

Tekstil Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar

Editor
HÜSNÜ AYDEMİR
MÜSLÜM EROL

BİDGE Yayınları

Tekstil Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar

Editörler: Dr. Öğr. Üyesi Hüsnu AYDEMİR & Dr. Öğr. Üyesi
Müslüm EROL

ISBN: 978-625-372-339-2

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 14.12.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Endüstri ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak pek çok sektörde olduğu gibi Tekstil sektöründe de üretilen malzemeler farklılaşmaktadır. Sürdürülebilir ve yenilikçi yaklaşımların ön planda tutulduğu son derece dinamik bir süreç ile karşı karşıya bulunmaktayız. “Tekstil Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar” adlı kitabımızda atık malzemelerin kullanımıyla katma değeri yüksek, kompozit ürünlere dönüştürülerek ekonomiye kazandırılması, akustik ve termal gibi yalıtım alanlarında kullanımı, yenilikçi arojel ve teknik tekstillerin üretimi gibi güncel konularda yapılan araştırmaları ve sonuçlarını okuyucu ile buluşturmayı amaçlamaktayız. Özellikle sürdürülebilirlik kapsamında değerlendirilebilecek bu konular mühendislik açısından büyük önem arz etmektedir.

Çalışmamızın mühendislik alanına yapacağı katkının önemli olacağı ve yeni çalışmalara ışık tutacağı kanısındayız. “Tekstil Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar” adlı eserimizin hazırlanması sürecinde emeği geçen bölüm yazarlarına ve “BİDGE” yayınevi çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

Editörler

Dr. Öğr. Üyesi Hüsnu AYDEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Müslüm EROL

İçindekiler

ÖNSÖZ	3
Ceviz Kabuğu Tozu İçerikli Epoksi Kompozitlerin Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi	5
Hüsnü AYDEMİR.....	5
Hindi Tüylerinin Fiziksel Yapısı, Özellikleri, Yıkama ve Dezenfeksiyon İşlemleri	29
Müslüm EROL	29
Aerojel İçerikli Tekstil Yüzeylerinin Akustik Özelliklerinin İncelenmesi	53
Süreyya KOCATEPE	53
Comparative Analysis of Essential Oils, Fixed Oils, and Plant Extracts in Electrospun Nanofiber Production: A Comprehensive Review	82
Ayşe ÖZKAL.....	82

BÖLÜM I

Ceviz Kabuğu Tozu İçerikli Epoksi Kompozitlerin Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

Hüsnü AYDEMİR¹

Giriş

Kompozit malzemeler, iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip yeni bir malzeme elde etmek için iki veya daha fazla farklı malzemenin fiziksel ve kimyasal olarak karıştırılmasıyla elde edilen malzemelerdir. Kompozitler, hafiflik, sertlik, eğilme mukavemeti ve düşük termal genleşme katsayısı gibi birçok özellik ve avantaja sahiptir ve bunları birçok karmaşık ve gelişmiş uygulamada kullanıma uygun hale getirir. Kompozit malzeme iki ana parçadan oluşur: malzemeleri (metal, seramik ve polimer) içeren matris malzemesi ve gerekli uygulamaya bağlı olarak elyaf, toz, pul, parçacık veya dolgu maddesi olabilen çeşitli şekillerdeki takviye

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Bingöl/Türkiye, ORCID: 0000-0001-8772-2257, husnuaydemir@gmail.com

malzemeleridir. Takviye malzemesi, aralarında güçlü bir bağ oluşturması koşuluyla matris malzemesinin dayanıklılığı, sertliği ve tokluğu gibi mekanik özelliklerini iyileştirir.

Epoksi reğinesi, yüksek performanslı, işlenmesi kolay bir polimer olup, termoset özelliktedir. 1-3 molekül başına en az iki epoksi grubu iğerir. Mükemmel yapışkanlık özellikleri nedeniyle, reaktif epoksi halkalar çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Sertlik, kimyasal direnç, boyutsal kararlılık, özgül direnç ve sertleşmeden önceki büyük akışkanlık bu kolay işlemleri sağlar. Ancak, işlem yöntemi sertleştiricinin ve reğinenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde kalıcı değişikliklere neden olur. Son aşamasında çapraz bağlı polimerin oluşturulması nedeniyle, ortaya çıkan epoksi reğinesi genellikle kararsızdır, çatlakların yayılmasına karşı çok az dirence sahiptir ve gevrekli. Termoset olan epoksinin viskoelastik matris ortamı olarak sečilmesinin başlıca nedenleri şunlardır: düşük viskozite ve büzölme; mükemmel kimyasal, termal ve mekanik dayanıklılık özellikleri; mekanik statik ve dinamik yükleri taşıyabilme kabiliyeti. (Jiang vd., 2013; X. Li vd., 2011; Mittal vd., 2021; Oleksy vd., 2014) Epoksi reğineler iyi bir çözölücü oldukları için, yüksek mekanik ve yapışma özellikleri ve kimyasal dirençleri ile birlikte uçucu yan ürün emisyonu olmadan geniş bir sıcaklık aralığında kürlenebilirlikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar (V. K. Singh, 2015).

Günümüzde çevre dostu kompozit malzemelerin imalatına yönelik küresel bir ilgi vardır ve bu da araştırmacıları geri dönüştürölabilen yüksek performanslı kompozitler üretmek için plastik ve kimyasal malzemelere alternatif olarak tarımsal artıklardan elde edilen doğal malzemeleri kullanmaya yöneltmiştir.

Bu doğal malzemeler düşük maliyetleri, büyük miktarlarda bulunmaları ve doğada parçalanabilme yetenekleri ile karakterize edilir. Bu doğal malzemelerin polimerik kompozitlerde dolgu maddesi olarak kullanılmasındaki temel sorun, şişirme sonrasında mekanik özelliklerde azalmaya neden olabilen su emme yetenekleridir. Dolgu maddesi ile matris maddesi arasındaki yapışma artırılabilir ve bazı kimyasal işlemlerle su emilimi azaltılabilir (Ahmad vd., 2015; Srivastava vd., 2013)

Doğal dolgunun en büyük dezavantajı, yüksek reaktif işlevselliğe sahip hidroksil grupları içeren selüloz, lignin, pektin ve hemiselülozların varlığından kaynaklanan hidrofilik yapılarıdır. Bu, biyodoldurucunun hidrofobik matrisle zayıf bir şekilde birbirine geçmesine neden olur. Dahası, doğal dolguda bulunan hidroksil grubu atmosferik su molekülü ile reaksiyona girebilir ve kompozitin arayüz bağı olumsuz yönde etkileyen hidrojen bağları oluşturabilir (Essabir vd., 2015; Xu vd., 2016)

Bilim ve teknolojinin ilerlemesi, çeşitli yüksek kaliteli, düşük maliyetli ve çevre dostu malzemelerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Son yıllarda, bilim camiasının odak noktası, temel matris ve takviye malzemesi olarak biyolojik olarak parçalanabilir dolgu maddesi / lif içeren polimerli kompozit malzemelere doğru hızla yönelmiştir. Çeşitli tipte kabuk ve kabuklar biçimindeki tarımsal bitkilerin ayrıştırılmış kısımları, yüksek bulunabilirlikleri ve diğer endüstriyel sektörlerin, yani enerji ve biyokimya endüstrisinin (biyopolimer üretimi) az ilgi duymaları nedeniyle kompozit modifikasyon süreçlerinde kullanılacak değerli ürünler haline gelmiştir (Salasinska vd., 2018).

Çeşitli kabuk cinsleri arasında ceviz kabuğu (CK) parçacıkları, polimerlerin çeşitli yararlı özelliklerini iyileştirebildikleri için dolgu maddesi olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. CK esas olarak hemiselüloz, α -selüloz ve ligninden oluşur. Bunların hepsi birlikte CK' nın yaklaşık %98,5 'ini oluşturur. Bunun dışında yağ, zambak, mum, pektin, tanen, uçucu maddeler ve kül izleri de içerir. CK' nın benzersiz bileşimi nedeniyle, gelişmiş mekanik özelliklere ve kararlılığa sahip bol miktarda reaktif fonksiyonel gruba sahiptir. En çeşitli endüstriyel kimyasallarla uyumludur (Shejkar vd., 2022). Tablo 1' de ceviz kabuğunun yapısal bileşimi gösterilmiştir.

Tablo 1: Ceviz kabuğunun bileşimi

Malzeme	Selüloz %	Hemiselüloz %	Lignin %	Kül %
Ceviz kabuğu	25.4	23.1	50.1	1.5

Kaynak: (Orue vd., 2020; Rao vd., 2015; Rao & Kumar, 2017)

Etkili özelliklere sahip olmasına rağmen, ceviz kabuğu parçacıklarının (CKP) dahil edilmesi, esas olarak doğal dolgu maddeleriyle ilişkili dezavantajlardan biri olan hidrofilik karakterleri nedeniyle malzemenin özelliklerini iyileştirememesidir. Bu nedenle, hidrofobik polimer matrisle doğal olarak düşük uyumluluğa sahiptirler ve boyutsal değişime neden olabilecek nemli koşullar altında nemi emerler. Ayrıca, bu hidrofilik doğal dolgu maddeleri kendi aralarında hidrojen bağları oluşturmaya çalışır ve üretim süreci sırasında bir araya gelerek stres konsantrasyonuna yol açarlar. Bu nedenle, bu tür kompozitlerden maksimum faydayı elde etmek için bu sorunun üstesinden gelmek zorunlu hale gelmektedir (Shejkar vd., 2022).

CKP içeren gözenekli termal yalıtım yapı malzemeleri üzerine yapılan araştırmalar, CKP' lerin uygulanabilir bir termal yalıtım malzemesi olarak kullanılmasını daha da desteklemektedir. CKP' lerin benzersiz morfolojisi, etkili termal yalıtım için gerekli olan kompozit içinde bir hava cepleri ağı oluşturmaya yardımcı olur. CKP' lerin gözenek oluşturunca bir madde olarak dahil edilmesinin hafif ve etkili termal yalıtım malzemelerinin üretimine yol açtığını göstermektedir. Bulgular CKP' lerin sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir (Tian vd., 2016).

1. Ceviz kabuğu parçacıklarının (CKP) epoksi reçineyle birlikte kullanıldığı çalışmalar

Çalışmada, CKP takviyeli kompozit malzeme geliştirmiştir. Ağırlıkça %10, %15, %20 ve %25 CKP ile epoksi reçinesini karıştırmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemelerinde, CKP' nin epoksi matrisinde iyi dağıldığını gözlemlemiştir. CKP eklenmesi biyokompozitin elastisite modülünü arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca CKP eklenmesiyle hem basınçta hem de çekmede nihai dayanımı azalttığını bildirmiştir. Bununla birlikte, CKP eklenmesi ile sertliği artırdığını tespit etmiştir. Eğilme elastisite modülünün de CKP ağırlık yüzdesinin artmasıyla arttığını, eğilme dayanımının ise azaldığı sonucuna varmıştır (V. K. Singh, 2015).

Çalışmalarında, CKP' lerin bir matris kompozitte takviye dolgu maddesi olarak etkisini araştırmışlardır. Bu nedenle, farklı CKP yüzdelinde (ağırlıkça %3, %5, %7 ve %9), iki farklı polimer (epoksi ve doymamış polyester) karıştırmışlardır. Kompozit numunelerinin, çekme, eğilme, sertlik ve darbe testleri ile mekanik özelliklerini karakterize etmişlerdir. Epoksi reçinesinin çekme

dayanımı ve darbe dayanımının, CKP eklendikten sonra arttığını belirtmişlerdir. Çekme dayanımı ve darbe dayanımının en yüksek değerleri %7 CKP oranıyla gerçekleşmiştir. Eğilme dayanımı ve sertliği, CKP yüzdesiyle artmış olup en yüksek değerleri %9 oranıyla elde etmişlerdir. CKP eklendiğinde epoksi kompozitin mekanik özelliklerinin doymamış polyester kompozitinkine göre daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. (Oleiwi & Hadi, 2022).

2. Ceviz kabuğu tozunun (CKT) ile ilgili çalışmalar

Epoksi kompozitlere ceviz kabuğu tozunun (CKT) dahil edilmesinin termal yalıtım yeteneklerini önemli ölçüde iyileştirdiği ve bunları inşaat ve otomotiv endüstrileri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için uygun hale getirdiği gösterilmiştir. Araştırmalar, epoksi kompozitlere ceviz kabuğu parçacıklarının eklenmesinin termal kararlılık ve yalıtım özelliklerinde önemli bir artışla sonuçlandığını göstermektedir.

Biyokompozitlerin geliştirilmesinde tarımsal atıkların, özellikle CK' ların yenilikçi yeniden kullanımına odaklanmış, CK biyokütlesinin mekanik indirgeme, kurutma ve öğütme yoluyla toz takviyelerine dönüştürme sürecini detaylandırmış, ardından elek analizi ve mikroskopik teknikler yoluyla karakterizasyon işlemini detaylandırmıştır. Çalışmada, biyokompozit malzemeler için toz takviye üretiminde birincil malzeme olarak atık CK biyokütlesini kullanmışlardır. CK' lar, 3 saat boyunca 100 °C' de kurutularak ve toz oluşturmak için çeşitli zamanlarda (10, 20, 30 ve 40 dakika) öğütülerek işlenmiştir. Optimum toz, 40 dakika öğütme ve ardından 100 °C'de 60, 180 ve 300 dakika boyunca ikinci bir kurutma işlemi ile elde edilmiştir. Karakterizasyon, tozun biyokompozit uygulamalara uygunluğunu değerlendirmek için elek analizi, ağırlık

ölçümleri ve mikroskobik analizleri ile sağlanmıştır (Çevik & Avşar, 2024).

Çalışmada kullanılan dolgu maddesi 50 µm, 75 µm ve 100 µm olmak üzere çeşitli boyutlarda hazırlanmıştır. Üç farklı parçacık boyutuyla el yatırma yöntemi kullanılarak üç farklı kompozit seti üretilmiştir. Her sette, kompozitler ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 ağırlıkça olmak üzere dört farklı dolgu yüklemesi ile hazırlanmıştır. CKT' nin parçacık içeriğinin ve boyutunun farklı fiziksel özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. İncelenen özellikler yoğunluk, boşluk içeriği ve su emilim oranıdır. Deneyisel incelemelerden, hem dolgu maddesi boyutunun hem de içeriğinin belirtilen parametreler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Dolgu içeriğindeki artışla birlikte kompozitin yoğunluğunun azaldığı, boşluk içeriğinin ve su emilim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, büyük parçacık boyutlu CKT' ye sahip kompozitlerin, küçük parçacık boyutlu CKT 'ye sahip kompozitlere kıyasla düşük yoğunluğa, yüksek boşluk içeriğine ve daha fazla su emilim oranına sahip olduğu belirtilmiştir (Shejkar vd., 2021).

Çalışmalarında, termoset matris kompozitte takviye maddesi olarak CKT' nin potansiyelini araştırmışlardır. Bu nedenle, epoksi polimerden farklı dolgu ağırlık yüzdelerinde (%15, %25, %35 ve %45) kompozit numuneler üretilmiştir. Kompozit numunelerde, çekme testi, eğilme veya üç nokta eğme testi, Izod darbe testi, basınç testi ve Rockwell sertlik testi kullanılarak mekanik özellikler açısından karakterize etmişlerdir. Ayrıca, selülozik dolgu içeriğinin epoksi esaslı kompozitlerin yoğunluğu ve su emiciliği üzerindeki etkisini de ASTM standardına göre araştırmışlardır. CK formundaki

tarımsal atığın tane boyutunun belirlenmesiyle karakterizasyon incelemelerine başlamışlardır. Daha sonra, CKT' nin ince parçacıklarının eklenmesinden sonra epoksi termosetin sertliğinin, çekme ve eğilme mukavemetindeki azalmayla arttığını belirtmişlerdir. %35 ağırlık oranındaki CKT kompozit, mukavemet, sertlik ve tokluğun dengeli bir kombinasyonunu sergilediğini bulmuşlardır. Dolgulu kompozitlerin mekanik dayanım ve modülünün, dolgu içeriğinin %35 ağırlıkça kadar artırılmasıyla arttığını bulmuşlardır (Mittal vd., 2021).

Çalışmada, alkali ile işlenmiş CKT, epoksi matris kompozitte takviye malzemesi olarak ele alınmıştır. CKT (%5, %10, %15 ve %20 ağırlıkça) test numuneleri hazırlanması için matrise toz olarak eklenmiştir. Kompozitlerin çekme , basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Mekanik testler yoluyla alkali ile işlenmiş CKT' nin, kimyasal işlem görmemiş CKT ve saf epoksi kompozitlerine göre daha fazla çekme mukavemetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca alkali işlem görmüş CKT' nin, alkali işlem görmemiş CKT kompozitine kıyasla %20 daha fazla mukavemete sahip olduğunu belirtmişlerdir. Alkali ile muamele edilmiş CKT' nin çekme dayanımının %15 oranlı numuneye seviyesine kadar arttığı, daha sonra azalmaya başladığını gözlemlemişlerdir. Alkali ile muamele edilmiş CKT' nin çekme, basınç ve eğilme dayanımının optimum değerinin %15 oranlı numune ile sağlandığı sonucuna varmışlardır (A. K. Singh vd., 2021).

Çalışmalarında, epoksi kompozitlerde organik atık dolgu maddesi olarak öğütülmüş CKT kullanımını tartışarak, geleneksel inorganik dolgu maddelerine kıyasla maliyet etkinliği, yenilenebilirlik ve üretim sırasında daha düşük enerji tüketimi gibi

doğal dolgu maddelerinin avantajlarını vurgulamışlardır. Bu dolgu maddelerinin dahil edilmesi, polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini, termal direncini ve genel performansını arttırmayı amaçlamışlardır. CKT ile modifiye edilmiş yüksek dolgulu epoksi kompozitlerin değerlendirilmesi, dolgunun ağırlıkça % 20-50' sinin dahil edilmesinin sertliği artırdığını ancak gerilme mukavemetini ve darbe direncini azalttığını göstermiştir. Mekanik özellikler için optimum dolgu içeriği ağırlıkça % 30 iken, ağırlıkça % 50 yapısal olmayan uygulamalar için ekonomik olarak uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Dinamik mekanik termal analizde, yüksek sıcaklıklarda iyileştirilmiş sertlik göstermiştir. Termogravimetrik analiz (TGA), modifiye edilmemiş epoksi reçinesine kıyasla kompozitlerin gelişmiş termal stabilite göstermiştir (Salasinska vd., 2018).

Mevcut çalışmada CKT takviyeli (ağırlıkça %10-%20-%30-%40) epoksi matris kompozit açık kalıpta üretmişlerdir. Fiziksel özellik olarak yoğunluk ve mekanik özellik olarak çekmeye karşı davranışlarını incelemişlerdir. Yoğunluk ve çekme özellikleri nihai çekme dayanımı, elastikiyet modülü ve yüzde uzama için CKT yüzdesinin etkisini değerlendirmişlerdir. CKT ağırlık yüzdesinin %10 ağırlıktan %20 ağırlığa çıkarılması, nihai çekme dayanımındaki kayıp ve yüzde uzamadaki kazanç için %20-40 ağırlıktaki artışa kıyasla çok etkili olduğu belirtilmiştir. Elastikiyet modülü üzerindeki belirgin bir etkisi olduğu sonucuna varmışlardır (Nitin & Singh, 2013)

CKT epoksi matrisinde uygun bir takviye görevi görmektedir. Kompozit için maksimum çekme dayanımını (36 MPa), %5 ağırlıkça CKT içeriğinde gözlemlemişlerdir. CKT arttıkça

daha da düşmüştür. Bunun nedenin, matriste düzgün parçacık dağılımı ile sonuçlanan daha düşük CKT içeriği olduğunu belirtmişlerdir. En yüksek basınç dayanımı değeri olan 130,13 MPa, %10 ağırlıkça CKT içeriğinde tespit etmişlerdir. Ancak saf epoksiye göre numunenin Young modülünde %20, basınç modülünde ise %52 artış, %10 ağırlıkça CKT ile sağlamışlardır. SEM görüntülerinden, parçacıkların kümeleşmediği daha düşük dolgu içeriğinde düzgün parçacık dağılımını olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak boşluk ve çatlak oluşumunun %20 CKT içeriğinde başladığı tespit etmişlerdir. Su emiliminin, artan CKT içeriği ile arttığını, %5 ağırlıkça CKT içerikli kompozitin en düşük değere sahip olduğunu bulmuşlardır. Geliştirilen kompozitin, geleneksel ahşap ürünleri ve katmanlarının yerini almada olası uygulamalar kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Lala vd., 2018).

Kompozit oluşumu ve bulgular

CKP' lerin öğütülmesi ile ortalama 50, 100 ve 200 µm boyutlarında hazırlanmış olan CKT' ler %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında epoksi reçine ile karıştırılarak numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra orta değer olan %30 oranına sahip alkali işlemi yapılmış CKT hazırlanmış ve ayrı bir numune hazırlanmıştır. Bu numunenin amacı alkali işlemi öncesi ve sonrası kompozit yapısındaki değişimi incelemektir. Daha sonra üretilen kompozitlerin yapısal özellikleri değerlendirilmiştir.

1. Yoğunluk ve parçacık boyutu

Polimer kompozitlerin yapısal yoğunluğu, dolgu içeriği, parçacık boyutu ve dağılımı, polimer matris ile dolgu maddesi arasındaki etkileşim dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir.

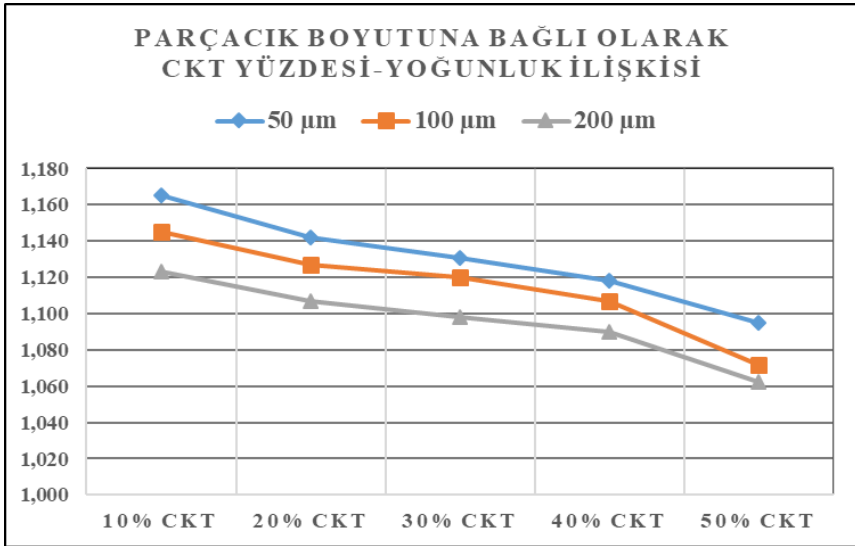
Genel olarak, polimer matristeki dolgu maddesi içeriğinin artırılması, dolgu maddesi polimer matristen daha yüksek yoğunluğa sahip olursa kompozitin daha yüksek bir paketleme yoğunluğuna yol açabilir. Polimer matris ile dolgu maddesi arasındaki etkileşim de kompozitin yapısal yoğunluğunu belirlemede önemli bir faktördür. Hidrojen bağı gibi işlemlerle kolaylaştırılan matris ile dolgu maddesi arasındaki güçlü arayüz yapışması, kompozitin yapısal yoğunluğunu artırabilir (J. Li vd., 2022; Shivashankar vd., 2022; Vasilev vd., 2019).

Yoğunluk, parçacıklardan oluşan kompozitlerde en önemli özelliklerden biridir. Kompozitlerin yoğunluğu, Arşimet prensibine dayalı su daldırma tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Yoğunluk değerini hesaplamak için üç veriye ihtiyaç vardır. Bunlar, numunenin havadaki ağırlığı, numunenin sudaki ağırlığı ve suyun yoğunluğudur. Deneyi gerçekleştirmek için damıtılmış su kullanılmış ve yoğunluğu 1 g/cm^3 olarak alınmıştır.

Parçacıkların boyutundan bağımsız olarak, kompozitlerin ölçülen yoğunluğunun CKT oranındaki artışla azaldığı görülmüştür. Saf epoksinin yoğunluğu $1,201 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçülmüştür. Grafik 1' de görüldüğü üzere $50 \text{ }\mu\text{m}$ boyutlu parçacıkların %10 ağırlık oranında eklendiğinde $1,165 \text{ gm/cm}^3$ ' e düşer ve aynı boyutta %50 ağırlık oranında dolgu eklendiğinde $1,095 \text{ g/cm}^3$ ' e düşmüştür.

Üretilen numuneler arasında en düşük yoğunluğun $200 \text{ }\mu\text{m}$ CKT' li kompozitte ve maksimum yoğunluğun $50 \text{ }\mu\text{m}$ CKT' li kompozitlerde sağlandığı görülmüştür. Bu durum, daha küçük boyutlu dolgu maddelerinin, polimerle birlikte daha düzgün dağılması ve daha fazla yoğunluk oluşturmaları ile ilişkilidir.

Polipropilen matris ile CKT takviye kullanılan bir çalışmada, büyüyen parçacık boyutlarıyla birlikte yoğunlukta azalma olduğunu belirtmişlerdir (Obidiegwu vd., 2014). Bunun sebebinin parçacık boyutunun büyümesi ile birlikte kompozit içerisindeki hava boşluklarının miktarının artması ile açıklanabilir. Hava boşluklarının yoğunluğu oldukça az olduğundan, daha fazla boşluk içeren yapılar daha az yoğunluk göstermektedir.



Grafik 1: Parçacık boyutuna bağlı olarak CKT yüzdesi – yoğunluk ilişkisi

2. Su emilim davranışları

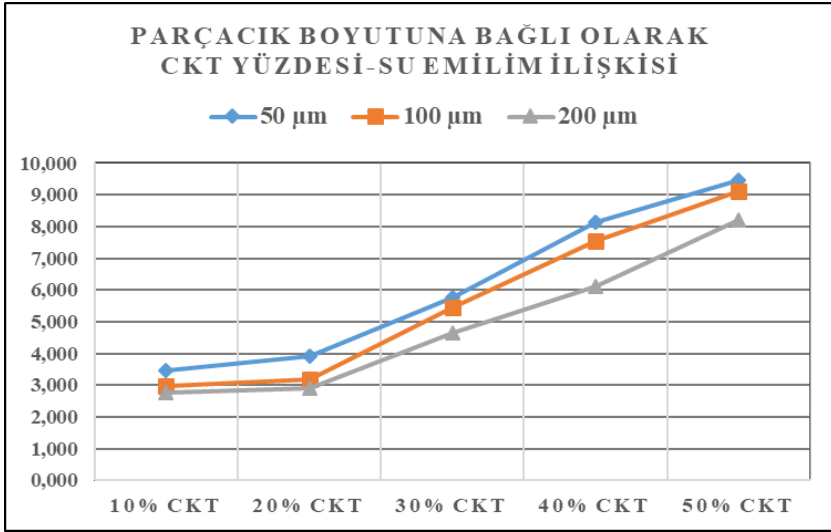
Polimer kompozitlerdeki su emilimi, polimer matrisin doğası, takviye edici liflerin türü ve özellikleri, bu bileşenler arasındaki arayüz bağı ve kompozitlerin maruz kaldığı çevre koşulları dahil olmak üzere birbiriyle ilişkili birkaç faktörden etkilenir. Su emilimini etkileyen temel faktörlerden biri lif / matris

arayüz bağıdır. Lifler polimer matrisle iyi bağlanmadığında boşluklar oluşabilir ve bu da kılcal etki yoluyla suyun içeri girmesi için yollar oluşturabilir. Kompozit yapısı içerisinde bulunan mikro kanalların varlığı, su emilim oranını önemli ölçüde artırarak zamanla mekanik özelliklerin potansiyel olarak bozulmasına yol açar (Doroudgarian vd., 2015).

Bir malzemenin su emilim etkisi, suyla temas eden uygulamalar için en önemli özelliklerdendir. Bu nedenle, geliştirilen biyokompozitlerin su emme kapasitesini ölçümlemek gereklidir. Bir polimer matrisine selülozik parçacıkların eklenmesinin su moleküllerinin difüzyonunda bir iyileşmeye yol açtığı gözlemlenmiştir. Mevcut çalışmada üretilen kompozitler, damıtılmış su içerisinde 24 saat bekletildikten sonra değerleri kontrol edilmiştir. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında CKT eklenmiş kompozitlerin su emilim özelliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, epoksi hidrofobik özellikler gösterirken CKT takviye malzemesinin kimyasal yapısından dolayı hidrofil özelliklere sahip olmasıdır (Alomayri vd., 2014). CKT' nin yapısında hidroksil gruplar olmasından dolayı üzerinde bir hidrojen bağı oluşturarak su emiliminin artmasına neden olmaktadır.

Grafik 2' den de görüldüğü üzere, epoksi matrisi içindeki CKT içeriği arttıkça dolgu maddelerinin boyutundan bağımsız olarak su emilimi artış göstermektedir. CKT içeriği arttıkça su molekülleri ile hidrojen bağı yapan parçacık sayısı da artacağından su emilim özellikleri artmaktadır. Daha küçük CKT parçacık boyutuna sahip kompozitler, daha büyük parçacık boyutu içerenlere göre daha fazla su emilimi sağlamıştır. Özellikle parçacıklar hidrofilikse, su moleküllerinin yapışabileceği mevcut alanların

sayısının artması nedeniyle su emilimini artırabilir (İskender vd., 2021; Mittal vd., 2021; Shejkar vd., 2022).



Grafik 2: Parçacık boyutuna bağlı olarak CKT yüzdesi – su emilimi ilişkisi

Ayrıca hidrofil özelliği olan takviye maddeleri, su molekülleriyle hidrojen bağları oluşturma kabiliyetleri nedeniyle su emilimini artırabilirken, grafen gibi hidrofobik dolgu maddeleri, su difüzyonunu engelleyen bariyerler oluşturarak su emilimini azaltabilir (Phuangngamphan vd., 2019). Hidrofobik yapılarda ise parçacık boyutunun artması su emilim özelliklerini artırmaktadır (Zykova vd., 2015). Takviye malzemesinin artışına bağlı olarak yüzey alanı artmakta, bu artış parçacık boyutunun küçülmesi ile daha yüksek seviyelere çıkmaktadır. Gözeneklerin varlığı da kompozitin mikro yapısında su difüzyonunu etkileyebilmektedir. Gözeneklilik takviye malzemesinin içeriğine bağlı olup daha yüksek gözeneklilik

ise daha fazla su emilimine sebep olabilmektedir (Bhosale vd., 2016).

Başka bir ifade ile yüzey alanını artıran etkenler sayesinde su molekülleri ile temas eden alan artmakta ve su emilimi fazlalaşmaktadır. Polyester / palmiye çekirdeği kabuğu kompozitinin üretildiği bir çalışmada parçacık boyutu ve yapısal özellikler açısından benzer sonuçlar bulunmuştur (Shehu vd., 2014). Kompozitlerde su emiliminin düşük olması, matris ile takviye malzemesinin arasındaki bağlanmanın iyi olduğunun göstermekte olup hidrofilitenin azaldığını işaret etmektedir.

CKT takviye malzemesinin hidrofilik özellikleri yapısındaki hemiselüloz kaynaklıdır (Taha vd., 2007). Hemiselülozun CKT içerisinden uzaklaştırılması ile yüzey özellikleri hidrofobik hale gelir ve epoksi – CKT arasındaki bağlantının artmasına yol açar. Daha iyi bağlanma, kompozit yapısındaki su molekülünün difüzyon direncinin artmasına sebep olur (Reddy vd., 2021).

3. Alkali işleminin etkisi

Matris – takviye malzemesi arasındaki bağlantıyı artıran bir diğer etken de kompozit üretimi öncesinde takviye malzemesine uygulanan kimyasal işlemlerdir. CKT için kullanılabilecek kimyasal alkali cinsinden sodyum hidroksit (NaOH) olarak belirlemiştir. Alkali işlemi ile CKT içerisindeki selüloz dışındaki hemiselüloz ve lignin gibi bileşenlerin yapıdan uzaklaştırılır. Alkali işlemi ile mum ve yağ gibi yapısal bileşenler de CKT yapısından ayrılmış olur (Lala vd., 2018; Rajesh & Prasad, 2014). Hemiselüloz su emilimini artıran yapı olması sebebiyle uzaklaştırılması ile hidrofob özelliğe kavuşan CKT’ nin epoksi matris ile arayüz bağlantısını artmış olacaktır.

Ayrıca su emilimini azaltan bir başka neden alkali işlemi ile birlikte daha pürüzsüz bir yüzey ve azaltılmış gözeneklilik göstermesi ve bunun da lif ile polimer matris arasında gelişmiş arayüz bağlanmasına yol açtığını göstermiştir (Bekele vd., 2023; Shanmugasundaram vd., 2018; Shejkar vd., 2022).

Alkali işlemine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün artması matris ve takviye malzemesi arasındaki bağlanmayı güçlendirir. Yapılan bir çalışmada, PLA / ceviz kabuğu tozları ile oluşturulan kompozitlerde takviye malzemesine uygulanan alkali işleminin özelliklere etkisini incelemişlerdir. Alkali işlemi görmüş kompozitlerin görmemiş olanlara göre daha iyi mekanik ve termal özellikler sağladığını belirtmişlerdir (Orue vd., 2020). Alkali işlem, istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi ve su emiliminin en aza indirilmesi için gerekli olan doğal elyaflar ile polimer arasındaki uyumluluğu iyileştirmiştir (Hu vd., 2020).

Sonuçlar

Mevcut çalışmada epoksi / CKT kompozitlerinin parçacık boyutlarına bağlı olarak yapıdaki boşluk içeriği, yapısal yoğunluk ve su emilim özellikleri incelenmiştir. Kompozitlerin üretimi esnasında ayrı bir %30 oranında CKT içeren numune hazırlanarak NaOH sulu çözeltisi ile işlem yapılmıştır. İncelemeler sonucunda, alkali işlemi yapılmış numunelerin matris – takviye malzemesi ara yüz bağlatısının iyileştiği belirlenmiştir.

Ayrıca alkali işlemi ile su emilimini artıran CKT’ deki hemiselüloz bölgelerinin azalmasıyla hidrofil bölgeler oldukça azalmıştır. Bu duruma bağlı olarak takviye – matris ara yüzü yapışmasında artış gerçekleşmiştir. Alkali işlemi uygulanmayan

%10 - %20 - %30 - %40 - %50 numuneler içinse parçacık boyutuna bağlı olarak kompozit yapıdaki boşluk içeriği, yoğunluk ve su emilim özellikleri incelenmiş olup ortaya çıkan sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

Kompozitlerdeki yoğunluk değerleri CKT takviyesinin yüzdelik olarak artması ile azalmıştır. Bunun dışında küçük boyutlu parçacıklara sahip numuneler, büyük parçacıklı numunelere göre daha yüksek yoğunluk göstermektedir. Bir başka deyişle parçacık boyutlarına göre numunelerin yoğunlukları azalan şekilde 50 µm, 100 µm ve 200 µm olarak sıralanabilir.

Kompozit yapısındaki boşluk miktarı, CKT takviye malzemesi arttıkça artmaktadır. Ayrıca, boşluk miktarı CKT parçacıklarının boyutunun artması ile artmaktadır. En fazla boşluk miktarı 200 µm parçacık boyutuna sahip numunelerde, en az boşluk miktarı da 50 µm boyutunda parçacık içeren numunelerde bulunmaktadır.

Kompozit üretiminde kullanılan CKT takviyesi içerisinde bulunan hemiselüloz sebebiyle hidrofil özelliğe sahiptir. Buna bağlı olarak kompozitlerdeki su emilim oranı CKT takviye malzemesinin miktarının artması ile artar. Çünkü su molekülleri ile bağlantı yapmak isteyen grupları bünyesinde barındırmaktadır. Ayrıca en küçük parçacık boyutuna sahip (50 µm) numunelerde en yüksek yüzey alanı oluşur. Yüzey alanı arttıkça yine su molekülleri ile bağlantı yapmak isteyen grupların sayısı artar. En yüksek miktarda su emilimi sağlayan numune en küçük parçacık boyutuna sahip olan (50 µm) ve bünyesinde %50 oranında CKT takviye malzemesi bulunduran kompozit olduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

Ahmad, F., Choi, H. S., & Park, M. K. (2015). A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 300(1), 10-24. <https://doi.org/10.1002/mame.201400089>

Alomayri, T., Assaedi, H., Shaikh, F. U. A., & Low, I. M. (2014). Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2(3), 223-230. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.05.005>

Bekele, A. E., Lemu, H. G., & Jiru, M. G. (2023). Study of the Effects of Alkali Treatment and Fiber Orientation on Mechanical Properties of Enset/Sisal Polymer Hybrid Composite. *Journal of Composites Science*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/jcs7010037>

Bhosale, S. H., Singh, V. V., Rangasai, M. C., Bandyopadhyay-Ghosh, S., & Ghosh, S. B. (2016). Integration of biobased functionalized feedstock and plastisol in epoxy resin matrix toward developing structural jute biocomposites with enhanced impact strength and moisture resistance properties. *Polymer Composites*, 37(2), 391-397. <https://doi.org/10.1002/pc.23192>

Çevik, B., & Avşar, Y. (2024). Production and characterization of waste walnut shell powder that can be used as a sustainable eco-friendly reinforcement in biocomposites. *Materials Testing*, 66(8), 1314-1326. <https://doi.org/10.1515/mt-2024-0018>

Doroudgarian, N., Pupure, L., & Joffe, R. (2015). Moisture uptake and resulting mechanical response of bio-based composites. II. composites. *Polymer Composites*, 36(8), 1510-1519. <https://doi.org/10.1002/pc.23058>

Essabir, H., El Achaby, M., Hilali, E. M., Bouhfid, R., & Qaiss, A. (2015). Morphological, Structural, Thermal and Tensile Properties of High Density Polyethylene Composites Reinforced with Treated Argan Nut Shell Particles. *Journal of Bionic Engineering*, 12(1), 129-141. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(14\)60107-4](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(14)60107-4)

Hu, C., Zhou, Y., Zhang, T., Jiang, T., & Zeng, G. (2020). Effect of fiber modified by alkali/polyvinyl alcohol coating treatment on properties of sisal fiber plastic composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 39(23-24), 880-889. <https://doi.org/10.1177/0731684420934866>

İskender, N., Ersöz, B., Aydın, N., Karaoğlanoğlu, S., & Oktay, E. A. (2021). Investigation of Water Absorption and Color Change of Indirect Composite Resins. *European Annals of Dental Sciences*, 48(2), 46-51. <https://doi.org/10.52037/eads.2021.0021>

Jiang, T., Kuila, T., Kim, N. H., Ku, B.-C., & Lee, J. H. (2013). Enhanced mechanical properties of silanized silica nanoparticle attached graphene oxide/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 79, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.02.018>

Lala, S. D., Deoghare, A. B., & Chatterjee, S. (2018). Mechanical and Morphological characterization of Walnut Shell reinforced epoxy composite. *IOP Conference Series: Materials*

Science and Engineering, 377, 012011.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012011>

Li, J., Bi, Y., Zhao, B., Zu, L., Yang, Q., & Cong, S. (2022). Thermomechanical properties of epoxy resin/basalt fiber/hydrotalcite composites and influence of hydrotalcite particle size on their properties. *Polymer Composites*, 43(2), 955-963.
<https://doi.org/10.1002/pc.26425>

Li, X., Zhan, Z.-J., Peng, G.-R., & Wang, W.-K. (2011). New high-performance epoxy nanocomposites co-reinforced by two- and zero-dimensional nanoscale particles. *Materials Science and Engineering: A*, 530, 680-684.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.111>

Mittal, M., Phutela, K., & Chaudhary, R. (2021). Influence of Walnut Shell Particles Addition on the Mechanical Properties of Epoxy Composites. *Applied Mechanics and Materials*, 903(7), 117-124. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.903.117>

Nitin, S., & Singh, V. K. (2013). Mechanical behaviour of Walnut reinforced composite. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 4(2), 233-238.

Obidiegwu, M. U., Nwanonenyi, S. C., Eze, I. O., & Egbuna, I. C. (2014). The Effect of Walnut Shell Powder on the Properties of Polypropylene Filled Composite. *The International Asian Research Journal*, 2(1), 22-29.

Oleiwi, J. K., & Hadi, R. S. (2022). Study of Polymeric Composite Reinforced with Natural Particles: Measurement and

Evaluation. *Instrumentation Mesure Métrologie*, 21(3), 113-117.
<https://doi.org/10.18280/i2m.210304>

Oleksy, M., Szwarc-Rzepka, K., Heneczkowski, M., Oliwa, R., & Jesionowski, T. (2014). Epoxy Resin Composite Based on Functional Hybrid Fillers. *Materials*, 7(8), 6064-6091.
<https://doi.org/10.3390/ma7086064>

Orue, A., Eceiza, A., & Arbelaiz, A. (2020). The use of alkali treated walnut shells as filler in plasticized poly(lactic acid) matrix composites. *Industrial Crops and Products*, 145, 111993.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111993>

Phuangngamphan, M., Okhawilai, M., Hiziroglu, S., & Rimdusit, S. (2019). Development of highly conductive graphite-/graphene-filled polybenzoxazine composites for bipolar plates in fuel cells. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(11).
<https://doi.org/10.1002/app.47183>

Rajesh, G., & Prasad, A. V. R. (2014). Tensile Properties of Successive Alkali Treated Short Jute Fiber Reinforced PLA Composites. *Procedia Materials Science*, 5, 2188-2196.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.425>

Rao, D. K., & Kumar, S. (2017). Mechanical Behaviour of Hybrid Bio-composite Reinforced with Walnut (*Juglans regia* L.) Shell Particle and Coconut Fibre. *International Journal on Emerging Technologies (Special Issue NCETST-2017)*, 8(1), 604-608.

Rao, D. K., Saxena, A., Kumar, S., Joshi, N. K., & Poonam, P. (2015). Tensile and Flexural Behaviour with Characterization of Hybrid Bio—Composite Reinforced with Walnut Shell Particles and

Coconut Fibres. *Journal of Technological Advances and Scientific Research*, 1(3), 94-102. <https://doi.org/10.14260/jtasr/2015/12>

Reddy, P. V., Mohana Krishnudu, D., Rajendra Prasad, P., & R, V. S. R. (2021). A Study on Alkali Treatment Influence on Prosopis Juliflora Fiber-Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Natural Fibers*, 18(8), 1094-1106. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1687063>

Salasinska, K., Barczewski, M., Górny, R., & Kloziński, A. (2018). Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler. *Polymer Bulletin*, 75(6), 2511-2528. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2163-3>

Shanmugasundaram, N., Rajendran, I., & Ramkumar, T. (2018). Static, dynamic mechanical and thermal properties of untreated and alkali treated mulberry fiber reinforced polyester composites. *Polymer Composites*, 39(S3). <https://doi.org/10.1002/pc.24890>

Shehu, U., Aponbiede, O., Ause, T., & Obiodunukwe, E. F. (2014). Effect of particle size on the properties of Polyester/Palm Kernel Shell (PKS) Particulate Composites. *Journal of Materials and Environmental Science*, 5(2), 366-373.

Shejkar, S. K., Agrawal, B., & Agrawal, A. (2021). Effect of particle size on physical properties of epoxy composites filled with micro-size walnut shell particulates. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2657-2661. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.520>

Shejkar, S. K., Agrawal, B., Agrawal, A., & Gupta, G. (2022). Physical, mechanical, and sliding wear behavior of epoxy

composites filled with surface modified walnut shell particulate. *Polymer Composites*, 43(10), 7526-7537. <https://doi.org/10.1002/pc.26847>

Shivashankar, H., Rajole, S., Sondar, P., Mathias, K. A., & Kulkarni, S. M. (2022). Physico-mechanical behavior of carbon black-infused polymer composite. *Bulletin of Materials Science*, 45(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02586-0>

Singh, A. K., Verma, R. P., Avikal, S., & Mehra, K. S. (2021). Mechanical characterization of epoxy composite reinforced with alkali treated walnut shell powder. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10642-10646. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.383>

Singh, V. K. (2015). Mechanical behavior of walnut (*Juglans L.*) shell particles reinforced bio-composite. *Science and Engineering of Composite Materials*, 22(4), 383-390. <https://doi.org/10.1515/secm-2013-0318>

Srivastava, N., Singh, V. K., & Bhaskar, J. (2013). Compressive behavior of walnut (*Juglans L.*) shell particles reinforced composite. *Usak University Journal of Material Sciences*, 2(1), 23-30. <https://doi.org/10.12748/uujms/20131709>

Taha, I., Steuernagel, L., & Ziegmann, G. (2007). Optimization of the alkali treatment process of date palm fibres for polymeric composites. *Composite Interfaces*, 14(7-9), 669-684. <https://doi.org/10.1163/156855407782106528>

Tian, Y., Li, S., Xu, C.-W., Li, J.-W., Sun, S.-B., Qi, H., Ma, C.-X., & Cao, M.-P. (2016). Process and Properties Study of Porous

Thermal Insulation Building Materials Based on Walnut Shell. *Proceedings of the 3rd International Conference on Material Engineering and Application (ICMEA 2016)*, 103, 262-268. <https://doi.org/10.2991/icmea-16.2016.43>

Vasilev, A. P., Struchkova, T. S., Okhlopkova, A. A., Alekseev, A. G., & Vasilev, A. P. (2019). Development of Antifriction Materials Based on Polytetrafluoroethylene Filled with Binary Fillers. *Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" Dedicated to the 85th Anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), Grozny, Russia. <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.66>

Xu, K., Tu, D., Chen, T., Zhong, T., & Lu, J. (2016). Effects of environmental-friendly modified rubber seed shell on the comprehensive properties of high density polyethylene/rubber seed shell composites. *Industrial Crops and Products*, 91, 132-141. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.036>

Zykova, A. K., Pantyukhov, P. V., Kolesnikova, N. N., Popov, A. A., & Olkhov, A. A. (2015). *Influence of particle size on water absorption capacity and mechanical properties of polyethylene-wood flour composites.* 020242. <https://doi.org/10.1063/1.4932932>

BÖLÜM II

Hindi Tüylerinin Fiziksel Yapısı, Özellikleri, Yıkama ve Dezenfeksiyon İşlemleri

Müslüm EROL¹

Giriş

Kümes hayvanı eti işleme endüstrisi dünya genelinde yıllık 40 milyar kg civarında beyaz et üretimi yapmaktadır. Kanatlı hayvanların beyaz et üretimine hazırlanması sürecinde açığa çok büyük miktarda atık olarak tüy çıkmaktadır. Kümes hayvanlarından açığa çıkan atık haldeki tüylerin bertarafı veya geri dönüşümü ciddi zorluklar barındırmaktadır. Bu tüylerin belli bir kısmı öğütülerek yem olarak kullanılmaktadır. Bu işlem tüylerin yüksek bir basınç altında, 140 °C veya daha yüksek sıcaklıklarda kaynatılması esasına dayanmaktadır. Ancak bu yöntem ile yapılan yıkama ve

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tekstil Giyim Ayakkabı ve Deri Bölümü, Bingöl/Türkiye, Orcid: 0000-0002-6905-7481, erolmuslum@gmail.com

dezenfeksiyon işlemlerine rağmen ürün üzerinde bir miktar kir kalabilmektedir.

Tüylerin değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer klasik ve popüler yöntem ise doğrudan yakarak imha etme ve yok etme işlemidir. Bu işlem havayı kirletmesi bakımından önemli çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Hindi tüyleri büyük miktarda azot içermekte ve bu da yakma işlemi esnasında yüksek miktarda NO_x oluşmasına neden olur. Yapılan araştırmalarda hindi tüyleri gibi yüksek azot içerikli malzemelerin termo kimyasal dönüşümü hidrojen siyanür (HCN) oluşumuna da yol açabilmektedir (Hansson vd., 2004).

Beyaz et imalatı yapan bazı üreticiler ise atık tüyleri toprağa gömmeyi denemektedirler. Toprağa gömülen bu tüyler toprağı kirletmektedir. Tüylerin bertaraf edilmesi veya volarizasyonu büyük bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. İşlenmemiş veya geri kazanılmamış olarak gömülen kümes hayvanı atıkları toprağı, yüzey ve yeraltı sularını kirletmekte ve sera gazları üretmektedirler (Bousshine vd., 2022; Ouakarrouch vd., 2020). Atıkların toprağa gömülmesiyle toprak kalitesi azalmaktadır. Buna bağlı olarak topraktan alınan ürünün kalitesi ile birlikte, ürünün çeşitliliği de önemli derecede azalmaktadır. Kümes hayvanı atıklarının yakılması, kömürle çalışan termik santraller kadar, hatta daha fazla zehirli hava emisyonuna neden olabilmektedir (Bansal vd., 2021; Erol & Aydemir, 2024; Franke-Whittle & Insam, 2013).

Dünya çapında artan atık nedeniyle oluşan çevre kirliliği etkisini ortadan kaldırmak için son zamanlarda binalarda ve otomotiv gibi birçok endüstriyel uygulamalarda atıkları geri

dönüştürerek yeniden kullanma ve katma değer yaratma çalışmaları hızla artmaktadır. Ayrıca, atıkların yeniden kullanımı maliyet tasarruflarına da yol açmakta ve sürdürülebilirliği artırmaktadır. Geleneksel petrol türevi malzemelerin yerine tüy atıklarını sürdürülebilir ve yenilenebilir yalıtım malzemesi olarak kullanmak çağımızın üretim tarzı ile uyushmaktadır (Tesfaye, Sithole, & Ramjugernath, 2017).

Dünya enerji tüketiminin yaklaşık %40'ı yaşam alanlarımızda ve binalarımızda gerçekleşmektedir. Tüketilen bu enerji binalarda ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme esnasında yapılmaktadır. Ciddi çevresel ve ekonomik sorunlardan kurtulmak veya bu sorunları önlemek için yapılarımızdaki enerjinin verimli kullanılması önemli bir olgu haline gelmiştir. Malzemenin yapısı, yalıtımın kalınlığı ve bütünlüğü, binanın tasarımı ve mimarisi, iklim koşullarına uygunluğu gibi özellikleri dikkate alınarak üretilen binalarda %30-%60 oranında enerji tasarrufu sağlanabilecektir (Kaynakli, 2012).

Lüateratür incelendiğinde kanatlı hayvanlara ait atık tüylerin temizlenmesi ile ilgili farklı yöntemlerin uygulandığı görölmüşür. Xiaolin ve arkadaşları, kuş tüylerinin Ultraviyole sistemi ile dezenfekte edilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu amaçla geliştirdikleri cihaz ile tüylerdeki bakterileri etkili bir şekilde ortadan kaldırmayı başarmışlardır. İşlem sırasında tüyleri dezenfekte etmek için UV lambalarını bir temizleme mekanizmasına entegre etmişlerdir. UV ışığının kullanımı, tüylerin dezenfekte edici maddelere tamamen maruz kalmasını sağlayan ve genel etkinliğini artıran mekanik sistemlerle tamamlanmaktadır (Xiaolin vd., 2020; Yanxin & Le, 2016).

Yungang proteini esaslı tüylerin yapısındaki tozları gidermek ve dezenfekte etmek amacıyla geliştirdiği yöntemin patentini de almıştır. Protein esaslı lifleri bir geçiş plakasından geçirmekte ve ürün geçiş kutusunun içinde iken ultraviyole ışınları ile muamele etmekte ve bu şekliyle dezenfekte etmektedir. Bunun sonucunda tozlar temizlenmekte ve ürün üzerindeki bakteriler uzaklaştırılmaktadır (Yungang, 2018). Temizleme verimliliğini artırmak için elektrostatik ve sürtünme mekanizmaları geliştirilmiş cihazlar tasarlanarak temizleme etkinliği arttırılmaya çalışılmıştır. Yungang toz toplayıcılar ve temizleme varilleri gibi mekanik yöntemler aracılığı ile tüyleri dezenfekte etmişlerdir (Yungang, 2018).

Ozon dezenfeksiyonu tüy işlemede kullanılan başka bir yöntemdir. Bu amaçla ultraviyole dezenfeksiyon yöntemine ozon işlemini de ilave etmek suretiyle yeni bir cihaz üretilmiş ve kapsamlı bir sterilizasyon ve koku giderme sağlanmıştır (Yanxin & Le, 2016). Kanatlı hayvan tüylerinin temizlenmesi ve dezenfekte edilebilmesiyle ilgili özel bir cihaz üretimi yapılmıştır. Üretilen bu cihaz ile temizleme ve dezenfekte işlemlerinin kısaldığı ve işçilerin çalışma yoğunluğu azaltılarak daha verimli bir sonuç elde edildiği ifade edilmiştir (Kunming & Chuangui, 2021).

Fayez ve Haliq kanatlı hayvanların kuluçkahanelerinde var olan bazı bakterilerin dezenfeksiyonu için yaptıkları çalışmalar sonucunda %5 konsantrasyonda Aquavinol® gibi dezenfektanların, E. coli ve Salmonella gibi patojenlere karşı üstün etkinlik gösterdiğini belirtmişlerdir (Sara F.A. Awad, Mona M.A.Ashoub, 2021).

Paşayev ve arkadaşları, kanatlı hayvanlardan tavuk tüylerinin belli temizleme işlemleri sonrasında kalan kötü kokuların giderilmesine yönelik yaptıkları çalışmada önemli sonuçlara ulaşmışlardır. Tüylerden kötü kokuya neden olabilecek uçucu maddeleri giderme açısından en etkili temizleme yönteminin, sodyum hipoklorit ile kısa bir ön yıkama ve sodyum hidroksit çözeltisi ile bitirme işleminden sonra noniyonik bir deterjanla ana yıkama olduğunu bulmuşlardır. Bu yıkama yöntemi sonucunda tüylerin yüzey, içyapı ve mekanik özelliklerinin bozulmadığını ifade etmişlerdir (Paşayev vd., 2022). Çiftlik hayvanlarının tüylerinin temizlenmesi ile ilgili ev tipi çamaşır makinasında farklı kimyasallar ile yapılan yıkamalar sonucunda sodyumhipoklorit ile yapılan yıkamalardan ideal temizleme ve dezenfeksiyona ulaşıldığı belirtilmiştir (Paşayev vd., 2021).

Çalışmamız beyaz et üretiminde önemli bir yere sahip olan hindi etinin üretimi sonrasında kesimhanelerde açığa çıkan atık haldeki tüylerin yıkama, temizleme ve dezenfeksiyon işlemlerinin yapılarak katma değeri yüksek ürün üretimine hazırlanması işlemlerini kapsamaktadır. Özellikle yapılarımızda ve yaşam alanlarımızda ısı ve ses yalıtımı amacıyla pek çok materyal üretilmektedir. Bu materyallerin üretiminde daha çok sürdürülebilir ve doğaya zarar vermeyecek ve imha edilebilir nitelikte olanların kullanılması büyük önem arz etmektedir. Burada çoğunlukla doğal elyafların kullanımı önem arz etmektedir. Çalışmamıza konu olan hindi tüyleri de diğer kanatlı hayvanların tüyleri gibi yalıtım amaçlı kullanılabilme potansiyeli bulunmaktadır. Kaz ve ördek tüylerinin hazır giyimde dolgu materyali olarak kullanılması giderek yaygınlaşmakta iken kanatlı hayvanlardan tavuk ve hindi tüylerinin

var olan potansiyeline rağmen kullanılamıyor olması araştırılmaya muhtaç bir zemin oluşturmaktadır.

Bu amaçla atık halde bulunan bu tüylerin yıkanıp, kurutulup, dezenfekte edildikten sonra kapalı mekanlarda yalıtım malzemesi olarak kullanımının mümkün olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada bu tüylerin hangi yöntemler ile yıkanıp temizlenebileceğine ilişkin literatür analiz edilirken en ideal sonuçları açığa çıkardığına kanaat ettiğimiz yöntem ve reçete ile hindi tüyleri yıkanarak temizlenmiş ve havadan nem emme ve su emme gibi fiziksel testler de yapılmıştır.

Hindi tüyleri hakkında

Hindi tüyleri, özellikle kompozit malzemelerde olmak üzere çeşitli uygulamalar için değerli kılan bir dizi fiziksel, kimyasal ve mekanik özellik sergiler. Literatür incelendiğinde çalışmaların büyük çoğunluğu tavuk tüyü gibi daha fazla atık olan tüyler üzerinden yapıldığı görülmektedir. Ancak, hindi tüyü lifleri genellikle tavuk tüyü liflerinden daha uzundur ve bu da tekstil işleme için faydalı olabilir (George vd., 2002).

Hindi tüylerinden katma değeri yüksek ürün üretmek için kompozit esaslı materyallerin üretilmesi mümkündür. Hindi tüyü ve polimer karışımından elde edilecek yapıların hafif ve elastikiyetleri açısından önemli performanslar gösterdiği bilinmektedir. Hindi tüyü liflerinden yararlanarak kompozit yapıların üretilmesi veya başkaca malzemelerin üretimi için bu liflerin bazı mekanik ve kimyasal içeriklerinin incelenmesi gerekmektedir. Araştırmalar protein esaslı bu liflerin keratin ağırlıklı bir içeriğe sahip olduğunu göstermektedir (Feughelman, 2002; Reddy & Yang, 2007). Reddy ve Yang tavuk

tüyü liflerinin mekanik özelliklerini hindi tüyleri ve yün lifleri ile kıyaslamıştır (Tablo 1). Buna göre tüylerin yapısının onun mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilerinin bulunduğu ifade edilmektedir. Kanatlı hayvanların tüyelerinin mekanik özellikleri büyük oranda tüylerin kalınlığı ile ilişkilidir. Tüylerin kalınlık veya inceliği tüyün bulunduğu bölgede üstlenmiş olduğu fonksiyon ile direkt ilişkilidir (Reddy & Yang, 2007).

Araştırmalar aynı kanatlı hayvanın farklı bölgelerindeki tüyelerinin farklı mekanik özellikler gösterdiğini ortaya koymaktadır. Hayvanların geçirmiş oldukları evrimsel süreçlerde ihtiyaç duydukları fonksiyonlara bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Tüyün yapısındaki keratinin yapısı ve polipeptit zincirleri içinde veya zincirler arasındaki bağların varlığı ve biçimi ile belirlenmektedir (Feughelman, 2002)

Tablo 1: Hindi tüyü, tavuk tüyü ve yün liflerinin mekanik özellikleri

Lifler	İncelik, denye	Uzunluk, cm	Mukavemet, MPa	Kopma uzaması, %	Modül, MPa
Hindi Tüyü (a)	142	5,2	107,9	7,96	2021,5
Hindi Tüyü (b)	55,2	4,1	46,8	16,43	581,1
Tavuk tüyü	76	1,5-4,5	187,2 ±59,8	7,7 ±0,85	4628 ±1449,5
Yün lifi	11	4,5-11,5	156-234	30-40	3900-5850

Kaynak: (Alonso vd., 2013; Reddy & Yang, 2007)

Şekil 1’de farklı uzunluklarda hindi tüyleri gösterilmiştir. Şekil 2’de ise bu tüylerin oluştuğu üç temel bölüm gösterilmiştir. Buna göre; tüy, tüyün üst kısmında bulunan pennaceous lifleri ve tüyün alt kısmından uzanan plumulaceous lifleri. Plumulaceous lifleri genellikle iki ila üç dala bağlı bir gövdeden oluşur. Bu lifler yumuşak ve esnektir.

Pennaceous lifleri genellikle plumulaceous liflerinden daha düz, daha sert ve çap olarak daha büyük bir yapıya sahiptir. Hindi tüylerini daha iyi analiz etmek için bu liflerin doğrusal yoğunlukları ve mekanik özelliklerini gösteren veriler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Hindi tüy liflerinin doğrusal yoğunluğu ve mekanik özellikleri

Tüy lifi	Ortalama Denye, (g/9000m)	Ortalama Dayanıklılık (g/denye)	Ortalama gerilme, (%)	Ortalama modül, g/denye
Plumulaceous	55,2	0,36	16,43	4,47
Pennaceous	142	0,83	7,96	15,55

Kaynak: (Evazynjad vd., 2001; George vd., 2002)



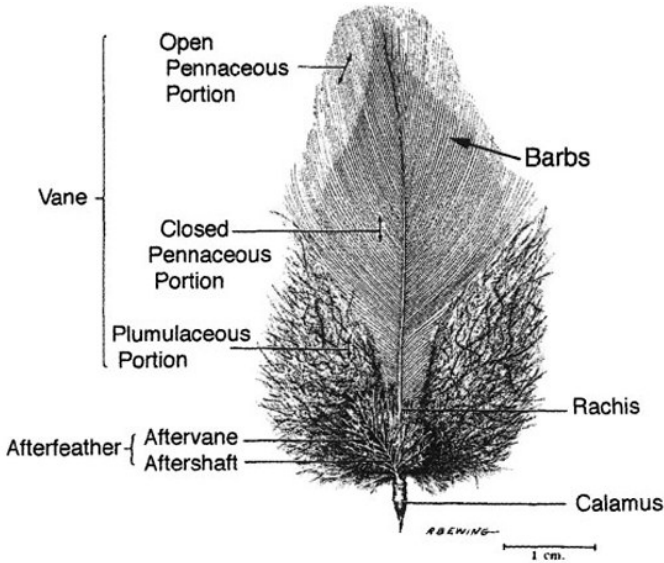
Şekil 1: Farklı uzunluklarda hindi tüyleri

Kaynak: (Lipe vd., 2020)

Hindi tüyleri, kompozitlerde kullanıldığında, daha yüksek lif içeriği ile su emiliminde önemli bir artış gösterir. Tavuk tüyelerine

kıyasla hindi tüyleri daha fazla su emer, bu da daha yüksek hidrofilik bir doğaya işaret eder (SM & S.Jayakrishna, 2023). Hindi tüylerinin diğer doğal liflere kıyasla daha düşük su emme kapasitesi sergilediğini ve bu da onları nem direncinin çok önemli olduğu uygulamalarda avantajlı hale getirdiğini göstermektedir.

Bu özellik, hibrit doğal elyaf takviyeli kompozitlerin dayanıklılığını ve performansını artırır. Kanatlı hayvanlardan tavuk ve hindi tüylerinin kimyasal yapısını gösteren veriler Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre yapı içeriğinin büyük oranda benzerlik arz ettiği görülmektedir. Mevcut içerikler küçük ölçüm farklılıkları göstermek ile beraber büyük oranda tabloda verilen verilere yakınlık arz etmektedir.



Şekil 2: Hindi tüyünün şekli

Kaynak: (George vd., 2002; Prum & Dyck, 2003)

Dariusz ve arkadaşlarının yaptığı analizlere göre tüylerin yapısında C ve H₂, bileşimlerinin neredeyse %59'unu oluşturduğunu ifade etmişlerdir. N₂ (%13,5) ve S (%2,54) oranında var olduğunu ortaya koymuşlardır (Dariusz Kardaś , Jacek Kluska & Szumowski, 2015).

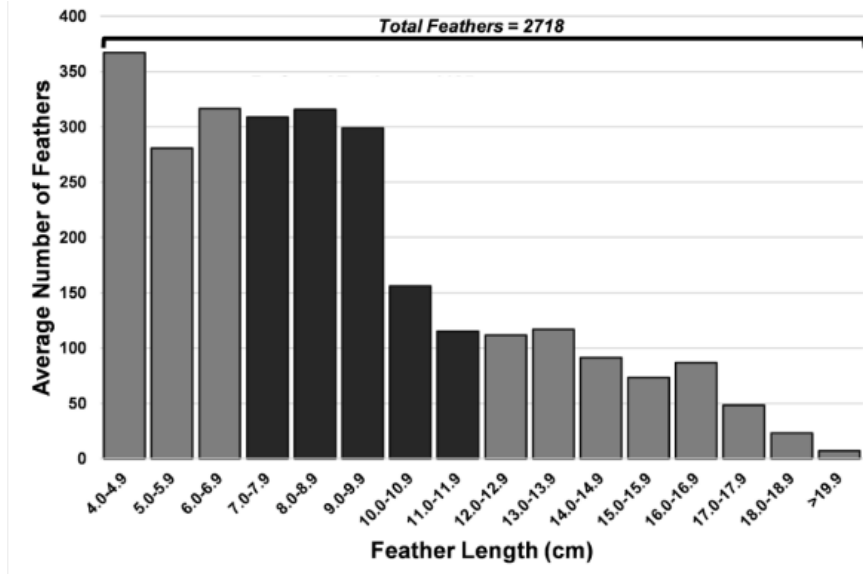
Tablo 3: Hindi ve tavuk tüylerinin kimyasal içeriği

Kimyasal yapısı	Hindi tüyü, % (Kluska vd., 2016)	Tavuk tüyü, % (Kocatepe, 2015; Tesfaye, Sithole, Ramjugernath, vd., 2017)
Karbon (C)	51,54	47,4
Oksijen (O)	24,68	26,57
Hidrojen (H)	7,37	7,2
Azot (N)	13,1	15,1
Kükürt (S)	2,54	2,9
Klor (Cl)	0,82	0,83

Lipe ve arkadaşları, hindi tüylerinden yalıtım amaçlı kullanılabilecek battaniyeler üretmek amacıyla yaptıkları çalışmalarında ihtiyaç duyulan hayvan sayısı, toplam tüy miktarı ve bu üretimi yapmak için hangi uzunluklarda kaç adet tüye ihtiyaç olduğunu analiz etmişlerdir. Yapılan bu çalışmadan hareketle bir hindiden elde edilecek tüylerin ortalama uzunlukları hakkında bir sonuca ulaşmak mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmadan hareketle 2718 adet tüyün ortalama uzunlukları ve kaç adet olduklarını gösteren veriler Şekil 3'te verilmiştir. Araştırmacılar hindi üzerinde zar zor ölçülebilecek kadar kısa olan tüylerden, uzunluğu 20cm'e kadar değişen bir skalada tüylerin olabildiğini ifade etmişlerdir.

Kullanılabilecek uzunluk aralığını ise 4cm-20cm arası tespit etmişlerdir. Bunun yanında Histogram incelendiğinde tüylerin çok büyük bir yüzdesini 4cm-11cm arasındaki tüylerin oluşturduğu görülmektedir. Lipe ve arkadaşları olgun bir erkek hindiden 2700’den biraz fazla tüy elde edilebildiğini ifade etmişlerdir (Lipe vd., 2020).



Şekil 3: Bir olgun erkek hindiden alınan tüylerin uzunluklarına göre ortalama sayısı

Kaynak: (Lipe vd., 2020)

Hindi tüylerinin yıkanması ve dezenfeksiyon işlemleri Yaklaşım

Kanatlı hayvanlara ait tüylerin kesimhanelerde yapılan kesimler sonrasındaki durumuyla kullanımı pek mümkün değildir. Zira kesimhanelerde kesim ve ıslak yolum işlemleri esnasında tüyler ıslanmakta ve hayvana ait kan ve diğer atıklar tüylere bulaşmaktadır. Kirlenen bu tüylerin daha sonraki işlemlere hazır hale getirilmesi

için yıkama, temizleme, kurutma ve dezenfeksiyon işlemlerinin yapılması şarttır.

Bu lifler her ne kadar yün ve ipek lifleri gibi keratin içeriyorsa da yapısı itibari ile özel işlemler ile kullanıma hazırlanması gerekmektedir. Bu tüylerin özellikle ses ve ısı yalıtımı amaçlı kompozit malzeme üretiminde kullanımı hususunda önemli çalışmalar bulunmaktadır. Giriş bölümünde farklı araştırmacıların bu tüylerin yıkanması, temizlenmesi ve dezenfeksiyonu çalışmaları ile ilgili olarak sundukları sonuçlar ve çalışma yapacaklara nerileri incelendiğinde çok farklı yöntemlerin kullanılabildiği ve farklı sonuçlara ulaşılabildiği anlaşılmaktadır. Kompozit retiminde sıklıkla tüylerin kesici bir materyal, giyotin veya mikser gibi karıştırıcılar kullanmak suretiyle parçalandıktan sonra kullanılabileceği bilinmektedir. Bu tüylerin tekstil esaslı kompozit olarak üretimi için bazı aşamalardan geçirilmesi icap etmektedir.

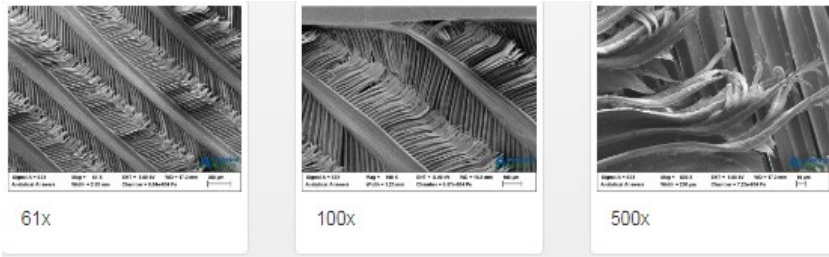
1- Hindi tüylerinin malzeme üretimine hazırlanması: Tüylerin toz, kir, kan ve hayvan üzerine yapışmış diğer karışımlardan temizlenmesi, yıkama, kurutma ve dezenfeksiyon işlemleri anlaşılmalıdır.

2- Hindi tüylerinden lif retimi: Bu aşamada tüyler istenilen uzunlukta kesilerek malzeme üretimine hazırlanmaktadır.

Hindi tüylerinin yapısında çok miktarda gözenek ve odacıkların olması yalıtım esaslı malzeme üretimi için uygun bir hammadde olarak öne çıkarmaktadır. Bu odacıklı ve gözenekli yapısının mutlak suretle değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu alışma hindi tüylerinin malzeme üretimine hazırlanması aşamalarını içermektedir.

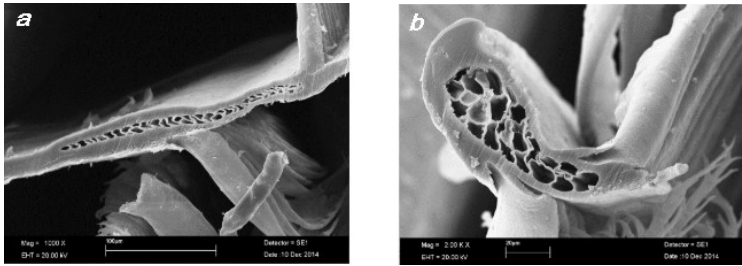
Hindi tüylerinin yapısını gösteren elektron mikroskobu ile farklı büyütme oranlarında alınmış görüntüleri Şekil 4’te verilmiştir. Ayrıca gerek kimyasal gerekse fiziksel yapısı açısından büyük benzerlik gösteren kanatlı hayvanların tüy teleklerinin içyapı görüntüsü de büyük benzerlik göstermektedir. Şekil 5’te buna ait bir görsel verilmiştir.

Yapının iç kısmının gözenekli ve çok sayıda odacıktan oluştuğu görülmektedir. Hindi tüyünün içyapısı da büyük benzerlik göstermektedir.



Şekil 4: Hindi tüylerinin taramalı elektron mikroskobunda farklı büyütme oranlarında alınmış görüntüleri

Kaynak: (By analyticalansw, 2018)



Şekil 5: Tavuk tüyünün kök kısmından (a) ve orta kısmından (b) alınmış SEM görüntüleri

Kaynak: (Kocatepe, 2015)

Materyal

1-Hindi tüyü

Hindi eti üretimi yapan bir işletmeden temin edilen tüyler kullanılmıştır. İşletmeden alınan tüyler üzerinde kesimhane süreci atıkları ile kümes çiftliğindeki mekanik atıklar ile birlikte teslim alınmıştır. Çalışmalarımızda kullandığımız hindi tüylerine ait görsel Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Kullanılan hindi tüyleri

2- Yıkama maddeleri ve ekipman

Yıkama maddelerinin seçiminde kanatlı hayvanlardan tavuk tüyleri ile ilgili yapılmış çalışmalar ve kullanılan yöntemlerden istifade edilmiştir. Kocatepe yaptığı çalışmasında üç farklı yıkama maddesi kullanarak dezenfeksiyon çalışması yapmıştır. Bu çalışmasında yıkama maddelerinin tüyler üzerindeki hem temizleme performansını analiz etmiş hem de yıkama sonrasında lif yapısının yıkama maddeleri kaynaklı olarak bozulup bozulmadığını ortaya koymuştur (Kocatepe, 2015).

Farklı ticari isimlerle satılan bu yıkama maddelerin özelliklerine bakıldığında anyonik, naniyonik ve katyonik özelliklere sahip oldukları görülmektedir. Dolayısı ile Kocatepe hangi iyonik yapıdaki yıkama maddesinin daha efektif olacağını tespit etmeye çalışmıştır. Çalışmasının sonuç verilerinde 40°C sıcaklık ve 60' dakika süre ile saf su ve noniyonik yıkama maddeleriyle yapılan yıkamanın liflerin gözenekli yapısının bozulmaması açısından daha elverişli sonuçlar verdiğini ifade etmiştir (Kocatepe, 2015). Yıkama maddesinin yanında dezenfektan olarak sodyumhipoklorit (NACIO) kullanılmıştır (Kocatepe, 2019). Yıkama işlemleri laboratuvar ortamında ev tipi çamaşır makinasında 800d/dk ayarlanarak yapılmıştır.

Yöntem

1-Yıkama işlemi:

Bir bez torba içerisine konulan hindi tüyleri ev tipi çamaşır makinasına konmuştur. 800d/dk ayarlanan makinaya yıkama maddesi olarak noniyonik bir kimyasal ve dezenfektan olarak ise NACIO makinanın deterjan gözüne konmuştur.

Makine NACIO çözeltisi ile yaklaşık olarak 20dk ön yıkama yapmıştır. Ardından NACIO çözeltisinin tüylerden uzaklaştırılması için 20dk durulama işlemi yapılmıştır. Yaklaşık 40 dk süren ön yıkama ve durulama işlemi sonrasında 60 dakika boyunca noniyonik yıkama maddesi ile esas yıkama, durulama ve sıkma işlemleri yapılarak yıkama tamamlanmıştır.

2- Kurutma işlemi

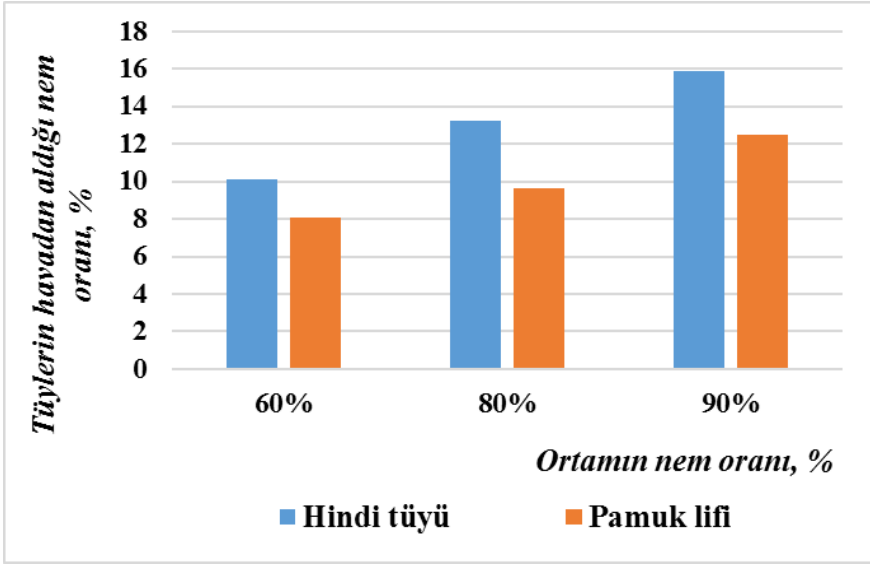
Yıkama işlemi tamamlanan hindi tüyleri yine bez torba içerisinde ve etrafa dağılmayacak şekilde ev tipi kurutma

makinesinde 800d/dk hızda 2 saat işlem görmek suretiyle kurutulmuştur. Tüylerin istenilen düzeyde kurduğundan emin olunması gerekmektedir. Zira bulunduğu ortam yada içinde saklandığı torbanın niteliğine bağlı olarak nem alması mümkün olabilmektedir. Bu da yapının kokmasına veya üretimde sorunların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir.

3- Hindi tüylerinin higroskopik ve su emme özelliklerinin analizi

a-Yıkanmış hindi tüyü liflerinin higroskopik özelliklerinin analizi

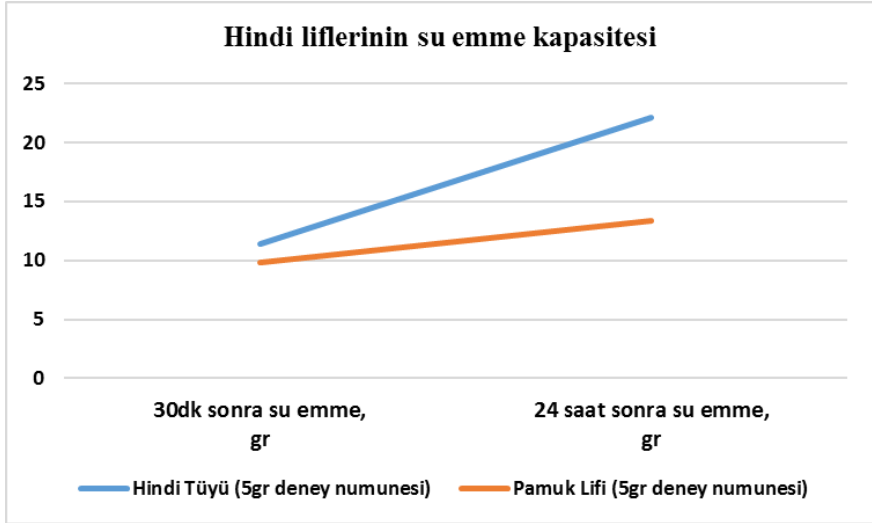
Hindi tüylerinde sap kısmı ile lif kısımları ağırlık olarak tüylerin yapısına bağlı olarak birbirinden farklılıklar göstermektedir. Hayvanın farklı bölgelerindeki tüyler yapısal olarak farklı olduğundan ağırlıkları da farklılıklar arz etmektedir. Kuyruk ve kanat bölgesindeki tüyler daha sert ve kalın olduğundan sap miktarı daha fazladır bu bölgelerde. Boyun, göğüs ve gövde tüylerinde sap daha az olmakla birlikte burada lif daha fazla ve lifler daha kısa bir yapıdadır. Yapılan yıkama sonrasında hindi tüyleri ve kıyaslama yapmak üzere pamuk liflerinin %60, %80 ve %90 bağıl nemli ortamda nem alma yüzdelerini belirlemek üzere iklimlendirme kabiniinde 1 saat bekletilmiştir. Sonuçlar protein esaslı liflerin nemli ortamda havadan nem çekme kabiliyetlerinin selüloz esaslı liflerden daha yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 7).



Şekil 7: Nemli ortamda protein lifi ve selüloz lifinin havadan aldığı nem miktarı

b-Yıkanmış hindi tüyü liflerinin su emme kapasitesinin analizi

Hindi tüylerinin su tutma kapasitesi test edilmiştir. Bu kapsamda 5gr ağırlığında tüy mikserde parçalanmıştır. Bu lif kütlesi beherde 30dk kadar suda bekletilmiştir. Daha sonra hassas tartıda ağırlık ölçülmüştür. Lif kütlesi tekrar suya konmuş ve 24 saat suda bekletilmiştir. Lif kütlesi tekrar tartılarak nihai ağırlık belirlenmiştir. Aynı işlem ve süreler dikkate alınarak pamuk lifi için de veriler alınmıştır. İlk 30dk içinde ve 24 saat sonrasındaki verilere dayalı olarak hazırlanan grafik incelendiğinde hindi tüylerinin selülozik esaslı pamuk lifinden daha fazla su emdiği görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 8: Nemli ortamda protein lifi ve selüloz lifinin su emme kapasitesi

Sonuç ve öneriler

Hindi tüyleri hakkında var olan literatür analiz edildiğinde bu tüylerin çoğunlukla atık halde bulunduğu ve bu durumun araştırmacıların dikkatini çekmeye başladığı anlaşılmaktadır. Atık haldeki bu tüyün katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi ile ilgili önemli araştırma ve gayret olduğu görülmektedir. Tüyün sert yapıdaki rachis ve ondan dallanan liflerin ağırlıkça %50:%50 olduğu hesaplanmıştır. Özellikle kompozit materyal olarak veya dokusuz yüzey olarak üretiminin mümkün olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamından üretici işletmeden alınan kirli tüyler hazırlanmış bir yıkama ve dezenfekte etme reçetesine göre yıkanmıştır. Yıkama işlemi yapılırken tüylerin iç yapısına zarar vermeyecek hassasiyette bir çalışma yapılmıştır. Bir bez torbaya konan tüyler NACIO çözeltisi ile yaklaşık olarak 20dk ön yıkama

ardından NACIO çözeltisinin tüylerden uzaklaştırılması için 20dk durulama işlemi ve sonrasında 60 dakika boyunca noniyonik yıkama maddesi ile esas yıkama, durulama ve sıkma işlemleri yapılarak yıkama tamamlanmıştır. Yapılan yıkama sonrasında kurutma işlemine tabi tutulan tüyler sonraki işlemlere hazır hale getirilmiştir.

Çalışmalar esnasında tüylerin higroskopiklik ve su emme özelliklerinin tespiti amacıyla bazı testler de yapılmıştır. Yapılan test sonuçlarına göre protein esaslı bu tüylerin selüloz esaslı pamuğa göre yapısına %64 oranında daha fazla su alma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

Hindi tüylerinin katma değeri yüksek ürün üretiminde kullanımının mümkün olabildiği, özellikle biyobozunur karakterde yalıtım başta olmak üzere pek çok alanda kullanılabilecek malzeme üretiminde kullanılabileceği düşünülmektedir. Atık haldeki bu malzemenin üstün özelliklerinin açığa çıkarılması için daha fazla araştırma yapılması ve mutlaka insanların kullanımına sunulacak ürünler haline getirilmesi önerilmektedir.

Kaynakça

Alonso, R. S., Sanches, R., Paulo, J., & Marcicano, P. (2013). Chicken Feather - Study Of Physical Properties Of Textile Fibers For Commercial Use. *International Journal of Textile and Fashion*, 3(2), 29–38.

Bansal, G., Jain, Y., Ahmed, Y., Kishore, C., & Agarwal, V. (2021). A comprehensive study on experimental analysis and development methods of chicken feather fiber reinforced bio composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10310–10314. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.455>

Bousshine, S., Ouakarrouh, M., Bybi, A., Laaroussi, N., Garoum, M., & Tilioua, A. (2022). Acoustical and thermal characterization of sustainable materials derived from vegetable, agricultural, and animal fibers. *Applied Acoustics*, 187, 108520. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108520>

By analyticalansw. (2018). *Turkey Feathers: Intricate Structures*. <https://analyticalanswersinc.com/turkey-feathers-intricate-structures/>

Dariusz Kardaś¹, Jacek Kluska¹, J. S., & Szumowski¹, M. (2015). Experimental study of thermal pyrolysis of turkey feathers. *Nhk 技研*, 151(1), 10–17.

Erol, M., & Aydemir, H. (2024). Effect of air gap on sound absorption in layered composite structures produced of sustainable materials. *Journal of the Textile Institute*, 0(0), 1–9. <https://doi.org/10.1080/00405000.2024.2356274>

Evazynajad, A., Kar, A., Veluswamy, S., McBride, H., & George, B. R. (2001). Production and Characterization of Yarns and Fabrics Utilizing Turkey Feather Fibers. *MRS Proceedings*, 702, U1.2.1. <https://doi.org/10.1557/PROC-702-U1.2.1>

Feughelman, M. (2002). Natural protein fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(3), 489–507. <https://doi.org/10.1002/app.2255>

Franke-Whittle, I. H., & Insam, H. (2013). Treatment alternatives of slaughterhouse wastes, and their effect on the inactivation of different pathogens: A review. *Critical Reviews in Microbiology*, 39(2), 139–151. <https://doi.org/10.3109/1040841X.2012.694410>

George, B. R., Bockarie, A., & McBride, H. (2002). Utilization of Turkey feather fibers in erosion control materials. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings*, 1–7. <https://doi.org/10.1115/IMECE2002-39472>

Hansson, K. M., Samuelsson, J., Tullin, C., & Åmand, L. E. (2004). Formation of HNCO, HCN, and NH₃ from the pyrolysis of bark and nitrogen-containing model compounds. *Combustion and Flame*, 137(3), 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.01.005>

Kaynakli, O. (2012). A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 415–425. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.006>

Kluska, J., Kardaś, D., Heda, Ł., Szumowski, M., & Szuszkiewicz, J. (2016). Thermal and chemical effects of turkey feathers pyrolysis. *Waste Management*, 49, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.001>

Kocatepe, S. (2015). Kuş Tüylerinden Tekstil Amaçlı Protein Esaslı Materyaller Üretiminde Hazırlık İşlemleri. İçinde *Kuş Tüylerinden Tekstil Amaçlı Protein Esaslı Materyaller Üretiminde Hazırlık İşlemleri*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kocatepe, S. (2019). Production Of Nonwoven Surfaces From Chicken Feather Fibers For Sound Insulation. Doctoral Thesis, Erciyes Universty.

Kunming, W., & Chuangui, Z. (2021). Cleaning and disinfecting device for down feather processing.

Lipe, W. D., Tushingham, S., Blinman, E., Webster, L., LaRue, C. T., Oliver-Bozeman, A., & Till, J. (2020). Staying warm in the upland southwest: A “supply side” view of turkey feather blanket production. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 34(PB), 102604. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102604>

Ouakarrouch, M., El Azhary, K., Laaroussi, N., Garoum, M., & Kifani-Sahban, F. (2020). Thermal performances and environmental analysis of a new composite building material based on gypsum plaster and chicken feathers waste. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19(March), 100642. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100642>

Paşayev, N., Arabacılar, Z., & Çadir, M. (2022). Cleaning method of chicken feathers to obtain odorless fibers. *Journal of*

Natural Fibers, 19(16), 14666–14677.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2068177>

Paşayev, N., Tekoğlu, O., Kocatepe, S., Erol, M., & Maraş, N. (2021). The Machine Method For Processing Chicken Feathers By Splitting Them into Fibers And Rachis. *Journal of Textiles and Engineer*, 28(124)(December), 248–260.
<https://doi.org/https://doi.org/10.7216/1300759920212812401>

Prum, R. O., & Dyck, J. (2003). A Hierarchical Model of Plumage: Morphology, Development, and Evolution. *Journal of Experimental Zoology Part B: Molecular and Developmental Evolution*, 298(1), 73–90. <https://doi.org/10.1002/jez.b.27>

Reddy, N., & Yang, Y. (2007). Structure and properties of chicken feather barbs as natural protein fibers. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(2), 81–87. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0054-7>

Sara F.A. Awad, Mona M.A.Ashoub, Y. F. A. M. (2021). Evaluation of the bactericidal effect of some disinfectants against E.coli and Salmonella isolated from poultry hatcheries. *Benha Veterinary Medical Journal*, 40(1), 32–33.
<https://doi.org/10.21608/bvmj.2021.54375.1316>

SM, S., & S.Jayakrishna. (2023). Effect of Fiber Composition on Physical and Mechanical Properties of Turkey, Duck, Chicken Feather and Goat Hair Fiber Reinforced Polymer Composites. *EDXJL International Journal on Innovations and Advanced Research*, 01(01), 22–27.
<https://doi.org/10.59599/EDXJL-IJIAR.2022.1104>

Tesfaye, T., Sithole, B., & Ramjugernath, D. (2017). Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route—current status and future prospects. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(10), 2363–2378. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1443-9>

Tesfaye, T., Sithole, B., Ramjugernath, D., & Chunilall, V. (2017). Valorisation of chicken feathers: Characterisation of chemical properties. *Waste Management*, 68, 626–635. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.050>

Xiaolin, H., Kaiming, W., Wei, X., Yun, Z., & Tenghui, X. (2020). *Disinfecting and sterilizing device for down feather*. Patent.

Yanxin, Z., & Le, C. (2016). Novel down feather sterilization and disinfection device. Patent.

Yungang, H. (2018). Disinfecting dedusting method for feather. Patent.

BÖLÜM III

Aerojel İçerikli Tekstil Yüzeylerinin Akustik Özelliklerinin İncelenmesi

Süreyya KOCATEPE¹

Giriş

Gürültü modern hayatın ve teknolojinin bir sonucu olarak, sağlık başta olmak üzere çok sayıda olumsuz yan etkilere sebep olmaktadır; işitme kaybı (Lokhande & ark., 2002), uyku bölünmesi, stres, yorgunluk ve kardiyovasküler hastalıklar (Floud & ark., 2013; Eulalia, 2020) bunların sadece belli bir kısmıdır. Gürültü aynı zamanda biyolojik çeşitliliği önemli ölçüde etkilemektedir (Sordello & ark., 2020). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre gürültü kirliliği, halk sağlığı sorunlarına sebep olan en önemli çevresel faktörlerden biridir (Moszynski & ark., 2011). Gürültü kirliliği

¹ Dr.Öğr.Gör., Fırat Üniversitesi, Elazığ OSB Meslek Yüksek Okulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Elazığ/Türkiye, ORCID: 0000-0002-0646-1380, skocatepe@firat.edu.tr

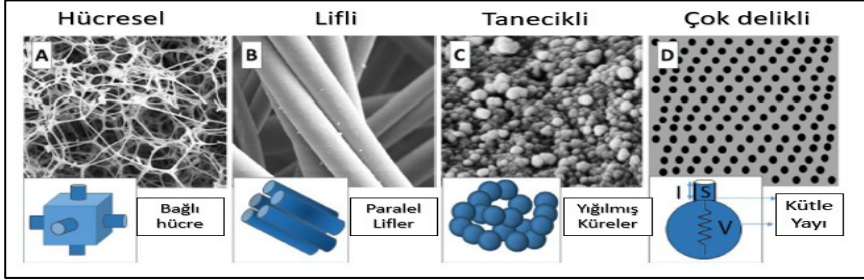
Avrupa genelinde de yeniden canlanan bir sorundur (Eulalia, 2020) ve bunun nedeni sanayileşme (Ahmed & Gadelmoula, 2022), ulaşım (Wang & ark., 2021), hava trafiği (Floud & ark., 2013) inşaat, sosyal etkinlikler (Lokhande & ark., 2022), yiyecek-içecek hizmetleri ve gece hayatıdır. Bu nedenle gürültü ile mücadele gittikçe daha fazla önem kazanmaktadır.

Günümüzde kapalı mekânlarda, uçak, otomobil ve tren vagonları gibi nakliye araçlarında akustik konforun sağlanması modern yaşamın önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Kapalı alanlarda akustik konforu temin etmek için birçok yöntem ve malzemeler geliştirilmektedir. Bunlardan biri de ses emici malzemelerin geliştirilmesi ve uygulanmasıdır.

Ses emici malzemeler genellikle ses enerjisinin çoğunu emebilen ve sesin açık boşluklarına veya kanallarına nüfuz etmesine izin vererek ses yansımalarını önleyebilen orta derecede hava akışı direncine sahip düşük yoğunluklu gözenekli malzemelerdir (Cox, 2005). Gözenekli emici malzemeler hücreli, lifli veya granül malzemeler olarak sınıflandırılabilir; sırasıyla köpükler, dokusuz yüzeyler veya gözenekli beton gibi malzemelerdir. Bu malzemelerin iç yapı görüntüleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

Son dönemlerde polimer içerikli malzemelerin de ses yalıtım materyalleri olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. Bunun ana sebeplerinden birisi bu malzemelerin geleneksel ses yalıtım malzemeleri olan cam yünü ve taş yününden elde edilen gözenekli malzemelerle kıyaslandığında daha hafif olması, kullanım süresi boyunca bozulmaması, düşük toksisiteye sahip olması ve hepsinden öte insan sağlığına zarar vermemesidir. Yapılan çalışmalara

bakıldığında sentetik içeriğe sahip olan materyallerin farklı birleşimlerinden elde edilen ses yalıtım malzemeleri efektif bir sonuç ortaya koymaktadır (Küçük & Korkmaz, 2012).



Şekil 1: Gözenekli emici malzemelerin üç temel tipi (A-C) ve Helmholtz tipi rezonans emiciler

Ses ve ısı yalıtım amaçlı pek çok araştırma yapılmış ve bu araştırmalar ile farklı performans özelliklerine sahip ürünlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Aerojel malzemeler, piyasadaki geleneksel malzemelerle kıyaslandığında, ultra hafif yapıda olmaları, yüksek gözenekliliği, yüksek özgül yüzey alanı, düşük yoğunluğu, düşük dielektrik sabiti, ileri düzeyde ses ve ısı yalıtımı gibi üstün özellikleri bulunmaktadır. Literatür incelendiğinde Aerojeller hakkında önemli bazı araştırmaların olduğu görülmüştür.

Gronauer & Fricke (1986) yapmış oldukları çalışmada, aerojellerde var olan düşük ses hızının havanın iskelet etkileşimlerinden mi yoksa Young modüllerinden mi meydana geldiğini ortaya çıkarmışlardır. Bu tür etkilerin, lifli yapıların işitsel aralıktaki ses dalga boylarıyla karşılaştırıldığında küçük olduğu geleneksel ses emici malzemelerde ise önemli olduğu bilinmektedir. Sesin malzeme içindeki yayılımını malzemenin gözenekli sistem

içindeki hava yolu aracılığıyla olmadığını, iskelet yoluyla meydana geldiğini, bundan dolayı da düşük young modüllerinin havaninkinden daha düşük ses hızlarının temel sebebi olduğu sonucuna varmışlardır. Aerojelin ses yayılımı, yoğunluk 0,100 g/cm³'ün üzerinde olduğunda öncelikle iskeletin elastik özelliklerinden etkilenirken, kapalı hava boşluğundaki atmosferik basınç yoğunluğunun 0,05 g/cm³ olan aerojeller için önemli olduğunu belirtmişlerdir (Gross, 1992, 1998).

Mazrouei-Sebdani(2021), aerojel bazlı malzemelerin uygulamayla ilgili en önemli fiziksel özelliklerini, geleneksel akustik malzemelerle karşılaştırmıştır. Ses emilimi açısından, gözenekli, lifli ve köpüklü malzemelerin geniş bir frekans aralığında emilim gösterdiği, delikli malzemelerin ise dar bir frekans aralığında yüksek ses emilimi göstermiş olduğunu ifade etmiştir. Köpüklü malzemelerin gözenek boyutu ve delikli sistemler için deliklerin boyutu ve deliklerin yüzey yoğunluğu, bunların frekans aralığını ve sesin emilim yüzdesini belirlediği sonucunu ortaya koymuştur.

Moretti ve arkadaşları, silika aerojellerin termal ve akustik performans özellikleri üzerindeki granül boyutunun etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları, normal geliş açısında geleneksel bir empedans tüpü kullanarak iletim kaybını (TL) ölçmeyi içermektedir. Bulgular, 0,01 ile 1,2 mm arasında değişen ve en yüksek yoğunluğu sergileyen küçük granüllerin hem termal hem de akustik özelliklerde üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle, termal iletkenlik λ 10°C'de 19 ile 22 mW/mK arasında değişirken, 20 mm kalınlığındaki küçük granüller için yaklaşık 6400 Hz'de 13 dB'lik bir iletim kaybı elde edilmiştir (Moretti vd., 2017).

Aerojellerin termal ve akustik özellikleri üzerindeki granül boyutunun etkisini ortaya koymak üzere yapılan bir araştırmada küçük (0,01–1,2 mm) ve büyük (1–4 mm) boyutlarda ve 65 ila 85 kg/m³ yoğunluk aralığında değişen dört farklı aerogel türü incelenmiştir. Beş farklı granül tabaka kalınlığı (15, 20, 25, 30 ve 40 mm) için normal geliş açısında iletim kaybı ve akustik yutma katsayısını geleneksel bir empedans tüpü kullanarak ölçülmüştür. Ayrıca, enerji verimliliğini artırmayı amaçlayan iki yenilikçi aerogel bazlı çözümü (bir sıva ve şeffaf polikarbonat panel) ve gevşek granülleri de test edilmiştir. Buna göre; küçük granüllerin hem termal hem de akustik özellikler açısından üstün performans gösterdiği, 40 mm kalınlığında ve yaklaşık 1700 Hz’de TL = 17 dB değerine ulaşarak optimum ses yalıtımı sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca, maksimum normal geliş açısı yutma katsayısının 1700 Hz ile 4100 Hz frekans aralığında zirve yaptığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, maksimum değerlerin frekansı, granül boyutunun büyümesine bağlı olarak azaldığı ifade edilmiştir (Buratti C, 2017).

Monolitik aerogel örneklerinin akustik özelliklerine odaklanan bir çalışmada, granüller için tepe frekanslarının 1700 ile 4100 Hz arasında değiştiği, monolitik örnekler için ise 1100 ile 1500 Hz arasında olduğunu belirlenmiştir. Monolitik panellerin tepe frekansı ve değerindeki azalma, malzemenin granüller türevine kıyasla daha düşük gözenekliliğine dayandırılmıştır. Çalışmada, hızlı süperkritik ekstraksiyon yöntemi ile farklı kalınlıklara sahip üretilen monolitik aerogel panellerin akustik yutma ve iletim kaybı özellikleri Kundt tüpü cihazını kullanarak ölçülmüştür. Sonuçlar, 12,7 mm kalınlığındaki monolitik panellerin yaklaşık 1500 Hz’de 0.88’lik maksimum yutma katsayısına ulaştığını göstermiştir.

Kalınlık arttıkça yutma katsayısı azalmış (0,78 ile 0,54 arasında değişmiş) ve tepe değerler 1300 ve 1100 Hz gibi daha düşük frekanslarda gözlemlenmiştir (Francesca ve ark., 2018).

Kyung Wha Oh ve arkadaşları (Kyung & ark., 2009), ultra gözenekli esnek PET/aerojel battaniyelerin ses yutma ve termal yalıtım özelliklerini incelemiştir. Çalışmaları, farklı pH koşullarında yoğunlaşma ve matris gömme süreçleri sırasında üretilen hibrit PET/silika aerojel battaniyelerde, silika aerojel boyutunun ve içeriğinin etkisini değerlendirmiştir. Kalınlığı sabit 5 mm olan bu battaniyelerin yoğunluğunun, aerojel ilavesiyle arttığı bulunmuştur. PET/silika aerojel battaniyelerin ses yutma katsayısı, 1000 Hz'nin altındaki frekanslarda nispeten düşük ve sabit (0,1'in altında) kalırken, 1000 Hz'yi aşan frekanslarda özellikle yüksek frekans aralıklarında önemli bir artış göstermiştir.

Mahesh ve arkadaşları (Mahesh & ark., 2016), farklı kalınlık ve granül boyutlarına sahip aerojel tabakalarının yutma katsayısı ve iletim kaybını ölçmüştür. Bulgular, granül boyutu ve kalınlık arttıkça her iki özelliğin de azaldığını ortaya koymuştur. 5 cm kalınlığındaki tabakalar için küçük granüller 0,86, büyük granüller ise 0,81'lik bir maksimum yutma katsayısına ulaşmış, bu değerler 980 Hz frekansında ölçülmüştür. Ortalama iletim kaybı ise küçük granüller için 14,8 dB, büyük granüller için 15,4 dB olarak kaydedilmiştir.

Aerojel bazlı malzemeler üzerine yapılan bu çalışmalar, granül boyutu, yoğunluk ve malzeme kompozisyonunun termal ve akustik performans üzerinde önemli bir etkisi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Küçük granüller genellikle daha iyi bir performans sergilerken, yenilikçi üretim teknikleri ve hibrit

malzeme kombinasyonları, gelecekte aerogel uygulamalarında daha geniş bir potansiyele işaret etmektedir.

Bu çalışmada, ısı yalıtım özelliğinin yanı sıra pek çok alanda ön plana çıkan aerogellerden akustik amaçlı üretmiş olduğumuz tekstil esaslı materyallerin üretim süreçleri hakkında genel bilgiler ile bazı performans değerleri sunulacaktır.

Aerogeller hakkında

Aerogeller, genel olarak iki kategoriye ayrılabilen çok çeşitli bir malzeme sınıfıdır: monolitik ve toz formlarda bulunabilirler. Aerogeller ayrıca organik, inorganik ve hibrit formlarda da sentezlenebilir ve bunların sınıflandırılması, mikro gözenekli, mezo gözenekli ve birleşik olarak kategorize edilebilen gözeneklerinin doğasına ve boyutuna göre de yapılabilir (Prashant, 2023).

Aerogeller, yapı olarak %99 oranında hava boşluklarından oluşur ve bu sayede oldukça gözenekli ve hafif bir yapıya sahiptirler. Ayrıca çevre dostu olmaları, yüksek orandaki kimyasal ve termal kararlılıkları, sahip oldukları yüksek dayanımları bu malzemeleri bir tekstil yüzeyi olan dokusuz yüzey yapılarıyla beraber kullanıldığında akustik ve termal amaçlı çok işlevsel bir malzeme haline getirir.

Silika, alümina veya titanyum gibi inorganik aerogellerin yanı sıra, biyouyumluluk ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi ek istenen özellikleri nedeniyle çeşitli organik aerogeller de sentezlenmiştir. Bu nanoyapılı malzemeler, jelleşme işlemi sırasında kullanılan kalıbın şekline bağlı olarak farklı monolitik formlarda sentezlenebilir. Ayrıca, sentez yönteminin seçimine bağlı olarak membranlar, levhalar, boncuklar, küreler ve battaniyeler de

hazırlanabilir. Elde edilen aerojel parçacık formunda isteniyorsa, damlatma yöntemi, emülsiyon polimerizasyonu ve püskürtme kullanılabilir.

Aerojel malzemeler, piyasadaki geleneksel malzemelerle kıyaslandığında, ultra hafif yapıda olmaları, yüksek gözenekliliği, yüksek özgül yüzey alanı, düşük yoğunluğu, düşük dielektrik sabiti, ileri düzeyde ses ve ısı yalıtımı gibi üstün özelliklerinden ötürü pek çok araştırmacının ve sektörde hizmet veren iş insanının dikkatini çekmekte ve bu alanda çalışma ve yatırım yapmaya teşvik etmektedir. Aerojellerin tespit edilen fiziksel bazı özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Gözenekli ve hafif yapıları ile akustik olarak iyi performans gösteren aerojeller, geleneksel malzemelerle birlikte kullanıldığında akustik anlamda bir takım iyileştirmeleri sağlayacağı düşünülmektedir.

Tablo 1: Aerojelin fiziksel özellikleri

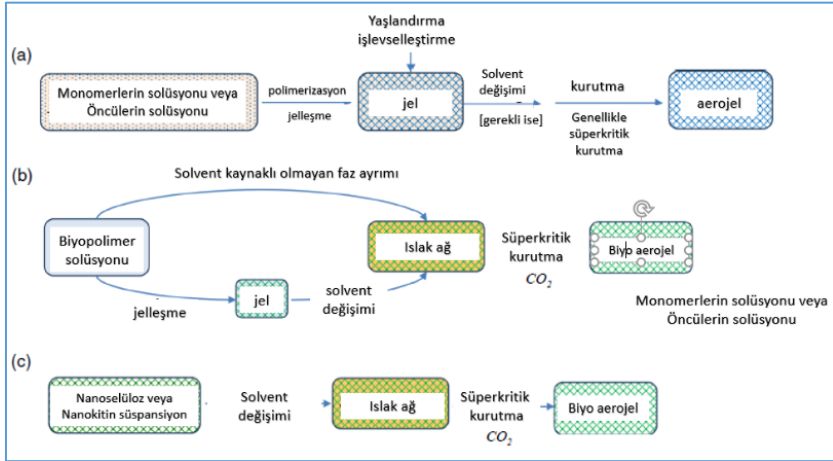
Özellikler	Değer
Yoğunluk	0.003-0.35 g/cm ³
İç yüzey alanı	600-1000 m ² /g
İçindeki katı miktarının oranı	0.13-15%
Gözenek çapı	~ 20 nm
Isı yalıtımı	0.013 W/m.K
Termal tolerans	500 C°’ye kadar
Termal genleşme katsayısı	2.0-4.0 x 10 ⁻⁶
Çekme mukavemeti	16 kPa
Dielektrik sabiti	~1.1

Kaynak: (Gurav vd., 2010)

Aerojel malzeme üretim yöntemi

Aerojeller, sol jel ile jelin hazırlanması, jelin yaşlandırılması ve süper kritik kurutma olmak üzere üç aşamada hazırlanan yüksek

gözenekli materyallerdir. Aerojeller üç fiziksel bileşenden oluşur. Katı fazın kimyasal olarak etkisi, farklı bileşenlerin sahip olduğu özellikler ve etkileri, yapının gözeneklilik boyutu aerojellere bir takım özel ve eşsiz özellikler sağlamaktadır. Tüm bu özelliklerde aerojelleri farklı sektörlerde kullanımı konusunda ön plana çıkarmaktadır (Woignier & ark., 2018). Aerojellerin hazırlanmasında farklı polimer ve inorganik öncüllerin, doğal polimer çözeltilerin ve doğal nanopartikül süspansiyonlarının durumunu gösteren akış süreçleri Şekil 2’de verilmiştir.



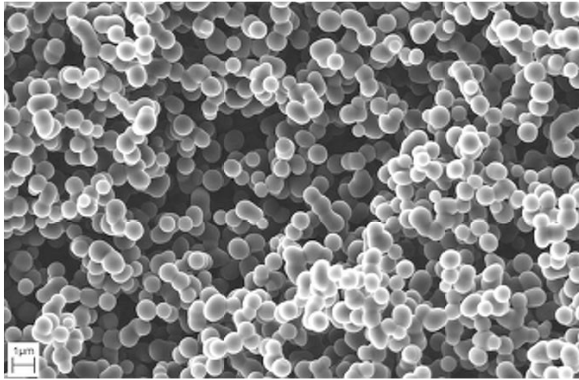
Şekil 2: Aerojellerin hazırlanmasındaki ana yaklaşımlar: a) sentetik polimer ve inorganik öncüllerin durumu, b) doğal polimerlerin çözeltileri durumu, c) doğal nanopartiküllerin süspansiyonları durumu

Aerojellerin üretimine baktığımızda, üretim sırasında yapıda hacimsel anlamda bir büzülme meydana gelmektedir. Bu durumun yüksek sıcaklıklarda daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Yapıda meydana gelen bu sınırlamalar, aerojellerin sentez sonrası

herhangi bir şekilde işlenmesini engellemekte ve sonuç olarak yapısal, termal ve akustik uygulamalar için yeterli mekanik özellikler sağlamak amacıyla diğer ilgili malzemelerle karıştırılması işlemlerini zorlaştırmaktadır.

Bu bağlamda birçok araştırmacı aerojelleri, organik/inorganik liflerle takviye ederek mekanik özelliklerini iyileştirmeye çalışmıştır (Anthony&ark., 2023; Hu &ark., 2023; Maleki & ark., 2014a; Mazrouei-Sebdani & ark.,2022; Yang & ark.,2011; AbdulHalim & ark.2017; Ahmad & ark., 2023; Choi & ark.,2019; Nazeran & Moghaddas,2017; Szczepaniak&ark., 2021; Karami & ark., 2018; Kucharek & ark., 2020; Boday & ark., 2012; Ceylan & Yılmaz,2022; Deka & ark.,2019; Hu & ark.,2023; Li & ark.,2017, 2022; Lu & ark.,2004; Mazrouei-Sebdani & ark., 2015; Tian & ark.,2022; Venkataraman & ark.,2016; Zhang & ark.,2022; Ramesh & ark.,2017; Hayase & ark.,2011; Sert Çok & Gizli, 2022).

Üretilmiş aerojelin electron mikroskobu altındaki görüntüsü Şekil 3’te verilmiştir.



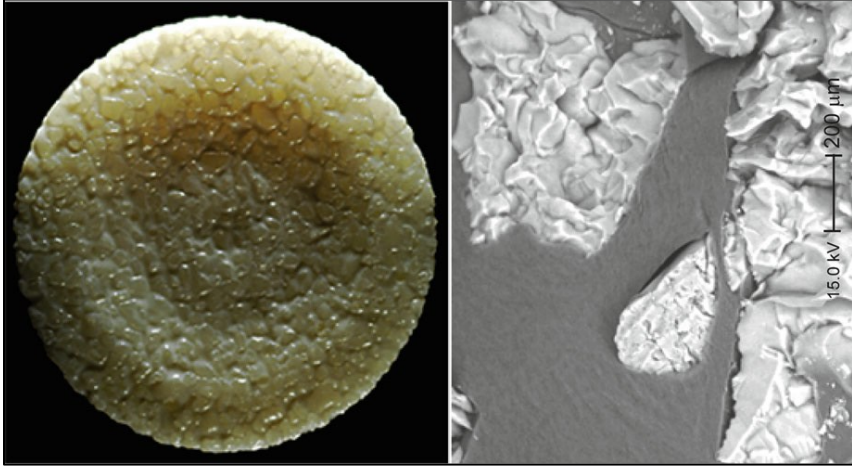
Şekil 3: Aerojelin elektron mikroskobu altındaki görüntüsü

Esasında aerojellerin tekstilde en sık kullanıldığı alan ısı yalıtımı olarak bilinse de, hava ve su geçirgenliği, su geçirmezlik, ses yalıtımı, elektromanyetik radyasyon önleme, alev geciktirme, kimyasal koruma ve tekstildeki işlem atıklarının arıtılması gibi pek çok farklı alanda da kullanıldığı bilinmektedir (Karabulut, 2022).

Literatüre baktığımızda aerojellerin akustik performans amaçlı üretildiği az sayıda çalışma bulunmaktadır. Özellikle tekstil sektöründeki uygulamalara göz attığımızda, aerojeller genellikle granül halde eriyik polimer yapıların içerisine gömülmekte, yâda reçinelerin içerisinde toz formda eklenip daha sonra da bir kumaş yüzeyine ince bir film olarak kaplanmaktadırlar. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise aerjel katkılı ipliklerin üretimi ve battaniye (blanket) olarak isimlendirilen yapıların üretilmesi ön plana çıkmaktadır. Yukarıda bahsedildiği gibi aerjel ürünlerin çok çeşitli olması ama aynı zamanda da bunların akustik özellikleri hakkında çok fazla bilginin olmaması, aerojellerin bu alandaki kullanımını karmaşık hale getirmektedir. Literatüre baktığımızda aerojeller çok çeşitli kompozit malzemelere (elyaf keçeler, polimerler, inorganik sıvalar ve beton, camlama sistemleri) dâhil edilebilir ve kompozitin doğası, bazen aerjelin özelliklerinden daha fazla akustik özellikler üzerinde baskın kontrol olabilir. Ayrıca bu ürünlerde soğurucuların bileşimine, kalınlığına ve yüzey şekline bağlı olarak ses yutma özellikleri, montaj yöntemi (hava boşluğu) ve gelen sesin frekansı da oldukça önem taşımaktadır.

Aerjellerin diğer potansiyel uygulamaları arasında akustik yalıtım, katalizörler, gaz filtreleri ve aynı zamanda gez depolama malzemeleri, iletken ve dielektrik malzemeler yer almaktadır. Ancak bu malzemeler henüz piyasada önemli bir etki yaratmamıştır (Merli,

2019). Silika aerogeli, elyaf matrisine takviye etmek, sentezdeki basitliğinden dolayı büyük ilgi görmektedir. Bu alanda fiber takviyeli silika aerogel kompozitlerin bazıları ticarileştirilmiştir (Li & ark.,2016; Linhares & ark.,2019; Mazrouei-Sebdani & ark.,2022)



Şekil 4: Bir polimere gömülü silika aerogel boncuklarının fotoğrafı (solda) ve taramalı elektron mikroskobu (sağda).

Silika aerogel gözeneklerindeki uzunlamasına ses hızı, tipik olarak 100 m/s veya daha az olmasına rağmen (Akimov, 2003; Hrubesh, 1995), gözeneksiz silika aerogeller için bu rakam 5000 m/s veya daha azdır (Gross, 1992). Aeroejllerden ses yutumu ve yalıtımı amaçlı elde edilen materyaller önemli derecede malzemenin hazırlanma yöntemine, aerogelin yoğunluğuna ve gözenekliliğine bağlı durumdadır.

Bir aerogeldeki ses zayıflaması, gaz fazından katı faza art arda yayılan akustik dalgalarda meydana gelen enerji kaybının oranına dayanır. Bu durum, ses dalgalarının genliğini ve hızını azaltarak ses dalgalarının yavaşlamasına ve daha hızlı dağılmasına

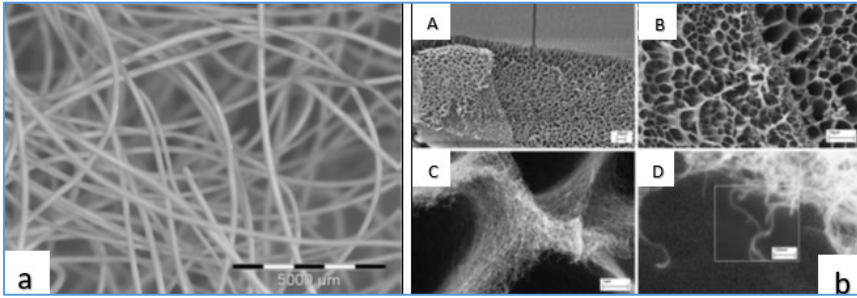
neden olur. Sonuç olarak bu durum, aerojelleri akustik yalıtım için kullanım açısından elverişli malzemeler haline getirir (Merli, 2019).

Silika aerojelleri (Wang, 2010), parçacık ağ yapısından kaynaklı sahip oldukları özelliklerden dolayı olağandışı akustik özellikler sergilerler. Örneğin sesin havada 343 m/s ve silika cam içinde 5000 m/s hızla yayılması ile kıyaslandığında, 0,07-0,3 g/cm³ arasındaki yoğunluğa sahip olan aerojellerin yayılma hızı 100-300 m/s gibi son derece düşük ses hızlarıdır.

Literatürde yapılan çalışmalara göz attığımızda aerjel esaslı akustik ses yalıtım malzemeleri ile ilgili bazı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, Gross ve arkadaşları (1992) yaptıkları çalışmada malzeme yoğunluğunun düşmesiyle birlikte ses hızının da düştüğünü görmüşlerdir. Katılarda boyuna ses hızı elastik sabitlerle ilişkilidir. Young modülüyle ilişkili kütle ve kayma modülü ısıtma işlem görmüş aerojeller, işlem görmemiş aerojellerden daha yüksek ses hızları sergiler, çünkü ısıtma nano parçacıklar arasındaki inci kolye ağ yapısı dediğimiz yapının bağlantı derecesini artırır (Gross, 1992).

Silika aerojellerin yanında, selüloz da aerjel üretiminde en çok kullanılan hammaddelerden birisidir. Bilindiği üzere selüloz, her türlü kumaşın üretildiği elyaf, filament ve iplik üretiminde kullanılan en eski malzemelerden biridir. Günümüzün filament ve iplik üretimi hem doğal hem de sentetik polimerlerin alanıdır (Rogowin, 1982). Günümüzde kullanılan tüm elyaflar kompakt bir mikro yapıya ve çok büyük bir en-boy oranına sahiptir. Bunların aksine Hacker ve arkadaşları (2009) sol-jel rutini kullanarak ilk kez açık gözenekli, nano yapıli bir selüloz aerjel filamentli üretmişlerdir. Çalışmada,

lifler ıslak eğirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Sıcak çözelti, 200 mL hacimli, termal olarak yalıtılmış bir enjeksiyon cihazına doldurulmuş ve 250 mm çapında bir açıklığa sahip bir püskürtme memesinden geçerek doğrudan bir etanol banyosuna 3 MPa ile preslenmiştir. Bunu yaparken filamentler soğutulmuştur. 80°C'nin altında viskoz çözelti jelleşmiş ve oda sıcaklığında seramik kıvamına gelmiştir. Selüloz bir etanol banyosunda rejenere edilmiştir. Yenilenen lifler süper kritik olarak kurutulmuştur. Lifler yoğunluklarına, spesifik yüzey alanına, gözenek dağılımına, mikro yapıya (SEM) ve gerilme mukavemetine (filamentlerin kırılmasını ve filamanları sabitleyen germe kelepçelerinde kırılmamasını sağlamak için özel bir cihaz kullanılarak) göre karakterize edilmiştir. Süper kritik olarak kurutulmuş filamentlerin bir örneği Şekil 5(a)'da gösterilmektedir.



Şekil 5: Kuru yoğunluğu 124 kg/m³ olan, süper kritik kurutmadan sonra selüloz aerogel filamentinin ışık mikroskopik resmi (a), ağırlıkça %3 selüloz içeren bir aerogel filamentinin farklı büyütmelerde SEM resmi (b)

Kaynak: (Schmenk vd., 2002)

Şekil 5 (b)-D'deki SEM görüntüleri, aerogel filamentlerinin nano düzeyde orta ölçekli yapısını göstermektedir. Şekil 5(b)-A'da

lifin yüzeyinin bir kısmı pul pul dökülmüştür. Lifler tipik manto-çekirdek yapısını sergiler ve bu durum selüloz lifi üretiminden iyi bilinmektedir (Rogowin, 1982). Manto, genellikle selülozun mikro kristallerinin hızlı kristalleşmesine atfedilir; bu, memecikteki yaklaşık 110°C' sıcaklıktan, eğirme deliğinin altındaki etanol banyosundaki oda sıcaklığına kadar hızlı soğumanın bir sonucu olabilir. Yüzeyin altındaki yapı açık gözenekli bir süngere benzemektedir (Şekil 5 (b)-B).

Lifler, ağırlıkça %3 selülozdan yapılan monolitlerle karşılaştırıldığında yaklaşık 124 kg/m³ yoğunlukla oldukça yoğundur. Bu gerçek, süngerimsi mezo-gözenekler açısından şaşırtıcıdır ve aerojel filament eğirme işleminin daha da geliştirilebileceğine işaret etmektedir. Çalışmada spesifik yüzey alanı yaklaşık 180 m²/g olarak ölçülmüştür.

Çekme mukavemeti 1,4 MPa'ya kadar çıkmaktadır ve dolayısıyla monolitler için bildirilen 100 kPa aralığındaki mukavemetten daha yüksektir. Kırılma gerilimi yaklaşık %10'dur. Lifler geleneksel tekstil ölçümleri kullanılarak eşit şekilde karakterize edilebilir. Standart tanım kullanıldığında 59 dtex yoğunluğa ve 1,1 cN/tex mukavemete sahiptirler. Bu değer, mukavemeti en az 30 kat daha yüksek olan geleneksel tekstil lifleriyle (Rogowin, 1982) karşılaştırıldığında çok düşüktür. Mukavemetin dahada iyileştirilebilmesi için yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Deneyisel çalışma

Akustik amaçlı aerojel bir ürün üretme amacıyla yaptığımız laboratuvar ön çalışmalarının kısa özetini ve aerojel materyaller

hakkında yapılmış çalışmalar ile ilgili literatür analizini içeren bu çalışmanın bu bölümünde deneme çalışmamızın stratejisi hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmanın daha detaylı sonuçları farklı yayınlarda daha etraflıca paylaşılabacaktır.

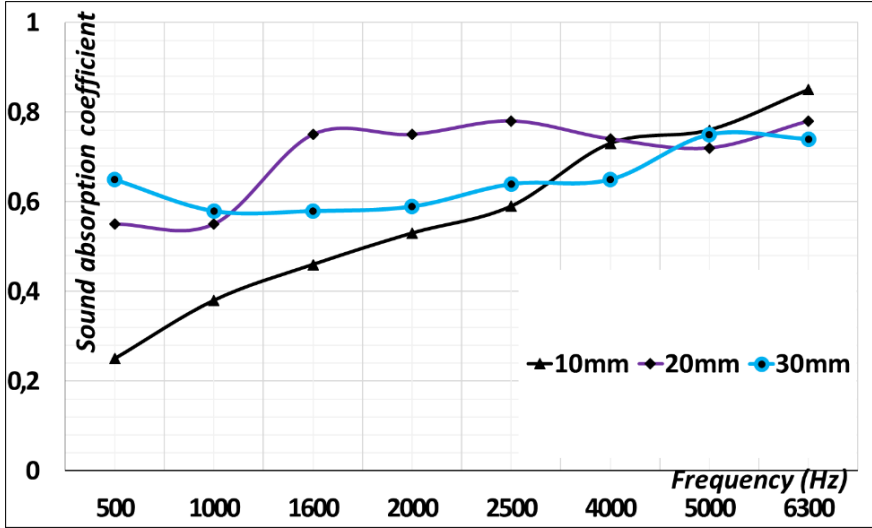
Sol jel polimerizasyonu yöntemini kullandığımız bu çalışmada silika aerogelleri sentezlenmiştir. Bu işlem sol oluşumu, jelleşme ve kurutma aşamalarından oluşmaktadır. Ön maddeler hidrolize tabi tutulmuş ve yapının içerisine ilave ettiğimiz katalizör sayesinde hızlandırılmıştır. Daha sonra hidrolize olan moleküller bir ağ oluşturmak üzere yoğunlaşma reaksiyonuna girmiştir. Bunun sonucunda bir jel elde edilmiştir. Elde edilen bu jellerin çok düşük mukavemete sahip olması sebebiyle ilave bazı işlemlere ihtiyaç olduğu görülmüştür. Aerogel üretim basamaklarının bu aşamasında Jellere mukavemet kazandırmak için yaşlandırma denilen işleme tabi tutulmalıdırlar. Yaşalandırma işleminden sonra gözenekler içerisinde kalan sıvıyı değiştirmek adına çözücü işlem uygulanmıştır. Bu işlem için alkol kullanılmış ve bu sayede yapı içerisindeki çözücüler uzaklaştırılarak daha saf bir yapı elde edilmiştir. Aerogel sentezinde gerçekleştirilmesi gereken nihai adım, alkojeller olarak da adlandırılan bu ıslak haldeki jelleri yapılarına zarar vermeden kurutmaktır.

Aerogel üretiminin bu aşamasında üç farklı kurutma yöntemi bulunmaktadır. Ortam basıncında kurutma, süperkritik kurutma veya dondurarak kurutma şeklindeki bu üç işlemten süperkritik kurutma yöntemini tercih ederek işlem uygulanmıştır. Etanol organik çözücü kullanılarak yüksek sıcaklık ve basınca maruz bırakılmıştır. Burada amaç dış basıncı organik çözücünün basıncının üzerine çıkarıp çözücünün sabit bir sıcaklıkta dışarı atılmasını

sağlamaktır. Basınç dengesi sağlandıktan ve çözücünün ayrıldığı anlaşıldıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

Süper kritik kurutma fazlaca tercih edilen bir yöntem olması sebebiyle seçilmiştir. Bu yöntemde gözenekler arasında buhar-sıvı arayüzeyinin oluşması engellendiğinden dolayı sağlam bir kurutma yapılmış ve mukavemeti yüksek gözenekli yapıların elde edilmesi sağlanmış olmaktadır.

10 mm, 20 mm ve 30 mm kalınlıkta üretilen yüzeylerin empedans tüpünde yapılan ses ölçümleri sonucunda elde edilen verilere ait grafikler incelendiğinde düşük ve orta frekans aralıklarında önemli derecede yutumun sağlandığı görülmektedir. Malzeme kalınlaştıkça düşük frekans aralıklarında daha iyi yutum performansı gösterdiği görülmektedir. Ancak kalınlığın belli bir seviyeden sonra artması ses yutum kabiliyetini daha fazla artırmamakta aksine düşürmüştür. 20mm kalınlıktaki materyalin düşük ve orta frekans aralıklarında en iyi ses yutumunu sağladığı tespit edilmiştir. En ince olan (10mm) numunenin ise yüksek frekanslarda daha iyi ses yutumuna sahip olduğu belirlenmiştir. 10mm, 20mm ve 30mm kalınlıkta üretilen numunelerin 500Hz-6300Hz frekans aralıklarında ses yutum katsayısı sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: 10mm, 20mm ve 30mm kalınlıkta üretilen numunelerin 500Hz-6300Hz frekans aralıklarında ses yutum katsayısı sonuçları

Sonuç ve öneriler

Yapılan araştırmalar, aerojel bazlı tekstil esaslı malzemelerin hem termal hem de akustik performans açısından geleneksel izolasyon malzemelerine kıyasla üstün özelliklere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle tekstil tabanlı aerojel kompozitlerin hafif, esnek ve dayanıklı yapısı, bu malzemeleri yapı sektörü, otomotiv endüstrisi ve giyilebilir teknolojiler gibi birçok farklı alanda cazip hale getirmektedir.

Araştırma bulgularına göre, aerojel granül boyutunun ve malzeme kompozisyonunun, termal iletkenlik ve akustik yalıtım performansı üzerinde belirgin bir etkisi bulunmaktadır. Küçük granüller, yüksek yoğunlukları nedeniyle, özellikle daha iyi termal ve akustik yalıtım sağlamaktadır. Silika aerojel esaslı tekstil malzemeleri, yüksek frekanslarda ses yutma performansı ile öne

çıkarken, orta ve düşük frekanslarda da iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Literatür verilerine dayalı olarak termal iletkenlik değerleri (~ 19 mW/mK) incelendiğinde ısı yalıtımında da oldukça etkili sonuçlar sunmuş olduğu anlaşılmaktadır.

Aerojel tekstil malzemeleri, aynı zamanda çevresel koşullara dayanıklı yapılarıyla uzun süreli performans göstermektedir. Bu malzemeler, özellikle esnek PET/silika aerojel battaniyelerde olduğu gibi, düşük frekanslarda sınırlı bir performans sergilese de, yüksek frekanslara geçişle birlikte ses yutma kapasitesini belirgin şekilde artırmaktadır. Bunun yanı sıra, çok katmanlı yapıların kullanımı, veya hibrit bazı materyallerin üretimi düşük frekanslardaki yalıtım performansını da artırma potansiyeli taşımaktadır.

Tüm bu özellikler, aerojel bazlı tekstil malzemelerinin hem akustik hem de termal performansı optimize eden, yenilikçi ve sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu malzemelerin yüksek üretim maliyetleri, ticari uygulamalarda geniş çaplı kullanımını sınırlayan önemli bir engel olarak görülmektedir. Ancak, hibrit aerojel malzemelerin geliştirilmesi ve maliyetleri düşürecek yenilikçi üretim tekniklerinin uygulanması, bu sınırlamayı aşmak için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Gelecekte, aerojel bazlı tekstil malzemelerinin enerji verimliliği sağlama, akustik konforu artırma ve sürdürülebilir yapı malzemeleri üretme hedeflerine yönelik olarak daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, hem termal hem de akustik performansını artıran, düşük maliyetli ve çevre dostu çözümler

geliştirilmesi, bu yenilikçi malzemelerin daha geniş uygulama alanlarına entegrasyonunu mümkün kılacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Tübitak 2219 Doktora Sonrası Araştırma Bursu kapsamında yürütülen proje destekleri ile gerçekleştirilmiştir. Finansal katkıları ve oluşturdukları imkndan dolayı TÜBİTAK ve RWTH Aachen Institute of Textile Technology'ye teşekkürlerimi sunarım.

Kaynakça

Abdul Halim, Z. A., Mat Yajid, M. A., Idris, M. H., & Hamdan, H. (2017). Effects of silica aerogel particle sizes on the thermal–mechanical properties of silica aerogel – unsaturated polyester composites. *Plastics, Rubber and Composites*, 46(4), ss:184–192. <https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1306913>

Ahmad, S., Ahmad, S., & Sheikh, J. N. (2023). Silica centered aerogels as advanced functional material and their applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 611, 122322. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122322>

Ahmed, S.S., Gadelmoula, A.M. (2022). Industrial noise monitoring using noise mapping technique: a case study on a concrete block-making factory. *Int J Environ Sci Technology*, 19:851–862, <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02982-9>

Akimov, Y.K. (2003). Fields of application of aerogels. *Instrum. Exp. Tech*, 46 (3), ss:287–299, <https://doi.org/10.1023/A:1024401803057>.

Anthony, D. B., Nguyen, S. N., Qian, H., Xu, S., Shaw, C. M. D., Greenhalgh, E. S., Bismarck, A., & Shaffer, M. S. P (2023). Silica aerogel infused hierarchical glass fiber polymer composites. *Composites Communications*, 39, 101531. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2023.101531>

Boday, D. J., Muriithi, B., Stover, R. J., & Loy, D. A. (2012). Polyaniline nanofiber-silica composite aerogels. *Journal of NonCrystalline Solids*, 358(12-13), ss:1575–1580. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.04.020>.

Buratti, C., Merli, F., Moretti, E., Zinzi, M. (2017). High Energy-Efficient Windows with Silica Aerogel for Building Refurbishment: Experimental Characterization and Preliminary Simulations in Different Climate Conditions Buildings 7, 8. <https://doi.org/10.3390/buildings7010008>

Ceylan, M., & Yılmaz, E. B. (2022). Fabrication of polycaprolactone-silica aerogel nanofibers via electrospinning method. *Journal of Nano Research*,73,ss:161–174. <https://doi.org/10.4028/p-9w4o39>

Choi, H., Parale, V. G., Lee, K.-Y., Nah, H.-Y., Driss, Z., Driss, D., Bouabidi, A., Euchy, S., & Park, H.-H. (2019). Polypropylene/silica aerogel composite incorporating a conformal coating of methyltrimethoxysilane-based aerogel. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*,19(3),1376–1381. <https://doi.org/10.1166/JNN.2019.16257>

Cox, T. J., D'antonio, P. (2005). Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application. *J. Acoust. Soc. Am.*117 (3), ss:988, <https://doi.org/10.1121/1.1861060>

Deka, B. J., Lee, E. J., Guo, J., Kharraz, J., & An, A. K. (2019). Electrospun nanofiber membranes incorporating PDMS-aerogel superhydrophobic coating with enhanced flux and improved antiwettability in membrane distillation, *Environmental Science & Technology*, 53(9), ss:4948–4958.<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07254>

Eulalia, P. (2020). Noise pollution is a major problem, both for human health and the environment. <https://www.eea.europa.eu/articles/noise-pollution-is-a-major>

Floud, S., Blangiardo, M., Clark, C. (2013). Exposure to aircraft and road traffic noise and associations with heart disease and stroke in six European countries: a crosssectional study. *Environment Health*, 12:89. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-12-89>

Francesca, M., Anderson, A. M., Carroll, M. K., Buratti, C. (2018). Acoustic measurements on monolithic aerogel samples and application of the selected solutions to standard window systems, *Applied Acoustics*, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.008>

Gronauer, M., Fricke, J. (1986). Acoustic properties of microporous SiO₂-aerogel, *Acta Acust. united Acust.*, 59 (3), ss: 177–181.

Gross, J., Fricke, J., Pekala, R., Hrubesh, L. (1992). Elastic nonlinearity of aerogels, *Phys. Rev. B*, 45 (22), ss:12774, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.45.12774>.

Gurav, J. L., Jung, I. K., Park, H. H., Kang, E. S., & Nadargi, D. Y. (2010). Silica aerogel: Synthesis and applications. *Journal of Nanomaterials*, ss:1–11. <https://doi.org/10.1155/2010/409310>

Hacker, H., Gries, T., Popescu, C., Ratke, L. (2009). Solution spinning process for highly porous, nanostructured cellulose fibers. *Chemical Fibers*. (59), ss:85 – 87.

Hayase, G., Kanamori, K., Nakanishi, K., Hanada, T. (2011). Synthesis of new flexible aerogels from di- and trifunctional organosilanes. *MRS Proceedings*, 1306, ss:1–6. <https://doi.org/10.1557/opl.2011.216>

Hrubesh, L.W., Poco, J.F. (1995). Thin aerogel films for optical, thermal, acoustic and electronic applications. *J. Non-Cryst. Solids*, 188(1-2), ss:46–53, [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(95\)00028-3](https://doi.org/10.1016/0022-3093(95)00028-3).

Hu, Y., Cao, M., Xu, J., Liu, X., Lu, J., Yan, J., Huan, S., Han, G., Bai, L., Cheng, W., & Rojas, O. J. (2023). Thermally insulating and electroactive cellular nanocellulose composite cryogels from hybrid nanofiber networks. *Chemical Engineering Journal*, 455, 140638. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140638>

Karabulut, C., (2022). Konvansyonel Malzemeler İçin Aerojel Takviyesi İle Düşük Termal İletkenlik, Düşük Akustik İletkenlik ve İyi Mekanik Özelliklere Sahip Süper Yalıtım Keçelerim Geliştirilmesi. Doktora Tez, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa

Karami, S., Motahari, S., Pishvaei, M., & Eskandari, N. (2018). Improvement of thermal properties of pigmented acrylic resin using silica aerogel. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(1), 45640. <https://doi.org/10.1002/app.45640>

Kucharek, M., MacRae, W., & Yang, L. (2020). Investigation of the effects of silica aerogel particles on thermal and mechanical properties of epoxy composites. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 139, 106108. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106108>

Kyung W. O., Duk, K. K., Seong, H. K., (2009). Ultra-porous Flexible PET/Aerogel Blanket for Sound Absorption and Thermal Insulation. *Fibers and Polymers*, Vol. 10, No.5, 731-737

Li, B. X., Qin, L., Yang, D., Luo, Z., Zhao, T., & Yu, Z. Z. (2022). Superelastic and responsive anisotropic silica nanofiber/polyvinylpyrrolidone/MXene hybrid aerogels for efficient thermal insulation and overheating alarm applications. *Composites Science and Technology*, 225, 109484, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022>.

Li, Z., Cheng, X., He, S., Shi, X., Gong, L., & Zhang, H. (2017). Aramid fibers reinforced silica aerogel composites with low thermal conductivity and improved mechanical performance. *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 84, ss:316–325. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.02.014>

Lokhande, S. K., Garg, N., Jain, M.C., Rayalu, S. (2022). Evaluation and analysis of frecrackers noise: measurement uncertainty, legal noise regulations and noise induced hearing loss. *Appl Acoust*, 186:108462. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108462>

Lu, W., Steigerwalt, E. S., Moore, J. T., Sullivan, L. M., Collins, W. E., & Lukehart, C. M. (2004). Carbothermal transformation of a graphitic carbon nanofiber/silica aerogel composite to a SiC/silica nanocomposite. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 4(7), ss:803–808. <https://doi.org/10.1166/jnn.2004.119>

Mahesh, S, Sunil, C. J., (2016). Effect of Granule Sizes on Acoustic Properties of Protein-Based Silica Aerogel Composites via Novel Inferential Transmission Loss Methos. *Gel.*, doi:10.3390/gels2010011

Maleki, H., Durães, L., & Portugal, A. (2014a). An overview on silica aerogels synthesis and different mechanical reinforcing strategies. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 385, 55–74. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017>

Mazrouei-Sebdani, Z., Begum, H., Schoenwald, S., Kirill, V., Horoskenkov, Malfait, W.J. (2021). A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 562, <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.120770>

Mazrouei-Sebdani, Z., Khoddami, A., Hadadzadeh, H., & Zarrebini, M. (2015). Synthesis and performance evaluation of the aerogel-filled PET nanofiber assemblies prepared by electro-spinning. *RSC Advances*, 5(17), 12830–12842. <https://doi.org/10.1039/C4RA15297B>

Mazrouei-Sebdani, Z., Naeimirad, M., Peterek, S., Begum, H., Galmarini, S., Pursche, F., Baskin, E., Zhao, S., Gries, T., & Malfait, W. J. (2022). Multiple assembly strategies for silica aerogel-fiber combinations. *Materials & Design*, 223, 111228. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111228>

Merli, F., Anderson, A.M., Carroll, M.K., Buratti, C. (2019). Acoustic measurements on monolithic aerogel samples and application of the selected solutions to standard window systems. *J. Appl. Acoust*, 142, 123–131, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.008>.

Moretti, E. Merli, F., Erdem C., Cinzia B. (2017). Thermal and Acoustic Properties of Aerogels: Preliminary Investigation of

the Influence of Granule Size. *Energy Procedia*, Vol.111, Page: 472-480

Moszynski, P. "WHO Warns Noise Pollution Is a Growing Hazard to Health in Europe". *BMJ* (2011), 342, d2114. [CrossRef] [PubMed], Son erişim tarihi: 05.11.2023

Nazeran, N., & Moghaddas, J. (2017). Synthesis and characterization of silica aerogel reinforced rigid polyurethane foam for thermal insulation application. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 461, ss:1–11.

<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.037>

Prashant D. Jinde, M., Gudiyawar, Y. (2023). Silica aerogel in textiles and nanofibers: a comprehensive review of synthesis techniques and embedding strategies. *Journal of The Textile Institute*, DOI: 10.1080/00405000.2023.2274630

Ramesh, S., Kim, H. S., Lee, Y. J., Hong, G. W., & Kim, J. H. (2017). Nanostructured Silica/Gold-Cellulose-Bonded Amino-POSS Hybrid Composite via Sol-Gel Process and Its Properties, *Nanoscale Research*

Rogowin, Z. A. (1982). *Chemiefasern*, Thieme Verlag. Stuttgart

Sert Çok, S., Gizli, N. (2022). Microstructural properties and heat transfer characteristics of in-situ modified silica aerogels prepared with different organosilanes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 188, 122618

Sordello, R., Ratel, O., Flamerie De Lachapelle, F. (2020). Evidence of the impact of noise pollution on biodiversity: a

systematic map. *Environ Evid*, 9:20, <https://doi.org/10.1186/s13750-020-00202-y>

Szczepaniak, R., Komorek, A., Przybyłek, P., Krzyzak, _ A., Roskowicz, M., Godzimirski, J., Pinkiewicz, E., Jaszczak, W., & Kosicka, E. (2021). Research into mechanical properties of an ablative composite on a polymer matrix base with aerogel particles. *Composite Structures*, 280, 114855. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114855>

Tian, J., Yang, Y., Xue, T., Chao, G., Fan, W., & Liu, T. (2022). Highly flexible and compressible polyimide/silica aerogels with integrated double network for thermal insulation and fire-retardancy, *Journal of Materials Science & Technology*, 105, ss:194–202. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.07.030>

Venkataraman, M., Mishra, R., Kotresh, T.M., Militky, J., Jamshaid, H. (2016). Aerogels for thermal insulation in highperformance textiles. *Textile Progress*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00405167.2016.1179477>

Wang, J.C., Shen, J., Ni, X.Y., Wang, B., Wang, X.D., Li, J. (2010). Acoustic properties of nanoporous silica aerogel. *Rare Metal Mat. Eng.* (39), ss:14–17.

Wang, T. C., Chang, T.Y., Tyler, R.S. (2021). Association between exposure to road traffic noise and hearing impairment: a case-control study. *J Environ Health Sci Eng*, 19:1483–1489, <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00704-y>

Woignier, T., Phalippou, J., Despetis, F., & Calas-Etienne, S. (2018). Aerogel processing". *Handbook of Sol-gel Science and Technology*. Springer

Yang, X., Sun, Y., Shi, D., Liu, J. (2011). Experimental investigation on mechanical properties of a fiber-reinforced silica aerogel composite. *Materials Science and Engineering: A*, 528(13–14), 4830–4836. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.013>

Zhang, X., Cheng, X., Si, Y., Yu, J., & Ding, B. (2022). All-ceramic and elastic aerogels with nanofibrous-granular binary synergistic structure for thermal superinsulation. *ACS Nano*, 16(4), ss:5487–5495. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c09668>

BÖLÜM IV

Comparative Analysis of Essential Oils, Fixed Oils, and Plant Extracts in Electrospun Nanofiber Production: A Comprehensive Review

Ayşe ÖZKAL¹

Introduction

This study aims to evaluate the role of natural additives—essential oils, fixed oils, and plant extracts—in enhancing the properties and functionality of nanofibers produced via electrospinning. It focuses on their behavior in polymer solutions, their impact on the electrospinning process, and their influence on nanofiber morphology. By providing a detailed assessment of these additives, this study seeks to facilitate the selection of materials and processes tailored to specific applications, ultimately enabling the

¹ Dr., Ayşe ÖZKAL, Pamukkale University, Engineering Faculty, Textile Engineering Department, Denizli/Türkiye, Orcid: 0000-0003-1294-7106 ayseozkal1940@gmail.com

more effective utilization of natural additives in nanofiber production.

This research addresses a significant gap in the literature by highlighting the underexplored role of fixed oils in electrospinning while offering a comprehensive comparative analysis of essential oils, fixed oils, and plant extracts. To the best of our knowledge, no prior study has conducted such a comparison of these three natural additives in the context of electrospun nanofiber production. The findings of this study provide valuable insights into the challenges and potential of bioactive materials, paving the way for more informed material and process selection based on application-specific requirements. Furthermore, this study underscores the need for future research to capitalize on the superior properties of fixed oils, ensuring their broader application in nanofiber systems.

1. Nanofibers and electrospinning

Nanofibers are ultra-fine fibers with diameters in the nanometer range, typically less than 100 nanometers, which exhibit unique properties such as high surface area to volume ratio, enhanced mechanical strength, and excellent permeability. These characteristics make nanofibers highly valuable in various applications, including filtration, tissue engineering, drug delivery, and protective clothing, where their exceptional properties can be leveraged to improve performance and efficiency (Jadhav and Tasgaodhar, 2023).

There are several nanofibers manufacturing techniques. Electrospinning, a technique that employs electrical forces, is one of the most extensively utilized production methods (Özkal et al.,

2020). It is a straightforward, versatile, and cost-effective approach capable of producing nanofibrous structures with a high specific surface area and three-dimensional porous meshes (Du et al., 2023). A schematic of the basic electrospinning setup is shown in Figure 1.

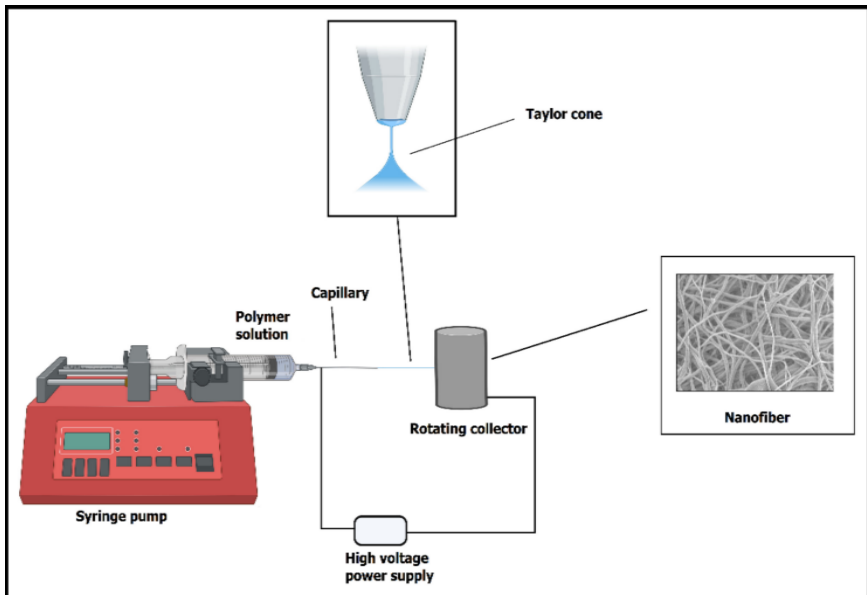


Figure 1: A schematic illustration of a basic electrospinning setup

Reference: (Rather et al., 2021)

In this technique, in Figure 1, a high voltage is applied to the polymer solution, inducing ejection of the solution from the spinneret (syringe needle), leading to the formation of continuous fine fibers on the collector (Hwang et al., 2019; Du et al., 2023).

Figure 2 highlights the key features of electrospun nanofibers designed for antimicrobial wound dressings.

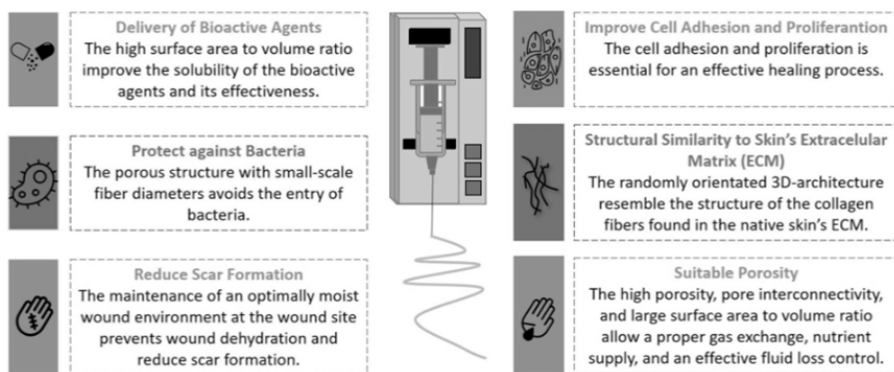


Figure 2: Representation of the most promising properties of electrospun fibers for application as antimicrobial wound dressings

Reference: (Mouro and Gouveia, 2023)

Figure 2 illustrates the multifunctional benefits of electrospun fibers in wound dressings. The high surface area to volume ratio enhances the solubility and delivery of bioactive agents, while the porous structure prevents bacterial infiltration. These fibers also maintain a moist environment, reducing scar formation, and their 3D architecture mimics the skin's extracellular matrix, promoting cell adhesion and proliferation. Additionally, their porosity ensures proper gas exchange and fluid control, making them highly effective for wound healing applications.

2. Additives incorporated into Polymer matrix during the electrospinning process

Various additives can be incorporated into the polymer matrix during the electrospinning process to modify the solution properties, enhance fiber formation (Li and Xia, 2004), and impart specific functionalities such as improved mechanical strength,

thermal stability, antimicrobial activity, and conductivity during manufacturing, making them suitable for a wide range of applications in various fields.

The choice of additives depends on the desired properties of the final nanofiber product (Kumari, 2023). For example, the addition of nanoparticles can improve the functionality of nanofibers in biomedical and energy applications (Kumari, 2023). The choice of additives can also influence the morphology and characteristics of the nanofibers. For instance, the addition of lignin can alter the porosity of nanofibers (Ahmad & Rahman, 2021).

Additives can be broadly categorized based on their roles as follows:

Conductivity Enhancers: Additives such as salts (e.g., sodium chloride) and surfactants (e.g., sodium oleate) are introduced to increase the electrical conductivity of the polymer solutions. This enhancement facilitates the electrospinning of polymers with inherently low conductivity, such as polypropylene, leading to the production of finer fibers. For instance, the addition of sodium oleate and sodium chloride to polypropylene enabled the fabrication of nanofibers with diameters as small as 310 nm (Nayak et al., 2012).

Viscosity Modifiers: The rheological properties of the spinning solution are critical for fiber formation. Viscosity modifiers, including stabilizers and plasticizers, are used to adjust the viscosity, ensuring a stable jet formation during electrospinning (Bachs-Herrera et al., 2021).

Nanofillers: Incorporating nanomaterials such as carbon nanotubes (CNTs) into the polymer matrix can significantly enhance

the mechanical, electrical, and thermal properties of electrospun fibers. For example, adding CNTs to polyacrylonitrile (PAN) solutions has been shown to improve the mechanical strength and electrical conductivity of the resulting nanofibers (Bachs-Herrera et al., 2021).

Hydrogen-Bonding Additives: Compounds capable of forming hydrogen bonds, such as ethylenediamine and urea, can influence the electrospinning behavior by modifying intermolecular interactions within the solution. These additives can lead to changes in fiber morphology and diameter, as observed in studies of cyclodextrin molecules (Topuz and Uyar, 2018).

Natural Additives: Essential Oils such as clove oil and eucalyptus oil; plant extracts such as green tea extract and aloe vera extract (Uddin et al., 2024); natural polymers such as cellulose and silk fibroin; polysaccharides including chitosan and alginate, and proteins such as gelatin and keratin may be used as natural additives in electrospinning (Abdu et al., 2023).

2.1. Essential oils, fixed oils and plant extracts

Plant extract can be defined as a concentrated preparation of plant material obtained by extracting the desired components from the plant using a suitable solvent. Plant extracts have been widely used in traditional medicine, and they continue to be a valuable source of bioactive compounds for the development of new drugs and other applications (Fowler, 2006).

Essential oils and fixed (carrier) oils are two distinct types of oils with different properties and uses (Alhasso et al., 2022; Orchard et al., 2019; Marshall, 2023). Essential oils are highly concentrated,

volatile, and aromatic compounds extracted from various plant parts, such as flowers, leaves, stems, bark, and roots (Irshad et al., 2020; Alhasso et al., 2022; Orchard et al., 2019). They are characterized by their distinctive aroma and chemical composition. They are complex mixtures of low molecular weight constituents, primarily composed of terpenes, their oxygenated derivatives, and other organic compounds (Saad et al., 2013), and are known for their potential therapeutic benefits, including antibacterial, antiviral, and sedative properties (Alhasso et al., 2022; Orchard et al., 2019). Essential oils are often used in aromatherapy and can be applied topically, but they are typically too potent to be used directly on the skin and need to be diluted (Orchard et al., 2019; Marshall, 2023).

On the other hand, fixed (carrier) oils are vegetable or seed oils that are used to dilute and enhance the absorption of essential oils (Alhasso et al., 2022; Orchard et al., 2019). Fixed (carrier) oils are composed mainly of triglycerides, fatty acids, and other lipophilic compounds (Alhasso et al., 2022; Orchard et al., 2019). They have a lower volatility and less potent aroma compared to essential oils (Marshall, 2023). Fixed oils play a crucial role in pharmaceutical formulations, acting as emulsifying agents, stabilizing agents, and diluents for essential oils before topical application (Alhasso et al., 2022; Orchard et al., 2019). A comparison for some chemical properties of essential oils, plant extracts, and fixed oils was given in Table 1.

Table 1: Some chemical properties of essential oils, plant extracts, and fixed oils

Aspect	Essential Oils	Plant Extracts	Fixed Oils
Volatility	Highly volatile	Non-volatile or minimally volatile	Non-volatile
Composition	Aromatic compounds (terpenes, alcohols)	Bioactive phytochemicals (flavonoids, etc.)	Fatty acids, triglycerides, vitamins
Polarity	Typically, non-polar or slightly polar	Depends on the solvent used for extraction	Predominantly non-polar, influencing their interaction with other substances
Thermal Stability	Limited; degrades at high temperatures	Varies based on constituent compounds; some may degrade upon heating	Generally stable under heat; suitable for processes involving higher temperatures

References: (adapted from Mele, 2020; Souza et al., 2022; Rahim et al., 2023; Zhou et al., 2023; Olalere, 2024)

Table 1 summarizes the chemical properties of essential oils (EO), plant extracts (PE), and fixed oils (FO). Essential oils are highly volatile and composed of aromatic compounds, making them suitable for applications requiring volatile bioactive delivery. Plant extracts, with their bioactive phytochemicals, display variable polarity and thermal stability, depending on the extraction method. Fixed oils, composed mainly of fatty acids and triglycerides, are non-volatile and thermally stable, ideal for applications involving heat. These distinct properties underscore their suitability for tailored

applications in nanofiber technologies. Properties of some fixed oils are given in Table 2.

Table 2: Properties of some fixed oils

Plant	Main Bioactive Molecules	Biological Properties
Grape seed	Resveratrol Tannins Gallic acid Proanthocyanidins Procyanidins Vitamin E	Antioxidant Anti-inflammatory Antitumor Antimicrobial Chemoprevention Photoprotection
Soybean	Linoleic acid Genistein Daidzein Phytosterols Tocopherols	Antioxidant Anti-inflammatory Photoprotection Osteoblastogenesis
Castor	Ricinoleic acid	Antimicrobial Anti-inflammatory Laxative and labor inducer Antinociceptive
Sesame	Sesamol Sesamin Sesamolin Sesamin	Antioxidant Anti-inflammatory Antitumor Chemoprevention Antiseptic and anti-hypertensive Photoprotective and anti-aging Anti-nociceptive
Olive	Carotenoids Squalene Tocopherols Phenolic compounds	Antioxidant Anti-inflammatory Antimicrobial Antitumor Chemopreventive Chondroprotective effect
Nigella Sative	Linoleic acid Oleic acid	Antioxidant Antitumor Anti-inflammatory Antimicrobial Antidiabetic activity Antiparasitic activity Hypolipidemic activity

References: (adapted from Riberio et al., 2022; Moghaddasi et al., 2024)

Table 2 highlights the bioactive molecules and biological properties of selected fixed oils. Grape seed, sesame, and olive oils exhibit strong antioxidant and anti-inflammatory properties, alongside additional effects like photoprotection and chemoprevention. *Nigella sativa* oil demonstrates broad-spectrum activity, including antimicrobial, antitumor, and antidiabetic effects. Soybean oil supports bone health through osteoblastogenesis, while castor oil is notable for its antimicrobial and anti-inflammatory effects as well as its use as a laxative. These diverse biological activities make fixed oils valuable for applications in health, cosmetics, and biomedical materials. Therapeutic properties of *Nigella Sativa* are presented in Figure 2.

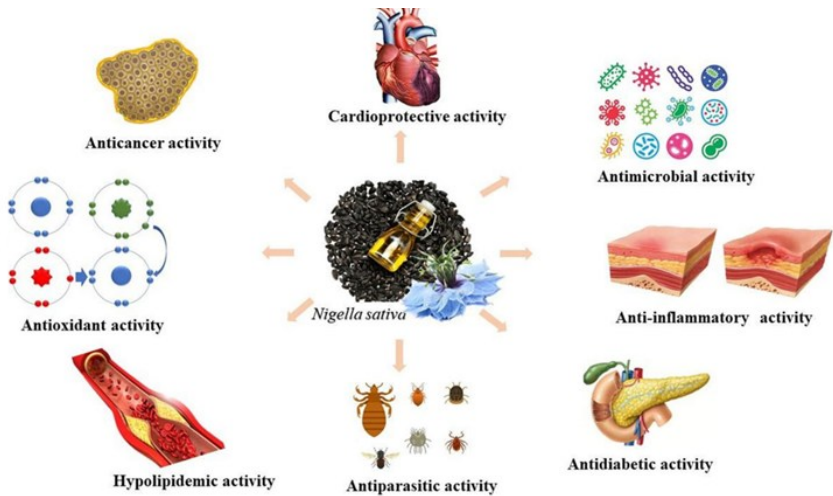


Figure 3: Therapeutic properties of *Nigella Sativa* (black kumin) oil

Reference: (Moghaddasi et al., 2024)

Figure 3 illustrates the diverse biological activities of *Nigella sativa*, highlighting its potential in various health applications. Key properties include anticancer, antioxidant, and cardioprotective effects, as well as antimicrobial, anti-inflammatory, and antidiabetic activities. Additionally, *Nigella sativa* exhibits hypolipidemic and antiparasitic properties, emphasizing its multifaceted role in disease prevention and treatment.

Nigella Sativa is present both in essential oil and fixed oil form depending on the extraction method. Both types of oil from *Nigella sativa* are valuable but serve different purposes based on their composition and properties (Rahim et al., 2022).

The combination of essential oils and fixed oils is believed to make the essential oils less toxic on the skin, slow down their evaporation rate, and increase their absorption (Orchard et al., 2019; Marshall, 2023). This is because the fixed oils are composed of molecules that are closely related to the skin's natural oil, sebum, which facilitates the penetration of the essential oils into the skin (Orchard et al., 2019; Marshall, 2023).

To summarize, essential oils are highly concentrated, aromatic, and therapeutic plant extracts, while carrier oils are vegetable or seed oils used to dilute and enhance the absorption of essential oils. The use of fixed oils in conjunction with essential oils is crucial for their safe and effective topical application.

2.2. Incorporating essential oils, fixed oils and plant extracts into electrospun nanofibers

In the literature, the number of studies conducted on incorporating essential oils, fixed oils, and plant extracts was investigated for the years 2017-2024* (Figure 3).

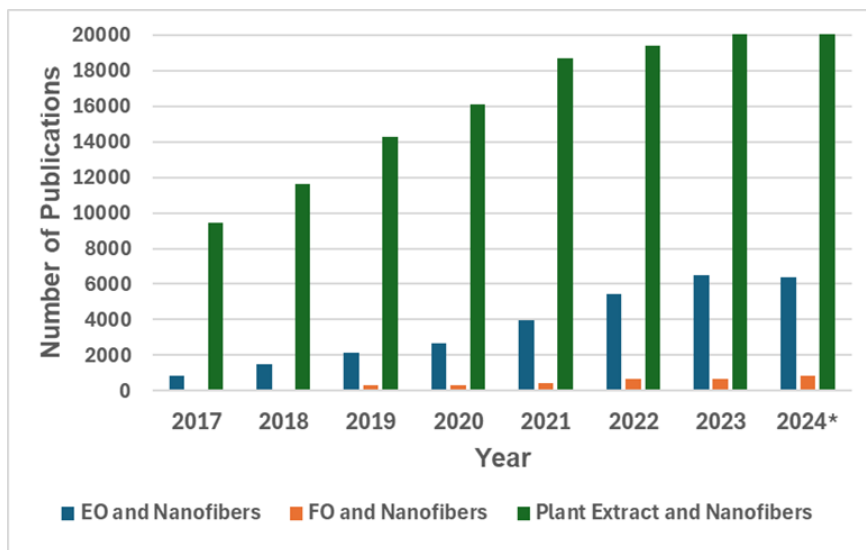


Figure 4: The number of studies conducted on incorporating essential oils, fixed oils, and plant extracts

From Figure 4, the total number of studies conducted on nanofibers incorporating essential oils, fixed oils, and plant extracts for each year from 2017 to 2024 is as follows:*

Essential Oils: 836, 1492, 2132, 2688, 3960, 5447, 6488, and 6392, respectively.

Fixed Oils: 80, 70, 300, 300, 450, 650, 652, and 850, respectively.

Plant Extracts: 9470, 11600, 14300, 16100, 18700, 19400, 20100, and 22000, respectively.

2024 indicates that December 2024 is excluded.*

To analyze the research on nanofibers incorporating essential oils, fixed oils, and plant extracts, specific keyword combinations were utilized. For essential oil-based nanofibers, the keywords “essential oils” AND electrospinning, “essential oil” AND electrospinning, and “volatile oil” AND electrospinning were employed. The resulting publications were collectively categorized under the term “EO and Nanofibers”. To determine the total number of studies involving fixed oil-incorporated nanofibers, the keywords “fixed oil” AND electrospinning and “seed oil” AND electrospinning were used, with the combined results labeled as “FO and Nanofibers”. For plant extract-incorporated nanofibers, the keyword “plant extract” AND electrospinning was searched using the Google Scholar platform to calculate the total number of relevant publications.

Plant extracts have been the most extensively studied natural additives for electrospun nanofibers, likely due to their diverse bioactive properties and broad application potential which will be discussed later. In contrast, fixed oils have received the least attention, reflecting their more limited functionality compared to essential oils and plant extracts.

Studies in literature

1. The purpose and potential benefits of incorporating essential oils, fixed oils and plant extracts into electrospun nanofibers

Incorporating natural additives such as essential oils and plant extracts into electrospinning solutions has garnered significant attention. They are among the natural additives commonly incorporated into polymer solutions to enhance the functionality of nanofibers. Beyond functionality they may enhance the stability, and

delivery of the bioactive compounds for a wide range of applications (Zambak et al., 2022). The high surface area-to-volume ratio of nanofibers also allows for better encapsulation and controlled release of the bioactive compounds (Priyanto et al., 2022; Rather et al., 2021; Kwon et al., 2023). Furthermore, protection and stabilization may be achieved. The nanofiber matrix can protect the essential oils and fixed oils from rapid degradation, evaporation, and cytotoxic effects, preserving their bioactive compounds (Priyanto et al., 2022; Çelebioğlu et al., 2018). The nanofiber structure also allows for better thermal stability of the incorporated oils (Çelebioğlu et al., 2018, Mori et al., 2015).

2. Studies from the literature on electrospun nanofibers incorporating essential oils, plant extracts and fixed oils

2.1. Methods for incorporating essential oils (EO), fixed oils (FO) into electrospun nanofibers

Osloo et al. (2020) performed a comprehensive review of studies published between January 1, 2013, and December 31, 2018, focusing on the incorporation of essential oils and plant derived (fixed) oils into electrospun nanofibers. The primary goal was to highlight recent advancements and methodologies in this field. According to the research, studies on nanofibers incorporating essential oils (EO) or fixed oils (FOs) have identified several key findings. Their findings are illustrated in Figure 4.

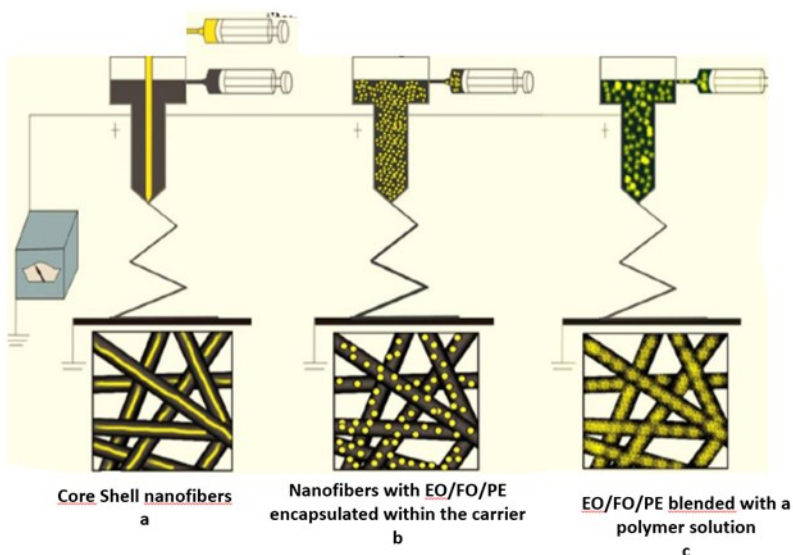


Figure 5: Methods for incorporating essential oils (EO), fixed oils (FO), and plant extracts (PE) into electrospun nanofibers

Reference: (Osloo et al., 2020)

As illustrated in Figure 4, three primary approaches have been developed for preparing electrospun nanofibers containing EO/FO. The first method involves blending EO/FO with a polymer solution, followed by electrospinning to produce EO/FO incorporated nanofibers (c). The second approach entails loading EO/FO into a carrier, which is then electrospun to fabricate nanofibers with EO/FO encapsulated within the carrier (b). Finally, the third method focuses on creating core-shell structured nanofibers, where EO/FO forms the core and the polymer constitutes the shell (a) (Osloo .et al., 2020). Plant extracts are also added into nanofibers in the same way as essential oils (EO), fixed oils (FO).

2.2. Some studies from the literature on electrospun nanofibers incorporating essential oils, plant extracts and fixed oils

Examples from the literature on electrospun nanofibers incorporating essential oils, plant extracts, and fixed oils are presented in Table 3.

Table 3: Examples of studies on electrospun nanofibers incorporating essential oils (EO), plant extracts (PE) and fixed oils (FO)

EO/PE/FO	Others	Aim	Result	Reference
Peppermint, Chamomile EO	Gelatin	Edible packaging	-Improved hydrophobicity and antioxidant activity -Better antibacterial activity for peppermint EO.	Tang et al., 2019
Lavender EO	Polyurethane (PU) Silver nanoparticles Dimethyl formamide Tetrahydrofuran	Wound healing	-Lavender oil improved hydrophilicity of PU nanofibers -Antibacterial activity	Sofi et al., 2019
Ziziphora clinopodioides EO Sesame FO	Chitosan Flaxseed mucilage Ethanol Acetic acid	Food packaging	-Tensile strength and water vapor transmissions decreased -Sustained release over 96 hours -High antimicrobial and antioxidant activities	Karami et al., 2021
Lavender EO	Polyurethane (PU) Cobalt nitrate	Bone tissue engineering	-Enhanced mechanical properties	Zhang et al., 2019
Grape seed oil FO	Polyurethane (PU) Honey propolis	Bone tissue engineering	-Enhanced thermal stability - Reduced surface roughness -Better blood compatibility -Grape seed oil contributed to the hydrophobicity but this can be adjusted by adding hydrophilic	Chao et al., 2018

			components like honey and propolis	
Pumpkin seed oil FO	Polyvinyl alcohol (PVA) and chitosan (CS)	Dermal and oral wound healing	Significant antibacterial activity	Rezk et al., 2023
Castor oil FO	Polyurethane (PU)	Vascular graft	Better physicochemical and blood compatibility	Jaganathan et al., 2017
Castor oil FO	Cellulose Triacetate (CTA)	Investigate their potential as a thickening agent for castor oil	Gel-like dispersions in oil-based media could be developed using nanofibers as a base, allowing for structured control of rheological characteristics.	
Ginger EO	Avocado seed starch	Food packaging	-Successful production of avocado seed starch as a polymer -Hydrophilic fibers materials due to the hydrophilic nature of starch. -Good antibacterial activity	Pires et al., 2024
Cinnamon EO	Polyvinylpyrrolidone (PVP)	Wound healing	Enhanced antibacterial properties	Kesici Güler et al., 2019
Lavender EO	Polyvinylpyrrolidone (PVP), Gelatin	Biomedical applications	-Uniform nanofibers with controlled release properties -Significant antimicrobial activity	Çallıoğlu and Güler, 2020
Cinnamon EO	Different starches Pullulan	Food packaging and wound dressing	-Different degrees of inhibition against <i>S. aureus</i> , <i>E. coli</i> , and <i>A. flavus</i> , with notable efficacy against <i>S. aureus</i> .	Huang et al., 2024
Nigella Sativa (black cumin) oil FO	Poly (lactic acid) (PLA) Poly (ε-caprolactone) (PCL) Hydroxyapatite	Bone healing	Potential as antibacterial agents in bone tissue engineering when NS dosage is appropriately adjusted	Moghaddasiet al., 2024
Nigella Sativa (black cumin) oil FO	Polyamide Metal oxides	Face mask	Enhancing personal protective equipment (PPE) against viral infections.	Deyab et al., 2022

Nigella Sativa (black cumin) oil FO or EO, not known	Polycaprolactone	Fruit packaging	Increased antioxidant activity	Ozer and Keskin, 2024
Henna extract FO	Chitosan	Wound healing	Nanofibers with diameters 64 to 87 nm, exhibited improved antibacterial activity and promoted wound healing.	Yousefi et al., 2017
Clove Extract EO	Pullulan, Whey Protein	Food packaging and biomedical applications	Enhanced antioxidant and antibacterial activities, indicating potential for.	Zambak et al., 2022

Table 3 presents a variety of studies on electrospun nanofibers incorporating essential oils (EO), plant extracts (PE), and fixed oils (FO). These examples illustrate the versatility of such fibers across applications like edible packaging, wound healing, bone tissue engineering, and food packaging. Key results include enhanced antimicrobial and antioxidant activities, improved mechanical and physicochemical properties, and controlled release capabilities. The findings highlight the potential of incorporating bio-based additives to tailor nanofiber properties for specific applications.

2.3. Electrospinning essential oil, fixed oil and plant extract loaded nanofibers

Electrospinning is performed after oils or extracts are mixed into the polymer solution. An example is illustrated in Figure 5.

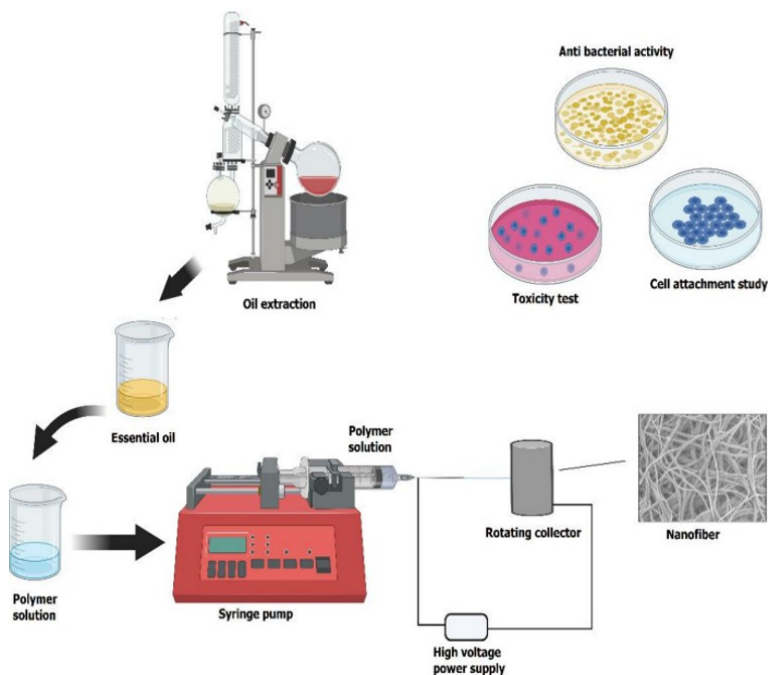


Figure 6: Schematic illustration an essential oil added electrospinning process

Reference: (Rather et al., 2021)

In Figure 6, an essential oil was added into the polymer solution prior to electrospinning process.

Another schematic representation of the most common electrospinning techniques used for the incorporation of bioactive compounds like essential oils, fixed oils, and plant extracts into nanofibers is shown in Figure 6.

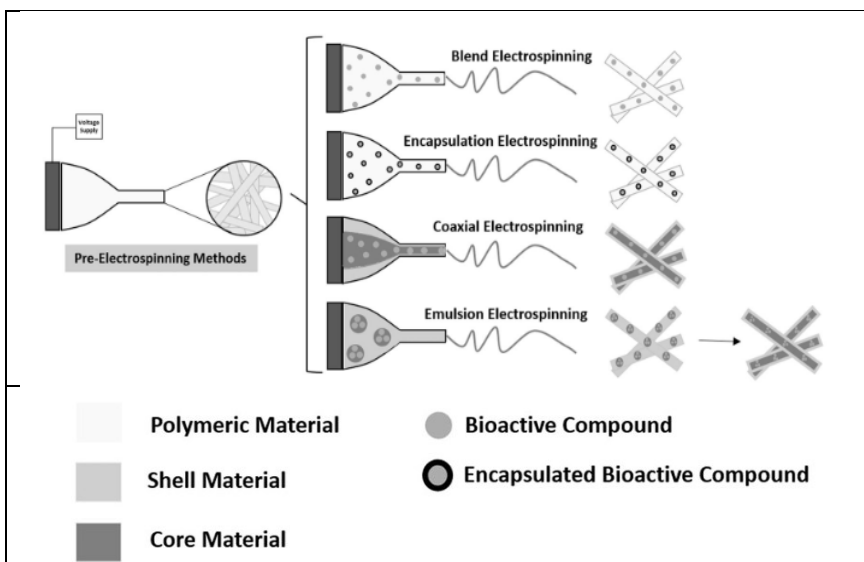


Figure 7: Schematic representation of the most common electrospinning techniques used for the incorporation of bioactive compounds into nanofibers

Reference: (Mouro and Gouveia, 2023)

From Figure 7, blend electrospinning, encapsulation electrospinning, coaxial electrospinning, and emulsion electrospinning are the most common electrospinning methods used for the incorporation of bioactive compounds into nanofibers.

To summarize, the strategic use of these additives enables the tailoring of nanofiber properties for specific applications, ranging from biomedical devices to filtration systems. By carefully selecting appropriate additives, researchers can optimize the electrospinning process and enhance the functionality of the resulting nanofibrous materials (Teo and Ramakrishna, 2006).

2.3.1. Morphology

The fiber morphology of electrospun nanofibers incorporated with essential oils, plant extracts, and fixed oils is presented in Table 4.

Table 4: Fiber morphology of essential oil, plant extract, and fixed oil incorporated electrospun nanofibers

Aspect	Essential Oils	Plant Extracts	Fixed Oils
Fiber Uniformity	Challenges in achieving uniformity due to volatility and miscibility issues	Potential for uniform fibers if extracts are well-integrated	Poor uniformity: oil droplets disrupt fibers. Non-uniform fibers may result from phase separation
Fiber Diameter	May produce thinner fibers; requires optimization	May slightly increase fiber diameter based on extract properties	Tends to increase fiber diameter; affects mechanical properties
Porosity	Increased porosity due to evaporation of volatile components	Moderate porosity; depends on extraction and spinning conditions	Limited porosity: oil presence affects fiber structure
Encapsulation	Good for volatile compounds if optimized	Effective for active compound loading	Poor encapsulation without polymer blending

Reference: (adapted from Mele, 2020; Lee and Lee, 2020; Rahim et al., 2023; Zhou et al., 2023)

The data presented in Table 4 highlights the distinct impacts of essential oils, plant extracts, and fixed oils on the fiber morphology of electrospun nanofibers. Essential oils enhance porosity and produce thinner fibers but face challenges in uniformity due to volatility. Plant extracts offer a balance, enabling moderate porosity and relatively uniform fibers. In contrast, fixed oils increase fiber diameter and disrupt uniformity, limiting their encapsulation efficiency. These findings underscore the need for careful material selection and optimization based on the intended application.

Encapsulating essential oils within electrospun fibers can protect their volatile components and control their release, which is beneficial for applications requiring sustained bioactivity (Lee and Lee, 2020).

2.3.2. Processes

The comparison in Table 5 highlights the complexity of incorporating bioactive compounds into nanofibers.

Table 5: Comparison of essential oils, plant extracts, and fixed oils in electrospinning processes

Aspect	Essential Oils	Plant Extracts	Fixed Oils
Solvent Selection	Requires organic solvents	Water, alcohol, or organic solvents	Organic solvents only
Electrospinning Setup	Needs optimization for miscibility and flow	Compatible with various setups	Challenging; requires stable emulsions
Processing	Encapsulation may be required to prevent loss	Typically requires stabilization	Often co-spun with stabilizing polymers

References: (adapted from Mele 2017; Mele, 2020)

Table 5 provides a comparative analysis of essential oils, plant extracts, and fixed oils in electrospinning processes, focusing on their solvent requirements, setup challenges, and processing strategies. This comparison highlights the unique considerations for incorporating these bioactive compounds into nanofiber systems.

The choice of solvent and electrospinning parameters must be optimized to effectively incorporate essential oils into polymer solutions, ensuring the stability of the electrospinning jet and the uniformity of the resulting fibers (Mele, 2017).

3. Functionality and applications of electrospun nanofibers incorporating essential oils, plant extracts and fixed oils

Essential oils possess significant antimicrobial properties, making them suitable for creating bioactive electrospun membranes (Liakos et al., 2017). By the incorporation of the oils, the nanofiber format has an efficient delivery and controlled release of the bioactive compounds. (Munteanu and Vasile, 2021).

Essential oils and fixed oils can also enhance the properties of the nanofibers, such as antimicrobial activity (Ünalan et al., 2019; Çallıoğlu et al., 2020; Rather et al., 2021; Chomachayi et al., 2018; Liakos et al., 2015), antioxidant activity (Çelebioğlu et al., 2018), and hydrophobicity (Tang et al., 2019). Similarly, plant extract incorporation enhances functionality (Stoyanova et al., 2023).

The electrospun nanofibers containing essential oils have a potential in biomedical (Ünalan et al., 2019; Çallıoğlu et al., 2020; Rather et al., 2021), pharmaceutical, wound dressing (Chomachayi et al., 2018; Liakos et al., 2015), and food packaging applications (Tang et al., 2019) to their bioactive properties (Mele 2017, Mele

2020). For instance, cellulose acetate fibers containing oregano essential oil exhibited potent antibacterial activity against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Candida albicans* (Liakos et al., 2017). In another study, it is reported that nanofibers embedded with plant extracts have shown enhanced germicidal activities, positioning them as promising materials for biomedical applications such as wound healing and drug delivery (Uddin et al., 2024). However, fixed oils are primarily used as carriers, their incorporation into electrospun fibers has been explored to improve the mechanical properties and biocompatibility of the fibers. Their direct antimicrobial effects are limited compared to essential oils and plant extracts.

Table 6 provides a detailed comparison of the functionalities and applications of electrospun nanofibers incorporating essential oils, plant extracts, and fixed oils. It highlights their diverse contributions to textiles, food packaging, and drug delivery systems.

Table 6: Functionality and applications of essential oil, plant extract, and fixed oil incorporated electrospun nanofibers

Aspect	Essential Oils	Plant Extracts	Fixed Oils
Functional Textiles	Provides aroma and therapeutic properties for clothing or upholstery	Suitable for smart textiles with antioxidant or bioactive functionalities	Can enhance softness and hydrophobic properties in textiles. Functionality is poor unless combined with other materials
Food Packaging	Nanofibers with essential oils can extend shelf life and prevent	Plant extracts add antioxidant and antimicrobial benefits to	Adds hydrophobicity to packaging materials but requires

	microbial contamination	biodegradable packaging	additional active agents for functionality
Drug Delivery Potential	High; good for aromatherapy or topical use, enables controlled release in medical applications	High; show potential for controlled release and targeted delivery of bioactive compounds	Low; primarily serves as a carrier, limited active delivery
Stability in Fibers	Volatility leads to loss over time; encapsulation can improve retention	High stability if properly embedded; suited for prolonged release applications	High stability but limited functionality
Biodegradability	Biodegradable fibers containing essential oils align with eco-friendly initiatives	Biodegradability depends on the polymer matrix and extraction method; suitable for sustainable applications	Fixed oils in biodegradable polymer matrices enhance environmental compatibility
Antimicrobial Activity	High; rich in bioactive volatile compounds	High; depending on extract composition and concentration	Low; limited inherent antimicrobial properties

References: (adapted from Mele 2017; Mele, 2020; Rahim et al., 2023; Zhou et al., 2023, Uddin et al., 2024, Moradinezhad et al., 2024)

Table 6 comparatively highlights the unique contributions of essential oils, plant extracts, and fixed oils in electrospun nanofibers. Essential oils excel in antimicrobial activity and controlled release applications, making them suitable for medical and food packaging uses. Plant extracts demonstrate versatility, with high stability and bioactive functionality, particularly in biodegradable systems. Fixed oils, while limited in antimicrobial activity, offer stability and

hydrophobicity, enhancing fiber properties in textiles and packaging. These findings emphasize the importance of tailoring material selection to the specific requirements of the intended application.

4. Compatibility and challenges in electrospinning with essential oils, plant extracts and fixed oils

Essential oils, fixed oils, and plant extracts are widely studied natural additives for electrospun nanofibers, each offering unique advantages and challenges. Essential oils are particularly suited for producing aromatic and antimicrobial nanofibers due to their high concentrations of active compounds like monoterpenes and phenolics (Kalorizou et al., 2022; Hosseini et al., 2021). However, their volatility and poor miscibility with polar polymers pose challenges, requiring careful formulation and encapsulation to prevent losses during the electrospinning process (Bahrami et al., 2022; Celebioglu et al., 2023). Fixed oils, on the other hand, act primarily as plasticizers or carriers, offering higher thermal stability and lower volatility compared to essential oils, making them easier to process. However, their higher viscosity and lower electrical conductivity can complicate fiber formation, necessitating precise optimization of solution properties and electrospinning parameters (Mannai, 2023; Mínguez-García et al., 2022).

Plant extracts stand out for their versatility and compatibility with various polymers, making them excellent for bioactive and functional fibers. Compared to essential and fixed oils, they are more adaptable for diverse electrospinning applications, including wound healing and functional textiles (Rahim et al., 2023; Zhou et al., 2023). Despite the established antimicrobial and bioactive properties of essential oils, fixed oils remain underexplored, though promising

examples such as pumpkin, cactus pear, and grape seed oils highlight their potential for specific applications like food packaging and transdermal drug delivery (Rezk et al., 2023; Wit et al., 2017).

The main challenges in manufacturing essential oil and fixed oil-loaded nanofibers include phase separation, stability, and compatibility with polymer matrices. Essential oils require tailored approaches due to their hydrophobicity and volatility, which can affect distribution within hydrophilic polymers (Mele 2017; Mele 2020). Fixed oils, while more stable, present difficulties in achieving uniform fibers unless well-blended into the polymer solution. The high surface-to-volume ratio of nanofibers can exacerbate issues like oil leaching and separation, further complicating their production (Mínguez-García et al., 2022; Mannai, 2023). Proper emulsion preparation and optimization of electrospinning parameters are critical for addressing these challenges and achieving stable nanofibers (Bahrami et al., 2022; Sinsup et al., 2021).

Table 7 explores the compatibility of essential oils, plant extracts, and fixed oils with electrospinning processes. It examines critical aspects such as polymer interaction, solubility, viscosity impact, and jet stability, providing insights into their behavior during fiber formation.

Table 7: Compatibility of essential oils, plant extracts and fixed oils with electrospinning

Aspect	Essential Oils	Plant Extracts	Fixed Oils
Polymer Interaction	Limited solubility with polar polymers; may require emulsifiers for uniform distribution (e.g., PVA)	Compatibility depends on the extract's solubility and the polymer matrix used. Better compatibility if water-soluble	Limited solubility with polar polymers; may require emulsifiers for uniform distribution (e.g., PVA); can act as plasticizers in some cases
Solubility	Soluble in organic solvents. challenges arise with aqueous systems	Soluble in water/alcohol (varies)	Soluble in organic solvents; insoluble in water, affecting processing methods
Viscosity Impact	Minimal effect on solution viscosity; requires careful formulation	Can alter viscosity depending on concentration and extract type	May increase viscosity; influences electrospinning parameters
Effect on Jet Stability	Potential to destabilize the electrospinning jet if not properly emulsified (low miscibility)	Properly prepared extracts can enhance jet stability	Risk of phase separation; requires stable emulsions for consistent jet behavior

References: (adapted from Mele 2017; Mele 2020; Rahim et al., 2023; Zhou et al., 2023)

As also highlighted in Table 7, essential oils, plant extracts, and fixed oils exhibit varying compatibility with electrospinning, influenced by their solubility, viscosity effects, and jet stability.

Proper formulation is key to overcoming challenges and ensuring consistent fiber production.

In terms of end use applications, essential oil-loaded nanofibers excel in antimicrobial, antioxidant, and biomedical applications, while fixed oil-loaded nanofibers are more suitable for food packaging and drug delivery systems (Mannai, 2023; Sinsup et al., 2021). The literature shows a greater focus on essential oil-loaded nanofibers due to their established bioactive properties and broader application scope, while fixed oil-loaded nanofibers remain a niche area with significant potential for further exploration (Geremias et al., 2021; Chao et al., 2018).

To summarize, essential oils often face limited solubility in polar polymers and may require emulsifiers for uniform distribution, impacting jet stability. Plant extracts, on the other hand, demonstrate better compatibility, depending on their solubility and concentration, often enhancing jet stability when prepared properly. Fixed oils can act as plasticizers but may increase solution viscosity and pose risks of phase separation, necessitating stable emulsions for consistent fiber production. These observations underline the need for careful material selection and precise formulation to optimize electrospinning processes for specific applications.

5. Conclusion

This study underscores the significant potential of natural additives, including essential oils, fixed oils, and plant extracts, in electrospun nanofiber production. Essential oils, known for their bioactive properties such as antimicrobial, antioxidant, and anti-inflammatory activities, have been extensively incorporated into

nanofibers, enhancing their functionality for applications in biomedical fields, food packaging, and cosmetics. However, challenges such as volatility and compatibility with polymer solutions remain key considerations in their effective use.

Similarly, fixed oils, despite their superior properties like plasticization, hydrophobicity, and structural enhancement, are underutilized in nanofiber production. Their incorporation into nanofibers has been limited, likely due to challenges related to process parameters and their compatibility with polymer matrices. Considering their unique advantages, fixed oils offer significant potential for applications such as drug delivery, moisture barriers, and wound healing. More research is needed to optimize their integration into nanofiber systems, particularly by tailoring their use based on specific application needs and refining electrospinning conditions to accommodate their properties.

Plant extracts, on the other hand, exhibit exceptional versatility due to their diverse bioactive compounds and compatibility with various polymer systems. They are highly effective in enhancing nanofiber functionality through antioxidant and antimicrobial properties, making them suitable for applications such as biodegradable packaging and biomedical materials. Their stability within polymer matrices and ability to support controlled release further underscore their utility. Future research should focus on leveraging the solubility and formulation flexibility of plant extracts to expand their application scope and optimize electrospinning parameters for consistent fiber production.

Ethical Approval

In this study, ChatGPT was employed for specific text edits and language checks, with all content subsequently reviewed and verified by the author. The study adhered to all applicable ethical guidelines.

References

Abdu, M. T., Abuhasel, K. A., Alquraish, M., Nagy, S., Khodir, S., & Ali, A. A. (2023). Selected natural fibers and their electrospinning. *Journal of Polymer Research*, 30(9), 340.

Aghayan, N., Seyfi, J., Asadollahzadeh, M., Davachi, S., & Hasani, M. (2022). Preparation and characterization of antibacterial chitosan nanocomposites loaded with cellulose/chitosan nanofibers and essential oils. *Polymers and Polymer Composites*, 30. <https://doi.org/10.1177/09673911221098732>

Ahmad, M. and Rahman, N. (2021). Preparation and characterization of highly porous polyacrylonitrile electrospun nanofibers using lignin as soft template via selective chemical dissolution technique. *Polymers*, 13(22), 3938. <https://doi.org/10.3390/polym13223938>

Alhasso, B., Ghorri, M., & Conway, B. (2022). Systematic review on the effectiveness of essential and carrier oils as skin penetration enhancers in pharmaceutical formulations. *Scientia Pharmaceutica*, 90(1), 14. <https://doi.org/10.3390/scipharm90010014>

Allahvaisi, S., Talebi, K., Imani, S., & Khanjani, M. (2017). Contact toxicity of ploy lactic acid nanofibers loaded with two essential oils against plodia interpunctella hub. (lepidoptera: pyralidae). *Journal of Biopesticides*, 10(1), 50-59. <https://doi.org/10.57182/jbiopestic.10.2.50-59>

Bachs-Herrera, A., Yousefzade, O., del Valle, L. J., & Puiggali, J. (2021). Melt electrospinning of polymers: blends,

nanocomposites, additives and applications. *Applied Sciences*, 11(4), 1808.

Bahrami, Z., Pedramnia, A., Saeidi-Asl, M., Armin, M., & Heydari-Majd, M. (2022). Bioactive gliadin electrospinning loaded with zataria multiflora boiss essential oil: improves antimicrobial activity and release modeling behavior. *Food Science & Nutrition*, 11(1), 307-319. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3062>

Berechet, M., Gaidău, C., Miletić, A., Pilić, B., Râpă, M., Stanca, M., ... & Lazea-Stoyanova, A. (2020). Bioactive properties of nanofibres based on concentrated collagen hydrolysate loaded with thyme and oregano essential oils. *Materials*, 13(7), 1618. <https://doi.org/10.3390/ma13071618>

Çallıoğlu, F. and Güler, H. (2020). Production of essential oil-based composite nanofibers by emulsion electrospinning. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(7), 1178-1185. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.67424>

Çallıoğlu, F. C., & Güler, H. K. (2020). Production of essential oil-based composite nanofibers by emulsion electrospinning. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(7), 1178-1185.

Çallıoğlu, F., Güler, H., & Çetin, E. (2020). Comparative analysis of clove and eucalyptus essential oils-based pvp/gelatin nanofibers. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 30(2), 126-137. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.621380>

Çelebioğlu, A., Yıldız, Z., & Uyar, T. (2018). Thymol/cyclodextrin inclusion complex nanofibrous webs:

enhanced water solubility, high thermal stability and antioxidant property of thymol. *Food Research International*, 106, 280-290. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.062>

Chao, C., Mani, M., & Jaganathan, S. (2018). Engineering electrospun multicomponent polyurethane scaffolding platform comprising grapeseed oil and honey/propolis for bone tissue regeneration. *PLoS ONE*, 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205699>.

Chao, C., Mani, M., & Jaganathan, S. (2018). Engineering electrospun multicomponent polyurethane scaffolding platform comprising grapeseed oil and honey/propolis for bone tissue regeneration. *Plos One*, 13(10), e0205699. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205699>

Chomachayi, M., Solouk, A., Akbari, S., Sadeghi, D., Mirahmadi, F., & Mirzadeh, H. (2018). Electrospun nanofibers comprising of silk fibroin/gelatin for drug delivery applications: thyme essential oil and doxycycline monohydrate release study. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 106(4), 1092-1103. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36303>

de Souza, A. L. C., Campos e Silva, R., Bezerra, F. W. F., de Oliveira, M. S., Neves Cruz, J., & de Aguiar Andrade, E. H. (2022). *Essential Oils and Their General Aspects, Extractions and Aroma*

Deyab, N. M., Ekram, B., Badr, K. R., Abd El-Hady, B. M., & Allam, N. K. (2022). Antiviral electrospun polyamide three-layered mask filter containing metal oxide nanoparticles and black seed oil. *ACS omega*, 7(48), 44438-44447.

El-Aassar, M., Ibrahim, O., & Al-Oanzi, Z. (2021). Biotechnological applications of polymeric nanofiber platforms loaded with diverse bioactive materials. *Polymers*, 13(21), 3734. <https://doi.org/10.3390/polym13213734>

ERTUĞRAL, T. (2023). Preparation and characterization of polylactic acid based nanofiber loaded with tangerine peel (citrus unshiu) essential oil. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(3), 283-287. <https://doi.org/10.18466/cbayarfb.1333674>

Fowler, M. (2006). Plants, medicines and man. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(12), 1797-1804. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2598>

Geremias, T., Sartoretto, S., Batistella, M., Souza, S., Alves, A., Uzeda, M., ... & Calasans-Maia, M. (2021). In vivo biological evaluation of biodegradable nanofibrous membranes incorporated with antibiofilm compounds. *Polymers*, 13(15), 2457. <https://doi.org/10.3390/polym13152457>

Hosseini, F., Miri, M., Najafi, M., Soleimanifard, S., & Aran, M. (2021). Encapsulation of rosemary essential oil in zein by electrospinning technique. *Journal of Food Science*, 86(9), 4070-4086. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15876>

Huang, X., Teng, Z., Xie, F., Wang, G., Li, Y., Liu, X., & Li, S. (2024). Loading of cinnamon essential oil into electrospun octenylsuccinylated starch-pullulan nanofiber mats: Electrospinnability evaluation, structural characterization, and antibacterial potential. *Food Hydrocolloids*, 148, 109426.

Irshad, M., Subhani, M., Ali, S., & Hussain, A. (2020). Biological importance of essential oils. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87198>

Jadhav, R., & Tasgaonkar, R. (2023). Nanofibers: The Novel Technology. International Journal For Science Technology And Engineering. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49859>

Jaganathan, S. K., Mani, M. P., Ayyar, M., & Supriyanto, E. (2017). Engineered electrospun polyurethane and castor oil nanocomposite scaffolds for cardiovascular applications. Journal of Materials Science, 52(18), 10673-10685.

Jiang, S., Meng, X., Chen, B., Wang, N., & Chen, G. (2020). Electrospinning superhydrophobic–superoleophilic pvdf-sio2 nanofibers membrane for oil–water separation. Journal of Applied Polymer Science, 137(47). <https://doi.org/10.1002/app.49546>

Kalorizou, H., Giannoulis, P., Kiritsaka, E., & Papachatzis, A. (2022). Effect of pepermint and oregano essential oil on olive seed germination. Annals of the University of Craiova Series Biology Horticulture Food Products Processing Technology Environmental Engineering, 27(63). <https://doi.org/10.52846/bihpt.v27i63.38>

Karami, N., Kamkar, A., Shahbazi, Y., & Misaghi, A. (2021). Electrospinning of double-layer chitosan-flaxseed mucilage nanofibers for sustained release of Ziziphora clinopodioides essential oil and sesame oil. Lwt, 140, 110812.

Kesici Güler, H., Cengiz Çallıoğlu, F., & Sesli Çetin, E. (2019). Antibacterial PVP/cinnamon essential oil nanofibers by

emulsion electrospinning. The journal of the Textile Institute, 110(2), 302-310.

Krysiak, Z., Kaniuk, Ł., Metwally, S., Szewczyk, P., Sroczyk, E., Peer, P., ... & Stachewicz, U. (2020). Nano- and microfiber pvb patches as natural oil carriers for atopic skin treatment. *Acs Applied Bio Materials*, 3(11), 7666-7676. <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00854>

Kumari, S. (2023). *Ascaridia galli* (chicken nematode) as a source for nanoparticle and nanofiber. *International Journal of Zoological Investigations*, 9(1), 744-748. <https://doi.org/10.33745/ijzi.2023.v09i01.083>

Kwon, S., Yang, H., & Lee, S. (2023). Core-shell nanofibers as carrier systems for sustained delivery of tea tree oil. *Textile Research Journal*, 93(21-22), 4742-4754. <https://doi.org/10.1177/00405175231180570>

Lee, J., Lee, J., Ko, S., Son, B., Lee, J., Kim, C., ... & Park, C. (2020). Fabrication of antibacterial nanofibrous membrane infused with essential oil extracted from tea tree for packaging applications. *Polymers*, 12(1), 125. <https://doi.org/10.3390/polym12010125>

Lee, K., & Lee, S. (2020). Electrospun Nanofibrous Membranes with Essential Oils for Wound Dressing Applications. *Fibers and Polymers*, 21(5), 999-1012.

Lee, M., An, S., Lathe, S., Lee, C., Hong, S., & Yoon, S. (2013). Electrospun polystyrene nanofiber membrane with superhydrophobicity and superoleophilicity for selective separation

of water and low viscous oil. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 5(21), 10597-10604. <https://doi.org/10.1021/am404156k>

Li, D., & Xia, Y. (2004). Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?. *Advanced materials*, 16(14), 1151-1170.

Liakos, I. L., Holban, A. M., Carzino, R., Lauciello, S., & Grumezescu, A. M. (2017). Electrospun fiber pads of cellulose acetate and essential oils with antimicrobial activity. *Nanomaterials*, 7(4), 84.

Liakos, I., Rizzello, L., Hajiali, H., Brunetti, V., Carzino, R., Pompa, P., ... & Mele, E. (2015). Fibrous wound dressings encapsulating essential oils as natural antimicrobial agents. *Journal of Materials Chemistry B*, 3(8), 1583-1589. <https://doi.org/10.1039/c4tb01974a>

Mannai, F. (2023). Electrospun cactus mucilage/poly(vinyl alcohol) nanofibers as a novel wall material for dill seed essential oil (*anethum graveolens* l.) encapsulation: release and antibacterial activities. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 15(50), 58815-58827. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c13289>

Marshall, T. (2023). Aroma compounds of carrier oils. *Appliedchem*, 3(4), 546-580. <https://doi.org/10.3390/appliedchem3040034>

Martín-Alfonso, M. A., Rubio-Valle, J. F., Estrada-Villegas, G. M., Sánchez-Domínguez, M., & Martín-Alfonso, J. E. (2024). Exploring Cellulose Triacetate Nanofibers as Sustainable Structuring Agent for Castor Oil: Formulation Design and Rheological Insights. *Gels*, 10(4), 221. Mele, E. (2017). Electrospun

Nanofibres Containing Antimicrobial Plant Extracts. *Nanomaterials*, 7(2), 42

Mele, E. (2020). Electrospinning of Essential Oils. *Polymers*, 12(4), 908.

Mele, E. (2020). Electrospinning of Essential Oils. *Polymers*, 12(4), 908. <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/4/908>

Mínguez-García, D., Breve, N., Capablanca, L., Bonet-Aracil, M., Díaz-García, P., & Gisbert-Payá, J. (2022). Liquid oil trapped inside pva electrospun microcapsules. *Polymers*, 14(23), 5242. <https://doi.org/10.3390/polym14235242>

Moghaddasi, M., Özdemir, M. M. M., Noshahr, A. T., Ozadenc, H. M., Oktay, B., Bingöl, A. B., ... &

Moradinezhad, F., et al. (2024). Zein Multilayer Electrospun Nanofibers Contain Essential Oil: Release Kinetic, Functional Effectiveness, and Application to Fruit Preservation. *Foods*, 13(5), 700

Mori, C., Passos, N., Oliveira, J., Altoé, T., Mori, F., Mattoso, L., ... & Tonoli, G. (2015). Nanostructured polylactic acid/candeia essential oil mats obtained by electrospinning. *Journal of Nanomaterials*, 2015(1). <https://doi.org/10.1155/2015/439253>

Mouro, C., & Gouveia, I. C. (2023). Electrospun wound dressings with antibacterial function: a critical review of plant extract and essential oil incorporation. *Critical Reviews in Biotechnology*, 44(4), 641–659. <https://doi.org/10.1080/07388551.2023.2193859>

Munteanu, B. S., & Vasile, C. (2021). Encapsulation of natural bioactive compounds by electrospinning—Applications in food storage and safety. *Polymers*, 13(21), 3771.

Nayak, R., Kyratzis, I. L., Truong, Y. B., Padhye, R., & Arnold, L. (2012). Melt-electrospinning of polypropylene with conductive additives. *Journal of Materials Science*, 47, 6387-6396.

Olalere, O. A., Gan, C. Y., Taiwo, A. E., Adeyi, O., & Olaiya, F. G. (2024). Essential Oils: Sustainable Extraction Techniques and Nutraceuticals Perspectives. In *Bioactive Extraction and Application in Food and Nutraceutical Industries* (pp. 373-389). New York, NY: Springer US.

Orchard, A., Kamatou, G., Viljoen, A., Patel, N., Mawela, P., & Vuuren, S. (2019). The influence of carrier oils on the antimicrobial activity and cytotoxicity of essential oils. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2019, 1-24. <https://doi.org/10.1155/2019/6981305>

Osanloo, M., Arish, J., & Sereshti, H. (2020). Developed methods for the preparation of electrospun nanofibers containing plant-derived oil or essential oil: a systematic review. *Polymer Bulletin*, 77, 6085-6104.

Ozer, F. T., & San Keskin, N. O. (2024). Fabrication of Stable Dual-Layer Polymer-Based Nanofibers with Applications for Food Preservation. *ChemistrySelect*, 9(10), e202304294.

Özkal, A., Çallıoğlu, F. C., & Akduman, Ç. (2020). Development of a new nanofibrous composite material from

recycled nonwovens to improve sound absorption ability. The journal of the Textile Institute.

Pala, N. (2022). Emulsion electrospinning of pva nanofibers containing hypericum perforatum oil. *Tekstil ve Mühendis*, 29(128), 267-271. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1222500>

Peng, F., Xu, J., Xu, H., & Bao, H. (2020). Electrostatic interaction-controlled formation of pickering emulsion for continuous flow catalysis. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 13(1), 1872-1882. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c17857>

Pires, J. B., Dos Santos, F. N., da Cruz, E. P., Fonseca, L. M., Siebeneichler, T. J., Lemos, G. S., ... & Dias, A. R. G. (2024). Starch extraction from avocado by-product and its use for encapsulation of ginger essential oil by electrospinning. *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127617.

Priyanto, A., Hapidin, D., & Khairurrijal, K. (2022). Potential loading of virgin coconut oil into centrifugally-spun nanofibers for biomedical applications. *Chembioeng Reviews*, 9(4), 393-408. <https://doi.org/10.1002/cben.202100043>

Rahim, M. A., et al. (2023). Essential Components from Plant Source Oils: A Review on Extraction, Detection, Identification, and Quantification. *Molecules*, 28(19), 6881

Rahim, M. A., et al. (2023). Essential Components from Plant Source Oils: A Review on Extraction, Detection, Identification, and Quantification. *Molecules*, 28(19), 6881. <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/19/6881>

Rahim, M. A., Shoukat, A., Khalid, W., Ejaz, A., Itrat, N., Majeed, I., ... & Al-Farga, A. (2022). A narrative review on various oil extraction methods, encapsulation processes, fatty acid profiles, oxidative stability, and medicinal properties of black seed (*Nigella sativa*). *Foods*, 11(18), 2826.

Rather, A., Wani, T., Khan, R., Pant, B., Park, M., & Sheikh, F. (2021). Prospects of polymeric nanofibers loaded with essential oils for biomedical and food-packaging applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(8), 4017. <https://doi.org/10.3390/ijms22084017>

Recovery. In *Essential Oils: Applications and Trends in Food Science and Technology* (pp. 3-20). Cham: Springer International Publishing.

Rezk, M., Ibrahim, S., Khalil, E., Saba, D., Abdellatif, M., Abdellatif, A., ... & Allam, N. (2023). Pumpkin seed oil -loaded chitosan/polyvinyl alcohol electrospun nanofiber scaffold for dermal and oral wound dressing. *Chemistryselect*, 8(26). <https://doi.org/10.1002/slct.202300722>

Ribeiro, A. R., Silva, S. S., & Reis, R. L. (2022). Challenges and opportunities on vegetable oils derived systems for biomedical applications. *Biomaterials Advances*, 134, 112720.

Sinsup et al. "Zingiber cassumunar Roxb. Essential Oil-Loaded Electrospun Poly(lactic acid)/Poly(ethylene oxide) Fiber Blend Membrane for Antibacterial Wound Dressing Application" *Membranes* (2021) doi:10.3390/membranes11090648.

Sofi, H. S., Akram, T., Tamboli, A. H., Majeed, A., Shabir, N., & Sheikh, F. A. (2019). Novel lavender oil and silver nanoparticles simultaneously loaded onto polyurethane nanofibers for wound-healing applications. *International journal of pharmaceutics*, 569, 118590.

Stoyanova, N., Nachev, N., & Spasova, M. (2023). Innovative bioactive nanofibrous materials combining medicinal and aromatic plant extracts and electrospinning method. *Membranes*, 13(10), 840.

Tang, Y., Zhou, Y., Lan, X., Huang, D., Luo, T., Ji, J., ... & Wang, W. (2019). Electrospun gelatin nanofibers encapsulated with peppermint and chamomile essential oils as potential edible packaging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(8), 2227-2234. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b06226>

Tariq, H., Rehman, A., Raza, Z. A., Kishwar, F., & Abid, S. (2024). Recent progress in the microencapsulation of essential oils for sustainable functional textiles. *Polymer Bulletin*, 81(9), 7585-7629.

Teo, W. E., & Ramakrishna, S. (2006). A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. *Nanotechnology*, 17(14), R89.

Topuz, F., & Uyar, T. (2018). Influence of hydrogen-bonding additives on electrospinning of cyclodextrin nanofibers. *ACS omega*, 3(12), 18311-18322.

Uddin, M. N., Ali, A., Jobaer, M., Mahedi, S. I., Krishnamoorthy, A., & Bhuiyan, M. R. (2024). Electrospun

nanofibers based on plant extract bioactive materials as functional additives: possible sources and prospective applications. *Materials Advances*.

Ünalın, I., Endlein, S., Slavik, B., Buettner, A., Goldmann, W., Detsch, R., ... & Boccaccini, A. (2019). Evaluation of electrospun poly(ϵ -caprolactone)/gelatin nanofiber mats containing clove essential oil for antibacterial wound dressing. *Pharmaceutics*, 11(11), 570. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics11110570>

Üstündağ, C. B. (2024). Blend Electrospinning of *Nigella sativa*-Incorporating PCL/PLA/HA Fibers and Its Investigation for Bone Healing Applications. *ACS omega*, 9(9), 10267-10275.

Wit, M., Hugo, A., & Shongwe, N. (2017). South african cactus pear seed oil: a comprehensive study on 42 spineless burbank opuntia ficus-indica and opuntia robusta cultivars. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120(3). <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700343>

Yang, C., Wu, X., Zhao, Y., Xu, L., & Wei, S. (2011). Nanofibrous scaffold prepared by electrospinning of poly(vinyl alcohol)/gelatin aqueous solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(5), 3047-3055. <https://doi.org/10.1002/app.33934>

Yousefi, I., Pakravan, M., Rahimi, H., Bahador, A., Farshadzadeh, Z., & Haririan, I. (2017). An investigation of electrospun Henna leaves extract-loaded chitosan based nanofibrous mats for skin tissue engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 75, 433-444.

Zambak, Ö., Özkal, A., & Özkal, S. G. (2022). Production of clove extract loaded pullulan and whey protein nanofibers as antioxidant and antibacterial agent. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(46), e53141.

Zhang, Z.; Zheng, Y.; Zhang, L.; Prasath Mani, M.; Kumar Jaganathan, S. In Vitro Blood Compatibility and Bone Mineralization Aspects of Polymeric Scaffold Laden with Essential Oil and Metallic Particles for Bone Tissue Engineering. *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 2019, 24, 504–516

Zhou, W., Li, J., Wang, X., Liu, L., Li, Y., Song, R., ... & Li, X. (2023). Research progress on extraction, separation, and purification methods of plant essential oils. *Separations*, 10(12), 596.

