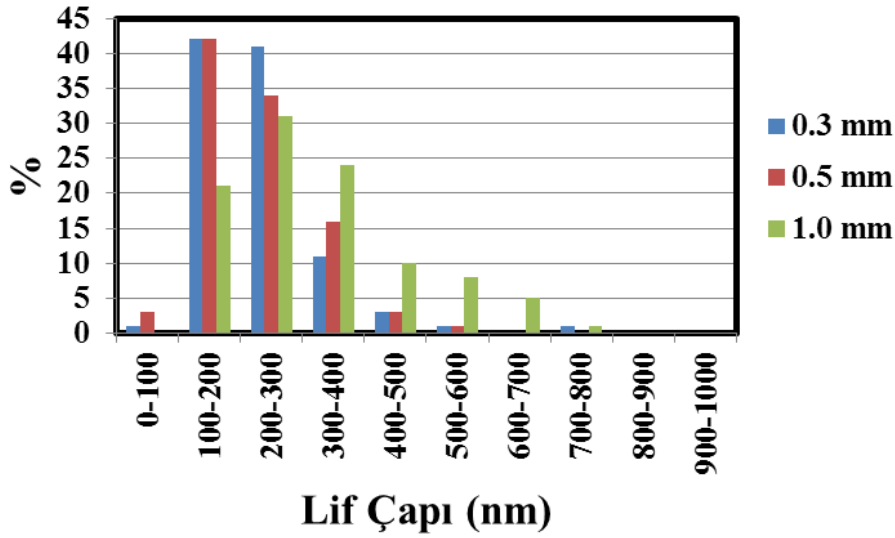
Tez çalışmasında 3000 ile 6000 dev/dak arasında üretilen numuneler üzerinde yapılan ölçümler sonucunda Şekil 4.12’ de görüldüğü üzere lif çaplarında küçük ölçülerde de olsa bir artış tespit edilmiştir. Bunun arkasında yatan sebep olarak artan devir hızına bağlı düzeden çıkan malzeme miktarında artış olması söylenebilir. 6000 dev/dak sonraki bölümde lif çapları tekrar düşüş eğilimi göstermektedir. Her ne kadar bu kısımda da düzeden çıkan malzeme miktarında bir artış olsa da, artan devir hızına bağlı olarak merkezkaç kuvvetindeki ciddi artış, sıvı jetlerin çok daha fazla ve hızlı şekilde incelmelerini sağlamıştır.



Şekil 4.12 : Farklı devir hızlarında elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.

4.3.4 Düz çapının etkisi

Deneyler %15 TPU çözeltisi 6000 dev/dak, 15 cm mesafeden, çapları 0.3, 0.5 ve 1 mm olan 3 farklı düze kullanılarak yapılmıştır. Genel olarak artan düze çapına bağlı olarak lif çapında artış beklenir. Çalışmamda ise Şekil 4.13’ de görüldüğü üzere 0.3 ve 0.5 mm lik düzelerle elde edilen liflerin çap ölçülerine bakıldığında yakın bir dağılım gözükmemektedir. Bu da belli bir değerin altındaki çap ölçülerinde lif çaplarında büyük oranda değişiklik olmadığını göstermektedir. 1 mm çapındaki düze ile yapılan numunelerde ise lif çapında artış gözlemlenmiştir ki bunu artan düze çapına istinaden ilk jet çapındaki büyümeye ve buna bağlı olarak düzeden çıkan malzeme debisindeki artışa bağlayabiliriz.



Şekil 4.13 : Farklı çaplardaki düze kullanımında elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.

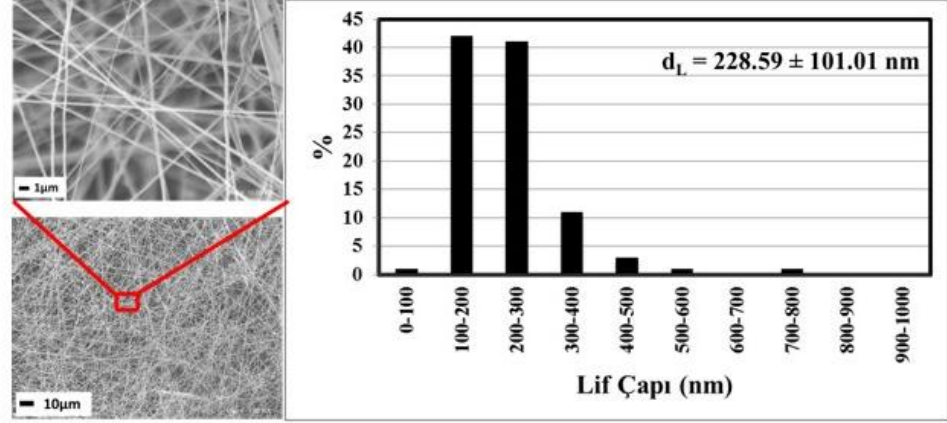
Şekil 4.14’ de görülen üç numuneden elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde ise, artan çapa bağlı olarak yapılarda daha fazla damla ve damlacıklar bulunduğu anlaşılmıştır. Bu durum hem düzeden çıkan daha fazla malzeme miktarına hem de çözücü miktarına bağlanabilir. Artan çözücü miktarını buharlaştırmak için daha uzun süreler gerekeceğinden, buharlaşma süreci tamamlanmamış sıvı jetler toplayıcı yüzeye ulaşmış olmaktadır.

4.3.5 Düzeye toplayıcı arası mesafenin etkisi

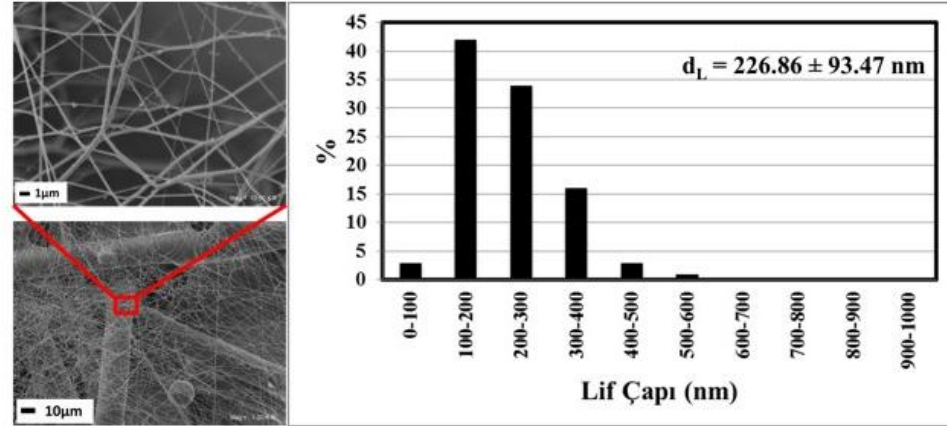
Santrifüj eğirme yönteminde diğerlerine göre etkisi en az olan faktör düze ile toplayıcı arasındaki mesafedir. Genel olarak santrifüj eğirme çalışmalarında çözelti içindeki çözücünün buharlaşması ve sıvı jetlerin ince liflere dönmesi için gereken süreyi tanıma adına tespit edilmesi gereken asgari bir mesafe deneysel yollarla bulunabilir. Daha sonrasında bu mesafeye eklenecek ilave uzunluklar lif çapı ölçülerinde büyük etkilere neden olmazlar [6].

Çalışmamda %15 TPU çözeltisi 6000 dev/dak, 0.5 mm düze ile 150 ve 300 mm mesafelerde deneyler yapılmıştır. Şekil 4.14’deki SEM görüntüleri incelendiğinde 300 mm mesafeli numunelerde daha az damla ve damlacık yapıları ile karşılaşılmıştır.

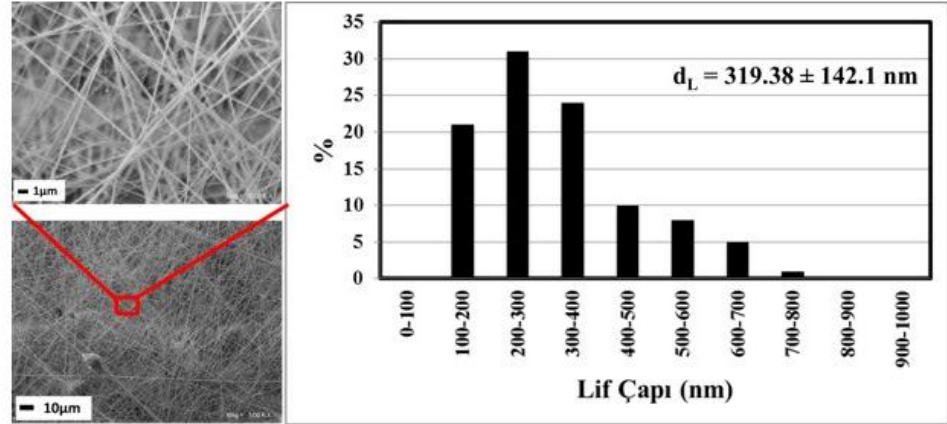
A.)



B.)

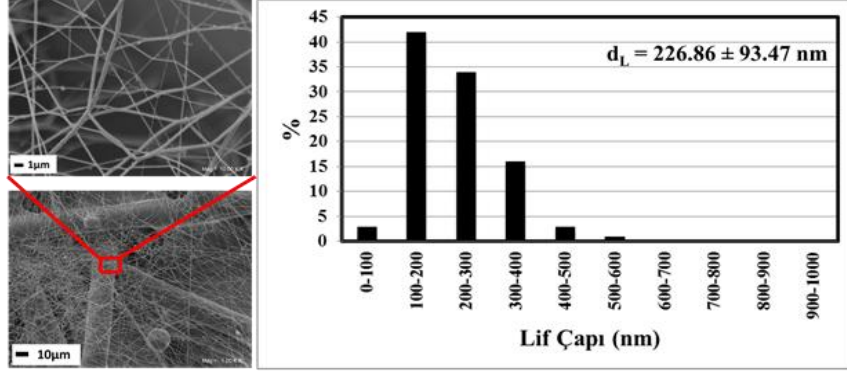


C.)

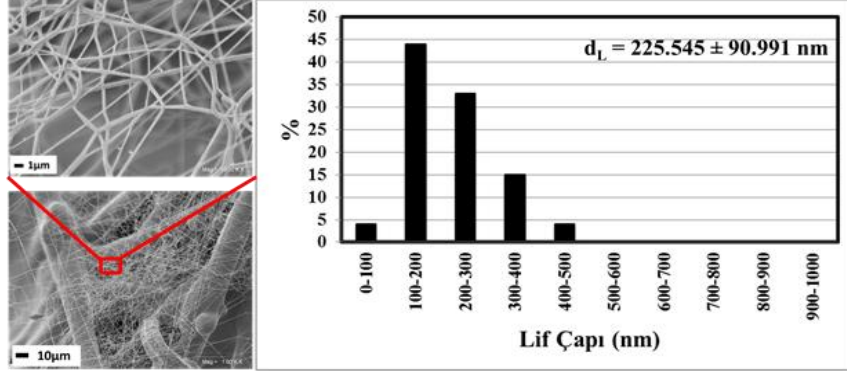


Şekil 4.14 : 6000 dev/dak, 15 cm mesafeden A) 0.3 mm B) 0.5 mm C) 1 mm çaplarındaki düze kullanımı ile %15 TPU çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.

A.)

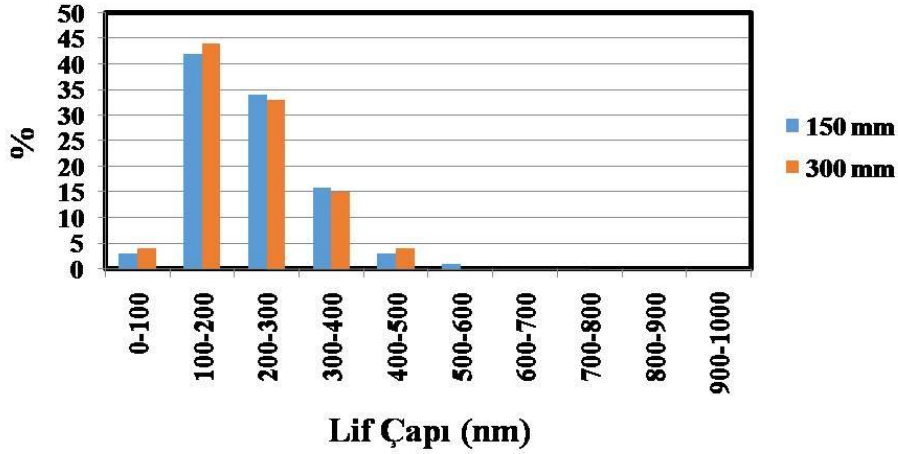


B.)



Şekil 4.15 : 6000 dev/dak, 0.5 mm düze kullanımı ve A) 15 cm B) 30 cm mesafelerden %15 TPU çözeltisi ile elde edilen SEM görüntüleri ve lif çapı dağılımları.

Lif çapı ölçüleri baz alındığında Şekil 4.16’ da görüldüğü üzere sonuçların yakın değerler çıktığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.16 : Farklı mesafe ölçülerinde elde edilen lif çaplarının yüzdelik dağılımı.

5. FİLTRASYON ÖZELLİKLERİ

Sistemde üretilen numunelerin filtrasyon özelliklerini araştırma adına %15 TPU %20 etil asetat katkılı çözelti 9000 dev/dak devirde, 30 cm mesafede ve 0.3 mm düzeler kullanılarak 1 saat çalıştırılıp optimum seviyede bir numune üretilmiş olup, hava, su geçirgenlik ve filtrasyon testleri icra edilmiştir. Teste tabi tutulan numuneler 40 g/m² PP dokusuz kumaş ve aynı kumaşın yukarıdaki parametrelerle üretilmiş 7.5 g/m² TPU ile kaplanmış halidir.

5.1 Hava Geçirgenlik Testi

ASTM D 737; dokulu, dokusuz, hava yastıkları, örgü vb tipteki kumaşların testlerinde kullanılan özel bir standarttır. Bilinen bir kumaş yüzey alanından dik bir şekilde geçirilen hava akımının oranına bağlı olarak hesaplanır [70].

Hava geçirgenlik testleri laboratuvar koşullarında (24°C, 65% oda nemi) Şekil 5.1’de görülen Pro-Ser marka Prowhite Airtest II cihazıyla ASTM D 737 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Her numune için 5 ölçüm yapıp ortalaması alınmıştır. Test sonuçları Çizelge 5.1’ de özetlenmiştir.



Şekil 5.1 : Hava geçirgenlik deney cihazı.

Yapılan testlerde oluşturulan nanoliflerin etkisini anlama adına karşılaştırmalı yöntem kullanılmıştır. Bu amaçla ilk etapta 40 g/m² PP dokusuz kumaş kullanılarak deneyler yapılmış ve değerler tespit edilmiştir. Akabinde bahsi geçen parametrelerde

sistem çalıştırılıp dokusuz kumaş yüzeyi kaplanmış ve numune cihaza bağlanıp deneyler yapılmıştır.

Çizelge 5.1 : Hava geçirgenlik deney sonuçları.

Malzeme	Hava Geçirgenlik Test Koşulları (ASTM D 737)	Hava Geçirgenlik Değerleri (m³/h)
PP Dokusuz Kumaş	T.B. – 125 Pa	377 ± 12
	Ö.S. – 5	
	T.A. – 38 cm ²	
TPU ile Kaplanmış Kumaş	T.B. – 125 Pa	119 ± 9
	Ö.S. – 5	
	T.A. – 38 cm ²	

T.B.: Test Basıncı, Ö.S.: Ölçüm Sayısı, T.A.: Test Alanı

Çizelge 5.1’de görüleceği üzere kaplanmış kumaş değerine nazaran %70’ e yakın oranlarda hava geçirgenlik değeri düşmüştür. Bu değerler sistemin filtrasyon uygulamalarında kullanılmasına uygun olduğunu gösteren önemli bir deneysel veridir.

5.2 Su Geçirgenlik ve Filtrasyon Testleri

Üretilen numunelerin su filtrasyonu kullanımı açısından uygunluğunu anlama adına iki aşamalı olacak şekilde su geçirgenlik ve filtrasyon testleri yapılmıştır. Genel olarak su geçirgenlik için deney düzeneği hazne, tartı ve basınç kaynağı olarak bir gaz tüpünden oluşur [71].

Su geçirgenlik testleri için Şekil 5.2’ deki görüldüğü gibi Sterlitech HP 4750 marka paslanmaz çelik hazne, su miktarını ölçmek için AND EJ-6100 marka dijital tartı ve ilgili firmaya ait RsWeight isimli yazılım programı ve ondalık hassasiyetle ölçüm yapabilen KELLER ECO 2 marka dijital manometre kullanılmıştır.

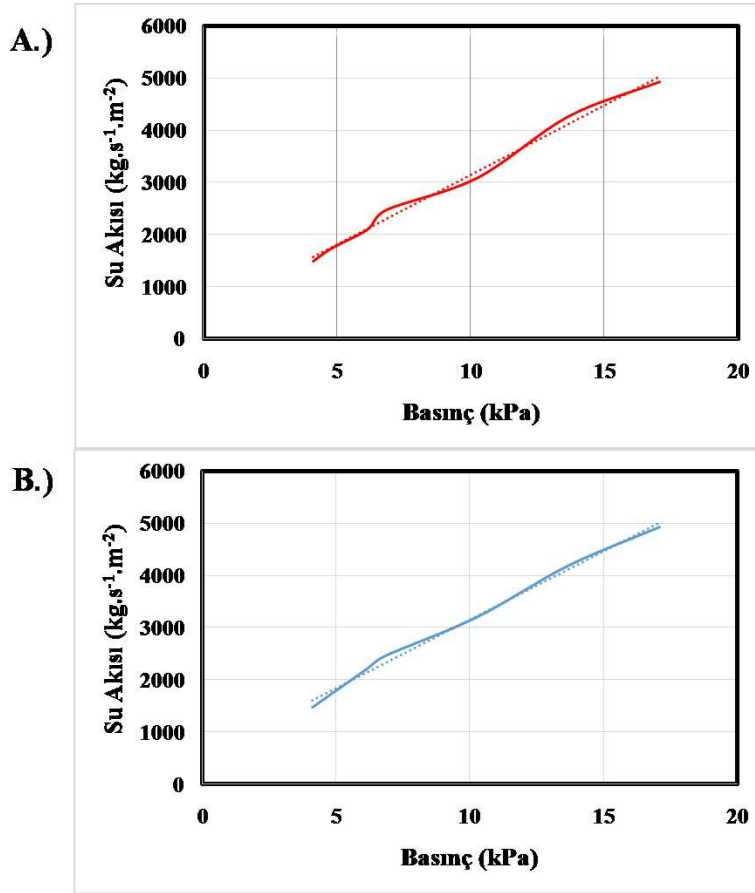


Şekil 5.2 : Su geçirgenlik deney düzeneği.

Deney, ilgili üretilen numuneden 20 cm^2 ’ lik daire şeklinde parça kesilip, hazne içine yerleştirilmesiyle başlar. Hazne içerisine 300 ml kadar damıtılmış su konur ve ağzı sıkıca kapatılır. Akabinde içinde azot bulunan tüpten gaz salınımı yapılır ve çeşitli basınç değerlerinde sabitlenerek 15 sn süreyle tutulur. Bilgisayar yazılımından devamlı olarak toplam kütle değişimine dair bilgiler birer sn lik aralıklarla hafızaya kaydedilip listelenir. Bu ölçümlerin hangi basınçlarda elde edildiğine dair listeleme yapılır ve kütle miktarındaki değişimler hesaplanarak basınca bağlı akı diyagramları çıkarılır. TPU ile kaplı kumaşın su geçirgenlik özelliklerini anlama adına kaplanmamış kumaş referans alınarak elde edilen değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

Şekil 5.3’ de görüldüğü üzere kaplamasız ve kaplanmış kumaş arasında su akı oranlarının genel olarak yakın değerlerde seyrettiği anlaşılmıştır. Bu ilk etapta beklenmeyen bir durum olabilir. Fakat TPU gibi hidrofilik özellikte bir malzeme için bu durum normaldir denebilir. Ayrıca Gopal ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada akışının başlaması için basınç değeri bir eşik değerine kadar artış sergiler [71]. Kaplanmamış kumaşımız mikro seviyede lifler içerir ve buna bağlı olarak varolan büyük boşluklardan su kolayca akabilir. Kaplanmış kumaşa ise TPU nun hidrofilik özelliğinden dolayı su hızlıca emilir. Ayrıca santrifüj eğirme yöntemi elektroüretime göre daha gevşek paketli lif yapısına sahip yüzeyler üretir [13]. Bu gevşek paketleme

su geçişine çok daha az direnç gösterir. Bu nedenlerden ötürü yapılan deneylerde kaplamasız ve kaplanmış filtreler için böyle bir eşik değere rastlanılmamıştır.



şekil 5.3 : Damıtık suyun A) Kaplamasız B) Kaplanmış kumaş kullanımı sonucundaki su akı değerleri.

Ayrıca aşağıda detaylı bir şekilde anlatılan deney düzenegine göre parçacık içeren sıvı kullanılarak yapılan geçirgenlik testlerinde ise şekil 5.3’ de görüldüğü üzere akı oranlarında kısmi bir düşüş olmuştur. Bunun da genel sebebi yüksek miktarda parçacığın gözeneklerde birikerek akıyı engellemesidir.

Çizelge 5.2 : Kaplamalı ve kaplamasız kumaşların sabit basınçtaki su akı değerleri.

Kumaş tipi	Basınç (kPa)	Su Akısı ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
Kaplamasız Kumaş (parçacık içeren su ile)	6.2	1829.59
Kaplanmış kumaş (parçacık içeren su ile)	6.2	1873.97
Kaplamasız Kumaş (damıtık su ile)	6.2	2095.89
Kaplanmış kumaş (damıtık su ile)	6.2	2219.17

İkinci aşama çalışmalarda ise Çizelge 5.2’ deki gibi kaplamalı kumaşın filtrasyon özellikleri araştırılmıştır.

Parçacık sayımında kullanılan aletlere ilaveten Şekil 5.4’ de görüldüğü üzere Lighthouse Remote LPC marka parçacık sayıcısı, LmsExpress yazılımı ve aynı firmanın özel hazırladığı 1, 5 ve 10 μm boyutlarda parçacık içeren sıvıları kullanılmıştır.



Şekil 5.4 : Parçacık sayımı deney cihazı.

İlk etapta deneyde kullanılmak üzere 360 ml damıtık suya 15’ er ml 5 ve 10 μm ve 10 ml 1 μm parçacıklı sıvı ilave edilip oda sıcaklığında manyetik karıştırıcıda 30 dk boyunca karıştırılmıştır. Akabinde oluşturulan bu sıvıdan 10 ml lik bir miktar alınıp filtrelenmeden parçacık test cihazına verilmiş ve sayım işlemi başlatılmıştır ve değerler yazılım kullanılarak kaydedilmiştir.

Sonrasında bu karışımdan 150 ml lik iki kısım alınıp hazne içerisine boşaltılmış ve 6.2 kPa basınçta sırasıyla kaplamasız ve kaplamalı kumaştan geçirilmiştir. Alınan 10 ml’ lik numuneler parçacık test cihazından geçirilip deney sonlandırılmıştır.

Çizelge 5.3’ de görülen sonuçlara göre kaplanmamış kumaş 1 ve 5 μm parçacıkları tutmada düşük bir performans sergilerken 10 μm de ise olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Kaplamalı kumaşımız ise 1 μm parçacık filtrasyonunda iyi sonuçlar

verirken artan boyutla beraber parçacık tutuculuğu artmış ve çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 5.3 : Parçacık sayımı deney sonuçları.

	Parçacık Boyutu			
	1 µm	5 µm	10 µm	
<i>Deney cihazından geçirilmiş damıtık su</i>	251800	4000	1000	Parçacık Miktarı (adet / litre)
<i>Hazırlanan parçacık içeren su</i>	177717900	103123000	47790900	
<i>Kaplamasız kumaştan geçirilen su</i>	160718900	71994500	19030300	
<i>Kaplamalı kumaştan geçirilen su</i>	51904600	6046100	501600	
<i>Kaplamasız kumaş</i>	9,56	30,18	60,18	Filtrasyon Faktörü Yüzdesi (%)
<i>Kaplamalı kumaş</i>	70,79	94,13	98,95	

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre;

- Santrifüj eğirme yöntemi kullanılarak geleneksel yöntemlerle üretilen kumaşlarla aynı mertebelerde lif çapına sahip dokusuz kumaş yapıları elde edilmiştir.
- Sisteme dair optimum parametreler 9000 dev/dak devir hızı, 30 cm toplayıcı düze arası mesafe, 0.3 mm düze çapı ve %15 TPU - %20 etil asetat içeren çözeltidir. Filtrasyon için numune bu parametrelere bağılı olarak üretilmiştir.
- 40 g/m² PP dokusuz kumaş üzerine 7.5 g/m² TPU kaplanarak üretilen filtrasyon numenesi ASTM D-737 hava geçirgenlik testine tabi tutulmuş olup kaplanmamış kumaşa göre % 70' e yakın oranlarda daha az hava geçirgenliği etkisi göstermiştir. Bu ilk etapta, sistem kullanılarak üretilen numunenin hava filtrasyonu uygulamalarında kullanımı için uygun olduğunu gösterir.
- Filtrasyon çalışmalarında ise üzerine kaplama yaptığımız PP dokusuz kumaşın 1 ve 5 µm parçacıkları tutmada zayıf 10 µm de iyi sonuçlar verdiğini gösterirken, kaplamalı kumaşın 1 µm parçacıkları filtrelemede iyi, 5 ve 10 µm parçacıkları filtrelemede ise çok iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Bu durum üretilen kumaşların su filtrasyonu kullanımına uygun olduğunu göstermektedir. Aynı numunenin damıtık su ve parçacık barındıran su ile yapılan su geçirgenlik testlerinde, kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin su akısı açısından yakın değerler vermiştir.
- Santrifüj çalışmalarında genel olarak toplayıcı tasarımları dairesel olmakla beraber, bu tez çalışmasına konu olan tasarımda lifler düz bir konveyör bant zemini üzerinde toplanmıştır. Bu, filtrasyon çalışmalarında kullanılmak üzere kumaş üretiminde önemli bir avantaj sağlamıştır.
- Değişen parametrelere bağılı olarak lif çapı değerlerinde büyük değişimler gözlemlenmemiştir. Sistemin açık alanda çalışıyor olması ve sadece vakum

ünitesinin bulunması, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle büyük çaplı nanoliflerin vakum tarafından çekilemeyip ortama dağılmasına neden olmuştur.

- Üretim, açık bir alanda yapılmış ve liflerin toplanması adına sadece hava emme ünitesi kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda kapalı bir mekan ve konveyör bant üzerine yönlendirici bir hava akımı kullanımıyla daha verimli bir sistem tasarımı yapıp lifler toplanabilir.
- Gelecek çalışmalarda tezde elde edilen deney sonuçları kullanılarak, düze akışı modellenerek kanal çapının akış karakterine etkisi açığa çıkartılıp bu etkinin lif karakterine yansımaları aydınlatılarak düze tasarımına ait ayrıntılar belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] X. Zhang, L. Ji, O. Toprakci, Y. Liang, and M. Alcoutlabi, "Electrospun Nanofiber-Based Anodes, Cathodes, and Separators for Advanced Lithium-Ion Batteries," *Polym. Rev.*, vol. 51, no. 3, pp. 239–264, Jul. 2011.
- [2] Q. Zhang, J. Welch, H. Park, C.-Y. Wu, W. Sigmund, and J. C. M. Marijnissen, "Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats," *J. Aerosol Sci.*, vol. 41, no. 2, pp. 230–236, Feb. 2010.
- [3] W.-J. Li, C. T. Laurencin, E. J. Caterson, R. S. Tuan, and F. K. Ko, "Electrospun nanofibrous structure: A novel scaffold for tissue engineering," *J. Biomed. Mater. Res.*, vol. 60, no. 4, pp. 613–621, Jun. 2002.
- [4] S. Lee and S. K. Obendorf, "Use of Electrospun Nanofiber Web for Protective Textile Materials as Barriers to Liquid Penetration," *Text. Res. J.*, vol. 77, no. 9, pp. 696–702, Sep. 2007.
- [5] H. Ma, J. Zeng, M. L. Realff, S. Kumar, and D. A. Schiraldi, "Processing, structure, and properties of fibers from polyester/carbon nanofiber composites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 11, pp. 1617–1628, Aug. 2003.
- [6] Y. Lu, Y. Li, S. Zhang, G. Xu, K. Fu, H. Lee, and X. Zhang, "Parameter study and characterization for polyacrylonitrile nanofibers fabricated via centrifugal spinning process," *Eur. Polym. J.*, vol. 49, no. 12, pp. 3834–3845, 2013.
- [7] C. J. Ellison, A. Phatak, D. W. Giles, C. W. Macosko, and F. S. Bates, "Melt blown nanofibers: fiber diameter distributions and onset of fiber breakup," *Polymer*, vol. 48, no. 11, pp. 3306–3316, 2007.
- [8] X. Zhuang, K. Jia, B. Cheng, K. Guan, W. Kang, and Y. Ren, "Preparation of polyacrylonitrile nanofibers by solution blowing process," *J. Eng. Fibers Fabr.*, vol. 8, no. 1, pp. 88–93, 2013.

- [9] J. T. McCann, D. Li, and Y. Xia, "Electrospinning of nanofibers with core-sheath, hollow, or porous structures," *J. Mater. Chem.*, vol. 15, no. 7, pp. 735–738, 2005.
- [10] I. D. Norris, M. M. Shaker, F. K. Ko, and A. G. MacDiarmid, "Electrostatic fabrication of ultrafine conducting fibers: polyaniline/polyethylene oxide blends," *Synth. Met.*, vol. 114, no. 2, pp. 109–114, 2000.
- [11] D. Li and Y. Xia, "Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?," *Adv. Mater.*, vol. 16, no. 14, pp. 1151–1170, 2004.
- [12] A. Gupta, C. D. Saquing, M. Afshari, A. E. Tonelli, S. A. Khan, and R. Kotek, "Porous nylon-6 fibers via a novel salt-induced electrospinning method," *Macromolecules*, vol. 42, no. 3, pp. 709–715, 2008.
- [13] X. Zhang and Y. Lu, "Centrifugal Spinning: An Alternative Approach to Fabricate Nanofibers at High Speed and Low Cost," *Polym. Rev.*, vol. 54, no. 4, pp. 677–701, 2014.
- [14] G. M. G. Eliton S. Medeiros, "Solution Blow Spinning: A New Method to Produce Micro- and Nanofibers from Polymer Solutions," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 113, no. 4, 2009.
- [15] H. G. Chae, Y. H. Choi, M. L. Minus, and S. Kumar, "Carbon nanotube reinforced small diameter polyacrylonitrile based carbon fiber," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 3, pp. 406–413, 2009.
- [16] R. Liu, N. Cai, W. Yang, W. Chen, and H. Liu, "Sea-island polyurethane/polycarbonate composite nanofiber fabricated through electrospinning," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, no. 3, pp. 1313–1321, 2010.
- [17] P. X. Ma and R. Zhang, "Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix," 1999.
- [18] M. Ikegame, K. Tajima, and T. Aida, "Template Synthesis of Polypyrrole Nanofibers Insulated within One-Dimensional Silicate Channels: Hexagonal versus Lamellar for Recombination of Polarons into Bipolarons," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 42, no. 19, pp. 2154–2157, 2003.
- [19] C.-G. Wu and T. Bein, "Conducting polyaniline filaments in a mesoporous channel host," *Science*, pp. 1757–1759, 1994.

- [20] C. R. Martin, "Membrane-based synthesis of nanomaterials," *Chem. Mater.*, vol. 8, no. 8, pp. 1739–1746, 1996.
- [21] C. R. Martin, "Nanomaterials—a membrane-based synthetic approach," DTIC Document, 1994.
- [22] Z. Yang and B. Xu, "Supramolecular hydrogels based on biofunctional nanofibers of self-assembled small molecules," *J. Mater. Chem.*, vol. 17, no. 23, pp. 2385–2393, 2007.
- [23] Y. Zhang, H. Gu, Z. Yang, and B. Xu, "Supramolecular hydrogels respond to ligand-receptor interaction," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 125, no. 45, pp. 13680–13681, 2003.
- [24] Z. Yang and B. Xu, "A simple visual assay based on small molecule hydrogels for detecting inhibitors of enzymes," *Chem. Commun.*, no. 21, pp. 2424–2425, 2004.
- [25] Z. Yang, H. Gu, D. Fu, P. Gao, J. K. Lam, and B. Xu, "Enzymatic formation of supramolecular hydrogels," *Adv. Mater.*, vol. 16, no. 16, pp. 1440–1444, 2004.
- [26] P. Gupta, C. Elkins, T. E. Long, and G. L. Wilkes, "Electrospinning of linear homopolymers of poly (methyl methacrylate): exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent," *Polymer*, vol. 46, no. 13, pp. 4799–4810, 2005.
- [27] M. M. Demir, I. Yilgor, E. E. A. Yilgor, and B. Erman, "Electrospinning of polyurethane fibers," *Polymer*, vol. 43, no. 11, pp. 3303–3309, 2002.
- [28] R. Kessick, J. Fenn, and G. Tepper, "The use of AC potentials in electrospraying and electrospinning processes," *Polymer*, vol. 45, no. 9, pp. 2981–2984, 2004.
- [29] L. Ji, Z. Lin, Y. Li, S. Li, Y. Liang, O. Toprakci, Q. Shi, and X. Zhang, "Formation and characterization of core-sheath nanofibers through electrospinning and surface-initiated polymerization," *Polymer*, vol. 51, no. 19, pp. 4368–4374, 2010.

- [30] J. Kameoka and H. G. Craighead, "Fabrication of oriented polymeric nanofibers on planar surfaces by electrospinning," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 2, pp. 371–373, 2003.
- [31] J.-S. Kim and D. H. Reneker, "Polybenzimidazole nanofiber produced by electrospinning," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 39, no. 5, pp. 849–854, 1999.
- [32] D. H. Reneker and I. Chun, "Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning," *Nanotechnology*, vol. 7, no. 3, p. 216, 1996.
- [33] Z. Lin, M. D. Woodroof, L. Ji, Y. Liang, W. Krause, and X. Zhang, "Effect of platinum salt concentration on the electrospinning of polyacrylonitrile/platinum acetylacetonate solution," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, no. 2, pp. 895–901, 2010.
- [34] J. Lyons, C. Li, and F. Ko, "Melt-electrospinning part I: processing parameters and geometric properties," *Polymer*, vol. 45, no. 22, pp. 7597–7603, 2004.
- [35] C. Salvagnini, A. Roback, M. Momtaz, V. Pourcelle, and J. Marchand-Brynaert, "Surface functionalization of a poly (butylene terephthalate)(PBT) melt-blown filtration membrane by wet chemistry and photo-grafting," *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.*, vol. 18, no. 12, pp. 1491–1516, 2007.
- [36] A. Begenir, S. Michielsens, and B. Pourdeyhimi, "Melt-blowing thermoplastic polyurethane and polyether-block-amide elastomers: Effect of processing conditions and crystallization on web properties," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 7, pp. 1340–1349, 2009.
- [37] X. Zhang, *Fundamentals of Fiber Science*. DEStech Publications, Inc, 2014.
- [38] M. Dasdemir, B. Maze, N. Anantharamaiah, and B. Pourdeyhimi, "Influence of polymer type, composition, and interface on the structural and mechanical properties of core/sheath type bicomponent nonwoven fibers," *J. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 16, pp. 5955–5969, 2012.
- [39] X. Xing, H. Yu, D. Zhu, J. Zheng, H. Chen, W. Chen, and J. Cai, "Subwavelength and Nanometer Diameter Optical Polymer Fibers as Building Blocks for Miniaturized Photonics Integration," in *Optical Communication*, N. Das, Ed. InTech, 2012.

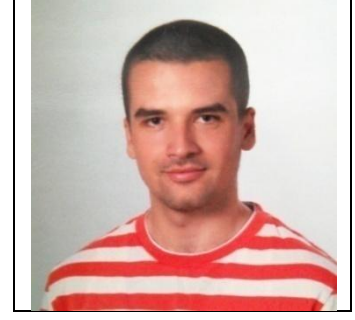
- [40] L. Feng, S. Li, H. Li, J. Zhai, Y. Song, L. Jiang, and D. Zhu, "Super-hydrophobic surface of aligned polyacrylonitrile nanofibers," *Angew. Chem.*, vol. 114, no. 7, pp. 1269–1271, 2002.
- [41] H. Voelker, H. D. Zettler, W. Fath, and H. Berbner, *Production of fibers by centrifugal spinning*. Google Patents, 1996.
- [42] W. A. Watton and J. G. Snyder, *Fiber manufacturing spinner and fiberizer*. Google Patents, 1996.
- [43] J. J. Meerman and R. Jelijs, *Centrifugal spinning process for spinnable solutions*. Google Patents, 2000.
- [44] K. Lozano and K. Sarkar, *Superfine fiber creating spinneret and uses thereof*. Google Patents, 2012.
- [45] R. T. Weitz, L. Harnau, S. Rauschenbach, M. Burghard, and K. Kern, "Polymer Nanofibers via Nozzle-Free Centrifugal Spinning," *Nano Lett.*, vol. 8, no. 4, pp. 1187–1191, Apr. 2008.
- [46] K. Sarkar, C. Gomez, S. Zambrano, M. Ramirez, E. de Hoyos, H. Vasquez, and K. Lozano, "Electrospinning to forcespinningTM," *Mater. Today*, vol. 13, no. 11, pp. 12–14, 2010.
- [47] S. Padron, A. Fuentes, D. Caruntu, and K. Lozano, "Experimental study of nanofiber production through forcespinning," *J. Appl. Phys.*, vol. 113, no. 2, p. 024318, 2013.
- [48] P. Mellado, H. A. McIlwee, M. R. Badrossamay, J. A. Goss, L. Mahadevan, and K. K. Parker, "A simple model for nanofiber formation by rotary jet-spinning," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 99, no. 20, p. 203107, 2011.
- [49] N. E. Zander, "Formation of melt and solution spun polycaprolactone fibers by centrifugal spinning," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 132, no. 2, 2015.
- [50] G. Eda, J. Liu, and S. Shivkumar, "Solvent effects on jet evolution during electrospinning of semi-dilute polystyrene solutions," *Eur. Polym. J.*, vol. 43, no. 4, pp. 1154–1167, 2007.

- [51] J. Tao and S. Shivkumar, "Molecular weight dependent structural regimes during the electrospinning of PVA," *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 11, pp. 2325–2328, 2007.
- [52] M. R. Badrossamay, H. A. McIlwee, J. A. Goss, and K. K. Parker, "Nanofiber assembly by rotary jet-spinning," *Nano Lett.*, vol. 10, no. 6, pp. 2257–2261, 2010.
- [53] L. A. Mary, T. Senthilram, S. Suganya, L. Nagarajan, J. Venugopal, S. Ramakrishna, and V. R. Giri Dev, "Centrifugal spun ultrafine fibrous web as a potential drug delivery vehicle," *EXPRESS Polym Lett*, vol. 7, no. 3, pp. 238–248, 2013.
- [54] M. A. Hammami, M. Krifa, and O. Harzallah, "Centrifugal force spinning of PA6 nanofibers—processability and morphology of solution-spun fibers," *J. Text. Inst.*, vol. 105, no. 6, pp. 637–647, 2014.
- [55] Z. McEachin and K. Lozano, "Production and characterization of polycaprolactone nanofibers via forcespinningTM technology," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 126, no. 2, pp. 473–479, 2012.
- [56] T. O'Haire, M. Rigout, S. Russell, and C. Carr, "Influence of nanotube dispersion and spinning conditions on nanofibre nanocomposites of polypropylene and multi-walled carbon nanotubes produced through ForcespinningTM," *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, p. 0892705713495222, 2013.
- [57] K. Shanmuganathan, Y. Fang, D. Y. Chou, S. Sparks, J. Hibbert, and C. J. Ellison, "Solventless high throughput manufacturing of poly (butylene terephthalate) nanofibers," *ACS Macro Lett.*, vol. 1, no. 8, pp. 960–964, 2012.
- [58] S. Mahalingam and M. Edirisinghe, "Forming of polymer nanofibers by a pressurised gyration process," *Macromol. Rapid Commun.*, vol. 34, no. 14, pp. 1134–1139, 2013.
- [59] S. Padron, R. Patlan, J. Gutierrez, N. Santos, T. Eubanks, and K. Lozano, "Production and characterization of hybrid BEH-PPV/PEO conjugated polymer nanofibers by forcespinningTM," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 125, no. 5, pp. 3610–3616, 2012.

- [60] L. Ren, V. Pandit, J. Elkin, T. Denman, J. A. Cooper, and S. P. Kotha, "Large-scale and highly efficient synthesis of micro-and nano-fibers with controlled fiber morphology by centrifugal jet spinning for tissue regeneration," *Nanoscale*, vol. 5, no. 6, pp. 2337–2345, 2013.
- [61] L. Wang, J. Shi, L. Liu, E. Secret, and Y. Chen, "Fabrication of polymer fiber scaffolds by centrifugal spinning for cell culture studies," *Microelectron. Eng.*, vol. 88, no. 8, pp. 1718–1721, 2011.
- [62] B. Vazquez, H. Vasquez, and K. Lozano, "Preparation and characterization of polyvinylidene fluoride nanofibrous membranes by forcespinningTM," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 52, no. 10, pp. 2260–2265, 2012.
- [63] M. Huttunen and M. Kellomäki, "A simple and high production rate manufacturing method for submicron polymer fibres," *J. Tissue Eng. Regen. Med.*, vol. 5, no. 8, pp. e239–e243, 2011.
- [64] X. Luo and P. T. Mather, "Conductive shape memory nanocomposites for high speed electrical actuation," *Soft Matter*, vol. 6, no. 10, pp. 2146–2149, 2010.
- [65] H. Liu, Y. Chen, S. Pei, G. Liu, and J. Liu, "Preparation of nanocrystalline titanium dioxide fibers using sol–gel method and centrifugal spinning," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 65, no. 3, pp. 443–451, 2013.
- [66] H.-Y. Liu, Y. Chen, G.-S. Liu, S.-G. Pei, J.-Q. Liu, H. Ji, and R.-D. Wang, "Preparation of high-quality zirconia fibers by super-high rotational centrifugal spinning of inorganic sol," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 28, no. 2, pp. 133–138, 2013.
- [67] A. Pedicini and R. J. Farris, "Mechanical behavior of electrospun polyurethane," *Polymer*, vol. 44, no. 22, pp. 6857–6862, 2003.
- [68] M. S. Sánchez-Adsuar, E. Papon, and J.-J. Villenave, "Influence of the synthesis conditions on the properties of thermoplastic polyurethane elastomers," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 76, no. 10, pp. 1590–1595, 2000.
- [69] A. F. M. Barton, *CRC Handbook of Solubility Parameters and Other Cohesion Parameters, Second Edition*. CRC Press, 1991.

- [70] ASTM, “D 737 Standard Test Method for Air Permeability of Textile Fabrics.” .
- [71] R. Gopal, S. Kaur, Z. Ma, C. Chan, S. Ramakrishna, and T. Matsuura, “Electrospun nanofibrous filtration membrane,” *J. Membr. Sci.*, vol. 281, no. 1, pp. 581–586, 2006.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mustafa Kurtuluş
Doğum Tarihi ve Yeri : 13.02.1986 – Eyüp/İstanbul
E-posta : mstfkrts@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2009, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans : 2015, İTÜ, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme ve
İmalat Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

01.2012 – 02.2014 **DETAY METAL EŞYA SAN.** – Üretim Sorumlusu
12.2014 – 09.2015 **TÜBİTAK 213M286** nolu “**Düzgün Gözeneklilikte Teknik
Tekstiller İçin Santrifüj Eğirme Tasarımı ve İmalatı**” adlı
projede bursiyerlik