

Atıf İçin: Avcı A, Akdoğan Eker A, Bodur MS, 2021. Yeşil Kompozit Malzemelerin Performans Özellikleri ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(4): 3035-3054.

To Cite: Avcı A, Akdoğan Eker A, Bodur MS, 2021. A Review Of Performance Of Green Composites And Using In Automotive Industry. Journal of the Institute of Science and Technology, 11(4): 3035-3054.

Yeşil Kompozit Malzemelerin Performans Özellikleri ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı

Ali AVCI^{1,2,*}, Ayşegül AKDOĞAN EKER², Mehmet Safa BODUR³

ÖZET: Son zamanlarda, küresel ısınma, çevre kirliliği ve petrolün tükenme olasılığı gibi nedenlerden dolayı yenilenebilir kaynaklardan elde edilen malzemelerin kullanımı hakkında ciddi bir farkındalık oluştu. Kompozit malzemelerin doğal malzemelerden üretilmesi ile kompozitlerin üretiminden kullanım ömrünün sonuna kadar geçen süreçte karbon ayak izinde ve sera gazı salınımlarında önemli bir azalma meydana geldi. Ayrıca otomotiv sektöründe doğal kaynaklardan üretilen yeşil kompozitlerin kullanımı maliyetlerde azalma, araçta hafiflik ve yakıt tasarrufu sağladı. Yeşil kompozitler, sürdürülebilirlik, biyolojik olarak ayrışabilme, yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül modül gibi özellikleri nedeniyle yapı, havacılık, otomotiv, spor, ambalaj ve benzeri alanlarda hâlihazırda kullanılan kompozitlere iyi bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, yeşil kompozitlerin matris ile doğal lifler arasında zayıf arayüzey bağının, yüksek nem emiliminin, düşük yanma dayanımının, düşük darbe dayanımının ve nispeten düşük dayanımın hala geliştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada, araştırmacıların bu özellikleri geliştirmek için yapmış oldukları yayınlar irdelenmiş olup özet şeklinde verilmiştir. Literatürde yeşil kompozitin arayüzey bağını kuvvetlendirmek için uygulanan çeşitli kimyasal veya fiziksel iyileştirme işlemleri yapıldığı ve yanma dayanımı için katkı malzemeleri kullanıldığı görülmüştür. Yeşil kompozitlerin otomotiv parçalarında hali hazırda kullanımına BMW, Ford, Renault ve Volvo gibi tanınmış otomobil markalarının ön kapı konsolu (1.2–1.9 kg), arka kapı konsolu (0.8–1.6 kg) ve bagaj konsolu (1.5–2.5 kg) örnek olarak verilebilir. 2021'den itibaren, yeni otomobiller için AB genelinde ortalama salınım hedefi 95 g CO₂ km⁻¹ olacaktır. Bu salınım seviyesi ise, yaklaşık olarak 100 km'de 4.1 l benzin veya 3.6 l dizel yakıt tüketimine karşılık gelmektedir. Yeşil kompozitlerin kullanımı araçların yakıt tüketimini azaltarak CO₂ salınımını önemli oranda düşürecektir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Kompozitler, Otomotiv Sanayi, Mekanik Özellikler

A Review Of Performance Of Green Composites And Using In Automotive Industry

ABSTRACT: Recently, there has been a serious awareness about the use of materials derived from renewable resources due to reasons such as global warming, environmental pollution and the possibility of running out of oil. With the production of composite materials from natural sources, there has been a significant reduction in carbon footprint and greenhouse gas emissions from the production of composites to the end of their useful life. In addition, the use of environmentally friendly composites produced from natural resources in the automotive industry has reduced costs, lightened the vehicle and reduced fuel consumption. Green composites emerge as a good alternative to the composites currently used in construction, aerospace, automotive, sports, packaging and, similar fields due to their features such as sustainability, biodegradability, high specific strength and specific modulus. However, the weak interfacial bond of the green composites between the matrix and the natural fibers, high moisture absorption, flammability at relatively low temperatures, low impact resistance and relatively poor strength must be further improved. In the study, the work carried out by researchers to improve these characteristics was reviewed and presented as a summary. The studies showed that different modification processes were applied to enhance the interfacial bond of the green composite and that additives were used for fire resistance. The aim of the study is to provide up-to-date information about the mechanical of green composites, their production methods, and their place in the automotive industry. The green composites provide weight loss in automotive parts is between 1.2–1.9 kg in the front door console, 0.8–1.6 kg in the rear door console and 1.5–2.5 kg in the trunk console of well-known car brands such as BMW, Ford, Renault and Volvo. Average gas emission target for new cars will be 95 g CO₂ km⁻¹ after 2021 in the EU. Using light weight green composites will significantly decrease the fuel consumption of vehicles consequently total car CO₂ emissions reduce as well.

Keywords: Green Composites, Automotive Industry, Mechanical Properties

^{1,2}Ali AVCI ([Orcid ID: 0000-0003-3901-6248](https://orcid.org/0000-0003-3901-6248)), Hakkari Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hakkari, Türkiye

²Ayşegül AKDOĞAN EKER ([Orcid ID: 0000-0003-0212-9230](https://orcid.org/0000-0003-0212-9230)), Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³Mehmet Safa BODUR ([Orcid ID: 0000-0001-5976-0256](https://orcid.org/0000-0001-5976-0256)), Yeditepe Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ali AVCI, e-mail: aliavci05@gmail.com

Bu Çalışma Ali Avcı'nın Doktora Tezinden Üretilmiştir.

GİRİŞ

Son yıllarda, plastiğin çevreye verdiği zarar, petrol kaynaklarının tükenme olasılığı ve çöp depolama alanlarının kontrol edilemez artışı gibi nedenlerden dolayı çevre dostu polimer ve kompozitlerin endüstriyel uygulamalarda kullanımı artmıştır. Çevre felaketlerinin artması ve küresel ısınma hükümetleri yeşil, doğa dostu malzemelerin kullanılması için rol almaya zorlamaktadır. Bu nedenle, biyobozunur malzemelerin geliştirilmesi ve endüstriyel olarak kullanımı hem araştırmacıların hem de sanayi kuruluşlarının ilgisini tekrardan çekmeye başlamıştır. Doğal lif takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler ve biyopolimerler; sürdürülebilir kaynaklardan elde edilmiş çevre dostu malzemelerdir. Keten, kenevir, hint keneviri, harakeke ve sabır ağacı gibi doğal lifler tamamen biyobozunur olmaları, kolayca geri dönüşebilmeleri ve sentetik liflere nazaran karbon salınımlarının çok düşük olmasından dolayı sentetik liflerin yerine kullanılmaya başlanmıştır. Dahası bu lifler, düşük sera gazı salınımı, düşük zehirli gaz salınımları, kazanım maliyetlerinin düşük olması ve petrole bağımlılığı azaltma gibi önemli avantajları vardır. Maliyet açısından bakıldığında, doğal liflerin tonu yaklaşık olarak 200 dolar iken cam liflerin tonu 1200-1800 dolar, karbon liflerin tonu ise 12500 dolardır. Doğal liflerin üretimi için gerekli olan enerji sarfiyatı da oldukça düşük olup, yaklaşık 4 Gigajoule (GJ)'dür. Bu değer cam lifler için yaklaşık 30 GJ, karbon lifler için ise 130 GJ'dir (Huda ve ark., 2008). Yeşil kompozitler kendini yenileyebilen, sürdürülebilir kaynaklardan gelmeleri, düşük yoğunluk ve yüksek özgül dayanımlarından dolayı otomobil sektöründe birçok parçada petrol türevli malzemelere ve parçalara alternatif olarak kullanılmaktadırlar (Liu ve ark., 2012; Silva ve Fontul, 2013). Doğal lifler hayvansal, mineral ve bitkisel türevli olmak üzere temelde üç farklı kaynaktan elde edilmektedirler. Bitkisel türevli lifler genellikle dayanıklı kompozit malzeme üretiminde polimer matris içerisine takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Hayvansal türevli lifler, başlıca proteinden meydana geldiği için mineral ve bitkisel türevli takviye elemanlarına göre daha düşük dayanımları vardır. Selüloz esaslı lifler; keten, hint keneviri, rami, kenevir gibi bast lifler, pamuk ve Hindistan cevizi gibi tohum esaslı lifler, sabır ağacı, ananas, abaka gibi yaprak esaslı lifler ve son olarak, çeltik, mısır ve buğday gibi kamış esaslı lifler olarak farklı sınıflara ayrılabilir (Mohammed ve ark.,2015).

Matris malzemesi olarak kullanılan biyopolimerler çevresel etkileri, düşük sera gazı salınımları, doğada kendi kendine tükenebilmeleri, sağlık riski taşımamaları ve atık problemlerinin olmamasından dolayı petrol türevli polimerler yerine tercih edilmektedirler. Ancak biyopolimerlerin su-nem tutmaları, ani sıcaklık değişimlerine ve UV ışınlarına dayanımlarının düşük olması gibi nedenlerden dolayı uygulama alanları kısıtlıdır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen poli (laktik asit) (PLA), petrol türevli polimerlere alternatif olarak sıklıkla kullanılan termoplastik alipatik polyester esaslı bir biyopolimerdir. PLA'nın biyobozunur (González-Ausejo ve ark., 2017; Wang ve ark., 2019) olmasından dolayı son yıllarda biyomedikal, paketleme ve otomotiv sektörü gibi birçok alanda kullanımı artmıştır. Günümüzde, PLA başta polipropilen olmak üzere, petrol türevli polimerlerin yerine alternatif olarak endüstriyel ölçekte kullanılmaya başlanmıştır. PLA, herhangi bir çevresel zarara neden olmaksızın mekanik özellikleri bakımından birçok petrol türevli polimer ile yarışabilmektedir. PLA'nın yüksek dayanım, rijitlik, sertlik, şeffaflık, biyoyoumluluk ve biyobozunurluk gibi üstün özellikleri tercih edilme nedenidir. Ancak PLA'nın doğasından gelen kırılğan yapısından dolayı tek başına ticari uygulamalarda kullanımı sınırlıdır. Aynı zamanda PLA petrol türevli polimerlere nazaran hala pahalı olması da ayrıca bir kısıttır. Biyokompozit malzemeler; matris malzemesi olarak doğal reçineler, takviye malzemesi olarak ise doğal lifler kullanılarak üretilen kompozitlerdir. Bilindiği üzere inşaat, uçak, otomotiv, plastik endüstrisi gibi farklı alanlarda bu kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Geçtiğimiz son yirmi yıl içerisinde doğal ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen liflerin, petrol türevli polimer matrise ilave edilerek üretilen kompozit malzemelere yönelik çalışmaların arttığı görülmektedir. Aslında doğal lif takviyeli kompozitlerin ilk olarak endüstriyel kullanımı 1940'larda Henry Ford tarafından doğal kenevir takviyeli otomotiv parçaları üretilerek yapılmıştır (Drzal ve Group, 2005). Ancak, ekonomik nedenlerden dolayı üretilen prototip seri üretime geçememiştir. Doğal lif takviyeli kompozitlerin otomotiv sektöründe seri üretimi ise, ilk olarak 1950 yılında olmuştur. Doğu Almanya'da bir otomobil firması "Trabant" adındaki aracın gövdesini pamuk takviyeli polyester matrisli kompozitten üretmiştir. Havacılığın gelişmesiyle cam takviyeli kompozitler geniş bir endüstriyel uygulama alanı bulmuştur. 1970 ve 1980'lerde otomobil iç parçalarında doğal liflerin yerine özelliklerini kontrol etmek daha kolay ve üretimleri hızlı olduğu için akrilonitril bütadien stiren (ABS) gibi petrol türevli lifler almıştır. 1980'lerin ortasına gelindiğinde, Avrupa birliği ülkelerinde, doğal liflerin ekolojik ve ekonomik etkilerinden dolayı teknik ve mekanik özelliklerinin tekrardan araştırılması için teşvikler verilmiştir. 1990'ların ortasında Mercedes E-Class ve Audi A2 modellerinde hint keneviri takviyeli plastik matrisli kapı içi panelleri ve iç konsol parçalarında biyokompozitler kullanılmıştır. 2000 yılında, Avrupa birliği tarafından yayınlanan bir yönergede (2000/53/EG); 2005 yılına kadar araçlarda kullanılan malzemelerin %85'inin geri dönüştürülebilir olması ve 2015 yılına kadar bu oranın %95'e çıkması gerektiği kararı alındı (Silva ve Fontul, 2013).

Biyokompozitler

Biyokompozit; kompoziti oluşturan matris veya takviyeden birinin veya her ikisinin de doğal kaynaklardan gelen malzemelerden olmasıdır (Rafiee ve ark., 2021). Genel olarak biyokompozitler geleneksel kompozit malzemelere alternatif ve çok farklı uygulamalarda kullanılmak üzere polimerik bir matris malzemesi ve içerisine takviye edilmiş liflerden oluşmaktadır. Biyokompozitler genellikle doğal lifler ve PP, PE, polivinil klorür (PVC), polyester (PS) gibi petrol esaslı ya da PLA, PHB polihidroksialkanoatlar (PHA) gibi biyopolimerler matrislerden oluşabilir (Silva, 2018). PLA ve soya reçinesi gibi biyopolimer matris içerisine sentetik cam veya karbon lifleri takviye edilerek elde edilen kompozitler de biyokompozit olarak adlandırılmaktadır. Biyokompozitler, eğer hem matris hem de takviye doğal kaynaklardan elde edilmişse yeşil kompozit olarak adlandırılır. Takviye elamanı olarak sürdürülebilir kaynaklardan gelen doğal malzemeler veya inorganik malzemeler kullanılabilir (Dicker ve ark., 2014)(Annandarajah, 2020). Örneğin; poli(ϵ -caprolactone) (PCL) petrol türevli kaynaklardan gelmesine rağmen karbondioksit, su, metan ve biyokütleyle aerobik/anaerobik biyolojik süreçler için tamamen biyobozunurdur. Yeşil ve biyoesaslı terimleri, kompozitin bir veya iki yönünü ele alırken, kompozitin kökeninden atık yönetimine kadar tüm kullanım hayatını kapsayan 'sürdürülebilir' biyokompozitler ile karıştırılmamalıdır (Rafiee ve ark., 2021). Tüm biyoesaslı polimerler biyobozunur olduğu gibi, bazı petrol esaslı polimerler de mikroorganizmalar, foto bozunma veya hidroliz yoluyla bozunabilmektedir. Biyolojik bozunma süreci, malzemenin kaynağından bağımsız olup tamamen polimerin moleküler yapısıyla yakından ilişkilidir (Annandarajah, 2020). Petrol esaslı polimerlerin kullanımı sonrası çevreye verdikleri zararlar ve petrol fiyatlarının artması biyokompozitlere olan ilgiyi ve ihtiyacı artırmıştır. Özellikle, petrol esaslı polimerlerin atıklarının ekolojik sistemdeki bozunmaz doğası, daha çevre dostu malzemelerle ilgili araştırmaların artmasına neden olmuştur (Cindu Annandarajah, 2020; Wu ve ark., 2020). Doğal liflerin düşük yoğunlukları ve üstün mekanik özellikleri cam lif ile yarışabilecek seviyede olduğundan sentetik liflerin yerini almıştır. 20. Yüzyılın ortalarından sonra endüstride kullanılan doğal lifler ve doğal malzemelerin yerine; seri olarak üretilen, mekanik dayanımları yüksek ve özellikleri kontrol edilebilen cam, karbon, aramid ve seramik gibi lifler kullanılmaya başlandı (Annandarajah, 2020). Ancak, bu malzemelerin çevreye olan olumsuz etkileri

küresel boyutlara ulaşması ve ekolojik yaşamı olumsuz olarak etkilemesi üzerine yapı, havacılık, otomobil ve spor eşyaları malzemelerinde doğal veya biyobozunur malzemelere dönüşler başladı. Geri dönüşebilen, hafif, doğal ve maliyeti oldukça uygun olan biyokompozitlerin üretimi ve araştırılması ilgi çekmektedir. Biyokompozitler, yenilenebilir doğal kaynaklardan gelen biyoesaslı polimerler ve doğal takviyenin bir araya gelmesiyle oluşan ve yenilenemeyen kaynaklardan üretilmiş petrol türevli kompozitlerin iyi bir alternatifidirler. Biyokompozitler sadece ekolojik hayata değil aynı zamanda insan sağlığına da zararı yoktur (Vilaplana ve ark., 2010).

Yeşil kompozitler

Artan çevre sorunları ve diğer yandan çok yönlü polimer esaslı malzemelere olan ihtiyaç, doğal-organik matris malzemeleriyle üretilen kompozitlere, yani yenilenebilir kaynaklardan gelen ve biyolojik olarak parçalanabilen malzemelere olan ilgiyi artırmıştır. Genellikle "yeşil" olarak adlandırılan bu kompozitler, birçok endüstriyel uygulama alanı bulabilir (La Mantia ve Morreale, 2011). Yeşil kompozitler, hem takviye elemanının hem de polimerin doğal veya geri dönüştürülmüş kaynaklardan meydana gelmiş kompozit malzemelerin alt sınıflarından biridir. Yeşil kompozitler, yeni nesil sürdürülebilir kompozit malzemelerdir ve geri dönüştürülebilir veya biyolojik olarak parçalanabilen hafif ve güçlü kompozitlerdir.

Doğal lif takviyeli kompozitler

Küresel ısınmanın ana nedenlerinden birisi insanoğlunun farklı nedenlerle atmosfere yaymış oldukları sera gazları olduğu bilinmektedir. Atmosfer yayılan CO₂'in ana kaynaklarına bakıldığında fosil yakıtlar (kömür, petrol ve doğalgaz) karşımıza çıkmaktadır. Avrupa Komisyonu İklim Raporuna göre küresel ısınmanın %63'üne insanoğlunun neden olduğu açıklanmıştır (EU climate action ve the European Green Deal, 2021). Avrupa Birliği ülkeleri sera gazı salınımının 2030 yılına kadar en az %55 azaltma kararı almıştır. Bu nedenle, düşük CO₂ salınımı ve doğal kaynakların kullanımına yönelik yenilikçi çalışmalar desteklenmektedir. Endüstriyel cam, aramid ve karbon lifler mekanik özelliklerinin iyi olması ve üretim kolaylığı nedeniyle kompozit malzeme yapımında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak cam ve karbon liflerin geri kazanımının olmaması, üretim maliyetlerinin yüksek ve üretimleri esnasında yayılan CO₂ oranının fazla olması nedeniyle artık yerlerini yavaş yavaş doğal liflere bırakmaktadırlar. Doğal lif takviyeli kompozitler çoğunlukla rastgele dağılmış kısa lifli bir yapıya sahiptirler. Süreksiz lif takviyeli olmalarından dolayı sürekli lif takviyeli kompozitlere nazaran elastik modülü ve çekme dayanımları daha düşüktür. Üretim yöntemleri çeşitli olup sıklıkla seri üretime de uygun olan enjeksiyon kalıplama (Patil ve ark., 2017; Hassan ve ark., 2019; Hatipoğlu, 2020) sıkıştırma kalıplama (Couture ve ark., 2016; Rubio-Lópezve ark., 2017) ve ekstrüzyon (Gamon ve ark., 2013) yöntemleri ile üretilmektedirler. Plastikler için kullanılan birçok üretim yöntemi, süreksiz lif takviyeli kompozitlerinin imalatında da kullanılabilir.

Doğal lif takviyeli kompozitlerin geliştirilmesinin bir başka nedeni de doğal liflerin sentetik liflere göre (ör: cam 2.4 g cm⁻³) daha düşük yoğunluğa (genellikle 1.2-1.6 g cm⁻³) sahip olmalarıdır. Ayrıca, doğal lifler cam liflere göre solunum ve cilt problemleri gibi sağlık sorunları bakımından zararsızdırlar. Doğal lif takviyeli kompozitler, aynı zamanda "yeşil kompozitler", "ekokompozitler" ve "biyokompozitler" olarak da adlandırılır; burada doğal lifler, termoset veya termoplastik matrise takviye edilerek kompoziti üretilir. Bitkisel doğal liflerin hidrofilik özelliği hidrofilik olan polimer matrise takviye edildiğinde zayıf ara yüzey bağı oluşmasına neden olmaktadır. Bu şekilde üretilen kompozitler ise daha düşük mekanik ve termal özelliklere sahiptirler. Bu nedenle, lif ve matris arasındaki tutunmayı geliştirmek için çeşitli lif-polimer arayüz modifikasyonları geliştirilmiştir. Doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini başlıca matris seçimi, kompozitin üretim yöntemi ve süreci, lif

seçimi (lifin tipi, hasat zamanı, çıkarılma yöntemi, en boy oranı ve uygulanan işlemler), arayüzey bağı, lif dağılımı ve boşluklu yapı etkilemektedir.

Doğal lif takviyeli kompozitler yüksek özgül dayanımları, hafiflikleri ve rakiplerine göre ekonomik olmalarından dolayı gelecekte kompozit uygulamaları için çok ümit vermektedirler. Özellikle keten ve jüt takviyeli kompozitler otomotiv ve yapı sektöründe sıklıkla uygulama alanı bulacağı ön görülmektedir. Literatürde; (Thwe ve ark., 2002; Soleimani ve ark., 2008; Andrzej ve ark., 2009; Yan, ve ark., 2012; Efendy ve ark., 2014; Gamon ve ark., 2013; Le Duigou ve ark., 2014; Rana ve ark., 2017;Hoque ve ark., 2018) yeşil kompozitlerin ve doğal lif takviyeli kompozitlerin otomotiv parçasından, inşaat malzemesine kadar birçok alan için geliştirildiği görülmektedir. Bambu, keten, kenevir, jüt ve hindistancevizi gibi doğal lifler polimeri güçlendirmek için iyi birer takviye elamanı olarak ortaya çıkan yenilenebilir kaynaklardır. Yolcu uçakları incelendiğinde Airbus A380 %25'ini, Boeing 787 Dreamliner'ın %50'sini, A350'nin ise %53'ünü oluşturmaktadır (Karthi ve ark., 2019). Uçaklarda doğal lif takviyeli kompozitlerin kullanılmaya başlanmış olup eğer bu kompozitler daha da geliştirilebilirse uçağın birçok parçasında kullanılması mümkün olacaktır.

Bitkilerin hücre duvarları, çoğunlukla çapraz bağlı polisakkarit ağları, glikozillenmiş proteinler ve lignin matrisi olan lignoselülozdan oluşan karmaşık yapılardır. Lignoselülozik malzemeler, doğal ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hammaddedir. Lignoselülozik biyomalzemeler selüloz (%38-50), hemiselüloz (%17-32) ve lignin (15-30%) olmak üzere üç temel yapısal bileşenden meydana gelirler. Selüloz, dünyada en çok bulunan organik polimerdir. Doğadaki bitkilerden elde edilebildiği gibi tekstil, gıda ve orman endüstrisinin çeşitli atıklarından da elde edilebilme imkânına sahiptir. Lignin ise selüloz ve hemiselülozdan sonra dünyada en bol bulunan ikinci polimerdir. Son birkaç yıldan beri, enzimlerin endüstriyel uygulamalardaki taleplerinin artmasından dolayı pamuk, atık kağıtlar, tarımsal atıklar gibi birçok selüloz esaslı malzemenin uygulama alanı da genişledi. Lignoselülozik nanomalzemeler otomotiv, kompozit, boya, uzay-uçak, kimya, elektronik, enerji, tekstil, jeller/köpükler, bariyer/ayırma membranları, kozmetik, gıda ambalajları, tıbbi implantlar, yara örtüleri, ilaç bilimi ve doku mühendisliği gibi çok çeşitli alanlarda uygulama potansiyeline sahiptir.

Nano ölçekli malzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla üstün fiziko kimyasal, optik, manyetik ve biyolojik özelliklere sahip malzemeler olup yaklaşık 100 nm ve daha küçük boyutlara sahiptirler. Nanomalzeme, yüksek yüzey alanı-hacim oranı, yüksek elastiklik modülü ve yüksek gerilme mukavemeti, düşük termal genleşme katsayısı, hidrojen bağlama kapasitesi, biyouyumluluk, çevre dostu olma ve yenilenebilirlik gibi önemli özelliklere sahiptirler. Genel olarak, Nanoselüloz mikrofibrillenmiş selüloz (MFC), nanokristalin selüloz (NCC) ve bakteriyel nanoselüloz (BNC) olmak üzere üç farklı tipte üretilmekte ve bu ürünler farklı boyutlarda olup, farklı özellikleri ve farklı üretim metotlarını kapsamaktadırlar. Birinci kategori mikrokristalin selüloz ve selüloz mikrofibrilleri içerirken, ikincisi selüloz nano kristalleri, selüloz nano fibrilleri ve bakteriyel selülozu içerir. Genellikle asit hidrolizi ile üretilen selüloz nanokristalleri, 4-70 nm genişliğinde, 100-6,000 nm uzunluğunda ve %54-88 kristallik indeksine sahip silindirik, uzun, daha az esnek ve çubuk benzeri nano parçacıklardan oluşur (Trache ve ark. 2020).



Şekil 1. Selülozik nanoliflerin elde edilmesi ve uygulama alanları (Trache ve ark. 2020)

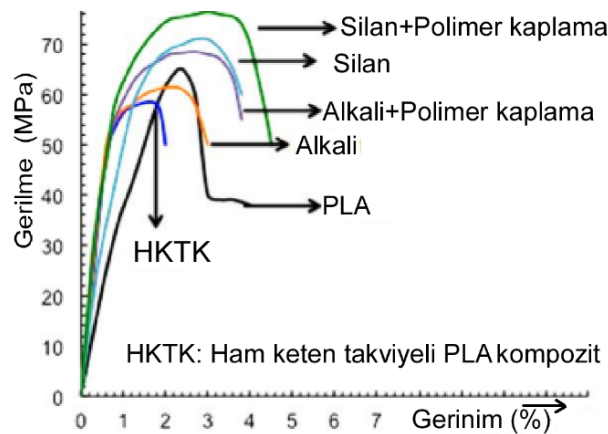
Lignoselülozik biyokütleden CNF üretimi için kullanılan en yaygın yaklaşım kimyasal, mekanik ve enzimatik işlem veya bunların bir kombinasyonu şeklindedir. Amorf nanoselüloz (ANC), çapı 80 ila 120 nm arasında değişen küresel veya eliptik şekle sahip başka bir nanoselüloz sınıfıdır. Fiziksel bir çözünme, şekillendirme ve rejenerasyon prosesi yoluyla doğrudan selüloz çözeltisinden elde edilir. Daha yakın zamanlarda, 3 nm çapındaki birbirine dolanmış selüloz nanofibrillerin oluşturduğu selüloz nanoplateletler (CNP), ılımlı koşullar altında oksidasyon yoluyla hazırlanmıştır. Bu tür CNP'nin kalınlığı yaklaşık 80 nm'dir. Nanometrik ölçekteki nano lifler, zehirli olmayan, yüksek özgül yüzey alanı, kolay işleme, yüksek en-boy oranı, sertlik ve iyi termal kararlılık gibi üstün özellikleri nedeniyle birçok uygulama alanı bulmuştur (Trache ve ark. 2020). Şekil 1'de selülozik liflerden nanoselüloz elde edilmesi ve nanoselülozların kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Yeşil kompozitlerin mekanik özellikleri

Çizelge 1'de biyokompozitlerin üretim yönteminin ve uygulanan modifikasyonun kompozitin mekanik, termo-mekanik özelliklerine etkileri literatürden derlenmiştir. PLA, PLLA matris ve keten, rami veya hint keneviri gibi doğal liflerden yapılan yeşil kompozitlerin geleneksel PP/cam takviyeli kompozitlerin performansına benzediği görülmektedir. Oksman ve diğerleri, (Oksman ve ark., 2003), PP/cam kompozit ile PLA/keten kompozitlerin mekanik özelliklerini karşılaştırmış olup PLA/keten kompozitin özelliklerinin daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, mekanik özellikleri bakımından, birçok doğal lifin PP, PHB ve nişasta esaslı matrislere kıyasla PLA matris ile daha uyumlu olduğu bilinmektedir. Örneğin; Bax ve Müssig (2008), ekstrüzyon ile karıştırıp enjeksiyon kalıplama ile ürettikleri %30 ağırlık oranında keten takviyeli PLA kompozitin çekme dayanımını 54 MPa olarak bulurken, Avcı ve ark., (2020), benzer yöntemle ürettikleri %25 ağırlık oranında keten takviyeli PLA kompozitin çekme dayanımını 30 MPa olarak bildirmişlerdir. Yeşil kompozitlerin mekanik dayanımları selülozik lif ile polimer matris arasındaki etkileşime bağlıdır. Arayüzey bağı kuvveti arttıkça kompozitin mekanik özellikleri de artmaktadır (Siakeng ve ark., 2019; Gholampour ve Ozbakkaloglu, 2020; Syduzzaman ve ark., 2020). Ayrıca, lifin türü, yoğunluğu, kimyasal yapısı, boyutu, mekanik özellikleri, kompozit içerisindeki dağılımı, kompozit yapıdaki oranı, hasat şekli, yetiştiği yer ve dokuma şekli biyokompozitlerin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler (Cha ve ark., 1998; Gassan ve ark., 2002; Mohammed ve ark., 2015; Karthi ve ark., 2019; Gholampour ve Ozbakkaloglu, 2020; Mann ve ark., 2020; Shrivastava ve Dondapati, 2021; Zhan ve ark., 2021). Yeşil kompozitlerin çekme dayanımı, esas olarak matris ve lif

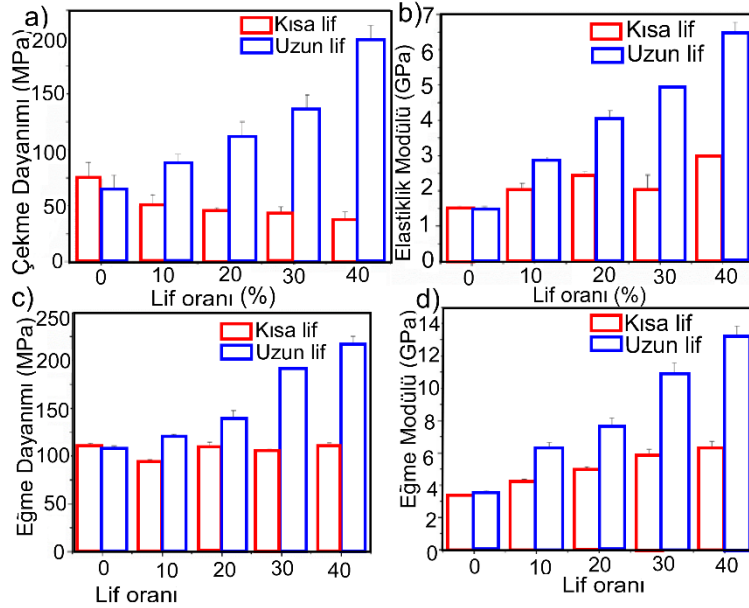
arasındaki bağlanma kuvvetine bağlıdır. Arayüzey bağı ne kadar kuvvetli olursa çekme dayanımı da o kadar yüksek olur. Eğilme dayanımı kompozitin bükülme deformasyonuna karşı direnci anlayabilmek için yapılan bir özelliktir. Yeşil kompozitlerin eğilme özellikleri, kompozitin atalet momenti ve modülüne bağlıdır. Yeşil kompozitlerin darbe dayanımı özellikleri, modifikasyon yöntemleri ile iyileştirilebilir. Darbeye maruz kalacak uygulamalarda, otomotiv, yapı vb. kullanılacak olan kompozitlerin darbe dayanımları önemlidir. Arayüzey bağı, lif oranı ve lif çekme ve enerji emme yeteneğini yeşil kompozitlerin darbe dayanımını etkileyen başlıca faktörlerdir.

Genel olarak, doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, sentetik lif takviyeli kompozitlere göre daha düşüktür. Yeşil kompozitler; hidrofilik selülozik lifler ve hidrofilik polimer matristen üretildiği için çoğu zaman arayüzey bağı zayıf olur ve mekanik özellikleri bu durumdan olumsuz etkilenir. Doğal lifin ve/veya polimer matrisin fiziksel ve/veya kimyasal modifikasyonu, ara yüzey bağı artırarak kompozitin mekanik özelliklerini artırır. Literatürde yeşil kompozitlerin mekanik özellikleri alkali, (O'Donnell ve ark., 2004; Hao ve ark., 2018; Jain ve ark., 2019; Maichin ve ark., 2020;) esterifikasyon (Azizah ve ark., 2020; Roy ve ark., 2020; Feng ve ark., 2020; Ko ve ark., 2020; Najeeb ve ark., 2020; Wang ve ark., 2020; Asumani ve Paskaramoorthy, 2021), silan ve ark., 2020; Wang ve ark., 2020) ve maleik anhidrit (Hong ve ark., 2008; Soleimani ve ark., 2008; Yu ve ark., 2014; Bodur ve ark., 2016; Avcı ve ark., 2020) gibi farklı işlemlere tabi tutularak iyileştirildiği görülmektedir. Pantani ve ark., (Pantani ve ark., 2015), keten lifini alkali, silan ve polimer kaplayarak PLA matrisli kompozitin çekme dayanımına etkisi verilmektedir. Alkali ve silan işlemi kompozitin çekme ve yüzde uzama değerlerini artırdığı görülmektedir.



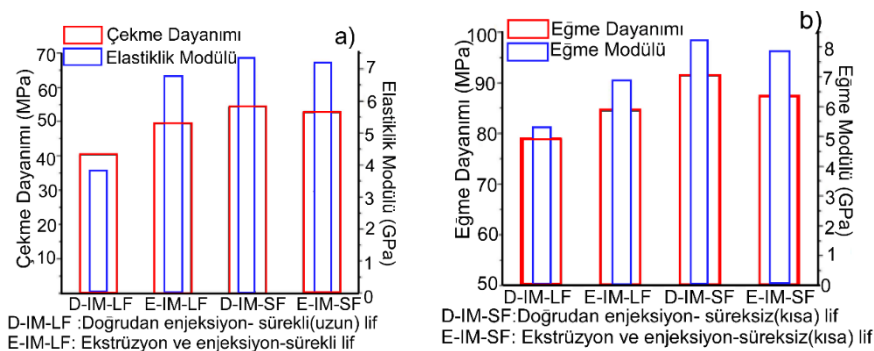
Şekil 2. Farklı kimyasal işlemlerin yeşil kompozitin gerilme-gerinim özelliklerine etkisi (Pantani ve Turng, 2015)

Dhokal vd. (Dhokal ve ark., 2013), epoksi matris içerisine çapraz dokunmuş ve tek yönlü olmak üzere iki farklı açılı keten lifini takviye ederek kompozit üretmişler. Yapılan çekme testi sonrasında tek yönlü keten takviyeli kompozitin çekme dayanımı çapraz dokulu keten kompozite göre %26 daha yüksek çıkmışken, elastik modülünün ise %10 daha az olduğunu bulunmuştur. Liang vd. (Liang ve ark., 2021), farklı lif oranlarında ve sürekli, süreksiz olmak üzere PLA matrisli keten lifi takviye etmişlerdir. Lifin sürekli veya süreksiz olması kompozitin mekanik özelliklerini önemli oranda etkilemiştir. Şekil 3'te verilen grafiklerde görüldüğü üzere sürekli(uzun) lif takviyeli kompozitin elastiklik modülü ve çekme dayanımı lif oranı arttıkça artmıştır.



Şekil 3. Lif oranının ve lif boyutunun kompozitin: a) çekme dayanımı, b) elastiklik modülü, c) eğme dayanımı, d) eğme modülü (Liang ve ark., 2021)

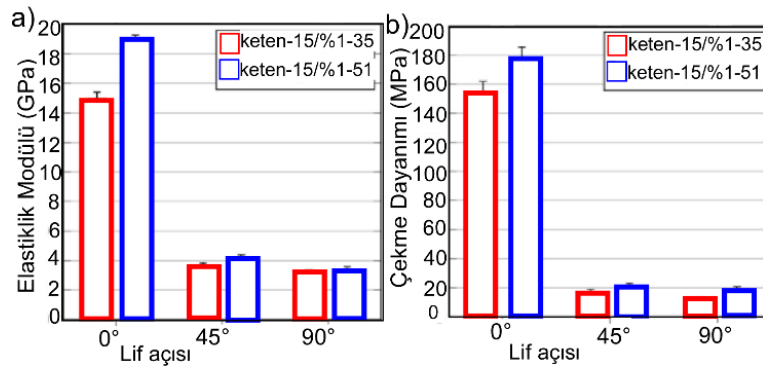
Süreksiz (kısa) lif takviyeli kompozitler de ise lif oranının artması çekme dayanımını düşürürken elastiklik modülünü artırmıştır. Çalışmada, en yüksek darbe dayanımı ve eğme dayanımı %40 uzun lif takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir. Zhan ve arkadaşları, (Zhan ve ark., 2021), kenaf ve hint keneviri lifi oranının kompozitin mekanik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, kompozit yapıdaki lif oranı arttıkça, elastiklik modülü ve çekme dayanımı belirli bir lif oranına kadar artmış sonrasında ise azalmaya başlamıştır. Literatürde, araştırmacılar farklı sonuçlar bulmuş olsa da genel olarak belirli bir orana kadar matris içerisindeki lif oranı arttıkça kompozitin çekme dayanımı ve elastiklik modülünün arttığı görülmektedir. Lif uzunluğu da yeşil kompozitlerin mekanik özellikleri etkileyen önemli diğer bir faktördür. Kısa lif takviyeli kompozitler de lifin uçundaki gerilme yoğunlaşması nedeniyle, çekme yükü altında bu noktalarda matris çatlağı oluşumu başlar. Numunedeki çatlak kritik bir noktaya ulaştığında lif artık gelen yükleri karşılayamaz ve dayanım düşer. Yeşil kompozitler de en-boy oranı (veya uzunluk / çap), kompozitin mekanik özelliğini etkileyen farklı bir özelliktir. Arayüzey bağı kuvvetli ve yük aktarımı verimli olduğunda, gerekli kritik en-boy oranı daha düşük olabilir. Ama diğer durumlarda en-boy oranı yüksek olmazsa mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedir (Pantani ve Turng 2015). Kompozitin üretim yöntemi de mekanik özelliklerini etkilemektedir.



Şekil 4. Farklı üretim yöntemi ile üretilmiş PLA/sisal kompozite ait: a) çekme dayanımı ve elastiklik modülü, b) eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri (Chaitanya ve Singh, 2016)

Kısa lif takviyeli kompozitte ise üretim yönteminin etkisi çok olmadığı görülmektedir. Hu ve Kim Chaitanya ve Singh (Chaitanya ve Singh, 2016), doğrudan enjeksiyon ve ekstrüzyon sonrası enjeksiyon

olmak üzere iki farklı yöntemle üretilen PLA/sisal kompozite üretim yönteminin etkilerini incelemiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere doğrudan enjeksiyonla uzun lifli kompozit üretmek çekme dayanımı, eğme dayanımı ve elastiklik modülü ve eğme modülünü düşürmektedir. (Hu ve Lim 2007), sıcak baskı yöntemi kullanılarak kenevir lifini PLA matrise takviye ederek kompozit ürettiler. Çalışmada, hacimce %30, %40 ve %50 oranında alkali muamele edilmiş ve herhangi bir işlem uygulanmamış kenevir lifleri takviye edilerek optimum lif oranı test sonuçlarına göre belirlendi. Aynı zamanda, alkali işleminin lif yüzey morfolojisine ve kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Test sonuçları, alkali ile muamele edilmiş hacimce %40 lif takviyeli biyokompozitin mekanik özelliklerinin en yüksek değerler olduğunu göstermiştir. %40 alkali kenevir/PLA kompozitin çekme dayanımı, elastik modülü ve eğilme mukavemeti sırasıyla 54.6 MPa, 8.5 GPa ve 112.7 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin tümü matrise göre artış göstermiştir.



Şekil 5. Farklı açılarda dokunmuş keten lifinin kompozitin çekme dayanımına ve elastiklik modülüne etkileri (Keck ve Fulland, 2016)

Keck ve Fulland (Keck ve Fulland, 2016), tek yönlü hizalanmış keten lifleri takviye edilen epoksi kompozitlerin mekanik ve kırılma mekaniği davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Şekil 5'te lif açısının ve keten oranının çekme dayanımı ve elastiklik modülüne etkileri verilmektedir. Çalışmada hem elastiklik modülü hem de çekme dayanımı artan lif oranı ile artmıştır. Ayrıca, lif açısı 0°'den 90°'ye doğru gittikçe her iki dayanım değeri de düşmüştür.

Çizelge 1. Yeşil ve biyokompozitlerin mekanik ve viskoelastik özelliklerine dair yapılmış mevcut çalışmaların özeti

Kompozit	Kimyasal işlem	Lif tipi ve oranı (%)	Üretim yöntemi	E_t (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	E_f (GPa)	Eğme dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı kJ m^{-2}	Uzama (%)	Ref.
PLA/keten	Kontrol	Kısa lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon, sıcak kalıplama	3.4 ± 0.9 ($\uparrow M60$ %)	60.1 ± 1.7 ($\uparrow M1.5$ %)					(Zhang ve ark., 2018)
PLA/keten	Dopamin hidroklorür	Demir fosfat		2.9 ± 0.1 ($\uparrow M38$ %), (K \downarrow)	55.4 ± 0.9 ($\downarrow M6$ %), (K \downarrow)					
PLA/kordenka		Kısa lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama	4.85 ± 0.03 (M \uparrow)	58 ± 5			72.2 ± 11		(Bax ve Müssig, 2008)
PLA/keten				6.3 ± 0.1	54.15 ± 5			11.13 ± 1.5		

PLA/ keten	Alkali %5 ve MA	Kısa lif, %15 ağ.	Ekstrüzyon , Enjeksiyon kalıplama	(M↑)	~5.8(K↓)	~47(↑ K%27)	2.27±0. 13 (K↓)	50±2.3 (↑K)	15±0.1 (↑K 100)	8.2±1.7 (↑K)	(Avcı, ve ark. 2020)
	Alkali %5 ve MA	Kısa lif, %25 ağ.		~6.8(K↓)	~51 (↑K %70)	2.3±0.2 (K↓)	36±3 (↑K)	13±0.5 (K%100)	7.4±0.3 (↑K)		
	Kontrol	Kısa lif, %15 ağ.		~6(↑ M)	~35 (↓M)	2.9±0.1 8 (↑M)	22,4±1	7.8±0.1	2.2±0.1		
	Kontrol	Kısa lif, %25 ağ.		~7(↑ M)	~30 (↓M)	2.52±0. 15 (↑M)	24.3±1. 2	6.3±1.5	2.06±0.1		
PLA/ rami	Silan %2	Kısa lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon , sıcak kalıplama		64.2 ± 0.7 (K↑%1 8)		145 (K↑%32)	15 (K↑%50)	3.6±0.1 (K↑%13)	(Yu ve ark., 2010)	
	Alkali %5				66.8 ± 1.7 (↑K%2 7)		~170 (K↑%54)	23 (K↑ %130)	4.8±0.2 (K↑%50)		
PLA/ keten	Kontrol	Tek yönlü dokuma lif, %22 ağ	Sıcak kalıplama			~14	~160		~2.5	(Georgio poulo ve ark, 2018)	
	%1 Silan					~15.5 (↑K 10 %)	~180 (↑K 12.5%)		~2.7		
	%2 Silan					~15 (↑K 7%)	~185 (↑K 15.5%)		~2.6		
	%3.5 silan					~14 →	~175 (↑K %9)		~2.8		
	%5 silan					~13.5 (↓K 3.5%)	~170 (↑K% 6)		~2.6		
PLA/ keten	Silan %2	Tek yönlü dokuma lif, %22 ağ.	Sıcak presleme	12.5±0 .9 (↑M %260)	102.5± 5.2 (M %85), (↑K)		117±5.7 (↑M %6), (↓ K)		0.015,	(Georgio poulos ve ark.2016)	
	MA %10			25.0 ± 1.4 (↑M %600)	35.0 ± 1.9 (↓M%3 6), (↓K)		63 ± 3.1 (↓M%4 3), (↓K)		0.003		
	Kontrol			16.0 ± 0.80 (↑M %350)	99.0 ± 4.7 (↑M %80)		140 ± 6.9 (↑M %27)		0.016		
	Alkali %5			~3.9 (↑M)	58 (↓M)			~16(↑M ,) (↑K)	5 (↑M), (↑K)		

PLA/ keten	Silan %10	Kısa lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon	~3.1(↑M)	27 (↓M)			~17(↑M), (↑K)	6.3 (↑M), (↑K)	(Xia ve ark.2016)
	MA %20			~2.8 (↑M)	57 (↓M)			~14.5(↑M), (↓K)	6 (↑M), (↑K)	
	Kontrol			~2.7 (↑M)	57 (↓M)			~15(↑M %200) (↓K)	4.5 (↑M),	
PLA/ keten	TiO ₂ (oksitlenmiş)	Dokuma, %34 ağ.	Sıcak pres kalıplama	10.5±0.3 (↓K %4.5)	211±2.1 (↑K %12)			~15 (M %200), (↓K)	4.5±0.2 (↑K)	(Foruzan mehr ve ark.2016)
	TiO ₂			9±0.5 (↓K %13)	172±1 (↓K)			~16.5 (↑M %230), (↓K)	3.8±0.2 (↑K)	
	Kontrol			11±0.4	188±6.2			18 (↑M %260)	3.4±0.2	
PLA/ keten	Silan	Kısa lif, %25 ağ.	Ekstrüzyon enjeksiyon	~1.88 (↑M)	~73(↑M)			~12 (↑M)	~4 (↑M)	(Pantani ve Turng, 2015)
	Alkali			~1.9(↑M)	~63(↓M)			~12.2 (↑M)	~3 (↑M)	
	Silan +PLA kaplama			~2.2(↑M)	~75(↑M)			~13.5 (↑M)	~4.8 (↑M)	
	Kontrol			1.8 (↑M)	~57(↓M)			~9 (↑M)	~2 (↓M)	
	Alkali - Silan			3±0.09 (↑M)	58.1 ± 0.8 (↑M)	3.9 ± 0.1	91.9 ± 0.3 (M→),(↑K)	16.1 ± 0.1 (↑M %21)	9.76 ± 0.62	
	Alkali-MA			2.78 ± 0.10 (↑M)	57.6 ± 0.6 (↑M)	4.1 ± 0.1 (↑M %10)	92.8 ± 1.9 (↑M), (↑K)	14.4 ± 0.6 (↑M)	7.98 ± 0.33	
	Kontrol			3.4±0.1 (↑M %26)	60±2 (↑M%10)	3.9 ± 0.4	90.2 ± 6.0 (M→)	14.8 ± 0.5 (↑M)	6.06 ± 0.43	
PP/ hint keneviri	MA %3	Kısa lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama	3.3 ± 0.2	44.7 ± 0.28					(Karmaker ve ark, 1996)
	Kontrol			3.5 ± 0.04	32.5± 0.2					
	MA %3	Kısa lif, %50 ağ.		5.5± 0.3	57.8± 0.3				~5.5	
	Kontrol	5.4 ± 0.4		32 ± 0.5					~2	
Epoksi/ tapsi lifi	KOH %5	%5	Elle yatırma		32.39		54.58			(Reddy ve ark.2021)
	%5	%10			35.97		161.42			
	Alkali %5	%5			36.19		58.44			
	%5	%10			43.02		167.19			
		Sürekli lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon ve	~5.5 (↑M)	~150 (↑M)	~11 (↑M)	~190 (↑M)	~45 (↑M)	~6	(Liang ve ark.2021)

PLA/sisal	Alkali %2	Sürekli lif, %40 ağ.	sıkıştırma kalıplama	~6.5 (↑M)	~200 (↑M)	~13 (↑M)	~225 (↑M %105)	~55 (↑M %1000)	~5.5 (↓M)	
		Kısa lif, 30ağ.	Ekstrüzyon ve kalıplama	~2.5 (↑M %40)	~50 (↓M)	~6.5 (↑M)	~110 (↓M)	~10 (↑M %100)	~4.5 (↓M)	
		Kısa lif, %40 ağ.		~3.5 (↑M)	~45 (↓M)	~7 (↑M %100)	~115 (↓M)	~12 (↑M)	~4 (↓M)	
PLA/sisal		Kısa lif, 30ağ.	Ekstrüzyon ve enjeksiyon	~5.5	~52	~7.8	~88	~32		(Singh ve ark., 2016)
		Uzun lif, 30ağ.		~5.2	~50	~7	~85	~42		
		Kısa lif, 30ağ.	Doğrudan enjeksiyon	~5.8	~55	~8.2	~85	~35		
		Uzun lif, 30ağ.		~3.5	~40	~5.2	~80	~44		
PLA/keten	PLA/cam	Kısa lif %30 ağ.	Ekstrüzyon , Basınçlı kalıplama	8.3 ±0.6 (M↑ %147)	53±3.1 (M↑%6)			12 (M↓%20)	1±0.2 (M↓%10)	(Oksman ve ark., 2003)
Dokuma , %30 ağ.		5±0.4		29±4.2				2.7±1.5		
PLA/hint keneviri		Kısa lif, %40 ağ.	Film istifleme	8.1±0.4 (M↑ %131)	72.7±2.3 (M↑%32)			14.3±2.1 (M↓%7)	1.5 (M↓%25)	(Plackett ve ark.2003)
PLA/selüloz	PLA/abaka	Kısa lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon , enjeksiyon kalıplama	5.8 (↑M%75)	91.3 (↑M%45)	6.5 (↑M%80)	152 (↑M %150)	7.9 (↑M %260)		(Andrzej ve ark., 2009)
				8.03 (↑M %142)	74 (↑M%17)	7.8 (↑M%15)	124 (↑M %170)	5.3 (↑M %140)		
PLA/keten	PLA/pamuk	Kısa lif, %30 ağ.	Ekstrüzyon , Sıcak kalıplama			4.76 ± 0.09 (↑M58 %)	27.74±1.3 (↓M68 %)		0.95 ± 0.02 (↓M80 %)	(Bajracharya ve Bajwa 2017)
		Kısa lif, %10 ağ.				3.38 ± 0.1 (↑M10 %)	49.8 ± 1.3 (↓M45 %)		2.168 ± 0.009 (↓M55 %)	
PLA/keten		Kısa lif, %30 ağ.	Film istifleme	~8 (↑M %150)	~100(↑M %50)				~1.8 (↓M)	(Bodros ve ark. 2007)

PP-g-MA/keten	Kısa lif, % 30 ağı.	sıkıştırma kalıplama	~6 (↑M %300)	~75 (↑M %188)				~1.8 (↓M)	
ZF03UA/keten	Kısa lif, % 30 ağı.		~3 (↑M)	~45 (↑M %550)				~2 (↓M %1500)	
PLA/keten	Keten dokuma, %30 ağı.	Sıcak pres kalıplama	13±0.9	72.2±2				1.5	(Nassiopoulos ve ark., 2015)
PLA/epoksi			7.6±0.4	90±4.8				1.85	
PHBV/hint keneviri	Sürekli lif, %30 ağı.	Sıkıştırma kalıplama	7 ± 0.26 (↑M)	35.2 ±1.3 (↑M %29)			~32 (↑M %540)	0.8	(A. K. Bledzki ve Jaszkiwicz 2010)
PLA/hint keneviri			9.6 ± 0.3 (↑M)	82±3 (↑M %29)			~5 (↑M %100)	1.8	

E: Elastiklik modülü

(↑M, ↓M): Matrise göre artış ve azalmayı ifade etmektedir

E': Eğme modülü

(↑K, ↓K): Kontrol grubuna göre artış ve azalmayı ifade etmektedir

E'': Sönümlenme modülü

MA: Maleik anhidrit

Yeşil kompozitlerin otomotiv sektöründe kullanımı

Yeşil kompozitler doğal lifler ve doğal matristen oluşan doğrudan doğadan elde edilen çevre dostu kompozitlerdir. Sentetik lifler ve petrol türevli polimerler mühendislik uygulamalarında çok fazla kullanım alanı bulmuş olsa da ciddi çevresel tehlikeleri vardır. Yenilenemeyen kaynaklardan, üretilen bu tür kompozitler kullanım ömrünün sonunda büyük miktarlarda atık üretir ve tamamen bozulmaları için uzunca bir süre gerekir. Son yıllarda, maliyeti, CO₂ yayımı ve petrol bağımlılığını azaltmak için sentetik malzemelerin doğal malzemeler ile değiştirilmesine yönelik çalışmalar artmıştır. Sanayileşmiş ülkelerdeki toplam sera gazı salınımlarının %20 ila %25'inin ulaşım sektöründen geldiği tahmin edilmektedir (Koronis ve Silva 2018). Bu nedenle, otomobilleri daha az yakıt tüketen, çevre dostu bir hale getirebilmek için otomotiv endüstrisinde hafif ve dayanıklı, biyokompozitler kullanılmalıdır. Petrol İhraç Eden Ülkeler Örgütü (OPEC), ulaştırma sektöründe dünya petrol talebinin günlük 43.6 milyon varil olarak tahmin etmiştir. 2017 yılında tahmini 1100 milyon olan binek araç sayısının 2040 yılında 1980 milyona yükseleceği öngörülmekte olup, bu da aynı dönemde ticari araç sayısının 230 milyondan 462 milyona çıkması anlamına gelmektedir (Huda ve Widiastuti, 2021). Bu nedenle birçok araç üreticisi, kullanılacak malzemeyi değiştirerek aracın ağırlığını azaltmaya çalışmaktadır. Ayrıca Avrupa Birliği'ndeki CO₂ yayımının azaltılmasına yönelik katı yasalar ve bazı Asya ülkelerinin de otomotiv sektöründeki benzer kısıtlamaları hem araçların hafifletilmesi hem de çevresel faktörleri ön plana çıkartmaktadır. Bir aracın toplam ağırlığını yaklaşık %25 azaltmakla dünya genelinde petrol tüketimini yaklaşık olarak 250 milyon varil azaltılabileceği ön görülmüştür. AB'nin toplam karbondioksit (CO₂) yayımı 1900-2010 yılları arasında yaklaşık %23 arttı. Bu yayımı azaltmak için mevcut ortalamaya kıyasla kilometre başına CO₂ yayımının %30 azaltılarak 2020 yılına kadar %10 azaltılmasını hedeflenmiştir (Taekema ve Karana 2012). Bu nedenle Avrupa Birliği (AB) Komisyonunun yayınladığı (EC) 443/2009 (Climate Action, 2021) yönetmelikte, yeni otomobiller için zorunlu salınım azaltma hedefleri belirlenmiştir. İlk hedef 2015 yılından itibaren binek araçlar için ortalama gaz salınımı için kilometre başına 130-gram CO₂ eşdeğeri olup bu hedef tutturuldu. 130 g CO₂ 100 km'de 4.9 l litre dizel veya 5.6 l benzin tüketimi anlamına gelmektedir. AB genelinde 2020 yılı itibariyle üretilen yeni

otomobillerin ortalama salınım miktarı $95 \text{ g CO}_2 \text{ km}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bu salınım seviyesi ise, yaklaşık olarak 100 km^2 'de 4.1 l benzin veya 3.6 l dizel yakıt tüketimine karşılık gelmektedir.

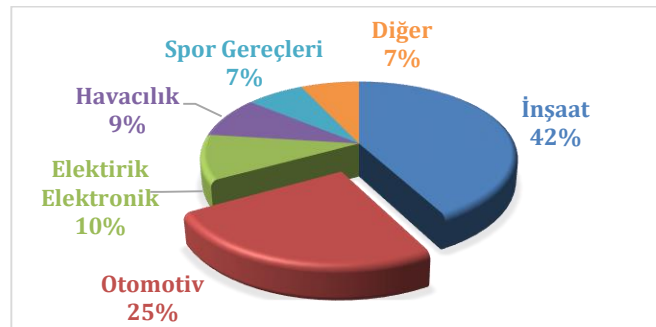
Çizelge 2. Yeşil kompozitlerin otomotiv parçalarında (Mohammed ve ark., 2015; Silva ve ark., 2018; Mann ve ark., 2020)

Üretici Firma	Uygulanan Model	Otomobil Parçası
Audi	A2, A3, A4, A6, A8, Roadster, Coupe	Koltuk sırtları, yan ve arka kapı panelleri, bagaj astarı, şapka rafı, yedek lastik astarı
BMW	3, 5,7 series, BMW I serileri ve diğer seriler	Koltuk arkası, tavan döşemesi paneli, bagaj kaplaması, kapı panelleri, ses yalıtım panelleri ve kalıplanmış ayak boşluğu kaplaması, ses yalıtım panelleri
Citroen	C5	Kapı iç paneli
Chrysler	A, C, E, ve S-class models	Kapı panelleri, ön cam, gösterge paneli, iş masası, direk kapak paneli
Fiat	Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156	Kapı kaplaması, koltuk arkası kaplamaları, kapı panelleri, koltuk altları, koltuk başlıkları, sırt minderleri
Ford	Mondeo CD 162, Focus, Freestar	Kapı panelleri, bagaj astarı, sürgülü kapı ekleri
Lotus	Eco Elise	Gövde panelleri, rüzgârlık, koltuklar, iç halılar
Mercedes-Benz	Trucks, Mercedes A, C,S sınıfı araçlar	İç motor ve tavan örtüsü, güneşlik, iç yalıtım, tampon, tekerlek kutusu Kapı panelleri (keten / sisal / epoksi reçineli / PP matrisli ahşap lifleri), torpido gözü (pamuk lifleri / ahşap kalıplı, keten / sisal), gösterge paneli desteği, yalıtım (pamuk lifi), kalıplama çubuğu / açıklıklar, koltuk arkalıği paneli (pamuk lifi), gövde paneli (PP / PET lifli pamuk) ve oturma yüzeyi / sırtlık (hindistan cevizi lifi / doğal kauçuk) İç motor kapağı, motor yalıtımı, güneşlik, iç yalıtım, tampon, tekerlek kutusu ve tavan kapağı
Opel	Vectra	Paketleme tepsileri, panel ekleri
Peugeot	406	Koltuk arkalıkları, arka raf
Renault	Twingo, clio	Arka koli rafı
Rover	2000	Yalıtım, arka depolama rafı
Saab	9S	Kapı Panelleri
Seat	—	Koltuk sırtlığı, kapı paneli
Saturn	L300s	Paketleme tepsileri, kapı paneli kaplamaları kapı
Toyota	Brevis, Harrier, Celsior, Raum	Döşeme panelleri, koltuk arkalıkları, yedek lastik kılıfı
Vauxhall	Corsa, Astra, Vectra, Zafir	Tavan paneli, iç kapı panelleri, sütun kapak paneli ve gösterge paneli
Volkswagen	Golf, Passat, Bora	Kapı paneli, koltuk arkalıği, bagaj kapağı kaplama paneli, bagaj astarı
Volvo	C70, V70	Koltuk dolgusu, doğal köpükler, kargo zemin döşemesi



Şekil 6. Yeşil kompozit malzemelerden üretilmiş otomobil parçaları (Lotfi ve ark.2021)

Yeşil kompozitler veya biyokompozitler binek ve ticari araçların parçalarının da kullanılması durumunda yukarıda istenilen yakıt tasarrufu, geri dönüşebilirlik ve CO₂ ayak izinin azaltılmasına yönelik hedeflere ulaşmada önemli oranda katkı vereceği aşikârdır. Yeşil kompozitlerin otomotiv parçalarında hali hazırda kullanımına BMW, Ford, Renault ve Volvo gibi tanınmış otomobil markalarının ön kapı konsolu (1.2–1.9 kg), arka kapı konsolu (0.8–1.6 kg) ve bagaj konsolu (1.5–2.5 kg) örnek olarak verilebilir (Mann ve ark., 2020). Ülkemizde Türkiye Otomobil Girişim Grubu (TOGG) tarafından üretilecek olan yerli otomobil için de Ankara Üniversitesi tarafından biyokompozitlerin kullanılabilmesi için yerli ekim kenevirin iyi bir takviye elemanı olduğu bildirilmiştir. Bu bağlamda ileriki yıllarda yerli otomobilde yeşil kompozitlerin ve biyokompozitlerin kullanılması ön görülmektedir. Şekil 6'de, doğal lif takviyeli kompozitler kullanılarak oluşturulan iç parçalara örnekler verilmektedir. Toyota 2019 yılındaki Milano Tasarım Haftası'nda özellikle tamamen Japon ahşabı, sedir ve huş ağacından yapılmış olan, çivisiz ve vidasız aracını tanıtmıştır. Elektrik motoruyla çalışan Toyota Setsuna, bir asırlık kullanıma dayanacak şekilde üretildi ve hem çevre dostu hem de yeşil otomobillere en iyi örnektir (Lotfi ve ark.2021). Birçok otomotiv parçası halihazırda keten, kenevir ve sabır ağacı gibi liflerden üretilmektedir. Çizelge 2'de otomobil bileşenlerinde kullanılan biyokompozit otomotiv parçalarına örnekler verilmektedir. Ulaşım sektörünü ilgilendiren bir diğer düzenleme ise ömrünü tamamlamış araçlar ile ilgili olup araç sökümü sonrasında hurdaların geri dönüşebilmesidir. Yeşil kompozit kullanımı ile sentetik veya cam takviyeli kompozitler parçalara nazaran hem ekolojik, geri dönüşebilme hem de ekonomiklik ilkelerini karşılanmış olacaktır. Aynı zamanda yeşil kompozitlerin üretimi boyunca CO₂ ayak izi düşüktür. Sonuç olarak, yeşil kompozitten üretilen bir otomotiv parçası imalatından kullanım ömrünün sonuna kadar, cam takviyeli kompozitlere nazaran çevre dostu, hafif, ucuz ve sağlıklı parçalar olacaktır (Taekema ve Karana 2012). Son gelişmelere bakıldığında yeşil kompozitlerin Avrupa pazarındaki en büyük yeri otomotiv sanayi, devlet kurumları ve küçük ölçekli çevreci endüstriler olduğu görülmektedir (Sienkiewicz ve Czub 2020). Kompozit malzeme pazarının 2024 yılına kadar tahmini olarak 40.2 milyar dolara ulaşması ve 2019'dan 2024'e %3.3'lük bir yıllık artış oranını ile büyümesi bekleniyor. Kompozit nihai ürün pazarının ise 2024 yılına kadar tahmini 114.7 milyar dolara ulaşması beklenmektedir. Bu pazarın içinde havacılık, savunma sanayi ve otomotiv sanayindeki hafif malzemelere olan talepler ve inşaat sektörü ve diğer birçok alanın ihtiyaçları bulunmaktadır.



Şekil 7. 2019 Yılına ait biyokompozitlerin küresel piyasası.

Dünya genelinde biyokompozitlerin piyasası ise 4.5 milyar dolar değerindedir ve her yıl yaklaşık %11.68 oranında büyümektedir (Cindu Annandarajah, 2021). Biyokompozit piyasasında en büyük pay sahibi yaklaşık %42 ile inşaat sektörü, ikinci olarak %25 ile otomotiv sektörüdür (Şekil 7). COVID-19 küresel salgını, inşaat ve otomotive sektörü ile bunlara bağlı birçok yan sektörün genel ekonomik faaliyetlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Birçok ülkede salgın nedeniyle kapanmaların uygulanması otomobil fabrikalarının, yan sanayinin çalışmaması ve inşaat faaliyetlerinin durdurulması biyokompozitlerin piyasasını olumsuz etkilemiştir (Climate Action, 2021). Buna rağmen otomotiv

sektöründe biyokompozit kullanımı her yıl yaklaşık olarak %20'den fazla artmaktadır ve 2021 yılı sonuna kadar 6.5 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Annandarajah, 2020).

SONUÇ

Yeşil kompozitler biyolojik olarak ayrışabilme, kolay erişilebilirlik, düşük yoğunluk, düşük fiyat, iyi termal ve akustik yalıtım, çevre dostu olma, geri dönüşebilme biyoyumluluk ve yenilenebilirlik gibi özellikleri cam, karbon ve diğer sentetik lif takviyeli kompozitlere göre çekici bir alternatiftirler. Bu çalışmada, yeşil kompozitlerin mekanik ve otomobil sektöründe kullanımı incelenmiştir. Hazırlanan çalışmalar sonucunda, yeşil kompozitlerin mekanik özelliklerinin lifin kimyasal, fiziksel özellikleri başta olmak üzere hasat şekli, hasat zamanı, kompozitin üretim yöntemi gibi birçok değişkenden etkilendiği bu nedenle mekanik ve termal özellikler farklılık gösterdiği anlaşılmıştır. Yeşil kompozitlerin ticari ölçekte kullanılabilmesi için, daha fazla geliştirme ve irdeleme çalışmaları yapılması gerekmektedir. Belki de mevcut matris ve liflere ilaveten yeni sürdürülebilir kaynakların bulunması yeşil kompozitlerin ticari ölçekte kullanılması için daha da faydalı olacaktır. 2000 yılında, Avrupa birliği tarafından yayınlanan bir yönergede (2000/53/EG); 2005 yılına kadar araçlarda kullanılan malzemelerin %85'nin geri dönüştürülebilir olmasını ve 2015 yılına kadar bu oranın %95 çıkması gerektiği kararı alındığından otomotiv parçalarında yeşil kompozitlerin kullanımına ilgi artmıştır. Ayrıca, yine Avrupa Birliği (AB) Komisyonunun yayınlamış olduğu (EC) 443/2009 yönetmelikte, yeni otomobiller için zorunlu salınım azaltma hedefleri belirlenmiştir. İlk hedef 2015'ten itibaren binek araçlar için ortalama gaz salınımı için kilometre başına 130 gram CO₂ hedefi tamamen uygulandı. 130 g CO₂ 100 km'de 4.9 l litre dizel veya 5.6 l benzin tüketimi anlamına gelmektedir. 2020'den itibaren aşamalı olarak 2021'den itibaren, yeni otomobiller için AB genelinde ortalama salınım hedefi 95 g CO₂ km⁻¹ olacaktır. Bu salınım seviyesi ise, yaklaşık olarak 100 km'de 4.1 l benzin veya 3.6 l dizel yakıt tüketimine karşılık gelmektedir. Yeşil kompozitlerin kullanımı hem araçların yakıt tüketimini azaltarak CO₂ salınımını durdururken hem de cam karbon gibi sentetik lifler yerine CO₂ salınımı çok daha düşük doğal lifleri ve biyomatrisleri kullanarak CO₂ ayak izini düşürmektedir. 2015 yılı Paris anlaşmasında da Dünya ülkeleri CO₂ salınımını düşürmeyi (Su ve Çevre, 2015) taahhüt etmişlerdir. Bunu başarmanın yollarından birisi de hiç şüphesiz yeşil malzemelerin endüstriyel uygulamalarda daha da yaygınlaştırılması olacaktır. Dünyamızın küresel ısınma, çevre kirliliği ve petrolün tükenme olasılığı ile yüzleştiği bu günlerde petrolden uzak, CO₂ ayak izi düşük, geri dönüşebilen, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen çevre dostu alternatif malzemelerin kullanılması kaçınılmazdır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde FDK_3401_2018 numaralı proje ile maddi imkân sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

Agrebi F, Hammami H, Asim M, Jawaid 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.

- Annandarajah C, 2020. Manufacture and Charecterization of Natural Fiber Biocomposites for Automative Applications. Doktora Tezi, IOWA State University, Ames Iowa, USA.
- Aruan Efendy MG, Pickering KL, 2014. Comparison of Harakeke with Hemp Fibre as a Potential Reinforcement in Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 67: 259–67.
- Asumani O, Paskaramoorthy R, 2021. Fatigue and Impact Strengths of Kenaf Fibre Reinforced Polypropylene Composites: Effects of Fibre Treatments, *Advanced Composite Materials*, 30(2): 103–15.
- Avcı A, Eker AA, Bodur MS, 2020. Effect of Coupling Agent and Alkali Treatment on Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Flax Fiber-Reinforced PLA Composites. *Green Materials*, In press.
- Azizah AB, Rozman HD, Azniwati AA, Tay GS, 2020. The Effect of Filler Loading and Silane Treatment on Kenaf Core Reinforced Polyurethane Composites: Mechanical and Thermal Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(2): 517–31.
- Bajracharya RM, Bajwa DS, Bajwa SG, 2017. Mechanical Properties of Polylactic Acid Composites Reinforced with Cotton Gin Waste and Flax Fibers. *Procedia Engineering*, 200: 370–76.
- Bax B, Müssig J, 2008. Impact and Tensile Properties of PLA/Cordenka and PLA/Flax Composites. *Composites Science and Technology*, 68(7-8): 1601-1607
- Bledzki AK, Jaszkiwicz A, 2010. Mechanical Performance of Biocomposites Based on PLA and PHBV Reinforced with Natural Fibres - A Comparative Study to PP. *Composites Science and Technology*, 70(12): 1687–96.
- Bledzki AK, Jaszkiwicz A, Scherzer D, 2009. Mechanical Properties of PLA Composites with Man-Made Cellulose and Abaca Fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(4): 404–12.
- Bodros E, Pillin I, Montrelay N, Baley C, 2007. Could Biopolymers Reinforced by Randomly Scattered Flax Fibre Be Used in Structural Applications? *Composites Science and Technology*, 67(3–4): 462–70.
- Bodur MS, Sonmez HE, Bakkal M, 2017. An Investigation for the Effect of Recycled Matrix on the Properties of Textile Waste Cotton Fiber Reinforced (T-FRP) Composites. *Polymer Composites*, 38(7): 1231–40.
- Bodur, Bodur MS, Bakkal M, Sonmez HE, 2016. The Effects of Different Chemical Treatment Methods on the Mechanical and Thermal Properties of Textile Fiber Reinforced Polymer Composites. *Journal of Composite Materials*, 50(27): 3817–30.
- Callister W, Rethwisch D, 2014. Wiley Materials Science. John Wiley, New York, USA.
- Cha YH, Kim KS, Kim DJ, 1998. Evaluation on the Fracture Toughness and Strength of Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites. *KSME International Journal*, 12(3): 370–79.
- Chaitanya S, Singh I, 2016. Processing of PLA_sisal Fiber Biocomposites Using Direct- and Extrusion-Injection Molding. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(5), 468-474.
- Couture A, Lebrun G, Laperrière L, 2016. Mechanical Properties of Poly(lactic acid) (PLA) Composites Reinforced with Unidirectional Flax and Flax-Paper Layers. *Composite Structures*, 154(1): 286-295.
- Dhakal HN, Zhang ZY, Guthrie R, MacMullen J, Bennett N, 2013. Development of Flax/Carbon Fibre Hybrid Composites for Enhanced Properties. *Carbohydrate Polymers*, 96(1): 1–8.
- Dicker MPM, Duckworth PF, Baker, Francois G, Hazzard MK, Weaver PM, 2014. Green Composites: A Review of Material Attributes and Complementary Applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 56: 280–89.
- Duigou AL, Bourmaud A, Davies P, Baley C, 2014. Long Term Immersion in Natural Seawater of Flax/PLA Biocomposite. *Ocean Engineering*, 90: 140–48.
- EU Climate Action and the European Green Deal | Climate Action. https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action_en (Erişim Tarihi: 28.05.2021).
- European Commission. Climate Action. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en (Erişim Tarihi: 28.05.2021).
- Feng NL, Malingam SD, Razali N, Subramonian S, 2020. Alkali and Silane Treatments towards Exemplary Mechanical Properties of Kenaf and Pineapple Leaf Fibre-Reinforced Composites. *Journal of Bionic Engineering*, 17(2): 380–92.

- Foruzanmehr M, Vuillaume PY, Elkoun S, Robert M, 2016. Physical and Mechanical Properties of PLA Composites Reinforced by TiO₂ Grafted Flax Fibers. *Materials and Design*, 106: 295–304.
- Gamon G, Evon P, Rigal L, 2013. Twin-Screw Extrusion Impact on Natural Fibre Morphology and Material Properties in Poly(Lactic Acid) Based Biocomposites. *Industrial Crops and Products*, 46: 173–85.
- Gassan J, 2002. A Study of Fibre and Interface Parameters Affecting the Fatigue Behaviour of Natural Fibre Composites. *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(3): 369–74.
- Georgiopoulou P, Christopoulos A, Koutsoumpis S, Kontou E, 2016. The Effect of Surface Treatment on the Performance of Flax/Biodegradable Composites. *Composites Part B: Engineering*, 106: 88–98.
- Georgiopoulou P, Kontou E, Georgousis G, 2018. Effect of Silane Treatment Loading on the Flexural Properties of PLA/Flax Unidirectional Composites. *Composites Communications*, 10(1): 6-10.
- Gholampour A, Ozbakkaloglu, 2020. A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications, *Journal of Materials Science*, 55(3): 829-892.
- González AJ, Sanchez SE, Lagaron JM, Olsson RT, GamezPJ, Cabedo L, 2017. Assessing the Thermoformability of Poly(3-Hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate)/Poly(Acid Lactic) Blends Compatibilized with Diisocyanates. *Polymer Testing*, 62: 235–45.
- Hao LC, Sapuan SM, Hassan MR, Sheltami RM, 2018. Natural Fibre Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites Natural Fiber Reinforced Vinyl Polymer Composites. Woodhead Publishing, 27-70, Michigan, USA.
- Hassan NE, Bai J, Dou DQ, 2019. Biopolymers; Definition, Classification and Applications. *Egyptian Journal of Chemistry*, 62(9): 1725–37.
- Hatipoğlu A, 2020. Preparation And Characterization Of Poly (Lactic Acid) / Barite Composites. Yüksek Lisans Tezi, Alparslan Türkeş Science And Technology University, Adana, Turkey.
- Hong CK, Kim N, Kang SL, Nah C, Lee YS, Cho BH, Ahn JH, 2008. Mechanical Properties of Maleic Anhydride Treated Jute Fibre/Polypropylene Composites. *Plastics, Rubber and Composites*, 37(7): 325–30.
- Hoque MB, Hossain MS, Nahid AM, Bari S, Khan RA, 2018. Fabrication and Characterization of Pineapple Fiber-Reinforced Polypropylene Based Composites. *Nano Hybrids and Composites*, 21: 31–42.
- Hu R, Lim JK, 2007. Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites. *Journal of Composite Materials*, 41(13): 1655–69.
- Huda MK and Widiastuti I, 2021. Natural Fiber Reinforced Polymer in Automotive Application: A Systematic Literature Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1808(1): 012015.
- Huda MS, Drzal LT, Ray D, Mohanty AK, Mishra M, 2008. Properties and Performance of Natural-Fibre Composites, Woodhead Publishing, 221–26, Michigan, USA.
- Jain J, Sinha S, Jain S, 2019. Compendious Characterization of Chemically Treated Natural Fiber from Pineapple Leaves for Reinforcement in Polymer Composites. *Journal of Natural Fibers*, 18(6): 845–56.
- Karmaker AC, Shneider jP, 1996. Mechanical Performance of Short Jute Fibre Reinforced Polypropylene. *Journal of Materials Science Letters*, 15(3): 201–2.
- Karthi N, Kumaresan K, Sathish S, Gokulkumar S, Prabhu L, Vigneshkumar N, 2019. An Overview: Natural Fiber Reinforced Hybrid Composites, Chemical Treatments and Application Areas. *Materials Today: Proceedings*, 27: 2828–34.
- Keck S and Fulland M, 2016. Effect of Fibre Volume Fraction and Fibre Direction on Crack Paths in Flax Fibre-Reinforced Composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 167: 201–9.
- Ko HU, Kim JW, Kim HC, Zhai L, Kim J, 2020. Esterified PVA-Lignin Resin by Maleic Acid Applicable for Natural Fiber Reinforced Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(26): 1–9.
- Koronis G, Silva A, 2018. Green Composites for Automotive Applications. Woodhead Publishing, Michigan, USA.
- Koronis G, Silva A, Fontul M, 2013. Green Composites: A Review of Adequate Materials for Automotive Applications. *Composites Part B: Engineering*, 44(1):120-127.
- Kumar S, Samal SK, Mohanty S, Nayak SK, 2018. Recent Development of Biobased Epoxy Resins: A Review. *Polymer - Plastics Technology and Engineering* 57(3): 133–55.

- Liang Z, Wu H, Liu R, Wu C, 2021. Preparation of Long Sisal Fiber-Reinforced Polylactic Acid Biocomposites with Highly Improved Mechanical Performance. *Polymers* 13(7): 1124.
- Liu B, Jinwen Z, Gabriel G, Linshu L, 2012. Performance Enhancement of Poly (Lactic Acid)/ Soy Protein Concentrate Blends by promoting formation of network structure. *Green materials*, 1(3): 176-185.
- Lotfi A, Li H, Dao DV, Prusty G, 2021. Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review on Material, Manufacturing, and Machinability. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(2): 238–84.
- Maichin P, Suwan T, Jitsangiam P, Chindaprasirt P, and Fan M, 2020. Effect of Self-Treatment Process on Properties of Natural Fiber-Reinforced Geopolymer Composites. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(10): 1120–28.
- Mann GS, Singh LP, Kumar P, Singh S, 2020. Green Composites: A Review of Processing Technologies and Recent Applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(8): 1145–71.
- Mantia FPL, Morreale M, 2011. Green Composites: A Brief Review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(6): 579–88.
- Mohammed L, Ansari MNM, Pua G, Jawaid M, Islam MS, 2015. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. *International Journal of Polymer Science*, 2015(1):1-15.
- Mohanty AK, Drzal LT, Group F, 2005. *Natural Fibers, Biopolymers, And Biocomposites*, Taylor Francis, New York, USA.
- Najeeb MI, Sultan MTH, Andou Y, Shah AUM, Eksiler K, Jawaid M, Ariffin AH, 2020. Characterization of Silane Treated Malaysian Yankee Pineapple AC6 Leaf Fiber (PALF) towards Industrial Applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3): 3128–39.
- Nassiopoulos E, Njuguna J, 2015. Thermo-Mechanical Performance of Poly(Lactic Acid)/Flax Fibre-Reinforced Biocomposites. *Materials and Design*, 66(PB): 473–85.
- O'Donnell A, Dweib MA, Wool RP, 2004. Natural Fiber Composites with Plant Oil-Based Resin. *Composites Science and Technology*, 64(9), 1135-1145.
- Oksman K, Skrifvars M, Selin JF, 2003. Natural Fibres as Reinforcement in Polylactic Acid (PLA) Composites. *Composites Science and Technology*, 63(9): 1317-1324.
- Patil A, Patel A, Purohit R, 2017. An Overview of Polymeric Materials for Automotive Applications. *Materials Today: Proceedings* 4(2): 3807–15.
- Plackett D, Andersen TL, Pedersen WB, Nielsen L, 2003. Biodegradable Composites Based on L-Polylactide and Jute Fibres. *Composites Science and Technology*, 63(9): 1287-1296.
- R. Pantani and L. S. Turng, 2015. Manufacturing of Advanced Biodegradable Polymeric Components. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(48), 1-3.
- Rafiee K, Schritt H, Pleissner D, Kaur G, Brar SK, 2021. Biodegradable Green Composites: It's Never Too Late to Mend. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 30(1): 2452-2236.
- Rana RS, Kumre R, Rana S, Purohit R, 2017. Characterization of Properties of Epoxy Sisal / Glass Fiber Reinforced Hybrid Composite. *Materials Today: Proceedings*, 4(4): 5445–51.
- Reddy KH, Reddy RM, Ramesh M, Krishnudu DM, Reddy BM, Rao HR, 2021. Impact of Alkali Treatment on Characterization of Tapsi (*Sterculia Urens*) Natural Bark Fiber Reinforced Polymer Composites. *Journal of Natural Fibers*, 18(3): 378–89.
- Roy K, Debnath SC, Tzounis L, Pongwisuthiruchte A, Potiyaraj P. Potiyaraj P, 2020. Polymers Effect of Various Surface Treatments on the Performance of Jute Fibers Filled Natural Rubber. *Polymers*, 12(2): 1-14.
- Rubio-López A, Artero-Guerrero, J, Pernas-Sánchez J, Santiuste C, 2017. Compression after Impact of Flax/PLA Biodegradable Composites. *Polymer Testing*, 59: 127–35.
- Shanmugam V, Mensah RA, Försth M, Sas G, Restás A, Addy C, Xu Q, Jiang L, Neisiany RE, Singha S, George G, Jose T, Berto F, Hedenqvist MS, Das O, Ramakrishna S, 2021. Circular economy in biocomposite development: State-of-the-art, challenges and emerging trends. *Composites Part C*, 5(1):1-16.
- Shrivastava A, Dondapati S, 2021. Biodegradable Composites Based on Biopolymers and Natural Bast Fibres: A Review. *Materials Today: Proceedings*, In Press.

- Siakeng R, Jawaid M, Ariffin H, Sapuan SM, 2019. Mechanical, Dynamic, and Thermomechanical Properties of Coir/Pineapple Leaf Fiber Reinforced Poly(lactic acid) Hybrid Biocomposites. *Polymer Composites*, 40(5): 2000–2011.
- Sienkiewicz A, Czub P, 2020. Flame Retardancy of Biobased Composites—Research Development. *Materials*, 13(22): 1–30.
- Soleimani M, Tabil L, Panigrahi S, Opoku A, 2008. The Effect of Fiber Pretreatment and Compatibilizer on Mechanical and Physical Properties of Flax Fiber-Polypropylene Composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 16(1): 74–82.
- Syduzzaman M, Faruque MAA, Bilisik K, Naebe M, 2020. Plant-Based Natural Fibre Reinforced Composites: A Review on Fabrication, Properties and Applications. *Coatings*, 10(10): 1–34.
- Taekema J, Karana E, 2012. Creating Awareness on Natural Fibre Composites in Design. *Proceedings of International Design Conference, 12th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, pp: 1141–50.
- Thwe MM, Liao K, 2002. Effects of Environmental Aging on the Mechanical Properties of Bamboo-Glass Fiber Reinforced Polymer Matrix Hybrid Composites. *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(1): 43–52.
- Vijay R, Manoharan S, Arjun S, Vinod A, 2020. Characterization of Silane-Treated and Untreated Natural Fibers from Stem of *Leucas Aspera*. *Journal of Natural Fibers*, 1-18.
- Vilaplana F, Strömberg E, Karlsson E, 2010. Environmental and Resource Aspects of Sustainable Biocomposites. In *Polymer Degradation and Stability*, 95(11): 2147–61.
- Wang Q, Zhang Y, Liang W, Wang J, Chen Y, 2020. Effect of Silane Treatment on Mechanical Properties and Thermal Behavior of Bamboo Fibers Reinforced Polypropylene Composites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15(33):1-10.
- Wang, Ying, Wang Y, Mei Y, Wang Q, Wei W, Huang F, Li Y, Li J, Zhou Z, 2019. Improved Fracture Toughness and Ductility of PLA Composites by Incorporating a Small Amount of Surface-Modified Helical Carbon Nanotubes. *Composites Part B: Engineering* 162: 54–61.
- Xia X, Liu W, Zhou L, Hua Z, Liu H, He S, 2016. Modification of Flax Fiber Surface and Its Compatibilization in Poly(lactic acid)/Flax Composites. *Iranian Polymer Journal*, 25(1): 25–35.
- Yan L, Chou N, Yuan X, 2012. Improving the Mechanical Properties of Natural Fibre Fabric Reinforced Epoxy Composites by Alkali Treatment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(6): 425–37.
- Yu T, Jiang N, Li Y, 2014. Study on Short Ramie Fiber/Poly(Lactic Acid) Composites Compatibilized by Maleic Anhydride. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64: 139–46.
- Yu T, Ren J, Li S, Yuan H, Li Y, 2010. Effect of Fiber Surface-Treatments on the Properties of Poly(Lactic Acid)/Ramie Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(4): 499–505.
- Zhan J, Li J, Wang G, Guan Y, Zhao G, Lin J, Nacear H, Coutellier D, 2021. Review on the Performances, Foaming and Injection Molding Simulation of Natural Fiber Composites. *Polymer Composites* 42(3): 1305–24.
- Zhang L, Li Z, Pan YT, Yanez AP, Hu S, Zhang XQ, Wang R, Wang DY, 2018. Polydopamine Induced Natural Fiber Surface Functionalization: A Way towards Flame Retardancy of Flax/Poly(Lactic Acid) Biocomposites. *Composites Part B: Engineering*.