

# GAZİ

## JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

### Sustainable Wood Plastic Composite Materials: Raw Materials, Structural Properties, Production Processes and Current Trends

Gözde Çolak Bayram<sup>a,b</sup>, Gamzenur Özsin<sup>c</sup>, Burçin Atılgan Türkmen<sup>d</sup>

Submitted: 13.03.2024 Revised: 03.06.2024 Accepted: 23.08.2024 doi:10.30855/gmbd.075A09

#### ABSTRACT

**Keywords:** Composite, polymer, wood, production technologies, sustainability.

<sup>a</sup>Bilecik Şeyh Edebali University, Graduate School, Chemical Engineering 11230 - Bilecik, Türkiye  
<sup>b</sup>İşıksöy Textile Inc. Demirtaş Dumlupınar Organized Industrial Zone 16245 Bursa/Türkiye  
Orcid: 0000-0002-2170-4838

<sup>c</sup>Bilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering 11230 - Bilecik, Türkiye  
Orcid: 0000-0001-5091-5485  
e mail: [gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr](mailto:gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr)

<sup>d</sup>Bilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering 11230 - Bilecik, Türkiye  
Orcid: 0000-0003-3220-3817

<sup>\*</sup>Corresponding author:  
[gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr](mailto:gamzenur.ozsin@bilecik.edu.tr)

**Anahtar Kelimeler:** Kompozit, polimer, ahşap, üretim teknolojileri, sürdürülebilirlik.

In parallel with technological developments, the need for affordable, functional and sustainable materials is increasing day by day. At this point, wood composite materials, which provide many economic and environmental advantages compared to traditional polymer matrix composites, attract great interest due to their functionality in a variety of engineering applications. In this study, the structural properties of functional wood plastic composites were examined before the sustainability analysis and the current market analysis was made by evaluating the usage areas of these materials. Furthermore, information about these materials' production methods is presented, and approaches for improving material properties are evaluated. The literature review compiled integrated information on the recent progress of these composites and the development of material properties. Thus, by emphasizing the importance of wood-plastic composite materials in terms of sustainability, it is aimed to provide researchers with a basis for the structural properties, production technologies and sectoral trends of these materials.

### Sürdürülebilir Ahşap Plastik Kompozit Malzemeler: Hammaddeler, Yapısal Özellikler, Üretim Süreçleri ve Güncel Eğilimler

#### ÖZ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak, ucuz, fonksiyonel ve sürdürülebilir malzemelere olan ihtiyaç gün geçtikçe daha artmaktadır. Bu noktada, geleneksel polimer matris kompozitlere oranla hem ekonomik hem de çevresel yönden pek çok avantaj sağlayan ahşap kompozit malzemeler, farklı mühendislik uygulamalarında işlevselliklerinden ötürü yoğun bir ilgi çekmektedir. Bu çalışmada, sürdürülebilirlik analizi öncesinde fonksiyonel ahşap plastik kompozitlerin yapısal özellikleri incelenmiş ve bu malzemelerin kullanım alanları değerlendirilerek güncel pazar analizi yapılmıştır. Ayrıca bu malzemelerin üretim yöntemleri hakkında bilgiler sunulmuş, malzeme özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak kullanılabilecek yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Yapılan literatür taraması ile bu kompozitlerin güncel gelişimi ve malzeme özelliklerinin geliştirilmesi konularında ulaşılan bütünlük bilgileri derlenmiştir.

## 1. Giriş (Introduction)

Çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik kavramlarının günümüzde gitgide önem kazanması nedeniyle kompozit malzemeler alanında da sürdürülebilirlik çalışmalarına odaklanılarak bu konuda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Basitçe, önemli ölçüde farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşen malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan, çeşitli kombinasyonlarla kendi yapısını oluşturan bileşenlerden farklı benzersiz özelliklere sahip bir malzeme olarak tanımlanabilen [1] kompozit malzemeler, yoğun günlük ve endüstriyel kullanım talebine paralel olarak sürdürülebilir üretim teknolojileri ve hammadde gereksinimi göstermektedir. Bu nedenle, malzeme yapısı ile, sürdürülebilirlik yaklaşımlarının analiz edilmesi bir zorunluluk olarak göze çarpmaktadır.

Kompozit malzemelerin üretiminde, bu malzemeleri oluşturan her bir bileşenin tek başına sahip olduğu özelliklerden daha fazla üstün özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanıp, üretilmesi ya da maliyet avantajı sağlayacak şekilde üretimi amaçlanmaktadır [2-4]. Böylelikle geleneksel malzemelerin özelliklerinin yetersiz kaldığı durumlarda bileşenlerin sinerjik etkilerinden de faydalanarak pek çok gelişmiş fiziksel ve kimyasal özellikler elde edilebilmektedir [5,6]. Örneğin, tokluk, hafiflik, korozyon direnci gibi malzeme özelliklerinin iyileştirilmesini amaçlayan pek çok kompozit malzeme tasarımları yapılarak, farklı uygulamalar için bu fonksiyonel malzemeler tercih edilmektedir [1-6].

Kompozit malzemeler özelinde, bu çalışmada odaklanılan ahşap-plastik kompozit (APK) malzemeler, plastik malzemeler veya masif ahşap gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında birçok avantaj sunmaktadırlar. Örneğin, bu malzemelerin üretim sürecine ikincil atıkların, ağaç liflerinin, yenilmeyen biyokütle parçalarının katılması ile yerel kaynakların kullanımı sağlanarak, karbon ayak izi azaltılabilmekte, enerji verimliliği artırılarak, uzun kullanım ömrüne sahip olan, dayanıklı fonksiyonel malzemeler elde edilebilmektedir. Fakat bu malzemelerin sürdürülebilirlik performanslarının malzemelerin tedariki, üretim süreçleri, yapıda kullanılan ahşap ve polimer fazları, katkı maddeleri, kullanım ömrü sonu bertaraf seçenekleri, ürün tasarımı ve bu kompozitlerin nihai uygulama alanları gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değiştiği de bilinmektedir. Bu nedenle, herhangi bir malzeme grubunda olduğu gibi, APK'lerin çevresel etkilerini ve faydalarını tam olarak anlamak için bu malzemelerin yapısı, özellikleri ve üretim yöntemleri incelenerek kapsamlı bir yaşam döngüsü değerlendirilmesi yapılması son derece önem arz etmektedir. Bu çalışmada, hammaddeler, üretim süreci, uygulama alanı ve alandaki gelişmeler ve yenilikler de dahil olmak üzere APK malzemeler hakkında güncel bilgiler derlenerek sunulmuştur. Böylece, hammadde tedarikinden, üretim sürecine, uygulama alanlarına ve pazar eğilimlerine kadar sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesi, Ar-Ge yoluyla inovasyonun teşvik edilmesine katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

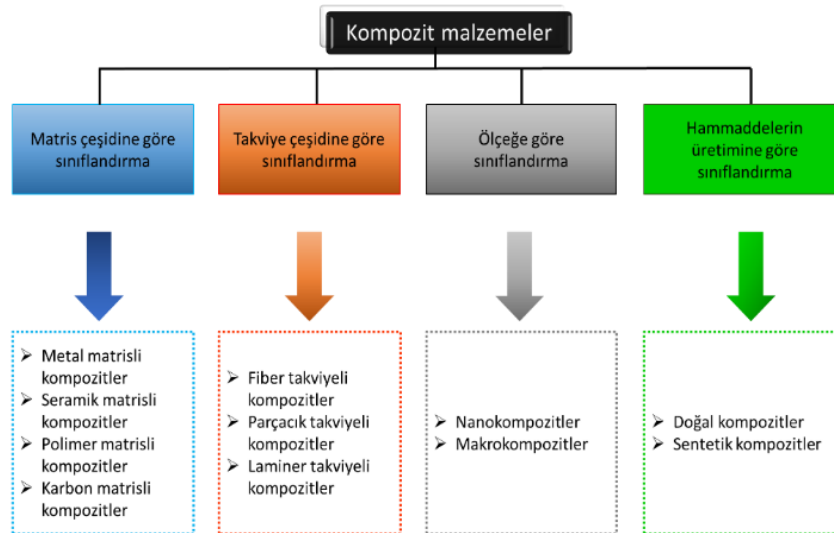
## 2. Kompozit Malzemeler ve APK Malzemeler (Composite Materials and WPC Materials)

Teknolojik ilerlemeler, malzemelerin özelliklerinin, dayanıklılığının, işlevselliğinin ve geliştirilmesine ve çeşitlendirilmesini gerektirmektedir. Bu noktada, fonksiyonel kompozit malzemelerin, malzeme niteliklerini iyileştirme kapasitesinden dolayı bu çeşit malzemelere olan talep günden güne artmaktadır. Geleneksel malzemelerle kıyaslandığında daha geniş uygulama alanları için uygulanabilir kompozit malzemeler, temel olarak, kompozit malzemeler matris (reçine) ve takviye edici malzeme olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Matris yapı (faz) elemanı (materyal) uygulanan bir kuvveti ara yüzey bağı yoluyla takviye edici faza iletir ve dağıtır. Böylece kompozit içinde bulunan takviye fazını planlanan şekilde tutarak uygulamalar esnasında karşılaşılabilecek olası tahribatı önleyebilmektedir. Matris genellikle süneklik, şekillendirilebilirlik ve termal iletkenlik gibi belirli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip nispeten yumuşak bir faz olarak görülmektedir ve kompozit içerisinde hacimsel olarak çoğunlukta olan bileşen olup, konumlarını koruyarak takviye malzemelerini çevrelemektedir [7]. Takviyeler ise matris özelliklerini geliştirmek için yapıda yer almaktadır ve sahip olduğu özelliklerini tasarlanan kompozit malzemeye taşımaktadır [8, 9]. Kompozit içerisinde bulunan takviye malzemeleri elyaf ve partikül gibi farklı morfolojik özelliklere sahip olabilirken, kompozit malzemelerin sınıflandırılması matris fazı da göz önünde bulundurularak

yapılabilmektedir. Kompozit malzemelerde kullanılacak takviye ile uyumlu olarak kullanılması gereken matris, temel olarak takviye malzemelerini hasardan koruyabilecek uygun düşük yoğunluğa ve mukavemete sahip malzeme gruplarından seçilmektedir [10-12].

Yapılarında farklı malzeme grupları barındıran kompozit malzemelerin sınıflandırılması farklı kriterler göz önünde bulundurularak yapılabilmektedir [13,14]. Şekil 1'de verildiği üzere bu konudaki en temel sınıflandırma, kompozitte kullanılan matris malzemesinin çeşidine göre yapılmaktadır. Buna göre kompozitler metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler gibi alt gruplara ayrılmaktadır. Takviye çeşidine göre yapılan sınıflandırmada ise, fiber takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler ve lamina takviyeli kompozitler gibi kompozit grupları yer almaktadır. Ayrıca, nanoteknolojideki gelişmelere paralel olarak, nano ölçekli takviyelerden oluşan kompozitler de ayrı bir sınıflandırmaya tabi tutularak nanokompozitler olarak adlandırılmaktadır. Bu sınıftaki nanokompozitler bile geleneksel kompozitler gibi matris ve takviye tiplerine göre ayrı bir sınıflandırma içine katılabilmektedir [15]. Son olarak ise, doğada kolayca bulunabilen "doğal kompozitler" olarak adlandırılan başka bir sınıflandırma da literatürde sıklıkla karşılaşılan bir başka terminolojidir [13]. Bu tanım aslında, sentetik olarak endüstriyel işlemlerden geçerek insan eliyle üretilmeyen, doğada kendiliğinden bulunan doğal malzemelerin matris ve takviye olarak kullanıldığı kompozitleri içine alarak, ahşap, kemik, biyolojik lifler gibi farklı malzemeleri yapısında bulundurabilir [16].

Kompozit malzemeler içinde önemli bir grubu oluşturan polimer matris kompozitler karbon, cam, Kevlar, metal fiberlerin gibi farklı takviyelerin termoset veya termoplastik matrise dağıtılması ile elde edilmektedir [17,18]. Bu kompozitler kolay kullanım teknikleri ve basit imalat yöntemleri nedeniyle düşük maliyetli olarak üretilmekte ve pek çok uygulamalarda kullanılabilir [19, 20]. Polimer matrisler hafif, yumuşak ve viskoelastik malzemeler olduğu için yapıda özellikle yük azaltma amacıyla önemli avantajlar sağlamaktadır [21]. Bu kompozit malzemelerin içinde yer alan APK'ler ise lignoselülozik yapıdaki doğal malzemeler ile plastiklerin kombinasyonları ile elde edilmektedir.

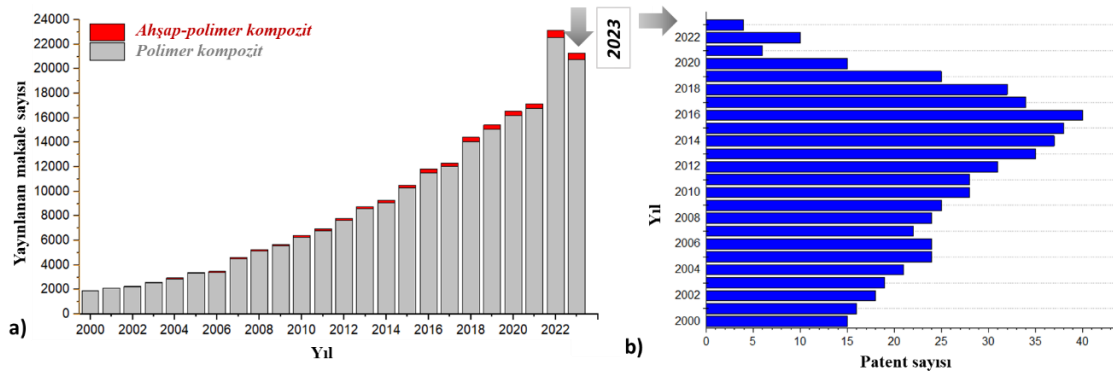


Şekil 1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Classification of composite materials)

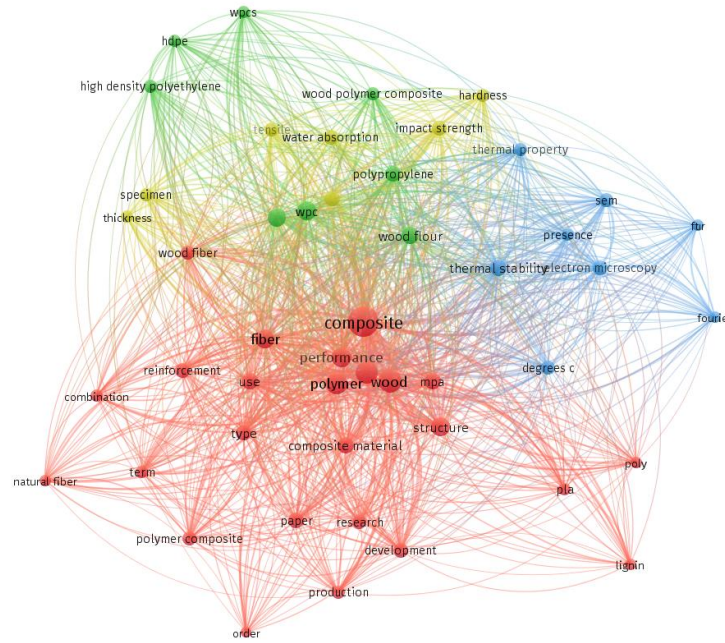
### 3. APK Malzemeler (WPC Materials)

APK terimi bitki lifleri ve termosetler veya termoplastikler içeren kompozit malzemeyi ifade etmektedir. Yaygın olarak bu kompozitlerin üretiminde, odun ya da ahşap unlarının veya fiberleri ile termoplastik esaslı polietilen (PE), polipropilen (PP), polilaktik asit (PLA), polivinilklorür (PVC), polietilen tereftalat (PET) ve polistiren (PS) polimerleri kullanılabilir [22]. Ayrıca APK'lerin üretiminde geri dönüştürülmüş polimerlerin de kullanılması ile hem çevresel hem de ekonomik bakımdan büyük bir avantaj elde

edilebilmektedir [23]. APK, kendisini oluşturan plastik ve ahşaba kıyasla daha üstün özelliklere sahip olması dolayısıyla tüm dünyada geniş kullanım alanlarına sahiptir. Bu üstün özellikler arasında plastik malzemeye kıyasla daha düşük maliyetli olmaları ve doğada daha kolay bozularak çevre dostu olmaları, ahşap malzemeye kıyasla ise daha iyi boyutsal dayanıklılığa sahip olmaları yer almaktadır. Ayrıca bu malzemeler istenilen boyut ve şekilde, farklı renk ve dokuda üretilebilmeleri, çatlamalara, mantarlara ve böceklere karşı daha dayanıklı olmaları ve geri dönüştürülmüş ve/veya atık malzemelerden üretilebilmeleri nedeniyle de pek çok uygulama için önemli avantajlar sağlamaktadır [24, 25]. Bu nedenle APK'ler üzerine günümüzde yoğun araştırmalar yürütülerek bu yapıların özelliklerinin geliştirilmesi, yeni reçeteler hazırlanarak hedeflenen bileşimin endüstriyel üretim sürecine katılması ve mevcut APK malzemelerin üretiminin optimizasyonunu hedeflenmektedir. Şekil 2'de son yıllarda APK malzemeler hakkında yürütülen bilimsel çalışmalar ve alınan patent sayıları verilmiştir. Sayısal sonuçlar incelendiğinde, polimer kompozitlere oranla, bu APK'ler hakkında yürütülen çalışmaların günümüzde halen yeterli seviyeye ulaşmadığı belirtilebilir. Özellikle bu APK'lerin geleceği hakkında yapılan tahminlemelere göre talep ve üretiminin artacağı da göz önüne alınarak araştırmacıların bu konuda daha sürdürülebilir üretim teknolojilerine, hammadde kullanımına ve çevre-dostu üretim proseslerine odaklanmaları gerekmektedir. Örneğin Fortune Business Insights tarafından yapılan pazar araştırmaları, APK pazar büyüklüğünün 2019'da 4,77 milyar ABD Doları olduğunu ve bu pazarın tahmin döneminde yaklaşık %8,6'lık bir bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) sergileyerek 2027 yılına kadar 9,03 milyar ABD Dolarına ulaşacağını göstermiştir [26]. Precedence Research tarafından yapılan bir başka araştırmaya göre ise küresel APK pazar büyüklüğünün 2030 yılına kadar yaklaşık 17,56 milyar ABD dolara ulaşacağı tahmin edilmekte ve 2022 ve 2030'dan itibaren %12,38'lik birleşik yıllık büyüme oranı sergileyeceği öngörülmektedir [27]. Pazar hacmindeki artış tahminlemelere paralel olarak, bu konuda yapılacak araştırma-geliştirme çalışmalarının da artacağı beklenmektedir. Bu noktada kaçınılmaz olarak hem araştırmacıların hem de sanayicilerin endüstriyel ve çevresel sürdürülebilirlik kısıtlarına odaklanması bir zorunluluk haline gelmiştir. Şekil 3'te ise APK malzemeler hakkında yürütülen bilimsel çalışmaların bibliyometrik analizini gerçekleştirebilmek için 2020-2024 (Şubat) arasında Web of Science'da bulunan tüm veri tabanlarından elde edilen bilgiler işlenerek bir kelime ağ haritası oluşturularak, son yıllarda bu konularda çalışılan anahtar kelimeler analiz edilmiştir. Şekilde bu konulardaki yapılan çalışmaların malzemenin performansını geliştirmek üzere yoğunlaştığı saptanmıştır.



Şekil 2. Yıllara göre polimer kompozit (PK) ve APK içerikli yayınlanan makale sayıları (a) ve APK malzemeler hakkındaki patent sayıları [28-30](Number of articles published on polymer composite (PK) and APK content by years (a) and number of patents on APK materials)



Şekil 3. 2020-2024 yılları arasında veri tabanlarında bulunan APK malzemelere ilişkin kelime madenciliği analizi (Word mining analysis of APK materials found in databases between 2020-2024)

### 3.1. APK malzemelerin uygulama alanları (Application fields of WPC materials)

APK malzemelerden imal edilen endüstriyel parçalar son derece geniş uygulama alanına sahiptir. Bu malzemeler, geleneksel kompozitler, polimer malzemeler ve ham ahşap esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında, sürdürülebilirlik, kalite ve maliyet bakımından önemli avantajlar sağladığı için, birçok alanda geleneksel malzemelere ve geleneksel kompozitlere ikame olarak kullanılabilir. Aynı zamanda APK malzemelerin, koruyucu maddelerle işlenmiş masif ahşap veya çürümeye dayanıklı türlerden masif ahşap malzemelere daha az bakım gerektirdiği bilinmektedir. Bu nedenle, inşaat, mobilya, otomotiv, elektronik endüstrilerde ve kaplama ile paketleme uygulamalarında APK malzemeler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunların yanı sıra, spor ve müzik aletleri yapımında da APK parçalar sıklıkla kullanılabilir. Örneğin, lamine kayak malzemeleri, golf malzemeleri, hokey ve beyzbol sopalarının üretiminde APK malzemeler yer almaktadır. Müzik aletlerine örnek olarak ise, nefesli ve telli çalgıların imalatında bu kompozitlerin kullanımı sıralanabilir. Yapı malzemelerinde ahşap plastik kullanımına yönelik uygulamalar arasında ise, elektrik direkleri, çitler, güverteler ve bina dış cephe kaplamaları gibi uygulamalar yer almaktadır [31-36].

APK üretim teknolojilerinin sürdürülebilirliği ve üretim maliyeti; teknolojik gelişmelere paralel bir şekilde düşük maliyetli üretim yöntemleri ve talaş artıklarının kullanımının artması ile giderek artmaktadır. Ayrıca, endüstriyel malzeme üretim tesisleri üzerinde sürekli artan petrol fiyatları nedeniyle ve petrol-esaslı polimer malzemelerin kullanımının azaltılması yönünde baskılar oluşturmaktadır. Özellikle otomotiv ve ulaşım araçlarının imalatında yenilenebilir biyokütle malzemelerin hammadde olarak kullanımı ile daha çevre dostu ve düşük maliyetli APK malzemelerin geliştirildiği dikkat çekmektedir. Bu sektörlerde daha yüksek performans, daha üstün güvenlik, daha yüksek konfor, daha çok yakıt tasarrufu ve daha düşük üretim maliyetlerine ulaşılması istenilirken, çevre dostu teknolojilerin daha çok kullanılması yönünde toplumsal baskılar da gün geçtikçe artmaktadır. Otomotiv sektöründe ahşap kompozit malzemeler kontrol panellerinde, kapı panellerinde, raflarda, koltuk minderlerinde, koltuk sırtlıklarında, kabin kaplamalarında, bagaj halılarında, bagaj yan giydirme ve şapkalıktaki gibi trim parçalarının imalatında sıklıkla kullanılmaktadır. Teknik açıdan bakıldığında, bu kompozitler araçta mekanik mukavemeti ve akustik performansı artırmakta, malzeme ağırlığını ve yakıt tüketimini azaltmaktadır. Ayrıca, geliştirilen malzeme yapılarıyla cam elyaf ve karbon esaslı kompozit ve hatta metal parçaların yerini alma potansiyeline sahiptir.

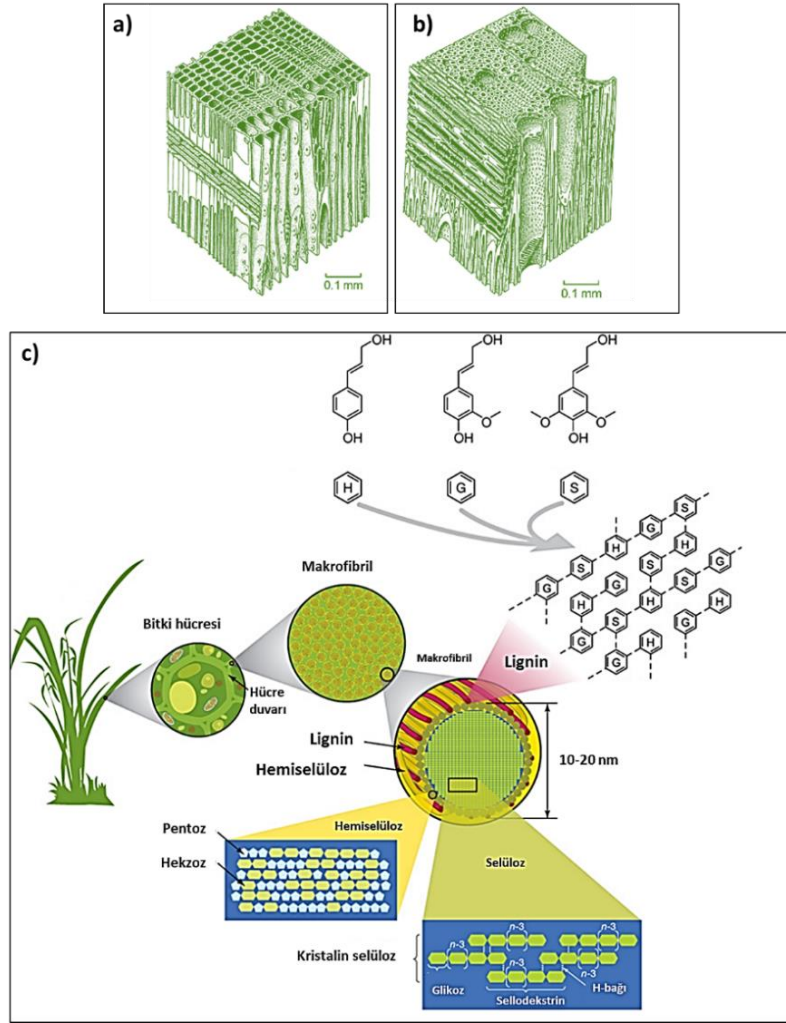
APK kompozit malzemelerin, katma değere sahip teknolojik ürünlerde kullanımının gün geçtikçe yaygınlaşması ile hem endüstriyel imalat sektöründe hem de kırsal alanlarda çalışan insanlar için de ekonomik kalkınmaya önemli bir katkı sağlanmaktadır. Bu nedenle, APK malzemelerin kullanımının günden güne artması ve yeni kullanım alanlarının yaratması hem modern yaşamda sağladığı avantajlar hem de çevresel ve sosyoekonomik faydaları nedeniyle son derece önem arz etmektedir [25, 37].

### 3.2. APK üretiminde kullanılan hammaddeler (Raw materials used in WPC production)

APK malzemeler temelde iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar termoplastik ya da termosetlerden polimerler ve lignoselülozik biyokütledir. Bunların yanında, malzeme özelliklerini geliştirmek için çeşitli katkılar ve dolgular da yapıya eklenmektedir. Lignoselülozik biyokütle, adından da anlaşılacağı gibi lignin, selüloz ve hemiselülozdan oluşan doğal bir kompozit malzeme yapısındadır. Ahşap terimi ise genel olarak ağaç gövdesinden elde edilen sert odunumsu biyokütleri tanımlayan bir terim olarak kullanılmaktadır. Fakat APK üretiminde hem sert odunumsu (hardwood) hem de yumuşak odunumsu (softwood) biyokütle kaynakları kullanılmaktadır. Bu nedenle literatürde bu konuda bir ikilem meydana gelmesine rağmen günlük pratik kullanıma uygunluğundan dolayı APK terimi sıklıkla tercih edilmektedir. Sert ve yumuşak odunsu biyokütle tanımları doğrudan biyokütlenin mekanik sağlamlığını tanımlamasa da genel olarak biyokütlenin özelliklerini yansıtmaktadır. Yumuşak odunsular, iğne ve iğnemsiz yapraklara sahip biyokütledir ve genellikle daha düşük yoğunluklara sahiptir, açık renkli yapıdadır. Yumuşak odunsular, genellikle sert odunsulardan daha hızlı büyürler ve daha kolay işlenebilirler. Örneğin, çam, köknar, ladin, karaçam ve sedir ağaçları yumuşak odunsular arasında yer alır. Sert odunsular ise genellikle geniş yaprakları ve koyu renklidir. Sert odunsular, yumuşaklardan daha yüksek yoğunluklara ve daha kalın hücre duvarlarına sahiptirler. Örneğin, meşe, dişbudak, karaağaç, kayın, huş ağacı gibi kaynaklar sert odunsular arasında yer almaktadır [38]. Sert veya yumuşak sınıflandırmasından bağımsız olarak tüm biyokütle kaynakları heterojen ve anizotrop yapıdadır. Kimyasal olarak lignin, selüloz ve hemiselüloz temel bileşenlerinin yanı sıra biyokütle kaynakları yapısında çok az miktarda su, düşük molekül ağırlıklı organik ekstraktifler ve inorganikler de içermektedir. Şekil 4'de yumuşak odunsu ve sert odunsu biyokütlenin yapısal farklılıkları ile biyokütlenin biyokimyasal bileşimi gösterilmiştir.

Biyokütlenin yapısında lignin ve hemiselüloz mikrofibrilleri, kristalin selüloz tarafından çevrelenmiş bir şekilde bulunur. Selüloz ağsı bir yapıda olan ve biyoküttele mikrofibriller halinde olan bir biyopolimerdir. Hemiselüloz ise heterojen ve amorf bir yapıda olan dallanmış bir moleküldür. Hemiselüloz, her bir selüloz mikrofibrilinin yüzeyine kovalent olmayan bağlarla sıkıca bağlanmış bir şekilde bulunur. Lignin ise büyük ve çapraz bağlı, amorf polimerik yapı olup, hemiselüloz moleküllerine kovalent bağlarla bağlıdır [39-42].

APK'lerin üretiminde odun partikül ve liflerinin yanında çeşitli türlerde tarımsal bitki atıkları, kenevir ve kenaf gibi tabii lifler de kullanılabilir. Çoğunlukla lifsi yapıdaki biyokütle kaynakları; çeşitli meyvelerden (pamuk, hindistan cevizi lifi), bitki saplarından (jüt, kenevir, kenaf) ya da yapraklarından (sisal, kendir) elde edilmektedir [43,44]. Günümüzde farklı atık biyokütle kaynaklarının APK yapısında hem endüstriyel ölçekte hem de araştırma amacıyla kullanım örnekleri bulunmaktadır. Tablo 1'de de görülebileceği gibi malzeme üretiminde biyokütle kullanımı, geleneksel fosil yakıt bazlı malzeme üretimine sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Fakat endüstriyel uygulanabilirlik açısından, biyokütle kaynağının kompozit içerisindeki performansının yanı sıra bu kaynağın ucuz bir şekilde tedariğinin sürdürülebilmesi göz önünde bulundurulması gereken en önemli kriter olarak göze çarpmaktadır. Bu nedenle, endüstriyel üretim tesislerinde bölgesel olarak temininde sıkıntı yaşanmayacak biyokütlenin işlenmesi tercih edilmektedir.



Şekil 4. Yumuşak odunsu (a) ve sert odunsu (b) biyokütle yapısı ile biyokütlenin biyokimyasal bileşimi (c) [39].  
(Softwoody (a) and hardwoody (b) biomass structure and biochemical composition of biomass)

APK üretiminde kullanılan lignoselülozik biyokütle kimyasal yapısı nedeniyle tipik olarak polar, hidrofiliktirler. Polimer matrisi ise genellikle polar olmayan ve hidrofobik bileşiklerdir. Sonuç olarak, bu temel farklılık nedeniyle biyokütlenin ıslanabilirliğini geliştirmek için çok sayıda modifikasyon yöntemi de APK'lerin geliştirilmesi sürecinde araştırılmaktadır. Dolgu maddelerinin ve polimer matrislerin yüzeylerini iyileştirmek için uygulanabilecek modifikasyon yöntemleri fiziksel ve kimyasal yöntemler olarak sınıflandırılır [45-47]. Ahşap ile polimer matris arasındaki uyumluluğu arttırmak, mekanik özellikleri geliştirmek, dayanıklılığı arttırmak ve istenilen performans özelliklerine ulaşmak modifikasyon tekniklerinin amacıdır. Kurutma, öğütme, yüzey pürüzlendirme gibi uygulanacak fiziksel ön işlemler, biyokütlenin nem içeriğini azaltma, biyokütlenin matris içindeki dağılımını artırma ve biyokütlenin yüzey alanı artırılarak polimer ile daha iyi yapışmayı sağlamayı amaçlamaktadır. Kimyasal modifikasyon, modifiye edici kimyasalın ahşabın mikro yapısına nüfuz etmesini gerektirir. Uygulanabilecek kimyasal işlemler sonucu, kimyasalların hücre duvarlarında ve/veya ahşabın lümenlerinde birikmesi ve lignoselülozik yapı ile etkileşmesi gerçekleşir [48]. Alkali işlemler, silanlama, asetilasyon, peroksit işlemi gibi kimyasal modifikasyon işlemleri gibi biyokütlenin yüzey kimyasına etki ederek matrisle daha iyi etkileşim sağlamayı amaçlamaktadır [49-54].

Tablo 1. Lignoselülozik biyokütlenin APK malzeme üretim süreçlerine katılmasının sunacağı avantajlar  
(Advantages of incorporating lignocellulosic biomass into WPC material production processes)

<b>Yenilenebilir olması</b>	Sonlu olan ve sonunda tükenen fosil kaynakların aksine, biyokütle sürekli olarak büyütülebilir ve hasat edilebilir.
<b>Biyobozunur olması</b>	Mikroorganizmalar tarafından biyolojik olarak parçalanabilmesi nedeniyle biyokütle çevre dostu bir malzemedir.
<b>Karbon nötr olması</b>	Biyokütle, büyüdükçe atmosferdeki karbondioksiti emer ve bu da kullanımı sırasında oluşan emisyonları dengelemeye yardımcı olur. Dolayısıyla, biyokütle üretimi ve kullanımı, geleneksel fosil yakıt bazlı malzeme üretimine kıyasla sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir.
<b>Çok yönlü ve çok çeşitli olması</b>	Farklı biyokütle çeşitleri malzeme üretimi için hammadde olarak veya doğrudan kullanımı ile çok yönlü bir malzeme kaynağıdır. Böylece geleneksel malzemelere sürdürülebilir alternatiflerin üretilmesine olanak tanır ve mevcut malzeme teknolojilerine uyum sağlar.
<b>Yerel kalkınmayı desteklemesi</b>	Biyokütle, yerel olarak yetiştirilebilir ve hasat edilebilir, bu da uzun mesafeli nakliye ihtiyacını ve buna bağlı emisyonları azaltır. Bu aynı zamanda yerel ekonomik kalkınma ve iş yaratma için fırsatlar yaratır.
<b>Eldesinde düşük enerji gerektirmesi</b>	Biyokütle esaslı malzemelerin fosil kaynaklı ürünlerin üretiminden daha az enerji gerektirir, bu da sera gazı emisyonlarını ve yenilenemeyen kaynakların kullanımını azaltır.
<b>Atık minimizasyonuna katkı sağlaması</b>	Düzenli depolama alanlarına gönderilecek olan gıda, tarımsal ve ormancılık atıklarının malzeme üretim kullanılabilecek değerli bir kaynak yaratılması bu atıkların çevresel etkisini azaltır.

APK malzemelerin üretiminde polimer hammaddeleri açısından, termoplastikler, termosetler ve elastomerleri içeren birçok farklı polimer türü kullanılabilir. Ancak dikkate alınması gereken temel husus kullanılacak polimerin çalışma sıcaklığıdır. Ahşabın kompozit içinde işlenmesiyle getirilen sınırlamalar nedeniyle, APK'lerin üretimi için yalnızca 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda işlenebilen polimerler üretimde kullanılabilir [55]. Yaygın olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), Poliamid (PA), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS), APK malzemelerin üretiminde kullanılabilmektedir [56, 57]. Sıcaklık karşısında sergilediği davranış bakımından termoplastikler sıklıkla üretimde kullanılmasına rağmen termosetlerin kullanıldığı APK üretimlerine de rastlanmaktadır. Termoset polimerler ısıtıldığında erimeyen veya yumuşamayan yapıya sahiptirler ve bu yapıların çok yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla polimer yapısı bozunur. Epoksi, polivinil ester, polyester, poliüretanlar, fenolik, formaldehit gibi ısı ile sertleşen polimerler, ahşap kompozit uygulamalarında kullanılarak elde edilen malzemeye dayanıklılık, termal kararlılık, dolgu maddesinin ıslanabilirliği, elektrik ve ısı yalıtımı, sürünme direnci, kimyasal direnç, viskozite ve moleküler çapraz bağlanma açısından avantajlar sağlayabilmektedir. Epoksi polimer reçineler ise dolgu maddeleriyle iyi arayüzeyde bağlanması, düşük viskoziteye sahip olması, daha yüksek ıslanabilirlik, termal kararlılık ve mekanik performans göstermesinin yanı sıra kürlenmeden sonra düşük çekme ve daha iyi kimyasal direnç göstermesi gibi sergilediği avantajlar nedeniyle mevcut termosetler arasında tercih edilebilmektedir [58]. Özetle üretilecek kompozit yapının nihai kullanım amacı doğrultusunda polimer tercihi ve malzeme tasarımı yapılmaktadır. Ayrıca yine nihai ürün özellikleri göz önünde bulundurularak farklı polimerlerin sentezi ve ahşap polimer kompozitlerdeki performansının incelenmesi çalışmaları da yürütülmektedir. Geri dönüştürülmüş polimerlerin kompozitlerdeki performanslarının incelenmesi ise son yıllarda ahşap kompozit malzeme üretiminde odaklanılan konular arasında yer almaktadır [59-61]. Bu çalışmalar atık polimerlerin ürün döngüsüne geri katılarak döngüsel ekonomiye katkı sağlanmasını ve endüstriyel simbiyozun desteklenmesini hedeflemektedir.

APK malzemelerinde kullanılabilecek dolgu maddeleri organik ve inorganik yapıda olabilesine rağmen, üretimde genellikle inorganik dolgu materyalleri tercih edilmektedir. Dolgular, son ürün maliyetini azaltmanın yanı sıra ilave edildikleri ürünlerin özelliklerinin yapısını bozmayacak şekilde tercih edilmektedir. Bu maddeler, genel olarak kompozit bileşimine katılarak özgül ağırlık, elastik modül, basma direnci, eğme direnci, sertlik gibi değerlere mekanik özellikleri etkiler. Kalsiyum, talk, kalsiyum karbonat, alüminyum silikat, kil, cam dolgu, metal oksit benzeri maddeler, sıklıkla kullanılan dolgu maddelerine örnek verilebilir. Katkı maddeleri ise APK'lerin çeşitli amaçlar için kullanılabilesini sağlayan oldukça önemli bileşenleridir.



APK malzemelerde kullanılan katkı maddeleri arasında yağlayıcılar, reoloji kontrol katkıları, bağlayıcılar, stabilize ediciler, yoğunluk azaltıcılar, biyositler, alev geciktiriciler, duman bastırıcılar, renklendiriciler gibi farklı amaçlarla kullanılan malzemeler yer almaktadır. Yapıya çok az miktarda etkilenen bu katkıları, nihai ürün özelliklerini büyük ölçüde değiştirebilecek niteliktedirler. Özellikle uyumlaştırıcılar olarak da bilinen bağlayıcı ajanlar, farklı yapıda olan polimerik ve lignoselülozik malzemelerin homojen bir şekilde karışımını sağlayarak nihai üründe istenen yapıyı sağlamak açısından son derece önem taşımaktadır. Günümüzde maleik anhidrit grafted polipropilen (MAPP) ve maleik anhidrit grafted polietilen (MAPE) bu amaçla yaygın olarak kullanılan kimyasallardandır [62-64].

### 3.3 APK malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler (Methods used in the production of WPC materials)

Genel olarak APK malzemelerin üretimi eriyik polimerin lignoselülozik biyokütle ve uygun katkı ve dolgu malzemelerin karıştırılması ile üretilir. Fakat üretim öncesinde biyokütle ve polimer arasındaki ara yüzey özelliklerini iyileştirmek ve biyokütlenin hidrofilik yapısını modifiye etmek için biyokütle bazı ön işleme tabi tutulmaktadır. Bu ön işlemler kimyasal, mekanik ve termal yöntemler olabilmektedir. Bu ön işlemlerden, kimyasal işlemlerin çevresel etkileri nedeniyle gerekmedikçe tercih edilmezken, mekanik ve ısıl yöntemlerin uygulanması ana işlem basamaklarından önce genellikle yapılmaktadır.

Kimyasal ön işlemler bitkisel lifler ve polimer arasındaki ıslanma özelliklerini iyileştirmeyi, esnek ve sert bir ara yüzey tabakası oluşturmayı, gelişmiş çapraz bağlı ara yüzey geliştirmeyi, polimer/lif ıslanmasını artırmayı ve liflerin yüzey enerjisini değiştirmeyi amaçlayabilir. Bu amaçlar doğrultusunda kimyasallar ya polimerdeki fonksiyonel gruplarla ya da biyokütle üzerindeki hidroksil gibi fonksiyonel gruplarla tepkimeye girer. Mekanik işlem yöntemleri ise liflerin polimer matris ile bağlanma özelliklerini geliştirmek için ağaç liflerinin yüzey ve yapısal özelliklerinin değiştirilmesini amaçlamaktadır [65]. Hidrofilik gözenekli bir yapıya sahip olan biyokütle yapısında hidroksilin de olduğu farklı fonksiyonel grupları bulundurmaya ve hidrojen bağı ile su molekülleri ile etkileşir. Bu nedenle, nemli ortamlarda ham biyokütle su tutabilir ve oluşturulacak nihai kompozit yapısını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle ana işlemler öncesi uygulanacak termal yöntemler ile biyokütle ısıtılarak yapının boyutsal kararlılığı sağlanır ve nihai kompozitin yıllar içinde bozunma ve çürümesinin önüne geçilir [66-68].

APK malzemeler için birincil üretim teknolojileri; ekstrüzyon, basınçlı kalıplama ve enjeksiyonlu kalıplama olarak sıralanabilir. Bu geleneksel yöntemlerin yanı sıra termoforming ve lazer sinterleme, üç boyutlu yazıcı ile üretim gibi farklı inovatif yöntemlerde kompozitlerin eldesi için uygulanabilmektedir. APK'ler için uygun imalat yönteminin seçimi, polimer çeşidine, ürün bileşimine ve geometrisine, çevre koşullarına, maliyete bağlı olarak yapılmaktadır. Fakat kullanılacak polimerin çeşidi ve termoset veya termoplastik yapısı, imalat yönteminin seçimindeki en önemli parametredir [58].

Ekstrüzyon yöntemi, APK malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bu yöntemde polimer eritilerek, ahşap ve katkı maddeleri ile seçilen kompozisyona göre karıştırılmaktadır. Uygulanan ısı ve basınç ile akışkan hale getirilen polimerik ham madde, ahşap, dolgu ve katkı maddeleri sisteme eklendikten sonra şekil verilip katılaştırılır. Başka bir deyişle ısıtılan kompozit bileşenleri bir metal bloğunun içerisinde sıkıştırılarak, daha küçük kesit alanına sahip kalıp boşluğundan akmaya zorlanır ve bu sırada deformasyona uğrar. Ekstrüzyon işleminde farklı geometrilerdeki vidalı ekstrüder, çift vidalı ekstrüder ve ortak yoğurucu ekstrüderler kullanılabilir [65,70,71]. Ekstrüzyon yönteminde vidanın hızı (devir sayısı) ve eriyik polimer sıcaklığı, işlem basıncı, ekstrüder vidasının uzunluk/çap oranı, heliks şekli ve açısı, ekstrüderden malzeme çıkış süresi gibi işlem parametreleri sürece etki etmektedir. Sürekli olarak yürütülen ekstrüzyon proseslerindeki temel hedef, en uygun kalitedeki kompozitin fire vermeden üretmektir. Ayrıca, ekstrüzyon yöntemleri; malzemenin akış yönü ve kuvvetin iletiliş biçimine göre dört sınıfta incelenebilir. Bunlar temel olarak; direkt ekstrüzyon, indirekt ekstrüzyon, püskürtmeli ekstrüzyon ve hidrostatik ekstrüzyondur. Bununla birlikte günümüzde en çok direkt ve indirekt ekstrüzyon yöntemlerinin kullanıldığı bilinmektedir. Ekstrüzyon yönteminde birçok parametrenin profil kalitesine etkisi bulunmaktadır. Bu parametrelerden biri sıcaklıktır. Ekstrüzyon sıcaklığının ürün kalitesine ve matris ömrüne iki farklı açıdan etkisi söz konusudur.

Ürün kalitesi açısından, çıkış sıcaklığı ısıtım proseslerini ve boyut kararlılığını etkilemektedir, aynı zamanda ekstrüzyon hatalarına da yol açabilmektedir. Ekstrüzyon sıcaklığı matris ömrü açısından da kritik bir konudur. Ürünün matristen çıkış sıcaklığı sonuç itibarıyla matris kanalındaki sıcaklık artışıyla ilintilidir, bu nedenle ürün çıkış sıcaklığı matris aşınması ve matris performansı için de bir kistas olabilmektedir [71]. Bir diğer parametre ise sürtünmedir. Sürtünme, gerekli ekstrüzyon kuvvetini yükseltmekte, daha güçlü preslerin kullanılmasını gerekli kılmakta ve takım boyutlarının büyümesine neden olmaktadır [73,74].

APK üretiminde yaygın olarak kullanılan bir diğer teknoloji ise basınçlı kalıplamadır. Bu yöntemde, kalıplama tozu, pul, granül veya pelet formundaki malzemenin aynı anda ısıtılıp, belirli bir şekle sıkıştırıldığı sıcak presleme olarak da bilinmektedir [69]. İşlem sırasında, ısıtılmış bir kalıbın iki yarısı arasında deforme olabilen kompozit karışımı preslenip, soğuma veya kürleşmeden sonra kalıplanmış bir kompozite elde edilmektedir [74]. Basınçlı kalıplama prosesleri, otomotiv endüstrisi de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel sektörlerde çeşitli uygulamaların nedeni olan hem termoplastikler hem de termosetler için yüksek derecede otomasyon, kısa çevrim süreleri, iyi tekrar üretilebilirlik ve mükemmel boyutsal kararlılık sunması bakımından son derece avantajlı bir üretim yöntemidir [75]. Özellikle, termoset polimerlere kıyasla termoplastik polimerlerin kullanıldığı APK'lerin üretimi için bu yöntemin uygun olduğu kanıtlanmıştır. Çünkü bu yöntemde hammaddelerin, kontrollü basınç ile farklı katman yönelimlerinin böylece kalıplamadan sonra korunması sağlanabilmektedir [76].

Enjeksiyonlu kalıplama tekniği daha karmaşık kompozit malzeme şekillerinin ve geometrilerin üretilmesi için tercih edilen, bir başka APK üretim tekniğidir [77]. Bu yöntemde hammadde genellikle enjeksiyon kalıplama makinesine granüller halinde eklenir ve sıvı bir kütle halinde eritilir ve ardından yüksek basınç altında kalıba yerleştirilir. Enjeksiyonlu kalıplama, basınçlı kalıplamaya kıyasla ölçek ekonomisi, minimum bükülme ve çekme, yüksek işlev entegrasyonu olasılığı, geri dönüştürülmüş malzeme kullanım olasılığı ve neredeyse hiç son işlem gerektirmemesi gibi bir dizi avantaja sahiptir. Enjeksiyonlu kalıplama prosesleri düşük viskoziteyi korumak için düşük moleküler ağırlığa sahip bir polimerik yapı gerektirirken; ekstrüzyonda daha iyi erime mukavemeti için daha yüksek moleküler ağırlığa sahip polimerler kullanılabilir [76].

APK malzemeler için en uygun üretim yönteminin seçilmesi, nihai ürünün istenen özellikleri, üretim ölçeği, mevcut kaynaklar ve maliyet hususları dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlı olarak yapılmalıdır. Bu amaçla öncelikle ürünün gereksinimlerinin doğru bir şekilde tanımlanması, buna uygun olacak şekilde biyokütle ve polimerik fazların seçimi, en uygun katkı maddesi ile yapı-özellik ilişkisini sağlayacak optimum karışım oranlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Ardından, ekipman, işçilik, malzeme ve bakım maliyetleri dahil olmak üzere her bir üretim yönteminin maliyeti ve üretim ölçeği değerlendirilmelidir. Bu noktada, farklı üretim yöntemlerinin, nihai ürünün kalitesinde ve performansında farklılıklara neden olabileceği göz ardı edilmemelidir. Hedef malzeme üretiminde seçilen yöntemin ürün gereksinimlerini tamamen karşıladığından emin olmak için proses sırasında ölçümler testler yapılarak mekanik özellikler, dayanıklılık gibi hedeflenen malzeme özellikleri hakkında veri toplanması da ürün kalitesi bakımından son derece büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda, sürece ilişkin enerji tüketimi, atık üretimi ve emisyonlar dahil olmak üzere her bir üretim yönteminin çevresel etkisi de sürdürülebilirlik açısından önem taşımaktadır. Belirtilen faktörler, bir bütün olarak dikkatlice değerlendirilerek ve kapsamlı bir araştırma yaparak, hedef APK malzemeler için en uygun üretim prosesi seçimi yapılmalıdır.

#### 4. APK Malzemelerin Üretimindeki Güncel Gelişmeler, Fırsatlar ve Hedefler (Current Developments, Opportunities and Goals in the Production of WPC Materials)

APK malzemelerin tüm avantaj ve dezavantajları ele alındığında farklı malzeme gruplarının sinerjistik etkilerinin aynı yapı içerisinde basit bir şekilde son ürüne kazandırılabilmesi ve hedef uygulamaya yönelik tasarım esnekliğine sahip olması sebebiyle bu malzeme grubunun üretiminde kullanılabilecek yeni teknolojilere ve yoğunlaşılması gerekliliği göze çarpmaktadır. Örneğin modern üretim yöntemlerinin gelişmesiyle, birlikte ve sürekli ekstrüzyon, *in-situ* polimerizasyon, eklemeli imalat gibi yenilikçi üretim

tekniklerindeki gelişmeler, fonksiyonel APK malzemelerin daha verimli ve uygun maliyetli üretimi ile sonuçlanabilir. Ayrıca bu üretim yöntemlerinin mevcut endüstriyel süreçlere dahil edilmesi ile ürünlerin performans ve yapı özellikleri de artırılabilir gibi süreçteki zaman ve maliyet kaybının önüne geçebilir.

APK malzeme sektörünün güncel durumu ve gelecekteki eğilimleri daha doğru bir şekilde anlamak için polimer bilimindeki en son araştırmalardan ve endüstriyel gelişmelerinden haberdar olmak büyük önem taşımaktadır. APK malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi için yoğun deneysel test ve analizlerin yanı sıra, modelleme ve simülasyon tekniklerinin de paralel bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Malzeme karakterizasyonu çalışmalarında ahşap ve plastik bileşenlerin ayrı ayrı ve kompozit içindeki davranışlarını belirleyebilmek için mekanik, termal ve fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi için çeşitli testler yürütülmelidir. Bu testlerde mekanik özellikler (çekme dayanımı ve modülü, eğilme dayanımı ve modülü, sıkıştırma dayanımı, darbe dayanımı vb.), termal özelliklerin yanı sıra (termal bozunma, termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı vb.) malzemenin kullanım amacına göre çeşitli fiziksel özellikler (yoğunluk, nem içeriği, su emme davranışı, kalınlık şişme oranı, elektriksel iletkenlik, vb.) ve farklı kimyasal ortamlardaki davranışı ve mikroyapısı da incelenmektedir. Ayrıca nihai ürünün alev dayanımı, UV dayanımı, fungal ve insektisit dayanımı ve hızlandırılmış yaşlandırma testleri de farklı dış uyaranlara, çevresel faktörlere ve zamana göre malzeme performansını tahmin etmek için kullanılabilir [79-83]. Bu noktada, hedef amaca yönelik en iyi kompozit formülasyonlarının belirlenmesi de kritik öneme sahiptir. Örneğin, en uygun ahşap/polimer oranının belirlenmesi, ürün içerisinde kullanılacak yeni katkı maddelerinin geliştirilmesi, sentezi ve kompozit içindeki uygun dağılımı sağlayabilecek teknolojilerin belirlenmesi de bu malzemelerin sürdürülebilirlik avantajlarını korumanın yanı sıra malzeme performansını ve kullanım ömrünü artıracaktır. Özellikle nanoteknoloji alanındaki son gelişmelere paralel olarak nano boyutlu katkıların üretim sürecine dahil edilmesi, çok daha gelişmiş mekanik özelliklere, boyutsal kararlılığa ve bozulmaya karşı dirençli kompozitlerin üretilmesine neden olacaktır.

Yapay zekâ temelli tahminlemeler ile inovatif teknolojilerin de üretim sürecine entegrasyonu ile gelişmiş işlevselliğe, benzersiz estetik özelliklere ve iyileştirilmiş dayanıklılığa sahip ürünler elde edilecektir. Özellikle sonlu elemanlar analizi farklı yüklem koşulları altında APK malzemelerin yapısal davranışını tahmin etmek için kullanılabilir uygun bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, özellikle kompozit malzemenin tasarımın güç, sertlik ve dayanıklılık açısından optimize edilmesine yardımcı olur ve yorulma davranışı ile malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı verilecek tepkilerin öngörülmesine olanak sağlar [84-88]. Bu konuda yürütülen çalışmalar temelde matris ve takviyenin özelliklerini girdi olarak atayarak son kompozit malzemenin belirli özelliklerini matematiksel olarak hesaplanabilmesi esasına dayanır. Temsili hacim elemanları yöntemi, mikro yapıların kompozit özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için sonlu elemanlar analizinde kullanılan en popüler çok ölçekli kurucu yöntem olarak göze çarpmaktadır. Analiz sonucunda yüksek doğrulukta ve optimize edilmiş sonuçlar elde edilerek ürün geliştirme süresi azaltılarak ve nihai ürünün kullanım ömrü artırılabilir. ANSYS, SDRC/IDEAS, NASTRAN/PATRAN, HYPERMESH, LS DYNA, ABAQUS, SIEMENS PLM NX, NISA, COMSOL, KEBIR gibi yazılım paketleri bu analizde kullanılabilir işlevsel araçlar olarak öne çıkmaktadır. [88, 89]. Modelleme aşamasında ise çok ölçekli modelleme veya yapısal modelleme yaklaşımları uygulanabilir. Çok ölçekli modelleme yaklaşımında ahşap parçacıklarının genel malzeme özellikleri üzerindeki mikroskobik düzeydeki etkisini yakalamak için kompozitlerin mikro ve makro ölçeklerini dikkate alan modeller geliştirilirken, yapısal modellemede APK malzemelerin çeşitli koşullar altında malzeme davranışını tanımlamak için matematiksel modelleri kullanılarak hem ahşap hem de plastik bileşenler için gerçekçi modeller kurulur. Ardından optimizasyon araçları ve yöntemleri ile belirli performans kriterleri için en iyi parametre kombinasyonunu bulmak amacıyla simülasyon sonuçları optimizasyon algoritmalarıyla birleştirilir ve iyileştirilmiş performans özelliklerine sahip APK malzemelerin geliştirilmesini kolaylaştırılır. Ayrıca malzeme üretim süreçlerine ilişkin giriş parametrelerine dayalı olarak APK özelliklerine yönelik tahmine dayalı modeller geliştirmek için makine öğrenimi algoritmaları ve veri analitiği çalışmaları da ürün geliştirme sürecinde optimizasyon ve verimliliğe önemli katkılar sağlayacaktır [90-93]. Böylece yeni ürünlere ve hali hazırda pazarda mevcut olan ürünlere tasarım ve uygulama esnekliği gibi avantajlar sağlanacaktır. Sonuç olarak, gelecekteki sektörel eğilimler, malzeme talebi de ahşap plastik malzemelerin daha yenilikçi tasarımını destekleyecektir.

Küresel olarak sürdürülebilirliğe yönelik eğilim, muhtemelen daha da sürdürülebilir ham maddelerin kullanımını şüphesiz ki destekleyecektir. Bu noktada birincil ve geri dönüştürülmüş hammaddelere ait özelliklerin üretim öncesinde doğru bir şekilde belirlenebilmesi ve hatta son tüketiciden kaynakların tekrar toplanarak üretim sürecine geri dönüştürülmesi gibi çabalar, hammadde bağımlılığı azaltmak ve ürünlerin çevresel etkisini azaltmak noktasında odaklanılması gereken bir nokta olarak göze çarpmaktadır. Bu noktada, hedef malzemeye ait yapısal özellikler ile hammadde ve geri dönüştürülmüş olası hammadde akımlarının sürdürülebilir şekilde tedarikinin sağlanması için geliştirilebilecek ağlar ve bu konuda yapılacak ekonomik ve çevresel analiz uygulamaları önemli bir yere sahip olacaktır. Ayrıca kompozit üreticileri, döngüsel bir ekonomi yaklaşımını teşvik ederek, bu ürünlerinin kolay sökülüp geri dönüştürülecek şekilde tasarlandığı kapalı devre sistemler geliştirmeye odaklanabilir. APK malzeme yelpazesi genişledikçe, üreticilerin de daha sürdürülebilir sistemlere yönelmesi ve bu konuda son kullanıcıları da sürece dahil etmesi beklenilmektedir. Geri dönüştürülmüş ahşap ve geri dönüştürülmüş plastik kullanarak sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunulmasının yanı sıra, nihai ürünün kullanım ömrünün artırılması da başlıca odaklanılan noktalardan biri olarak göze çarpmaktadır. Bu noktada sürdürülen araştırma ve geliştirme çalışmaları APK'lerin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olup dayanıklılığın, çürümeye karşı direncin ve yangına dayanımının artırılması çalışmaların başlıca odak noktaları olarak sıralanabilmektedir. Bu nedenle çevresel etki ve ürün güvenliğine ilişkin düzenleyici standartların tam anlamıyla belirlenmesi ve karşılanması önemli bir hedeftir.

## 5. Değerlendirme (Conclusion)

APK malzemeler, çevresel ve ekonomik yönlerden avantajlar sunan fonksiyonel kompozit malzemeler olup, ticari uygulamalarda hem polimer malzemelere hem de ahşaba oranla pek çok avantajı bünyesinde barındıracak şekilde tasarlanabilmektedirler. Ayrıca uygun üretim yöntemleriyle elde edilen APK malzemeleri hedeflenen kullanım alanına göre sahip olacağı üstün özellikler, farklı son işlemler veya katkı maddeleri ile de geliştirilebilmektedir. Bu malzemelerin bileşim ve üretim koşullarının hedef uygulamaya göre optimizasyonu ile, geleneksel polimer matris kompozitlerin üretiminde gözlemlenen çevresel etkilerin (küresel ısınma, hammadde ve enerji kullanımı, asidifikasyon, toksisite, kimyasal duman oluşumu, ozon tabakası incilmesi ve ötrofikasyon gibi) azaltılarak, daha ekolojik bir üretim yaklaşımı sunması mümkündür. Bu konuda yürütülen araştırmalar APK malzemelere olan ilgiyi her geçen gün arttırmasına rağmen, daha sürdürülebilir üretim yöntemleri ve hammadde kaynaklarının farklı kombinasyonlarının kullanılmasını içeren süreçlerin, malzeme performansları ve ekonomik ömür gibi kıstasları da göz önünde bulundurularak, bütünlük bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

## Teşekkür (Acknowledgment)

Destekleri için Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne (Proje no: 2022-01.BŞEÜ.03-07) teşekkür ederiz.

## Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

## Kaynaklar (References)

- [1] T. W. Clyne and D. Hull, *An introduction to composite materials*, 3<sup>rd</sup> Edition, UK: Cambridge University Press, 2019.
- [2] A. Thule and R. Shanks, *Natural fibre composites: materials, processes and properties*, USA: Woodhead Publishing, 2014.
- [3] H. Ehrlich, D. Janussen, P. Simon, V. V. Bazhenov, N. P. Shapkin, C. Erler, M. Mertig, R. Born, S. Heinemann, T. Hanke and H. Worch, "Nanostructural organization of naturally occurring composites—part II: silica-chitin-based biocomposites," *Journal of*

*Nanomaterials*, vol. 2008, pp. 1-8, February 2008. doi:10.1155/2008/670235

[4] S. Kangishwar, N. Radhika, A.A. Sheik, A. Chavali and S. Hariharan, "A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application," *Polymer Bulletin*, vol.80, pp.47-87, January 2022. doi:10.1007/s00289-022-04087-4

[5] D. K. Hale, "The physical properties of composite materials," *Journal of Materials Science*, vol.11, pp. 2105-2141, November 1976. doi:10.1007/PL00020339

[6] G. Özsin, M. Kılıç, Ç. Kırbıyık Kurukavak, E. Varol, "Thermal Characteristics, Stability, and Degradation of PVC Composites and Nanocomposites," in: H. A. Sabu, T. (eds) Poly(Vinyl Chloride) Based Composites and Nanocomposites. Engineering Materials. Cham, Switzerland: Springer, 2024.

[7] D. Kumlutaş, İ.H. Tavman and M. Turhan Çoban, "Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp. 113-117, January 2003. doi:10.1016/S0266-3538(02)00194-X

[8] S. Dixit, R. Goel, A. Dubey, P. R. Shivhare and T. Bhalavi, "Natural fibre reinforced polymer composite materials-A review," *Polymers from Renewable Resources*, vol.8, pp. 71-78, May 2017. Doi: 10.1177/204124791700800203

[9] D. K. Rajak, D. D. Pagar, R. Kumar, and C. I. Pruncu, "Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials," *Journal of Materials Research and Technology*, vol.8, pp.6354-6374, November 2019. doi:10.1016/j.jmrt.2019.09.068

[10] A.K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar and R. Rimašauskienė, "Matrix materials used in composites: A comprehensive study," *Materials Today: Proceedings*, vol.21, pp.1559-1562, November 2020. doi:10.1016/j.matpr.2019.11.086

[11] M. De Araújo, "Natural and man-made fibres: physical and mechanical properties. In Fibrous and composite materials for civil engineering applications," USA: Woodhead Publishing, 2014.

[12] D. C. Davis, J. W. Wilkerson, J. Zhu and D. O. Ayewah, "Improvements in mechanical properties of a carbon fiber epoxy composite using nanotube science and technology," *Composite Structures*, vol.92, pp.2653-2662. October 2010. doi:10.1016/j.compstruct.2010.03.019

[13] S. S. Wicks, R. G.de Villoria, and B. L. Wardle, "Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes," *Composites Science and Technology*, vol.70, pp.20-28, January 2010. doi:10.1016/j.compscitech.2009.09.001

[14] R. Teti, "Machining of Composite Materials," *CIRP Annals*, vol.51, pp. 611-634, July 2002. doi:10.1016/S0007-8506(07)61703-X

[15] E. Omanović-Miklićanin, A. Badnjević, A., A. Kazlagić and M. Hajlovac, "Nanocomposites: A brief review," *Health and Technology*, vol.10, pp.51-59, January 2020. doi:10.1007/s12553-019-00380-x

[16] Singh, S. and Singh, S., *Fabrication and Machining of Advanced Materials and Composites*, USA: CRC Press, 2022.

[17] B. C. Ray, "Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 298, pp. 111-117, June 2006. doi:10.1016/j.jcis.2005.12.023

[18] M. Mukherjee, C.K. Das and A.P. Kharitonov, "Fluorinated and oxyfluorinated short Kevlar fiber-reinforced ethylene propylene polymer," *Polymer Composites*, vol.27, pp. 205-212, March 2006. doi:10.1002/pc.20195

[19] S.D. Thoppul, J. Finegan, and R.F. Gibson, "Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures – A review," *Composites Science and Technology*, vol.69, pp. 301-329, March 2009. doi:10.1016/j.compscitech.2008.09.037

[20] M. R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell, and K.D. Potter, "Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer-matrix composite structures," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol.37, pp.522-529. April 2006. doi:10.1016/j.compositesa.2005.05.019,

[21] M. Kutz, *Mechanical Engineers' Handbook*, NJ: Wiley 2015.

[22] S. K. Najafi, "Use of recycled plastics in wood plastic composites–A review," *Waste management*, vol.33, pp. 1898-1905, September 2013. doi:10.1016/j.wasman.2013.05.017

[23] M. J. Taufiq, M.R. Mansor, and Z. Mustafa, "Characterisation of wood plastic composite manufactured from kenaf fibre reinforced recycled-unused plastic blend," *Composite Structures*, vol.189, pp. 510-515, April 2018. doi:10.1016/j.compstruct.2018.01.090

- [24] K. Karakuş, "Üniversitemizdeki polietilen ve polipropilen atıkların polimer kompozit üretiminde değerlendirilmesi," MSc. Dissertation, Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Kahramanmaraş, Türkiye, 2008.
- [25] A. Ashori, "Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!" *Bioresource Technology*, vol.99, pp. 4661-4667, July 2008. doi:10.1016/j.biortech.2007.09.043
- [26] Fortune Business Insights. "Wood Plastic Composite Market Size, Share & Industry Analysis, By Material (Polyethylene, Polypropylene, Polyvinyl Chloride and Others), By Application (Decking, Automotive, Sliding & fencing, Technical Application, Furniture, Consumer Goods and Others), and Regional Forecast, 2020-2027". Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/enquiry/request-sample-pdf/wood-plastic-composite-market-102821>. [Accessed: December 12, 2022].
- [27] Precedence Research. "Wood plastic composites". Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-plastic-composites-market>. [Accessed: December 7, 2022].
- [28] Google Analytics. "Google Analytics 2023". Available: <https://analytics.google.com/analytics/web/>. [Accessed: December 10, 2023].
- [29] Google Patents, "Google Patents 2023. Available: <https://www.google.com/patents>. [Accessed: December 14 2023].
- [30] Clarivate, "Web of Science 2022". 2023, Available: <https://clarivate.com/>. [Accessed: December 14 2023].
- [31] Y. Feng, H. Hao, H. Lu, C. L. Chow, and D. Lau, "Exploring the development and applications of sustainable natural fiber composites: A review from a nanoscale perspective," *Composites Part B: Engineering*, vol. 276, pp.111369, May 2024. doi:10.1016/j.compositesb.2024.111369
- [32] G. Martins, F. Antunes, A. Mateus, A. and C. Malça, "Optimization of a wood plastic composite for architectural applications," *Procedia Manufacturing*, vol.12, pp.203-220, September 2017. doi:10.1016/j.promfg.2017.08.025
- [33] A. Jacob, "WPC industry focuses on performance and cost," *Reinforced Plastics*, vol. 50, pp. 32-33, May 2006. doi:10.1016/S0034-3617(06)71010-4
- [34] A.K., Bledzki, P. Franciszczak, Z. Osman, and M. Elbadawi, "Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute, and kenaf fibers," *Industrial Crops and Products*, vol.70, pp.91-99, August 2015. doi:10.1016/j.indcrop.2015.03.013
- [35] L. Kristak, I. Kubovský, and R. Réh, "New challenges in wood and wood-based materials," *Polymers*, vol. 13, pp.1-5, July 2021. doi:10.3390/polym13152538
- [36] A. Gubana, and M. Melotto, "Experimental tests on wood-based in-plane strengthening solutions for the seismic retrofit of traditional timber floors," *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 290-299, December 2018. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.177
- [37] G. Pritchard, "Two technologies merge: wood plastic composites," *Plastics, Additives and Compounding*, vol.6, , pp. 18-21, July 2004. doi:10.1016/S1464-391X(04)00234-X
- [38] M. Asif, "Sustainability of timber, wood and bamboo in construction, in Sustainability of Construction Materials," Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2009.
- [39] A. Faik, "Plant Cell Wall Structure-Pretreatment," the Critical Relationship in Biomass Conversion to Fermentable Sugars. In: Green Biomass Pretreatment for Biofuels Production" Dordrecht, Holland: Springer, 2013.
- [40] D. N. S. Hon and N. Shiraiishi, "Wood and Cellulosic Chemistry Revised, and Expanded". London, UK: CRC Press, 2000.
- [41] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 37-46, May 2002. doi:10.1016/S0960-8524(01)00118-3
- [42] F.X. Collard, and J. Blin, "A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 594-608, October

2014. doi:10.1016/j.rser.2014.06.013

[43] B. Yuca, Ş. Kurt., M. Korkmaz and S. Aysal, "Determination of the influence of some boric acid added adhesives on combustion properties of beech wood," *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, vol.14, pp. 182-190, March 2014.

[44] A. A. Klyosov, "Wood-plastic composites". New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

[45] M. Akter, M. H. Uddin, and H. R. Anik "Plant fiber-reinforced polymer composites: a review on modification, fabrication, properties, and applications," *Polymer Bulletin*, vol. 81, pp. 1-85, February 2024. Doi:10.1007/s00289-023-04733-5

[46] R. Prem Kumar, M. Muthukrishnan and A. Felix Sahayaraj, "Effect of hybridization on natural fiber reinforced polymer composite materials—A review," *Polymer Composites*, vol. 44, pp.4459-4479, February 2023. doi:10.1002/pc.27489

[47] M. S. Mendis, P.A.U. Ishani, and R.U. Halwatura, "Impacts of chemical modification of wood on water absorption: a review," *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, vol.20, pp. 73-88, March 2023. doi:10.1007/s13196-023-00309-y

[48] P. Niemz, A. Teischinger, D. Sandberg. "Springer handbook of wood science and technology," Heidelberg, Germany: Springer, 2023.

[49] E. Sarioğlu, E.A.Turhan, S. Karaz, B. Bengü, A. Biçer, T. Yarıcı, C. Erkey and E. Senses, E., "A facile method for cross-linking of methacrylated wood fibers for engineered wood composites," *Industrial Crops and Products*, vol. 193, p.116296, March 2023. doi:10.1016/j.indcrop.2023.116296

[50] Y. Mohd Aref, R. Othaman, F. H. Anuar, K. Z. K. Ahmad, and A. Baharum, "Superhydrophobic modification of *Sansevieria trifasciata* natural fibres: a promising reinforcement for wood plastic composites," *Polymers*, vol.15, 1-15, January 2023. doi:10.3390/polym15030594

[51] R Maguteeswaran, P. Prathap, S. Satheeshkumar and S. Madhu, "Effect of alkali treatment on novel natural fiber extracted from the stem of Lankaran acacia for polymer composite applications," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 14, pp.8091-8091, April 2023. doi:10.1007/s13399-023-04189-7

[52] M. Johansson, M. Skrifvars, N.Kadi, and H. N. Dhakal, "Effect of lignin acetylation on the mechanical properties of lignin-poly-lactic acid biocomposites for advanced applications," *Industrial Crops and Products*, vol.202, pp. 117049, October 2023. doi:10.1016/j.indcrop.2023.117049

[53] Y Liu, L. Guo, W. Wang, Y. Sun and H. Wang, "Modifying wood veneer with silane coupling agent for decorating wood fiber/high-density polyethylene composite," *Construction and Building Materials*, vol. 224, pp.691-699. November 2019. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.090

[54] W. Harnnarongchai, J. Kaschta, D.W. Schubert, D. W. N. Sombatsompop, "Shear and elongational flow properties of peroxide-modified wood/low-density polyethylene composite melts," *Polymer composites*, vol. 33, pp. 2084-2094, October 2012. doi:10.1002/pc.22351

[55] J. K. Kim and K. Pal, "Recent advances in the processing of wood-plastic composites," Heidelberg, Holland: Springer, 2010.

[56] E. Yilmaz, "Çinko borat maddesinin odun plastik kompozitlerde antifungal etkisinin incelenmesi," Msc. dissertation, Kahramanmaraş Sütçü İmam University., Kahramanmaraş, Türkiye, 2018.

[57] G. Yilmaz, "Termal işlem uygulanmış mısır saplarından üretilen odun plastik kompozitlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri," Msc. dissertation, Düzce University., Düzce, Türkiye, 2020.

[58] M. Z. Khan, S. K. Srivastava and M. K. Gupta, "A state-of-the-art review on particulate wood polymer composites: Processing, properties and applications," *Polymer Testing*, vol. 89, pp.106721, September 2020. doi:10.1016/j.polymertesting.2020.106721

[59] S. K. Najafi, "Use of recycled plastics in wood plastic composites – A review," *Waste Management*, vol.33, pp. 1898-1905, September 2013, doi:10.1016/j.wasman.2013.05.017

[60] A. Kaymakçı, N. Ayrılmış and T. Akbulut, "Dış cephe kaplamalarına ekolojik bir yaklaşım: ahşap polimer kompozitler" in 7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu, April 3-4, 2014. İstanbul, Türkiye [Online]. Available: [https://catider.org.tr/pdf/sempozyum7/8\\_%20Bildiri%20kaymakci.pdf](https://catider.org.tr/pdf/sempozyum7/8_%20Bildiri%20kaymakci.pdf) [Accessed: 12 June. 2023].

[61] M. Y. Çelik and E. Kılıç, "Bitkisel Kaynaklı Biyopolietilenin Biyokompozit Üretiminde ve Polimer Karışımlarında Kullanımı,"

*Journal of Textile Engineering*, vol.27, pp. 197-215, September 2020. doi:10.7216/1300759920202711908

- [62] J. Chen, Y. Wang, C. Gu, J. Liu, Y. Liu, M. Li, and Y. Lu, "Enhancement of the mechanical properties of basalt fiber-wood-plastic composites via maleic anhydride grafted high-density polyethylene (MAPE) addition," *Materials*, vol.6, pp.2483-2496, June 2013. doi:10.3390/ma6062483
- [63] Y. Kazemi, A. Cloutier, and D. Rodrigue, "Mechanical and morphological properties of wood plastic composites based on municipal plastic waste," *Polymer composites*, vol.34, pp. 487-493, March 2013. doi:10.1002/pc.22442
- [64] R. M. Rowell, "Advances and challenges of wood polymer composites," in Proceedings of the 8<sup>th</sup> Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium, November 20-23, 2006, USA [Online]. Available: [https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2006/fpl\\_2006\\_rowell001.pdf](https://www.fpl.fs.usda.gov/documnts/pdf2006/fpl_2006_rowell001.pdf) [Accessed: 10 June. 2024].
- [65] A. H. Elsheikh, H. Panchal, S. Shanmugan, T. Muthuramalingam, A.M El-Kassas and B. Ramesh, "Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 8, pp. 100450, June 2022. doi:10.1016/j.clet.2022.100450
- [66] N. Ayrilmis, S. Jarusombuti, V. Fueangvivat, and P. Bauchongkol, "Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 96, pp. 818-822, May 2011. doi:10.1016/j.polydegradstab.2011.02.005
- [67] P. H. G. Cademartori, P. S., dos Santos, L. Serrano, J. Labidi and D. A. Gatto, "Effect of thermal treatment on physicochemical properties of Gympie messmate wood," *Industrial Crops and Products*, vol. 45, pp. 360-366. February 2013. doi:10.1016/j.indcrop.2012.12.048
- [68] J. Follrich, U. Mueller, W. Gindl, and N. Mundigler, "Effects of long-term storage on the mechanical characteristics of wood plastic composites produced from thermally modified wood fibers," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol.23, pp.845-853, May 2010. doi:10.1177/0892705710369042
- [69] T. Jiang, G. Zeng, and C.Hu, "Fabrication of highly filled wood plastic composite pallets with extrusion-compression molding technique," *Polymer Composites*, vol. 41, pp. 2724-2731, March 2020. doi:10.1002/pc.25570
- [70] D. J. Gardner, Y. Han and L. Wang, "Wood-Plastic Composite Technology," *Current Forestry Reports*, vol 1, pp. 139-150, June 2015. doi:10.1007/s40725-015-0016-6
- [71] S. Das, A.K. Saha, P. K. Choudhury, R. K. Basak, B. C. Mitra, T. Todd, S. Lang and R.M Rowell, "Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite," *Journal of Applied Polymer Science*, 76, pp.1652-1661, March 2000. doi:10.1002/(SICI)1097-4628(20000613)76:11<3C1652::AID-APP6>3E3.0.CO;2-X
- [72] H. Bayram, "Ekstrüzyon yönteminde sıcaklık, ekstrüzyon hızı ve sürtünme parametrelerinin profil kalitesine etkisinin araştırılması," PhD.dissertation, Yıldız Teknik University., İstanbul, Türkiye, 2008.
- [73] A. Gallos, G. Paës, F. Allais and J. Beaugrand, "Lignocellulosic fibers: a critical review of the extrusion process for enhancement of the properties of natural fiber composites," *RSC Advances*, vol.7, pp. 34638-34654, July 2017. doi:10.1039/C7RA05240E,
- [74] A. K. Pal, A. K. Mohanty and M. Misra, "Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: recent developments and future prospective," *RSC Advances*, vol.11, pp.36398-36438, November 2021. doi:10.1039/D1RA04060J
- [75] Mitschang, P. and K. Hildebrandt, "Polymer and composite moulding technologies for automotive applications, in *Advanced Materials in Automotive Engineering*," USA: Woodhead Publishing, 2012.
- [76] O. Faruk and A. K. Bledzki, "Wood plastic composite: present and future in Wiley Encyclopedia of Composites," 2<sup>nd</sup> Edition, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- [78] S. S. Raj, "Wood-plastic composite processing and mechanical characteristics—a brief literature review in *Recent Advances in Manufacturing, Automation, Design and Energy Technologies*," Singapore: Springer, 2021.
- [78] M. Chandrasekar, K. Senthilkumar, T. S. M. Kumar, R. Sabarish and S. Siengchin, "Morphological characterization of the wood polymer composites in *Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications*," Singapore: Springer, 2021.
- [79] R. Gogoi and G. Manik, "Mechanical properties of wood polymer composites," in *Wood Polymer Composites: Recent Advancements and Applications*" Singapore: Springer, 2021.



- [80] J. S. Neto, H. F. de Queiroz, R. A. Aguiar and M.D. Banea, "A review on the thermal characterisation of natural and hybrid fiber composites," *Polymers*, vol.13, pp.4425, December 2021. doi:10.3390/polym13244425
- [81] N. Nurazzi, M. R. M. Asyraf, M. Rayung, M. N. F. Norrrahim, S.S. Shazleen, M. S. A. Rani, A. R. Shafi, H. A. Aisyah, M. H. M. Radzi, F. A. Sabaruddin, and R. A. Ilyas, "Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments," *Polymers*, vol.13, pp.2710, August 2021. doi:10.3390/polym13162710
- [82] M. R. Sanjay, P. Madhu, M. Jawaid, P. Sentharamaikkannan, S. Senthil and S. Pradeep, "Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 566-581, January 2018. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.101
- [83] E. Soury, A.H. Behraves, E.R. Esfahani, and A. Zolfaghari, "Design, optimization and manufacturing of wood-plastic composite pallet," *Materials & Design*, vol.30, pp. 4183-4191, December 2009. doi:10.1016/j.matdes.2009.04.035
- [84] P. Mackenzie-Helnwein, J. Eberhardsteiner and H.A. Mang, "A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis of structural details," *Computational Mechanics*, vol. 3, pp. 204-218, May 2003. doi: 10.1007/s00466-003-0423-6
- [85] K. Aldaş and F. Şen, "Karma bağlantılı kompozit plaklarda farklı sıcaklıklar etkisiyle oluşan gerilmelerin analizi," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol.3, pp.21-30, June 2012.
- [86] T. Dursun and M. Özbay, "Tabakalı kompozit levhalarda hasar ilerleme modellemesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol.23, pp. 65-69, August 2008.
- [87] M. Alhijazi, Q. Zeeshan, Z. Qin, B. Safaei and M. Asmael, "Finite element analysis of natural fibers composites: A review," *Nanotechnology Reviews*, vol.9, pp. 853-875, September 2020. doi:10.1515/ntrev-2020-0069
- [88] J. Naveen, M. Jawaid, P. Amuthakkannan, M. Chandrasekar, "Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composites in Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites," USA: Woodhead Publishing, 2019.
- [89] A. Mujtaba, F. Islam, P. Kaeding, T. Lindemann, B. Gangadhara Prusty, "Machine-learning based process monitoring for automated composites manufacturing," *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-16, December 2023. doi:10.1007/s10845-023-02282-2
- [90] Altarazi, S., R. Allaf, and F. Alhindawi, "Machine Learning Models for Predicting and Classifying the Tensile Strength of Polymeric Films Fabricated via Different Production Processes," *Materials*, vol.12, pp.1475, May 2019. doi:10.3390/ma12091475
- [91] C. Joo, H. Park, H. Kwon, J. Lim, E. Shin, H. Cho, and J. Kim, "Machine learning approach to predict physical properties of polypropylene composites: Application of MLR, DNN, and random forest to industrial data," *Polymers*, vol.14, pp.3500, August 2022. doi:10.3390/polym14173500
- [92] A. Sharma, T. Mukhopadhyay, S.M. Rangappa, S. Siengchin, and V. Kushvaha, "Advances in computational intelligence of polymer composite materials: machine learning assisted modeling, analysis and design," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol.29, pp.3341-3385, January 2022. doi:10.1007/s11831-021-09700-9

This is an open access article under the CC-BY license

