

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).

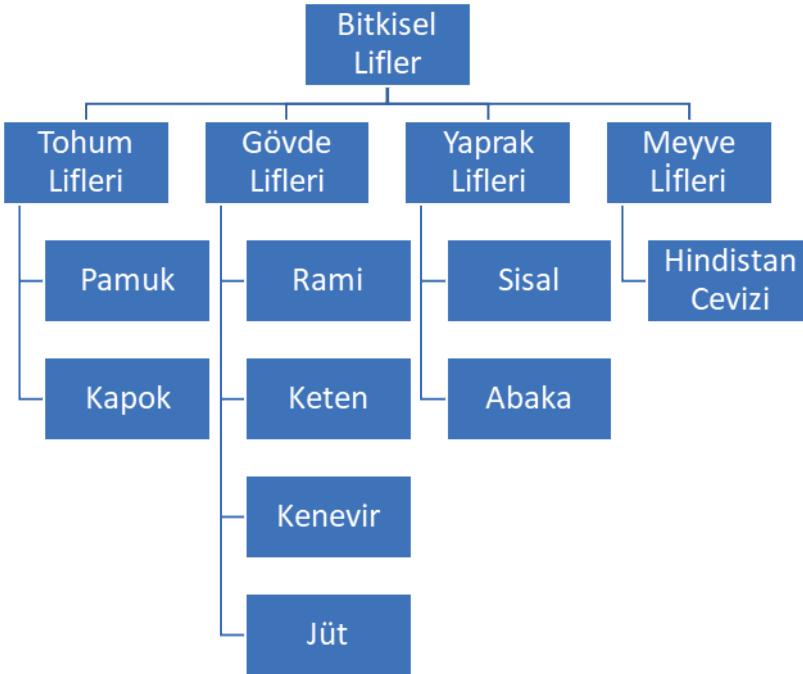
Kompozit üretiminde doğal liflerin kullanılması, hafif, kolay bulunabilen, uygun fiyatlı ve biyolojik olarak parçanabilir ürünlerin ortaya çıkmasına imkan sağlar. Bu kompozitler birçok endüstriyel sektör için uygun özelliklere sahiptir. Selüloz içerikli bu malzemeler, her geçen gün daha yaygın hale gelirken, 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 zamb giderme ve yeni kimyasal zamb giderme olarak sınıflandırılır.

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

Geleneksel kimyasal zamb giderme yöntemiyle karşılaştırıldığında, rami için yeni kimyasal zamb giderme işlemi zamb giderme süresini kısaltır, sert şeritleri azaltır ve zamb 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 Zamb Giderme İşlemi

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

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

Mikrobiyal zamb gidermenin, kararsızlık ve zambın tam olarak giderilememesi gibi bazı dezavantajları da vardır. Kontrolsüz mikrobiyal zamb giderme sırasında selülozu parçalayan mikroorganizmaların büyümesi nedeniyle lif kalitesinin bozulmaya başlaması nedeniyle rami zamb 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 zambk giderme için kullanılan ana mikroorganizmalardır.

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

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

1.1.3. Fiziksel Zambk Giderme İşlemi

Fiziksel zambk 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 zambk giderme verimliliğini artırmaktır. Rami hammaddesinin fiziksel işlenmesi tek başına ideal zambk giderme etkisini sağlayamadığından, genellikle diğer yöntemlerle birlikte kullanılan bir lif ön işleme yöntemi olarak kabul edilir (Shen, Wang, Chen, et al., 2015).

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

1.1.4. Biyokimyasal Zamk Giderme İşlemi

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

Biyokimyasal zamk giderme yöntemi, zamkı 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 zamk 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, rakım 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 zamk 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 kırılabilirliğe 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 zamlık 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 işlemde sonra arıtılmış su toprağa dökülse bile çevreyi etkileyemez. Yoğunluğu daha yüksek olan kristalin bölgedeki selülozün 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).

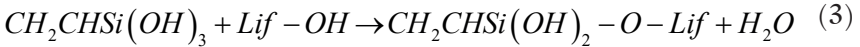
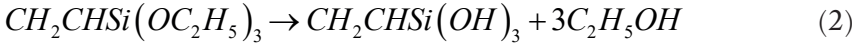
Ancak, alkali maruziyetinin konsantrasyonu ve süresinin kritik öneme sahip olduğunu dikkate almak çok önemlidir, çünkü aşırı işlem lif bozulmasına ve mekanik bütünlüğünün azalmasına yol açabilir. Optimum bir alkali konsantrasyonunun gerekli olduğunu vurgulamıştır; aşırı konsantrasyonlar, kompozitlerin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

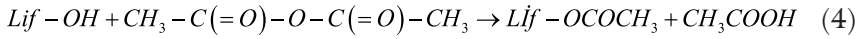
Dahası, silan bileşikleri ve polimerler arasında iç içe geçmiş ağların oluşumu, arayüz boyunca etkili yük transferine yardımcı olur. Silan ajanları içindeki reaktif gruplar ile epoksi reçine arasındaki reaksiyonun, kompozitlerde yüksek performans elde etmek için gerekli olan sağlam bir bağ oluşturduğunu 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 hidrofilikliğini 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 (Ekebaf, 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; Thiyaqu & 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 bağıni 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.

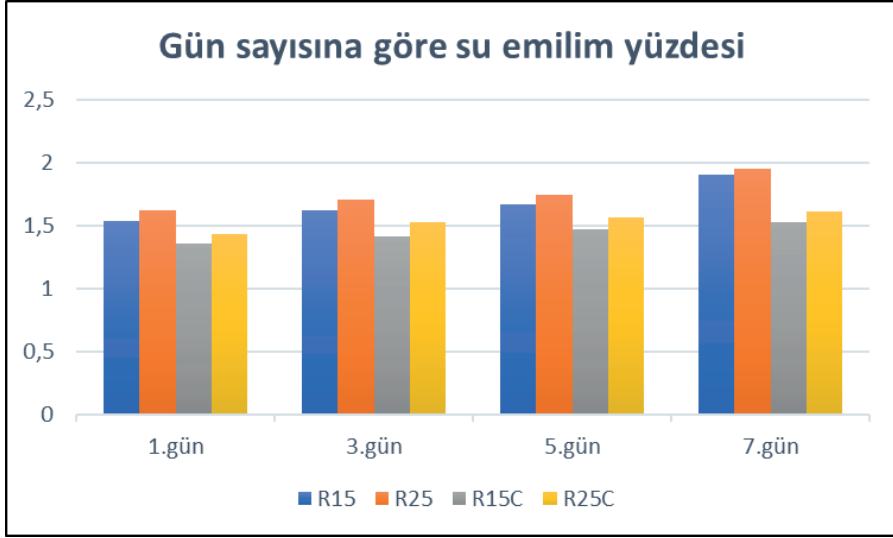
Öncelikli numuneler 60 °C’de 5 saat boyunca elektrikli fırında kurutulmuş ve ardından oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonra numuneler, hassas terazide ölçülmüştür. PLA’ nın yapısı nedeniyle numunelerde belirgin ve ölçümlenebilir bir şişme görülmemiştir. Doygunluğa ulaşana kadar oda sıcaklığında bir 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).

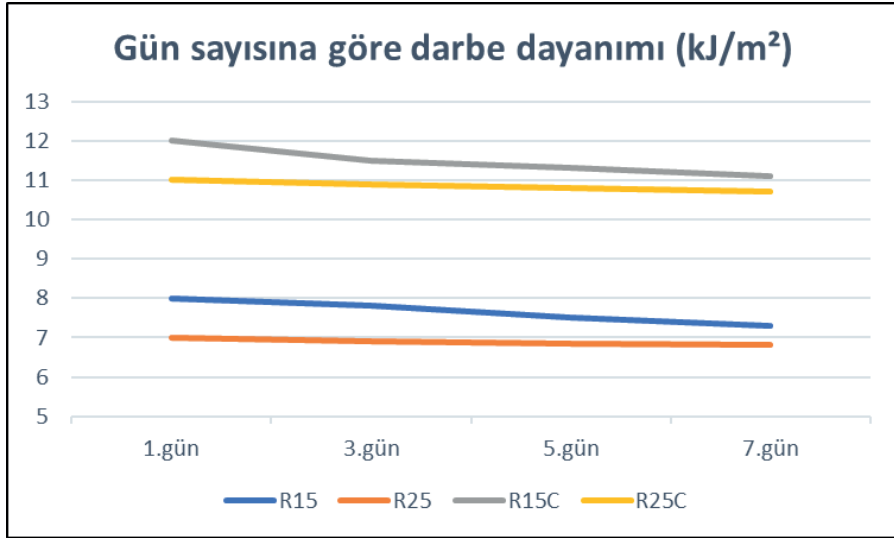


Şekil 2. Gün sayısına göre su emilimindeki değişim.

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, E., 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>