

Tekstil Bilimleri ve Mühendisliğinde İnovatif Çalışmalar

Editörler: Süreyya KOCATEPE • Hüsnü AYDEMİR



Tekstil Bilimleri ve Mühendisliğinde İnovatif Çalışmalar

Editörler:

Süreyya KOCATEPE

Hüsnü AYDEMİR



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şehitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozguryayinlari.com

✉ info@ozguryayinlari.com

Tekstil Bilimleri ve Mühendisliğinde İnovatif Çalışmalar

Editörler: Süreyya KOCATEPE • Hüsnü AYDEMİR

Language: Turkish-English

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-8562-06-4

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1118>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Kocatepe, S. (ed), Aydemir, H. (ed) (2025). *Tekstil Bilimleri ve Mühendisliğinde İnovatif Çalışmalar*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1118>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozguryayinlari.com/>



Ön Söz

Son yıllarda bilim ve teknolojiye yaşanan gelişmeler, tekstil dünyasındaki geleneksel üretim metotlarının ötesinde, bu alandaki çalışmaları, sürdürülebilir ve çok boyutlu bir araştırma alanına doğru yönlendirmiştir. Günümüzde tekstil bilimleri ve mühendisliği; malzeme bilimi, çevresel duyarlılık ve performans odaklı yaklaşımların kesiştiği multidisipliner bir çalışma alanı sunmaktadır.

Tekstil Bilimleri ve Mühendisliğinde İnovatif Çalışmalar başlıklı bu kitap, tekstil alanında yürütülen güncel bilimsel çalışmaları bir araya toplayarak, doğal ve biyokökenli malzemeler odağında yenilikçi yaklaşımlara ışık tutmayı hedeflemektedir. Eserde yer alan çalışmalar, tekstil malzemelerinin yapısal özellikleri ile kullanım ve performans ilişkilerini bilimsel bir bakış açısıyla ele almaktadır.

Kitapta sunulan çalışmaların, tekstil bilimleri ve mühendisliği alanında hem kuramsal hem de uygulamaya yönelik katkılar sağlayacağı; özellikle sürdürülebilirlik ve inovasyon ekseninde yeni araştırmalara zemin oluşturacağı düşünülmektedir.

Bu eserin hazırlanmasında emeği geçen değerli bölüm yazarlarına ve yayın sürecindeki destekleri için Özgür Yayınları çalışanlarına teşekkür ederiz.

İçindekiler

Ön Söz

iii

Bölüm 1

Biyokökenli Sürdürülebilir Akustik Yalıtım Malzemesi Olarak Kaz Tüyü
Liflerinin Morfolojik Olarak İncelenmesi

1

Süreyya Kocatepe

Bölüm 2

Kaz Tüylerinin Yapısal Özellikleri, Kullanım Alanları ve Yıkama Programı
Önerisi

23

Müslüm Erol

Bölüm 3

Rami Liflerinde Yüzey Modifikasyon İşlemleri ve Su Emiliminin Darbe
Dayanımına Etkisi

47

Hüsnü Aydemir

Biyokökenli Sürdürülebilir Akustik Yalıtım Malzemesi Olarak Kaz Tüyü Liflerinin Morfolojik Olarak İncelenmesi

Süreyya Kocatepe¹

Özet

Son yıllarda, biyolojik kökenli lifli yapılar, sentetik akustik malzemelere sürdürülebilir alternatifler olarak önemli ölçüde dikkat çekmektedir. Bir takım doğal liflere bakıldığında, kuş tüylerinin kullanımı akustik yalıtım uygulamalarında çok fazl tercih edilen bir malzeme olmasada, son yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında bu malzemenin alternatif olarak umut vaad eden bir malzeme olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kaz tüyleri morfolojik açıdan değerlendirilerek, kaz tüyü liflerinin benzersiz bir biçimde akustik alanda yüksek seviye kullanım bulabileceğini destekler niteliktedir. Liflerin dallı bir yapıda olmasının yanı sıra içyapısının boşluklu olması gözenekli bir lif olarak bu malzemeyi akustik sektöründe kullanmak için oldukça elverişli kılmaktadır. Konvansiyonel doğal liflerin aksine, düşük yoğunlukta olmaları, içyapıda havayı hapsedmeleri ve düzensiz gözenek topolojisi kavramlarının birleşimi yüksek derece bu malzemenin sesi sönümleme potansiyelinin olacağına işaret etmektedir. Tüylerde bulunan liflerin dikensi yapıların inceliği, dallanma yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğünün malzemedeki hava akış direncini ve enerji dağılım mekanizmalarını etkileyerek sesin sönümlemesine imkân vereceğini vaat etmektedir. Ancak liflerin akustik davranışlarını ele alan sistematik çalışmalar bu alanda oldukça sınırlıdır. O nedenle bu çalışma mevcut literatür bilgilerini sentezleyerek ve ses yutum performansı için yapı temelli hipotezler önererek literatürde var olan kritik boşluğu doldurmaktadır. Kaz tüylerinin yenilenebilir, hafif ve biyolojik olarak parçalanabilen bir malzeme olarak yeni nesil biyobazlı akustik ses yalıtım malzemelerinin geliştirilmesini desteklemeyi amaçlamaktadır.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ Organize Sanayi Bölgesi MYO, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Elazığ/Türkiye, sureyya.kocatepe@hotmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8084-0699

1. Giriş

Gürültü kirliliğine yönelik oluşan endişe, dünya genelinde ekonomik olarak ilerleme, teknolojik gelişim ve kentsel genişleme ile birlikte artmış durumdadır. Gürültüye maruz kalmanın olumsuz sonuçları arasında ciddi işitme kaybı, yüksek tansiyon, artan nefes hızı, kardiyovasküler rahatsızlıkların başlaması, sindirim bozuklukları, davranışsal ve psikolojik anomaliler, stres ve uyku bozuklukları gibi işitsel olmayan etkiler görülmektedir [Sheikhmozafari ve ark., 2021].

Değişen dünya düzeni ile birlikte kentsel nüfusun yoğunlaşması ve endüstriyel ortamlarda gürültünün artması, insan sağlığı üzerinde bir takım olumsuz sonuçlar oluşturmaktadır. Meydana gelen bu olumsuz durum ise hafif yapı elemanları ve iç mekân tasarımlarında etkili akustik çözümlerin geliştirilmesi konusunda meydana gelen ihtiyacı güçlendirmektedir. Özellikle iç mekân yapılar, otomotiv ve taşımacılık sektöründe ağırlık bakımından hafif, çevre dostu ve yüksek performanslı ses yalıtım malzemelerine olan talep giderek artmış durumdadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde petrokimyasal bazlı geleneksel ses yalıtık malzemelerinin çevresel düzeyde maliyeri ve geri dönüşüm sorunları ele alındığında biyokökenli alternatif malzemelerin araştırılması ve piyasaya çıkarılması hız kazanmıştır [Lashgari ve ark., 2024].

Yapılan çalışmalara bakıldığında son senelerde doğal ve geri dönüştürülmüş malzemelere duyulan ilginin artması, bu malzemelerin sadece çevresel ve sağlık üzerindeki etkilerin azatılmasına katkı sunmadığı, aynı zamanda ekonomik olarak ciddi bir fırsat sunduğu görülmektedir. Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde daha sürdürülebilir ve ekonomik olarak daha uygulanabilir çözüm arayışlarını beraberinde getirmiştir. Bu alandaki araştırmalar 2 geniş kategoride değerlendirilebilir: Birinci kategori yalnızca ham doğal elyaf malzemelerinin kullanılması ve bu malzemelerin incelenmesine adanmış çalışmaları içerirken, ikinci kategori ise genellikle biyokompozitler olarak isimlendirilen polimer matris içinde takviye olarak doğal elyafların kullanıldığı araştırmaları kapsamaktadır [Arenas ve ark.,2020].

Yapısal olarak lifli ve gözenekli malzemeler, ses enerjisinin yapı içinde viskoz ve termal kayıplarla dönüştürülmesine dayanan mekanizmaları ile birlikte akustik alandaki uygulamalarda uzun zamandır tercih edilmektedir. Lif çapı, gözenek boyutu dağılımı, porozite, akış direnci (airflow resistivity) ve yapı tortuozitesi gibi mikro ölçek parametreler; malzemenin frekans bağımlı ses yutma performansını belirler. Bununla birlikte, doğal liflerden üretilen paneller ve kompozitler (ör. kenaf, jüt, hindistancevizi, kenevir) üzerinde yapılan son çalışmalarda, uygun işlem ve sıkıştırma koşullarıyla doğal liflerin geniş bantlı ses yutma potansiyeli gösterdiği raporlanmıştır.

Bu çalışmalar doğal liflerin hem sürdürülebilir hem de rekabetçi akustik çözümler sağlayabileceğini desteklemektedir [Yang ve ark., 2020].

Bununla birlikte, doğrudan avian (kuş) tüyleri özellikle kaz ve ördek tüyleri, akustik literatürde ihmal edilen bir alan olarak kalmıştır. Son birkaç yılda atık kuş tüylerinden elde edilen kompozitlerin ve katmanlı tüy matlarının ses yutma özelliklerini gösteren deneysel çalışmalar ortaya çıkmaya başlamış; örneğin tavuk-tüyü ve diğer kuş tüyü bazlı numuneler orta yüksek frekans aralığında umut verici performans göstermiştir [Pasayev ve ark., 2018]. Ancak bu çalışmalar hâlen sınırlı sayıda olup, tüylerin hiyerarşik morfolojisinin (calamus/quill, barb, barbu) akustik etkileri sistematik olarak ele alınmamıştır. Dolayısıyla kuş tüyleri, hem bol bulunurlukları hem de benzersiz yapısal özellikleri nedeniyle incelenmeye değerdir [Artayani, M., 2024].

Akustik performansın doğru anlaşılabilmesi için sadece makro parametrelere (kalınlık, yoğunluk, gramaj) bakmak yetersiz kalır; malzeme içindeki mikro ve mezo ölçek yapının doğrudan karakterizasyonu gereklidir. Bu nedenle SEM (Scanning Electron Microscopy) analizleri, tüy liflerinin dallanma yoğunluğu, lumen hacmi, yüzey pürüzlülüğü ve boşluk topolojisi gibi kritik morfolojik öğeleri nicel ve nitel olarak ortaya koymak için vazgeçilmez bir araçtır. SEM tabanlı morfolojik veriler, mevcut poröz malzeme modelleri ve akustik kuramsal çerçevelerle (ör. JCAL / Champoux–Allard, Delany–Bazley gibi yaklaşımlar) ilişkilendirildiğinde, tüylerin hangi frekans bantlarında ve hangi mekanizmalarla (viskoz sürtünme, termal kayıp, rezonans, çoklu saçılma) etkili olabileceği konusunda sağlam hipotezler üretilir [Yang, 2020].

Bu çalışmanın amacı, kaz tüyü liflerinin hiyerarşik morfolojisini SEM analizleriyle sistematik olarak betimleyip, gözlemlenen yapısal özelliklerin akustik yalıtım (transmission loss ve/veya absorption) açısından taşıdığı potansiyeli kavramsal olarak ortaya koymaktır. Deneysel ölçüm metodlarından empadas tüpü, reverbasyon kabini vb. çalışmalar bu çalışmanın dışında tutulmaktadır. Mevcut literatür çalışmaları ışığında SEM çalışmaları yardımıyla yapı-işlev bağlantısı kurularak tüy esaslı akustik malzemelerin tasarlanmasına yönelik somut anlamda önerilerin getirilmesi hedeflenmiştir. Bu yaklaşımla hem sürdürülebilirlik hedefleri hem de hafif yapı uygulamaları bakımından yeni araştırma yolları açması beklenmektedir.

2. Doğal Liflerle Akustik Yalıtımın Teorik Temelleri

2.1. Gözenekli Lifli Malzemelerde Ses Malzeme Etkileşiminin Temeli

Gözenekli malzemelerde ses yutma temel olarak havanın lifli matris içinde ilerlerken yüzeylerle etkileşmesi sonucu oluşan viskoz ve termal kayıplara dayanır; küçük gözeneklerde hava akışı sınır tabakaları oluşturur ve bu sınır tabakalarında sürtünme, enerjiyi ısıya dönüştürür. Doğal liflerin düzensiz lif yönelimi ve geniş yüzey-hacim oranı, bu mekanizmaların etkisini artırır. Son yıllarda yapılan derleme ve deneysel çalışmalar doğal liflerin uygun üretim/işleme koşullarında rekabetçi ses yutma performansı gösterebildiğini ortaya koymuştur [Moncayo ve ark., 2024].

2.2. Mikro Yapı Parametrelerinin Etkisi: Lif Çapı, Porozite ve Tortuozite

Akustik tepkiyi belirleyen ana parametreler lif çapı dağılımı, gözenek boyutu, porozite ve tortuozitedir. İnce lifler yüksek yüzey alanı sağlar ve yüksek frekanslarda viskoz kayıpları artırır; çok ölçekli (mikro-+mezo) porozite ise farklı frekans bantlarında enerji sönümü sağlar. Deneysel çalışmalarda, doğal lif panellerin (örn: çeşitli bitkisel lifler ve tüy tabanlı yapılar) bu heterojen mikro yapıları nedeniyle geniş bantlı performans gösterebildikleri bildirilmiştir [Abdul Aziz&Kamarul, 2021]

2.3. Akış Direnci (Airflow Resistivity): Ses Yutma Kapasitesinin Temel Göstergesi

Akış direnci (σ) bir gözenekli malzemenin akustik performansındaki en kritik niceliklerden biridir. Literatürde orta seviyede σ 'nin çoğu uygulama için optimum olduğu, aşırı yüksek veya düşük σ 'nin ise performansı olumsuz etkilediği gösterilmiştir. Doğal lif kaynaklı panellerde akış direnci liflerin dolgu yoğunluğu, sıkıştırma, lif biçimlenmesi ve yüzey topolojisi tarafından belirlenir. Dolayısıyla morfolojik veriler akış direncinin anlaşılmasında doğrudan anahtar rol oynar [Abdul Aziz&Kamarul, 2021].

2.4. Morfoloji-Akustik İlişisini Açıklayan Kuramsal Modeller

Poröz malzemeler için kullanılan yaygın modeller (Delany-Bazley, Johnson-Champoux-Allard – JCA, Zwikker-Kosten) temel olarak; akış direnci, porozite ve tortuozite gibi parametreleri kullanır. Ancak bu modeller çoğunlukla daha düzenli sentetik veya tek ölçekli doğal lifli yapılar için kalibre edilmiştir. Kaz tüyleri hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Bu tarz hiyerarşik yapıya sahip malzemelerin doğru bir şekilde temsil edilebilmesi

için model parametrelerine yapının lümen hacmi, barbules yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü gibi morfolojik ölçülerin girilmesi veya bu modellerin genişletilmesi gerekmektedir. Böylece hem teorik çalışmalar hem de son yıllardaki uygulamalı çalışmalar bahsediliği üzere model-deney bağlantısını kurmaya odaklanmıştır [Moncayo ve ark.,2024].

2.5. Gözenek Geometrisi, Kanal Yapıları ve Rezonans Etkileri

Gözeneklerin boyutu ve şekli (küresel boşluk, boru/kanal tipi, kapalı odaçıklar) rezonans-türü mekanizmalar oluşturabilir. Örneğin küçük bir boşluk + dar bir boğaz (Helmholtz tipi davranış) belirli frekansta yerel enerji zayıflaması sağlayabilir. Kaz tüyünün sap (calamus) içi boş kanal yapıları ve plumul-barbule hiyerarşisi bu tür mikro-Helmholtz benzeri veya kanal rezonanslarını tetikleyebilir. Bu nedenle SEM’de gözlenen iç boşluk geometrisinin rezonans katkısını tartışmak anlamlıdır. Literatürde atık tüylerden üretilen hava-laid matların 250–800 Hz aralığında iyi performans gösterdiği raporlanmıştır. Bu, yapısal rezonans ve çoklu saçılmanın ortak etkisine işaret eder [Dieckmann, 2018].

2.6. Lif Sertliği, Yoğunluk ve Akustik Empedans Geçiş

Malzeme içinde sert (sap/ calamus) ile yumuşak (plumule/barbule) bölgelerin varlığı bir empedans geçişi yaratır. Bu tür geçişler düşük frekansta yansımayı/iletimi etkiler ve malzemenin ses iletim kaybı (transmission loss: TL) davranışına katkıda bulunabilir. Bu açıdan kaz tüyü, hem düşük yoğunluklu (hafif) hem de yerel olarak sert yapılar içerdiği için, klasik tek özellikli lif yapılarında farklı bir TL profili verebilir. Bu tür heterojen yapıların akustik etkileri, son dönemde yapılan doğal atık tabanlı yalıtım çalışmaları tartışılmaktadır. [Dieckmann, 2018].

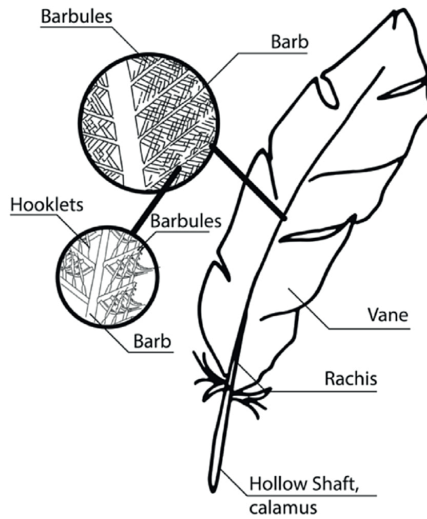
3. Kaz Tüylerinin Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi Ve Akustik Performans Özellikleri

Hayvansal tüylerin sahip oldukları bir takım benzersiz özellikler, onları yeniden yüksek performanslı malzemelere dönüştürme konusunda olarak sağlamaktadır. Tüyler ağırlıklı olarak keratinden oluşurlar ve Şekil 1’de gösterildiği üzere, içi boş bir gövde(rachis) ve tüy ekseninden oluşan karmaşık bir yapıya sahiptirler. Tüyler, diken ve tüycük adını verdiğimiz yapıdan meydana gelmektedir [Schelestow ve ark., 2017]. Nihayetinde tüyler yüksek çekme mukavemet ve tokluk özelliği ile beraber son derece hafif ve mükemmel ısı yalıtım özelliğine sahip olan materyallerdir. Tüylerin ayrıca göve ve dikenli yapıları ses dalgalarını emerek çok etkili bir şekilde

dağıtarak ses iletimini engellemesi nedeniyle sıradışı bir akustik özelliğe sahip olduğu bilinmektedir [Chen ve ark., 2017].

Hafif ses emici malzemeler, havacılık ve otomotiv uygulamalarında, ses iletiminin sorun olduğu bazı özel sivil altyapı geliştirmelerinde ve binalarda önemli bir yere sahiptir [Asdrubali ve ark., 2016].

Köpük yapı malzemelerinin normalde ses emiliminde yaygın kullanılması yine de alternatif açıdan daha sürdürülebilir malzemelerin geliştirilmesine olan ihtiyacın önünü kapatmamaktadır. Literatürde bakıldığında doğal ve geri dönüştürülmüş akustik malzemelerin üretimine dair çalışmalar bulunmaktadır fakat tüylerle ilgili olan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Tüylerle ilgili yapılan çalışmalar incelediğinde ise bu çalışmaların büyük oranda tavuk tüyleri kullanılarak yapıldığı görülmektedir. Kaz tüylerinin ses yalıtım malzemesi olarak kullanılmasına yönelik detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

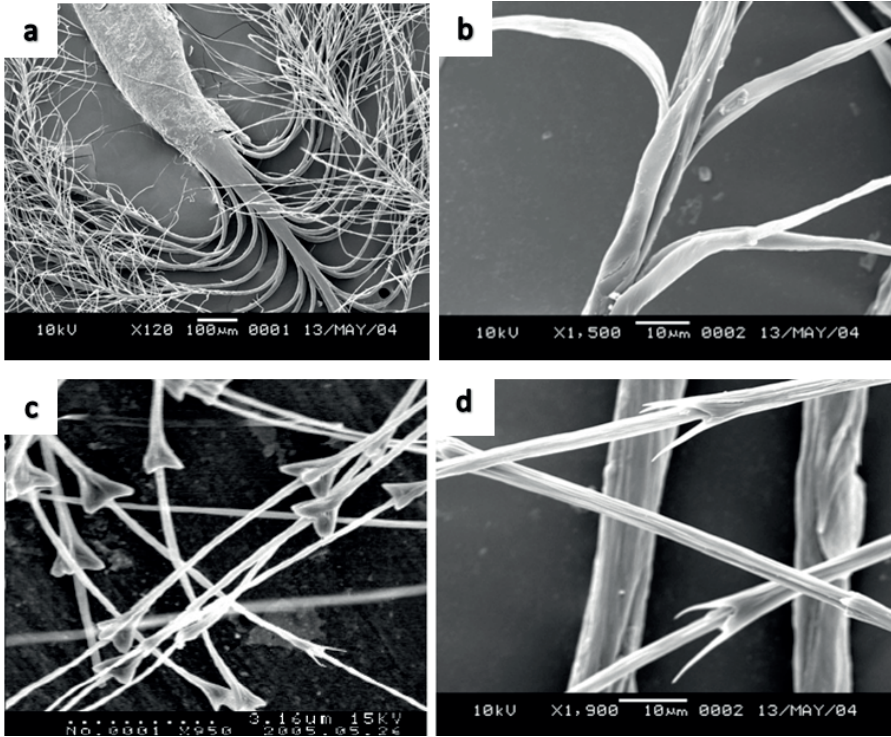


Şekil 1. Tüyün yapısı [Schelestow, 2017].

Kaz tüyleri hafiflik, yüksek hapsolmuş hava hacmi, doğal porozite ve kompleks lif mimarisi sayesinde ısı yalıtımında uzun süredir tercih edilmektedir. Fakat bu tüylerin morfolojik özelliklerinin ses yutumu üzerindeki potansiyel etkileri üzerinde az sayıda çalışma olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, kaz tüylerinin çok katmanlı mikroyapısının ses yutum mekanizmasına olan katkılarını anlamak, doğal lif esaslı üretilen sürdürülebilir ses yalıtım malzemelerinin tasarımı açısından önem taşımaktadır [Kang ve ark., 2021; Zulkifli ve ark., 2020].

Kaz tüylerinin karmaşık morfolojik yapısı ısı yalıtımında üstün performans göstermektedir. Literatür incelendiğinde bu konudaki en kapsamlı SEM temelli yapılan çalışmalardan birisi Gao, Yu ve Pan (2007) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma kaz tüylerinin ısı yalıtım mekanizmasını açıklayabilmek için hem morfolojik hem de fiziksel ve kimyasal özelliklerinin detaylı incelendiği kapsamlı bir araştırma olduğunu göstermektedir.

Gao'nun çalışmasındaki kaz tüylerinin SEM analizinde, tüylerin hiyerarşik olarak dallanmış bir yapıda olduğu gösterilmektedir. Bir kaz tüyü dalı, kısa bir merkezi gövdeden farklı açılarla ayrılan çok sayıdaki alt dallar ve bunların üzerinde yer alan yüzlerce ince fibrilden oluşmaktadır. Araştırmada fibril çaplarının yaklaşık 2–6 μm , alt dalların ise 8–20 μm aralığında olduğu; fibril uçlarında ise düzenli aralıklarla yerleşen düğüm (node) ve çatallanma (crotch) benzeri özel morfolojik unsurlar bulunduğu belirtilmiştir [Gao ve ark., 2007]. Bu düğümlerin ve çatallanma noktalarının, sıkıştırma altında bile yüksek geri kazanım sağlayan üç boyutlu bir iskelet oluşturduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, Gao'nun SEM incelemeleri büyük ölçüde liflerin enine kesitine ve makro düzeydeki yapısal bütünlüğüne odaklanmıştır. Bu nedenle, akustik davranışla doğrudan ilişkili olan mikro-gözeneklilik, iç boşluk yapıları ve tortuoosite gibi parametreler çalışma içerisinde net olarak ortaya çıkmamaktadır. Özellikle, SEM görüntülerinde makrofibrillerin oldukça kompakt ve gözeneksiz bir düzen içinde olduğu vurgulanmıştır. Bu durum ısı yalıtımı açısından avantajlı olmakla birlikte, akustik sönümleme açısından yorumlanabilir nitelikte boşluk bilgisi sunmamaktadır [Gao, 2002]. Bu nokta, kaz tüylerinin akustik uygulamalar açısından yeniden değerlendirilmesi için literatürde önemli bir boşluğun olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü akustik soğurma mekanizması, ısı yalıtımından farklı olarak, ses dalgalarının lifler arasındaki bağlantılı gözenek ağında sürtünmeye uğraması ve visko-termal kayıpların oluşmasıyla ilişkilidir; dolayısıyla lif yüzeyi, fibril düzeni ve özellikle mikro ölçekli porozite akustik performansı belirleyen temel unsurlardır.



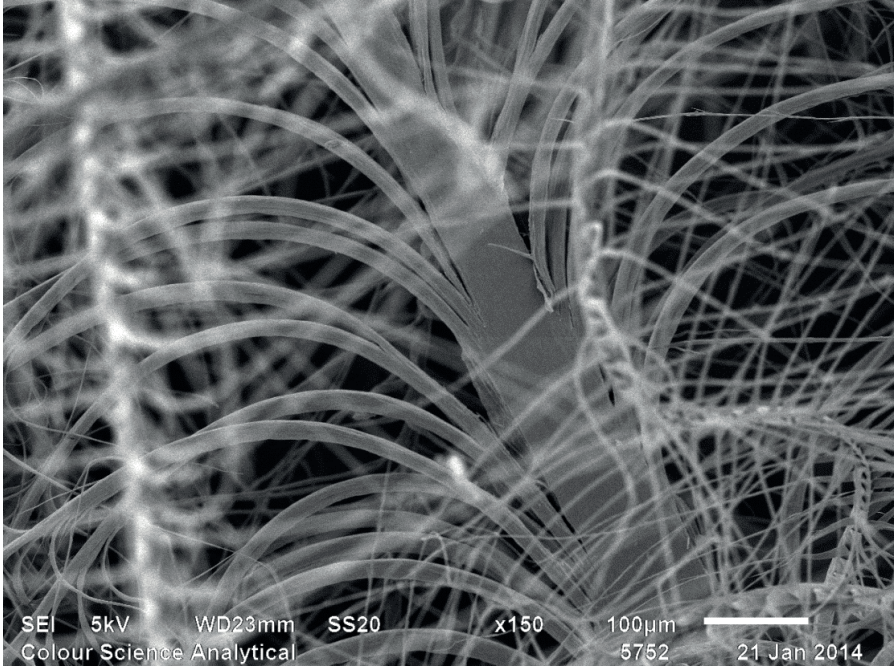
Şekil 2. *Bireysel dallanmış tüy, alt dallar; üçgen ve dallanmış bölge, fibriller üzerindeki düğümler.*

Kaz tüyü temelde merkezde sap dediğimiz rachis (ana sap) ve ondan çıkan ve dallanmış vaziyette bulunan çok sayıda barb (dallanmış lifler) ile bu barblar üzerinde yer alan barbuleslerden meydana gelmektedir. Fuller (2015) tarafından yapılan ölçümlere göre, kaz tüyü barbları ortalama 15–20 mm uzunluğundadır ve eider tüyü barblarına kıyasla daha kısadır. Barblar esnek yapıları sayesinde büyük açılarda bükülebilir; barbules yapısı sayesinde ise kırılırlar bir tamamen birbirinden ayrılmazlar. Bu da yapının bütünlüğünün korunmasını sağlar.

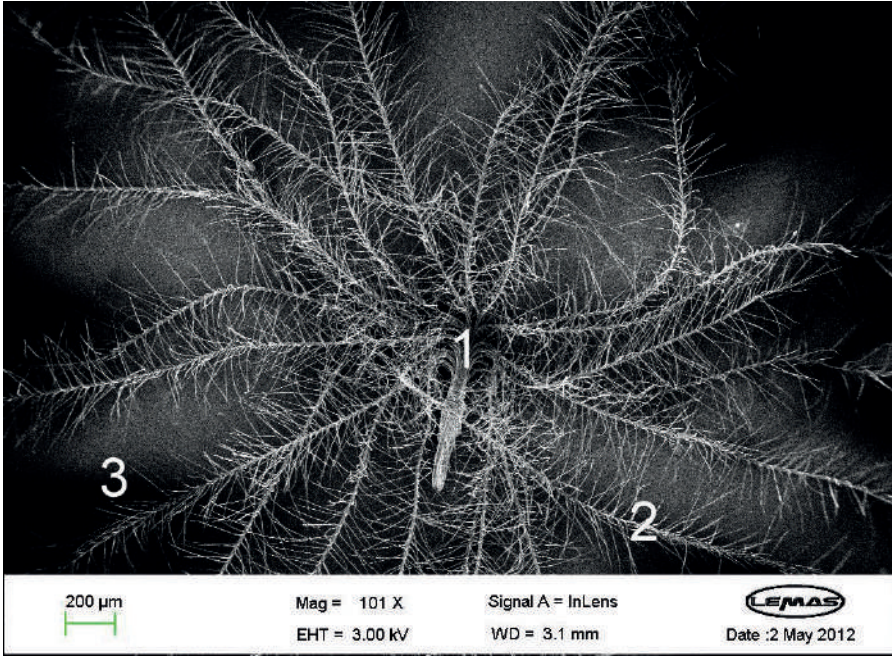
Kaz tüyleri, üzerine uygulanan bir yüke rağmen sıkıştırmaya karşı oldukça yüksek direnç göstermektedirler. Bu nedenle geri yayılım kapasitesi (rezilyans) yüksek bir malzemedir. Bu durum tüyün hacimsel anlamda doluluğunu (loft) korumasına ve uzun süreli kullanımlarda yüksek performans göstermesine olanak sağlar. Kaz tüyü üzerinde yapılan mekanik testlerde kaz tüyü barb yapılarının orta seviyede Young modülü ve maksimum çekme dayanımına sahip olduğunu ve aynı zamanda liflerin yüksek deformasyona karşı tolerans gösterdiği görülmektedir. Sahip olduğu bu özellik kaz tüylerini uzun

ömürlü ve aynı zamanda dayanıklı doğal bir yalıtım malzemesi olarak sunulmaktadır. Liflerin sahip olduğu elastik yapı, sıcaklık değişimleri ve yük altında sıkıştırma durumlarında yapının bütünselliğini korumaya yardımcı olur.

Tüm bu özellikleriyle kaz tüyü, dış giyim, uyku tulumları ve yüksek performanslı izolasyon ürünlerinde tercih edilen doğal bir malzeme olarak öne çıkar [Fuller, 2015] Şekil 3'te ve Şekil 4'te kaz tüyünün SEM görüntüsü; barblar ve barbullerin mikro yapısını gösterilmektedir.



Şekil 3. Kaz tüyünün uç kısmından merkezinden alınan barbs kısmının SEM görüntüsü [Fuller, M. E., 2015].



Şekil 4. Kaz tüyü demetinin ana özelliklerini tanımlayan SEM: 1 – tüy çekirdeği; 2 – tüy ucu; 3 – tüyçük [Fuller, M. E., 2015].

SEM ve mikroskopik incelemeler, kaz tüyünün barblar ve barbuller gibi mikro yapılarının ayrıntılarını ortaya koyar. Bu yapısal özellikler, tüyün mekanik ve fonksiyonel performansının temelini oluşturur.

3.1. Kaz Tüyünün Çok Katmanlı Mikroyapısının İncelenmesi

Yapılan bu çalışmada kullanılan tüyler Nevşehir'in Göreme ilçesinden temin edilmiş olup, 30°C sıcaklıkta, 30 dk süre ile kimyasal kullanılmadan musluk suyu ile çamaşır makinesinde pamuklu bir yıkama çantası içinde yıkanmış ve normal atmosfer şartlarında 24 saat süre ile kurutulmaya bırakılmıştır [Şekil 5].



Şekil 5. Yılanmış kaz tüyü.

Yukarı verilen kaz tüylerinin baş (distal tip), orta (barb bölgesi) ve sap/kök (rachis) adı verilen bölgelerden elde edilen SEM görüntüleri değerlendirilerek, liflerin morfolojisinin akustikte önem taşıyan porozite, akustik akış direnci, ses dalgasının saçılması, iç sürtünme kayıpları gibi temel parametrelerle olan ilişkisi değerlendirilecektir.

Kaz tüyü temelde üç esas bölgeye oluşmaktadır:

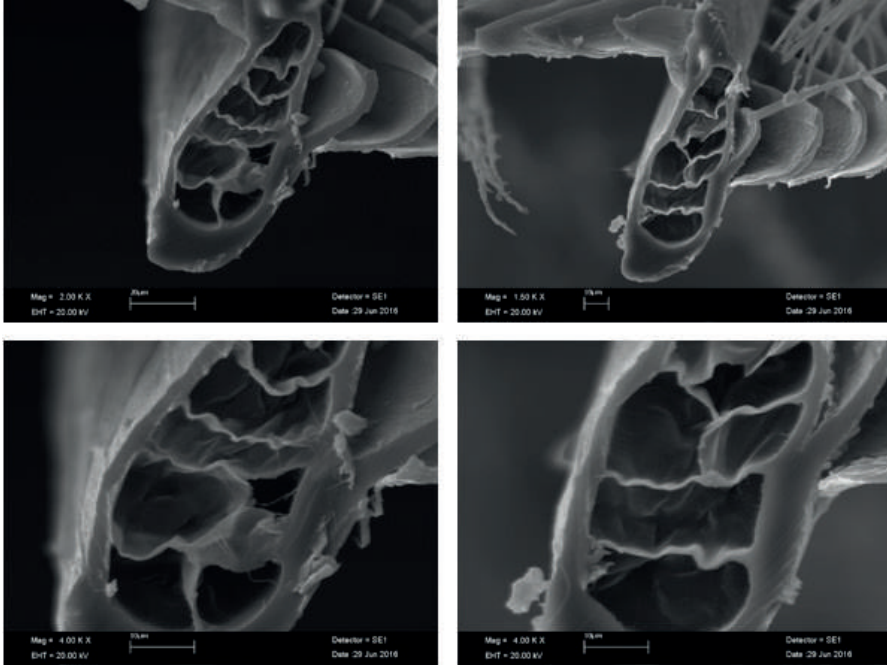
1. Distal uç (tip): Bu kısım yüksek düzeyde mikro dereceli lif içerir. İnce barbüllerin meydana getirdiği düzensiz şekilde yerleşmiş yapılardan oluşur.
2. Barb bölgesi (orta kısım): Bu kısım distal uca göre daha kalın liflerden meydana gelmektedir. Ayrıca etrafa yayılan yan lif ağları ile çevrilidir.
3. Rachis (sap/kök): Bu bölge gözeneklik bakımından en düşük olan alandır. Bölgenin sertlik derecesi çok yüksektir. Aynı zamanda lif açılımının minimum olduğu bölgedir

Yukarıda sıralandığı üzere kaz tüylerinin sahip olduğu bu anatomik çeşitlilik, aynı tüy içinde bile olsa farklı frekanslardaki sesleri farklı mekanizmalarla yutabilecek heterojen bir yapı ortaya koymaktadır [Wang et al., 2021].

3.2. Numunelerin SEM Analizi ve Akustik Açısından Yorumu

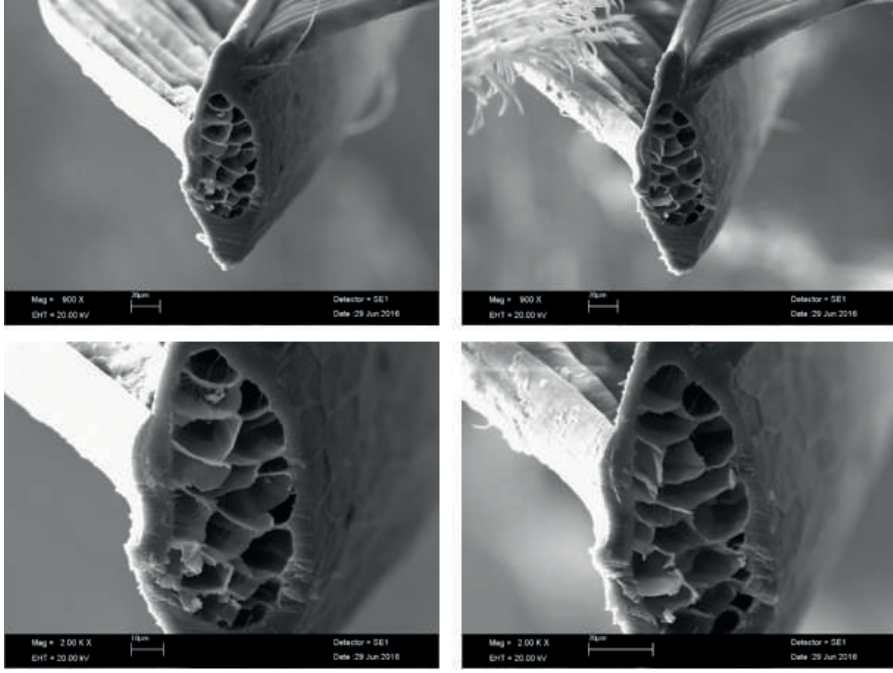
Yapılan SEM analizleri kaz tüylerinin her bir bölgesini mikromorfolojik anlamda detaylı olarak değerlendirmeye olanak tanıyacaktı. Bu nedenle tüyün baş, orta ve uç kısmından elde edilen liflerin enine kesit görüntüleri incelenmiştir. Aşağıda sırasıyla bu görüntüler verilmiştir.

Şekil 6'da kaz tüylerinin kök kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 6'da farklı açılardan elde edilmiş SEM görüntüsünde, tüylerin ince barbüllere ve dallanmış mikro lif ağına sahip olduğu görülmektedir. Bu görüntü, yapıya yüksek yüzey alanı ve yüksek boşluklu düzensiz bir porozite kazandırır ki; bu durumda liften elde edilecek yapıların yüksek derecede ses emilimi yapabileceğine işaret etmektedir. Bu yapı, özellikle orta ve yüksek frekanslarda (1000-5000 Hz) sesin çoklu saçılmalarla yönünün değiştirip enerji kaybetmesine neden olabilir. Bu liflerden üretilecek olan akustik malzemelerde lifin yüksek mikro porozite yapısına sahip olması iç sürtünmeden kaynaklı daha fazla viskoz kayıp olacağına anlamına gelir. Düzensiz şekilde liflerin yönlendirilmesi ise sesin saçılmasına neden olur. Lif aralıklarının geniş dağılımı ise ses frekans bandını genişletir ki bu durum malzemenin kullanım alanını artırır.



Şekil 6. Kaz tüylerinin kök kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 7’de kaz tüylerinin orta kısmından (barb bölgesi) alınan numunenin SEM görüntüsü verilmiştir.



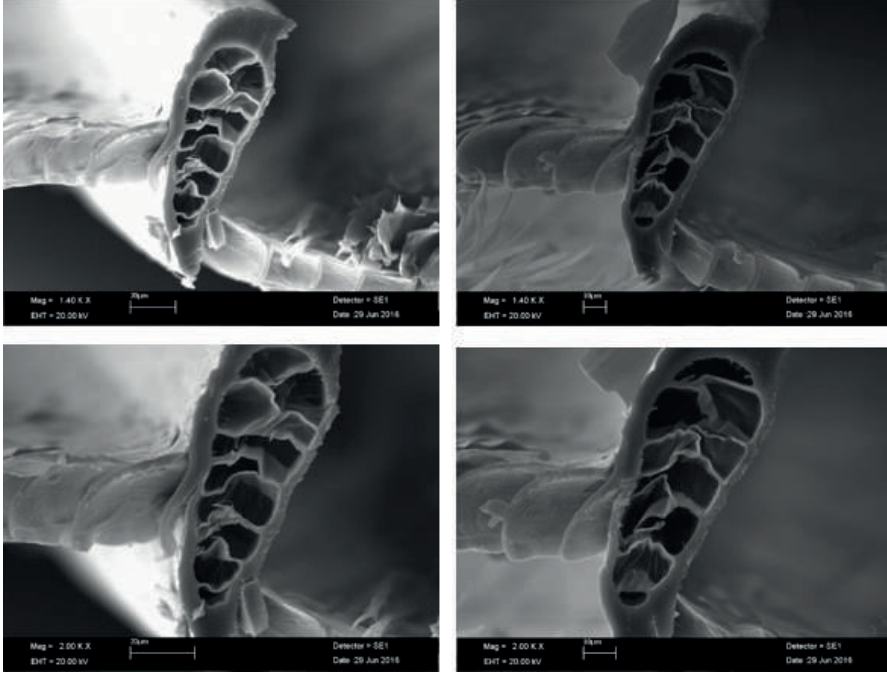
Şekil 7. Kaz tüylerinin orta kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 7’de incelenen lifte, ana liflerin arasında köprülenen yan barbüllerin olduğu görülmektedir. Benzer yapı tavuk tüylerinde de vardır. Bu konuda literatür çalışmalarına bakıldığında detaylı bir çalışma bulunmaktadır [Kocatepe, 2019]. Dallanmış yapıda belirginleşen bir düzen fark edilmektedir. Orta ölçekli bir porozitenin olduğu ve lif yüzeylerinde ise mikro pürüzlerin olduğunu açıkça fark edilmektedir.

Şekil 7’de SEM görüntüsü alınan numune, tüyün en karmaşık ve akustik bakımdan en işlevsel kısmıdır denilebilir. Porozite dağılımı orta frekanslarda (500-1500 Hz) ses yutumuna uygun bir direnç sunabilir. Ayrıca lifin yüzey pürüzlülüğü lif ile hava arasındaki sürtünme kayıplarını artırarak akış direncini optimum hale getirir.

Şekil 8’de SEM görüntüsü alınan yapı incelendiğinde sert ve kompakt rachis yapısına sahip olduğu görülmektedir. Düşük porozite ve kalın hücresel duvarların varlığı açıkça görülmektedir. Lifin bu bölgesinde ses yutumundan çok ses enerjisinin kısmen engellenebileceği bundan dolayı

da sesin yansıtılabileceği düşünülebilir. Dolayısıyla kaz tüyü esas ses yutum davranışını orta ve uç bölgelerde sahip olduğu yüksek gözenekli alanlar yardımıyla gösterecektir. Yapıdaki gözeneklerin orta ve uç bölgedeki gözeneklere oranla çok iyi olmaması, sesin düşük frekans alanlarında (100-400 Hz) sınırlı etki gösterebileceğini düşündürmektedir. Belki çok katmanlı kompozit yapılarda arka katman olarak kullanılması durumunda tasarlanan malzemenin ses yutumuna katkı sunabilir.



Şekil 8. Kaz tüylerinin baş(uç) kısmından alınan numunenin SEM görüntüsü

Bu çalışmada kaz tüylerinin baş, orta ve kök bölgelerinden elde edilen yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleri, Gao'nun ısı odaklı çalışmasından farklı olarak, liflerin akustik davranışa etki eden doğal gözenek kanallarını, hiyerarşik lif ayrışmasını, fibril açıklıklarını ve bağlantılı boşluk sistemini ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Çalışma bu yönüyle literatürde bulunan ısı yalıtımla alakalı yapılan önceki çalışmaların bıraktığı boşluğu tamamlayan yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Dolayısıyla Gao'nun çalışması, kaz tüylerinin hiyerarşik morfolojisini anlamak açısından temel bir referans olmasına rağmen, akustik performansla ilişkili mikro-gözenek yapısını açıklamak için yeterli değildir. Bu sebeple, aşağıda verilmiş olan özgüm SEM analizi sonuçları kaz tüylerinin akustik

açından ses yutum potansiyelini doğru şekilde değerlendirmek bakımından gereklidir ve bilimsel çalışmalar açısından literature önemli düzeyde bir katkı sunacağı düşünülmektedir.

4. Kaz Tüylerinin Akustik Malzemelerde Kullanım Potansiyeli

Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde kaz tüyleri kronolojik olarak ısı yalıtımı alanında kullanılmış doğal protein esaslı bir biyomalzeme olmasına rağmen, gözenekli yapıları ve hiyerarşik lif yapısına sahip olması bakımından akustik sektöründeki çeşitli uygulamalarda dikkat çeken bir malzeme haline gelmiştir. Bu bölümde kaz tüylerinin akustik olarak davranışı doğal liflerin ses yutum prensiplerine dayanarak ilişkilendirilecek ve akustik performansın hangi yapısal mekanizmalardan kaynaklanabileceği detaylı bir şekilde tartışılacaktır. Ayrıca elde edilen analiz sonucuna göre kaz tüylerinin yenilikçi akustik malzemelerde kullanımına yönelik bir tasarım modeli önerilerek ve bu alanda yapılacak olan çalışmalara ışık tutması planlanmaktadır.

4.1. Doğal Liflerin Akustik Davranışlarının İncelenmesi

Lif morfolojisi, gözeneklilik, lif çapı, tortuosity, lif-matris arayüzü, lif akış direnci gibi pek çok parametre doğal lifli malzemelerin akustik performansını direk etkilemektedir. Gözenekli malzemelerde ses enerjisinin yutulması, esas olarak viskoz ve termal kayıplar ile gözenek içerisindeki sıkışma–genişleme döngüleri yoluyla gerçekleşir [Allard&Atalla, 2009; Cox&D’Antonio, 2017]. Homojen olmayan gözenek yapıları, dallanmış biçimdeki lif morfolojisi ve yüksek yüzey alanlarından dolayı doğal lifler pek çok sentetik life göre farklı bir akustik mekanizma sunmaktadır.

Özellikle jüt, pirinç, hindistan cevizi (coco), kenaf, yün ve pamuk gibi doğal liflerde dallanmış ve içi boş olan yapılar, orta ve yüksek frekanslarda ses yutum performansını iyileştirirler. Lifin boşluklu iç yapısı, geniş gözeneklerin hacmi sayesinde düşük frekanslı ses dalgalarının sönümlenmesine katkı sağlarlar. Yüzey pürüzlülüğü üse sürtünme katsayısını artırdığından dolayı, yapının yüksek frekanslarda viskoz kayıpları yükselir. Tüm bu bulgular, kaz tüylerinin yapısal olarak sahip olduğu hiyerarşik dallanmadan ötürü ses yutum mekanizmalarında diğer malzemeler gibi benzer bir performans sergileyeceğini ortaya koymaktadır.

4.2. Kaz Tüylerinin Morfolojisi Açısından Akustik Değerlendirme

SEM analizleri kaz tüyünün temelde üç bölgeden meydana geldiğini göstermektedir: distal uç, bar/barbules bölgesi ve ana omurgasını oluşturan

rachis (sap) bölgesi. Bu bölgeler gözenek boyutu, lif inceliği ve hiyerarşik dallanma düzeyi bakımından yüksek oranda farklılıklar göstermektedir.

Distal Uç Bölgesi: Mikro-Kapiller ve Yüksek Frekans Sönümü: Distal uçta görülen barbule yapıları, 10–30 μm arasındaki mikro kanallar ve yüksek pürüzlülük düzeyiyle karakterizedir (Şekil 2). Bu bölge yüksek frekanslara çıkıldığında baskın olan viskoz sürtünme kayıplarından dolayı akustik bakımdan önemlidir. Delany–Bazley modeline göre gözenek çapı küçüldükçe viskoz sınır tabakası kalınlığı göreceli olarak büyür ve ses enerjisi daha yoğun biçimde sönümlenir [Delany&Bazley, 1970]. Bu nedenle ≥ 1500 Hz frekans aralığında yapının yüksek ses yutma performansı göstermesi beklenmektedir.

Barb ve Barbules Bölgesi: Gözenekli Yapı ve Orta Frekans Ses Yutumu: Barbule yapısı incelendiğinde yapıda daha büyük boşlukların olduğu ve genel anlamda düzensiz şekilde odacıklardan meydana geldiği görülmektedir. Bu da yapının karmaşık bir tortuosity değeri sunacağını ortaya koyar (Şekil 4). Bu yapı, orta frekanslarda (500–2000 Hz) ses yutma için ideal kabul edilebilir. Mikrogözeneklerin içindeki çoklu yansımalar ve yön değişimleri ses dalgalarının fazında gecikmeye ve bu sayede de enerji kayıplarının yaşanmasına yol açar. Bu nedenle ses yutumunda lifin orta bölgesinin orta frekansta etkin rol oynayacağını düşündürmektedir.

Rachis (Sap) Bölgesi: Makro Gözenekler ve Düşük Frekans Ses Davranışı: Kaz tüyünün merkez gövdesi olan sapı (rachis), iç boşuklu geniş yapısı ile adeta tüp benzeri bir yapıyı andırır (Şekil 7). Bu hacimsel gözenek, düşük frekanslı dalgaların sıkışma–genişleme döngüsüne olanak tanıdığından bir tür Helmholtz benzeri rezonans hapsi yaratır [Yang ve ark., 2020]. Cox ve D’Antonio (2017) geniş iç boşuklu doğal tüplerin 100–500 Hz aralığında düşük frekans performansını artırdığını bildirmiştir. Bu nedenle rachis bölgesinden alınan görüntüde yapının düşük frekansta ses yutumuna katkı sunacağı yapılan bilimsel çalışmalarla örtüşmektedir [Paşayev ve ark., 2018].

5. Tartışma ve Değerlendirme

Bu çalışmada anatomik olarak 3 farklı bölgesinden (distal uç, barb/ barbule, rachis) görüntü alınan kaz tüyleri, doğal lifli akustik yalıtım malzemelerinde gözlenen temel ses yutum mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmiş ve bu tüylerin akustik amaçlı kullanımına yönelik mevcut potansiyel değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, mikrogözenekli bir iç yapıya sahip olan kaz tüylerinin literatürdeki diğer doğal lif esaslı olan çalışmalardan nasıl ayrıldığını, SEM görüntülerinden elde edilen bulguların hangi akustik sonuçlarına işaret ettiğini ve gelecekte kaz tüylerinin akustik

bir malzemede uygulanabilirliğine dair temel bir çalışma ortaya koymaktır [Allard & Atalla, 2009].

Akustik açıdan değerlendirildiğinde kaz tüyünün morfolojik yapısı, hiyerarşik bir biçimde sunduğu gözeneklilikten ötürü üç boyutlu ve çok katmanlı bir yapının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Literatürde bulunan akustik yalıtım malzemeleri incelendiğinde doğal liflerin ses yutum performansının temelde lifin çapı, yüzey pürüzlülüğü, gözeneklerin boyutu ve dağılımı, tortuosity ile ilişkide olduğu görülmektedir. Kaz tüyünü diğer doğal liflerden ayıran en temel özellik ise aynı lif üzerinde bölgesel olarak değişen morfolojik bir yapıya sahip olmasıdır. Bu da malzemeyi eşsiz bir biyomalzeme kılar. Bu durum kenaf, jüt, yün ve kenevir gibi tek ölçekli lif yapısına sahip doğal liflerle kıyaslandığında kaz tüyleri geniş bir frekans aralığında enerji sönümleme potansiyeline sahip olan özel bir yapıdır

Kaz tüyünün SEM analizleri incelendiğinde tüyün distal uç bölgesinin çok sayıda ince barbule liflerinden meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgedeki lif çaplarının boyutlarının küçük olması ($10\text{--}30\ \mu\text{m}$), ince mikro kanallar oluşturması ve yüksek yüzey alanı, yüksek frekanslarda viskoz kayıpların baskın hale geldiği modellerle uyumludur [Delany & Bazley, 1970]. Bu nedenle distal uç bölgesinin, akustik yalıtım malzemelerinde yüksek ses frekans bandının absorpsiyonu bakımından kritik bir katman görevi gördüğü düşünülebilir. Bu sonuç, yün ve pamuk gibi mikro liflerden oluşan yapılarda yüksek frekans absorpsiyonunu arttırdığını ortaya koyan çalışmalarla paraleldir.

Kaz tüyünde barb ve barbule bölgesi, SEM görüntüleri dikkatli incelendiğinde çok odacıklı ve bağlantılı gözenek yapılarıyla dikkat çekmektedir. Bu durum orta frekanslarda ses dalgalarının çoklu yansımaları nedeniyle, sesin enerji kaybetmesine neden olan mekanizmalarla benzerdir. Doğal liflerde orta frekansta ses yutumunun en belirgin göstergesi yüksek tortuosity değeridir. Barbule bölgesi bu yapıyı oluşturur. Bu bulgu, jüt ve kenaf liflerinin orta frekans aralığında yüksek performans göstermesinin arkasındaki mekanizmayla da benzer sonuçlar göstermektedir. Kaz tüyü morfolojisinin bu bölümü, konvansiyonel dokusuz yapılara kıyasla daha karmaşık ve düzensiz bir geometri sunarak özellikle $500\text{--}2000\ \text{Hz}$ frekans aralığında etkili bir sönümlemenin yapılabileceğine işaret etmektedir.

Sap kısmını oluşturan rachis bölgesi ise içi boş makro ölçekli bir tüy yapısı göstermektedir. Literatürde geniş iç boşluklu doğal tüplerin düşük frekanslarda rezonans tabanlı absorpsiyona katkı sunduğu bilinmektedir [Cox&D'Antonio, 2017; Yang ve ark., 2020]. Kaz tüyünün bu bölgesi literatürdeki diğer doğal liflerle kıyaslandığında, bu liflerde bulunmayan yapısal bir avantaj sağlar. Çünkü kaz tüyünün makro ölçekli gözenekli hacmi,

düşük frekanslı ses dalgaları için sıkışma-genişleme odası görevi görerek bu sayede enerji kaybına katkı sağlar. Bu durum, kaz tüyü esaslı akustik yalıtım malzemelerinde düşük ses frekans performansının artırılmasına yönelik farklı tasarım olanakları sunar.

Bununla beraber kaz tüylerinin akustik performansının test edilmesi üzerine az sayıda deneysel çalışmanın bulunması bu alanda önemli bir araştırma boşluğunun olduğunu göstermektedir. SEM bulguları bu tüylerin potansiyel anlamda farklı frekans aralıklarında etkin bir performans gösterebileceğini ortaya koymaktadır. Fakat akustik performansın pratikte doğrulanması için normal ses yutum katsayısı, akış direnci testleri, FEM modellemeler ve çok katmanlı kompozit yapılarda kullanımında yapıların deneysel analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu eksiklik, kaz tüylerinin akustik yalıtımda yeterince detaylı şekilde araştırılmamış olmasına rağmen, yenilikçi ve sürdürülebilir akustik malzemelerin geliştirilme çalışmaları için gelecekte büyük bir fırsat sunmaktadır.

Ayrıca kaz tüylerinin düşük yoğunlukta olması, yüksek sıkıştırılabilir özelliği, biyobozunur özelliği ve kimyasal işlenebilirliği bu malzemeleri iğneleme veya termal bağlama metodları ile hibrit kompozit malzemelere entegre ederek, onları akustik malzeme tasarımlarında çok cazip bir malzeme haline getirebilir. Bu çalışma, kaz tüyünün morfolojik yapısını çok boyutlu olarak akustik mekanizmalarla ilişkilendirerek, literature kapsamlı bir teorik bakış sunmaktadır. Böylece kaz tüylerinin sadece ısı yalıtımında değil, aynı zamanda geniş ses frekans bandında akustik soğurucu malzemelerde de etkin şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada kaz tüylerinin morfolojik yapısını SEM analizleri ile ayrıntılı şekilde değerlendirilmiş ve yapısal özelliklerin akustik performansa olan olası etkilileri mevcut literatür bilgileri ile tartışılarak, kaz tüylerinin gelecekte sürdürülebilir bir akustik malzeme olarak kullanılabilme potansiyelini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Son yıllarda doğal lifler üzerine yapılan mevcut çalışmalar, malzeme gözenekliliği, lif çapı, çok ölçekli porozite, tortuosity ve akış direncinin ses yutum davranışı üzerinde etkin belirleyici parametreler olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, kaz tüyünün kompleks ve hiyerarşik yapısının sadece ısı yalıtım sektöründe değil, aynı zamanda akustik yalıtım malzemelerinde de potansiyeli yüksek bir malzeme olabileceğini göstermiştir.

SEM analizleri üç temel bölgeye sahip olan kaz tüylerinin farklı ses frekans aralıklarında etkin şekilde tamamlayıcı bir akustik mekanizmaya sahip olduğunu işaret etmiştir. Distal uç, mikro çaplı barbule lifleri ve

viskos kayıplarının yüksek olduğu ve yüksek frekanslarda etkin olabilecek bir mikro yapısal etki sunar. Barb-barbule bölgesi çok odacıklı ve düzensiz gözenekli yapısı ile, orta frekanslarda ses dalgalarının çoklu saçılma ve yön değiştirme etkisi sayesinde enerji kaybetmesine olanak sağlar. Sap kısmı olan rachis bölgesinin ise düşük frekanslı dalgaların sıkışma-genleşme etkileri ile rezonans tabanlı sönümlenmesine destek veren gözeneklilik sunar. Kritik üç bölgenin birleşimi, kaz tüyünü geniş ses bandında doğal bir ses yutucu malzeme olarak eşsiz bir malzeme haline getirebilir.

Genel anlamda bu çalışmada sunulan SEM analizleri ile literatür bilgisi bir araya getirildiğinde, hafif, çok ölçekli gözeneklilik, biyobozunurluk ve morfolojik çeşitlilik gibi özelliklere sahip olan kaz tüylerinin çevre dostu, yenilikçi ve performans odaklı akustik malzemeler arasında önemli bir aday olabileceği görülmektedir. Bu çalışma, kaz tüyü esaslı ses yalıtım malzemelerinin geliştirilmesine yönelik temel bilimsel bir çerçeve oluşturup, gelecekte bu alanda gerçekleştirilecek olan çalışmalar içinde bir referans niteliği taşımaktadır.

Kaynaklar

- Abdul Aziz, M. A., & Mohd Sari, K. A. (2021). Comparison of sound absorption coefficient for natural fiber. *Progress in Engineering Application and Technology*, 2(1), 157–163. <https://doi.org/10.30880/peat.2021.02.01.15>
- Allard, J. F., & Atalla, N. (2009). *Propagation of sound in porous media: Modelling sound absorbing materials*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470747339>
- Arenas, J. P., del Rey, R., Alba, J., & Oltra, R. (2020). Sound-absorption properties of materials made of esparto grass fibers. *Sustainability*, 12(14), 5533. <https://doi.org/10.3390/su12145533>
- Asdrubali, F., Bianchi, F., Cotana, F., D'Alessandro, F., Pertosa, M., Pisello, A. L., & Schiavoni, S. (2016). Experimental thermo-acoustic characterization of innovative common reed bio-based panels for building envelope. *Building and Environment*, 102, 217–229.
- Bravo-Moncayo, L., Argotti-Gómez, M., Jara, O., Puyana-Romero, V., Ciaburro, G., & Guerrero, V. H. (2024). Thermo-acoustic properties of four natural fibers, *Musa textilis*, *Furcraea andina*, *Cocos nucifera*, and *Schoenoplectus californicus* for building applications. *Buildings*, 14(8), 2265. <https://doi.org/10.3390/buildings14082265>
- Chen, K., Liu, O., Liao, G., Yang, Y., Ren, L., Yang, H., & Chen, X. (2012). The sound suppression characteristics of wing feather of owl (*Bubo bubo*). *Journal of Bionic Engineering*, 9.
- Cox, T. J., & D'Antonio, P. (2017). *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application* (3rd ed.). CRC Press.
- Delany, M. E., & Bazley, E. N. (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials. *Applied Acoustics*, 3(2), 105–116. [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(70\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9)
- Dieckmann, E., Dance, S., Sheldrick, L., & Cheeseman, C. (2020). Novel sound absorption materials produced from air-laid non-woven feather fibres. *Applied Acoustics*, 170, 107539. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107539>
- Fuller, M. E. (2015). *The structure and properties of down feathers and their use in the outdoor industry* (Doctoral dissertation). University of Leeds. <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/9268>
- Gao, J., Yu, W., & Pan, N. (2007). Structures and properties of the goose down as a material for thermal insulation. *Textile Research Journal*, 77(8), 617–626.
- Kang, C., Lee, J., & Kim, H. (2021). Acoustic characterization of natural fiber-based porous materials. *Applied Acoustics*, 178, 108054.

- Kang, H., Ko, S., & Lee, J. (2021). Sound absorption mechanisms of natural fibers: A review. *Materials Today Sustainability*, 14, 100074.
- Kocatepe, S. (2019). Kuş tüylerinden tekstil amaçlı protein esaslı materyaller üretiminde hazırlık işlemleri, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri
- Lashgari, M., Taban, E., SheikhMozafari, M. J., Soltani, P., Attenborough, K., & Khavanin, A. (2024). Wood chip sound absorbers: Measurements and models. *Applied Acoustics*, 220, 109963.
- Mohanty, A. K., Vivekanandhan, S., Pin, J. M., & Misra, M. (2021). Composites from renewable and sustainable materials. *Nature Sustainability*, 4(3), 150–160.
- Pashayev, N., Kocatepe, S., & Maraş, N. (2018). Investigation of sound absorption properties of nonwoven webs produced from chicken feather fibers. *Journal of Industrial Textiles*, 48(3), 1–20.
- Schelestow, K., Troncoso, O. P., & Torres, F. G. (2017). Failure of flight feathers under uniaxial compression. *Materials Science and Engineering C*, 78, 923–931.
- Sheikhmozafari, M. J., Alizadeh, P. M., & Ahmadi, O. (2021). Assessment of noise effect on employee comfort in an open-plan office: Validation of an assessment questionnaire. *Journal of Occupational Health and Epidemiology*. <https://doi.org/10.52547/johe.10.3.193>
- Wang, Z., Li, H., & Chen, J. (2022). Micro-porous natural fibers and their acoustic behavior. *Materials Today*, 53, 112–122.
- Yang, T., Hu, L., Xiong, X., Petru, M., Noman, M. T., Mishra, R., & Militký, J. (2020). Sound absorption properties of natural fibers: A review. *Sustainability*, 12(20), 8477. <https://doi.org/10.3390/su12208477>

Kaz Tüylerinin Yapısal Özellikleri, Kullanım Alanları ve Yıkama Programı Önerisi

Müslüm Erol¹

Özet

Beyaz et tüketimi dünya genelinde son derece yaygındır. Kanatlı hayvanlar ve su kuşları bu ihtiyacın karşılanmasında önemli bir yere sahiptir. Dünyada kaz üretimi kaz eti, kaz ciğeri ve kaz tüyü için yapılmaktadır. Ancak ülkemizde kaz üretimi çoğunlukla kaz eti için yapılırken çok az da olsa yumurtası için yapılmaktadır. Kazdan elde edilecek tüm ürünler ve yan ürün olan kaz tüyü dahil teknik ve standartlara uygun bir üretim sürecine tabi tutulduğunda her bir çıktısından çok yüksek düzeyde katma değer sağlanabilecektir. Bu açıdan bakıldığında son derece kazançlı bir üretim olarak görülmektedir. Çalışmamızın esas konusunu teşkil eden kaz tüyleri yumuşaklığı, hafifliği ve üstün ısı yalıtım özelliği sayesinde önemli bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Son yıllarda kaz tüyünün değerli bir katma değere dönüşebildiği görülünce farklı bölgelerde kaz üretmek amacıyla yeni çiftlikler açılmıştır. Bu üreticilerde tüy yetiştiriciliği amacıyla da kaz üretimi isteginin oluştuğu görülmektedir. Bu çalışmada kaz eti üretimi sonrasında yan ürün olarak açığa çıkan gıdık ve sırt tüylerinin yıkanıp temizlenmesi ve daha hijyenik bir ürün üretimine ön hazırlık amacıyla tüyler iki farklı yıkama programına göre yıkanmıştır. Yıkamalarda farklı kimyasal ve yardımcı kimyasal maddeler kullanılmıştır. Ağartma ve durulama işlemleri yapıldıktan sonra kurutulan tüyler koku ve temizlik derecesi açısından değerlendirmeye tabi tutularak en ideal reçete tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre Y1 olarak kodlanan yıkama reçetesinin en iyi sonucu verdiği ve yapılacak yıkamalarda tercih edilebileceği önerilmiştir.

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

1. Giriş

Kanatlı hayvanlar, küresel olarak tüketilen diyet amaçlı beslenmelerde alınması gereken proteininin ana kaynağı olarak görülmektedir. Kümes hayvanı eti işleme endüstrisi dünya genelinde yıllık kırk milyar kg civarında beyaz et üretimi yapmaktadır. Kanatlı hayvanların beyaz et üretimine hazırlanması sürecinde çok büyük miktarda atık olarak tüy açığa çıkmaktadır. Yan ürün olan bu tüyler, giderek daha sorunlu bir endüstriyel atık haline gelmektedir. Bu nedenle, tüyler için döngüsel bir ekonomi geliştirmek, bu bol ve doğal esaslı malzemenin benzersiz özelliklerinin birleşiminden yararlanmak gerekmektedir.

Bu çalışma, kanatlı hayvanlardan özellikle kaz tüylerinden açığa çıkan tüylerin özellikleri ve katma değerli ürün haline dönüştürülmesi için ihtiyaç duyulan ön hazırlık işlemlerine odaklanmıştır. Kanatlı hayvanların kesimhanelerde beyaz et üretimi için kesildikten sonra atık hale gelen tüylerinin çevre ve doğa için zararsız hale getirilmesi veya geri dönüşümü ciddi zorluklar barındırmaktadır. Kanatlı hayvan atıkları bazen yakılarak hava kirliliğine, bazen de toprağa gömmek suretiyle toprak kirliliğine sebep olduğu bilinmektedir. Bu tüylerin yapısında büyük oranda azot bulunmakta olup yakma işlemleri esnasında açığa hidrojen siyanür gibi zararlı gazların havaya salınmasına sebebiyet verilmektedir (Erol, 2025; Hansson et al., 2004). İşlenmemiş veya geri kazanılmamış olarak gömülen kanatlı hayvan atıkları toprağı, yüzey sularını, yeraltı sularını kirletmekte ve sera gazları üretmektedirler (Bousshine et al., 2022; Ouakarrouch et al., 2020). Kanatlı hayvan atıklarının yakılması, kömürle çalışan termik santraller kadar, hatta daha fazla zehirli hava emisyonuna neden olabilmektedir (Bansal et al., 2021; Erol, 2025; Erol & Aydemir, 2024; Franke-Whittle & Insam, 2013).

Çevre kirliliğini azaltma ve sürdürülebilir ürün üretip kullanma arzusu sebebiyle özellikle kapalı yaşam alanlarında ve endüstriyel alanlarda atık materyallerin dönüştürülmesi sonucunda elde edilen materyallerin kullanılması önem arz etmektedir. Atık materyallerin kullanımı ile birlikte maliyetin düşüyor olması önemli bir diğer husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel petrol türevi ve polimer esaslı malzemelerin yerine tüy atıklarını sürdürülebilir ve yenilenebilir yalıtım malzemesi olarak kullanılması, içinde bulunduğumuz yüzyılın üretim beklentileri ile uyumluluk göstermektedir. Özellikle bu atıl materyallerin bina ve mimaride yalıtım malzemesi olarak kullanılması ile önemli miktarda enerjiden tasarruf edilebileceği düşünülmektedir. Kaynaklı'ya göre malzemenin yapısı, kalınlığı ve diğer enstrümanlar ile birlikte uygunluk dikkate alındığında mimaride %30-60

oranında enerji tasarrufunun yapılabilir (Kaynaklı, 2012; Tesfaye et al., 2017).

Literatür incelendiğinde kanatlı hayvanlara ait atık tüylerin temizlenmesi ile ilgili farklı yöntemlerin uygulandığı görülmüştür. Xiaolin ve arkadaşları, kuş tüylerinin Ultraviyole sistemi ile dezenfekte edilebileceğini ifade etmişlerdir (Xiaolin et al., 2020; Yanxin & Le, 2016). Yungang protein esaslı tüylerin yapısındaki tozları gidermek ve dezenfekte etmek amacıyla geliştirdiği yöntemin patentini de almıştır. Yungang toz toplayıcılar ve temizleme varilleri gibi mekanik yöntemler aracılığı ile tüyleri dezenfekte etmişlerdir (Yungang, 2018). Ozon dezenfeksiyonu tüy işlemede kullanılan başka bir yöntemdir. Ultraviyole dezenfeksiyon yöntemine ozon işlemi eklenerek üretilen yeni cihaz ile çok detaylı bir sterilizasyon ve koku giderme sağlanmıştır (Yanxin & Le, 2016). Kunming ve Chuangui kanatlı hayvan tüylerinin temizlenmesi ve dezenfekte edilebilmesiyle ilgili olarak ürettikleri cihaz sayesinde temizleme ve dezenfekte etme işlemlerinin kolaylaştığı, işçilerin çalışma yoğunluğunun azaltılarak daha verimli bir sonucun elde edildiğini ifade etmişlerdir (Kunming & Chuangui, 2021).

Paşayev ve arkadaşları, kanatlı hayvanlardan tavuk tüylerinin yıkamaya rağmen kötü kokuya neden olan ve tüylerin yapısında bulunan uçucu maddelerin giderilebilmesi için en iyi yıkama yönteminin; sodyum hipoklorit ile kısa bir ön yıkama ve sodyum hidroksit çözeltisi ile bitirme işleminin ardından noniyonik bir deterjanla ana yıkama olduğunu tespit etmişlerdir. Bu yıkama yöntemi sonucunda tüylerin yüzey, içyapı ve mekanik özelliklerinin bozulmadığını ifade etmişlerdir (Paşayev et al., 2022). Çiftlik hayvanlarının tüylerinin temizlenmesi ile ilgili ev tipi çamaşır makinasında farklı kimyasallar ile yapılan yıkamalar sonucunda sodyum hipoklorit ile yapılan yıkamalardan ideal temizleme ve dezenfeksiyona ulaşıldığı belirtilmiştir (Paşayev et al., 2021).

Çalışmamız beyaz et üretiminde önemli bir yere sahip olan kaz eti üretimi sonrasında kesimhanelerde açığa çıkan atık haldeki tüylerin yıkama, temizleme ve dezenfeksiyon işlemlerinin yapılarak katma değeri yüksek ürün üretimine hazırlanması işlemlerini kapsamaktadır. Kaz tüyleri diğer kanatlı hayvan tüylerinden (tavuk ve hindi gibi) daha az üretiliyor olması ve daha hafif ve daha üstün performanslara sahip olması sebebiyle çoğunlukla hazır giyimde dolgu materyali olarak kullanılmaktadır. Özellikle kışlık mont, yastık ve yorgan üretiminde yaygın olarak kullanılan bir materyaldir. Dolgu materyali olarak sentetik lifler de kullanılmaktadır. Ancak sürdürülebilir bir çevre ve daha hijyenik şartlar dikkate alındığında geri dönüştürülebilir nitelikte

olanların kullanılması büyük önem arz etmektedir. Burada çoğunlukla doğal elyafların kullanımı önem arz etmektedir.

Çalışmamıza konu olan kaz tüyleri de diğer kanatlı hayvanların tüyleri gibi yalıtım amaçlı kullanılabilme potansiyeli yüksektir. Kaz ve ördek tüylerinin tekstil ve hazır giyimde dolgu materyali olarak kullanılmasının yaygınlaşması ve talep gören bir konu haline gelmesi daha araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu amaçla atık halde bulunan bu tüylerin yıkanıp, kurutulup, dezenfekte edildikten sonra dolgu materyali olarak kullanılmasının yanında kapalı mekanlarda iç dekoratif ve süsleme malzemeleri olarak yada yalıtım malzemesi olarak kullanımının mümkün olabileceği düşünülmektedir. Tüylerin yıkanması ile ilgili pek çok reçete ve uygulama bulunmaktadır. Bu çalışmada tüylerin hangi yöntemler ile yıkanıp temizlenebileceğine ilişkin literatür analiz edilirken en ideal sonuçları açığa çıkardığına kanaat ettiğimiz yöntem ve birkaç reçete ile kaz tüyleri yıkanarak temizlenmiş ve havadan nem emme ve su emme gibi fiziksel testleri yapılarak okuyucuya sunulmuştur.

2. Kaz Üretimi Hakkında

Genel kabul gören görüşe göre, Anatidae familyasına ve Anser cinsine ait olan kazlar, evcilleştirilen ilk hayvanlardandır. 3000 yıl önce Mısır'da evcilleştirilmiş olabilecekleri düşünülürken bazı araştırmalar bunun daha da eski olabileceğini öne sürmektedir. Buna rağmen, kazlar hiçbir zaman tavuklar, hindiler veya ördekler kadar ticari olarak değerlendirilmemiştir. Oysa kazlar sıcak iklimlere olduğu kadar soğuk iklimlere de uyum sağlayabilen, minimum barınakla açık havada yaşamını geçirebilme yetenekleri olan bir yapıdadır. Ticari kaz üretimi yalnızca Asya ve Avrupa'daki nispeten az sayıda ülkede gelişmiştir (Chelmonska, 1995). Örneğin, ılıman iklimlerden Kuzey Amerika'nın Kanada kazı (*Branta canadensis*) ve Güney Amerika'nın güneyindeki Amerikan kuğu kazı (*Coscoroba coscoroba*) bunlara örnek verilebilir. Tropik bölgelerden ise Afrika'dan Mısır kazı (*Alopochen aegyptiacus*), Hawaii Adaları'ndan Nene kazı (*Branta sandvicensis*), Hindistan ve Orta Asya'dan Çubuk başlı kaz (*Anser Indicus*), Afrika'dan Kuzey mahmuz kanatlı kaz (*Plectropectus gambensis*) ve Avustralya ile Yeni Gine'den yarı pençeli (saksagan) kaz (*Anseranas semipalmata*) bulunmaktadır (Schneider, 1995).

Türkiye'de kaz yetiştiriciliği Doğu ve Orta Anadolu ile İç Ege bölgelerinin köyleri başta olmak üzere hemen hemen her bölgede yapılabilmektedir. Kaz eti ve yumurtası bu bölgelerde yaşayan insanlar için önemli bir protein kaynağıdır (Betül Çelik, 2021)

Ülkemizde yapılan kaz yetiştiriciliğine daha spesifik bakacak olursak en çok Kars, Ardahan, Muş, Erzurum, Ağrı ve Van illerinde yapılmaktadır. Farklı bir yetiştiricilik kolu olarak kaz yetiştiriciliği ülkemizde çok fazla bilinmemekle birlikte Dünyada pek çok ülkede önemli bir yer tutmaktadır. Dünyada başlıca kaz yetiştiriciliği yapılan ülkeler; İngiltere, Kanada, ABD, Çin, Polonya, Çekoslovakya, Fransa, Bulgaristan ve Rusya'dır. Bu ülkelerin çoğunda kazlar, karaciğeri ve tüyleri için üretilmektedir (Turgut Kırmızıbayrak, 2018). Dünya Gıda ve tarım örgütü (FAO) 2016 yılı verileri Tablo 1'de verilmiştir. Bu tablodan da anlaşılacağı üzere Çin toplam kaz varlığının %83'üne sahiptir. Rusya Federasyonu %4, ve Mozambik %3 ile takip ederken Türkiye 774bin adet ile 15. Sırada yer almaktadır. Tablo incelendiğinde farklı iklim yapılarına rağmen kaz yetiştiriciliğinin yapıldığı görülmektedir.

Tablo 1. Dünya Kaz Varlığı ve İlk 20 Ülke (FAO, 2016 Yılı) (Turgut Kırmızıbayrak, 2018).

SN	Ülke	Kaz Varlığı	SN	Ülke	Kaz Varlığı
	Dünya	380.620.000			
1	Çin	315.350.000	11	Macaristan	1.023.000
2	Rusya Federasyonu	15.448.000	12	İran	994.000
3	Mozambik	12.291.000	13	İsrail	960.000
4	Mısır	7.045.000	14	Arnavutluk	895.000
5	Ukrayna	5.115.000	15	Türkiye	774.000
6	Romanya	4.688.000	16	Almanya	501.000
7	Polonya	3.989.000	17	Filipinler	407.000
8	Myanmar	3.455.000	18	Fransa	369.000
9	Madagaskar	3.014.000	19	Kanada	323.000
10	Tayvan	2.394.000	20	Arjantin	168.000

3. Kaz Tüyü ve Alt Tüy Üretimi

Kaz yetiştiriciliğinde elde edilen, önemli bir çıktı olan ve üstün yetenekleri ile öne çıkan kaz tüyüdür. Su kuşlarının, kazların, ördeklerin ve benzeri kanatlı hayvanların tüyleri oldukça değerlidir. Bu tüyler çok kısa olduğundan iplik yapımına uygun değildir. İplik üretilmediği için de dokuma veya örme kumaş üretiminde kullanılamamaktadır. Bu değerli tüyler için kullanılabilir en ideal alan dolgu elyafı olarak kullanmaktır. Diğer bir seçenek dokusuz yüzey ve kompozit malzeme üretimi için değerlendirmektir.

Mevcut durumda kazın alt tüyleri tekstil ürünlerinin üretiminde kaliteli dolgu materyali olarak kullanılmaktadır. Tüylerin büyüklüğü ve yumuşaklığı arttıkça daha nitelikli bir ekonomik değere ulaşmakta dolayısıyla katma değeri yüksek ürün üretimine uygunluğu da artmaktadır. Kanatlı hayvanlardan

tavuk ve hindi tüylerinde bahsettiğimiz bu nitelikler biraz daha geride bulunmaktadır. Kaz tüyleri tekstil ve hazır giyim üretiminde dolgu materyali olarak kullanıldığında hem pahalı hem de ciddi anlamda talep gören kazançlı bir sonuç elde edilmektedir.

Kaz tüyü ve alt tüy üretiminde Çin'in pazara hâkimiyeti çok üst seviyededir. Kaz yetiştiriciliğinde tüyün elde edilmesi kadar depolanması ve bozulmadan saklanması büyük önem taşımaktadır. Depolamada ortamın nemi ve termal şartlarının yanında haşere ve böcek ilaçlama işlemlerinin yapılmış olduğuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Sağlıklı koşullarda saklanmayan tüyler son işleme gelene kadar kalitesinden ciddi anlamda kayıplar yaşayacaktır.

Kaz tüyü yıkanabilen hijyenik, terletmeyen bir dolgu maddesidir. Kaz tüyleri yastık ve yorgan yapımında, koltuk üretiminde, okçulukta, boya sanayinde ve olta iğnesi yapımında kullanılır. Yün, elyaf ve pamuğa göre pahalı olmasına rağmen kullanım ömrü daha uzun olduğu için daha ekonomik olur. Tüy yumuşaklığı kaz ırkına göre değişim göstermektedir. Yaşlı kazlardaki tüy verimi daha fazladır. Kazların tüy verimi yılda yaklaşık 200-250 gr olarak hesaplanmıştır.

Kaz tüyünün kalitesi;

- Birim tüyün doldurma gücü
- Esneklik
- Yoğunluk
- Farklı tüyler ile karışık olup olmaması
- Rengi, temizliği İle belirlenmektedir (D'alba et al., 2017; Oral & Esra Dirgar, 2017).

Türkiye ve Dünyada yaygın olarak kesim işlemi sonrasında tüyler elde edilmektedir. Kesim sonrasında tüylerin ıslanması, kesim işlemleri esnasında kan ve diğer atıklar ile lekelenip kirlenmesi, rutubet ve neme bulaşması gibi sorunların meydana gelmesi söz konusu olabilir. Bu sorunlar ürün kalitesini olumsuz yönde etkilemekte olup maliyet artışına da sebebiyet verebilmektedir.

Küçük çapta üretimler yapan aile şirketleri bilgi yetersizliğinden kaynaklı olarak tüy kalitesinde meydana gelebilecek bu düşüşü ve buna bağlı ekonomik kayıplar ile diğer sorunları düşünememektedirler. Dünyada ve Türkiye'de yetiştiricilerin kesim esnasında ve sonrasında tüylerin doğru depolanması konusunda bilgilendirilmesi tüylerin ekonomiye kazandırılmasını sağlayacaktır. Ayrıca kapasitesi yüksek entegre kesim

tesisleri kurulurken kümes ve çiftliklerin yoğun olduğu bölgelerde kurulması tüy temini ve değerlendirilmesi konusunda da önemli katkı sağlayacaktır (Turgut Kırmızıbayrak, 2018).

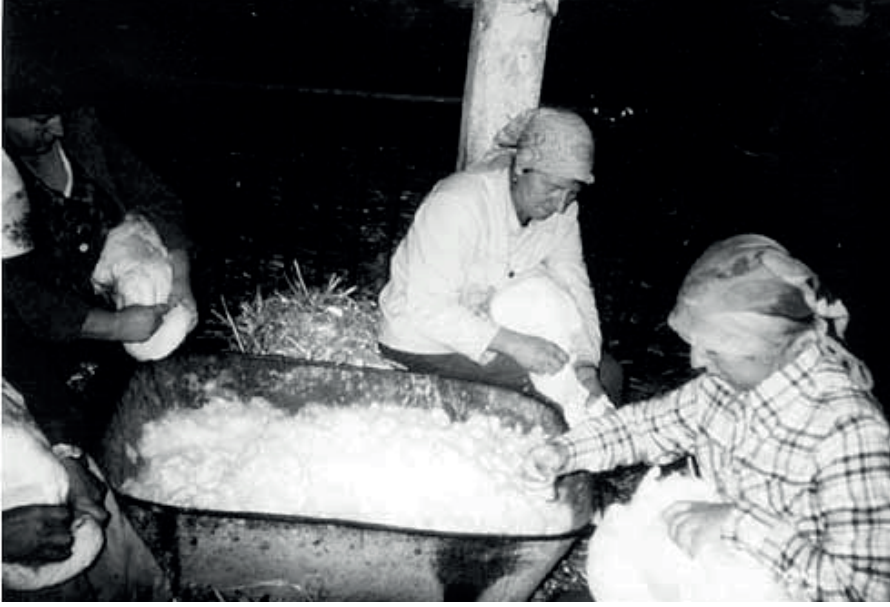
Kaz tüyünün en değerlisi, göğüs bölgesinden elde edilenidir. Alt tüyler olarak da isimlendirilen bu tüyler son derece incedir. Ticari ürünlerin çoğu hem kuş tüyü hem de alt tüy karışımını içerir; kuş tüyü oranı ne kadar yüksekse, ürünün değeri de o kadar yüksektir. Kuş tüyü ve alt kuş tüyü arasındaki fark Şekil 1’de gösterilmiştir (Guy G., Rousselot-Pailley D., 1996).



Şekil 1. Kazlardan elde edilen tüyler ve ince kuş tüyü (Guy G., Rousselot-Pailley D., 1996).

Kesim sırasında tüy ve alt tüyleri elde etmek için normal işlem, önce kazları 1-3 dakika boyunca sıcak suda (60-68°C) haşlamaktır. Kanat ve kuyruk tüylerinin kaba kısımları elle alınır, geri kalan tüyler ve alt tüyler ise yolma makinesiyle veya elle alınır (Şekil 2). Tüyler daha sonra kurutulur ve bu işlem genellikle büyük ticari kurutma makinelerinde yapılır. Az miktarda tüy için, kurutmayı kolaylaştırmak amacıyla tüyler serilir ve sık sık karıştırılır.

Çok az miktardaki kısmı ise haşlanmadan kuru olarak yolunabilir (şekil 2) ve bu işlem daha uzun sürse de kuru tüy ve ince kuş tüyü elde edilmesi bakımından daha değerlidir. Ancak daha zor ve emek istediğinden dolayı çoğunlukla bu yol tercih edilmek istenmemektedir. Yolma işleminden bağımsız olarak, tüy ve alt tüyün ayrıştırılması, Şekil 3’te gösterildiği gibi tüylerin ağırlık farkından istifade edilerek hava akımı aracılığı ile yapılabilir.



Şekil 2. Canlı yetişkin kazlardan tüy yolma (Polonya) (R. B. Buckland, 1995).

Canlı kazlardan tüy hasadı, et veya yağlı karaciğer üretimi için yetiştirilen kazlardan ve damızlık sürülerindeki kazlardan önemli bir gelir kaynağı olabilir. Canlı kazların göğüs tüylerinin ve kanat tüylerinin hasadı, 9-10 haftalık olduklarında diğer yumuşak tüylerle birlikte olgunlaşmış kuş tüylerinin doğal olarak dökülmesiyle mümkündür. Tüy yolma işlemini doğal tüy dökme dönemine denk getirerek, göğüs tüyleri ve kanat tüyleri Şekil 2’de gösterildiği gibi hasat edilebilir.

Büyüyen kazlar daha sonra yaklaşık altı haftada bir, her bir sonraki tüy dökme dönemine denk gelecek şekilde tüy yolma işlemine tabi tutulabilir. İlk tüy yolma işleminden elde edilen tüy ve kuş tüyü verimi yaklaşık 80 g, sonraki her tüy yolma işleminde ise 100-120 g arasındadır. Kuş tüyü yüzdesi normalde toplam ağırlığın %15-20’si arasında olacaktır. Pazara yönelik kazlar için gerçek tüy yolma sayısı genellikle et veya yağlı karaciğer için pazar koşullarına ve tüy ve kuş tüylerinin mevcut pazar değerine bağlıdır. Tüm ırkların tüyleri yolunabilir, ancak beyaz tüyler daha değerlidir. Canlı kazların tüyleri yolunurken veya kesimhanede tüy hasadı yapılırken, tüylerin olgunlaşmış olması gerekir.

Üreme dönemindeki kazlar, yumurtlamadıkları dönemde de altı haftada bir benzer bir programla tüy yolma işlemine tabi tutulabilir; genel öneri, son tüy yolma işleminin yumurtlamanın başlamasından iki buçuk ay veya

daha fazla süre önce yapılmasıdır. Normalde bu öneriler, sezon başına üç tüy yolma işlemiyle sonuçlanır. Bununla birlikte, Polonya’da yapılan son çalışmalar, Haziran başında yumurtlamayı bırakan ve bir sonraki yumurtlama sezonu Ocak ortasında başlayan kuşlar için, sonraki yumurta üretimi veya doğurganlık üzerinde zararlı bir etki olmaksızın dört kez tüy yolmanın (son tüy yolma işlemi Kasım başında) mümkün olduğunu göstermiştir.

Kaz kanat tüyü ve ince tüyleri, kaz üretiminin değerli bir ürünüdür. Bu durum özellikle kuru olarak yolunmuş tüyler için geçerlidir, çünkü kurutma veya ayıklama için herhangi bir ekipmana ihtiyaç duyulmaz. Tüy ve ince göğüs tüyleri ya depolanıp uluslararası pazarda satılabilir ya da yerel küçük işletmelerde yorgan gibi yüksek değerli perakende ürünlerinin üretiminde kullanılabilir (Şekil 3) (R. Buckland & Guy, 2002).



Şekil 3. Hava akımında tüylerin karıştırılması (R. B. Buckland, 1995).



Şekil 4. Kaz tüyü ile doldurulmuş yastık, yorgan, mont ve badminton topu. (<https://www.enderspor.com/urun/cmp-fix-hood-erkek-kaz-tuyu-mont-3z14757-130q>; <https://www.hepsiburada.com/delta-ozel-kaz-tuyu-pratik-kutusunda-6-adet-mantar-kafa-badminton-topu-pm-spordelta1701>).

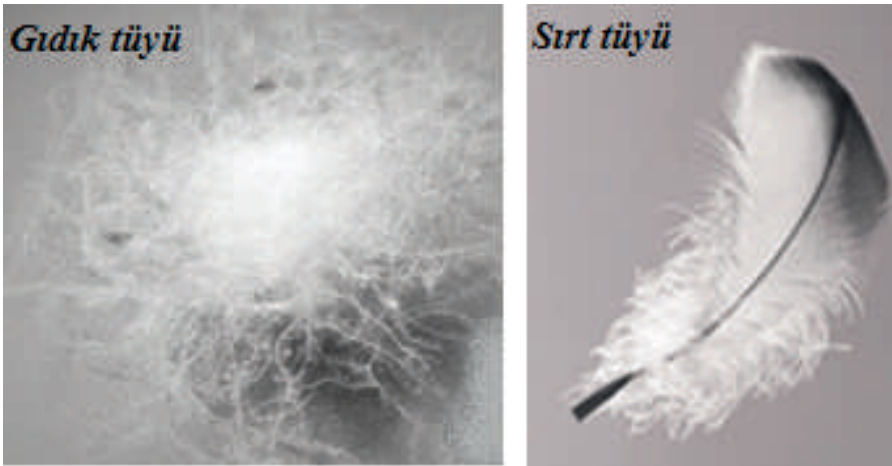
3.1. Kaz Tüylerinin Fiziksel yapısı

Kuş tüylerinin yalıtım özelliklerine olan ilgi, kuşların davranışsal ve ekolojik çalışmalarının ötesine uzanmaktadır. Kuş tüyü endüstrisinde, evcil kaz (*Anser anser domesticus*) tüyü, giyim ve yatak takımlarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Ördek tüyüne göre daha üstün olduğu kabul edilir ve büyük miktarlarda evcil kuşlardan elde edildiği için ideal bir ticari yalıtım malzemesi olarak kabul edilir. Bunun yerine, yaygın eider tüyü,

dişilerin karın tüylerini yolup yuvalarını kaplamak için kullandıkları vahşi doğadaki yuvalardan toplanır. Eider tüyünün olağanüstü termal özellikleri yüzyıllardır bilinmektedir ve doğal yalıtım malzemeleri arasında birinci sırada yer almaktadır.

Kaz tüyü, yalıtım özellikleri, hafifliği, kohezyonu ve esnekliği sayesinde soğuk havalarda giyim ve yatak takımlarında oldukça değerli bir üründür. On yıllar önce Loconti, tüycüklerin kendine özgü morfolojisinin olağanüstü termal özellikler kazandırdığını varsaymıştı, ancak şaşırtıcı bir şekilde bu konu daha fazla araştırılmamıştır. Kaz tüyünün termal verimliliği, “belirli bir miktarda kaz tüyü ve tüyün standart bir sıkıştırma ağırlığına tabi hacimsel ölçümü” olarak tanımlanan dolgu gücü ile değerlendirilir (IDFL). Başka bir deyişle, dolum gücü ne kadar yüksekse, kuş tüyü o kadar fazla hava hapsedebilir (Loconti, 1956).

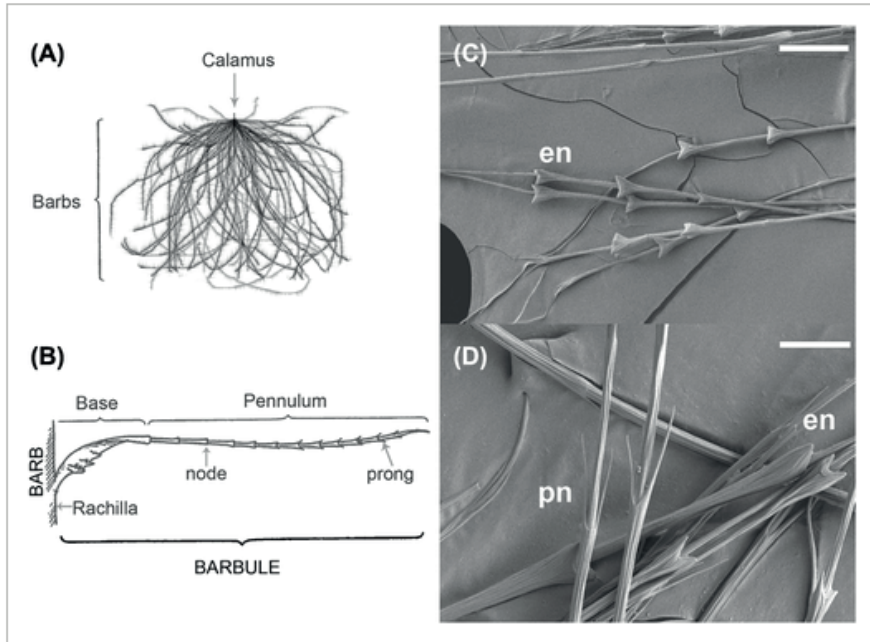
Gıdı tüyleri su kuşlarının iç koruma kalkanıdır. Bu sebeple İngilizce de down (aşağı) anlamına gelen bir terim kullanılmaktadır. Hayvanı, havada veya suda kimi zaman aşırı düşük olabilen sıcaklıklardan koruyan tüylerdir. Su geçirmez bir yapıya sahip olup neredeyse hiç su tutmaz. Sırt tüyleri de hayvanın yüzeyindeki suyu bir film tabakası gibi tutma özelliğine sahiptir. Kaz türlerine bağlı olarak -44°C sıcaklıkta ve Sibirya kazları zaman zaman -50°C 'den daha düşük sıcaklıklarda bile rahatlıkla yaşamaktadırlar. Gıdık tüyleri çok ince, yumuşak ve hafif olduğundan yorganlarda veya dolgu montlarda kullanılırken sırt tüyleri kısmen daha ağır olduğundan yastık veya fazlaca hafiflik istenmeyen ürünlerin üretiminde kullanılırlar. Gıdık tüyleri yumuşaklığı sağlar, hacmi artır, ısı tutma özelliği yüksektir. Şekil 5'te gıdık ve sırt tüylerine ait görseller verilmiştir.



Şekil 5. Kaz tüyü gıdık (down) ve sırt tüylerine ait görseller.

Eider tüyü, $813 \text{ in}^3 \text{ 30 g}^{-1}$ (IDFL) gibi olağanüstü bir ortalama dolum gücü sergiler ve yüksek kaliteli ürünlerde kullanılan üstün kalitede kuş tüyü, $800 \text{ in}^3 \text{ 30 g}^{-1}$ dolgu gücüne sahiptir (PHDesigns). Kohezyon, doğal malzemelerin tek tek liflerin demetler halinde bir arada tutulmasını sağlayan bir diğer özelliğidir (Alexander et al., 1962). Tüy kütlelerinin işlevselliği açısından kohezyonun mantıksal önemine rağmen, bildiğimiz kadarıyla bu özellik daha önce tüyler bağlamında araştırılmamıştır. Eider tüyünün olağanüstü özelliklerinin ardındaki mekanizmalar hakkındaki bilgiler, daha iyi yalıtım malzemelerinin biyomimetik tasarımına katkıda bulunabilir. Kaz tüyünün bölümlerini gösteren SEM görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir.

Kaz tüylerinin fiziksel yapısı, yalıtım, su geçirmezlik ve aerodinamik performans gibi işlevsel özelliklerini etkileyerek önemli bir rol oynar. Kaz tüylerinin mikro yapısını inceleyen çalışmalar, bu işlevlere katkıda bulunan çeşitli temel yapısal özellikleri ortaya koymaktadır. Kaz tüyleri iki ana tipe ayrılabilir: dış tüyler ve alt tüyler. Vücudu kaplayan ve kuşun şekline katkıda bulunan dış tüyler, karmaşık bir tüycük ve tüycük dizilimine sahiptir. Tüy yapısı, öncelikle bu unsurların dizilimi ve morfolojisi ile tanımlanır ve bu da tüyün yalıtım özelliklerini önemli ölçüde etkiler.



Şekil 6. Eider tüyü örneklerini oluşturan plumulaların yapısı.

(A) Karakteristik yelpaze şeklini gösteren tek bir plumulanın şematik gösterimi; ince tüyler, merkezi, küçülmüş kalamustan yayılır. (B) Düğüm yapılarının yerini gösteren tek bir tüyçük diyagramı. (C) Gri kaz tüyçüklerinde bulunan tipik genişlemiş düğümler (en), ölçek çubuğu 50 μm . (D) Yaygın eider plumula tüyçüklerini temsil eden distal düğümlerdeki uzun çıkıntılar (pn), ölçek çubuğu 20 μm . (D'alba et al., 2017)

D'Alba ve ark. (2017), farklı kaz türleri arasında tüy mikro yapısındaki farklılıkların, özellikle gri kaz gibi türlerde, karasal ortamlar için termal yalıtımı optimize ettiğini bulmuştur. Bu adaptasyon, değişken sıcaklıklarda vücut ısını koruma yeteneğini artırır (D'alba et al., 2017). Tüylerin iç mimarisi, özellikle de tüy sapı (tüyün orta gövdesi), yapısı içindeki lif yöneliminden etkilenen çeşitli mekanik özellikler sergiler. Liu ve arkadaşları, kazın birincil uçuş tüyünün gövdesini analiz etmek için mikro-CT görüntüleme yöntemini kullanarak, kortikal ve medüller bölgelerin etkili sıkıştırma özellikleri sağlamak için sinerjik olarak etkileşimde bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu katmanlı yapı, uçuş dinamikleri için gerekli olan önemli bir ağırlık olmadan mukavemet için bir adaptasyon önermektedir (Liu et al., 2022).

Malzeme bilimi alanında Büyükkaya, kaz tüyü lifleriyle güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik performansını incelemiş ve bu doğal liflerin, polimetil metakrilat (PMMA) gibi malzemelerle birleştirildiğinde eğilme dayanımı ve kırılma direnci gibi özellikleri artırabileceğini belirtmiştir (Büyükkaya, 2017). Tüy liflerinin yapısal özellikleri (lif çapı ve hizalanması gibi) bu kompozitlerin mekanik davranışını doğrudan etkileyerek, mühendislik uygulamalarında doğal liflerden yararlanmanın avantajlarını ortaya koymaktadır.

Tüy yapısının bir diğer kritik yönü de hidrofobiklikteki rolüdür. Kaz tüyleri, su geçirmez bir özelliğe sahip olacak şekilde evrimleşmiştir; bu özellik, su ortamlarında yalıtım ve yüzme yeteneği için son derece önemlidir. Kütükül olarak bilinen mumsu dış tabakanın varlığı, suyu itmeye yardımcı olur ve tüylerin genel hidrofobikliğine katkıda bulunur. Bu özellik, yalıtım özelliklerinin kaybına yol açabilecek su emilimini önlemek için gereklidir.

Yang ve Song tarafından incelenen mikro yapısal özellikler, tüy geometrisinin uçuş sırasında aerodinamik performansı nasıl etkileyebileceğini ortaya koymaktadır (Yang & Song, 2017). Tüy mikro yapılarının oluşturduğu hafif ancak güçlü iskelet, sürüklenmeyi en aza indirirken kaldırma kuvvetini en üst düzeye çıkarır ve biyolojik ilhamlı mühendislik tasarımlarında görülen aerodinamik prensipleriyle yakından örtüşür.

Özetlemek gerekirse, kaz tüylerinin karmaşık bir şekilde düzenlenmiş tüyçükleri ve esnek bir tüy sapı (rachis) ile karakterize edilen fiziksel yapısı,

yalıtım, su geçirmezlik ve aerodinamik gibi işlevsel yeteneklerini önemli ölçüde etkiler. Bu adaptasyonlar, kuş biyolojisinde tüylerin evrimsel önemini vurgulamakla kalmaz, aynı zamanda bu doğal yapıların anlaşılması ile birlikte, kompozit malzemelerin tasarımına katkıda bulunabilecek, malzeme bilimi ve mühendisliğinde potansiyel uygulamalarda kullanılabilme imkanı da sağlar.

3.2. Kaz Tüylerinin Mekanik Özellikleri

Kaz tüylerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, yalıtım, uçuş sırasında destek ve çeşitli ortamlara uyum sağlama gibi işlevlerini anlamak için çok önemlidir. Kaz tüyleri, hafifliği, yüksek mukavemeti ve çeşitli mekanik özelliklere katkıda bulunan benzersiz mikro yapıları nedeniyle dikkat çekici bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Özellikle kaz gibi uçan kuşların tüyleri, keratin bileşimlerinden kaynaklanan önemli çekme dayanımı ve esneklik sergiler. Tüylerdeki baskın protein olan α -keratin, mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynayarak onlara sağlam ancak esnek özellikler kazandırır. Araştırmalar, farklı kuşlar arasında elastikiyet modülünün değiştiğini, uçuş tüylerinin karasal kuşlarınkinden 2-4 kat daha yüksek değerler sergilediğini ve mekanik yükler altında uçuş için özel bir adaptasyonu vurguladığını göstermektedir (Barone & Schmidt, 2005; Laurent et al., 2020). Ayrıca, tüylerin merkezi gövdesi olan rachis'in, gerekenden çok daha yüksek güvenlik faktörlerine sahip "aşırı mühendislik ürünü" olduğu ve böylece dinamik aerodinamik koşullar altında mükemmel mekanik dayanıklılık sağladığı bildirilmiştir (Laurent et al., 2020).

Ayrıca, kaz tüylerinin, tüy sapından dallanan tüycükler ve tüycüklerden oluşan karmaşık mikro yapısı, mekanik bütünlükleri için temel öneme sahiptir. Bu yapısal özellikler, uçuş sırasında stresi etkili bir şekilde dağıtmaya yardımcı olarak, yüksek aerodinamik yükleme sırasında meydana gelebilecek felaket niteliğindeki arızaları önler (Chen et al., 2020). Tüycükler ve tüycükler arasındaki bağlantı noktaları, yapısal istikrarı korurken esnekliği artıran benzersiz bir dönme mekanizması sergiler; bu da kuş uçuş dinamikleri bağlamında kritik öneme sahiptir (Chen et al., 2020).

Araştırmalar ayrıca, hidrasyonun tüy malzemelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini de vurgulamaktadır. Örneğin, çalışmalar hidrasyon seviyelerinin tüylerin çekme ve eğilme özelliklerini doğrudan etkilediğini ve tüylerin keratinin elastik yapısı sayesinde yeniden hidrasyon sonrasında şekillerini ve mukavemetlerini geri kazanabildiklerini ortaya koymaktadır (Sullivan et al., 2018). Bu tür iyileşme mekanizmaları, çeşitli çevresel koşullarda hayati öneme sahiptir ve tüylerin uyum yeteneğine katkıda bulunur.

Gelişmiş mikroskopi ve 3 boyutlu görüntüleme teknolojileri kullanılarak tüy yapısı üzerine yapılan daha ileri araştırmalar, potansiyel biyokompozit uygulamaları için manipüle edilebilen keratin liflerinin dağılımına ilişkin ayrıntıları ortaya koymaktadır. Keratin liflerinin yönlendirilmesi, performansı en üst düzeye çıkarırken ağırlığı en aza indiren bir kompozit malzeme çerçevesi oluşturur; bu da uçuş için temel bir özelliktir (Fraser & Parry, 2008; Liu et al., 2022).

4. Kaz Tüylerinin Yıkanması ve Dezenfeksiyonu

4.1. Yaklaşım

Kanatlı hayvanlara ait tüylerin kesimhanelerde yapılan kesimler sonrasındaki durumuyla kullanımı pek mümkün değildir. Bazı üreticiler kuru yolum yaparak tüylerden daha yüksek verimlilikte istifade ederken seri üretim yapılan 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.

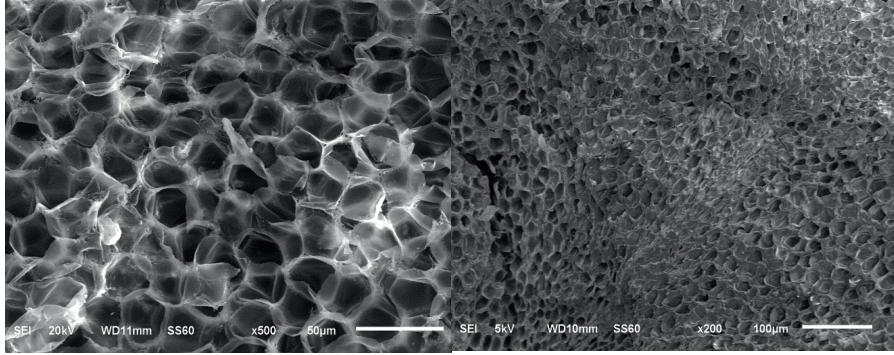
Bu lifler her ne kadar yün ve ipek lifleri gibi keratin içeriyorsa da yapısı itibarı ile özel işlemler ile kullanıma hazırlanması gerekmektedir. Kaz tüyleri tekstil ve hazır giyimde genellikle dolgu materyali olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple dezenfeksiyon bu ürünlerde büyük önem taşımaktadır. Giriş bölümünde farklı araştırmacıların bu tüylerin yıkanması, temizlenmesi ve dezenfeksiyonu çalışmaları ile ilgili olarak sundukları sonuçlar ve çalışma yapacaklara önerileri incelendiğinde çok farklı yöntemlerin kullanılabildiği ve farklı sonuçlara ulaşılabildiği anlaşılmaktadır.

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

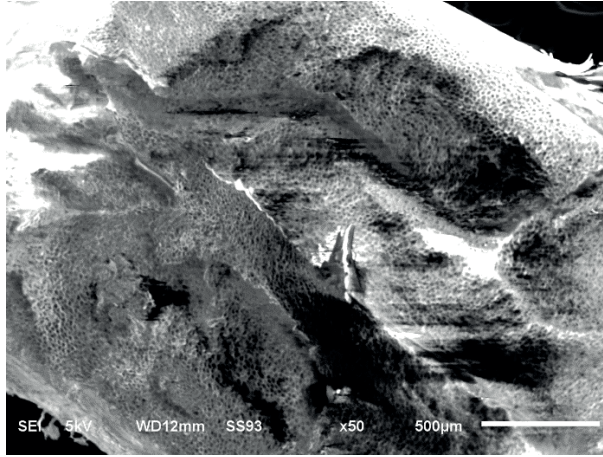
2- Kaz tüylerinden lif üretimi: Kaz tüylerinin yapısında çok miktarda gözenek ve odacıkların olması yalıtım esaslı malzeme üretimi için uygun bir hammadde olarak öne çıkarmaktadır. Bu odacıklı ve gözenekli yapısının mutlak suretle değerlendirilmesi gerekmektedir. Kaz tüylerinin yapısını gösteren elektron mikroskobu ile farklı büyütme oranlarında alınmış görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Rachisin enine ve boyuna yönde kesitleri alınarak çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde boşluklu yapı açıkça görülmektedir.

Yapının iç kısmının tavuk, hindi ve diğer kuşlarınkine benzer olacak şekilde gözenekli ve çok sayıda odacıktan oluştuğu görülmektedir. Kaz tüyünün

içyapısı incelendiğinde çok sayıda odacıktan oluştuğu ve bu odacıkların içerisine dolan hava kazı soğuğa ve ısıya karşı korumaktadır. Yüksek termal konfor sağlama özelliği olan bu yapıdan hareketle tüyler ağırlıklı olarak yalıtım gerektiren alanlarda kullanılması önerilmektedir ki kaz tüyü dolgu montlarda kullanılmaktadır. Kışın hafifliği ve yüksek ısı yalıtım özelliği ile fazlaca tercih edilmektedir.



(a) *Rachis enine yönde SEM görüntüsü.*



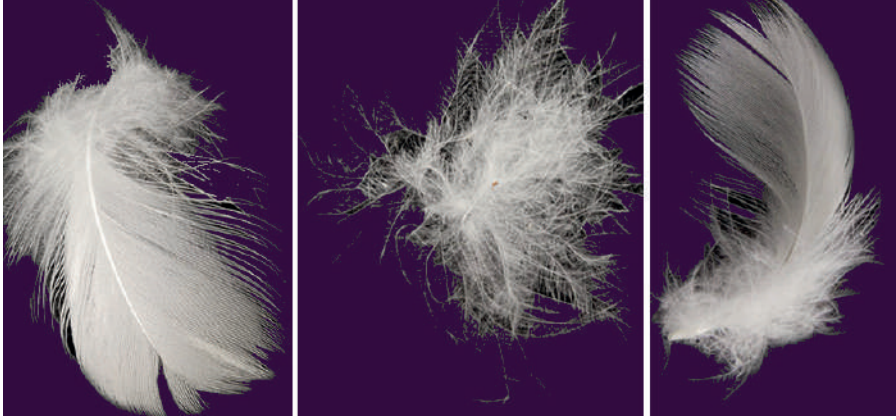
(b) *Rachis boyuna yönde SEM görüntüsü.*

Şekil 7. Kaz tüylerinin rachis kısmının taramalı elektron mikroskopunda (a) enine yönde ve (b) boyuna yönde olmak üzere farklı büyütme oranlarında alınmış görüntüleri

4.2. Materyal

4.2.1. Kaz Tüyü

Kaz 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 kaz tüylerine ait görsel Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Kazın farklı bölgelerinden alınan tüyler.

4.2.2. Yıkama Maddeleri ve Ekipman

Tavuk ve hindi tüylerinin yıkanması, dezenfekte edilmesi ile ilgili daha önce yaptığımız çalışmalarda kullanılan yıkama programlarından istifade edilmiştir. Kocatepe, tavuk tüylerini temizleme için yaptığı çalışmasında üç farklı yıkama maddesi kullanmıştır. Yıkama maddelerinin temizlemeye etkileri ile yapılan yıkamanın temizlik derecesini tespit etmeye dönük sonuçları ortaya koymuştur (Kocatepe, 2015).

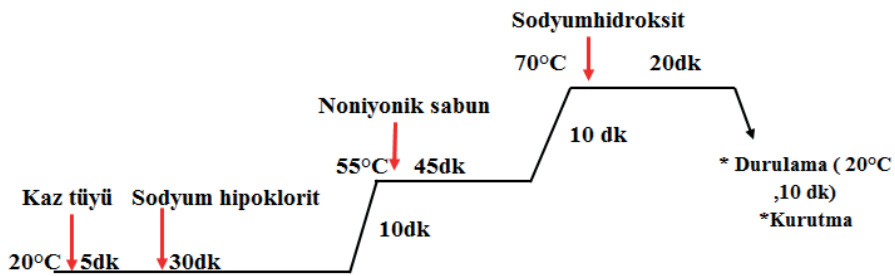
Anyonik, naniyonik ve katyonik özelliklere sahip yıkama maddeleri kullanılarak ideal temizlemeye ulaşılmaya çalışılmıştır. Buna göre 40 °C sıcaklık ve 60 dakika süre ile saf su ve noniyonik yıkama maddeleriyle yapılan yıkamanın liflerin gözenekli yapısının bozulmaması açısından daha elverişli sonuçlar 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. Erol, Hindi tüylerinin temizlenmesi işlemlerinde de aynı reçeteyi kullanarak olumlu sonuçlar elde ettiğini ifade etmiştir (Erol, 2025). Yapısal özellikleri açısından

tavuk ve hindi tüyleri benzerlik teşkil eden kaz tüylerinin yıkanması için Y1 ve Y2 olarak kodlanmış iki yıkama programı uygulanmıştır. Bu yıkama programları kullanılan kimyasal maddelere, yıkama sürelerine ve yıkama suyu sıcaklıklarına göre farklılıklar teşkil etmektedir.

4.3. Yöntem

4.3.1. Yıkama

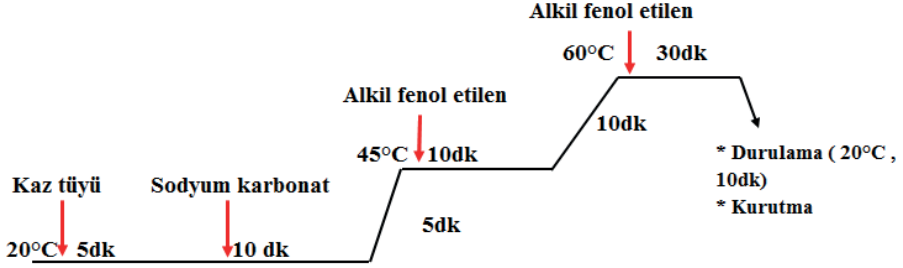
Kaz tüyleri Y1 ve Y2 olarak kodlanan iki farklı yıkama programı ve farklı kimyasal maddeler ile yıkanmış ve tüylerin temizlenme dereceleri kıyaslanmıştır. Tüyler gözenekli ve ince bir kumaş torbanın içerisine gevşek halde doldurulmuş ve Şekil 9’da verilen Y1 yıkama programına göre yıkanmıştır. Buna göre; 1lt su içerisine 50 gram kaz tüyü konularak 5 dk ısıtma ardından 50 ml sodyum hipoklorit (NaClO) ilave edilerek hazırlanan çözelti ile 30 dk boyunca tüylere ön yıkama yapılmıştır. Ardından noniyonik sabun ile esas yıkama işlemine geçilmiştir. Burada 1lt su içerisine 8ml sabun yıkama maddesi olacak şekilde çözelti hazırlanmış ve ön yıkaması yapılmış tüyler bu çözeltide 55°C sıcaklıkta 45 dk boyunca karıştırılarak yıkanmıştır. Yıkama sonrasında ağartma ve durulama işlemine geçilmiştir. Suyun sıcaklığı 10 dk içinde 70°C ‘ye kadar ısıtılmıştır. Burada durulama işlemi NaOH ile yapılmıştır. Çözelti 1 litre suya yıkanan tüy ağırlığının %5’ i kadar NaOH ilave edilmesiyle hazırlanmıştır. 70°C ‘de 20 dk ağartma ve 10 dakika durulama zamanı planlanmıştır. Durulama işleminden sonra tüylerin içinde nem kalmayacak şekilde ideal bir kurutma işlemine maruz bırakılması gerekmektedir.



Şekil 9. Y1 yıkama programına ait yıkama reçetesi.

Kaz tüyleri Şekil 10’da detaylı grafiği verilen programa göre yıkanmıştır. 20°C sıcaklıkta 1lt suyun içerisine Y2 işlemine tabi tutulmuş 50 gr kaz tüyü 5 dakika süreyle ısıtılır. Ardından Na_2CO_3 (sodyum karbonat, çamaşır

sodası) karışımın içerisine dahil edilir ve 10 dk daha muamele edilir. Çözelti sıcaklığı 45 °C' ye 5 dk içinde çıkarılır. Bu aşamada 2,5gr hidrofilik karakterde noniyonik deterjan alkil fenol etilen eklenerek 10dk işlem yapılır. Ardından sıcaklık 10dk içinde 60 °C' ye çıkarılır ve bu aşamada 2,5 gr daha deterjan ilave edilerek 30dk yıkama yapıldıktan sonra numuneyi çıkarıp 20 °C de 10 dk durulama yapıldıktan sonra tüyler kurutma işlemine tabi tutulur.



Şekil 10. Y2 yıkama programına göre yapılan yıkama reçetesi.

4.3.2. Kurutma

Yıkama işlemi tamamlanan kaz tüyleri bir bez torba içerisinde ve etrafa dağılmayacak şekilde ev tipi kurutma makinesinde 800 d/dk hızda 30 dk işlem görmek suretiyle kurutulmuştur. Tüylerin istenilen düzeyde kuruduğundan 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. Şekil 11'de kaz tüyü yıkama ve kurutma sürecinin grafiksel özeti verilmiştir.

Yıkama işlemi yapılırken tüylerin içyapısına zarar vermeyecek hassasiyette bir çalışma yapılmıştır. 50 gram ağırlığındaki tüyler NaClO çözeltisi ile işlem gördükten sonra naniyonik sabun ile yıkanmış ve NaOH ile ağartma işlemine tabi tutulduktan sonra durulanmıştır. Yapılan yıkama sonrasında kurutma işlemine tabi tutulan tüyler sonraki işlemlere hazır hale getirilmiştir.

Isı yalıtım değeri yüksek, hafif, gözenekli, hava geçirgenliği olan, temizlemesi kolay ve hazır giyimde dolgu materyali olarak kullanıldığında üstün konfor sunan bir malzemedir. Kaz tüylerinin katma değeri yüksek ürün üretiminde kullanımının yaygınlaşması, devlet desteği veya teşvikler ile üretiminin artırılması büyük önem arz etmektedir. Atık haldeki bu lifin katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi suretiyle sosyal ve ekonomik kalkınmaya katkı sunacağı açıktır.

Kaynakça

- Alexander, E., Lewin, M., Litav, Y., Peres, H., & Shiloh, M. (1962). The Crimp of Cotton Fibers. *Textile Research Journal*, 32(11), 898–908. <https://doi.org/10.1177/004051756203201104>
- 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>
- Barone, J. R., & Schmidt, W. F. (2005). Polyethylene reinforced with keratin fibers obtained from chicken feathers. *Composites Science and Technology*, 65(2), 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.06.011>
- Betül Çelik, Z. B. (2021). Muş Yöresi Yerli Kazlarında Kesim Ve Karkas Özellikleri. *Lalahan Hayvancılık Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 32(3), 167–186.
- Bousshine, S., Ouakarrouch, 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>
- Buckland, R. B. (1995). *Personal communication. McGill University.*
- Buckland, R., & Guy, G. (2002). *Goose Production. FAO ANIMAL PRODUCTION AND HEALTH PAPER.*
- Büyükkaya, K. (2017). Effects of the Fiber Diameter on Mechanic Properties in Polymethyl-Methacrylate Composites Reinforced with Goose Feather Fiber. *Materials Sciences and Applications*, 08(11), 811–827. <https://doi.org/10.4236/msa.2017.811059>
- Chelmonska, B. (1995). *Personal communication. Agricultural University of Wrocław.*
- Chen, Q., Pugno, N. M., & Li, Z. (2020). The rotation toughening mechanism of barb–barbule joint in the barb delamination of feathers. *Acta Mechanica*, 231(3), 1173–1186. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-02566-w>
- D'alba, L., Carlsen, T. H., Ásgeirsson, Á., Shawkey, M. D., & Jónsson, J. E. (2017). Contributions of feather microstructure to eider down insulation properties. *Journal of Avian Biology*, 48(8), 1150–1157. <https://doi.org/10.1111/jav.01294>
- Erol, M. (2025). Hindi Tüylerinin Fiziksel Yapısı, Özellikleri, Yıkama ve Dezenfeksiyon İşlemleri. In H. Aydemir & M. Erol (Eds.), *Tekstil Mühendisliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar* (1. baskı, pp. 29–52). BİDGE Yayınları.
- 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>

- 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>
- Fraser, R. D. B., & Parry, D. A. D. (2008). Molecular packing in the feather keratin filament. *Journal of Structural Biology*, 162(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2008.01.011>
- Guy G., Rousselot-Pailley D., & R. A. (1996). Comparison of meat geese performances fed with or without grass. *Arch Geflügelk*, 60(5), 217–221.
- 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>
- Kunming, W., & Chuangui, Z. (2021). *Cleaning and disinfecting device for down feather processing*.
- Laurent, C. M., Dyke, J. M., Cook, R. B., Dyke, G., & de Kat, R. (2020). Spectroscopy on the wing: Investigating possible differences in protein secondary structures in feather shafts of birds using Raman spectroscopy. *Journal of Structural Biology*, 211(1), 107529. <https://doi.org/10.1016/j.jsb.2020.107529>
- Liu, C., Xu, L., Li, X., Liu, Y., Qi, Y., Sun, J., & Zou, M. (2022). Microscopy imaging and modeling study on the mechanical properties of the primary flight feather shaft of the bean goose, *Anser fabalis*. *Microscopy Research and Technique*, 85(7), 2446–2454. <https://doi.org/10.1002/jemt.24100>
- Loconti, J. D. (1956). *Utilization of Chicken Feathers as Filling Materials/The utilization of chicken feathers as filling materials*. Advisory Board on Quartermaster Research and Development (L. I. (eds) In: Kennedy, S. J., Schubert, A. and Weiner (ed.)). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18880>
- Oral, O., & Esra Dirgar. (2017). Dolgu Malzemesi Olarak Kaz Tüyünün Kullanım Alanları ve Özellikleri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 10–14.
- 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., & Çadır, 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>
- Schneider, K.-H. (1995). *Gänse. (Geese)*. Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- Sullivan, T. N., Zhang, Y., Zavattieri, P. D., & Meyers, M. A. (2018). Hydration-Induced Shape and Strength Recovery of the Feather. *Advanced Functional Materials*, 28(30). <https://doi.org/10.1002/adfm.201801250>
- 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>
- Turgut Kırmızıbayrak. (2018). Türkiye’de Kaz Yetiştiriciliğinin Ticari Bir Sektör Olmasının Önündeki Engeller. *Türkiye Kaz Yetiştiriciliği Çalıştayı*, 53–67.
- Xiaolin, H., Kaiming, W., Wei, X., Yun, Z., & Tenghui, X. (2020). *Disinfecting and sterilizing device for down feather*. Patent.
- Yang, W., & Song, B. (2017). Experimental Investigation of Aerodynamics of Feather-Covered Flapping Wing. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/3019640>
- Yanxin, Z., & Le, C. (2016). *Novel down feather sterilization and disinfection device*. Patent.
- Yungang, H. (2018). *Disinfecting dedusting method for feather*. Patent.

Rami Liflerinde Yüzey Modifikasyon İşlemleri ve Su Emiliminin Darbe Dayanımına Etkisi

Hüsni Aydemir¹

Özet

Sürdürülebilir malzemeler kapsamında yer alan doğal bitkisel lifler maliyetlerinin düşük, bol bulunabilmesi, hafif bir yapıya sahip olması ve çevre dostu olması sebepleriyle birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Üretimin artmasına paralel olarak ortaya çıkan atıkların geri dönüştürülmesi son yıllardaki önemli konulardandır. Kompozitlerin üretiminde kullanılan dolgu malzemelerinden beklenen özelliklerin birçoğunu doğal bitkisel lifler sağlayabilmektedir. Aynı matris malzemesinin de doğada bozunarak geri dönüşebilen bir polimer olması da ortaya çıkacak kompoziti tamamen geri dönüştürülebilir bir malzemeye dönüştürülecektir. Bu kapsamda çalışmada, doğal bitkisel liflerden biri olan rami lifinin polilaktik asit (PLA) ile karıştırılmasıyla üretilen kompozit, doğada bozunabilen çevre dostu endüstriyel ürün haline gelmektedir. Ancak doğal liflerin kompozitin üretiminde kullanımı avantajlarının yanında olumsuz yönler de sahiptir. Bunlardan biri doğal yapısından gelen su emicilik (hidrofil) özelliğidir. Bu durum sebebiyle kompozit içerisindeki doğal liflerin iyi bir arayüzey bağlantısı oluşturmaması, matris bünyesindeki nemi emmesi ve zamanla alınan nem sebebiyle şişmenin oluşmasına bağlı olarak arayüzeyin daha da zayıflaması söz konusudur. Bu sebeple doğal bitkisel liflere kompozit üretimi öncesi yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmaktadır. Hidrofil yapıya sebep olan hemiselüloz ve lignin gibi maddeler lif yapısından uzaklaştırılarak selüloz oranı artırılır ve yüzey pürüzlülüğü artar. Yüze uygulanan kimyasal işlemler tek başlarına uygulanacağı gibi, birden fazla işlem kombinasyon şeklinde de uygulanabilir. Çalışma kapsamında liflere ilk olarak alkali işlemi (sodyum hidroksit ile), daha sonra silan işlemi (SiH_4 ile) uygulanmıştır. Rami liflerine uygulanan kimyasal işlemler sonrasında yedi gün süresince incelenen su emilim yüzdeleri azalırken, darbe mukavemeti özelliğinde ise iyileşme meydana gelmiştir. Ancak su içerisinde bekleme süresinin artmasıyla emilim değerlerinde bir miktar artış görülmüştür. Darbe dayanımında ise artan süreyle birlikte azalma meydana gelmiştir.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, Bingöl/Türkiye, haydemir@bingol.edu.tr, Orcid: 0000-0001-8772-2257

1. Giriş

Kompozit malzemeler, mükemmel dayanıklılıkları ve hafiflikleri nedeniyle, düşük maliyetli ve yüksek yapısal performans gösteren ürünleri oluşturmak için sürekli gelişen bir sektördür. Petrol kökenli hammaddelerin kullanımını azaltarak çevre dostu kompozitler geliştirilmektedir. CO₂ emisyonlarını azaltmaya yardımcı olabilecek ve doğal hammadde kullanımı artıracak seçeneklerin gerekliliği artmıştır. Bunun bir sonucu olarak, biyokompozitler gibi çevre dostu ve daha hafif malzemeler, geleneksel kompozit malzemelerin yerini almaya başlamıştır. Düşük yoğunluğa sahip ve güçlü mekanik özelliklere sahip doğal lif içerikli kompozitler ile ilgili çalışmalara ilgi her geçen gün artmaktadır (Mudo et al., 2024; T. Sathish et al., 2021).

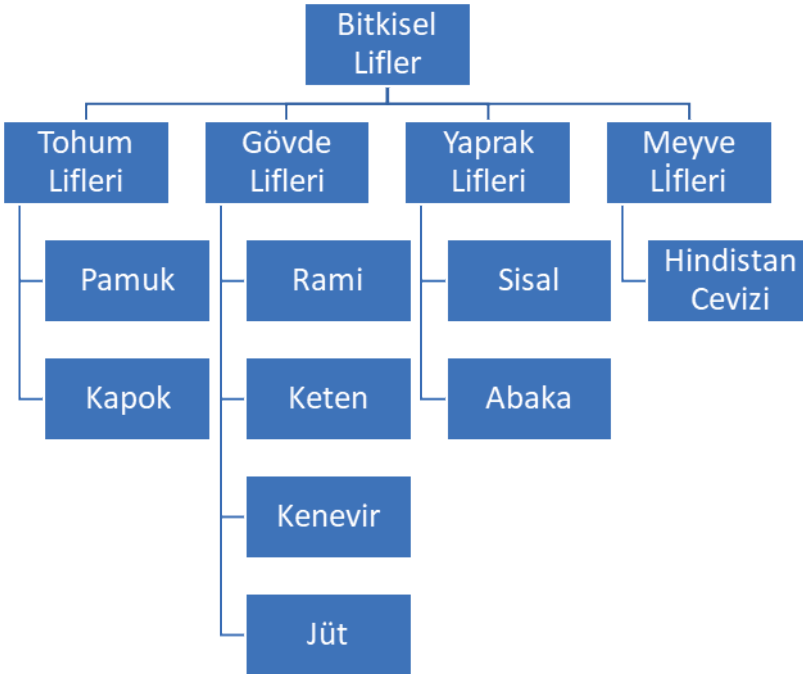
Kompozit üretiminde doğal liflerin kullanılması, hafif, kolay bulunabilen, uygun fiyatlı ve biyolojik olarak parçanabilir ürünlerin ortaya çıkmasına imkan sağlar. Bu kompozitler birçok endüstriyel sektör için uygun özelliklere sahiptir. Selüloz içerikli bu malzemeler, her geçen gün daha yaygın hale gelirken, otomotiv ve inşaat sektörlerinde yalıtım amaçlı kompozitlerde sentetik liflerin yerine kullanılabilirliği araştırılmaktadır (Sassoni et al., 2014).

Doğal liflerin yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikleri ve karşılaştırılabilir mekanik özellikleri, araştırmacıları, bilim insanlarını ve mühendisleri polimer bazlı kompozitlerin uygun bir alternatifi olarak polimerlerle güçlendirilmiş doğal lifleri kullanmaya yöneltmiştir ve bunları uygun bir takviye malzemesi haline getirmek ve yaşamın her alanında kullanmak için kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. Son yıllarda, birçok araştırmacı yeşil kompozitler geliştirmek için doğal lifler alanında araştırmalar yürütmüştür. Doğal liflerin ekonomik ve biyolojik olarak parçalanabilir avantajları, karşılaştırılabilir mekanik özellikler ve kimyasal dirençle bir araya getirildiğinde, doğal lifler test edilmiş ve karakterize edilmiş; cam, karbon ve kevlar gibi geleneksel liflerin yerine uygun bir takviye malzemesi haline gelmişlerdir (Barari et al., 2016; Omrani et al., 2016).

Çin otu olarak da bilinen rami lifi, Urticaceae familyasına aittir. Rami lifi bilimsel sınıflandırma da Boehmeria nivea adıyla bilinir. Benzerleri arasında en güçlü lif biridir. Uzmanlar rami bitkisinin Çin'in batı ve orta bölgelerinde ortaya çıktığını iddia etmektedir. Rami bitkisinin yetiştirildiği diğer ülkeler arasında Filipinler, Brezilya, Vietnam, Tayland, Kore ve Tayvan bulunmaktadır (T. Liu et al., 2014). Rami tropikal bölgelerde yetişen bir bitki olup 90 – 300 cm arasında uzunluğa kadar büyüyebilir. Kış aylarındaki soğuk havalarda büyüme hızı artar. Diğer liflerle karşılaştırıldığında rami lifi, yüksek selüloz konsantrasyonuna sahip ve biyolojik olarak tamamen

parçalanabilir bir yapıya sahiptir. Doğada bozunması, yenilenebilirliği ve sürdürülebilirliği çevresel açıdan avantajlardır (Khoo et al., 2023).

Doğal lifler, mineraller, hayvanlar ve bitkiler gibi doğal kaynaklardan elde edilen liflerdir. Minerallerden elde edilen liflere mineral lifler, doğal olarak oluşan mineral lif ise asbesttir. Hayvansal lifler, yün, ipek, tiftik, alpaka gibi proteinlerden oluşur. Hayvansal kollar lif formunda çıkarılır. Koyun yünü, keçi kılı, alpaka kılı, at kılı vb. gibi hayvanlardan elde edilir. İpek lifleri, koza hazırlama sırasında ipek böceklerinin salgılarının kurumasıyla oluşan bir yapıdır. Bitkisel lifler, geniş bulunabilirliği, uygun maliyeti ve daha kısa sürede yenilenebilmesi nedeniyle son araştırmalarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Şekil 1, bitkisel liflerin sınıflandırılmasını göstermektedir. Tüm doğal bitkisel takviye lifleri, doğası gereği lignin ve selüloz içerir. Selüloz ve ligninin katkıları her lif için farklıdır. Birçok çalışmada belirtildiği gibi, doğal liflerin çeşitli mekanik özellikleri, lifteki selüloz içeriğinin, selülozun polimerizasyon derecesinin ve mikro lif açısının bir fonksiyonudur (Elfaleh et al., 2023; Ez-Zahraoui et al., 2023).



Şekil 1. Doğal bitkisel liflerin sınıflandırılması

1.1. Rami Lifinin Üretimi

Rami lifi, ilk üretim süreci kullanılarak rami bitkilerinden elde edilir. Rami önce rami bitkisinin sapından sıyrılır. Ardından, dış kabuğunu çıkarmak için rami kabuğu soyulur ve kabuğu soyulmuş rami üretilir. Kabuğu soyma işlemi elle ve makine ile yapılabilir. Tekstil işletmelerine tedarik sağlamak için liflerin hasat sonrası kabuk çıkarma ve zamk giderme işlemlerinden geçmesi gerekir. Hasat ve kabuk çıkarma işlemlerinin, üretim boyunca gereken işgücünün yaklaşık %80'ini oluşturduğu tahmin edilmektedir (Mudi & Shaw, 2025) ve bu rakam engebeli ve dağlık bölgelerde daha da yüksektir. Bu önemli iş gücü talebi, verimliliği artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek için bu aşamalarda mekanizasyon ve teknolojik çalışmaları artırmaktadır. Rami liflerine olan talep artmaya devam ettikçe, optimize edilmiş hasat ve kabuk çıkarma teknikleri, genel üretim verimliliğinde ve ürün kalitesinde önemli iyileştirmeler sağlanması gerekecektir. Rami mahsullerinin büyüme özellikleri göz önüne alındığında, sektör yüksek işçilik maliyetleri, önemli miktarda iş gücü gereksinimi, verimsiz hasat ve kabuk çıkarma süreçleri dahil olmak üzere çok sayıda zorlukla karşılaşmaktadır ve bu sorunlar özellikle engebeli alanlarda daha fazladır (Ding et al., 2023).

Kabuğu soyulmuş rami, yaklaşık %20-30 oranında selülozik olmayan yapışkan maddeler içerir. Liflerin sonraki süreçte sorunsuz kullanılabilmesi için kabuğu soyulmuş raminin yapışkan malzemelerini çıkarmak ve bağlı lifleri ayırmak için zamkının giderilmesi gerekir. Raminin geleneksel alkali zamk giderme işlemi, yalnızca yüksek miktarda kimyasal tüketimine neden olmakla kalmaz, aynı zamanda ciddi çevre kirliliği sorunlarına da yol açar (Li et al., 2016; Yang et al., 2022).

1.1.1. Kimyasal Zamk Giderme İşlemi

Rami için kimyasal zamk giderme, karmaşık bir süreçtir. Rami hammaddesindeki selüloz ve zamkın (pektin, hemiselülozlar ve lignin) alkali, inorganik asit veya oksidan ortamlarda farklı derecelerde ayrışması kuralına göre gerçekleştirilir. Kimyasal zamk gidermenin mekanizması, zamk maddelerini eş zamanlı veya adım adım uzaklaştırmak için belirli kimyasal ortamlarda selüloz ve safsızlıklar arasındaki hidroliz farklılıklarıdır. Bundan dolayı, elde edilen rami lifinin mekanik ve fiziksel performans özelliklerinin mümkün olduğunca az zarar görmesi önemlidir. Tipik olarak, pektin ve hemiselüloz yüksek konsantrasyonlu alkali çözeltide kolayca hidrolize olabilirken, selüloz hidrolize olamaz. Böylece ayrıştırma işlemi gerçekleştirilir (C. Wang et al., 2018). Kimyasal zamk giderme, kullanılan reaktiflerin

çeşitliliğine göre geleneksel kimyasal zımk giderme ve yeni kimyasal zımk giderme olarak sınıflandırılır.

Rami için geleneksel kimyasal zımk giderme, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç koşullarında çok sayıda sodyum hidroksit (NaOH) reaktif gerektirdiğinden, oldukça yüksek maliyetli ve yüksek enerji tüketen bir yöntemdir. Dahası, geleneksel kimyasal zımk giderme, yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı nedeniyle doğrudan deşarj edilemeyen büyük miktarda atık su üretmektedir. Atık su arıtımı pahalıdır ve geleneksel kimyasal zımk gidermenin maliyetini önemli ölçüde artırarak, bu yöntemin geniş çaplı kullanımını bir ölçüde sınırlamaktadır (Li & Yu, 2015; Meng et al., 2016).

Geleneksel kimyasal zımk giderme yöntemiyle karşılaştırıldığında, rami için yeni kimyasal zımk giderme işlemi zımk giderme süresini kısaltır, sert şeritleri azaltır ve zımk giderme verimliliğini artırır, ancak yine de NaOH yerine önemli miktarda başka kimyasal reaktif gerektirir. Tamamen kimyasal olan bu işlem, yüksek sıcaklıkta kaynatma ve basınç gerektirdiğinden, kolayca enerji israfına ve çevre kirliliğine yol açar (Jiang et al., 2018; Meng et al., 2019).

1.1.2. Biyolojik Zımk Giderme İşlemi

Biyolojik işlemde, rami zımkları, selülozu parçalamayan mikroorganizmaların yerinde veya hücre dışı enzimleriyle işlenmesiyle giderilir. İki biyolojik zımk giderme yöntemi, özünde selüloz olmayan bileşenlerin bir dizi polisakkarit parçalayıcı enzim tarafından katalize edildiği aynı bozunma süreçleridir (Meng et al., 2017). Rami hammaddesinin biyolojik zımk giderme işlemi, kullanılan farklı katkı maddelerine göre bakteriyel veya enzimatik olarak sınıflandırılabilir.

Mikrobiyal zımk gidermenin etki süreci, mikrobiyal büyüme, mikrobiyal metabolizma ve enzimatik bozunma döngüsüdür. İlginç bir şekilde, mikrobiyal yapılar, metabolik aktivite için karbon kaynağı olarak zımk hidrolizatlarının bir kısmını tüketir, bu da hidroliz ürünü (oligosakkaritler) tarafından zımk giderme enzimatik reaksiyonunun geri beslemeli inhibisyonunu önler ve zımkın tamamen giderilmesini sağlayarak, nihayetinde rami liflerinin biyolojik zımk giderme işleminin verimliliğini ve etkinliğini artırır (Fan et al., 2015).

Mikrobiyal zımk gidermenin, kararsızlık ve zımkın tam olarak giderilememesi gibi bazı dezavantajları da vardır. Kontrolsüz mikrobiyal zımk giderme sırasında selülozu parçalayan mikroorganizmaların büyümesi nedeniyle lif kalitesinin bozulmaya başlaması nedeniyle rami zımk giderme işleminin yedi günden fazla uzatılamayacağını bulmuşlardır (Cheng et al.,

2018). Bu nedenle, hızla büyüyen ve çoğalan ve selüloz aktivitesi olmayan hemiselüloz sistemlerini kapsamlı bir şekilde salgılayan bakteriler, rami zambak giderme için kullanılan ana mikroorganizmalardır.

Enzimatik zambak giderme işleminde, rami zambakının bozunması, mannanaz ve ksilanaz gibi pektinaz ve hemiselülozik parçalayıcı enzimler de dahil olmak üzere bir dizi polisakkarit hidrolazın sinerjik etkisini gerektirir. Pektinaz, enzimatik zambak gidermede primaz olarak en önemli enzimlerden biridir (Cheng et al., 2019). Rami biyolojik zambak gidermenin erken aşamasında, pektinaz dış pektik maddeyi parçalar, hücre yapısını gevşetir, hemiselüloz ve diğer zambak giderme faktörlerinin etkili bir şekilde nüfuz etmesini sağlar ve böylece zambak komplekslerinin genel bozunma verimliliğini artırır (R. Wang et al., 2019).

Enzimatik zambak giderme, kimyasal zambak giderme yöntemlerine kıyasla yumuşak ve esnek işleme koşulları, çevre dostu çalışma, minimum lif hasarı ve kolay kalite kontrolü gibi birçok avantaja sahiptir. Ancak, enzimatik zambak giderme, aşağıdaki iki ana nedenden dolayı endüstriyel üretimde büyük ölçekte uygulanmamıştır. Birincisi, enzim hazırlama maliyeti biraz yüksektir; ikincisi, rami malzemelerinin zambak benzeri maddesinin karmaşıklığı göz önüne alındığında, türev rami zambak bileşenleriyle eşleşen bir zambak giderme kompleksi enzim sistemi oluşturmak zor bir iştir (Qi et al., 2019; A. Singh et al., 2020).

1.1.3. Fiziksel Zambak Giderme İşlemi

Fiziksel zambak giderme, selüloz molekülleri arasındaki hidrojen bağlarını yok etmek, selülozun iç yapısının agregasyon durumunu değiştirmek ve lifler arasındaki bağı koparmak için fiziksel yöntemler (örneğin mekanik haddeleme, ultrason, süperkritik CO₂ ve buhar püskürtme) kullanarak, takip eden enzim, alkali ve diğer reaktiflerin liflere kolayca nüfuz etmesini sağlayarak reaktif kullanım oranını ve zambak giderme verimliliğini artırmaktır. Rami hammaddesinin fiziksel işlenmesi tek başına ideal zambak giderme etkisini sağlayamadığından, genellikle diğer yöntemlerle birlikte kullanılan bir lif ön işleme yöntemi olarak kabul edilir (Shen, Wang, Chen, et al., 2015).

Fiziksel zambak giderme yöntemi, kısa zambak giderme süresi, yüksek verimlilik, kontrol edilebilirlik, iyi tekrarlanabilirlik, düşük maliyet ve neredeyse hiç çevre kirliliği olmaması gibi avantajlara sahiptir; ancak düşük zambak giderme oranı ve liflerin zayıf eğrilebilirliği gibi dezavantajları da vardır (Mao et al., 2019).

1.1.4. Biyokimyasal Zamb Giderme İşlemi

Bu işlem, rami liflerinden zamb giderim oranını en üst düzeye çıkarmak ve kimyasal ve enerji tüketimini azaltmak için biyolojik ve kimyasal işlemlerin bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir.

Biyokimyasal zamb giderme yöntemi, zambı tamamen gidermek için hem biyolojik hem de kimyasal yöntemlerin avantajlarını bir araya getirir de, lif hasarı ve zorlu işleme koşulları gibi bariz dezavantajları da vardır. Dahası, kimyasal işlem ve bakteri hazırlama veya enzim hazırlama ile ilgili biyokimyasal zamb giderme yöntemi, yüksek maliyet ve karmaşık bir işlem gerektiren karmaşık ve uzun bir süreç akışı gerektirir (Shen, Wang, & Long, 2015).

1.2. Rami Lifinin Yapısal Özellikleri

Doğal lif özellikleri, lif türü, yetiştirme ortamı, hasat süresi, çıkarma işlemi, lif işleme, bitki yaşı ve depolama şekliyle ilişkili olan kimyasal içerik ve düzenlemeye bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Liflerin özellikleri, bitkinin yetiştiği ortamdan büyük ölçüde etkilenebilir. Liflerin mukavemeti, uzunluğu, genişliği ve hatta rengi, toprak kalitesi, sıcaklık, bakım ve güneş ışığına maruz kalma gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Bitki lifleri söz konusu olduğunda, hasat sırasında bitkinin yaşı lifin kalitesi üzerinde etkilidir. Olgun bitkilerle karşılaştırıldığında, daha genç bitkiler daha yumuşak ve farklı özelliklere sahip lifler üretebilir. Doğal liflerin kalitesini koruması için uygun şekilde depolanması gerekir. Zamanla, sıcaklık, nem ve ışık maruziyeti gibi değişkenler liflerin özelliklerini etkileyebilir. Kötü depolama koşulları bozulmaya, renk bozulmasına veya küf oluşumuna neden olabilir. Genel olarak, daha yüksek selüloz içeriğine ve lif yönünde daha uyumlu selüloz mikrofibrillerine sahip liflerle üstün özellikler elde edilir (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2020; Sanjay et al., 2015).

Doğal liflerin iç hücre duvarı yapısı üç ana bölüme ayrılır. Doğal liflerin özellikleri mikrofibril açısı ve hücre duvarı içindeki düzenlemesi tarafından belirlenir. Hücre duvarı iki katmandan oluşur: birincil hücre duvarı ve ikincil hücre duvarı. Bitki büyümesi sırasında birincil hücre duvarı yayılır. İkincil hücre duvarı, her biri uzun bir mikrofibril zincirine sahip üç katmandan oluşur (Chokshi et al., 2022; Jamilah & Sujito, 2021). Hemiselülozlar, bir ağa benzeyen bir yapıya sahiptir ve selülozik fibrillerle bağlar oluştururlar. Selüloz-hemiselülozlar bir ağ oluşturur ve lignin ile pektin yapışkanlığa sebep olur. Bu zamb özelliği, selülozik lifin mukavemetinden ve sertliğinden sorumludur. İkincil hücre duvarı, doğal liflerin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirler. Tipik olarak, daha yüksek selüloz konsantrasyonları ve

daha düşük mikrofibril açısı daha yüksek mukavemet nitelikleri sağlar. Rami lifinin içeriğinde selüloz %68,0 ile %91, hemiselüloz %4,0 ile %16,7, lignin %0,6 ile %12,7 ve pektin %1,8 ile %6,1 oranlarında bulunmaktadır (Choi & Lee, 2012; Faruk et al., 2012; Fuqua et al., 2012).

Rami liflerinin fiziksel özelliklerini araştırmak için birçok çalışma yürütülmüştür ve liflerin iyi ısı, ışık, alkali ve asit direncinin yanı sıra büyük bir parlaklığa, ısıltıya ve dayanıklılığa sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Doğal bir lif olan rami, yalnızca olağanüstü dayanıklılık, emicilik ve parlaklık sunmakla kalmaz, aynı zamanda büyük mukavemet ve uzunluğa sahip en hafif lif olmasıyla da öne çıkar. Rami lifi, çekme özelliklerinde gözle görülür bir kayıp olmaksızın 160 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklarda termal olarak kararlıdır (De Azevedo et al., 2021; Khoo et al., 2023; X. Liu et al., 2018). Bu, rami lifini kompozit malzemelerde takviye olarak kullanım için önemli bir doğal lif haline getirir.

2. Bitkisel Lifler ile Kompozit Üretiminde Ön İşlemler ve Kompozitlerde Kullanımı

Doğal bitkisel lifler ile kompozit üretiminde yapısal özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla ön işlemler yapılması önemlidir. Hidrofilik lifler ile hidrofob matris arasında iyi bir ara yüzey bağlanması sağlamak istenildiğinde ön işlemler gereklidir.

2.1. Bitkisel Lif İçerikli Kompozitlere Uygulanan Yüzey Modifikasyon İşlemleri

Kimyasal modifikasyonlar, doğal lifler ve polimer matrisler arasındaki arayüzü iyileştirmek için kullanılır ve bu, takviye edici ajan olarak performanslarını artırmak için gereklidir. Hidroksil gruplarını aktive ederek veya yeni gruplar ekleyerek, bu modifikasyonlar lifler ve matris arasındaki etkileşimi güçlendirmeyi ve lifin hidrofilik yapısının getirdiği zorlukların üstesinden gelmeyi amaçlar (Krishnasamy et al., 2022).

Kompozit malzemelerde kimyasal bağlanma süreci anlamak oldukça karmaşıktır. Kimyasal bağlayıcı maddeler genellikle iki işlevlidir, yani matrisin fonksiyonel gruplarının yanı sıra selülozdaki hidroksil gruplarıyla da reaksiyona girebilirler. Malzemelerde zayıf sınır tabakalarının çıkarılması, sağlam ve esnek bir tabakanın oluşturulması, lignin, pektin ve hemiselüloz gibi selülozik olmayan kısımların çıkarılması ve polimer ile dolgu maddesi arasındaki güçlü bir şekilde çapraz bağlı bir ara alanının geliştirilmesi gibi bir çok faktörü bir arada içerir (Suriyaparakash et al., 2023).

Mükemmel arayüz yapışması, elyafın güçlendirme verimliliğini ve dolayısıyla ortaya çıkan kompozitlerin toplu mekanik performanslarını sağlamada önemli bir rol oynar. Doğal elyaflar, doğal polar ve hidrofilik yapı ve hidrofobik polimerik matrislerle (polar olmayan) sınırlı uyumluluk gibi önemli sınırlamalar gösterir ve bu da zayıf arayüz yapışmasına yol açar. Bu, birleştirme sorunlarına neden olur ve polimer matrislerin içinde düzgün olmayan elyaf dağılımına yol açarak verimliliklerini kısıtlar. Doğal elyaflar çok fazla nem emebilir, bu da kompozitlerde şişme ve boşluklara neden olur ve bu da zayıf mekanik özellikler ile sonuçlanır. Su emilimi ayrıca arayüzde agrega oluşumuna yol açarak biyo-kompozitlerin boyut kararlılığını zayıflatır ve azaltır (Fatona et al., 2018; Shi et al., 2017; Sun, 2019).

Doğal liflerde yapılan modifikasyonlar, yüzey özelliklerini değiştirerek matrislere yapışmalarını iyileştirmeye çalışır. Doğal olarak kırılma eğilimli güçlü bir arayüzün varlığıyla gelişmiş mukavemet ve sertlik elde edilebilir ve bu da matris ve elyaf içinde çatlakların kolayca yayılmasını kolaylaştırır. Matris-elyaf gerilim transfer verimliliği, daha zayıf bir arayüzle azaltılabilir (Arbelaiz et al., 2022; Sayeed & Paharia, 2019).

Doğal bitkisel liflerle kompozit üretiminde matris-dolgu ara yüzünün daha iyi bağlanması için farklı kimyasal işlemler uygulanabilir. Bunlara; alkali, silan, asetilasyon, benzoilasyon ve peroksit işlemleri örnek gösterilebilir ve aşağıda kısaca bu işlemler açıklanacaktır. Bu işlemlere ek olarak aşı kopolimerizasyonu, permanganat ve stearik asit işlemleri de benzer amaçla farklı çalışmalarda kullanılmıştır.

2.1.1. Alkali İşlemi

Bitkisel liflerin alkali ile işlenmesi, lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini ve arayüz uyumluluğunu artırmak için yaygın olarak kabul edilen etkili bir yöntemdir. Çeşitli çalışmalar, özellikle sodyum hidroksit (NaOH) ile yapılan alkali işleminin, hemiselüloz, lignin ve pektin gibi selüloz dışı bileşenleri uzaklaştırarak lif yapısını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir. Bu işlem, liflerin kristallliğini artırır ve çekme özelliklerini iyileştirirken, lifler ile polimer matrisi arasındaki yapışmayı da artırır (Ismail et al., 2021).

Pektin, rami hücre duvarlarında bulunan bir tür kompleks şeker olan bir heteropolisakkarittir. Lifleri birbirine bağlayarak tek tek liflerin ayrılmasını zorlaştırır. Pektini gidermek ve kullanılabilir rami lifi oluşturmak için zamburak giderme işlemi yapılmalıdır (Suriyaprakash et al., 2023; J. Wang et al., 2023).

Alkali işlem çoğunlukla selülozu doğal liften uzaklaştırmak için NaOH kullanır. NaOH suda çözüldükten sonra %6,5 ila %8,5 arasında bir pH değerine sahiptir, bu nedenle işlemten sonra arıtılmış su toprağa dökülse bile çevreyi etkileyemez. Yoğunluğu daha yüksek olan kristalin bölgedeki selülozun düzeninin çökmesine ve amorf bir bölge oluşmasına yol açar, daha sonra eklenen NaOH lifle yüksek oranda reaksiyona girer (L. Prabhu et al., 2020). Lifteki su molekülleriyle reaksiyona girerken moleküller arasında bulunan hidroksil grupları parçalanır. Böylece lifin hidrofilik yapısı hidrofobik yapıya dönüşür, mukavemeti bu kimyasal modifikasyonla arttırılır. Aynı zamanda, alkali yüzdesi optimum koşuldan daha büyükse bu lifin hasar görmesine yol açar (S. Sathish et al., 2020).

Alkali işlem, merserizasyon olarak da bilinir. Termoplastik ve termoset polimer matrislerin içindeki liflerin yüzeylerinin matris-dolgu bağlanması açısından iyi özelliklere sahip kompozitlerin üretiminde kullanılan en yaygın ve en iyi yöntemdir. Liflerin alkali işlemi, daha yüksek en boy oranı sağlar. Alkali işlem genellikle kısa liflere, %10' luk NaOH sulu çözeltisinde 80°C'de yaklaşık 3-4 saat süreyle uygulanır. Ardından havalandırılmalı fırında kurutulur. Bu süreçte aşağıdaki reaksiyon gerçekleşir (R. Prabhu et al., 2022):



Alkali işlemi hidroksil grubu içeren NaOH dışında potasyum hidroksit (KOH) ve lityum hidroksit (LiOH) gibi farklı alkalilerle de yapılabilir. Ketten lifinin alkali ile işlemi sonrasında, lifin boyundaki düzgünlüklerin azaldığı, enine kesitinin ise dairesel forma dönüştüğü bildirilmiştir. Elyaf ile matris arasındaki arayüz yapışmasının gelişmesi sağlanmıştır (Montreuil et al., 2024).

Alkali işlemle elde edilen gelişmiş arayüzey bağlaması, reçinelerin lif yüzeyine etkili bir şekilde nüfuz etmesini kolaylaştırarak mekanik kenetlenmeyi iyileştirir ve böylece kompozitin çekme dayanımını ve eğilme modülünü artırır (Rizal et al., 2018). Bu , alkali işlemin liflerin etkili yüzey alanını ve en boy oranını artırdığını ve daha güçlü bir lif-matris arayüzüne katkıda bulunduğunu bildirilmiştir (Wan Ramli et al., 2020).

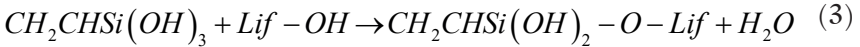
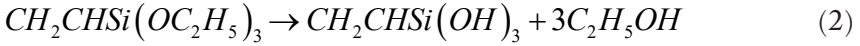
Ancak, alkali maruziyetinin konsantrasyonu ve süresinin kritik öneme sahip olduğunu dikkate almak çok önemlidir, çünkü aşırı işlem lif bozulmasına ve mekanik bütünlüğünün azalmasına yol açabilir. Optimum bir alkali konsantrasyonunun gerekli olduğunu vurgulamıştır; aşırı konsantrasyonlar, kompozitlerin çekme dayanımını önemli ölçüde azaltan

lignin kaybına neden olabilir (Ridzuan et al., 2017). Ek olarak, daha yüksek NaOH konsantrasyonlarının lif yapısına zarar verdiğini ve sonuç olarak nihai kompozitin mekanik performansını tehlikeye attığını göstermiştir (Salim et al., 2015). Bu nedenle, lif bütünlüğünden ödün vermeden alkalizasyonun faydalarını en üst düzeye çıkarmak için işlem konsantrasyonu ve süresine dengeli bir yaklaşım şarttır.

2.1.2. Silan İşlemi

Bitkisel liflerin silanla işlenmesi, lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini ve performansını artırmak için giderek daha değerli bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Bu işlem, kimyasal bağlar oluşturarak lifler ve polimer matris arasında daha güçlü yapışmayı teşvik eder ve böylece gerilim transferini iyileştirerek kompozitin genel mekanik özelliklerini artırır.

Silan (SiH_4) olan bir kimyasal aileye aittir. Doğal lifler ile polimer matris arasındaki yapışmayı artırmak için bağlayıcı ajan olarak kullanılırlar. Silan bağlayıcı ajanlar, lif matrisinin ara yüzeyindeki selüloz hidroksil gruplarının sayısını azaltabilir. Nem varlığında, hidrolize edilebilir alkoksi grupları silanollerin oluşumuna yol açar. Silanol daha sonra hidroksil grubuyla reaksiyona girerek kararlı kovalent bağlar oluşturur. Lif ve matris arasında kovalent bağ oluşması sonucunda çapraz bağlı ağın oluşmasıyla liflerin şişme özelliğinde bir azalma olur (Mu et al., 2023; Xie et al., 2010).



Silan işlemi, bitki lifleri ve matris reçineleri arasındaki arayüzey yapışmasını iyileştirir. Alkali ve silan kombinasyonu ile işlenmiş jüt lifleri, işlenmemiş liflere kıyasla belirgin şekilde daha iyi yapışma ve uyumluluk sergileyerek epoksi kompozitlerde mekanik performansı iyileştirmiştir (Dilfi et al., 2018). Bu sinerjik etki önemlidir, çünkü daha iyi lif-matris yapışması, yük uygulamaları sırasında daha iyi gerilim transferine dönüşerek üstün çekme dayanımı ve sertliğe sahip kompozitler elde edilmesini sağlar.

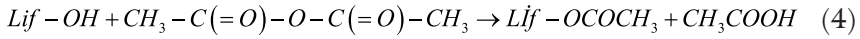
Dahası, silan bileşikleri ve polimerler arasında iç içe geçmiş ağların oluşumu, arayüz boyunca etkili yük transferine yardımcı olur. Silan ajanları içindeki reaktif gruplar ile epoksi reçine arasındaki reaksiyonun, kompozitlerde yüksek performans elde etmek için gerekli olan sağlam bir bağ oluşturduğunu vurgulamıştır (Fathi et al., 2019). Bu kimyasal bağ,

yalnızca mekanik dayanımı artırmakla kalmaz, aynı zamanda kompozitin nem emilimi gibi çevresel bozulmaya karşı direncini de artırır; bu da özellikle dış mekan veya nemli uygulamalar için önemlidir.

Kigelia Pinnata meyve liflerinin silan ile işlenmesinin, yüzeyde küçük bir aşınmaya ve termal olarak bozunabilir kirleticilerin uzaklaştırılmasına yol açarak lif ile polimer matrisi arasındaki etkileşimi artırdığını göstererek bu bulguları desteklemiştir. Bu modifikasyon sadece termal özellikleri iyileştirmekle kalmamış, aynı zamanda selüloz lifleri içinde daha düzenli bir kristal yapı oluşmasına da neden olarak kompozitin termal maruz kalma sırasında daha iyi stabilitesine katkıda bulunmuştur (Vishal et al., 2023).

2.1.3. Asetilasyon

Asetilasyon işlemi, selüloz lifinin plastikleştirilmesi için bir yöntemdir. Bu yöntemde, organik bir bileşiğe bir asetil fonksiyon grubu eklenir. Esterifikasyon, doğal liflerin asetillenmesi için kullanılan yöntemlerden biridir. Doğal lifler kimyasal olarak asetik anhidrit ($\text{CH}_3\text{-C(=O)-O-C(=O)-CH}_3$) ile işlenir. Asetik anhidrit, polimer hidroksil grubunu asetil gruplarıyla değiştirerek bu polimerlerin özelliklerini değiştirir ve böylece hidrofobik hale gelirler (Zaman & Khan, 2021).



İşlem görmüş liflerin, işlem görmemiş muadillerine kıyasla daha az nem emdiği gösterilmiştir; asetilasyon sonrasında jüt liflerinde yaklaşık %50, çam liflerinde ise %65'e varan azalmalar bildirilmiştir (Gudayu et al., 2022). Bu özellik kritik öneme sahiptir çünkü aşırı nem emilimi, zamanla mekanik özelliklerin azalmasına ve kompozit malzemenin bozulmasına yol açabilir. Asetilasyonun bir sonucu olarak lif-matris yapışmasının da iyileştiği belirtilmiştir ve bu durum kompozitlerin genel mekanik performansına olumlu katkıda bulunmaktadır (Raj Mahendran et al., 2022).

Asetillenmiş liflerin mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileşme göstermektedir. Araştırmalar, asetilasyonun liflerin çekme ve eğilme dayanımlarını artırdığını ve lif-matris arayüzünde daha iyi gerilim transfer verimliliğini desteklediğini göstermektedir. Sisal, keten ve kenevir de dahil olmak üzere çeşitli lifler üzerinde yapılan çalışmalar, asetilasyonun nihai çekme dayanımını artırdığını ve Young modülünü iyileştirdiğini göstermektedir. (Kassegn et al., 2024; S. Singh & Kumar Gupta, 2023).

Ancak, asetilasyonun genel olarak özellikleri iyileştirdiği göz önünde bulundurulmalı; bu faydaların derecesi, lif tipine ve kullanılan asetilasyon koşullarına bağlı olarak değişebilir. Örneğin, aşırı veya yetersiz kontrol edilen asetilasyon, selüloz bütünlüğünü olumsuz etkileyerek lifin mekanik özelliklerinin bozulmasına yol açabilir. Çalışmalar, potansiyel zararlı etkileri azaltırken özellik iyileştirmelerini en üst düzeye çıkarmak için iyi optimize edilmiş bir asetilasyon sürecinin hayati önem taşıdığını göstermiştir (Guday et al., 2022; Nurazzi et al., 2021)

2.1.4. Benzoilasyon

Benzoilasyon, doğal bitki lifi takviyeli kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan bir kimyasal modifikasyon tekniğidir. Bu işlem tipik olarak liflerin benzoil klorür veya benzer bileşiklerle işlenmesini içerir ve çeşitli polimer matrislerle uyumluluğun artmasına neden olur. Çalışmalar, benzoilasyon işleminin doğal liflerin doğal hidrofiliğini etkili bir şekilde azalttığını, böylece mekanik performanslarını ve neme karşı dirençlerini iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.

Benzoilasyonun başlıca faydalarından biri, lifin kimyasal bileşiminin değiştirilmesidir; bu da mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Örneğin, benzoil klorür işlemi, liflerin balmumu, lignin ve hemiselüloz içeriğini azaltarak selüloz yüzdesinde önemli bir artışa yol açmıştır (Loganathan, 2020). Selüloz içeriğindeki bu artış, genellikle elde edilen kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımının artmasıyla ilişkilidir. Özellikle, benzoilasyon işleminin lifler ve polimer matrisler arasındaki arayüzey yapışmasını iyileştirdiği ve kompozit malzemelerin mekanik bütünlüğünü daha da güçlendirdiği belgelenmiştir (Ganesh et al., 2022; Mansingh et al., 2023). Benzoillenmiş liflerle güçlendirilmiş kompozitler, nemli koşullar altında bozulmayı önlemek için gerekli olan su emilimine karşı daha yüksek direnç gösterir (Sherwani et al., 2022).

Ancak, benzoilasyonun etkinliği, lif tipi ve işlem konsantrasyonu gibi belirli faktörlere bağlı olarak değişebilir. Örneğin, araştırmalar, optimum benzoilasyon işlem konsantrasyonlarının lifler ve polimer matrisi arasındaki uyumluluğu ve arayüzey yapışmasını artırdığını, aşırı işlemin ise lif bozulması nedeniyle mekanik özelliklerde azalmaya yol açabileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, benzoil klorür işlemi önemli iyileştirmeler sağlarken, hem mekanik hem de fiziksel özelliklerde daha da iyi sonuçlar elde etmek için genellikle diğer işlemlerle (alkali işlem gibi) birlikte değerlendirilir (Kenned et al., 2021)

2.1.5. Peroksit İşlemi

Peroksit işlemi, doğal bitki lifi içeren kompozitlerin özelliklerini iyileştirmek için önemli bir yöntemdir. Genellikle hidrojen peroksit veya benzoil peroksit kullanan bu teknik, liflerin kimyasal yapısını değiştirmeyi amaçlar; bu da polimer matrislerle uyumluluklarını büyük ölçüde etkileyebilir ve mekanik performans, termal özellikler ve nem direncinde iyileşmelere yol açabilir.

Peroksit işleminin başlıca etkilerinden biri, liflerdeki lignin ve hemiselüloz içeriğinin azaltılmasıdır. Çalışmalar, peroksit işleminin bu bileşenlerde belirgin bir azalmaya yol açtığını göstermiştir; bu durum, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi ile kanıtlanmıştır ve belirli fonksiyonel gruplarla ilişkili tepe yoğunluklarındaki düşüş yoluyla ligninin uzaklaştırıldığını göstermektedir (Wong & Chan, 2018). Ligninin uzaklaştırılması, doğal liflerdeki ana takviye edici madde olan selülozun moleküler yapısını önemli ölçüde geliştirir ve böylece kompozitlerin çekme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklerini iyileştirir (Kenned et al., 2021).

Ek olarak, peroksit işlemi, polimer matrislerle güçlü bir bağ elde etmek için çok önemli olan liflerin ıslanabilirliğini artırır. Geliştirilmiş ıslanabilirlik, polimer içinde liflerin daha iyi dağılmasına ve arayüzey etkileşiminin artmasına yol açarak kompozitlerin üstün mekanik özelliklerine neden olur. Bu olgu, gelişmiş arayüzey bağının doğrudan strese ve çevresel bozulmaya karşı performansı iyileştirdiğini belirtmişlerdir (Ekebafe, 2022).

2.2. Rami Lifinin Kompozitlerde Kullanımı

Rami lifinin kompozit malzemelere, özellikle PLA ve polietilen (PE) gibi polimer matrisli olanlara entegrasyonu, birçok önemli avantaj sunmaktadır. Yüksek çekme dayanımı, çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikleri ile bilinen rami, çeşitli uygulamalarda kompozitlerin genel performansını artırır. Rami lifinin kompozit malzemelere dahil edilmesinin başlıca avantajları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.2.1. Mekanik Özelliklerin İyileştirilmesi

Kompozitlere rami lifi eklemenin en önemli avantajlarından biri, mekanik özelliklerin önemli ölçüde iyileştirilmesidir. Rami lifleri, çekme dayanımını ve modülünü artırarak kompozit yapıları stabilize eder. Araştırmalar, rami liflerinin ağırlıklı olarak selülozdan oluştuğunu, tipik olarak %68-76 selüloz içerdiğini ve bunun yüksek mekanik performanslarına katkıda bulunduğunu göstermektedir; bu da jüt ve sisal gibi diğer bazı doğal liflere

kiyasla üstün çekme özelliklerini göstermektedir (Behera, 2024; Thiyaçu & Narendrakumar, 2022).

2.2.2. Çevresel Sürdürülebilirlik

Kompozitlere rami liflerinin eklenmesi, malzeme biliminde sürdürülebilirliğe katkıda bulunur. Doğal bir lif olan rami, biyolojik olarak parçalanabilir ve kullanımı, çevre kirliliğine katkıda bulunan sentetik malzemelere olan bağımlılığı azaltmaya yardımcı olur (Behera, 2024). Rami liflerinden yapılan kompozitler geri dönüştürülebilir ve minimum çevresel etkiyle üretilebilir, bu da onları otomotiv ve inşaat gibi sektörlerde çevre dostu uygulamalar için uygun hale getirir. Rami liflerinin kullanımı, inşaat ve imalatla daha çevreci malzemelere yönelik çabalarla uyumludur, çünkü bu lifler yenilenebilir kaynaklardan elde edilirken iyi performans özellikleri sergiler. Çalışmalar, rami gibi doğal liflerin biyopolimer matrislere dahil edilmesinin, kompozit üretiminde ortaya çıkan karbon ayak izini azalttığı belirtilmiştir (Molla et al., 2024).

2.2.3. Termal Özelliklerin İyileştirilmesi

Rami lifi kompozitleri, sentetik muadillerine kıyasla daha yüksek termal kararlılık sergiler. Doğal lifler, daha düşük termal genişlemeye katkıda bulunur ve termal kararlılığın kritik olduğu uygulamalarda ısı direncini etkili bir şekilde yönetmeye olanak tanır. Araştırmalar, rami lifinin doğal özelliklerinin, sıcaklık değişimlerini etkili bir şekilde yalıtıma ve yönetmeye yardımcı olabileceğini ve bu kompozitleri otomotiv bileşenleri ve yapı malzemeleri için mükemmel adaylar haline getirdiğini göstermiştir. Dahası, rami lifleri özellikle sıcaklık değişimleri altında boyutsal kararlılıklarını koruyarak, termal yönetim gerektiren uygulamalarda uygunluklarını vurgulamaktadır (Molla et al., 2024; Sevak et al., 2024).

2.2.4. Ağırlığı Azaltma

Kompozitlere rami liflerinin eklenmesi, düşük yoğunlukları nedeniyle toplam ağırlığı azaltır; bu da, yapısal bütünlükten ödün vermeden ağırlığı azaltmanın kritik olduğu otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki uygulamalar için önemli bir avantajdır. Daha hafif malzemeler, otomotiv uygulamalarında yakıt verimliliğini artırır ve havacılık tasarımlarında performansı iyileştirir (Yu et al., 2018).

2.2.5. Neme Dayanıklılık ve Uzun Ömürlülük

Doğal lifler yüksek su emme özelliğine sahipken, rami liflerinin kimyasal modifikasyonlarla işlenmesi nem direncini artırabilir ve böylece

nemli koşullarda şişme ve bozulmayla ilgili sorunları en aza indirebilir. Özellikle alkali veya silikat çözeltileri gibi işlemlerle güçlendirilmiş rami lifi kompozitleri, su girişine karşı daha iyi dayanıklılık göstererek, değişen çevresel koşullara maruz kalan uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabilir (Pratiwi et al., 2025; Syifa et al., 2021).

Araştırmalar, doğru işlemin su emme oranlarını önemli ölçüde azaltabileceğini ve doğal elyaf kompozitlerle ilgili temel zorlukların üstesinden gelebileceğini göstermiştir (Parai et al., 2023). Ek olarak, rami elyaf kompozitleri, diğer doğal elyaflara kıyasla neme maruz kaldıktan sonra genellikle daha yüksek mekanik özelliklerini koruyarak zorlu ortamlarda işlevsel dayanıklılık sağlar (Tezara et al., 2021)

3. Kompozitlerin Üretimi ve Ölçümler

Doğal bitkisel lif takviyeli polimer kompozitlerde su emilimi ve zayıf elyaf-matris bağının yarattığı zorlukların giderilmesinde temel olarak elyafa yüzey modifikasyon işlemleri uygulanır. Bu işlemlerin temel amacı, doğal elyafların hidrofobikliğini artırmak ve polimer matrislerle uyumluluklarını iyileştirmektir. Elyaf yüzeyini değiştirerek, bu işlemler nem emilimini azaltır, matris içindeki elyaf dağılımını iyileştirir ve arayüzey bağını güçlendirir; sonuç olarak daha iyi mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahip kompozitler elde edilir (Kamarudin et al., 2022; Nurazzi et al., 2021).

Alkali işlemi, lignin ve hemiselüloz gibi safsızlıkları uzaklaştırarak, sadece selülozu daha iyi matris bağlaması için açığa çıkarmakla kalmaz, aynı zamanda hidrofilik bölgeleri azaltarak nem emilimini de düşürür (Raspolli Galletti & Antonetti, 2012). Silan işlemi, lif yüzeyi ile polimer matrisi arasında kimyasal bağlar oluşturarak uyumluluğu artırır ve su girişini daha da azaltır. (Kumar & Singh, 2023)

3.1. Numunelerin Üretimi

Kompozit üretiminde kullanılacak rami lifi, PLA bağlayıcı ve yüzey işlemleri için alkali (NaOH) ve silan (SiH_4) temin edildi. Daha sonra rami lifi ile PLA matris arasındaki yapışmayı artırmak için kimyasallarla sırasıyla yüzey modifikasyon işlemleri yapılmıştır. Daha sonra numune üretimi gerçekleştirilmiştir

3.1.1. Alkali İşlemi

Doğal liflerin ana bileşeni kristal selülozdur. Ayrıca hemiselüloz, lignin ve mumsu maddeler de içerir. Bununla birlikte, lignin ve hemiselüloz zamanla bozulabilir. Bu nedenle, kompozitin uzun vadeli stabilitesini artırmak

ve arayüzey bağıny iyileştirmek için alkali lif işlemleri kullanılabilir. Esas olarak ksilan, poliüronid ve heksozandan oluştuğı düşünölen hemiselöloz, α -selöloz üzerinde yalnızca hafif bir etki gösteren kostik sodanın etkisine karşı çok hassastır. Bu nedenle, NaOH ile yapılan alkali lif işlemleri, lignin, pektin ve hemiselölozları uzaklaştırarak ve böylece lif yüzeyine pürüzlü bir doku kazandırarak doğal liflerin yapışma özelliklerini iyileştirebilir. Pürüzlü ve temiz lif yüzeyi, mekanik kenetlenmeyi kolaylaştırır ve reçine matrisi ile ıslatma yeteneğini geliştirir.

Rami lifi, su içinde %5'lik NaOH çözeltisi kullanılarak 30 dakika boyunca alkali çözeltiye batırıldı. Daha sonra, alkali işlem görmüş lifler, tüm sodyum hidroksit giderilene ve suyun pH' 1 7'ye eşit olana kadar damıtılmış su ile yıkandı. Yıkamış lifler daha sonra 70 °C'de 24 saat boyunca fırında kurutuldu.

3.1.2. Silan İşlemi

Doğal liflerin yaygın kullanımını sınırlayan en büyük zorluk, hidrofilik yapılarıdır. Bu özellik, hidrofobik bir matrise (polimerik yapıda) yapışmayı etkiler ve ortaya çıkan kompozit malzemenin mekanik özelliklerini azaltır. Bu nedenle, önemli bir kimyasal modifikasyon yöntemi kimyasal bağlama yöntemidir. Bu yöntem, arayüzey yapışmasını iyileştirir. Lif yüzeyi, lif ile matris arasında kimyasal bağ köprüsü oluşturan bir bileşik ile işlenir.

Silan bağlayıcı maddeler, bir ucu matrisle etkileşime girebilen ve diğer ucu hidrofilik lifle reaksiyona girebilen, farklı fonksiyonel gruplara bağı bir silikon atomuna sahip hidrofilik bileşiklerdir ve bu da aralarında bir köprü görevi görür.

Bağlayıcı ajandaki fonksiyonel organik grup, polimerle reaksiyona neden olur. Alkoksisilanlar ve lif yüzeyi arasında bağların oluşmasına yol açan genel bir mekanizma meydana gelir. Alkoksisilan önce aktif silanol grupları oluşturmak üzere hidrolize edilir; bu gruplar diğer silanol gruplarıyla yoğunlaşarak siloksan bağları (oligomerler) oluşturabilir. Oligomerler daha sonra substratın OH gruplarıyla hidrojen bağı oluşturur.

Son olarak, kurutma veya kütleme sırasında, su kaybıyla birlikte substratla kovalent bir bağ oluşur. Silan işlemlerinin etkisini değerlendirmek için, rami lifleri, etanol ve suda %5 oranında silan bağlayıcı madde (silan ağırlığının rami lifinin ağırlığına oranı) içeren çözeltiler kullanılarak işlendi. Yeterli miktarda silan, önceden oda sıcaklığında 1 saat boyunca %80/20 hacim oranında etanol/su çözeltisinde ön hidrolize edildi. Bu sürenin ardından, lifler, hidrolize edilmiş silan çözeltisine 1 saat süreyle batırıldı. Daha sonra lifler, 70 °C'de 24 saat boyunca fırında kurutuldu.

3.1.3. Kompozitlerin Hazırlanması

Rami lifi içerikli PLA kompozitlerin üretimindeki ağırlıkça karışım oranları aşağıdaki Tablo 1’ de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kompozitlerin üretim oranları.

Numune kodu	Rami lifi oranı (%)	PLA oranı (%)	Kimyasal işlem
R15	15	85	Yok
R25	25	75	Yok
R15C	15	85	Var
R25C	25	25	Var

Hazırlanan farklı karışımlar sırasıyla kalıba döküldükten 4 bar basınç altında 2 saat tutulduktan sonra 12 saat boyunca 60 °C’ de fırında kurutuldu.

3.2. Su Emilimi ve Darbe Dayanımı Ölçümleri

Dört farklı kompozit numunesinin farklı gün sayılarına göre su emme yüzdeleri Şekil 2’ de gösterilmiştir.

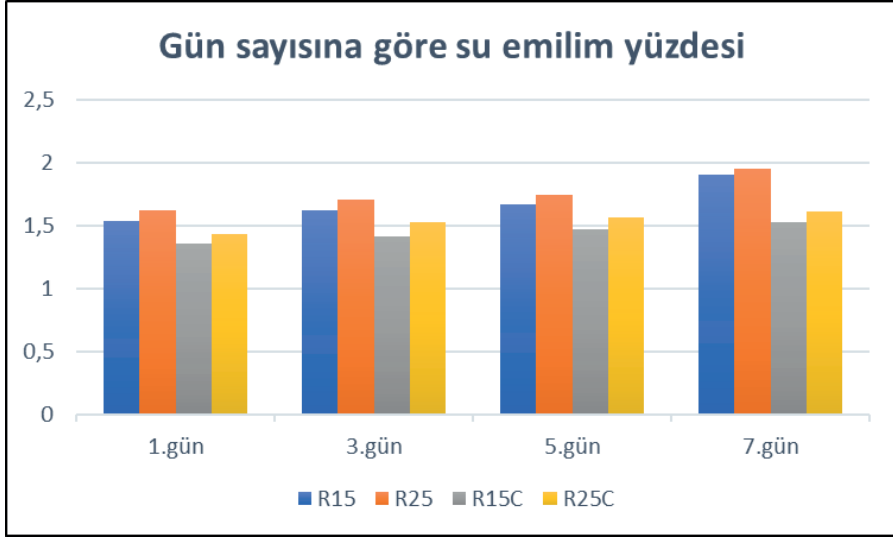
Öncelikli numuneler 60 °C’de 5 saat boyunca elektrikli fırında kurutulmuş ve ardından oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonra numuneler, hassas terazide ölçülmüştür. PLA’ nın yapısı nedeniyle numunelerde belirgin ve ölçümlenebilir bir şişme görülmemiştir. Doygunluğa ulaşana kadar oda sıcaklığında bir su banyosuna daldırılmıştır. 1, 3, 5 ve 7 gün süreyle su emilimindeki değişim incelenmiştir. Her zaman döngüsünden sonra, numunelerin yüzeyindeki su temiz ve kuru bir bezle kurutulmuş ve ardından numuneler tartılmıştır.

$$SE \% = \frac{A_e - A_i}{A_i} \times 100 \quad (5)$$

Formülde SE % su emilim yüzdesini ifade ederken, A_e emilim sonrası malzeme ağırlığı ve A_i kompozitin ilk kuru ağırlığını ifade etmektedir.

Kimyasal işlem içermeyen numunelerde su emilimi içerenlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. İşlem görmemiş liflerin yüzeyinde, suya yüksek afiniteye sahip hidroksit grupları bulunur. Bu nedenle, işlem görmemiş liflerin su emme yüzdeleri, lif yüzeyindeki hidroksil gruplarını ortadan kaldıran alkali işlem görmüş kompozitlere göre daha yüksektir (Ling & Kwan, 2018). Silanın eklenmesi, lif ve matris arasında daha iyi bir arayüz etkileşimi

sağladığından, su yüzeyden kompozitlerin içine kolayca yayılamaz. Başka bir deyişle, alkali ve silan işlemleri içermeyen kompozit, lif ve matris arasında zayıf yapışma göstermiştir. Sonuç olarak, su zayıf arayüzlü kompozit yapının yüzeyinden içine kolayca yayılabilir (Pang et al., 2018).

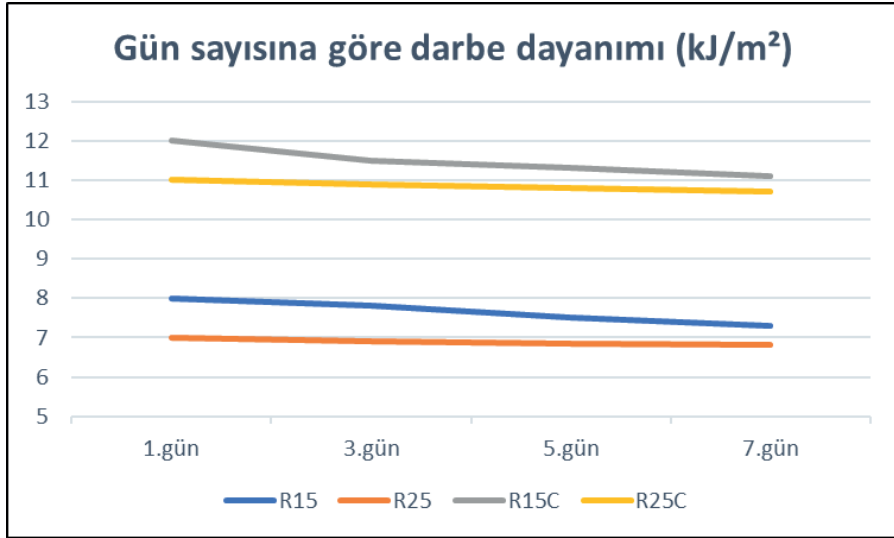


Şekil 2. Gün sayısına göre su emilimindeki değişim.

Zayıf arayüzey bağı, suyun yüzeyden kompozitin içine kolayca geçmesine ve liflerin şişmesine neden olur. Bu durum, kompozitin kılcal etkisini artırmak için bir tetikleyici olacaktır. Beklendiği gibi, alkali ve silan işlemi gören R15C kompoziti, daha düşük lif içeriği ve kimyasal işleme sahip olduğu için en düşük su alım davranışını göstermiştir. Bu, iyi yapışma lifi ve matrisin, suyun kompozitin yüzeyinden içine difüzyonunun yavaşlamasına neden olmasıyla açıklanmaktadır. Kimyasal işlemin olmadığı durumda doğal liflerin hidrofilik karakteri kompozitlerdeki su alımından sorumludur, bu nedenle, lifler üzerindeki daha yüksek oran, daha yüksek miktarda su emilimine neden olur.

Şekil 3' deki veriler incelendiğinde, kimyasal işlem yapılmış kompozitlerin darbe dayanımı, yapılmamış olanlara göre daha yüksek çıkmıştır. Su emiliminden sonra darbe dayanımındaki azalma, kılcal etki ve şişen liflerin bozulmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, lif yüzeyindeki selüloz ve hemiselülozun suyun difüzyonunu hızlandırdığı bilinmektedir (Agrebi et al., 2020). Rami liflerinde su emilimi ile birlikte oluşan şişmeye bağlı bozulmalar meydana gelmiştir. Ayrıca lif ve matris arasında oluşan boşluklar matristen yük

transferini engelleyerek mekanik özelliklerin azalmasına neden olur. Su emiliminden sonra en iyi darbe dayanımı R15C numunesinde görülmüştür.



Şekil 3. Gün sayısına göre darbe dayanımındaki değişim.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada rami / PLA biyokompozitlerinde alkali ve silan işleminin su emilimine etkisi araştırılmıştır. Üretilen bu kompozitlerin mekanik dayanım gerektirmeyen otomotiv iç yalıtımı ve kapı izolatörü olarak kullanılabileceği düşünülmektedir. Uzun süre su emilimine maruz kalan kompozitlerin darbe dayanımında azalma olduğundan dolayı, uzun süreli suya maruz bırakılmamalıdır. R15C numunesi, en düşük su emilimi göstermiş, bundan dolayı da dayanımdaki azalma diğer numunelere göre düşük seviyede kalmıştır.

- Doğal bitkisel lif içerikli kompozitler geleneksel sentetik içerikli kompozitlere göre sürdürülebilir bir alternatif olmaları nedeniyle giderek üreticiler tarafından daha fazla kabul görmektedir. Rami benzeri lifler düşük yoğunluk ve maliyetin yanında aynı zamanda iyi mekanik özellikler sunmaları avantajlarıdır.
- Çalışmada incelenen su emilimi özellikleri, rami lifinin kompozitlerde kullanımının dezavantajının hidrofil yapısı olduğunu göstermektedir. Bu yapı hem su emilimini artırmakta, matris ile arayüz bağlantısını

zayıflatmakta, aynı zamanda nem emilimine bağlı şişme ile kompozit yapısının dayanıklılığını azaltabilmektedir.

- Rami lifinin kullanımının dezavantajları çeşitli yüzey modifikasyon işlemleri ile azaltılabilmekte, bu durum avantajlı yönlerini ön plana çıkarmaktadır. Böylece doğal bitkisel lif içerikli kompozitlere olan ilgi artmakta ve bu malzemeler üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır.

Kaynakça

- Agrebi, F., Hammami, H., Asim, M., Jawaïd, M., & Kallel, A. (2020). Impact of silane treatment on the dielectric properties of pineapple leaf/kenaf fiber reinforced phenolic composites. *Journal of Composite Materials*, 54(7), 937–946. <https://doi.org/10.1177/0021998319871351>
- Arbelaiz, A., Txueka, U., Mezo, I., & Orue, A. (2022). Biocomposites Based on Poly(Lactic Acid) Matrix and Reinforced with Lignocellulosic Fibers: The Effect of Fiber Type and Matrix Modification. *Journal of Natural Fibers*, 19(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1726247>
- Barari, B., Omrani, E., Dorri Moghadam, A., Menezes, P. L., Pillai, K. M., & Rohatgi, P. K. (2016). Mechanical, physical and tribological characterization of nano-cellulose fibers reinforced bio-epoxy composites: An attempt to fabricate and scale the ‘Green’ composite. *Carbohydrate Polymers*, 147, 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.097>
- Behera, B. K. (2024). Mechanical, viscoelastic, and biodegradability characteristics of ramie fibre-reinforced acrylonitrile butadiene styrene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(22), e55448. <https://doi.org/10.1002/app.55448>
- Cheng, L., Duan, S., Zheng, K., Feng, X., Yang, Q., Liu, Z., Liu, Z., & Peng, Y. (2019). An alkaline pectate lyase D from *Dickeya dadantii* DCE-01: Clone, expression, characterization, and potential application in ramie bio-degumming. *Textile Research Journal*, 89(11), 2075–2083. <https://doi.org/10.1177/0040517518790971>
- Cheng, L., Wang, Q., Feng, X., Duan, S., Yang, Q., Zheng, K., Liu, Z., Liu, Z., & Peng, Y. (2018). Screening a bacterium and its effect on the biological degumming of ramie and kenaf. *Scientia Agricola*, 75(5), 375–380. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0108>
- Choi, H. Y., & Lee, J. S. (2012). Effects of surface treatment of ramie fibers in a ramie/poly(lactic acid) composite. *Fibers and Polymers*, 13(2), 217–223. <https://doi.org/10.1007/s12221-012-0217-6>
- Chokshi, S., Parmar, V., Gohil, P., & Chaudhary, V. (2022). Chemical Composition and Mechanical Properties of Natural Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 19(10), 3942–3953. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848738>
- De Azevedo, A., Cruz, A., Marvila, M., De Oliveira, L., Monteiro, S., Vieira, C., Fediuk, R., Timokhin, R., Vatin, N., & Daironas, M. (2021). Natural Fibers as an Alternative to Synthetic Fibers in Reinforcement of Geopolymer Matrices: A Comparative Review. *Polymers*, 13(15), 2493. <https://doi.org/10.3390/polym13152493>
- Dilfi, A. K. F., Balan, A., Bin, H., Xian, G., & Thomas, S. (2018). Effect of surface modification of jute fiber on the mechanical properties and durabi-

- lity of jute fiber-reinforced epoxy composites. *Polymer Composites*, 39(S4). <https://doi.org/10.1002/pc.24817>
- Ding, J., Zhou, C., & Dong, Z. (2023). Trend of ramie industry development: A review of green degumming and the utilization of processing residues. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135487. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135487>
- Ekebafé, L. (2022). Improving the dispersion and reinforcing properties of peroxidated corn stover and sugarcane bagasse fibers in natural rubber compounds. *Proceedings of the Nigerian Academy of Science*, 15(1). <https://doi.org/10.57046/ZMAD4158>
- Elfaleh, I., Abbassi, F., Habibi, M., Ahmad, F., Guedri, M., Nasri, M., & Garnier, C. (2023). A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering*, 19, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101271>
- Ez-Zahraoui, S., Semlali Aouragh Hassani, F.-Z., El Achaby, M., Qaiss, A. E. K., & Bouhfid, R. (2023). Natural fiber reinforcements: Classification, extraction, treatment, and properties. In *Multiscale Textile Preforms and Structures for Natural Fiber Composites* (pp. 3–29). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95329-0.00004-1>
- Fan, P., He, F., Yang, Y., Ao, M., Ouyang, J., Liu, Y., & Yu, L. (2015). In-situ microbial degumming technology with *Bacillus* sp. HG-28 for industrial production of ramie fibers. *Biochemical Engineering Journal*, 97, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.12.010>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Fathi, B., Foruzanmehr, M., Elkoun, S., & Robert, M. (2019). Novel approach for silane treatment of flax fiber to improve the interfacial adhesion in flax/bio epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 53(16), 2229–2238. <https://doi.org/10.1177/0021998318824643>
- Fatona, A., Berry, R. M., Brook, M. A., & Moran-Mirabal, J. M. (2018). Versatile Surface Modification of Cellulose Fibers and Cellulose Nanocrystals through Modular Triazinyl Chemistry. *Chemistry of Materials*, 30(7), 2424–2435. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00511>
- Fuqua, M. A., Huo, S., & Ulven, C. A. (2012). Natural Fiber Reinforced Composites. *Polymer Reviews*, 52(3), 259–320. <https://doi.org/10.1080/15583724.2012.705409>
- Ganesh, S., Keerthiveetil Ramakrishnan, S., Palani, V., Sundaram, M., Sankaranarayanan, N., & Ganesan, S. P. (2022). Investigation on the mechanical properties of ramie/kenaf fibers under various parameters using GRA

- and TOPSIS methods. *Polymer Composites*, 43(1), 130–143. <https://doi.org/10.1002/pc.26362>
- Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55(3), 829–892. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- Gudayu, A. D., Steuernagel, L., Meiners, D., & Woubou, A. M. (2022). Sisal fiber reinforced polyethylene terephthalate composites; Fabrication, characterization and possible application. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 09673911221103317. <https://doi.org/10.1177/09673911221103317>
- Ismail, N. F., Mohd Radzuan, N. A., Sulong, A. B., Muhamad, N., & Che Haron, C. H. (2021). The Effect of Alkali Treatment on Physical, Mechanical and Thermal Properties of Kenaf Fiber and Polymer Epoxy Composites. *Polymers*, 13(12), 2005. <https://doi.org/10.3390/polym13122005>
- Jamilah, U. L., & Sujito, S. (2021). THE IMPROVEMENT OF RAMIE FIBER PROPERTIES AS COMPOSITE MATERIALS USING ALKALIZATION TREATMENT: NaOH CONCENTRATION. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 22(2), 62. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2021.22.3.6182>
- Jiang, W., Song, Y., Liu, S., Ben, H., Zhang, Y., Zhou, C., Han, G., & Ragauskas, A. J. (2018). A green degumming process of ramie. *Industrial Crops and Products*, 120, 131–134. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.045>
- Kamarudin, S. H., Mohd Basri, M. S., Rayung, M., Abu, F., Ahmad, S., Norizan, M. N., Osman, S., Sarifuddin, N., Desa, M. S. Z. M., Abdullah, U. H., Mohamed Amin Tawakkal, I. S., & Abdullah, L. C. (2022). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers*, 14(17), 3698. <https://doi.org/10.3390/polym14173698>
- Kassegn, E., Sirhabizu, B., Berhanu, T., Buffel, B., & Desplentere, F. (2024). Influence of fiber surface treatment on the mechanical properties of sisal fiber reinforced polylactic acid bio-composites. *Composites and Advanced Materials*, 33, 26349833241275700. <https://doi.org/10.1177/26349833241275700>
- Kenned, J. J., Sankaranarayanan, K., & Kumar, C. S. (2021). Chemical, biological, and nanoclay treatments for natural plant fiber-reinforced polymer composites: A review. *Polymers and Polymer Composites*, 29(7), 1011–1038. <https://doi.org/10.1177/0967391120942419>
- Khoo, P. S., Hassan, S. A., Ilyas, R. A., Loganathan, T. G., Adhiguna, R. T., Reby Roy, K. E., & Mubarak Ali, M. (2023). Tensile properties of ramie fibre: Effect of harvesting day and extraction method. *Materials Today: Proceedings*, S221478532302148X. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.247>

- Krishnasamy, P., Rajamurugan, G., Muralidharan, B., & Krishnaiah, R. (2022). General practice to enhance bast fiber composite properties for state of art applications – A Review. *Engineering Research Express*, 4(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac49d7>
- Kumar, A., & Singh, A. (2023). Mechanical Characterization of Pineapple Leaf Fiber Epoxy Composites with Steel Wire Mesh. *Key Engineering Materials*, 960, 205–217. <https://doi.org/10.4028/p-cpZe1o>
- Li, Z., Li, Z., Ding, R., & Yu, C. (2016). Composition of ramie hemicelluloses and effect of polysaccharides on fiber properties. *Textile Research Journal*, 86(5), 451–460. <https://doi.org/10.1177/0040517515592811>
- Li, Z., & Yu, C. (2015). The effect of oxidation–reduction potential on the degumming of ramie fibers with hydrogen peroxide. *The Journal of The Textile Institute*, 106(11), 1251–1261. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.985889>
- Ling, S. K., & Kwan, A. K. H. (2018). Filler technology for low-carbon high-dimensional stability concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.083>
- Liu, T., Tang, S., Zhu, S., & Tang, Q. (2014). QTL mapping for fiber yield-related traits by constructing the first genetic linkage map in ramie (*Boehmeria nivea* L. Gaud). *Molecular Breeding*, 34(3), 883–892. <https://doi.org/10.1007/s11032-014-0082-7>
- Liu, X., Yi, X., & Zhu, J. (2018). Bio-based epoxies and composites as environmentally friendly alternative materials. In *Thermosets* (pp. 621–637). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00019-8>
- Loganathan, G. B. (2020). Influence of benzoyl chloride treatment on the tribological characteristics of *Cyperus pangorei* fibers based non-asbestos brake friction composites. *Materials Research Express*, 7(1), 015303. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab54f1>
- Mansingh, B. B., Binoj, J. S., Siengchin, S., & Sanjay, M. R. (2023). Influence of surface treatment on properties of *Cocos nucifera* L. *Var typica* fiber reinforced polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(3), e53345. <https://doi.org/10.1002/app.53345>
- Mao, K., Chen, H., Qi, H., Qiu, Z., Zhang, L., & Zhou, J. (2019). Visual degumming process of ramie fiber using a microbial consortium RAMCD407. *Cellulose*, 26(5), 3513–3528. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02288-1>
- Meng, C., Li, Z., Wang, C., & Yu, C. (2017). Sustained-release alkali source used in the oxidation degumming of ramie. *Textile Research Journal*, 87(10), 1155–1164. <https://doi.org/10.1177/0040517516648512>

- Meng, C., Liu, F., Li, Z., & Yu, C. (2016). The cellulose protection agent used in the oxidation degumming of ramie. *Textile Research Journal*, 86(10), 1109–1118. <https://doi.org/10.1177/0040517515606358>
- Meng, C., Zhong, N., Hu, J., Yu, C., & Saddler, J. N. (2019). The effects of metal elements on ramie fiber oxidation degumming and the potential of using spherical bacterial cellulose for metal removal. *Journal of Cleaner Production*, 206, 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.072>
- Molla, A., Moyeen, A. A., Mashfiqua Mahmud, R., & Haque, Md. J. (2024). Plant fiber-reinforced green composite: A review on surface modification, properties, fabrications and applications. *Materials Open Research*, 3, 6. <https://doi.org/10.12688/materialsopenres.17651.1>
- Montreuil, A., Mertz, G., Bardon, J., Guillot, J., Grysan, P., & Addiego, F. (2024). Flax fiber treatment by an alkali solution and poly(dopamine) coating: Effects on the fiber physico-chemistry and flax/Elum® composite interfacial properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 177, 107963. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107963>
- Mu, W., Chen, X., Li, S., Sun, Y., Wang, Q., & Na, J. (2023). Mechanical Performances Analysis and Prediction of Short Plant Fiber-Reinforced PLA Composites. *Polymers*, 15(15), 3222. <https://doi.org/10.3390/polym15153222>
- Mudi, C., & Shaw, A. (2025). Investigations on the Mechanical Performance and Durability of Ramie Fibers Under Various Environmental Conditions. *Journal of Natural Fibers*, 22(1), 2433043. <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2433043>
- Mudoi, M. P., Sinha, S., & Parthasarthy, V. (2024). Himalayan nettle fibre-reinforced polymer composite: A physical, mechanical, and thermal analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(23), 30415–30434. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04819-0>
- Nurazzi, N. M., Harussani, M. M., Aisyah, H. A., Ilyas, R. A., Norraahim, M. N. F., Khalina, A., & Abdullah, N. (2021). Treatments of natural fiber as reinforcement in polymer composites—A short review. *Functional Composites and Structures*, 3(2), 024002. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/abff36>
- Omrani, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 717–736. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.10.007>
- Pang, A. L., Ismail, H., & Abu Bakar, A. (2018). Eco-friendly coupling agent-treated kenaf/linear low-density polyethylene/poly (vinyl alcohol) composites. *Iranian Polymer Journal*, 27(2), 87–96. <https://doi.org/10.1007/s13726-017-0588-z>

- Parai, D., Gautam, V., Upadhyay, V., & Misra, J. P. (2023). *A Study on Water Absorption Behavior of Jute and Ramie Hybrid Composites with and without SiC Filler*. 28–36. <https://doi.org/10.21467/proceedings.161.4>
- Prabhu, L., Krishnaraj, V., Sathish, S., GokulKumar, S., & Karthi, N. (2020). Study of mechanical and morphological properties of jute-tea leaf fiber reinforced hybrid composites: Effect of glass fiber hybridization. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2372–2375. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.132>
- Prabhu, R., Mendonca, S., D'Souza, R., & Bhat, T. (2022). Effect of Water Absorption on the Mechanical Properties of Alkaline Treated Bamboo and Flax Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Trends in Sciences*, 19(18), 5779. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.5779>
- Pratiwi, H., Kusmono, K., & Wildan, M. W. (2025). The Effect of Sodium Hydroxide and Oxalic Acid Treatments on Water Absorption, Thickness Swelling, and Hardness of Polyester/Ramie Fiber Composites. *Solid State Phenomena*, 372, 33–39. <https://doi.org/10.4028/p-Cj3XII>
- Qi, H., Chen, H., Mao, K., Qiu, Z., Zhang, L., & Zhou, J. (2019). Investigation of the structure of ramie fibers by enzymatic peeling. *Cellulose*, 26(5), 2955–2968. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02309-z>
- Raj Mahendran, A., Wuzella, G., Pichler, S., & Lammer, H. (2022). Properties of Different Chemically Treated Woven Hemp Fabric Reinforced Bio-Composites. *Journal of Renewable Materials*, 10(6), 1505–1516. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017835>
- Raspolli Galletti, A. M., & Antonetti, C. (2012). 5 Biomass pretreatment: Separation of cellulose, hemicellulose, and lignin – existing technologies and perspectives. In M. Aresta, A. Dibenedetto, & F. Dumeignil (Eds.), *Biorefinery* (pp. 101–122). DE GRUYTER. <https://doi.org/10.1515/9783110260281.101>
- Ridzuan, M. J. M., Abdul Majid, M. S., Hafis, S. M., & Azduwin, K. (2017). The effects of alkali treatment on the mechanical and morphological properties of *Pennisetum purpureum* /glass-reinforced epoxy hybrid composites. *Plastics, Rubber and Composites*, 46(10), 421–430. <https://doi.org/10.1080/14658011.2017.1368966>
- Rizal, S., Ikramullah, Gopakumar, D. A., Thalib, S., Huzni, S., & Abdul Khalil, H. P. S. (2018). Interfacial Compatibility Evaluation on the Fiber Treatment in the Typha Fiber Reinforced Epoxy Composites and Their Effect on the Chemical and Mechanical Properties. *Polymers*, 10(12), 1316. <https://doi.org/10.3390/polym10121316>
- Salim, M. S., Mohd Ishak, Z. A., Ariawan, D., & Thirmizir, M. Z. A. (2015). Effect of Alkaline Treatment to Wettability and Flexural Properties of Kenaf Nonwoven Fibre Mat Reinforced Epoxy Composites Produced

- by Resin Transfer Moulding. *Applied Mechanics and Materials*, 754–755, 99–105. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.99>
- Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., & Yogesha, B. (2015). Study on Mechanical Properties of Natural - Glass Fibre Reinforced Polymer Hybrid Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2959–2967. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.264>
- Sassoni, E., Manzi, S., Motori, A., Montecchi, M., & Canti, M. (2014). Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, 77, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.033>
- Sathish, S., Kumaresan, K., Prabhu, L., Gokulkumar, S., Karthi, N., & Vigneshkumar, N. (2020). Experimental investigation of mechanical and morphological properties of flax fiber reinforced epoxy composites incorporating SiC and Al₂O₃. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2249–2253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.106>
- Sathish, T., Palani, K., Natrayan, L., Merneedi, A., De Poures, M. V., & Singaravelu, D. K. (2021). Synthesis and Characterization of Polypropylene/Ramie Fiber with Hemp Fiber and Coir Fiber Natural Biopolymer Composite for Biomedical Application. *International Journal of Polymer Science*, 2021, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2021/2462873>
- Sayeed, M. M. A., & Paharia, A. (2019). Optimisation of the surface treatment of jute fibres for natural fibre reinforced polymer composites using Weibull analysis. *The Journal of The Textile Institute*, 110(11), 1588–1595. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1610998>
- Sevak, R. V., Burela, R. G., Arora, G., & Gupta, A. (2024). Microwave-assisted fabrication of high-strength natural fiber hybrid composites for sustainable applications: An experimental and computational study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 14644207241269567. <https://doi.org/10.1177/14644207241269567>
- Shen, M., Wang, L., Chen, F., Long, J.-J., & Rui, Y.-N. (2015). Effect of low-temperature oxygen plasma on the degumming of ramie fabric. *Journal of Cleaner Production*, 92, 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.054>
- Shen, M., Wang, L., & Long, J.-J. (2015). Biodegumming of ramie fiber with pectinases enhanced by oxygen plasma. *Journal of Cleaner Production*, 101, 395–403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.081>
- Sherwani, S., Sapuan, S., Leman, Z., Zainudin, E., & Khalina, A. (2022). Effect of alkaline and benzoyl chloride treatments on the mechanical and morphological properties of sugar palm fiber-reinforced poly(lactic acid) composites. *Textile Research Journal*, 92(3–4), 593–607. <https://doi.org/10.1177/00405175211041878>

- Shi, S., Yang, C., & Nie, M. (2017). Enhanced Interfacial Strength of Natural Fiber/Polypropylene Composite with Mechanical-Interlocking Interface. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 10413–10420. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02448>
- Singh, A., Varghese, L. M., Battan, B., Patra, A. K., Mandhan, R. P., & Mahajan, R. (2020). Eco-friendly scouring of ramie fibers using crude xylano-pectinolytic enzymes for textile purpose. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(6), 6701–6710. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07424-9>
- Singh, S., & Kumar Gupta, P. (2023). Natural Fiber-Reinforced Polymer Composite: A Review. In A. Patnaik, A. Cavaleiro, M. K. Banerjee, E. Kozeschnik, & V. Kukshal (Eds.), *Manufacturing and Processing of Advanced Materials* (pp. 141–153). BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS. <https://doi.org/10.2174/9789815136715123010016>
- Sun, Z. (2019). Hyperbranched Polymers in Modifying Natural Plant Fibers and Their Applications in Polymer Matrix Composites—A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(32), 8715–8724. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b03436>
- Suriyaprakash, M., Nallusamy, M., Shri Ram Shanjai, K., Akash, N., & Rohith, V. (2023). Experimental investigation on mechanical properties of Ramie, Hemp fiber and coconut shell particle hybrid composites with reinforced epoxy resin. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2952–2956. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.091>
- Syifa, N. H., Yulianto, A., & Nurbaiti, U. (2021). Pembuatan dan Karakterisasi Sifat Fisis Komposit Multilayer Serat Rami. *Jurnal Pendidikan Fisika Dan Teknologi*, 7(2), 87–95. <https://doi.org/10.29303/jpft.v7i2.2783>
- Tezara, C., Hadi, A. E., Siregar, J. P., Muhamad, Z., Hamdan, M. H. M., Oumer, A. N., Jaafar, J., Irawan, A. P., Rihayat, T., & Fitriyana, D. F. (2021). The Effect of Hybridisation on Mechanical Properties and Water Absorption Behaviour of Woven Jute/Ramie Reinforced Epoxy Composites. *Polymers*, 13(17), 2964. <https://doi.org/10.3390/polym13172964>
- Thiyagu, C., & Narendrakumar, U. (2022). Vibrational analysis of glass/ramie fiber reinforced hybrid polymer composite. *Polymer Composites*, 43(3), 1395–1406. <https://doi.org/10.1002/pc.26460>
- Vishal, K., Rajkumar, K., Sabarinathan, P., & Arun, A. (2023). Mechanical and thermal characteristics of steam-exploded silane grafted Kigelia Pinnata fruit fiber reinforced vinyl ester polymer composites. *Polymer Composites*, 44(8), 4862–4878. <https://doi.org/10.1002/pc.27449>
- Wan Ramli, W. M. A., Abdul Majid, M. S., Ridzuan, M. J. M., Sultan, M. T. H., Amin, N. A. M., & Gibson, A. G. (2020). The effect of nano-modified epoxy on the tensile and flexural properties of Napier fiber re-

- inforced composites. *Polymer Composites*, 41(3), 824–837. <https://doi.org/10.1002/pc.25413>
- Wang, C., Ren, Z., Li, S., & Yi, X. (2018). Effect of Ramie Fabric Chemical Treatments on the Physical Properties of Thermoset Polylactic Acid (PLA) Composites. *Aerospace*, 5(3), 93. <https://doi.org/10.3390/aerospace5030093>
- Wang, J., Liu, Z., Li, X., Liu, G., & Zhao, J. (2023). Elucidating structure of pectin in ramie fiber to customize enzyme cocktail for high-efficiency enzymatic degumming. *Carbohydrate Polymers*, 314, 120954. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120954>
- Wang, R., Liu, Z., Cheng, L., Duan, S., Feng, X., Zheng, K., Cheng, Y., & Zeng, J. (2019). A novel endo- β -1,4-xylanase GH30 from *Dickeya dadantii* DCE-01: Clone, expression, characterization, and ramie biological degumming function. *Textile Research Journal*, 89(4), 463–472. <https://doi.org/10.1177/0040517517748511>
- Wong, J. Y. M., & Chan, M. Y. (2018). Influence of bleaching treatment by hydrogen peroxide on chitosan/durian husk cellulose biocomposite films. *Advances in Polymer Technology*, 37(7), 2462–2469. <https://doi.org/10.1002/adv.21921>
- Xie, Y., Hill, C. A. S., Xiao, Z., Militz, H., & Mai, C. (2010). Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 806–819. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.03.005>
- Yang, S., Yu, C., Zhang, B., Zhang, P., Bi, X., Li, J., & Zhang, W. (2022). Highly efficient and low pollution catalytic oxidation of ramie degumming by NHPI. *Industrial Crops and Products*, 186, 115189. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115189>
- Yu, T., Sun, F., Lu, M., & Li, Y. (2018). Water absorption and hygrothermal aging behavior of short ramie fiber-reinforced poly(lactic acid) composites. *Polymer Composites*, 39(4), 1098–1104. <https://doi.org/10.1002/pc.24038>
- Zaman, H. U., & Khan, R. A. (2021). Acetylation used for natural fiber/polymer composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(1), 3–23. <https://doi.org/10.1177/0892705719838000>

Tekstil Bilimleri ve Mühendisliğinde İnovatif Çalışmalar

Editörler:

Süreyya KOCATEPE

Hüsnü AYDEMİR