



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.12.2021
Kabul Tarihi : 05.07.2022

Received Date : 24.12.2021
Accepted Date : 05.07.2022

MEMRAN TEKNOLOJİLERİ VE MEMBRAN TEKNOLOJİLERİNİN ELEKTROSPİNNİNG YÖNTEMİ İLE NANO LİF ÜRETİMİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

LITERATURE SEARCH ON MEMBRAN TECHNOLOGIES AND MEMBRANE TECHNOLOGIES ON NANO FIBER PRODUCTION BY ELECTROSPINNING METHOD

Abdullah GÜL^{1*} (ORCID: 0000-0001-6990-417X)
İsmail TİYEK² (ORCID: 0000-0002-1643-8977)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği ABD, Kahramanmaraş, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Abdullah Gül, Abdullahgul46@gmail.com

ÖZET

Nanoteknoloji alanında yapılmış birçok çalışma, yeni filtreleme teknikleri üzerine 100 ile 1000 nm arasında değişen lif çaplarına sahip elektrospinning tekniği ile rahatlıkla üretilen nanolif yapısındaki membran filtre sistemlerini konu almaktadırlar. Nanolif üretimi için en etkili teknik "Elektrospinning" yöntemidir. Elektrospinning, yüksek gözenekli ve geniş yüzey alanına sahip membran yapıları oluşturur.

Son zamanlarda membran teknolojileri; başta çevre, sağlık, enerji ve endüstriyel alanlar olmak üzere birçok alanda uygulama alanı edinmiştir. Membran teknolojilerinin uygulamalarındaki esas hedef, membran yapısının bileşenlerden oluşmuş çözeltilerde amaca uygun olarak istenilmeyen bileşenlerin geçişini engelleyerek süzülmesidir.

Membran teknolojileri, ayrışma sağlayacak şekilde süzmenin ve moleküler taşınmanın yerine getirildiği kontrollü geçirgen sistemler olarak tarif edilebilir. Ayrıştırma prosesi, membran yapısının hem moleküler yapısına hem de tasarımsal karakteristiklerine bağlı olarak uygulanan ortamın birkaç özelliğine bağlı olarak yerine getirilmesi ile sağlanır. Ayrıca ayrıştırma prosesi, gözenekli yapıya sahip membranlarda; gözenek çapı, formu ve yük ayrışmasına göre kontrol edilirken gözeneksiz yapıya sahip membranlarda ise difüzyon ve sorpsiyon tasarımlarına göre kontrol etmektedir. Membran teknolojilerinde membranın performansı, akı ve seçicilik parametreleri dikkate alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrospinning, membran, nanolif, arıtma, filtrasyon.

ABSTRACT

Many studies in the field of nanotechnology focus on new filtering techniques, membrane filter systems with nanofiber structure that can be easily produced with the electrospinning technique with fiber diameters ranging from 100 to 1000 nm. The most effective technique for nanofiber production is the "Electrospinning" method. Electrospinning creates membrane structures with high porosity and large surface area.

ToCite: GÜL, A., & TİYEK, İ., (2022). MEMRAN TEKNOLOJİLERİ VE MEMBRAN TEKNOLOJİLERİNİN ELEKTROSPİNNİNG YÖNTEMİ İLE NANO LİF ÜRETİMİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 183-211.

Recently, membrane technologies have gained many application areas especially in the environment, health, energy and industrial areas. The basis goal in the applications of membrane technologies is to filter membrane structure in solutions consisting of components by preventing the passage of undesired components in accordance with the purpose.

Membrane technologies can be described as controlled-permeable systems in which filtration and molecular transport are performed to achieve dissociation. The separation process is achieved by performing membrane structure depending on both its molecular structure and design characteristics, depending on several properties of the applied environment. In addition, the separation process, membranes with a porous structure; While it is controlled according to the pore diameter, form and charge separation, it is controlled according to the diffusion and sorption designs in non-porous membranes. In membrane technologies, membrane performance, flux and selectivity parameters are taken into account.

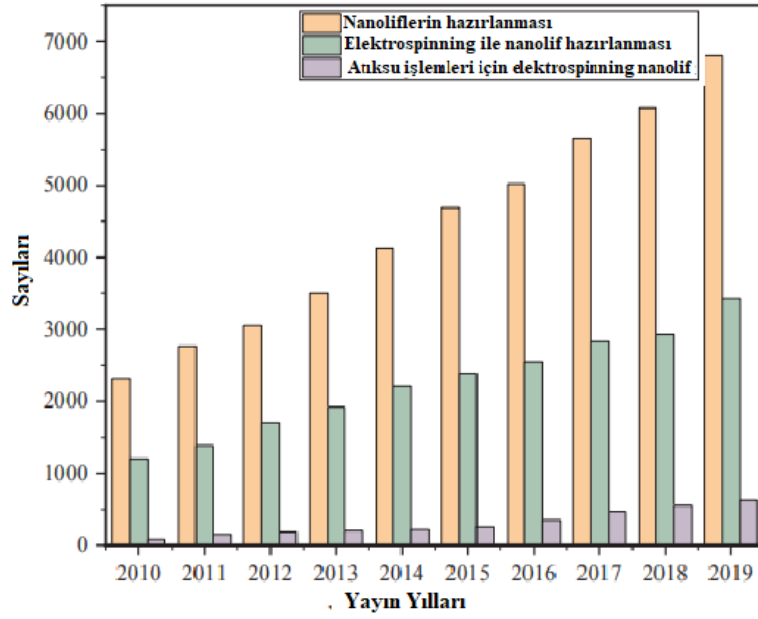
Keywords: Electrospinning, membrane, nanofiber, purification, filtration.

GİRİŞ

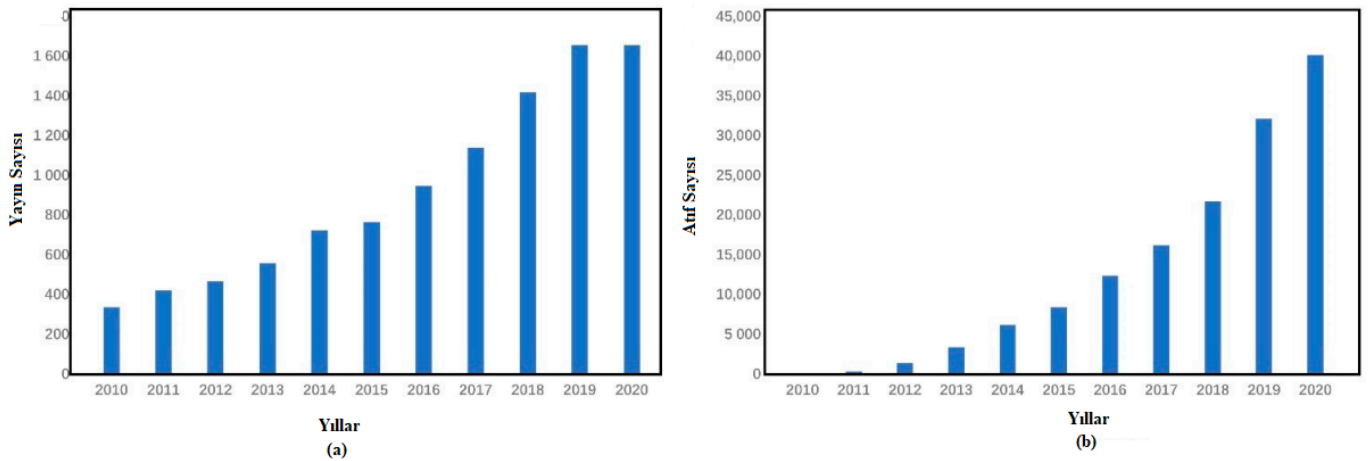
Arıtma sistemleri arasında, özellikle birçok alanda safsızlıkları etkili bir şekilde buldukları bileşenli ortamlardan uzaklaştıran membran teknolojileri, son zamanlarda adından oldukça bahsedilen konu olmuştur. Membran teknolojisi, çevremizde uygulama alanı bulan birçok fiziksel ve kimyasal ayrıştırma yöntemlerine alternatif bir seçenek olarak dikkat çekmektedir. Özellikle sulu ortamlarda bulunan safsızlıkların giderilmesi ve yeniden kullanılması oldukça yüksek verimler kazandırmaktadır. Bu özelliğinden dolayı membran arıtma yöntemleri, önümüzdeki uzun yıllar boyunca dahi üstün performans gösteren arıtım teknolojileri olarak yerini koruyacaktır (Juang & Wany, 2002; Kulkarni & Mahajani, 2002; Dhaouadi & Marrot, 2008; Yuan et al, 2008).

Filtrasyon prosesi, belirli karakteristik özelliklerine göre birden fazla kategoriye ayrılmaktadırlar. Bu tanıma göre; filtrasyon mekanizması sistematiği açısından: yüzey ve derinlik filtrasyonu. Ayrılan parçacıkların boyutu açısından: hiper filtrasyon, nano filtrasyon, ultra filtrasyon, mikro filtrasyon ve partikül filtrasyonu. Kullanılan filtre yapıları açısından: granül filtreler, tekstil filtreleri ve membranlardır. Sıvıların arıtma prosesleri, ticari veya endüstriyel uygulamaların vazgeçilmez bir parçasıdır. Özellikle yağ filtrasyonu (hidrolik yağlar, yakıt) ve su filtrasyonu membran filtrasyonların en çok kullanım alanları oluşturan sıvı arıtma prosesleridir. Su arıtma filtrasyonların, yer altı sularının filtre edilerek içme suyuna dönüştürülmesine, atık suların yeniden kullanılabilir hale getirilerek yiyecek ve içecek sularında kullanılabilir hale getirilmesine katkı sağlar. Bu filtre mekanizması için, gözeneklerin boyut dağılımı, en büyük ve ortalama gözenek boyutu filtrasyon işlemi için önemli bir faktördür (Sutherland, 2008).

Son zamanlarda nanolifler, elektrospinning yöntemi ve bu yöntemle membran üretimi konuları çok popüler olmuş ve bu konuda çok sayıda çalışma yapılarak bu çalışmaların sonuçları bilimsel makaleler şeklinde yayınlanmıştır. 2010-2019 yılları arasında nanolif üretimi, elektrospinning yöntemiyle nanolif üretimi ve atık su arıtma amacıyla elektro çekilmiş nanoliflerle ilgili yapılan ve Web of Science tarafından taranan bilimsel makalelerin istatistiği aşağıdaki Şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca 2010-2020 yılları arasında elektrospinning yöntemiyle üretilen membranlar konusunda Web of Science’da taranan yayınların (Şekil 2-a) ve atıfların (Şekil 2-b) ‘de istatistikleri verilmiştir.



Şekil 1. Web Of Science'ı Takip Eden Son Atık Su İşlemleri Üzerine Elektrospinning Nanolif Yayınlar.



Şekil 2. Elektrospinning Membran Konusunda (a) Yayın ve (b) Alıntı Sayısının Şematik Gösterimi.

Elektrospinning yöntemi ile elde edilen nano boyutlarında ve çok farklı doğrultularda yönlendirilmiş uzun lifler filtre üretimi için onu avantajlı kılmaktadır. Bunun yanı sıra üretilen liflerin çapları, yönelişleri ve şekillerinin kontrol edilebiliyor olması da önemli avantajlarından. Elektrospinning yönteminin prensibi, kılcal uçtaki damlanın elektriksel kuvvetler vasıtasıyla çekilmesine dayanmaktadır. Damlacığı oluşturan kılcal uç pozitif yük görevi üstlenirken birikme yapılacak toplayıcı levha ise negatif yüklü bir yüzey görevi üstlenmektedir (Bilek & Hruza, 2014).

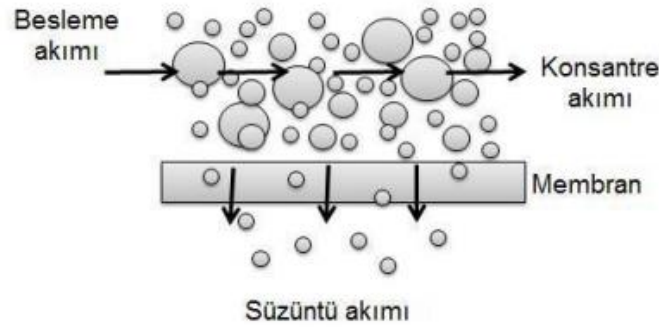
Elektrospinning nano fiber membranlar, yüksek gözenekliliğe, yüksek spesifik yüzey alanına ve benzersiz birbirine bağlı yapıya sahiptir. Atık suların arıtılması ve geri dönüştürülmesinde büyük avantaj ve potansiyele sahiptir (Chen et al. 2020).

Yükselen enerji maliyetlerin üstesinden gelebilmek için, ortaya çıkan kirleticilere karşı etkili, daha katı çevre düzenlemeleri ve endüstriyel taleplere karşılayabilen, daha seçici ve sağlam filtrasyon membranların üretimini zorunlu kılmaktadır. Buna ek olarak daha düşük kimyasal ve enerji girdilerine sahip olması gerekmektedir.

MEMBRAN VE MEMBRAN TEKNOLOJİSİ

Membran, birbirinden farklı iki fazı veya ortamı ayırabilen ve bir ortamdan diğer ortama taşınacak maddelerin seçilebilmesine imkân sağlayabilen geçirgenli bir malzemedir. Besleme akımı ve konsantre akışının membran

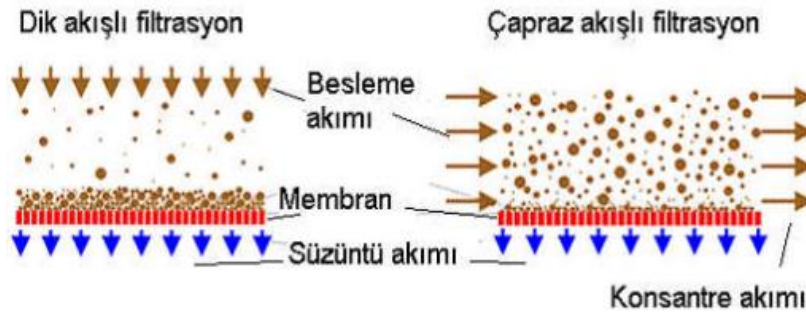
üzerindeki görseli Şekil 3’de verilmiştir. Bütün membran sistemlerinde, membran üzerinden maddelerin geçme rotasında akışın sağlanması için destekleyici bir kuvvet ve amacına uygun olarak belirli maddelerin geçişini sınırlayan ayırma faktörü, en temel prensipleri oluşturmaktadır (Çevik, 2006).



Şekil 3. Membran Ayırma Prosesi Görseli.

Özet olarak membran teknik ve teknoloji ilerleyişindeki tarihsel ilerlemeyi üç döneme odaklandırmak daha uygun olmaktadır. İlk dönem 1950 yılları olarak; membran tekniğinin bilinen manada ilk kez ortaya çıktığı, 1960 yılları olarak; daha çok bilimsel araştırmaların yoğunluk kazandığı ve son dönemi ise 1980 yıllar ve sonrası olarak; membran teknolojilerinin genel manada endüstriyel uygulama alanlarında çokça kullanılmaya başlandığı dönem olarak belirtilmektedir (Koyuncu, 2013).

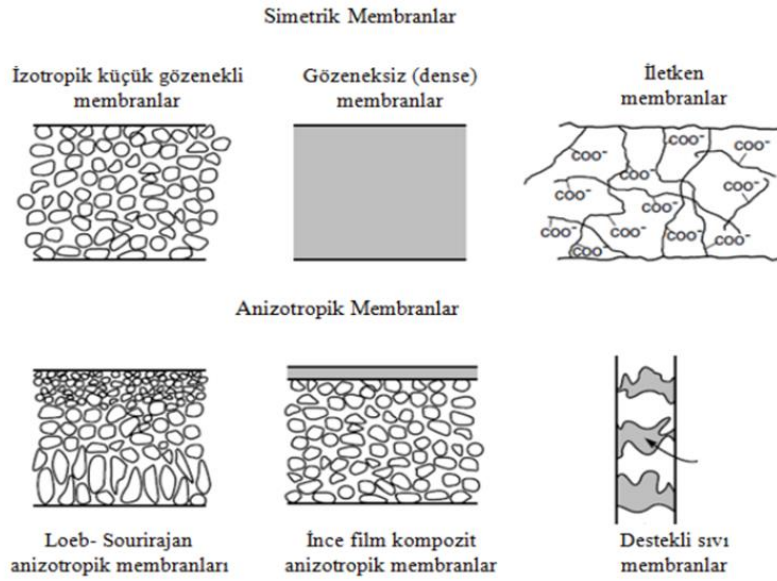
Bilinen manada membran filtrasyonu, kolloidlerin, partikül maddelerin, askıda katı maddelerin, büyük moleküllerin ve çözünmüş maddelerin ayrıştırılması amacıyla kullanılan bir tekniktir. Membran proseslerindeki besleme akımı, basınç, sıcaklık ve konsantrasyon farklılıklarının etkisi ile oluşmuş sürücü kuvvetler yardımıyla membrandan geçmesi esnasında süzüntü ve konsantre (Şekil 4) diye tabir edilen iki akıma ayrılmaktadırlar (Arı, 2009).



Şekil 4. Membran Filtrasyonu Görseli.

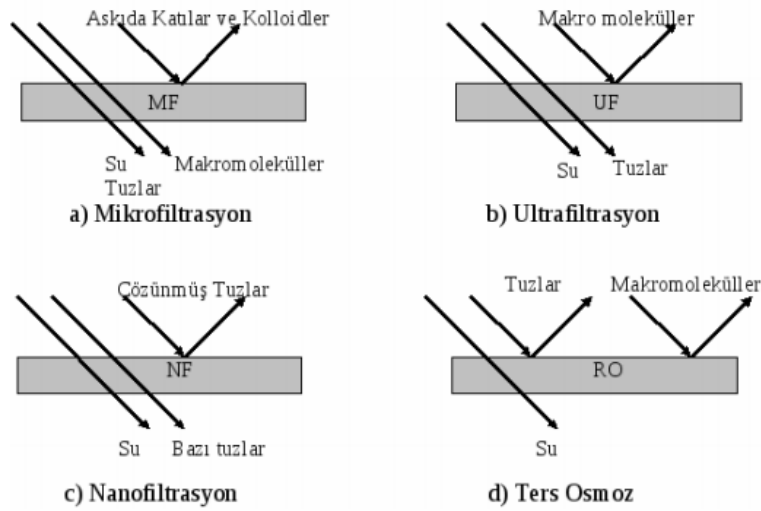
MEMBRAN TİPLERİ

Membranlar çok farklı yönlerinin dikkate alınması ile de sınıflandırılması yapılabilir. İlk sınıflandırma yöntemi, biyolojik veya sentetik zar yapıları ilgilidir. Bu iki tür zar yapısındaki membranlar, işlevsellik açısından birbirinden tamamen farklı olabilirler. Membran tabakası, ince ya da kalın olabilir. Morfolojik yapısı homojen ya da heterojenlik içerebilir. Madde taşınımı aktif ya da pasif olduğu gibi pasif taşınımı ise basınç, konsantrasyon ya da sıcaklık farklarına göre, bunlara ilave olarak doğal ya da sentetik; nötr ya da yüklü olmasına göre de sınıflandırılabilir (Mulder, 1996). Buna ek olarak Şekil 5’de gösterildiği gibi simetrik ve anizotropik olarak da sınıflandırılabilir.



Şekil 5. Genel Membran Tipleri.

Membranlarda geçirgenlik (seçicilik) oranı, membran içerisinde oluşan boşlukların boyutlarıyla ilişkilendirilebilmektedir. Boşluk yapılarının çapları revize edilerek Mikrofiltrasyon (MF), Ultrafiltrasyon (UF), Nanofiltrasyon (NF) ve Ters ozmoz (RO) işlemleri gerçekleştirilmesi sağlanabilir. Membranların ilk olarak geniş ölçekte kullanılması ise Mikrofiltrasyon (MF) ve Ultrafiltrasyon (UF) teknolojileriyle (Şekil 6) birlikte gerçekleşmiştir. Membranlar, homojen ya da heterojen yapılarda ve çeşitli kalınlıklarda oluşabilir. Membranlar, nötr yüklü olabileceği gibi elektrik yüklenmek suretiyle aktif veya pasif özellikleri kullanılarak da parçacıkları ayrıştırabilir. Basınç ve konsantrasyon farklılıkları, kimyasal ve elektriksel etkiler membranların verimini doğrudan etkiler (Yalçın, 2014).



Şekil 6. Genel Membran Geçirgenlik Tipleri.

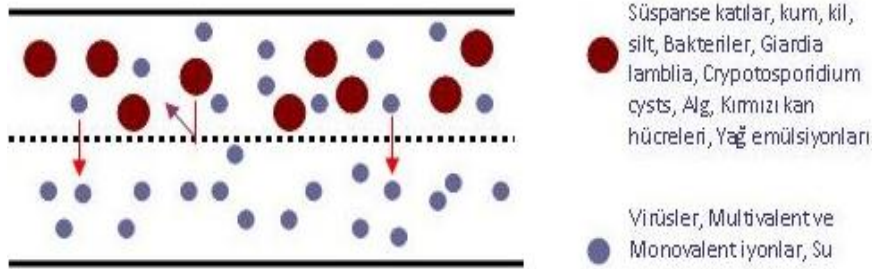
Sürücü Tiplerine Göre Membranlar

Mikrofiltrasyon (MF) Membran

Mikro yapıdaki filtrasyon tekniği, en çok tercih edilen basınç farklılığından kaynaklı sürücü özelliğine sahip membran prosesine sahiptir. Mikrofiltrasyon gaz veya sıvılarda mikron veya daha küçük seviyelerdeki molekülleri ayırtma amacıyla kullanılmaktadır. Membranların gözeneklik ölçümleri yaklaşık 0.1 ile 1.4 μm aralıklarındadır. MF, yüz bin daltondan daha büyük bir molekülleri ağırlık engelleme sınırında (MWCO), yaklaşık olarak 100 - 400kPa (15-

60 Psi) aralığında nispeten düşük basınç uygulamalı bir membran ayırma prosesi olarak tarif edilmektedir (Aslan, 2016).

Bu bahsi geçen ve Şekil 7’de temsili verilen membranlar, seçici karakteristikte geçirgen özelliğe sahiptir. Bunun yanı sıra büyük molekül yapılarındaki organik maddelerin yüksek konstrasyonlarda saflaştırmasına imkan sağlayan dinamik bir mekanik filtrasyon prosesi sağlar. Özellikle metal kaplama proseslerinde üretilen mikron ebatlarındaki partiküller ayrıştırılabilmektedir. Bu proseslerde seçici geçirgenlik için gerekli olan basıncın düşük olması (ki bu yaklaşık 0.2 - 0.5 bar), filtreleme için gerekli olan enerji ihtiyacının da düşük olmasını sağlamaktadır (Aslan, 2016).



Şekil 7. Mikrofiltrasyon.

MF tekniğinin kullanımı, membran kullanım süreçlerinde diğer membran ayırma tekniklerinden kayda değer oranda fark oluşturduğu belirtilmiştir. Kullanımda en fazla talep gören tipi tek kullanımlık modüller şeklinde olmaktadır. MF ile artırılabilir hacmi doğrudan su içindeki partikül seviyesi ile ilişkilidir. Bilinen bir gerçek olarak kritik olmayan bir kullanımda kartuş filtrenin partikül yakalama kapasitesi membran alanının 100 - 300 g/m² arasındadır. Bundan dolayı sıvı hacmi artırılabilenler için, MF bir elektronik atık su kullanımı için nihai ve verimli bir filtredir (Aslan, 2016).

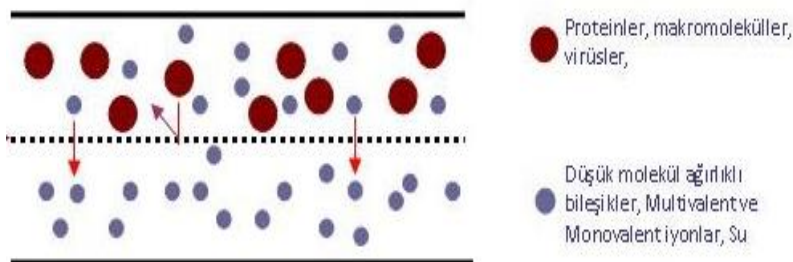
Meşrubat, gıda, ilaç ve alkol sanayisi MF membranların işleme alındığı sanayiler arasında yer almaktadır. MF membranları daha çok; su ve atık suların arıtılma işlemlerinde, doğal ve sentetik organik partikül giderimi, yağ karışımı suların ayrılması, saf su elde etmek için partikül giderimi, diğer membran proseslerden koloidal maddelerin ve bulanıklığın giderilmesi amacıyla ön arıtma için kullanılmaktadır (Zaidi et al., 1999).

Ultrafiltrasyon (UF) Membran

Ultrafiltrasyon (UF); gözenek boyutu 1-100 nm aralığında olan, 1-10 bar basınç aralığında (Şekil 8) işletilen, moleküler ağırlıkları 1000 Da’dan büyük partiküllerin sudan ayrıştırılmasında kullanılan membran prosedir (Fane et al. 2011).

UF membranlarında, partiküllerin tutulma oranlarını ifade etmek için moleküler ağırlık engelleme sınırı (MWCO) kullanılmaktadır ve moleküler ağırlıkları 1000-100.000 Da aralığındaki olan partiküller membranda tutulmaktadır. UF membranlarda ayrıştırmada temel etkili molekül büyüklüğü olmakla beraber bileşenlerin oluşturduğu yüzey yükü ve şekli, membranın özellikleri ve hidrodinamik özellikleri de rol oynamaktadır (Aslan, 2016).

UF membranlar asimetric forma sahiptirler ve üst bölümleri daha yoğun bir katmandan oluşmaktadır. Bu yoğun katmana, ultrafiltrasyon membranlara oldukça yüksek hidrodinamik dayanıklılık sağlamaktadır. Ayırma işleminin esas işlemi, UF membranının üst katmanında gerçekleşmekte olup, alt katmanda sadece üst katmana mesnet oluşturmaktadır (Acarer, 2020).



Şekil 8. Ultrafiltrasyon.

Genel manada faz inversiyon işlemiyle üretilen UF membranlarında, kloro karşı dayanım, yüksek sıcaklık ve geniş pH aralığında kullanım gibi standartlara sahip olduklarından aromatik yapıdaki poliamidler (PA), poliviniliden florür (PVDF), polisülfon (PS), polietersülfon (PES) gibi polimerler en sık kullanılan polimerlerden oluşturulmaktadır (Koyuncu, 2018).

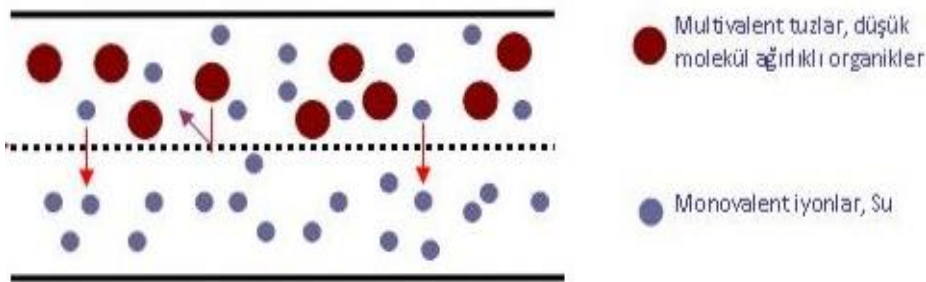
UF membranları genel manada; ev ve endüstriyel atık suların ayrıştırılmasında, makro yapıdaki moleküllerin ve kolloidal parçaların giderilmesinde, yağlı yapı içeren atık suların ayrıştırılmasında, virüs ve bakterilerin giderilmesinde, trihalometanların (THM) giderilmesinde, endüstriyel protein saflaştırmada, belli başlı moleküler ağırlığa sahip değerli maddelerin geri kazanımında ve NF ve TO işlemleri öncesinde ön ayırma amaçlı kullanılmaktadır. UF membranlarının yaygın olarak kullanıldığı endüstrilere örnek olarak gıda, süt, ilaç, tekstil, kimya, kâğıt, deri endüstrileri verilebilir (Çakmakçı, 2012).

UF membranları, yüzey suların ve atık suların ayrıştırılmasında doğrudan kullanılabilirler gibi, yüzeysel suların ayrıştırılmasında koagülasyon flokülasyon sistemleri ile entegre olabilmekte; atık su ayrışımında ise membran bioreaktör sistemleri içerisinde de kullanılabilirler (Koyuncu, 2018).

Nanofiltrasyon (NF) Membran

Nanofiltrasyon (NF); UF ve TO membran boyutları arasında yer alan basınç tabanlı sürücülü membran prosesidir. "Nanofiltrasyon" terimi, besleme fazındaki bazı iyonların isteyerek süzünü kısmına geçmesine sağlayan "ayırıştırıcı bir ters ozmoz prosesi" olarak ifade edilmesiyle ortaya çıkmıştır (Acarer, 2020).

Değerli yüksek tuzların ayrımı sağladıklarından, NF membranlar aynı zamanda kısmi demineralizasyon prosesi olarak da ifade edilebilir. NF membranlar, (Şekil 9'da verilmiştir) yaklaşık olarak 1-10 nm'lik MWCO'ya uygun olacak şekilde üretilmektedir. Genellikle MWCO değerleri çözülmüş organik yapılar için 200-1000 Dalton arasındadır ve çeşitli tuzları moleküler ağırlık uyarınca tutan NF membranlarında tuzlarda farklı tutunma oranları ($\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{CaCl}_2 > \text{NaCl}$ gibi) bilinmektedir. Birçok NF membranının yüzeyi yüklü olduklarından, NF membranlarının taşıma ve seçicilik özelliklerine elektriksel etkileşimleri de ilave katkı sağlamaktadır. NF membranlarının gözeneksiz yapıya sahip olan ve çözelti-difüzyon transfer sistemiyle çalışan TO membranlarından farkı, gözenekli ve gözeneksiz membran ara yüzünde eleme-difüzyon taşıma mekanizmasıyla çalışmasıdır. Ayrıca, NF membranlarında TO'ya nazaran daha az basınçta çalışılıp fazla su akışı elde edildiğinden NF membranlarında son derece önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Acarer, 2020).



Şekil 9. Nanofiltrasyon.

NF membranları genel olarak; çok değerlilik anyonların tutulması (sertlik giderimi), düşük molekül ağırlıklı organik maddelerin ve organik boyanın tutulması, bulanıklığın giderilmesi, mikroorganizmaların giderilmesi, düşük ve yüksek molekül ağırlıklı maddelerin ayrılması, pestisitlerin giderilmesi, mikro kirleticilerin giderilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Hilal et al. 2004).

Nanofiltrasyon membranları yer altı suyu, yüzey suyu ve atık su arıtımında kullanıldığı gibi deniz suyunun arıtımı için ters ozmozdan önce ön arıtma amacıyla da kullanılabilir (Çakmakçı vd. 2009).

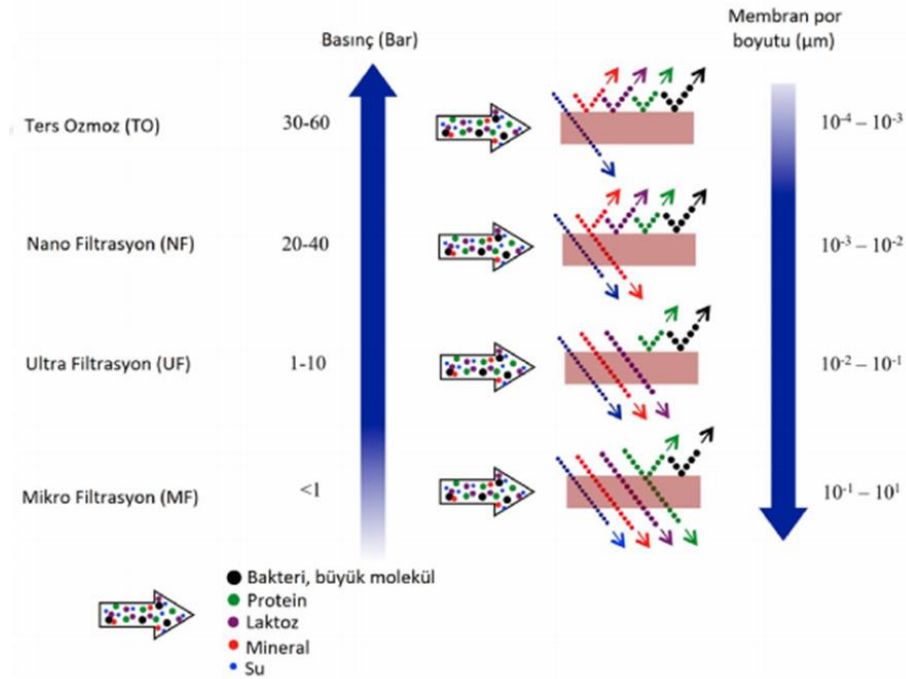
Ters Osmoz (RO) Membran

Ters osmoz membranları tek bir proseste iyonik haldeki bileşiklerin, hidrolize edilmiş boyaların ve buna ek olarak yardımcı kimyasalların ayrıştırılmasını %90 oranında sağlamaktadır (Ramesh et al. 2007).

Ters osmoz yapıdaki membranlar klorür, sodyum, kalsiyum ve sülfat gibi iyonik boyutundaki partikülleri giderebilmektedir. Ters osmoz membranları çoğunlukla NaCl ayrıştırma verimi ile sınıflandırılmaktadır. RO membranları da NF membranlarında olduğu gibi tıkanma konusunda daha hassastır. Genel manada RO membranları selüloz asetat ve aromatik poliamidlerden(PA) üretilir. Bu özellikteki membranların basıncı yüksek ozmotik basınç farklılığından kaynaklandığı için kullanımları sınırlıdır (Naveed et. al. 2006).

Ters Osmoz, endüstriyel atıksu arıtılmasında kullanılan çözülmüş anorganik ve organik maddelerin sudan uzaklaştırılması veya geri kazanılması amacıyla yüksek basınç uygulanan bir tekniktir. Nitrat konsantrasyonunu azaltmak için kullanılabilir başka bir yöntemdir. Su bir zardan yüksek basınç altında hareket eder. Membran, sadece su moleküllerinin geçmesine izin veren birçok mikroskobik gözenek içerir ve bu nedenle nitrat, kalsiyum ve magnezyum gibi diğer inorganik kimyasalları durduracaktır. Membran, gelen nitrata yaklaşık %83-92'sini tahmin eden nitrata giderebilir. Ters osmoz etkili bir nitrat giderici olabilir de bu yöntem nispeten pahalıdır ve faydalı kimyasalları uzaklaştırır (Garner & Mahler, 1978).

Ters Osmoz teknolojisi ile (Şekil 10'da verilmiştir) su, tuz içeriğinden tamamen temizlenmez ve bu yüzden içme suyu olarak kullanılamaz. Ancak ters osmoz sayesinde tarımsal su kullanımı için uygun kalitede su üretilebilir (Schoeman & Steyn, 2003)

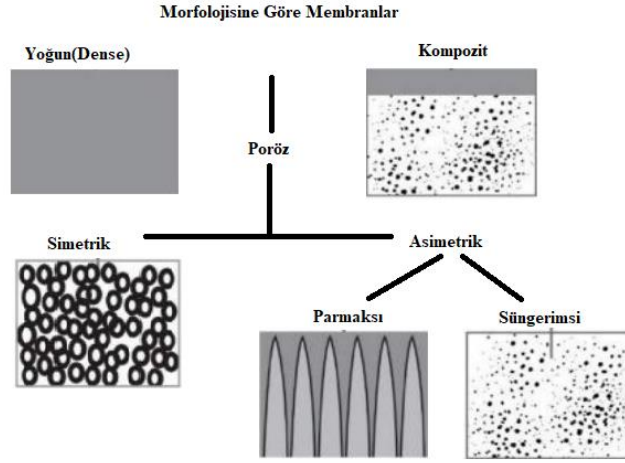


Şekil 10. Gözenek Boyutuna Göre Membran Çeşitleri.

Morfolojilerine Göre Membranlar

Membranlar morfoloji yapılarına göre sınıflandırıldığında; yoğun (dense) membranlar, gözenekli (poröz) membranlar ve kompozit membranlar olarak temel olarak üç grupta ayrılmaktadır. Membranların morfoloji yapılarına göre sınıflandırılması Şekil 11'da ifade edilmektedir. Genellikle ters osmoz ve gaz ayırma membranlarında kullanılan yoğun tipli membranlar, oldukça düşük su akısına sahip özelliktedir. Membran yapılarının içinde veya yüzeylerinde gözenekler içeren porlu yapıdaki membranların polimer yapısı, yoğun membranların polimer yapısı

gibi çok sıkı değildir. Porlu yapıdaki membranların içerisinde bulunan porlar, asimetrik boyut dağılımında veya simetrik boyut dağılımında olmaktadır. (Koyuncu, 2018).



Şekil 11. Morfolojisine Göre Membranların Sınıflandırılması.

Asimetrik yapıdaki membranlar, membran duvarı üzerinde gözenek boyutu değişen katmanlı bir yapıdadırlar. Bu yapıdaki membranlar genellikle, kalın bir mikro gözenekli alt katman ile desteklenen çok ince bir yüzey katmana sahiptir. Mikro gözenekli alt katman esas olarak mekanik dayanım oluştururken ince yüzey katmanı, ayırmayı gerçekleştiren seçici katman olarak rol oynamaktadır. İnce, seçici yüzey katmanından dolayı membran akıları oldukça yüksektir (Cansız, 2017).

Simetrik yapıdaki porlu membranın hemen hemen her yerindeki porlar eşit büyüklükte olmakla birlikte membranın yanal tarafı boyunca büyük miktarda tüm porların çapı eşittir. Asimetrik yapıdaki porlu membranların gözenek çapları, alt tabakadan yüzey tabakasına doğru ilerledikçe azaldığı görülmektedir. Membranların yüzeyindeki gözenekler hemen hemen aynı boyutta olduğunda, su küçük gözeneklerden filtre edilirken oldukça zorlanmaktadır. Bu durumda, membranın akışa karşı direncinin fazla olduğu kanıtı olarak gösterilebilir. Asimetrik yapıdaki membranlarda su, yüzeyde bulunan mevcut küçük porlardan geçtikten sonra alt tabakalardaki daha geniş porlardan geçtiğinden dolayı genel olarak daha az direnç ile karşılaşır. Asimetrik yapıdaki membranlar simetrik olanlara nazaran daha fazla geçirgenlik değerleri sağlamakla beraber daha iyi ayırma performansı da göstermektedir (Acarer, 2020).

Asimetrik yapıdaki membranların ara kesit morfolojileri süngerimsi ya da parmaksı yapıda olabilir. İç yapılarında yüzeye doğru gidildikçe ince kanal yapıları bulunduran membranlar parmaksı membranlar olarak nitelendirilmektedir. Parmaksı boşluk içermeyip birbiriyle bağlantısı olan gözenekleri bulunan yoğun ve küçük boşluk yapısı gösteren membranlar süngerimsi membranlar olarak nitelendirilmektedir. Parmaksı membranlar mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon gibi daha az basınç gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Membrandaki parmaksı boşluklar, besleme fazının daha rahat geçebileceği kanallar oluşturduğundan dolayı membran tarafından suyun geçişine gösterilen direnç daha az olmaktadır. Süngerimsi yapıda olan membranlarda ise, suyun geçişine karşı hidrolik direnç parmaksı yapıdaki membranlardan fazladır. Süngerimsi yapıdaki membranlar daha fazla mekanik dayanım gösterdiklerinden, membran imalatında destek tabakası olarak kullanım alanı bulmaktadırlar. Süngerimsi yapıdaki membranlar; ticari ters ozmoz membranlarda ve bazı membran biyoreaktörlerde destek tabakası olarak kullanılmaktadır (Acarer, 2020).

Morfolojik bakımdan kompozit sınıfta yer alan membranların suyla temas eden üst yüzeyleri yoğun yapıya sahipken, alt kısımları gözenekli yapıya sahiptir. Kompozit membranların en başarılı uygulamasına örnek ince film kompozit kaplı (İFK) membranlardır. İnce film kompozit membranlarda; biri porlu yapıya sahip destek tabakası, diğeri porsuz üst tabaka olmak üzere iki farklı katman yer almaktadır. Porsuz üst katman yüksek seçiciliğe sahipken, yüksek

gözenekliliğe sahip destek tabakası genellikle seçici değildir. İFK membranlar, mikroporlu yapının üzerine 50-500 nm kalınlıkta yoğun yapıya sahip polimerin kaplanmasıyla üretilmektedir. Hem yoğun yapıya sahip olan hem de ince olan aktif tabaka sayesinde yüksek giderme verimleri elde edilmektedir. Membran teknolojilerinin deniz suyu desalinasyonunda geleneksel hale gelmesini sağlayan önemli faktörlerden biri İFK membranlardır (Acarer, 2020).

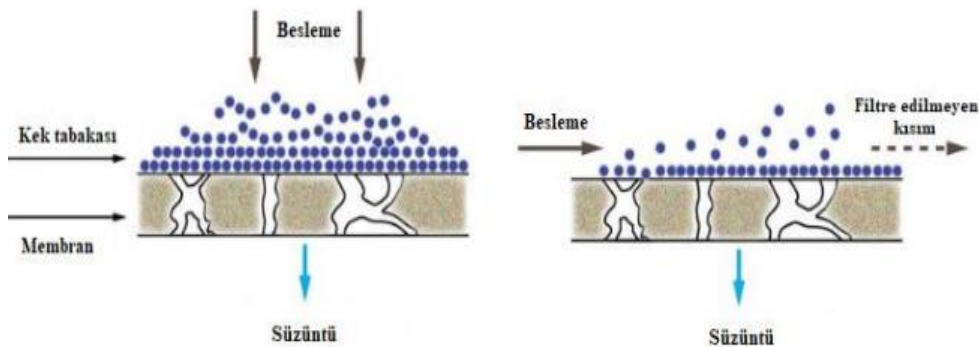
Akım Türlerine Göre Membranlar

Membran yapılarının işletilmesinde klasik filtrasyon olarak da tabir edilen dikey yönlü membran filtrasyonu ve çapraz akış filtrasyonu olarak da tabir edilen teğetsel akış filtrasyonu olmak üzere iki farklı filtrasyon tekniği uygulanmaktadır (Aslan, 2016).

Basınç sürücülü klasik filtrasyon proseslerinde, besleme yapılacak akım, membrana dikey yönde hareket eder ve partiküller membran sayesinde tutularak yüzeyde biriktirilmesi esasına dayanır. Membran yüzeylerinden geçen partikül içermeyen akım permeatı meydana getirir. Tutulan partiküller ise membranın yüzeyinde toplanarak kek katmanı oluşturur (Ramesh, 2014).

Klasik filtrasyon sisteminden farklı olarak, besleme akımı ve süzütünün aynı tarafta olmadığı çapraz akış filtrasyonunda çapraz akış ifadesi membran yüzeyine paralel olarak akan sıvıyı ifade etmektedir. Çapraz akış filtrasyonunda besleme çözeltisi, filtrelenmemiş kısım ve permeat olmak üzere iki akıma ayrılır. Bu filtrasyon sisteminde, filtre edilmemiş olan kısım sisteme geri devredilmesi mümkündür. Bu sistemde, yüksek geri devir hızları membranın yüzeyindeki türbülansı artırdığından besleme çözeltisindeki katıların membran yüzeyinde toplanmaları azalır. Fakat filtrasyon devam ettikçe membran yüzeyinde toplanma artar. Bunun sonucunda da filtrasyon hızında düşme meydana gelir. Akı limit veya basınç değerlere eriştiğinde kullanılan membranın temizlenmesi veya başka bir membran yüzeyi ile değiştirilmesi gerekmektedir (Ramesh, 2014). Membranın yapısının yüzeyinde sürekli bir akış olduğundan dolayı ayrıışan partiküller membran yüzeyinde toplanmamaktadır (Sert, 2015).

En nihayetinde iki filtrasyon sistemi karşılaştırıldığında; besleme akımı ve süzütünün aynı yönde olduğu klasik filtrasyon sistemi, zamanla süzütü akış hızında azalma meydana gelmesi ve direnç gösteren parçacıkların meydana gelmesi gibi nedenlerden dolayı bazı olumsuzluklara sahiptir. Membrandaki kek katmanı kalınlığının kontrol edilebilir bir noktada tutulabilmesi ve göreceli olarak daha fazla akı değerlerinin sağlanabilmesi açısından çapraz akış filtrasyonunun kullanılması membranın çabuk tıkanmasını engellemektedir. Bununla birlikte, daha uzun ömürlü olmasını da ortaya koymaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda membranların akım türlerine göre şematik gösterimi Şekil 12’de açıkça gösterilmektedir.



Şekil 12. Membran Akı Türleri.

Geometrik Şekillerine Göre Membranlar

Membranlar; düz plaka, içi boşluklu fiber, tübüler ve çoklu delikli olmak üzere dört farklı şekilde üretilmektedir. Levha şeklinde olan düz plaka membranların bir yüzeyi aktif ayırmayı gerçekleştirirken diğer yüzeyinden süzütü

elde edilmektedir. Genellikle plaka membranların üretimi, destek malzemesine üzerine polimerin kaplanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu membranlarda; ayırma polimer ile gerçekleştirilir, mekanik mukavemet ise dokuma olmayan kumaş ile sağlanır.

Silindir şeklinde olan içi boşluklu fiber membranlarda ayırma işleminin gerçekleştiği tabaka yüzeyin iç bölümünde ya da yüzeyin dış bölümünde olabilmektedir. Bu tip membranlar içten dışa veya dıştan içe doğru çalışabilirler. Mekanik mukavemetlerinin artırılması amacıyla içi boşluklu membranların üretiminde, içi boş olan örgü ip kullanılmakta ve bu ip üzerine polimer kaplaması yapılmaktadır. Bu yöntemle, güçlendirilmiş içi boşluklu fiber membranlar elde edilmektedir.

Silindir şeklinde olan tübüler membranlar biraz daha geniş çapa sahiptirler. Bu tür membranların üretiminde silindirik dokuma olmayan kumaş kullanılmaktadır. Kullanılan kumaşın iç yüzeyleri polimer ile kaplanmaktadır. Tübüler membranlarda aktif tabaka iç yüzeyde yer almaktadır. Özellikle askıda katı madde içeriği fazla olan sularda tercih edilmektedirler.

Malzemelerine Göre Membranlar

Membranlar, birçok değişik materyalden üretilmektedirler. Daha çok üretildikleri malzemeye bağlı olarak biyolojik ve sentetik membranlar şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan sentetik olan membranlar, organik (polimerik) ve inorganik (seramik, metalik) olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Polimerik yapıdaki membranlar, yaygın olarak 10 - 3000 °C aralığında proses uygulanabilmesine imkan sağlamaktadır.

Organik (Polimerik) Membranlar

Organik yapıdaki membranların esas maddesi polimerdir. Endüstriyel olarak kullanılan membranların birçoğu sentetik veya doğal polimer ürünlerinden oluşmaktadır. Esas olarak bütün polimerler membran malzemesi olarak kullanılsa da membran malzemesi olarak kullanılacak polimerin belirlenmesinde polimerin fiziksel ve kimyasal nitelikleri ön plana çıkmaktadır. Fiziksel ve kimyasal farklılıklardan dolayı ancak kısmi sayıda polimer membran malzemesi olarak kullanılabilir (Çelik, 2019).

Hali hazırda olan uygulamalarda sınırlı sayıda polimer kullanılabilir. Membran yapısında kullanılma üzere yaygın olarak kullanılan polimerik membranlar;

Poliamit Membranlar: Selüloz diasetattan sonra en sık kullanılan ikinci polimer olan poliamitler, aromatik poliamitlerden üretilirler. Selüloz asetatlarla kıyaslandığında daha iyi kimyasal yapıya ve termal özelliklere sahiptirler ve daha geniş pH aralıklarında (2-10 aralığı) işletilirler. Kompozit membranlarda üst tabaka malzemesi olarak poliamitler kullanılmaktadır (Çelik, 2019).

Selüloz Asetat (CA) Membranlar: Selüloz ve türevlerinden üretilen selüloz asetat membranların üretimi kolaydır ve diğer membranlara kıyasla maliyetleri oldukça düşüktür. Aşındırıcı maddelere karşı dayanıklıdır. Adsorblayıcı özellikleri düşüktür. Yüksek sıcaklıkta işletmeye uygun olmayan selüloz asetat membranlar için uygun pH işletme aralığı 3-8 arasındadır (Çelik, 2019).

Polisülfan (PS) Membranlar: Polisülfon membranlar, poliamit ve selüloz asetat gibi bazı organik membranlara göre daha az hidrofilik özelliğe sahiptir. Polisülfon membranlar fiziksel ve kimyasal bakımdan stabil yapıya sahiptirler. Geniş pH aralığı (1-13) ve geniş sıcaklık aralığında (75°C'ye kadar dayanırlar) işletilebilirler. İmal edilmeleri kolaydır. Diğer membranlar ile karşılaştırıldıklarında, aşındırıcı kimyasallara karşı daha yüksek direnç gösterirler (Çelik, 2019).

Polieter Sülfan (PES) Membranlar: Polietersülfon (PES), yüksek performans, düşük maliyet ve modifikasyon çalışmalarında fazla kullanılması nedeniyle oldukça popüler membran üretim malzemelerinden biridir. PES'den üretilen membranların, yüksek sıcaklıkta ve geniş pH aralığında kullanılabilmesi (1-12) ve iyi kimyasal dayanım göstermesi gibi avantajlarına karşılık en büyük dezavantajı hidrofobik olmalarından dolayı tıkanmaya karşı

dirençlerinin düşük olmasıdır. PES membranların kimyasal olarak modifiye edilmeleri zordur ancak amaca göre hidrofilik özelliklerinin modifikasyonu kolaydır (Çelik, 2019). PES polimerinin nanokompozit membran üretiminde kullanılarak tıkanmaya karşı direncinin artırılması mümkündür.

Poliakrilonitril (PAN) Membranlar: En çok kullanılan polimer membranlardandır. Az hidrofobik özelliktedirler. İmalatında vinil asetat veya metil methakrilat gibi comonomer ilavesi sayesinde esneklik ve hidrofobik özellik kazanır.

Polivinildin Florid (PVDF) Membranlar: PES membranlar gibi hidrofobik özellik gösteren PVDF membranların mekanik özelliklerinin çok iyi olmasının yanı sıra yüksek gerilme kuvvetlerine sahiptirler. Yüksek gerilme kuvvetleri nedeniyle süper fiberler olarak da isimlendirilirler. PVDF polimerinden üretilmiş membranlar aşındırıcı kimyasallara karşı dirençlidirler. Yüksek termal kararlılığa sahip olan bu membranlar yüksek sıcaklıklarda (90 °C gibi) işletilebilirler (Çelik, 2019).

Polipropilen (PP) Membranlar: Fiberlerin birleşiminden meydana gelirler. Oldukça yüksek gerilme kuvvetine sahiptirler. Hidrofobik özelliktedirler. Çözücülere karşı dirençleri iyidir ancak oksidantlara karşı düşük toleranslıdır (Çelik, 2019).

Politetrafloroetilen (PTFE) (Teflon) Membranlar: Geniş pH aralığında ve yüksek sıcaklıklarda işletilmeye uygundur. Hidrofobik özelliktedirler. Aşındırıcılara ve asitlere karşı dirençleri iyidir (Çelik, 2019).

Polietilen (PE); Bütün analitik filtrasyon işlemlerinde kullanılan genel bir filtre malzemesidir. Aşındırıcı kimyasal maddelere karşı oldukça dirençli olan polietilen membranlar sıvı ve aşındırıcı özellikteki organik olan çözeltiler için kullanılırlar (Çelik, 2019).

Polivinilklorid (PVC) Membranlar; yüksek kimyasal ve mekanik karakteristik özelliklere sahip olan bu membranlar aşındırıcı kimyasal ve asitlere karşı oldukça direnç gösterebilirler. Buna ek olarak yüksek filtrasyon akısına sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı membran imalatında uygun bir malzeme olmuşlardır. Fiyatı ise diğer membran malzemelerine göre daha uygundur (Çelik, 2019).

Naylonlar ; Doğal olarak hidrofilik yapıdadırlar. Geniş kimyasal uyumluluk aralığına sahiptirler. Termal olarak kararlı değildirler. Yüksek sıcaklıklarda işletilmezler. Naylonlardan imal edilen membranlar kirlenme özellikleri azaltılırlar. Ancak buhar ile sterilize edilememeleri en büyük dezavantajlarıdır. Naylon 6, Naylon 4.6, Naylon 6.6 ve benzeri değişik türleri mevcuttur. Naylon 4.6 daha iyi termal direnç göstermesi nispeten onun buharla sterilizasyonu mümkün kılar. Genel olarak MF ve UF imalatlarında kullanılırlar. Gazların geçirgenliklerinin çok düşük olması nedeniyle, gaz ayırma uygulamaları için uygun değildirler (Aslan, 2016).

İnorganik Membranlar

İnorganik yapıdaki membranlar karbon, silika, zeolit, seramik, farklı oksitler (alüminyum, titanyum, zirkonyum) ve gümüş, palladyum ve alaşımları gibi pek çok metal malzemeden üretilmiş membran tipleridir. Oldukça zor şartlar altında çalışabilirler ve spesifik moleküller için oldukça seçici ve geçirgen olabilirler. İnorganik yapıdaki membranlar, oldukça geçirgen olmaları halinde bağımsız katmanlar ve tüpler olarak yapılmaktadır. Şayet durum aksi ise, çok tabakalı destek yapılarında ince film olarak yapılır. Bu durumda destekleyici tabakalar yeterince dayanıklı ve geçirgen olmalıdır. Membran için pürüzsüz yapıda bir yüzey oluşturmak için gözeneklikte yavaş yavaş veya kademeli değişikliklere ihtiyaç vardır. Örnek olarak;

- *Kömür kaynaklı gazdan H₂ ayrımının yapılması,
- *Doğalgaz ve kömür santrallerinde baca gazlarından CO₂ ayrımı yapılması,
- *Oldukça ekili yanma ve petrokimyasal proseslerde kullanmak için O₂'nin havadan ayrılması,
- *Kimyasal olarak reaksiyon karışımlarından H₂O'nun ayrıştırılmasında,
- *İyonize tuzların ve diğer kirletici maddelerin sudan ayrıştırılması verilebilir (Verweij, 2012).

Seramik Membranlar

Seramik yapıdaki membranlar titanyum, alüminyum ve silisyum oksitlerinden elde edilir. Seramik yapıdaki membranlar, çözücüye karşı dirençli ve ısı kararlılığın ihtiyaç olduğu UF ve MF proseslerinde kullanılmaktadırlar. Bunlar oldukça yüksek sıcaklığa ve kimyasallara karşı dirençlidirler. Bu stabilite, seramik membran ile imal edilen MF ve UF proseslerinin gıda, biyo-teknoloji ve eczacılık vb. sektörlerde kullanımı daha uygun kılmaktadır. Seramik yapıdaki membranlar gaz ayırma ve üretme proseslerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber bazı handikapları da barındırmaktadır. Şöyle;

- Yüksek sıcaklıklarda performansları aşırı hassasiyet
- Bazı tiplerinde kararlılık eksikliği göstermesi,
- Membran malzemesinde fiziksel kırılma ve çatlamların meydana gelmesi,
- Oldukça yüksek sıcaklıklarda son derece hassas geçirgenlik,
- Son derece düşük sızdırmazlık performansı göstermelerini sıralayabiliriz.

Metal Membranlar

Metal yapıdaki membranlar, özellikle paladyum membranlar, gaz karışımlarından hidrojenin ayrılmasında tercih edilirler. Palladyum ve alaşımları bu tür membranların hazırlanması ve imalatında yaygın olarak kullanılır. Kompozit paladyum membran bir katalizör yatağına bitişik yerleştirilir ve katalitik reaksiyon kaynağından hidrojenin ayrıştırmasını sağlar. Diğer bir uygulaması ise hidrojen ilavesi içindir (Aslan, 2016).

Metal membranlar ile ilgili temel sorun yüzeyin zarar görebilmesidir. Bu durumda metal aşınması ve bozunması meydana gelebilmektedir. Paladyum tabanlı membranlarda H₂S veya CO gibi toksik bileşenlerin etkisi ciddi sorun olmaktadır. Ayrıca palladyum oldukça pahalıdır. Ancak bu zararlı durum platinyum kullanılarak minimize edilebilmektedir. Bu nedenle son yıllarda bir seramik destek ile desteklenmiş metalik membranlar ince bir palladyum tabakası ile kaplanarak imal edilmekte ya da tek vanadyum, nikel, tantal ve titanyuma dayalı, sadece hidrojen geçişine veren, membranlar tercih edilmektedir. Bu durum nispeten yoğun paladyum ve alaşımlarına göre daha ucuz bir alternatif olmaktadır (Aslan, 2016).

Nanokompozit Membranlar

Polimerik membranlarda kullanılan polimer malzemeleri hidrofilik ve hidrofobik olmak üzere iki grupta toplanabilir. Hidrofilik membranlar tıkanmaya karşı dirençli olduklarından, hidrofilik membranlar ile iyi düzeyde stabil bir filtrasyon prosesi gerçekleştirilebilir. Hidrofobik membranlar ise uzun vadede yüksek kimyasal ve mekanik dayanım özelliği gösterdiğinden kimyasal temizleme ile stabil bir biçimde kullanılabilir. Hem hidrofilik hem de hidrofobik özelliklere sahip polimeri bulmak oldukça zor olduğundan dolayı iki grubun özelliklerine de sahip nanokompozit membranlar ilgi odağı olmaktadır (Chaharmahali, 2012). Çeşitli kimyasal işlemler kullanılarak yapılan kimyasal modifikasyonlarla malzemelere değişik ve yeni yapısal özellikler kazandırılabilir ve bu sayede malzemeler daha farklı uygulama alanlarında kullanılabilir hale gelmektedir (Acarer, 2020).

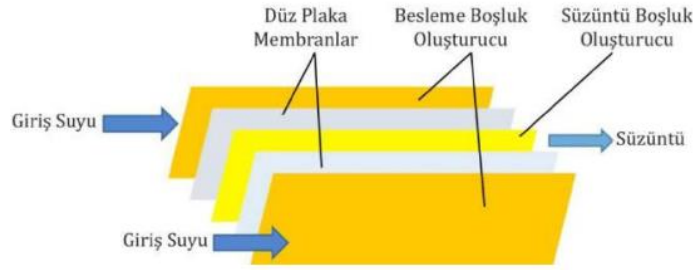
MEMBRAN MODÜLLERİ

Plak Çerçeve Modüller

Plak çerçeve modül membranlarında düz plaka membranlar kullanılmaktadır. Bu membranlar, her bir membran plakası arasında boşluk oluşturacak şekilde plastik malzemenin yerleştirilmesiyle meydana gelmektedir. Böylelikle plak çerçeve modül, hidrodinamik akış kanallarının oluşturulduğu sandviç benzeri modül yapıları elde edilmiş modül tipidir. Genellikle, laboratuvarlarda çokça kullanılan sıkıştırılabilir çelik gövde çerçeveye sahip düz plaka membran modüllerine anımsatılmaktadır (Mulder, 1996).

Plak çerçeve yapıdaki modülleri, iki membranın besleme yüzlerinin birbirine yönelecek şekilde sandviç benzeri yerleştirilmesiyle oluşturulan modüllerdir (Drioli & Giorno, 2016). Besleme ve süzünü kısmı uygun boşluk oluşturucu malzeme ile desteklenmektedir. Plak çerçeve yapısındaki membran modülü, istenilen alanı oluşturabilecek membran plaka sayısı kullanılarak sızdırmazlık contaları ve boşluk oluşturucuların üst üste getirilip somun ve civatalar yardımıyla sıkıştırılması şeklinde hazırlanan modüllerdir.

Plaka çerçeve yapıdaki modüllere ilişkin çalışma esası Şekil 13'de açıkça gösterilmektedir. Bu yapıdaki modüller şekilde görüldüğü gibi düz plakaı membran, besleme suyu boşluk oluşturucusu veya destek yapısı ve üretim suyu boşluk oluşturucusunun üst üste montajı elde edilmektedir.



Şekil 13. Plak Çerçeve Modülün Çalışma Prensibi.

Düz plaka yapıdaki membranların kullanıldığı alanlardan olan membran biyoreaktör (MBR) modüllerinde, membranlar aralarında büyük hava kabarcıkları dolaşabilecek şekilde dizayn edilmektedir. Membranlardan süzülen su, merkezi bir toplama tüpte biriktirilmekte ve ana süzünü suyu toplama hattına bağlanmaktadır. Bu tip plak çerçeve batık MBR modüllerinin uygulamanın kapasitesine göre ihtiyaç duyulan toplam yüzey alanları, modüllerin yan yana ve üst üste konumlandırılmasıyla artırılabilir sağlanmaktadır.

İçi Boşluklu Fiber Membran Modülleri

İçi boşluklu yapıdaki fiber modülleri, çoğunlukla MF veya UF membranları olarak üretilmektedir. Daha çok küçük partiküllerin giderimi için kullanılmaktadır. Çok değişik polimer malzemelerinden elde edilmiş içi boşluklu fiber membranlar uzun, ince ve dar bir boru şeklinde olup değişik tiplerde demet halinde toplanarak modül haline getirilmesi ile elde edilir. En fazla kullanılan içi boşluklu fiber modül tarzı, membranların bir demet halinde toplanarak üst ve alt kısımlarından bir epoksi reçine içerisine yerleştirilerek oluşturulmaktadır. Bu şekilde birleştirilmiş içi boşluklu fiber membranlar, basınç kabı içerisine yerleştirilmektedir. Bu modül dikey veya yatay olarak kullanılabilir. İçi boşluklu fiber modüllerin bir diğer kullanım yöntemi de membran demetini etrafıca saran basınç kabı olmadan bir havuz içerisine daldırılarak kullanılma yöntemidir. Normal bir ticari içi boşluklu fiber modülü birkaç yüz fiberden birkaç bin fibere kadar membran içerebilmesi ile oluşturabilmektedir .

Pek çok uygulamada içi boşluklu fiber membran modülleri düz plaka ve benzeri diğer membran modüllerine göre daha çok tercih edilirler. Diğer modüllere göre daha fazla tercih edilmesini sağlayan bu belli başlı özellikler aşağıda verilmiştir. Bunlar ;

- Membran yüzey alanı ya da modülün kapladığı hacim oranının yüksek olması,
- Mükemmel bir tasarıma sahip olmaları ve bunun da geri kazanım oranını artırıp enerji tüketimini azaltılma imkanının olması,
- Çok fonksiyonlu özelliklere sahip olmaları (her iki yönlü de çalıştırılabilir, dıştan-içe, içten-dışa),
- Oldukça yüksek geri kazanım verimliliğine sahip olmalarıdır (Pabby, 2008).

İçi boşluklu yapıdaki fiber membranların genellikle çapları, yaklaşık 1 - 2 mm arasındadır. İçi boşluklu membranların birçoğu güçlendirilmiş yapıdadır. Bu yapıda olanların iç kısmında bir destek tabakası bulunmaktadır. Bundan dolayı, çekme ve kopmalara karşı daha dirençli bir yapı kazandırılmıştır (Koyuncu, 2018).

İçi boşluklu yapıdaki fiber modülleri dik veya çapraz akışlı olarak uygulanabilir. Şekil 14’de çapraz akışlı içi boşluklu yapıdaki fiber membran modülü görülmektedir. Proses dıştan içe doğru çalışmaktadır. Buna prosese göre konsantre kısım, membran fiberlerinin dış kısmından toplanırken, süzüntü kısmı ise iç çeperlerin ucunun açık olduğu yerden toplanmaktadır (Koyuncu, 2018).

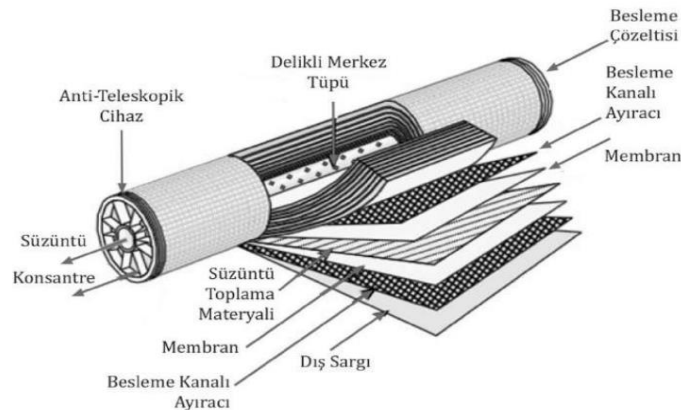


Şekil 14. Çapraz Akışlı Çalışan Bir İçi Boşluklu Fiber Membran Modülü.

Spiral Sargılı Modüller

Spiral sargılı yapıdaki membran modülleri, membran uygulamalarında çok önemli bir yere sahiptir. En başında ters osmoz uygulamaları için geliştirilmiş olsa da şimdilerde ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, gaz ayırımı gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılabilir (Blackmer et al., 1978)

Spiral sargılı yapıdaki modüller (Şekil 15), plak çerçeve modüllerin daha da geliştirilmesi ile elde edilmiş bir halidir. Ayrıca en yaygın kullanılan modül türüdür. Bu modül tipinin en büyük üstün özelliği oldukça yüksek paketleme yoğunluk kapasitesine sahip olmasıdır. Spiral sargılı yapıdaki modülde, paketleme yoğunluğu yaklaşık 14-35 m²/m³ aralığındadır. Bu değer, plak çerçeve tip ya da tübüler modüllere nazaran daha yüksek bir değerdir (Kucera, 2015).

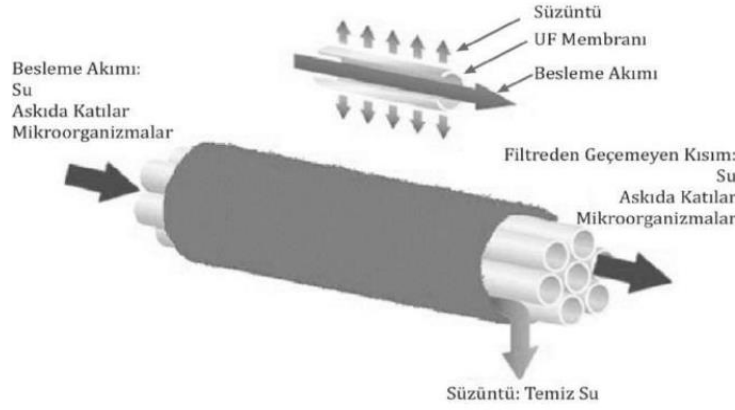


Şekil 15. Spiral Sargılı Modülü İçerisinde Bulunan Malzeme Katmanları.

Tübüler Membran Modülleri

1965 'li yıllarda geliştirilen bu modül tipi, genellikle ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon uygulamaları ile sınırlıdır. İçi boşluklu fiber membranlar ile aynı geometriye sahip olup sadece boyutları daha büyüktür. Gözenekli paslanmaz çelik, seramik ya da polimerik malzemelerden üretilebilmektedirler. Tübüler yapıdaki membranların (Şekil 16) çapları yaklaşık 0,5 - 3 cm aralığında değişebilmektedir.

A. Gül, İ. Tiyek



Şekil 16. Tübüler Membran Çalışma Prensibi.

MEMBRAN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Sentetik yapıdaki polimerik membranların üretilmesinde birçok farklı yöntem uygulanabilmektedir. Bu metotlardan hangisinin kullanılacağı hususu büyük ölçüde polimerin cinsine ve üretim sonucunda elde edilmesi planlanan morfolojiye bağlıdır (Howel et al. 2012). Organik ve organik yapıda olmayan membranların nasıl üretilebileceği ve üretilen membranın tipi Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Membran Hazırlama Teknikleri.

Membran Hazırlama Prosesi	Hazırlanan Membranların Cinsi
Faz inversiyonu	Ters ozmos, UF, MF ve diyaliz membranları
Faz Ayrımı/Ayrıştırma	Na ₂ O-B ₂ O ₃ -zengin faz SiO ₂ -zengin faz (cam ve seramik)
Sol/Gel Teknikleri	Metal alkoksitleri, polimerize olmuş (alümina, titanya)
Sinterleme	0,1-20 µ por büyüklüğü (PTFE, PE, PP)
Kontrollü Germe	0,1-5 mikron por büyüklüğü (Goretex ve Celgard)
Ekstrüzyon/Aktivasyon	Silikon kauçuk, Nafion
Kontrollü Piroliz	Temel organik membranlar, silika ve karbon moleküler elek membranları hazırlamak için pirolizlenir.
Boşluk oluşturma	Önce radyoaktiviteye sonra aside maruz bırakılır.
İnce-Film Kaplama	Püskürtme kaplama, buhar depozisyonu (geçiş metal alaşımları örneğin; Al/Ag, Cu/Zr, Ni/Pd)
Anodik Oksidasyon/Aşındırma	Kuvvetli metal asidiyle aşındırma
Kaplama	Kompozit membranlar
Elektrospinning	Nanofiber membranlar

Elektrospinnig Lif Çekim Teknolojisi

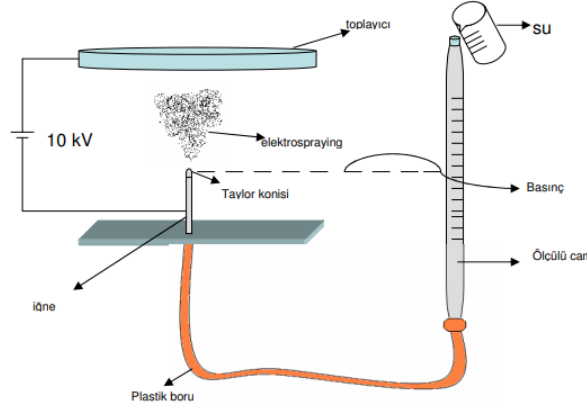
Elektrospinning Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Aslında elektrospinning prosesi yeni bir teknoloji değildir. Elektrospinning prosesi, 1600 ’lü yılların başında William Gilbert’in çalışmalarında ilk görülmüştür (Kataphinan, 2004). Manyetizma üzerine yaptığı bu çalışmalarda, elektromanyetizmanın sıvılar üzerindeki etkisini tesadüfi olarak gözlemlemiştir. Gözlem neticesinde su damlasının uygulanan elektriksel alan içerisinde bir yüzeyden başka bir yüzeye koni formunda yönlendiğini açıklamıştır. Bu açıklamaları, elektrospinning yönteminin tarihsel noktadaki başlangıcı olmuştur (Kataphinan, 2004; Lam, 2004).

Lord Rayleigh 1882 yılında elektrik alan içerisindeki çözeltilerin elektrospinning prosesi sırasında meydana gelen düzensiz yönlendirmeler hakkında çalışmalar gerçekleştirmiştir (Chun, 2005). Bu çalışmalar sonucunda elektrik alan içerisindeki çözelti damlacığının yüzey gerilimini aşan bir seviyeye ulaşması durumunda elektrik alan içerisinde kararsızlık düzeyine ulaşarak yönlendirmenin ardından kopmaların yaşandığını savunmuştur (Yarin et al. 2001). Buna

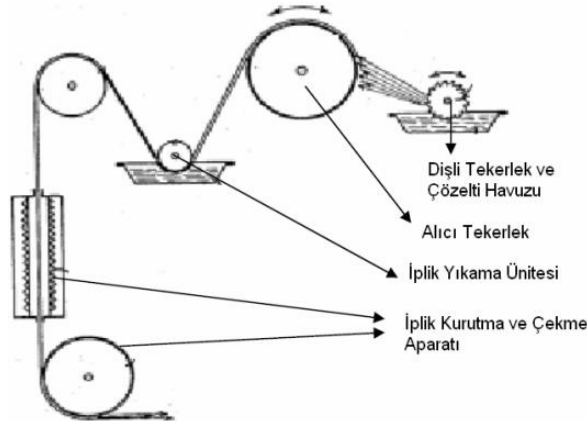
ek olarak; çözelti damlacığı üzerine etki eden iki kuvvet olduğunu ve bunlardan birinin elektrik kuvveti, diğerinin ise elektrik kuvvet yönünün tersine yönde etki eden yüzey gerilim kuvveti olduğunu açıklamıştır. Elektrospraying prosesi, elektrik alan içerisindeki damlacığın kuvvetinin, yüzey gerilim kaynaklı olan kuvveti aştığı noktada düz ucunda ince jet çıkışlara ayrılarak yönlenebilir hale gelmesiyle gerçekleşmektedir (Chun, 2005; Sanders, 2005; Reneker, 2000).

İlk olarak elektrik verilmiş sıvıların hızlı elektrodinamik çarpılmasını gözlemleyen Zeleny bu çalışmasını 1917’de gerçekleştirmiştir (Şekil 17). Gerçekleştirdiği bu çalışma neticesinde meydana gelen spreynin; sıvının yapısının, uygulanan yüksek voltajın ve borunun uç bölgesindeki sıvı basıncının fonksiyonu olduğunu ifade etmiştir (Margean, 2004).



Şekil 17. Zeleny'nin Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

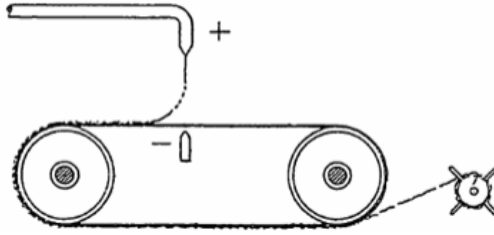
Elektrospraying yöntemine dayalı lif üretimi konusundaki ilk patenti, 1934’de Anton Formhals almıştır. Anton’un icadı, sıvı yapılar konusunda elektrik alana dayalı suni ve sentetik filament elde edilmesini hakkındadır (Desai, 2004). Anton bu çalışmasıyla polimerik yapıda filamentlerin elde edilmesini üzerine elektrostatik kuvvetlerin kullanılmasının esaslarını açıklamıştır (Şekil 18).



Şekil 18. Anton'un Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

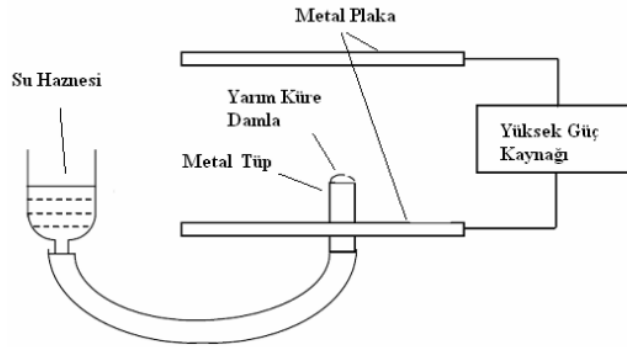
Daha istikrarlı bir elektrospraying üretimi yapabilmek için Gladding tarafından yeni bir teknoloji geliştirildi. Bu teknolojiye liflerin bir arada toplanabilmesi amacıyla süreklilik arz eden bir konveyör bant sisteminden yardım aldı. Bu konveyör sistemi (Şekil 19) elektrik alan içerinden geçip, meydana gelen lifleri bir arada toplayabilmesi ile farkındalık oluşturmuştur (Chun, 2005).

A. Gül, İ. Tiyek



Şekil 19. Gladding'in Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

Taylor tarafından 1960'lı yıllarda ortaya konulan birçok çalışmada, elektrik yükü ile yüklenmiş sıvıların, esas olan teorik ilkeler ifade edilmiştir (Hohman, 2001). Bir çalışmasında, iki sıvı seviyeleri arasında bulunan koni ara yüzeyin uygulanan elektrik alan içerisinde (Şekil 20) dengeli bir seviyede olduğunu ifade etmiştir (Kataphinan, 2004). Sıvı yüzeyleri elektrik alan içerisinde yüklenir ve zıt yüklerin itme kuvvetleri ile bir kuvvet meydana gelir. Denge değerini aştıktan sonra elektro-statik kuvvet yardımıyla, sıvı damlacık yüzeyleri bir koni formunu alır. Bu koni formu sayesinde fazladan olan yükler, koni formunun ucunda meydana gelen yüklenmiş jetten dışa doğru yönlendirilir. Yaptığı çalışmada elektrik alan kuvvetinin, yüzey gerilimi ile aynı olduğu eşik noktada koni formunun oluştuğunu ifade eden Taylor, meydana gelen bu koninin yarım pozisyon açıl değerinin 49.3° olarak açıklamıştır (Rangkupan, 2002).



Şekil 20. Taylor'un Ortaya Koyduğu Çalışma Düzenegi.

Taylor'un açıkladığı teoride, elektriksel alan içerisindeki viskoz damlacıktan ince liflerin meydana gelmesi, elektriksel kuvvet yardımıyla yüklü olan sıvı yüzeyinde meydana gelen kararsız yapıdan kaynaklandığını ifade etmiştir (Mohan, 2002). Uygulanana büyük voltaj değerlerinde dairesel damlacık meydana gelmektedir. Eşik noktada viskoz damlacığının yarı dairesel formu yıkılarak jet meydana gelmesinden önce koni Şekil 21-(a)'da ifade edilen formunu almaktadır. Koni şeklini alan damla yapısının ucu ile taban seviyesi arasında Şekil 21-(b)'de ifade edildiği gibi yaklaşık 50° 'de bir açı oluşur. Elektrik alan kuvvetinin etkisi altındaki, viskoz formundaki akışkanın yüzey kıvrımlı yapısı farklı bir al alır. Bu esnada elektriksel kuvvete karşı meydana gelen tek kuvvet yüzey geriliminin oluşturduğu kuvvettir.

Taylor tarafından geliştirilen damlacık yapının maksimum kararsızlık seviyesindeki eşik değer voltaj (V_c) değerinin denklemi denklem 1'de şu şekilde açıklanmıştır;

$$V_c = 4 \left(\frac{H}{L} \right) * \left(\ln \left(\frac{2L}{R} \right) + 1.5 \right) * \left(1.3\pi RT \right) * (0.09) \quad (1)$$

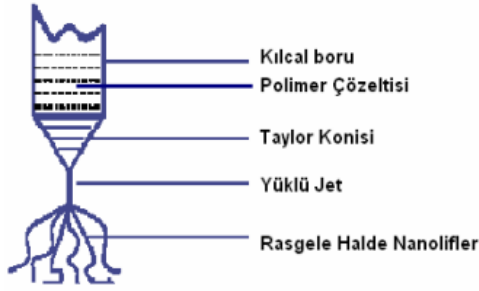
Burada;

H: elektrik alan mesafesi (cm),

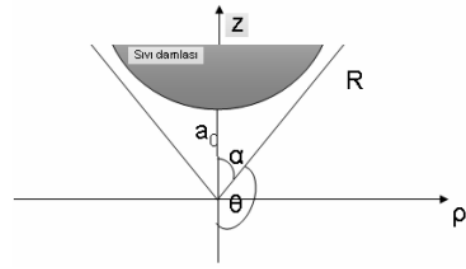
L: kılcal boru uzunluk değeri (cm),

R: kılcal boru yarı çap değeri (cm),

T: damlacıkta meydana gelen yüzey gerilimi (dyne/cm) olarak dikkate alınmaktadır.

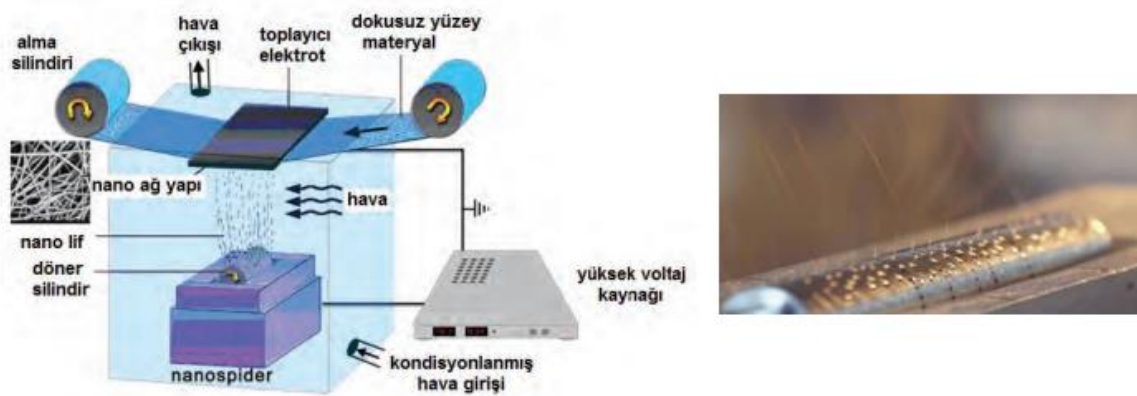


Şekil 21 (a). Damlacığın Taylor Konisi ve Lif Dağılımı



(b) Taylor Konisi Yarı-Konik Açısı

Günümüzde oldukça fazla tercih edilen elektrospinning lif çekim yönteminin gelinen noktadaki şematik gösterimi Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 22. Elektrospinning Lif Çekim Yönteminin Şematik Gösterimi.

Elektrospinning Sürecini Etkileyen Faktörler

Düzenli ve sorunsuz bir elektrospinning prosesi için Tablo 2’de belirtilen parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu parametreler sadece prosenin sorunsuz bir şekilde uygulama konmasında değil aynı zamanda elde dillecek olan nanolif karakteristik yapılarına doğrudan etki edebilecek parametrelerdir.

Tablo 2. Elektrospinning İşlemine Etki Eden Parametreler.

Polimer Özellikleri	Çözelti Özellikleri	Diğer Özellikler
*Moleküler Ağırlık	*Viskozite	*Substrat Özellikleri
*Moleküler Ağırlık Dağılımı	*Viskoelastisite	*Çözelti Akış Hızı
*Camsı Geçiş Sıcaklığı	*Konsantrasyon	*Elektrik Alan Şiddeti
*Çözünürlük	*Yüzey Gerilimi	*Elektrot Geometrisi
	*Elektriksel İletkenlik	*Çözücü Buhar Basıncı
		*Bağıl Nem

Elektrospinning sürecinin temel amaçları genel olarak;

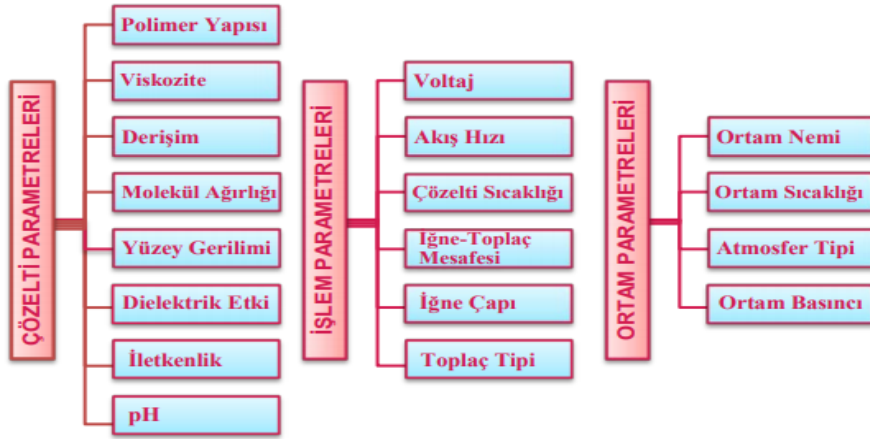
- * Mono filament şeklinde nanolifler toplanması,
- * Birbirleriyle uyumlu ve kontrol edilebilir lif çapları,
- * Lif yüzeyinde oluşacak hatasız yapı ya da kontrol edilebilir durumlar, şeklinde özetlenebilir (Kozanaoğlu, 2006).

Kontrollü bir elektrospinning süreci ile belirtilen genel hedeflere ulaşmak mümkün olabilmektedir. Elektrospinning yöntemi, düşük maliyetli ve kolay uygulanabilir bir nanolif üretim tekniği olarak avantajlı

olmasına karşın, sürece etki eden pek çok parametre bulunduğundan kontrol edilebilirliği oldukça güç bir süreçtir (Cengiz et al. 2006).

Parametrelerin iyi anlaşılması ve doğru analiz edilmesi sayesinde kontrollü bir elektrospinning süreci gerçekleştirmek ve farklı yapılarda düzgün, ultra ince lifler elde etmek mümkün olacaktır. Parametreleri çeşitlendirerek farklı morfolojilerde nanolifli yüzeylerin elde edilebilmesi de mümkün olabilmektedir (Ramakrishna et al. 2005).

Elektrospinning sürecini etkileyen faktörlerin, nanolif çapı ve yüzey morfolojisine etkilerinin incelenmesi, süreçle ilgili literatürde en çok ilgi çeken konulardan biri olmuş, bu konuda oldukça fazla sayıda çalışmalar yapılmış ve bu faktörlerin farklı şekillerde sınıflandırıldığı görülmüştür. Genel olarak, elektrospinning sürecini etkileyen faktörler Şekil 23 gibi sınıflandırılabilir:

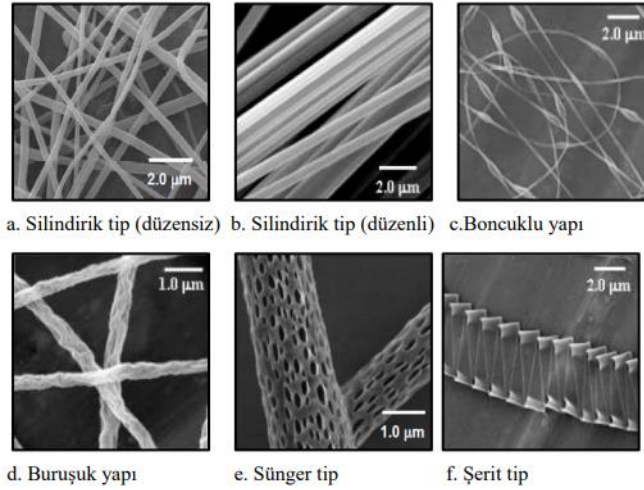


Şekil 23. Elektrospinning Yöntemini Etkileyen Faktörler Tablosu.

Çözelti Parametreleri:

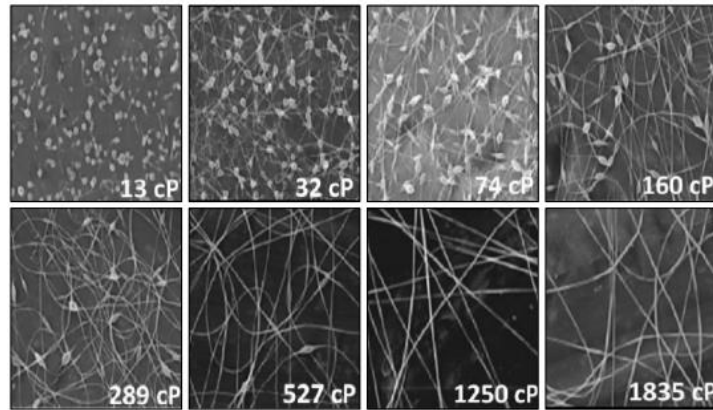
Elektrospinning sürecini ve elde edilen nanolif yüzey morfolojisini doğrudan etkileyen faktörlerin en başında polimer çözeltisinin özellikleri gelmektedir. Polimer çözeltinin yüzey gerilimi, viskozitesi ve elektriksel özellikleri gibi genel özellikleri nanolif yüzeyde karşılaşılabilecek yaygın sorunlardan biri olan boncuk oluşumunun ve lif formasyonu ve çaplarının kontrol edilmesinde önemli bir etkiye sahiptir (Üstündağ, 2009).

a- Polimer Yapısı: Farklı polimer çözeltileri kullanılarak birbirlerinden oldukça farklı niteliklere sahip nanolif yüzeyler elde edilebilmektedir. Farklı polimerler kullanılarak elde edilmiş nanolifler, dallanmış, düz veya eğik şeritler halinde, gözenekli veya buruşuk tiplerde (Şekil 24) olabilmektedir.



Şekil 24. Elektrosinning Yöntemiyle Elde Edilmiş Polimer Yapısına Bağlı Farklı Lifler

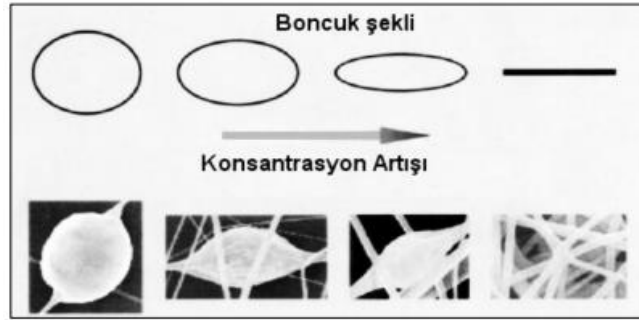
b- Viskozite: Elde edilen polimer çözeltisinin akışkanlığa karşı gösterdiği direnç polimerin viskozitesini oluşturmaktadır. Elektrosinning işleminde kullanılan çözeltinin nanolif meydana getirmesi için belli değerler arasında olması gerekmektedir. Polimer çözelti viskozitesinin çok yüksek olması, damlacık üzerindeki elektrostatik kuvvetlerin yüzey gerilimini yenememesine ve polimer jetin oluşamamasına neden olur. Çünkü viskozite yüksekliği, polimerin şırıngadan pompalanmasını güçleştirir ve şırınga ucunda damla oluşabildiğinde ise çözücü buharlaşır. Bu durum şırınga ucunda kurumalara ve tıkanmalara neden olmaya başlar. Viskozite değişimine bağlı olarak elde edilen liflere ait SEM görüntüleri Şekil 25'te verilmiştir.



Şekil 25. Viskozite Değişiminin Nanofiber Morfolojisine Etkisini Gösteren SEM Görüntüleri.

Polimer çözelti viskozitesinin düşük olması halinde, elektrosinning prosesinde polimer jet üzerinde yüzey gerilimi kuvvetlerinin baskın etkisi olur ve zincir karmaşıklığı düşük düzeyde kalır. Bu nedenle sürekli bir jetin oluşumu gerçekleşemez veya sık boncuk oluşumları görülebilir. Viskozitedeki artışla birlikte polimer jetin zincir karmaşıklığı artarak, elektrosinning sürecinde sürekli jet oluşumu gerçekleşmiş olur.

c- Derişim: Elektrosinning işleminde, nanolif yapısının oluşumu için en optimum çözelti derişimin sağlanması gerekmektedir. Çözelti derişiminin düşük olduğu hallerde liflerin boncuklarla birlikte oluşabilmektedir. Çözelti derişiminin artırılması ile beraber boncukların şekli küresel formdan uzaklaşarak lif formuna dönüşmesi sağlanır. Bununla beraber derişim artışı, yüksek viskoziteye neden olacağından lif çaplarında da artışlar Şekil 26'de gösterildiği gibi oluşması beklenmektedir (Bhardwaj et al., 2011).



Şekil 26. Çözelti Derişimindeki Artışla Boncuk Şekli Arasındaki ilişki.

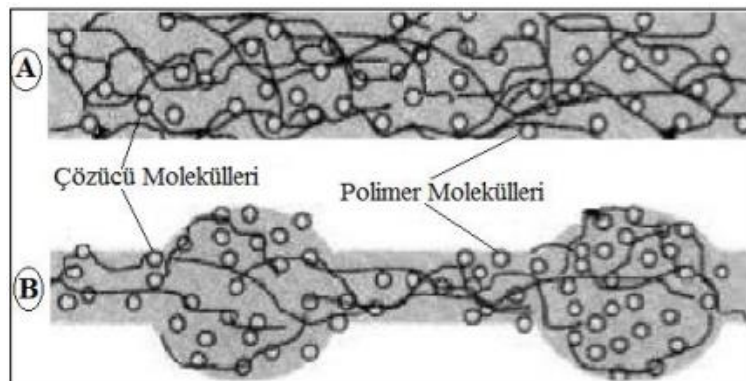
Daha yüksek derişimlerde ise, iğne ucundaki çözelti akış sağlanamayarak uçta kurumalar ve tıkanmalara neden olur ki bu durumda lifler oluşmaz veya oluşabilecek liflerde devamlılık sağlayamazlar (Bhardwaj et al., 2011).

d- Molekül Ağırlığı: Moleküler ağırlık değeri, çözeltinin viskozitesini etkileyen temel parametrelerden biridir. Aynı polimerin farklı molekül ağırlıklarına sahip iki farklı numunesi alınarak, aynı çözücüde çözeltisi hazırlandığında genellikle molekül ağırlığı büyük olan numunenin oluşturduğu çözeltinin viskozitesi daha yüksek olur. Elektrosinning işleminin gerçekleşmesi için çözeltinin uygun viskoziteye ve molekül ağırlığına sahip olması gerekmektedir (Gürcan, 2016).

Polimerin yapısının molekül ağırlığı, oluşacak polimer zincir uzunluğunun göstergesidir. Polimer çözeltisinin şırınga ucundan toplayıcı plakaya yönelme süresince, jetin dağılmasını engelleyen ve devamlılığı sağlayan, molekül zincirlerinin birbirine dolanmasından kaynaklıdır. Bundan dolayı küçük polimer zincirleri elektrolif oluşturmaya yatkın değillerdir. Genelde düşük molekül ağırlığına sahip polimer çözeltilerinin boncuklu lif yapılarına, yüksek molekül ağırlığına sahip polimerler çözeltilerinin ise büyük lif çaplarına sebep oldukları söylenebilmektedir (Özkoç, 2010).

e- Yüzey Gerilimi: Elektrosinning sürecinin başlayabilmesi, polimer çözeltisi üzerindeki elektriksel yüklerin, çözeltinin yüzey gerilimini aşması ile meydana gelmektedir. Yüzey gerilimi, bir sıvının birim kütledeki yüzey alanını azaltma etkisine sahiptir. Ayrıca yüzey gerilimi, elektrosinning işlemini oldukça zorlaştıran bir etmendir.

Yüzey gerilimi kaynaklı olarak çözelti içerisindeki çözücü moleküllerinin oranı arttığında, çözücü moleküllerinin toplanarak küresel bir form alma eğilimi daha da artacaktır. Bundan dolayı, polimer jeti metal toplaca doğru ilerlerken yüzey gerilimi etkisiyle çözücü molekülleri boncukların oluşmasına neden olabilecektir. Polimer çözeltisinde çözücü oranının azalması yüksek viskoziteyle birlikte, çözücü ve polimer molekülleri arasında daha fazla etkileşim anlamına gelmektedir. Böylece yüklerin etkisi ile çözelti gerildiğinde çözücü molekülleri, karmaşık polimer moleküllerine yayılmaya yönelecek (Şekil 27) ve bu şekilde yüzey geriliminin etkisi altında çözücü moleküllerinin bir araya toplanma eğilimi azalacaktır (Ramakrishna et al., 2005).



Şekil 27. Yüksek (A) ve Düşük (B) Viskozitede Yüzey Geriliminin Çözücü Moleküllü.

f- Dielektrik Etki: Çözücünün dielektrik sabiti elektrospinningi işleminde önemli bir etkiyi sahiptir. Genel manada dielektrik özelliği yüksek olan bir polimer çözeltilisinden elde edilen liflerin, boncuklu yapısı daha az ve çapı küçüktür. Dielektrik özelliğini artırmak ve lif morfolojisini geliştirmek için bir polimer çözelti içerisine N,N-dimetilformamid (DMF) gibi çözücüler ilave edilebilir. Polimer, jetin yüksek dielektrik değerine sahip olmasıyla birlikte, jetin esneklik kararsızlığı da artarak, liflerin birikme alanının artmasını sağlar. Buna bağlı olarak jetin izlediği yol artmış olacağından bu durum lif çapını azaltmaya yönelik bir imkân da sağlayabilir (Yener, 2010).

g- Çözelti İletkenliği: Elektrospinningi yönteminde lif çapını etkileyen önemli polimer çözeltisi özelliklerinden birisi de çözelti iletkenliktir. İletkenlik olarak çözelti, elektrik akımı taşıma kabiliyeti olarak da tanımlanabilir. Polimer çözeltisinin elektrolif olarak çekilebilmesi için belli bir iletkenlik değerine sahip olması gerekmektedir. Polimer jetin oluşması için yüzeyde yüklerin akması ile beraber çözeltinin uzaması gerçekleşmelidir. Çözeltiye bir miktar tuz veya iyon ilave edilerek çözeltinin iletkenliği artırılmaktadır. Böylelikle jet üzerinde daha fazla yük taşınabileceğinden, artan yükler sayesinde çözelti daha fazla uzayacaktır. Böylelikle boncuklu yapı oluşumu önlenerek, daha düzgün lif yapısı elde edilmiş olunur. Polimer jetinin uzaması aynı zamanda da daha küçük çaplarda liflerin oluşmasına neden olur (Kozanaoğlu, 2006).

h- pH: Elektrospinning sisteminde kullanılan polimer çözeltisinin pH'ı, bir anlamda elektrik iletkenliği hakkında da bilgi verir. Ph değerinin değişmesiyle iletkenliğin de değişmektedir. Ph artışı sonucu çözeltinin bazik duruma gelmesiyle liflerin daha homojen ve ince bir hal aldıkları ancak asidik ortamda boncuklu yapıların oluştuğu hakkında bazı araştırmalar mevcut değildir (Üstündağ, 2009). Bu durumun, asidik ortamda polimerin proton fazlalığından kaynaklandığı açıklanmıştır (Kozanaoğlu, 2006).

İşlem parametreleri:

a-Voltaj: Elektrospinning sürecinin en temel parametresi, polimer çözeltilisine yüksek voltaj uygulanmasından oluşmaktadır. Uygulanan yüksek gerilim ile çözelti üzerinde toplaman elektriksel yük miktarını artırarak, çözeltinin topraklanmış bir toplayıcıya doğru ince bir jet şeklinde ilerlemesini sağlayan elektrostatik kuvvetleri meydana getirmektedir. Çözeltideki elektromanyetik kuvvetlerin, çözeltinin yüzey gerilimi kuvvetlerini yenmesi ile birlikte de elektrospinning işlem süreci başlatılır (Üstündağ, 2009).

Meydana gelen elektrik alanının yoğunluğu artırıldığında, iğne ucundaki yarı küresel sıvı yüzeyi toplayıcıya doğru esnemeye başlar. Böylece Taylor konisi oluşmuş olur. Koni üzerindeki elektromanyetik itme kuvvetleri yüzey alanını aştığında polimer jeti iğne ucundan toplaca doğru yönelmeye devam eder. Uç ve toplayıcı mesafesi boyunca esner, içerisindeki çözücü buharlaşır ve metal toplayıcı üzerinde bir nonwoven (dokuma ve örgü olmayan) kumaş yüzeyi oluşumu gerçekleştirilmiş olunur. Uygulanan voltaj elektrospinning jet üzerinde birikmelerin oluşmasını sağlar (Sirin, 2013).

Bazı hallerde çok yüksek voltajla beraber, jetin ilgili yapıdan küresel yapıya dönerek liflerde boncuk yapı oluşturduğu gözlenmiştir. Uygulanan voltaj, liflerin düzenli bir şekilde dizilebilmelerini, fiziksel görünüşlerini ve kristal yapılarını da etkilemektedir. Ancak polimer moleküllerinin düzenli bir şekilde dizilebilmeleri için uç ve toplayıcı arasındaki mesafede belirli bir süreye ihtiyaç vardır. Gerilim arttırılırsa bu süre kısılacağı için kristalleşme için gerekli süre olmayacak ve boncuk yapılar meydana gelecektir. Bundan dolayı uygulanacak voltaj en uygun kritik değerler arasında olmalı, çok yüksek ya da çok düşük uygulanmamalıdır (Ramakrishna et al., 2005).

b- Çözelti Akış Hızı: Çözelti akış hızı, elektrospinning işlemi için kullanılacak polimer çözeltisinin miktarı olarak ifade edilir. Çözelti akış hızı arttırıldığında şırınga ucundan transfer edilen çözelti miktarı artacağından boncuk büyüklüklerinde ve lif çaplarında artışlar beklenmektedir. Elektrospinning için en uygun kritik çözelti

akış hızı Taylor konisinin kararlı olduğu akış hızı olarak tarif edilir. Akış hızı bu kritik değeri geçtiğinde lif çapı ve boncuk oluşumu da mümkün mertebe artmaktadır.

Şırınga ucundan çekilen çözelti miktarının fazlalığına bağlı olarak jetin kuruması için gerekli olan zaman da artar. Böylece aynı transfer süresinde toplayıcıda biriken lifler içindeki çözücü buharlaşmak için gerekli süreyi bulamaz. Biriken lifler içerisinde buharlaşmadan kalan çözücü, toplaç üzerinde toplandıktan sonra buharlaşacağından liflerin birbirlerine değdiği bölgelerde kaynaşmalar ve yapışmalar meydana getirir. Bundan dolayı çözelti akış hızı, jet içerisindeki çözücünün buharlaşmak için ihtiyaç duyduğu zamanı sağlayabilecek derecede düşük olması gerekmektedir (Üstündağ, 2009).

c- Çözelti Sıcaklığı: Çözelti yüksek sıcaklığı, viskozitenin azalmasını sağlarken, elektrospinning işlemi esnasında da buharlaşma hızını arttırmasına neden olur. Çözelti sıcaklığının artmasıyla beraber viskozitesi düşeceğinden, jet üzerindeki coulomb kuvvetleri daha fazla gerilmeye neden olarak daha homojen ve ince yapıda liflerin oluşması sağlanmış olunur. Yükselen sıcaklık, polimer moleküllerinin hareketliliğinin artmasına ve sonuçta coulomb kuvvetlerinin etkisi ile çözeltinin gerilimini arttırmasına sebep verir. Buna ek olarak, çözelti sıcaklığının artması ile polimer moleküllerinin hareketliliği arttığından coulomb kuvvetlerinin çözelti jetine etkisi fazla olmaktadır (Ramakrishna et al., 2005).

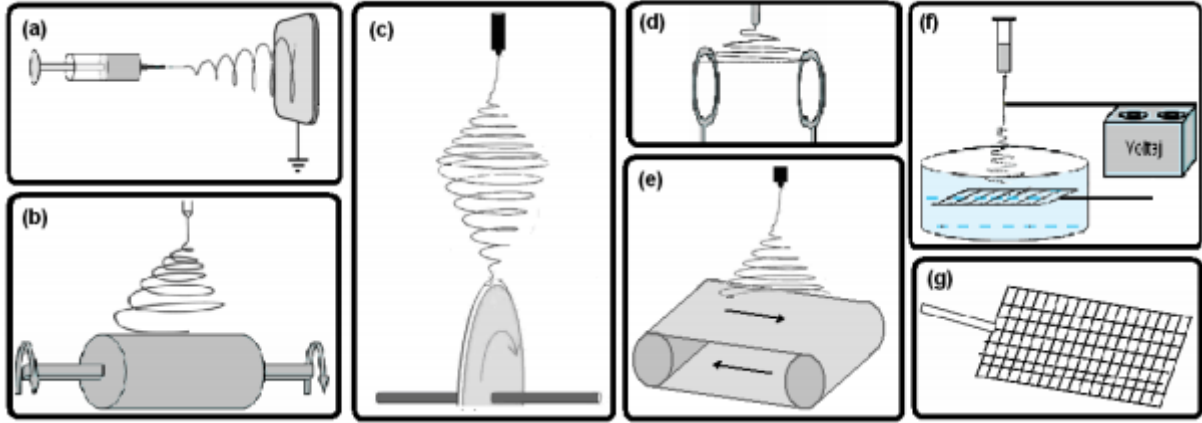
d- İğne-Toplayıcı Arası Mesafe: Elektrospinning işleminde elektriksel alan kuvveti kadar etkili olan başka bir faktör çözeltinin uçuş süresidir. Şırınga ucu ve toplayıcı arasındaki mesafe değişiminin, elektriksel alan kuvvetinin değerini ve polimer jetin uçuş süresi üzerinde doğrudan etkisi olmaktadır. Birbirinden bağımsız lifler oluşturmak için elektrospinning yönteminde çözücünün uçarak ayrılması için zamana ihtiyaç vardır. İğne ucuyla toplayıcı arasındaki mesafe yaklaştıkça, artacak elektriksel alan kuvveti ile birlikte jetin toplayıcıya doğru ivmelenmesi sağlanmış olunur. Ancak jetin uçuş yolu kısaldığından jet lif oluşumu için içerisindeki çözücünün buharlaşması için gereken yeterli zamanı olmayacaktır. Böylece toplaç üzerinde biriken liflerin birbirleriyle kaynaşmaları veya boncuklu lif yapısı gözlemlenecektir (Aytan, 2016).

Boncuklu iğne ucu ve toplaç arasındaki elektriksel alan kuvvetinin yükseltilmesi sonucu da oluşabilir. Mesafeyi daraltmak uygulanan voltajı arttırmakla aynı etkiyi gösterir. Başka bir durumda mesafeyi arttırmak, ortalama lif çapının düşmesine neden olmaktadır. Uç ve toplayıcı arası mesafenin yükselmesi, çözeltinin uzayarak toplaca ulaşmadan önce çözücünün uçmak için daha uzun bir zamana sahip olmasını ifade eder. Ancak bazı durumlarda mesafenin artmasıyla birlikte lif çapı artışları da gözlenebilir. Bu, elektrik alan kuvvetinin azalmasının lifin daha az uzamasına neden olmasından kaynaklandığının göstergesi olabilmektedir. Mesafe çok fazla olduğu zaman toplayıcıda lif oluşumu gerçekleşmez (Kozanaoğlu, 2006).

e- İğne Çapı: Nanolif yüzeyin toplandığı alanın beslediği iğne veya kılcal borunun iç çapı elektrospinning işleminde nanolif niteliği açısından son derece önemlidir. Çaptaki küçülme arttıkça üretilen nanoliflerin çapında da azalmalar gözlenmektedir. İğnenin ucunda oluşan damlacığın boyutu küçüldükçe damlacıktaki yüzey gerilimi de artmaktadır. Uygulanan voltaj miktarı aynı düzeyde tutulduğunda jetin başlayabilmesi için daha fazla elektrostatik itme kuvveti gerekmektedir. Nihayetinde jetin hızlanması azalır ve nanoliflerin toplayıcı üzerinde birikmesinden önce gerilmesi ve uzaması için daha fazla zaman sağlanmış olur. Sistemde iğne ve kılcal boru iç çapı daha fazla küçültüldüğü takdirde polimer çözeltisinin püskürtülmesi gittikçe zorlaşacağından uçta tıkanmalar ve boncuk oluşumları daha sık gözlemlenir (Ramakrishna et al., 2005).

f- Toplayıcı Tipi: Elektrospinning işleminin başlayabilmesi için öncelikle topraklanmış toplayıcı ve şırınga/pipet arasında elektriksel bir alan oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle toplayıcı olarak değişik iletken bir materyal kullanılır ve bu materyal de elektriksel olarak topraklanabilir. Toplayıcı olarak iletken olmayan bir malzemenin kullanılması durumunda, jet üzerindeki yükler, toplayıcı üzerinde çok hızlı birikir ve böylece daha az lif toplanmış olur.

Toplayıcı malzeme üzerine düşen lifler, toplayıcının şeklini almaktadır. Farklı düzeneklerden elde edilen nanoliflerin özellikleri de birbirinden farklıdır. Sabit plaka üzerinde toplanan nanolifler, birbiri üzerinde rastgele konumlanır. Rastgele konumlanma durumu, elektrospinning yöntemi ile elde edilen nanolifli yüzeyin kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Nanoliflerin potansiyel kullanım alanlarını artırmak için, nanoliflerin kontrollü konumlanması ve belirli bir düzende hizalanması, farklı toplayıcı tipleri kullanılarak oluşturulmaya çalışılmaktadır. Bu nedenle dönen tambur veya disk, taşıyıcı bant gibi hareketli toplayıcılar kullanılabilirken, paralel bilezik veya çerçeveler gibi sabit toplayıcı malzemeler de kullanılabilir (Şekil 28). Hareketli toplayıcıların dönüş hızları da oluşan liflerin hizalanmasında önemli etkiye sahip olacaktır (Ramakrishna et al., 2005).



Şekil 28. Elektrospinning Yönteminde Kullanılan Bazı Toplayıcı Tipleri (a) Sabit Plaka; (b) Dönen Tambur; (c) Dönen Disk; (d) Paralel Bilezikler; (e) Taşıyıcı Bant; (f) Sıvı Banyo; (g) Metal Izgara.

Çevre Parametreleri:

Sıcaklık seviyesi arttıkça çözücünün buharlaşma hızı da artmaktadır. Buna ek olarak viskozitenin azalmasına ve çözünürlüğün artması sağlanmış olur. Tüm bunlar, polimer jetinin esnemesine yardımcı olur ve daha düzgün dağılımlı nanolif yapıları elde edilir. Nem oranı yüksek bir ortamda elektrospinning işlemi gerçekleştirildiğinde, nanolifler üzerinde su molekülleri birikmiş olacağından gözenekli yapıda nanolif yüzeyleri meydana gelmektedir. Nem miktarının artması, oluşan gözeneklerin boyutunun ve derinliğinin artmasına neden olmaktadır. Buna ek olarak ortamın nemi, nanolifler üzerinden çözücünün buharlaşma hızını da yavaşlatmaktadır. Nem olmayan ortamlarda çözücünün buharlaşması, daha hızlı olmaktadır (Sevimli, 2011).

Elektrospinning işleminin gerçekleştiği ortamdaki havanın bileşimi de oldukça önemlidir. Çünkü birtakım gazlar yüksek elektrik alanı altında farklı davranışlar sergileyebilmektedirler. Helyum gazı buna bir örnektir. Elektrik alana maruz kaldığında bozulur ve elektro çekimi engellemektedir. Ortamdaki basınç miktarının azalması genellikle elektrospinning üzerinde olumlu bir etki oluşturmaz. Elektrospinning işlemi, atmosfer basıncından daha düşük bir basınç altında gerçekleştirildiğinde, iğne ucunda çözelti çabucak köpürür, şırıngadaki çözeltinin dışarı akma eğilimi daha fazla olur ve bu durum dengesiz bir jet başlangıcına neden olur. Çok düşük basınçta, elektriksel yüklerin direkt boşalmasına bağlı olarak elektrospinning oluşması gözlenmez (Üstündağ, 2009).

SONUÇ

Nanofiber üretiminde en fazla tercih edilen “Elektrospinning” tekniği, fiber çaplarının nano boyutta olmasında en etkili, basit ve çok yönlü bir tekniktir. Elektrospinning yöntemi ile elde edilen membranlar enerji, çevre, sanayi alanlarında önemli bir gelişme göstererek oldukça geniş kullanım yerleri edinmiştir. Bu membran teknolojileri uygulamalarındaki hedef, membran yapısı üzerinde bir çözelti karışımı halinde bulunan bazı bileşen yapıların ayrışmasına izin verilirken, bazılarının ise yakalanmasını sağlamaktır.

Membran yapıları genel olarak süzme yapabilecek şekilde seçme olayının ve taşınımın meydana geldiği yarı geçirgen zarımsı tabaka da ifade edilebilir. Arıtma ve ayırıştırma prosesi, membran yapısının hem fiziksel hem de kimyasal karakteristiklerine bağlı olmakla beraber uygulanan elektriksel potansiyel, basınç ve sıcaklık farkı gibi birçok sürücü kuvvet yardımı ile gerçekleşir. Membran yapılarında ayırma prosesi gözenek yapıya sahip membranlar için boyut, şekil ve yük ayırışımına göre kontrol edilirken gözenek olmayan membranlar için ise difüzyon ve sorpsiyon şekline göre kontrol edilmektedir. Buna ek olarak membranlarda performans özellikleri, akı ve seçicilik karakteristiklerine göre sınıflandırılır.

Elektrospinning membran üretimindeki temel hedef, yeterli seviyede mekanik kuvvet barındıran ve yüksek seçicilik kapasitesi sergileyerek süzme yapabilen bir malzeme ortaya koymaktır. Membran yapılarında geçirgenlik kavramı, yapıdaki gözenekli yoğun bölgelerin atması ile doğru orantılıdır. Böyle özellikteki membran malzemesi için Porozite terimi kullanılmaktadır. Üretilen membran malzemelerinde direnç, membran malzemesinin kalınlığıyla doğrudan bağlantılıdır. Membran malzemesinde seçici olma özelliği, yapıda bulunan yüksek çap değerine sahip gözenekli boyutların yoğunluğu ile ters orantılıdır. Sıradan özellikte bir membran malzemesi için kabul edilebilir seviyedeki fiziksel yapı, son derece küçük gözenekli boyutlu ve oldukça yüksek seviyelerde porozite değerine malzeme kalınlığı barındırmalıdır.

Açıklama:

Yapılan bu çalışma, 2019 /1-21 D proje numarası ile Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından ve 100/2000 YÖK DOKTORA araştırmacı bursu ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Acarer, S. (2020). Polimerik Nanokompozit Membran Üretimi ve Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi. Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul 10s.
- Arı, H. (2009). Türkiye’de İçme Suyu Amaçlı Büyük Kapasiteli Membran Sistemlerinin Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 24s.
- Aslan, M. (2016). Membran Teknolojileri. ISBN: 978-605-9351-02-7: Türkiye Çevre Koruma Vakfı Yayınları. Ankara. 69s.
- Bhardwaj N., Kundu, S. C. (2011). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances Sci.* 28(1): 325-347s. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>
- Bilek, P., & Hruza, J. (2014). Influence of structure uniformity of nanofibrous filters on their homogeneity of filtration efficiency. *Nanocon*, 5, 1-10s.
- Blackmer, H. R., & Hendman, J. E. (1978). Membrane Oxygen Enricher Apparatus. USA:Patent. No:US4174955A.
- Can, A. O. (2019). Manyatik Nano Parçacık Katkılı Kompozit Membranların Eldesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi: Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi. Fen bilimleri Enstitüsü. Konya. 5s.
- Cansız, S. (2017). Karbonnanotüp Katkılı Polimerik Membranların İçmesuyu Arıtımında Kullanılması. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 24s.
- Chaharmahali, A. (2012). The Effect of TiO₂ Nanoparticles On The Surface Chemistry Structure and Fouling Performance of Polymeric Membranes. Phd Thesis: The University of New South Wales. School of Chemical Engineering.Sydney, Australia. 44.
- Chen, H., Huang, M., Liu, Y., Meng, L., & Ma, M. (2020). Functionalized electrospun nanofiber membranes for water treatment:Review, *Science of the Total Environment*, 739(2020), 139944. <https://doi.org/10.3390/ma14030558>
- Chun, I. (2005). Finer Fibers Spun By Electrospinning Process From Polymer Solutions and Polymer Melts in Air and Vacuum: Characterization of Structure and Morphology on Electrospun Fibers and Developing a New Process Model, PhD Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron.

- Cui, J., Li, F., Wang, Y., Zhang, Q., Ma, W., & Huang, C. (2020). Electrospun nanofiber membranes for wastewater treatment applications. *Separation and Purification Technology*, 250, 117116. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117116>
- Çakmakçı, M. (2012). Membran Uygulamaları Ders Notları. Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul. 7s.
- Çakmakçı, M., Başpınar, A. B., Balaban, U., Uyak, V., Koyuncu, İ., & Kınacı, C. (2009). Comparison of Nanofiltration And Adsorption Techniques to Remove Arsenic From Drinking Water. , *Desalination*, 9(1): 149-154s. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.765>
- Çallıoğlu, F. C., Jirsak, O., & Dayık, M. (2013), Investigation into the relationships between independent and dependent parameters in roller electrospinning of polyurethane, *Textile Research Journal*, 83(7), 718-729 s. <https://doi.org/10.1177/0040517512447587>
- Çevik, N. (2006). Tekstil Boyar Maddelerinin Membran Filtre Uygulaması İle Giderimi. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bursa. 31s..
- Desai, K. (2004). Electrospinning and Phase Characterization of Polyaniline/Poly Methymethacrylate Blends, MSc Thesis, The Faculty Of The Department Of Chemical and Nuclear Engineering University Of Massachusetts Lowell ISBN978-0-496-26418-6.
- Dhaouadi, H., & Marrot, B. (2008). “Olive Mill Wastewater Treatment in a Membrane Bioreactor: Process Feasibility and Performances”. *Chemical Engineering Journal*, 145(2), 225-231s. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.04.017>
- Drioli, E., & Giorno, L. (2016). Encyclopedia of Membranes. *Springer*. 47(2): 556-567s. .
- Fane, A. T., Wang, R., & Jia, Y. (2011). Membrane Technology: Past, Present and Future. *Membrane and Desalination Technologies*.(13) 1-45s. https://doi.org/10.1007/978-1-59745-278-6_1
- Garner, B. D., & Mahler, J. (1978). Relation of Specific Conductance in Ground Water to Intersection of Flow Paths by Wells, and Associated Major Ion and Nitrate Geochemistry. Barton Springs Segment of the Edwards Aquifer, 5002: 39s. https://digitalcommons.usf.edu/kip_data/113
- Güçlü, S. (2012). İki Farklı Polimerden Simultane Olarak Elektrospinning Yöntemi ile Nanolif ve Membran Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 7s.
- Gürcan, Ş. (2016). Elektro-Eğrilmiş BNNS/PMMA Nanolif Katkılı Vinilester Reçinenin Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi: Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.31s.
- Hilal, N., Al-Zoubi, H., Darwish, N. A., Mohamma, A. W., & Arabi, M. A. (2004). A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy. *Desalination*, 170(3), 281-308 s. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.01.007>
- Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G., & Brenner, M. P. (2001). Electrospinning and Electrically Forced Jets. I. Stability Theory, *Physics Of Fluids*,13-8, 2201- 2220 s. <https://doi.org/10.1063/1.1383791>
- Howell, J. A., Sanchez, V., & Field, R. W. (2012). Membranes in Bioprocessing: Theory and Applications. ISBN: 9789401121569: *Springer Science & Business Media*.
- Jia, Y. T., Gong, J., Gu, X. H., Kim, H. Y., Dong, J., & Shen, X. Y. (2007). Fabrication and characterization of poly (vinyl alcohol)/chitosan blend nanowbers produced by electrospinning method. *Carbohydrate Polymers* 67, 403–409 s. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.010>
- Juang, R., & Wany, Y. Y. (2002). Amino Acid Separation with D2EHPA by Solvent Extraction and Liquid Surfactant Membranes. *Journal of Membrane Science* 207(2), 241-252 s. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00254-5](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00254-5)
- Kataphinan, W., (2004). Electrospinning and Potential Applications, PhD Thesis, The Graduate Faculty Of The University Of Akron. ISBN978-0-496-17531-4.
- Koyuncu, İ. (2013). Nanofiltration For Water And Wastewater. ISBN:9781904455660 : Horizon Press New York. 623-645 s.

- Koyuncu, İ. (2018). Su/Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları. ISBN:978-605-9351-22-5: Türkiye Çevre Koruma Vakfı Yayınları. 1. Cilt. 67s.
- Kozanoğlu, G. (2006). Elektrospinleme Tekniğiyle Nanofiber Üretim Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi,: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kucera, J. (2015). Reverse Osmosis: Industrial Processes and Applications. ISBN: 9781119145769: Scrivener Publishing LLC. Canada. 144s.
- Kulkarni P. S, & Mahajani V. V. (2002). "Application of Liquid Emulsion Membrane (LEM) Process for Enrichment of Molybdenum from Aqueous Solutions". *Journal of Membrane Science*, 201, 123-135 s. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(01\)00720-7](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(01)00720-7)
- Lam, H. (2004). Electrospinning of Single Wall Carbon Nanotube Reinforced Aligned Fibrils and Yarns, PhD Thesis, The Faculty Of Drexel University.
- Li, K. (2008). Membrane Science and Membrane Separation Processes. South Kensington, (Lecture Notes). Imperial College London.
- Lyu, C., Zhao, P., Xie, J., Dong S., Liu J., Rao C., & Fu, J. (2021). Electrospinning of Nanofibrous Membrane and Its Applications in Air Filtration: A Review, *Nanomaterials*, 11, 1501. <https://doi.org/10.3390/nano11061501>.
- Marginean, I., Parvin, L., Heffernan, L., & Vertes, A. (2004). Flexing the Electrified Meniscus: The Birth of a Jet in Electrosprays, *Analytical Chemistry*, 76, 14, 4202-4207 s. <https://doi.org/10.1021/ac049817r>
- Mohan, A. (2002). Formation and characterization of electrospun nonwoven webs. Yüksek Lisans Tezi.: North Carolina State University, Textile Management Department. Raleigh.ABD. 47s. .
- Mohan, A., (2002). Formation and Characterization of Electrospun Nonwoven Webs, MSc Thesis, The Graduate Faculty of North Carolina State University.
- Mulder, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. 9780792342472: *Springer Science & Business Media*. The Netherlands. 623-647s.
- Naveed, S., Bhatti, I., & Ali, K. (2006). Membrane technology and its suitability for treatment of textile waste water in Pakistan. *Journal of Research (Science)*, 17(3), 155-164 s. ISSN 1021-1012
- Özkoç, Ü. (2010). Experimental Investigation of Optimal Spinning Parameters for Nanofibers. Yüksek Lisans Tezi: Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.Gaziantep.28s.
- Pabby, A. K. (2008). Handbook of Membrane Separations. Chemical, Pharmaceutical, Food, and Biotechnological Applications. ISBN:9780429128066: CRC Press. Boca Raton. 667s.
- Ramakrishna S. (2005). An Introduction to Electrospinning And Nanofibers. ISBN: 9789812564153: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore, 381 s.
- Babu B. R., Parande, A.K., Raghu S., & Prem Kumar T. P. (2007). Cotton Textile Processing: Waste Generation and Effluent Treatment. *The Journal of Cotton Science*, 11(1). 141-153 s. ISSN : 1524-3303
- Ramesh, R. (2014). Fermentation And Biochemical Engineering Handbook: Principles, . ISSN: 9781455730469: Noyes/William Andrew Publication. 3.Cilt. USA. 271-279 s.
- Rangkupan, R. (2002). Electrospinning Process of Polymer Melts, PhD Thesis, The Graduate Faculty Of The University Of Akron.
- Reneker, D. H., Yarin, A. L., Koombhongse, S., & Fong, H. (2000). Bending instability of electrical charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning., *Journal of Applied Physics*, 87-9 ,4531-4547 s. <https://doi.org/10.1063/1.373532>
- Sanders E. H. (2005). Electrostatic Processing of Polymers and Polymer Composites, PhD Thesis, Virginia Commonwealth University.
- Schoeman, J., & Steyn, A. (2003). Nitrate Removal with Reverse Osmosis in a Rural Area in South Africa. *Desalination*, 155: 15-26 s. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00235-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00235-2)

- Sert, G. (2015). Membran Biyoreaktör (MBR) Prosesi ile Arıtılan Endüstriyel Atık Suların Yeniden Kullanımı İçin Membran Teknolojilerin Uygulanması. Doktora Tezi: Ege Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İzmir. 22s.
- Sevimli, E. (2011). Elektrosinleme Yöntemiyle Alümina Destekli Nikel Borosilikat Nanofiberlerin Üretimi. Yüksek Lisans Tezi: Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 37s.
- Sirin, Ş., Çetiner S., & Saraç A.S. (2013). Elektro Çekim Yoluyla Polimer Nanolifler: Nanolif Kalitesini Etkileyen Faktörler, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 1-12.
- Sutherland, K. (2008). *Filters and Filtration Handbook*. Elsevier. Oxford. p. 523. ISBN 978-1-8561-7464-0
- Üstündağ, G. (2009). Elektrosinleme Yöntemi ile Biyomedikal Kullanıma Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi Ve Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi: Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. 1 (14) :159-172s.
- Verweij, H. (2012). *Inorganic Membranes. Current Opinion in Chemical Engineering*. 1(2):156-162s.
- Wagner, J. (2001). *Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints*. ISBN: 9785462579: Chem. Eng Second Edition.USA. 244s.
- Yalçın, H. (2014). Santrifüj Eğirme Sistemi ile Üretilen Liflerle Yapılan Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi: İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul. 20s.
- Yarin, A.L., Koombhongse, S., & Reneker, D. H. (2001). Taylor cone and jetting from liquid droplets in electrospinning of nanofibers , *Journal of Applied Physics*, 90-9, 4837-4846 s. <https://doi.org/10.1063/1.1408260>
- Yener, F. (2010). Klasik ve İğnesiz Elektrosinleme Yöntemleriyle Elde Edilen Nano Liflerin Kıyaslanması ve Bu Yöntemlerdeki Sistem Parametrelerinin Lif Üzerindeki Etkileri. Yüksek Lisans Tezi: Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. , Kahramanmaraş.
- Yuan, L. M., Zhang, C. Y., Zhang, Y. Q., Ding, Y., & Xi, D. L. (2007). “Biological Nutrient Removal using an Alternating of Anoxic and Anaerobic Membrane Bioreactor (AAAM) Process”. *Desalination*, 221(1-3), 566-575, 2008 s. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.118>
- Zaidi, A., Simms, K. & Kok, S. (1992). The use of micro/ultrafiltration for the removal of oil and suspended solids from oilfield brines. *Water Science and Technology*, 25(10), 163-176 s. <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0245>