



**TEKSTİL VE MÜHENDİS**  
**(Journal of Textiles and Engineer)**



<http://www.tekstilvemuhendis.org.tr>

**Bitkisel Kaynaklı Biyopolietilenin Biyokompozit Üretiminde ve Polimer Karışımlarında Kullanımı**

**Usage of Plant- Based Biopolyethylene in Biocomposite Production and Polymer Blends**

Mustafa ÇELİK, Eylem Kılıç  
Uşak Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

Online Erişime Açıldığı Tarih (Available online):30 Eylül 2020 (30 September 2020)

**Bu makaleye atıf yapmak için (To cite this article):**

Mustafa ÇELİK, Eylem Kılıç (2020): Bitkisel Kaynaklı Biyopolietilenin Biyokompozit Üretiminde ve Polimer Karışımlarında Kullanımı, Tekstil ve Mühendis, 27: 119, 197-215.

**For online version of the article:** <https://doi.org/10.7216/1300759920202711908>



***Derleme Makale / Review Article***

# **BİTKİSEL KAYNAKLI BİYOPOLİETİLENİN BİYOKOMPOZİT ÜRETİMİNDE VE POLİMER KARIŞIMLARINDA KULLANIMI**

**Mustafa ÇELİK\***

**Eylem Kılıç**

<http://orcid.org/0000-0001-8123-8632>

Uşak Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

*Gönderilme Tarihi / Received: 27.05.2020*

*Kabul Tarihi / Accepted: 02.09.2020*

**ÖZET:** Gün geçtikçe etkisini daha çok hissettiren iklim değişikliği ve çevre kirliliği gibi güncel çevresel sorunlar, tüketici alışkanlıklarında ve endüstriyel plastik üretiminde yeni önceliklerin ortaya çıkmasına, yenilenebilir kaynaklardan polimer üretimine ve çevresel olarak sürdürülebilir biyokompozit malzemelere olan ilginin giderek artmasına neden olmuştur. Ticari bir biyopolimer olan biyopolietilen (BiyoPE), yenilenebilir bir bitkisel kaynak olan şeker kamışından üretilmektedir. BiyoPE veya diğer adıyla yeşil polietilen, petrokimyasal kaynaklı polietilen ile aynı mekanik performansa ve çok yönlü uygulama özelliklerine sahip olması, polietilenle aynı geri dönüşüm sürecinde geri dönüştürülebilmesi gibi öne çıkan özellikleri nedeniyle, petrokimyasal kaynaklı polietilene alternatif bir polimer olarak önemli bir potansiyele sahiptir. BiyoPE'nin otomotiv endüstrisinde, kozmetik ve temizlik ürünlerinin ambalajlarında, oyuncaklarda yaygın bir şekilde kullanılan polietilen karşısındaki rekabet gücü; plastik kirliliği, fosil kaynakların tükenmesi, petrol fiyatlarının artışı ve biyopolimer üretim teknolojilerinin geliştirilmesi için gerçekleştirilen yatırımlarla birlikte oldukça artmıştır. Son yıllarda döngüsel ekonomiye geçiş doğrultusunda sürdürülebilir üretim süreçlerinin önem kazanması ve BiyoPE ile gerçekleştirilen çevresel etki değerlendirme çalışmalarının sayısının artması, BiyoPE'nin daha çok üretici tarafından benimsenerek, gönüllü ürün sertifikasyonu ve etiketlemesinde tercih edilmesine, yeni uygulamaların ve ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmada yenilenebilir kaynaklardan elde edilen BiyoPE'nin çevre dostu, toksik madde içermeyen biyokompozitlerin ve polimer karışımlarının üretiminde kullanımı ile ilgili güncel gelişmeler ele alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yeşil polietilen, biyopolietilen, sürdürülebilir üretim, biyokompozit, polimer karışımları

## **USAGE OF PLANT- BASED BIOPOLYETHYLENE IN BIOCOSMPOSITE PRODUCTION AND POLYMER BLENDS**

**ABSTRACT:** Current emerging environmental issues such as global warming and environmental pollution gave rise to changes in consumer behaviours and industrial production's priorities and have led to a growing interest for the production of environmentally sustainable biocomposites, and polymer blends using renewable sources. Biopolyethylene (BioPE) is a commercial biopolymer derived from sugar cane, which is a renewable source. BioPE also known as green polyethylene, possess the same mechanical performance, versatile application properties of polyethylene from fossil origin, and can be recycled in the same chains already developed for conventional polyethylene, therefore it has a significant potential as an alternative polymer for polyethylene from fossil origin. Competitiveness of biopolyethylene against polyethylene, which is utilised widely in automobile industry, packaging of cosmetics and cleaning products, toys, is improved significantly due to plastic pollution, depletion of fossil sources, increasing oil prices and investments in biopolymer production technologies. In recent years due to increasing importance of transition to circular economy and sustainable production processes, and increasing numbers of studies related to environmental impact assessment of biopolyethylene, led producers prefer biopolyethylene for volunteered product certification and labelling, and enable development of new application areas and products. In this study, recent developments regarding usage of biopolyethylene, which is derived from renewable sources, for environmentally friendly, non-toxic polymer blends and biocomposite production were reviewed.

**Keywords:** Green polyethylene, biopolyethylene, sustainable production, biocomposite, polymer blends

**\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** [mustafacelik@yandex.com](mailto:mustafacelik@yandex.com)

**DOI:** <https://doi.org/10.7216/1300759920202711908> [www.tekstilmuhendis.org.tr](http://www.tekstilmuhendis.org.tr)

## 1. GİRİŞ

Geleneksel polimerler, fosil yakıt olarak da kullanılan ham petrolün çeşitli kimyasal sentez işlemlerine tabi tutulmasıyla üretilen, ucuz, korozyon direnci yüksek, dayanıklı, hafif, çok iyi mekanik ve termal özellikleri olan ve kolay işlenebilen plastik malzemelerdir [1]. İlk olarak 19. yüzyılda keşfedilen sentetik polimerler, zamanla bu üstün özellikleri nedeniyle birçok farklı kullanım alanı bulmuş, çoğu metal ve seramik malzeme ile rekabet edebilecek düzeye gelmiş, hatta bu malzemelerin yerini almıştır [1, 2]. 1950-2017 yılları arasında dünyadaki toplam plastik kullanımının sektörlere göre dağılımına bakıldığında; ambalaj sektörünün %36'lık pay ile plastik kullanımında başı çektiği, bunu %16 payla yapı ve inşaat sektörünün, %14 ile de tekstil sektörünün takip ettiği belirtilmiştir [3]. Günümüzde inşaat, ambalaj, elektrik elektronik gibi birçok endüstriyel sektörde kullanım alanı bulan ve mobilya, giyim, ev eşyası, spor malzemeleri gibi günlük hayatın hemen her alanında karşımıza çıkan polimer esaslı malzemelerin ham maddesini oluşturan sentetik polimerlerin üretimi, özellikle son on yılda önemli miktarda artmıştır [3-5]. 1977 yılında dünya genelinde 50 milyon ton olan plastik üretiminin 38 yılda yaklaşık %544 artarak, 2015 yılında 322 milyon tona çıktığı [2], 2018 yılı için ise bu değer 359 milyon tona ulaştığı Plastics Europe'un 2019 yılında yayınladığı raporda belirtilmiştir [6]. Bunun yanı sıra dünyada şimdiye kadar üretilen toplam plastik miktarının yarısının 2004-2017 arasındaki 13 yıllık süreçte üretildiği belirtilmektedir [3].

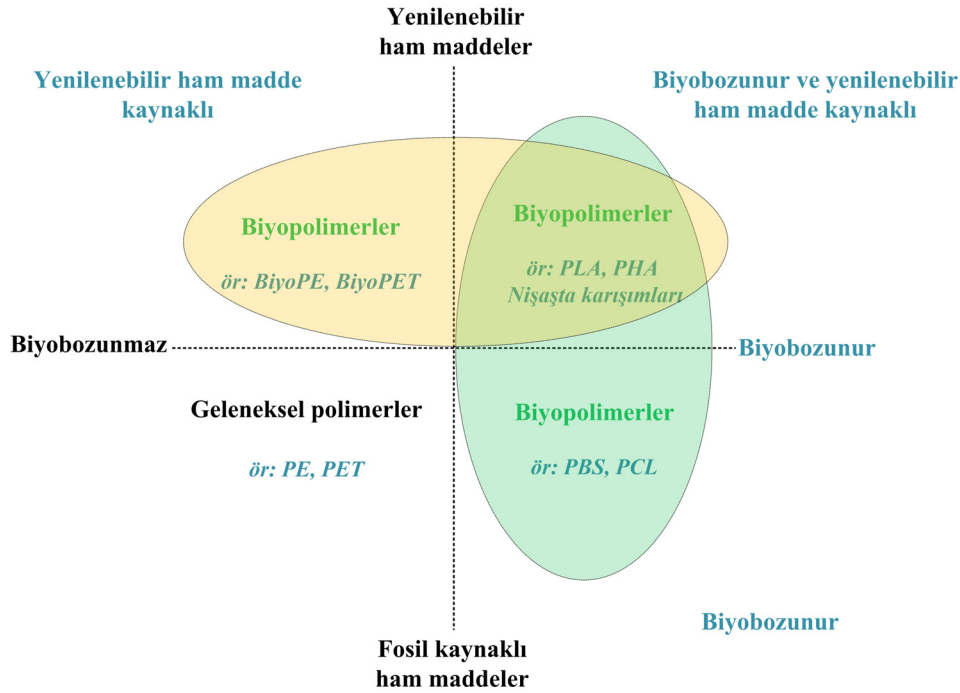
Sentetik polimerlerin üretiminde fosil kaynakların yaklaşık %6-8'lik kısmının kullanıldığı tahmin edilmektedir. Artan dünya nüfusu ile birlikte enerji ve ham madde ihtiyacının da artacağı göz önünde bulundurulduğunda, bu rakamın 2050 yılında %20'ye çıkması, plastik üretiminin de yıllık 1,1 milyar tona ulaşacağı tahmin edilmektedir [3, 5, 7]. Polimer ham maddelerinin ve polimer esaslı malzemelerin üretimi ve fosil kaynakların tüketimi ile ilgili bir diğer önemli konu, plastik üretim artışına bağlı olarak ortaya çıkan plastik atıkların, çevre kirliliğindeki payının her geçen gün artmasıdır. World Wildlife Fund'ın (Doğal Hayatı Koruma Vakfı, WWF) 2018 yılında yayınlanan raporunda, sadece Avrupa'da 2018 yılında 27 milyon ton plastik atık ortaya çıktığı ve Akdeniz'e en fazla plastik atık boşaltan ülkenin, günlük 144 ton atık ile Türkiye olduğu belirtilerek yaşanan plastik kirliliğinin boyutları vurgulanmıştır [8].

Ambalaj ürünleri başta olmak üzere fosil kaynaklar kullanılarak üretilen plastiklerin, kullanım ömürleri sonunda çevreye atık

olarak bırakılması ve bu atıkların doğada yıllarca bozunmadan kalması ciddi bir çevre kirliliğine yol açmaktadır [9-11]. Bunun yanı sıra polimerlerin ham maddesi olan fosil kaynakların işlenmesi, plastiklerin kullanım ömrü sonunda yakılarak bertaraf edilmesi sırasında ve atık olarak doğaya bırakılan plastiklerin uzun süre güneş ışığına maruz kaldığında, atmosfere önemli miktarda sera gazı salımı gerçekleştirdiği ve bu nedenle fosil kaynakların ve fosil kaynaklı polimer kullanımının küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlara da yol açtığı belirtilmektedir [12, 13].

Polimer ham maddelerinin ve polimer esaslı malzemelerin imalatı, endüstriyel üretimin en önemli alanları arasında olmakla birlikte, plastik kirliliğine yol açmaları ve ham madde olarak tükenir ve kısıtlı fosil kaynakları kullanmaları nedeniyle yarattıkları çevresel sorunlar, her geçen gün bu sektörlerin daha kirlitici sektörler olarak anılmalarına neden olmaktadır. Bu durum plastik üreticilerinin endüstriyel üretimde sürdürülebilirliğin sağlanması noktasındaki kaygılarını arttırmış, çevre dostu üretim teknolojilerinin geliştirilmesine ivme kazandırarak ham madde olarak fosil kaynaklar yerine yenilenebilir kaynaklı ham maddelerin geliştirilmesini ve uygulama alanlarının yaygınlaştırılmasını dünya genelinde öncelikli bir konu haline getirmiştir [7, 14]. Bu alanda yapılan en önemli çalışmalardan biri petrol türevli polimerlere alternatif olarak biyopolimerlerin sentezlenmesi ve farklı üretim süreçleri için ham madde olarak kullanımudur. Günümüzde birçok araştırmacının ve üreticinin ilgisini çeken biyopolimerlerin, petrokimyasal kaynaklı muadillerine göre daha düşük karbon salımı yapmaları ve fosil kaynaklar yerine yenilenebilir kaynaklardan üretilmeleri nedeniyle, ekolojik dengenin korunmasında ve petrole olan bağımlılığın azaltılmasında kritik bir rolünün bulunduğu belirtilmektedir [4, 5, 7, 13].

Literatürde "yeşil polimerler" [15, 16] olarak da isimlendirilen biyopolimerler, elde edildiği ham maddenin türüne ve biyobozunurluk özelliklerine göre farklı şekillerde gruplandırılmaktadır. European Bioplastics'e göre; polilaktik asit (PLA), polihidroksialkanoat (PHA) gibi biyolojik olarak parçalanabilen veya biyolojik kaynaklardan üretilen plastikler biyoplastik olarak isimlendirilmektedir [17]. Örneğin fosil kaynaklı ham maddelerden üretilen polikaprolakton (PCL) ve polibutilen süksinat (PBS) biyolojik olarak parçalanabilir olmaları nedeniyle biyopolimer olarak isimlendirilmektedirler. Diğer yandan BiyoPE ve biyolojik esaslı polietilen tereftalat (BiyoPET) biyobozunur özellikleri olmamasına rağmen yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri nedeniyle biyopolimer olarak isimlendirilebilmektedir.



Şekil 1. Kaynağına göre biyoplastikler ve biyobozunurluk özellikleri [18]

Şekil 1 incelendiğinde, ham madde kaynağı ve biyobozunurluk özelliği göz önünde bulundurulduğunda fosil kaynaklı ham maddelerden üretilen biyobozunmaz polimerlerin, biyoplastik tanımına uymadığı görülmektedir.

Biyobozunma özelliği bulunmayan ve fosil kaynaklardan elde edilen geleneksel polimerler, diğer gruplarda yer alan biyoplastiklerden çok daha fazla miktarda üretilmektedirler. WWF, 2018 raporunda plastik üretiminin neredeyse %90'ının petrokimyasal kaynaklar kullanılarak gerçekleştirildiğini belirtmiştir [8].

Günümüzde fosil kaynaklardan üretilen polimerlerin maliyetleri, üretim hızları, mekanik ve termal özellikleri yenilenebilir kaynaklardan üretilen biyopolimerlere kıyasla nispeten daha üstün olmasına rağmen [4, 5, 7] biyopolimerler, sürdürülebilir ve çevreci üretim teknolojilerinin geliştirilmesi sürecinde, fosil kaynaklı polimerlere en güçlü ve en önemli alternatiflerden biri olarak kabul edilmektedir. Son yıllarda döngüsel ekonomiye geçiş doğrultusunda sürdürülebilir üretim süreçlerinin önem kazanması, biyopolimerlerin daha çok plastik üreticisi tarafından benimsenmesine, gönüllü ürün sertifikasyonu ve etiketlemesinde tercih edilmesine, yeni uygulama alanlarının ve ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır [4, 19].

## 1.2 Biyopolietilen (BiyoPE)

Polietilen, etilen monomerinin polimerizasyonu ile üretilmektedir ve düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) gibi farklı çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 2'de BiyoPE üretim sürecinde gerçekleştirilen işlemler ve bu işlemler sonucunda elde edilen ürünler birlikte gösterilmiştir. Ağırlıklı olarak

ambalaj sektöründe geniş kullanım alanı ve çeşitliliği bulunan polietilen, plastik dış ticaret hacmi içindeki yaklaşık %30'luk payla, küresel ölçekte en fazla üretimi ve tüketimi gerçekleştirilen plastik ham maddesidir [20, 21]. Bu veriler ve yaygın kullanım alanı göz önünde bulundurulduğunda fosil kaynaklar kullanılarak üretilen polietilenin, plastik kirliliğine önemli bir katkısının olduğu, dolayısıyla çevresel etkisinin azaltılması amacıyla da petrokimyasal kaynaklı polietilene alternatif olabilecek doğal ve sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen biyopolimerlerin sentezinin önem kazandığı söylenebilir.

Yenilenebilir bir kaynak olan şeker kamışından üretilen BiyoPE, polimer üretiminin ve plastik ürünlerin çevresel performansının iyileştirilmesi ve sürdürülebilirliğinin sağlanması amacıyla geliştirilen, petrokimyasal kökenli polietilene alternatif olarak kabul edilen ve yüzde yüz geri dönüştürülebilir, biyolojik esaslı bir biyopolimerdir [21, 22]. BiyoPE diğer biyobozunmaz biyopolimer türleri arasında en yüksek üretim yüzdesine sahiptir. Dünyada biyoplastik üretimi 2019 yılı verileri göz önünde bulundurulduğunda (2,11 milyon ton), BiyoPE biyolojik esaslı ve biyobozunmaz biyopolimer çeşitleri arasında %11,8 ile en yüksek üretim yüzdesine, tüm biyopolimer çeşitleri göz önünde bulundurulduğunda ise nişasta karışımları (%21,3), polilaktik asit (%13,9) ve polibutilenadibat tereftalattan (%13,4) sonra dördüncü en yüksek üretim payına sahip biyopolimerdir [23].

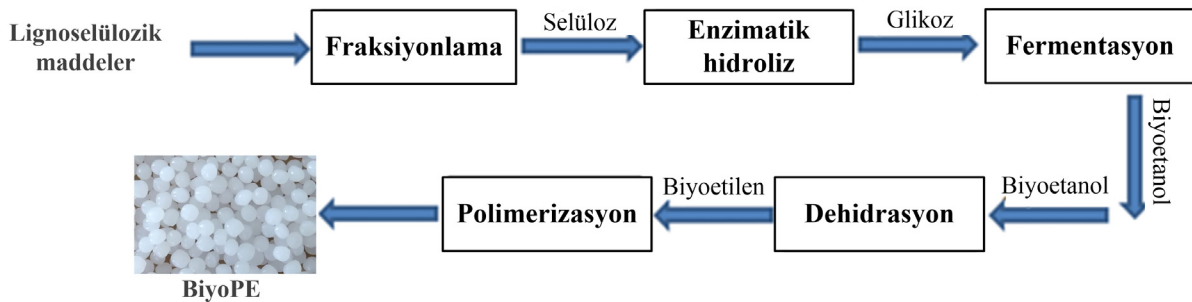
İlk kez 2010 yılında Brezilya'da faaliyet gösteren bir petrokimya şirketi olan Braskem tarafından, "I'm Green™ Polyethylene" sertifikası ile ticari bir polimer olarak piyasaya sürülen BiyoPE, 1980 yılından aynı firma tarafından üretilmiştir. Ne var ki 1980'lerdeki petrol fiyatlarının günümüze kıyasla düşük olması

ve o dönem biyopolimer üretimindeki teknolojik kısıtlamalar, BiyoPE'nin petrokimyasal kaynaklı polietilen ile rekabet etmesini engellemiştir. Gelişen üretim teknolojileri ve petrol fiyatlarının artmasıyla birlikte BiyoPE'nin rekabet gücü artmış ve petrokimyasal kaynaklı polietilene alternatif olarak 2010 yılında ticari bir polimer olarak piyasaya sürülebilmektedir. Braskem firması şeker kamışı etanolünden yıllık 200.000 ton polietilen üretim kapasitesiyle dünyanın önde gelen BiyoPE üreticisi konumunu, günümüzde de korumaya devam etmektedir [15, 24]. Başta kozmetik, gıda, kişisel bakım ve içecek ambalajları olmak üzere otomobil, elektronik cihazlar gibi sayısı gün geçtikçe artan uygulama alanları bulunan BiyoPE, sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesi aşamasında endüstriyel plastik üreticileri tarafından giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bunun en önemli etkenlerinden biri ham maddesini oluşturan şeker kamışının yetiştirilmesi esnasında önemli miktarda karbondioksit yakalayan bir bitki olmasıdır [24]. Şeker kamışının bu özelliğinden dolayı, BiyoPE üretimi esnasında atmosfere salınan karbondioksitin sonraki hasatta şeker kamışı tarafından tekrar yakalanacağı ve böylece karbondioksit dengesinin korunacağı belirtilmektedir [22, 24].

BiyoPE'nin çevresel etkisinin araştırıldığı yaşam döngüsü analizi (Life Cycle Assessment) çalışmalarında BiyoPE'nin petrokimyasal polietilene göre karbon ayak izini ve sera gazı emisyonlarını azaltma konusunda olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir [22, 25]. Liptow ve ark. tarafından gerçekleştirilen yaşam döngüsü analizi çalışmasında, şeker kamışından ve fosil kaynaklardan üretilen aynı miktarda LDPE'nin çevresel etkileri karşılaştırılmıştır [22]. Çalışmada değerlendirilen senaryoda LDPE'nin Brezilya'da şeker kamışı etanolünden üretildiği, Avrupa'ya sevk edildiği, tüketiciler tarafından kullanılıp atıldığı ve ardından enerji geri kazanımı için yakılarak bertaraf edildiği kabul edilmiştir. Fosil kaynaklı LDPE'nin ise Orta Doğu'dan çıkarılan ham petrolün Avrupa'da işlenmesi sonucunda üretildiği, tüketiciler tarafından kullanıldıktan sonra atık formunda enerji geri kazanımı için yakılarak bertaraf edildiği kabul edilmiştir. Çalışmada iki farklı kaynaktan elde edilen polimerlerin, küresel

ısınma potansiyeli (GWP) karşılaştırılmış ve tarımsal kökenli polietilen (BiyoPE) için en belirleyici faktörün arazi kullanım değişikliğinden (LUC) kaynaklanan emisyonlar olduğu tespit edilmiştir. Sonuçta LUC emisyon aralığını belirlemenin zor olduğu, ancak şeker kamışından üretilen LDPE için bu emisyonların sifıra yakın olabileceği ve bu durumda küresel ısınma potansiyelinin önemli ölçüde düşük olacağı belirtilmiştir. Fakat çevresel etki açısından en kötü senaryo göz önünde bulundurulduğunda dahi, şeker kamışı esaslı LDPE'nin küresel ısınma potansiyelinin, fosil esaslı LDPE ile yakın veriler sağladığı belirtilmiştir. Araştırmacılar yenilenebilir kaynaklı polimerlerin fosil kaynaklara olan bağımlılığını azaltacağını ve çevresel etkileri bakımından fosil kaynaklardan elde edilen polimerlere alternatif olabileceğini belirtmiştir.

Şeker kamışından üretilen BiyoPE'nin sera gazı emisyonu, küresel ısınma potansiyeli gibi çevresel etkilerinin araştırıldığı benzer bir yaşam döngüsü analizi çalışmasında, Kikuchi ve ark [25] Brezilya'da şeker kamışından üretilen, Japonya'ya sevk edildikten sonra plastik kutu (kap, şişe vb.) ve ambalaj imalatında kullanılan ve kullanım ömrü sonunda yakılarak bertaraf edildiği kabul edilen BiyoPE ile satın alındıktan sonra Japonya'ya sevk edilen ham petrolden üretilen petrokimyasal kaynaklı HDPE'yi karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda, diğer yaşam döngüsü analizi çalışmasına [22] benzer şekilde, arazi kullanım değişikliğinden kaynaklanan emisyonların BiyoPE'nin sera gazı emisyonları ve küresel ısınma potansiyelinde önemli bir katkısının bulunduğu, ancak BiyoPE'nin yaşam döngüsü boyunca petrokimyasal kaynaklı polietilene kıyasla daha az sera gazı emisyonuna yol açtığı bulunmuştur. Araştırmacılar petrokimyasal kaynaklı polietilen yerine BiyoPE tercih edilmesinin, polietilen kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonunu azaltabileceğini belirtmiştir [25]. Bunun yanı sıra aynı senaryo için; 1 kg BiyoPE'nin bu süreçte ortalama 1,35 kg sera gazı emisyonuna yol açtığı, petrokimyasal kaynaklı polietilen için bu rakamın 4,55-5,10 kg olduğu ve BiyoPE kullanımının sera gazı emisyonlarında yaklaşık %70-74'lük bir azalma sağlayacağı belirtilmektedir [26].



Şekil 2. BiyoPE üretim sürecinde gerçekleştirilen işlemler [21]

## 2. BİYOPOLİETİLENİN KULLANILDIĞI POLİMER KARIŞIM VE BİYOKOMPOZİT ÇALIŞMALARI

Kompozit malzemeler; aynı veya farklı malzeme grubundan, iki ya da daha fazla materyalin çeşitli yöntemlerle bir araya getirildiği ve bileşenlerin tek başına sahip olduğu özelliklerden daha üstün fiziksel, kimyasal vb. özelliklere sahip yeni bir malzemenin türetildiği geniş bir gruptur. Kompozitlerin yapısını oluşturan bileşenler, matris fazı ve takviye fazı olarak isimlendirilmekte ve bunlardan matris fazı hacimsel olarak daha fazla yer kaplamaktadır. Bu bileşenlerden en az birinde biyolojik kaynaklardan elde edilen ya da biyolojik olarak parçalanabilen malzemeler kullanıldığında, elde edilen ürün biyokompozit olarak isimlendirilmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde BiyoPE'nin biyokompozit üretiminde kullanıldığı pek çok çalışma olduğu ve artan çevre bilinci ve sürdürülebilir üretim anlayışının yaygınlaşmasına paralel olarak, yapılan çalışma sayısının da gün geçtikçe arttığı görülmektedir [27-49]. Öyle ki; çalışmalar yıllara göre gruplandırıldığında, çalışmaların 2017'den bu yana artarak devam ettiği ve en fazla çalışmanın da 2019 yılında yapıldığı tespit edilmiştir [46-53].

Bu makale kapsamında incelenen BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmalarının yaklaşık %90'ında, düşük yoğunluklu BiyoPE'ye göre üstün mekanik özellikleri ve çok geniş bir kullanım alanı (ambalaj filmi, basınçlı borular, plastik şişe üretimi vb.) bulunması nedeniyle yüksek yoğunluklu BiyoPE tercih edilmiştir. İncelenen biyokompozit çalışmalarında, takviye malzemesi olarak tarımsal atıklar, budama atıkları gibi bitkisel lifler ve kil, kalsiyum karbonat, yumurta kabuğu gibi mineral katkı maddelerinin tercih edildiği gözlenmiştir. Literatürde BiyoPE'nin biyokompozit üretimi dışında farklı polimerlerle karıştırılarak, yeni polimer karışımlarının elde edildiği çalışmalar da bulunmaktadır [54-61]. Polimer karışımları temel olarak çok bileşenlidir, iki veya daha fazla polimerin karıştırılmasıyla daha ucuz, etkin, yeni özelliklere sahip malzemelerin oluşturulması amaçlanır. Biyokompozit çalışmalarına benzer bir şekilde bu alanda yapılan çalışmaların çoğunun son yıllarda gerçekleştirildiği ve çalışma sayısının da giderek arttığı gözlenmiştir [50-53].

Makale kapsamında incelenen BiyoPE esaslı çalışmalar, üç alt başlıkta değerlendirilmiştir. Kullanılan takviye malzemesinin içeriğine göre; **(i)** bitkisel kaynaklı takviye malzemesi içeren biyokompozitler ve **(ii)** mineral takviye malzemesi içeren biyokompozitler ilk iki grubu, **(iii)** iki veya daha fazla polimerin kullanıldığı polimer karışımı çalışmaları ise üçüncü grubu oluşturmaktadır.

### 2.1 Bitkisel Kaynaklı Takviye Malzemesi İçeren BiyoPE Esaslı Biyokompozitler

Ekonomik açıdan katma değeri yüksek yeni ürünlerin geliştirilmesine elverişli, çevresel etkileri bakımından daha avantajlı olmaları, birçok uygulama alanında ve sektörde kullanım alanı bulmaları nedeniyle, doğal lif takviyeli kompozitlerin kullanımına olan ilgi artmıştır. Bu makale kapsamında incelenen BiyoPE

esaslı biyokompozit çalışmalarının yaklaşık dörtte üçünde doğal takviye malzemelerinin ya da bunların türevlerinin kullanıldığı görülmektedir. Tablo 1'de bitkisel kaynaklı takviye malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen biyokompozit çalışmalarının özeti verilmiştir.

Çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen çekme testi, eğilme testi ve darbe dayanımı testi gibi çeşitli mekanik testler ve test sonuçları değerlendirilmiş, erişilebilen veriler mekanik özelliklerin karşılaştırılabilmesi amacıyla Tablo 2'de verilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde, BiyoPE'nin biyolojik olarak bozunabilme yeteneğinin bulunmaması nedeniyle, biyokompozitlerin biyobozunurluklarıyla ilgili bir test gerçekleştirilmediği, sadece bir çalışmada araştırmacıların elde ettikleri biyokompozitin kompostlama koşulları altında parçalanabilirliğini incelediği tespit edilmiştir [32].

Endüstriyel atıklar ve tarımsal yan ürünler, yüksek miktarda bulunabilmeleri, ulaşılabilir ve ucuz olmaları nedeniyle, kompozit malzemelerin üretiminde doğal takviye malzemesi olarak kullanılan ağaç lifleri ve doğal liflere, oldukça iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, takviye malzemesi olarak çeşitli atıkların kullanılması sayesinde, atıklar ikincil ham madde olarak değerlendirilmekte, atıkların depolama alanlarında kirlilik oluşturmaması önlenmekte, dolayısıyla depolama ve atık bertaraf maliyeti azaltılarak, ekonomik açıdan katma değeri yüksek yeni ürünler geliştirilebilmektedir. BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmalarında kullanılan doğal lif takviye malzemeleri genellikle bitkisel kaynaklıdır ve bitki budama atıkları, kekik, lif kabağı, arpa sapı atığı gibi farklı bitkisel atık malzemelerden ve tarımsal yan ürünlerden oluşmaktadır. Bu kapsamda incelenen çalışmaların çoğunda biyokompozitlerin üretimi için matris malzemesi olarak granül formda BiyoPE kullanılmış, genellikle ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinden yararlanılmıştır (Şekil 3).

Bu alanda yapılan ilk çalışmalar, Castro ve ark. tarafından curaua lifleri [27-29] ve bu liflerden elde ettikleri selüloz nanokristalleri [30] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Curaua; ananasgiller familyasına ait Amazon bölgesine özgü bir bitkidir. Yapılan dört farklı çalışmada genel itibarıyla farklı uyumlaştırıcı ajanların kompozit bileşenlerinin yapışma özelliklerine olan etkisi ve farklı üretim yöntemleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaların ilkinde [27], %5-10-15-20 curaua lifi içeren kompozit örneklerinde %5 oranında hidroksil uçlu sıvı polibütadien (LHPB) kullanılmış ve dahili karıştırıcı/sıkıştırarak kalıplama, ekstrüzyon/enjeksiyon kalıplama sistemleri ile kompozitler üretilmiştir. Yapılan testler neticesinde ekstrüzyon/enjeksiyon kalıplama sistemi ile üretilen kompozitlerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [27]. Yapılan ikinci çalışmada ise optimum uyumlaştırıcı miktarı belirlenmeye çalışılmış ve bu amaçla, %30 curaua lifi içeren kompozitlerde %10-15-20 oranlarında LHPB kullanılmıştır. Sonuçta LHPB'nin lif/matris yapışmasını iyileştirdiği ve darbe mukavemetini arttırdığı, ayrıca optimum sonuçların %15 LHPB içeriği ile elde edildiği tespit edilmiştir [28].



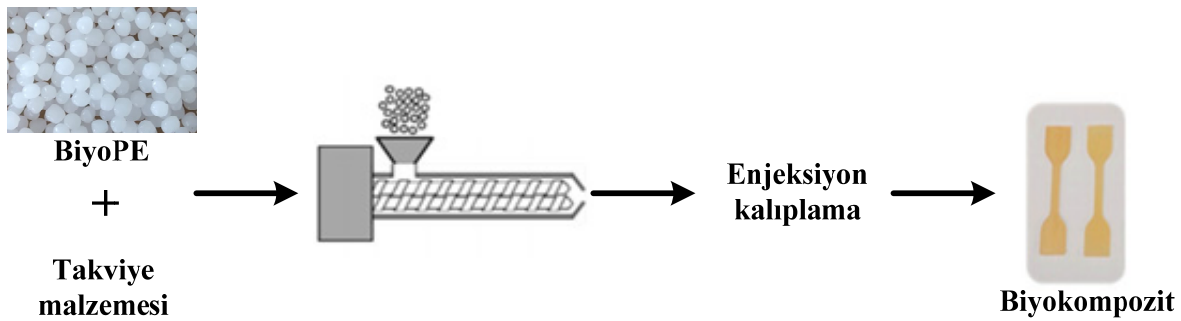
**Tablo 1.** BiyoPE ve bitkisel kaynaklı takviye malzemesi içeren biyokompozit çalışmaları

Matris Malzemeleri	Takviye Malzemeleri	Arayüzey/Katkı Malzemeleri	Üretim Yöntemi	Referans
BiyoPE	Curaua Lifleri	Hidroksil uçlu sıvı polibütadien	Dahili karıştırıcı ve sıkıştırarak kalıplama/Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Castro vd. 2012 [27]
BiyoPE	Curaua Lifleri	Hidroksil uçlu sıvı polibütadien	Dahili karıştırıcı ve sıkıştırarak kalıplama	Castro vd. 2013 [28]
BiyoPE	Odun unu Ultra ince selüloz tozu Kenaf lifi Tüf mikropartikülleri	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Kuciel vd. 2014 [31]
BiyoPE	Termoplastik nişasta (TPS)	PEgMA <sup>1</sup> , Sepiyolit, Propiltrimetoksilan	Mikro dökme film hattı	Madrigal vd. 2015 [32]
BiyoPE	Lif kabağı atıkları	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Escocio vd. 2015 [33]
BiyoPE	Curaua selüloz nanokristalleri (CNC)	Hintyağı, ESO <sup>2</sup> , ELO <sup>3</sup>	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve sıkıştırarak kalıplama	Castro vd. 2015 [30]
BiyoPE	Deniz çayırı atığı	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Ferrero vd. 2015 [34]
BiyoPE	Yerfıstığı kabağı atığı	PEgMA <sup>1</sup> , PPgMA <sup>4</sup> , SEBSgMA <sup>5</sup>	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Garcia vd. 2016 [35]
BiyoPE	Curaua Lifleri	Hintyağı, Kanola yağı	Dahili karıştırıcı ve sıkıştırarak kalıplama	Castro vd. 2017 [29]
BiyoPE	Deniz çayırı atığı	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Ferrero 2017 [36]
BiyoPE, Biyopoliamid	Keten elyaf Ahşap kaplama	Tabaka yapıli kompozit	Sıkıştırarak kalıplama	Ouali vd. 2017 [37]
BiyoPE	Saz püskülü atığı	MAPE <sup>1</sup> , NaOH, Propiltrimetoksilan	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Vilaplana vd. 2017 [38]
BiyoPE	Ahşap Kaplama	PVFA-co-PVAm <sup>6</sup>	Sıkıştırarak kalıplama	John vd. 2017 [39]
BiyoPE	Termomekanik odun hamuru (TMP)	MAPE <sup>1</sup>	Gelimat mikser ve enjeksiyon kalıplama/Ekstrüzyon ve 3D yazıcı	Tarrés vd. 2018 [40]
BiyoPE	Termomekanik odun hamuru (TMP)	Lauril gallat, Oktil gallat, MAPE <sup>1</sup>	Ekstrüzyon ( <i>tek vidalı</i> )	Filgueira vd. 2018 [41]
BiyoPE, Polipropilen	Kişniş sapı atığı	MAPE <sup>1</sup> , MAPP <sup>4</sup>	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Uitterhaegen vd. 2018 [42]
BiyoPE, PLA	Selüloz Esterleri	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Keyriläinen vd. 2018 [43]
BiyoPE	Kekik atığı	PVAE <sup>7</sup> , PEMAGM <sup>8</sup> , PEGM <sup>9</sup> , PEA <sup>10</sup>	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Montanes vd. 2018 [44]
BiyoPE	Kekik atığı	PEGM <sup>9</sup>	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> )	Montanes vd. 2018 [45]
BiyoPE	Ahşap Kaplama	MAPE <sup>1</sup> , MAPP <sup>4</sup> , MAPS <sup>11</sup> , MAPO <sup>12</sup>	Sıkıştırarak kalıplama	John vd. 2019 [46]
BiyoPE	Kahve çekirdeğı zarı atığı	Alkali ağartıcı, Palmitoil klorür, Maleik anhidrit, Dikumul Peroksit	Ekstrüzyon ve mikro dökme film hattı	Dominici vd. 2019 [47]
BiyoPE	Mantar tozu	PEgMA <sup>1</sup>	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Vasconcelos vd. 2019 [48]
BiyoPE	Arpa sapı atığı	MAPE <sup>1</sup>	Gelimat mikser ve enjeksiyon kalıplama	Parareda vd. 2019 [49]

<sup>1</sup>Maleik anhidrit grafltanmış polietilen, <sup>2</sup>Epoksilenmiş soya yağı, <sup>3</sup>Epoksilenmiş keten tohumu yağı, <sup>4</sup>Maleik anhidrit grafltanmış polipropilen, <sup>5</sup>Polistiren-blok-poli(etilen-ran-butilen)-blok-polistiren-graft-maleik anhidrit, <sup>6</sup>Poli (N-vinilformamid-ko-vinilamin) <sup>7</sup>Poli(vinil alkol-ko-etilen), <sup>8</sup>Poli (etilen-ko-metil akrilat-ko-glisidil metakrilat), <sup>9</sup>Poli (etilen-ko-glisidil metakrilat), <sup>10</sup>Poli (etilen-ko-akrilik asit), <sup>11</sup>Maleik anhidrit grafltanmış polistiren, <sup>12</sup>Poli (maleik anhidrit-alt-1-oktadesen)

**Tablo 2.** Bitkisel kaynaklı takviye malzemesi içeren BiyoPE esaslı biyokompozitlerin mekanik özellikleri

Biyokompozitlerde Kullanılan Takviye ve Uyumlaştırıcı Miktarları	Çekme Testi Sonuçları			Eğilme Testi Sonuçları		Darbe Dayanımı	Referans
	Young Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğilme Modülü (GPa)	Eğilme Dayanımı (Mpa)		
%25 Odun unu	2,74 ± 0,21	23,8 ± 0,1	6,5 ± 0,2	2,484 ± 0,077	35,6 ± 0,3	5,2±0,2 kJ/m <sup>2</sup>	[31]
%25 Ultra ince selüloz tozu	2,25 ± 0,07	23,5 ± 0,3	18 ± 0,7	1,942 ± 0,072	31,6 ± 0,1	3,2±0,1 kJ/m <sup>2</sup>	
%25 Kenaf lifi	2,63 ± 0,17	22,6 ± 0,8	5,8 ± 0,3	2,667 ± 0,015	36,3 ± 0,2	4,3±0,1 kJ/m <sup>2</sup>	
%25 Tüf mikropartikülleri	1,72 ± 0,06	21,8 ± 0,5	48 ± 3,4	1,728 ± 0,012	28,6 ± 0,1	3±0,1 kJ/m <sup>2</sup>	
%30 TPS + %5 PEGMA & Sepiyolit (%0.5 Sepiyolit)	-	12	>600	-	-	-	[32]
%30 Lif kabağı atığı	1,682±0,158	21,2±0,4	-	-	37,7±0,5	26,9±2,4 J/m	[33]
%40 Lif kabağı atığı	2,082±0,237	20,8±0,3	-	-	35,8±0,3	25,5±1 J/m	
%3 CNC + %3 Hintyağı	0,536±0,041	22,7±2,1	155±12	-	-	-	[30]
%3 CNC + %3 ESO	0,495±0,031	22,5±2,4	152±9	-	-	-	
%3 CNC + %3 ELO	0,511±0,035	22±1,9	154±10	-	-	-	
%30 Deniz çayırı atığı	0,522±0,01	19,5±0,1	5,4±0,3	1,430±0,0323	30,3±0,2	-	[34]
%40 Deniz çayırı atığı	0,601±0,0198	18,9±0,5	3,3±1,4	1,762±22,6	30,8±0,3	-	
%30 Yerfıstığı kabuğu atığı + %3 PPgMA	0,632	-	0,7	1,387	28,5	1 kJ/m <sup>2</sup>	[35]
%30 TMP, %6 MAPE (Yüksek MFI değerine sahip BiyoPE)	3,26±0,06	38,72±0,61	2,90±0,42	-	-	-	[40]
%40 Kişniş sapı atığı + %10 MAPE	-	12	-	-	16	-	[42]
%30 Kekik atığı	0,645±0,076	16,2±0,6	2,83±0,5	1,690±0,131	27,2±2,8	2,3±0,1 kJ/m <sup>2</sup>	[44]
%30 Kekik atığı + %3 PEGM	0,554±0,042	23,6±0,7	3,63±0,4	1,369±0,1	33,2±2,6	2,6±0,3 kJ/m <sup>2</sup>	
%5 Mantar tozu	0,457	16,52	-	-	-	-	[48]
%5 Mantar tozu + %5 PEGMA	0,329	11,83	-	-	-	-	
%45 Arpa sapı atığı + %6 MAPE	3,55±0,05	43,1±0,57	4,69±0,33	-	-	-	[49]
Ahşap kaplama (PVFA-co-PVAm işlenmiş (pH 11))	0,552±0,073	4,42±0,52	-	-	-	-	[39]
Ahşap kaplama (MAPP ile işlenmiş)	1,027	8,6	0,92	-	-	-	[46]

**Şekil 3.** Ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemiyle biyokompozit üretimi

Castro ve ark. tarafından yapılan diğer çalışmalarda ise uyumlaştırıcı malzeme olarak bitkisel esaslı; hintyağı, kanola yağı, epoksilenmiş soya yağı ve epoksilenmiş keten tohumu yağı, takviye malzemesi olarak da curaua lifleri [29] ve bu liflerden elde ettikleri selüloz nanokristalleri (CNC) [30] kullanılmıştır. Selüloz nanokristallerinin kullanıldığı çalışmada; %3 CNC içeren biyokompozitlerde en yüksek Young modülü, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerinin hintyağı kullanılarak elde edildiği

görülmüştür [30]. Yapılan son çalışmada ise takviye malzemesi olarak curaua lifleri ve uyumlaştırıcı olarak hintyağı ile kanola yağı kullanılmıştır [29]. Sonuçlar bitkisel yağların ve özellikle hintyağının lif/matris arayüzey özelliklerini etkileyerek, kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiğini ortaya çıkarmıştır.

Başka bir çalışmada Kuciel ve ark. biyokompozit üretiminde ek maliyetleri ortadan kaldırmak ve proses süresini kısaltmak amacıyla uyumlaştırıcı kullanmadan, farklı lignoselülozik ham



maddeler ve mineral yapıları takviye malzemesi içeren biyokompozitler hazırlamışlardır [31]. Bu çalışmada odun unu, selüloz tozu, kenaf lifi ve tuf mikropartikülleri %25 oranında BiyoPE matrisine katılmıştır. Yapılan mekanik testler sonucunda, tüm takviye malzemelerinin Young modülü, eğilme modülü ve eğilme dayanımı değerlerini arttırdığı ancak kopma uzaması değerini düşürdüğü, çekme mukavemeti değerinde ise önemli bir azalmaya sebep olmadığı görülmüştür. Odun unu ve kenaf lifi içeren biyokompozitlerin darbe dayanım değerlerinin arttığı, diğer takviye malzemelerinin ise darbe dayanım değerlerini azalttığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda odun unu ilavesinin biyokompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmesi yanında diğer takviye malzemelerine göre ucuz olması sebebiyle avantajlı olabileceği vurgulanmıştır.

Madrigal ve ark. biyokompozit üretiminde takviye malzemesi olarak termoplastik nişasta (TPS) kullanmışlardır [32]. TPS doğal bir polimer olan nişastanın plastikleştirilmesi ile elde edilen ekonomik ve biyolojik olarak parçalanabilir bir malzemedir [62]. Araştırmacılar matris/takviye uyumunu iyileştirmek için bir çeşit mineral olan sepiyolite hidrofobik özellikteki propiltrimetoksisilan ile muamele ederek, kompozit üretiminde kullanmış ve karşılaştırmak adına maleik anhidrit graflanmış polietilen (MAPE veya PEGMA) katkılı biyokompozitler hazırlamıştır. Yapılan testler sonucunda tüm uyumlaştırıcıların Young modülü ve çekme dayanımı değerlerinde azalmaya sebep olduğu, ancak bazı bileşimlerde kopma uzaması değerinde ciddi bir artış sağladığı görülmüştür. Bunun dışında üretilen biyokompozitlerin kompostlama koşullarında parçalanabilirliğini incelemek için ağırlıkça %30 TPS içeren biyokompozitler ve saf BiyoPE, 56 günlük kontrollü kompostlama koşullarına maruz bırakılarak, biyokompozitlerdeki kütle kaybı ölçülmüştür. İlk 7 günlük süreçte, tüm örnekler için kayda değer bir kütle kaybı olmazken, 7-21 günlük süreçte ise hızlı bir parçalanma tespit edilmiştir. Son olarak ağırlıkça %5 MAPE içeren biyokompozitlerin daha yüksek bir parçalanma eğiliminde olduğu ve yaklaşık %28'lik bir kütle kaybı yaşandığı belirtilmiştir. Beklendiği şekilde saf BiyoPE örneklerinde 56 günlük süreçte herhangi bir kütle kaybı gözlenmemiştir.

Escocio ve ark. tarımsal bir yan ürün olarak lif kabağı atıklarının biyokompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır [33]. Kompozit örneklerinin hazırlanmasında herhangi bir uyumlaştırıcı malzeme kullanılmamıştır ve kompozitler %10 ila %40 arasında lif kabağı atığı eklenerek üretilmiştir. Saf BiyoPE'ye kıyasla, darbe dayanımı dışındaki mekanik özelliklerin iyileştiği ancak erime akış hızının azaldığı gözlenmiştir.

Bitkisel lif takviyesi içeren farklı bir biyokompozit çalışmasında Ferrero ve ark., Akdeniz'e özgü endemik bir deniz yosunu olan Posidonia Oceanica kullanmıştır [34, 36]. Deniz çayı olarak da bilinen Posidonia Oceanica, rüzgâr, akıntı ve fırtına gibi farklı meteorolojik olaylar neticesinde köklerinden ayrılarak kıyılarda ve plajlarda birikmektedir. Biriken bu bitki atıkları, kıyılarda görüntü kirliliğine yol açmakla birlikte, atıkların bertaraf edilmesi ve temizlenmesi ekonomik açıdan önemli maliyetlere yol açmaktadır. Araştırmacılar deniz çayı atığının biyokompozit

üretiminde kullanılabilirliğini incelemiş, bu amaçla %5-40 oranlarında atık içeren BiyoPE esaslı biyokompozitler üretmiştir. Artan deniz çayı atığı içeriği ile Young Modülü ve eğilme dayanımı değerlerinin arttığı, kopma uzaması değerlerinin ise belirgin ölçüde azaldığı görülmüştür. En iyi mekanik özelliklerin ise %30 ve 40 deniz çayı atığı içeren biyokompozitlerde elde edildiği vurgulanmıştır. Bitkisel atıkların kullanıldığı başka bir çalışmada, Vilaplana ve ark. saz püskülü olarak da bilinen "Cortaderia Selloana" bitkisinin budanmasından ortaya çıkan atıkları BiyoPE matris kullanarak biyokompozit üretiminde değerlendirmişlerdir [38]. Bu çalışmada uyumlaştırıcı olarak MAPE ve sodyum hidroksitle işlenerek kullanılan propiltrimetoksisilan tercih edilmiştir. Ağırlıkça %15-30 saz püskülü atığı içeren biyokompozitlerin termal dayanımlarında bir azalma olmadan, eğilme dayanımı ve sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür.

Garcia ve ark.'larının "ahşap plastik kompozit" üretiminde bitkisel doğal lif atıklarını değerlendirdikleri çalışmalarında, yerfıstığı kabuğu atığını öğütürerek un formuna getirmiş ve takviye malzemesi olarak biyokompozit üretiminde kullanmışlardır [35]. Çalışmada üç farklı maleik anhidrit kopolimer uyumlaştırıcısının etkinliği test edilmiş, en iyi sonuçların maleik anhidrit graflanmış polipropilen (MAPP veya PPGMA) ile elde edildiği saptanmıştır. Biyokompozitlerin takviye miktarı %5-30 arasında değişmekle birlikte elde edilen sonuçlar, yerfıstığı kabuğu ununun bazı mekanik özellikleri ve termal stabiliteyi arttırdığını en iyi sonuçların da %30 takviye içeriğiyle elde edildiğini göstermiştir.

Gıda endüstrisinde kullanılan bitki atıklarının biyokompozit üretiminde kullanılabilirliğiyle ilgili 2018 yılında gerçekleştirilen iki farklı çalışmada, İspanya'da yerel bir likör damıtma firmasından temin edilen İspanya'ya özgü endemik bir bitki olan "Thymus Morederi" cinsi kekik atıkları kullanılmıştır [44, 45]. Çalışmanın ilk aşamasında BiyoPE matris ile kekik atıkları arasındaki bağlanma özelliklerinin geliştirilmesi için uygun bağlayıcı ajan seçilmeye çalışılmış ve bu amaçla dört farklı kimyasal ajan farklı oranlarda kompozite eklenmiştir. Yapılan testler sonucunda optimum sonuçların %10 oranında polietilen-koglisidil metakrilat (PEGM) ilavesiyle elde edildiği görülmüştür. Bu aşamada takviye malzemesi olarak %10 ile %50 arasında değişen oranlarda kekik atığı kullanılmış ve artan kekik takviye miktarıyla kompozitlerin Young modülü değeri ile çekme ve eğilme mukavemeti değerlerinin arttığı ve kopma uzaması değerinin ise azaldığı görülmüştür [44]. İkinci aşamada %10, 30, 50 oranlarında kekik atığı ve %10 PEGM içeren biyokompozitler hazırlanarak, kompozitlerin reolojik özellikleri incelenmiştir. Artan kekik atığı miktarıyla doğru orantılı olarak, kompozitlerin işlenebilirliğinin olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir [45].

Dominici ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir biyokompozit çalışmasında araştırmacılar takviye malzemesi olarak kahve çekirdeği zarı atığını (coffe silverskin) kullanmışlardır [47]. Yapılan çalışmada kahvenin, su ve çaydan sonra en fazla tüketilen içecek olduğunu ve kahvenin kavrulması esnasında ortaya çıkan ve herhangi bir ticari değeri bulunmayan çekirdek zarının kahvenin yaklaşık %4,2'lik kısmını oluşturduğunu

belirtmektedir. Araştırmacılar her yıl önemli miktarda kahve çekirdeği zarının atık olarak depolama alanlarına gönderildiğini ve bu atıkların biyokompozit üretiminde değerlendirilerek ekonomik açıdan katma değer sağlayabileceğini belirtmektedir. Bu amaçla öğütülen kahve çekirdeği zarı atıklarına yüzey özelliklerini değiştirmek amacıyla, alkali ağartıcı ve palmitoil klorür ile iki farklı uygulama yapılmış ardından bu atıklar %10, 20, 30 oranında kompozit üretimine dahil edilmiştir. Kompozitlerde uyumlaştırıcı olarak maleik anhidrit ve dikumil peroksit (DCP) kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda, takviye miktarının %20 ile sınırlandırılmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

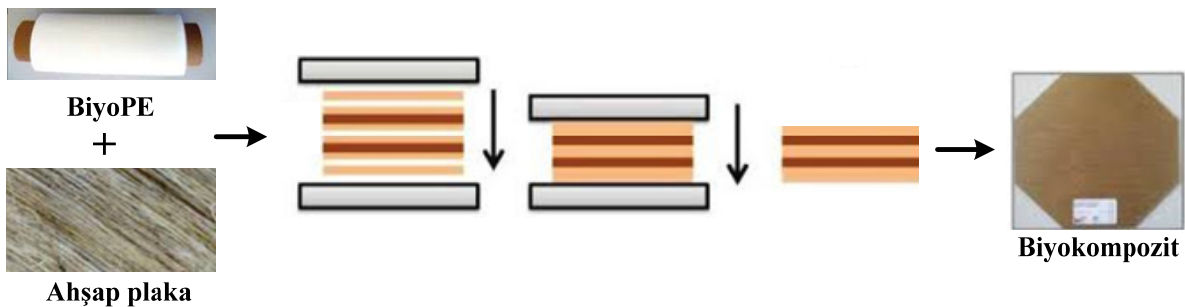
Tarımsal atıkların kullanıldığı diğer bir çalışmada, Uitterhaegen ve ark. kişniş sapı atığı kullanarak polipropilen (PP) ve düşük yoğunluklu BiyoPE matrisli kompozitler hazırlayarak, iki farklı uyumlaştırıcının etkinliğini test etmişlerdir [42]. Uyumlaştırıcıların biyokompozitlerin mekanik özelliklerin iyileşmesinde büyük etkisinin olduğu ve polipropilen matrisli kompozitlerin BiyoPE'e göre çok daha iyi mekanik özellikler sergilediği, fakat daha kırılabilir özelliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Hızlandırılmış yaşlanma testi uygulanan kompozitlerin mekanik özelliklerini muhafaza ettiği anlaşılmıştır. Yapılan çalışmada malzemelerin geri dönüştürülebilirliği ve takviye malzemesi olarak atık kişniş sapı kullanımının biyokompozitlerin maliyetine olan etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla %40 kişniş sapı atığı içeren kompozitler 5 kez yeniden üretim işlemine tabi tutulmuştur. Üretim döngülerinin sonunda mekanik özelliklerde %10'un altında bir düşüş, darbe mukavemetinde ise büyük bir artış görülmüştür. Bunun yanı sıra %40 kişniş sapı atığı ilavesinin polipropilenin granül maliyetini (€/kg) %14, BiyoPE'nin granül maliyetini ise %31 düşürdüğü belirlenmiştir [45].

Bitkisel liflerin takviye malzemesi olarak kullanıldığı BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmalarında ise mantar, odun tozu, kenaf ve keten lifi gibi çeşitli bitkisel kaynaklı malzemeler kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak mantar tozunun kullanıldığı bir biyokompozit çalışmasında Vasconcelos ve ark. üretilen biyokompozitlerin yapı ve inşaat sektöründe kullanılabilirliğini araştırmıştır [48]. Bu amaçla toz haline getirilmiş mantar PEGMA uyumlaştırıcısı ile birlikte farklı oranlarda kompozit bileşimine dahil edilmiştir. Mantar tozu ilavesinin, kompozitlerin termal stabilitesinde, akma gerilmesi ve Young modülü değerlerinde

önemli bir azalmaya sebep olmadığı, kopma gerilmesi değerinde ise artış sağladığı görülmüştür.

Odun hamurundan elde edilen selüloz esterleri de BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmalarında kullanılan takviye malzemelerinden biridir. Keyriläinen ve ark. yaptıkları çalışmada iki farklı selüloz esterini (selüloz oktanat ve selüloz palmitat) takviye malzemesi olarak, PLA ve BiyoPE matrisli biyokompozitlerin üretiminde kullanmıştır [43]. Öncelikle selüloz esterler hazırlanmış ve nükleer manyetik rezonans yöntemiyle karakterize edilmiştir. Selüloz esterleri, PLA ve BiyoPE ile %25-50-75 oranlarında karıştırılmış ayrıca saf selüloz oktanat ve selüloz palmitat dahil olmak üzere toplamda 19 farklı kombinasyondaki örnekler enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmiştir. Çalışmada selüloz esterlerin PLA matrisli biyokompozitlerde kopma uzaması değerini arttırdığı, fakat BiyoPE matrisli kompozitlerde azalttığını ve iki biyopolimerde de çekme mukavemetini ve Young modülünü olumsuz etkilediği görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar selüloz esterlerinin enjeksiyon kalıplama yöntemiyle kompozit üretiminde kullanılma potansiyelinin olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Şimdiye kadar sözü edilen çalışmaların çoğunda biyokompozitlerin üretimi için matris malzemesi olarak granül formda BiyoPE kullanılmış ve genellikle ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinden yararlanılmıştır, ancak mikro dökme film hattı [32, 47], sıkıştırarak kalıplama [27, 28] ve film formda BiyoPE kullanılarak üretilen biyokompozit çalışmaları da bulunmaktadır. Ouali ve ark., özellikle otomotiv endüstrisinde ve spor ekipmanlarının imalatında kullanılabilecek çevre dostu hafif yapıların üretilmesini amaçlamış ve bu sebeple film formunda BiyoPE kullanarak tabaka yapılı biyokompozitler üretmişlerdir [37]. Çalışmalarında film formda BiyoPE ve biyopoliamid (BiyoPA) ile iki çeşit keten elyaf ve yine iki çeşit ahşap kaplama malzemesini bir araya getirmişlerdir. Takviye olarak kullanılan keten elyafların ve ahşap kaplama malzemelerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, takviyeler çözelti banyosundan sürekli şekilde geçirilerek işlenmiş, ardından sıkıştırarak kalıplama yöntemiyle takviye ve matris fazları birleştirilmiştir (Şekil 4). Çalışmada BiyoPA kullanılarak üretilen kompozitlerin daha iyi mekanik özellikler sergilediği görülmüştür.



Şekil 4. Sıkıştırarak kalıplama yöntemiyle tabakalı biyokompozit üretimi [37]

Benzer bir çalışmada John ve ark. ahşap kaplama malzemesi ile BiyoPE film kullanmış, farklı uyumlaştırıcı kopolimerler ve tabaka dizim yöntemleri kullanarak tabaka yapılı biyokompozitler üretmişlerdir [39, 46]. İlk çalışmada PVFa-ko-PVAm kopolimerinin farklı konsantrasyonlarda ahşap yüzeye adsorpsiyonu sağlanmış ardından kurutulan ahşap kaplamalar BiyoPE filmleri ile VPV (ahşap/polimer/ahşap) diziliminde sıkıştırılarak kalıplama yöntemiyle birleştirilmiştir. Sonuçta PVFa-ko-PVAm kopolimerinin oldukça iyi bağlanma özellikleri sergilediği ve kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [39]. İkinci çalışmada arayüzey özelliklerinin geliştirilmesi için dört farklı maleik anhidrit kopolimeri kullanılmıştır. Önceki çalışmaya benzer şekilde ahşap kaplama malzemesi sulu çözeltilerle ıslatılmış ve BiyoPE filmleriyle sıkıştırarak kalıplama yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Yapılan çalışmada MAPP ile hazırlanan biyokompozitlerin Young modülü değerinde %139'luk, çekme mukavemeti değerinde ise %115'lik bir artış gözlenmiştir [46].

Tablo 1'deki çalışmalar incelendiğinde, kompozitlerin üretiminde genellikle benzer üretim yöntemleri tercih edilmesine rağmen, karmaşık şekilli yapıların üretimini kolaylaştıran yeni bir teknoloji olan, üç boyutlu yazıcı gibi farklı üretim yöntemlerinin kullanıldığı çalışmaların da bulunduğu görülmektedir. Bu çalışmalardan birinde Tarrés ve ark. termomekanik odun hamuru (TMP) takviyeli biyokompozit örneklerini, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle ve üç boyutlu yazıcı kullanarak iki farklı proses ile üretmişlerdir [40]. Üç boyutlu yazdırma sistemi için biyokompozit filamentlerinin uygun reolojik ve mekanik performansa sahip olup olmadığının araştırıldığı çalışmada, araştırmacılar iki farklı erime akış hızı değerine sahip BiyoPE'i TMP lifi ile takviye ederek kullanmıştır ve bu liflerin eklenmesiyle 3D baskı kalitesinin arttığı görülmüştür. Ayrıca petrokimyasal kaynaklı polietilen ile BiyoPE'nin karşılaştırıldığı çalışmada, BiyoPE'nin birçok açıdan petrokimyasal polietilenle benzer özellikleri sergilediği, ayrıca mekanik özelliklerde rekabet edebilir değerler sağladığı belirtilmektedir.

Benzer bir çalışmada Filgueira ve ark. biyokompozit üretiminde takviye malzemesi olarak TMP liflerini ve iki farklı erime akış hızı değerine sahip BiyoPE kullanmıştır [41]. Önceki çalışmadan farklı olarak lifler, lauril gallat ve oktil gallat kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye edilen TMP lifleri, MAPE uyumlaştırıcısı kullanılarak biyokompozit üretiminde değerlendirilmiştir. Üretilen biyokompozitlerin üç boyutlu yazdırma sistemleri için uygunluğunun test edildiği çalışmada, özellikle düşük erime akış hızı değerine sahip BiyoPE kompozitlerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Parareda ve ark. arpa saplarını işleyerek elde ettikleri TMP liflerinin, MAPE uyumlaştırıcısı ile birlikte biyokompozit üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır [49]. Yapılan çalışmanın ilk aşamasında uygun MAPE miktarı belirlenmeye çalışılmış bu amaçla %30 TMP lifi içeren biyokompozitlere farklı oranlarda uyumlaştırıcı ilave edilmiştir. Yapılan testlerde %6'lık MAPE

içeriğinin optimum özellikleri sağladığı belirlenmiş, ardından %15-45 arasında TMP lifi içeren biyokompozitler hazırlanmıştır. Artan takviye oranıyla birlikte kopma uzaması değerinin düştüğü, çekme mukavemetinin ise arttığı görülmüştür.

Bitkisel kaynaklı takviye malzemesi içeren BiyoPE esaslı biyokompozitlerle gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirildiğinde, biyokompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için çekme testi, üç nokta eğilme testi ve farklı darbe dayanım testlerinin uygulandığı görülmüştür. Tablo 2'de yer alan çalışmaların büyük bir kısmında [31, 32, 34, 35, 42, 44] çekme testinin uygulanmasında "ISO 527" standardının kullanıldığı, bazı çalışmalarda ise [40, 49] "ASTM D790" standardının tercih edildiği görülmüştür. Benzer şekilde üç nokta eğilme testinin uygulanmasında genellikle "ISO 178" standardı tercih edilmiştir [31, 34, 35, 42, 44]. Biyokompozitlerin darbe dayanım özelliklerinin incelenmesinde ise Charpy darbe dayanım testi [31, 35, 44] ve İzod darbe dayanım testi [33] gibi farklı testlerin kullanıldığı görülmüştür. Tablo 2'de yer alan çalışmaların neredeyse tamamında matris malzemesi olarak yüksek yoğunluklu BiyoPE kullanılmıştır. Yalnızca kişniş sapı atığının takviye malzemesi olarak kullanıldığı çalışmada [42], matris malzemesi olarak düşük yoğunluklu BiyoPE tercih edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan bitkisel takviye malzemelerinin neredeyse tamamının saf BiyoPE'nin kopma uzaması değerini ( $\approx$  %520) [35] önemli ölçüde düşürdüğü, yalnızca bir çalışmada takviye malzemesi olarak %30 TPS içeren biyokompozit örneklerinin kopma uzaması değerinin %600'den büyük olduğu tespit edilmiştir [32]. Takviye malzemesi olarak ahşap kaplama malzemesinin kullanıldığı biyokompozit örnekleri incelendiğinde [39, 46] MAPP ile işlenerek elde edilen ahşap kaplama malzeme örneklerinin Young modülü ve çekme dayanımı değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Mekanik test sonuçları incelendiğinde dikkat çeken önemli bir nokta; en yüksek Young modülü (3,55 GPa) ve çekme dayanımı (43,1 MPa) değerlerinin, yine en fazla takviye malzemesi içeren (%45 arpa sapı atığı) biyokompozitlerden elde edilmesidir [49]. Bunu %30 TMP lifi içeren biyokompozit örneği takip etmektedir [40]. Aynı miktarda takviye malzemesi içeren ve uyumlaştırıcı kullanılmayan farklı biyokompozitlerin [33, 34] Young modülü ve çekme dayanımı değerlerinin, %30 TMP ve %6 MAPE içeren örneklerle kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir [40]. Ne var ki en yüksek eğilme dayanımı değerinin ise uyumlaştırıcı içermeyen ve %30 lif kabağı atığının takviye malzemesi olarak kullanıldığı biyokompozit örneklerinden elde edildiği görülmektedir [33]. Biyokompozitlerin eğilme modülü değerlerinin ise %25 odun unu ve %25 kenaf lifi içeren örnekler dışında [31], genellikle birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1'de yer alan biyokompozitlerin termal özellikleri incelendiğinde ise; lif formda takviye malzemesinin kullanıldığı çalışmalarda, biyokompozitlerdeki takviye malzemesi miktarındaki artışın, kompozitlerin erime sıcaklığında ve termal bozunma sıcaklığında kayda değer bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür

[29, 34, 38, 42, 44]. Bunun yanı sıra selüloz tozu [31] ve yer fıstığı kabuğu unu [35] gibi toz formda takviye malzemelerinin, benzer şekilde kompozitlerin termal stabilitesini koruduğu, mantar tozu kullanımının ise [48] kompozitlerin bozunma başlangıç sıcaklığını nispeten düşürdüğü, fakat kompozitlerin işleme sıcaklığı aralığına önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

## 2.2 Mineral Takviye Malzemesi İçeren BiyoPE Esaslı Biyokompozitler

Son yıllarda kil ve kalsiyum karbonat gibi materyallerin eklenmesiyle kompozitlerin teknik özelliklerinde olumlu gelişmelerin

gözlenmesi, kil karışımı kompozitlere yönelik çalışmalara ilginin artmasına, aynı şekilde biyokompozit üretiminde de bu takviye malzemelerinin kullanım olanaklarının araştırılmasına yol açmıştır [63]. BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmalarında genellikle tercih edilen mineral takviye malzemesi kil olmakla birlikte, kalsiyum karbonat yerine yüksek oranda kalsiyum karbonat içeren yumurta kabuklarının takviye malzemesi olarak kullanıldığı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Mineral takviye malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen biyokompozit çalışmaları Tablo 3'te, bu çalışmalardan elde edilen ve çalışma kapsamında erişilebilen mekanik test sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Mineral takviye malzemeleri kullanılarak gerçekleştirilen BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmaları

Matris Malzemeleri	Takviye Malzemeleri	Arayüzey/Katkı Malzemeleri	Üretim Yöntemi	Referans
PLA	BiyoPE Kil	Etilen-metil akrilat-glisidil metakrilat	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Araujo vd. 2014 [64]
BiyoPE	Kayraktaşı Lifi	Maleik anhidrit graflanmış polietilen, Propiltrimetoksisilan	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Verdú vd. 2015 [65]
BiyoPE	Yumurta Kabuğu Atığı, Kalsiyum karbonat	Titanat, Silan, Zirkonat,	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Boronat vd. 2015 [66]
PLA	BiyoPE Kil	Etilen metil akrilat	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Agrawal vd. 2018 [67]
BiyoPE	Kil	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Hanken vd. 2019 [68]
BiyoPE	Kil	Yüzey aktif madde	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Hanken vd. 2019 [69]

**Tablo 4.** Mineral takviye malzemesi içeren farklı biyokompozitlerin mekanik özellikleri

Biyokompozitlerde Kullanılan Takviye ve Uyumlaştırıcı Miktarları	Çekme Testi Sonuçları			Eğilme Testi Sonuçları		Darbe Dayanımı	Referans
	Young Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğilme Modülü (GPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)		
%30 Kayraktaşı Lifi ( <i>propiltrimetoksisilan ile işlenmiş</i> )	2,15	22,7	12	2,864	-	4,2 kJ/m <sup>2</sup>	[65]
%20 Ticari Kalsiyum Karbonat	0,372±0,0127	16,8±0,7	45,5±2,0	0,785±0,506	22,6±0,5	0,19±0,01 kJ/m <sup>2</sup>	[66]
%20 Yumurta Kabuğu	0,402±0,0215	17,1±0,1	20,3±0,8	0,826±0,758	24,3±0,6	0,16±0,01 kJ/m <sup>2</sup>	
%20 Yumurta Kabuğu ( <i>titanat ile işlenmiş</i> )	0,439±0,0115	17,4±0,6	17,3±3,3	1,021±0,528	25,2±0,3	0,16±0,01 kJ/m <sup>2</sup>	
3 phr kil ( <i>doğal halde</i> )	1,12±0,07	21,85±0,21	87,48±15,55	-	-	25,08±3,54 J/m	[68]
10 phr kil ( <i>doğal halde</i> )	1,36±0,04	21,93±0,08	29,79±9,06	-	-	20,19±1,40 J/m	
3 phr kil ( <i>genleştirilmiş</i> )	1,10±0,03	20,45±0,08	130,58±53,93	-	-	23,75±2,49 J/m	
10 phr kil ( <i>genleştirilmiş</i> )	1,23±0,03	20,26±0,10	40,96±21,07	-	-	17,99±2,17 J/m	
3 phr kil ( <i>organik olarak modifiye edilmiş</i> )	1,043±0,0251	20,3±0,3	-	-	-	25,4±2,0 J/m	[69]
10 phr kil ( <i>organik olarak modifiye edilmiş</i> )	1,167±0,48	20,1±0,2	-	-	-	25,5±1,8 J/m	
%20 BiyoPE	2,26±0,03	35,4±1,0	-	-	-	26,2±0,9 J/m	[64]
%20 BiyoPE+3phr kil	2,16±0,12	29,1±2,4	-	-	-	34,6±3,2 J/m	
%20 BiyoPE+3phr kil+10phr EMA-GMA	1,66±0,03	25,1±1,3	-	-	-	54,1±6,7 J/m	
%20 BiyoPE+1phr kil	2,0±0,1	24,7±0,6	-	-	-	28,4±2,1 J/m	[67]
%20 BiyoPE+3phr kil	2,0±0,2	27,2±4,1	-	-	-	26,1±2,9 J/m	
%20 BiyoPE+1phr kil+5phr EMA	1,8	22,3±1,3	-	-	-	24,6±2,2 J/m	
%20 BiyoPE+3phr kil+5phr EMA	1,7±0,1	19,2±0,9	-	-	-	27,4±1,2 J/m	

Tablo 3'teki çalışmalar incelendiğinde, yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunda takviye malzemesi olarak kil kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmaların ilkinde Araujo ve ark. takviye malzemesi olarak montmorillonit türü kili katyonik özellikte yüzey aktif madde ile modifiye ederek organofilik kil formunda, lineer düşük yoğunluklu BiyoPE ile birlikte kompozit üretiminde kullanmıştır [64]. Çalışmada matris malzemesi olarak PLA tercih edilmiş ve BiyoPE miktarı %20 olarak sabit tutulmuştur. BiyoPE ve kilin birlikte takviye malzemesi olarak kullanıldığı biyokompozitlerin, yalnız BiyoPE içerenlere kıyasla, çekme dayanımı değerlerinin daha düşük olduğu ayrıca etilenmetil akrilat glisidil metakrilat (EMA-GMA) uyumlaştırıcısının tüm bileşimlerde darbe dayanımı değerini önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir.

Diğer bir çalışmada ise Verdú ve ark., bir çeşit başkalaşım kayası olan ve genellikle dekoratif amaçlı kullanılan, arduvaz veya damtaşı olarak da isimlendirilen "kayrak taşından" elde edilen "kayrak elyafını", kompozit üretiminde takviye edici malzeme olarak değerlendirmiştir [65]. Araştırmacılar kayrak elyafını hem saf halde herhangi bir modifikasyon işlemi uygulamadan, hem de propiltrimetoksisilan ile muamele ederek kompozit üretimine dahil etmişlerdir. Ayrıca bazı kompozit örneklerinde MAPE uyumlaştırıcısı kullanılmıştır. Silan ile muamele edilen kayrak elyaflarının daha iyi sonuçlar verdiği ve %20 kayrak elyafı içeren biyokompozitler için kopma uzaması değeri dışındaki tüm mekanik özelliklerde artış sağlandığı gözlenmiştir.

Kil kullanılarak gerçekleştirilen başka bir biyokompozit çalışmasında, Agrawal ve ark. takviye malzemesi olarak organik olarak modifiye edilmiş kil ve BiyoPE kullanmışlardır [67]. Çalışmada uyumlaştırıcı malzeme olarak etilen metil akrilat (EMA) tercih edilmiştir. Yapılan testler sonucunda uyumlaştırıcının, biyokompozitin mekanik özelliklerini genellikle olumsuz etkilediği ve takviye malzemesi olarak sadece BiyoPE içeren kompozitlerin Young modülü değerleri ve çekme dayanımı değerlerinin, kil ve uyumlaştırıcı içerenlere göre daha yüksek, darbe dayanımı değerlerinin ise daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Farklı bir çalışmada Hanken ve ark. çeşitli formlarda vermikülit kil kullanarak ürettikleri biyokompozitlerin yanmazlık ve reolojik özelliklerini incelemiştir [68, 69]. Herhangi bir yüzey aktif madde veya uyumlaştırıcı kullanılmayan çalışmada vermikülit kile ısı işlem uygulayarak genleşmesi sağlanmış, işlemin etkisini karşılaştırmak için ayrıca doğal işlem görmemiş şekilde de takviye malzemesi olarak kullanılarak örnekler üretilmiştir. Her iki formda da kil ilavesinin Young modülü ve çekme dayanımı değerlerine önemli bir etkisinin olmadığı, kopma uzaması ve darbe dayanımı değerlerini ise düşürdüğü ancak ısı sapma sıcaklığını arttırdığı ve yanma hızını düşürdüğü gözlenmiştir [68]. Modifiye vermikülit kilinin kullanıldığı diğer biyokompozit çalışmasında ise; kil ilavesinin darbe ve çekme mukavemeti değerlerini neredeyse etkilemediği, Young modülü değerini arttırdığı ve biyokompozitin alev alma hızını düşürdüğü belirlenmiştir [69].

Bu başlık altında incelenen biyokompozit çalışmalarında kullanılan katkı malzemelerinden farklı olarak, gıda endüstrisi atığının

kullanıldığı tek çalışma Boronat ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar mineral takviye malzemesi olarak ticari kalsiyum karbonat ve ticari ürün yerine yüksek oranda kalsiyum karbonat içeren yumurta kabuğu atıklarını kullanarak biyokompozit örnekleri üretmişler ve uyumlaştırıcı olarak kullandıkları farklı malzemelerin etkilerini karşılaştırmışlardır [66]. İlk aşamada uygun uyumlaştırıcı madde belirlenmeye çalışılmış, ardından optimum yumurta kabuğu atığı takviye oranını tespit etmek için farklı konsantrasyonlarda örnekler üretilmiştir. Yapılan testlerde optimum özelliklerin titanat ilavesi ile sağlandığı, titanat kullanımının biyokompozitin termal bozunma sıcaklığını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca yumurta kabuğu takviye oranının çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerini azalttığı, diğer mekanik özellikleri ise orantısız olarak arttırdığı görülmüştür.

Mineral takviye malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen biyokompozit çalışmalarından elde edilen erişilebilir mekanik test sonuçları Tablo 4'te gösterilmektedir. Tablo 2'de yer alan çalışmalardan farklı olarak Tablo 4'te sunulan çalışmalarda, çekme testinin uygulanmasında genellikle "ASTM D638" standardının tercih edildiğidir [64, 67-69]. Daha az sayıdaki çalışmada ise [65, 66] "ISO 527" test standardına uygun biçimde çekme testi uygulanmıştır. Eğilme testi uygulanan çalışmalarda ise [65, 66] "ISO 178" standardı kullanılmıştır.

Ayrıca incelenen çalışmalarda ağırlıklı olarak yüksek yoğunluklu BiyoPE kullanıldığı, daha az sayıdaki çalışmada lineer düşük yoğunluklu BiyoPE kullanıldığı görülmüştür [64, 67]. Tablo 2'deki çalışmalara benzer şekilde, Tablo 4'de yer alan çalışmalarda da Charpy darbe dayanım testi [65, 66] ve İzod darbe dayanım testi [64, 67-69] gibi farklı darbe testlerinin uygulandığı saptanmıştır. Tablo 4'teki mekanik test sonuçları incelendiğinde, en yüksek Young modülü değerinin takviye malzemesi olarak kayraktaşı lifi [65] ve %20 BiyoPE + 1-3 phr kil kullanılarak üretilen [64, 67] biyokompozitlerden elde edildiği görülmektedir. Burada dikkat çeken bir nokta; kullanılan kil miktarındaki artışın Young modülü ve çekme dayanımı değerlerini önemli ölçüde etkilememesidir [67]. Kil kullanılarak gerçekleştirilen dört farklı çalışmadan [64, 67-69] elde edilen darbe testi sonuçları, birçok farkı biyokompozit örneğinin birbirine yakın darbe dayanım değerleri sergilediğini, ancak uyumlaştırıcı malzeme olarak EMA-GMA kullanımının [64], darbe dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Tablo 2'deki çalışmalara benzer şekilde Tablo 4'de yer alan çalışmalarda da biyokompozitlerin kopma uzaması değerinin, saf BiyoPE'ne göre önemli ölçüde düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 3'te yer alan mineral takviye malzemesi içeren biyokompozit çalışmalarının birçoğunda erişilebilir termal test verileri bulunmamasıyla birlikte, yumurta kabuğunun takviye malzemesi olarak kullanıldığı çalışmada [66], takviye malzemesi içeriğinin ve özellikle titanat kullanımının bozunma başlangıç sıcaklığını arttırdığı görülmüştür. Kil kullanılan bir çalışmada ise [67] hem doğal halde hem de genleştirilmiş halde kil kullanımının, erime sıcaklığını önemli ölçüde etkilemediği tespit edilmiştir.

### 2.3 BiyoPE Kullanılarak Üretilen Polimer Karışımları

Polimer karışım uygulamaları, iki ya da daha fazla polimerin bir araya getirilmesiyle, her bir bileşenin tek başına sahip olduğundan daha üstün mekanik, termal vb. özelliklere sahip, daha düşük maliyetli yeni bir malzemenin geliştirilmesine olanak sağlar [70]. Polimer karışımlarının özellikleri; kullanılan polimer çiftine, karışım oranlarına, karıştırma yöntemine, kullanılan uyumlaştırıcıların niteliğine ve miktarına bağlıdır [71]. Polimer karışımlarının üretilmesindeki temel amaç bir polimerin tek başına sahip olduğu özelliklerden daha üstün mekanik, termal vb. özelliklere sahip olmakla birlikte aynı zamanda maliyeti daha düşük yeni bir ürünün geliştirilmesidir [70-72]. Bu açıdan bakıldığında kompozit üretimi ile benzer amaçlarla üretilen polimer karışımlarının, toplam polimer tüketiminin yaklaşık üçte birini oluşturduğu belirtilmektedir [71]. Fosil kaynaklardan üretilen polietilenin, küresel polimer pazarındaki hacmi ve polimer karışımlarının toplam polimer tüketimindeki payı göz önüne alındığında, fosil kaynaklardan elde edilen polietilen yerine BiyoPE'in polimer karışımlarında kullanımı, sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesinde dikkate değer bir konudur. Çalışma kapsamında incelenen BiyoPE, PLA ve PCL gibi biyoesaslı polimerlerin kullanıldığı polimer karışımı çalışmaları Tablo 5'te özetlenmiş, çalışmalardan elde edilen erişilebilir mekanik test sonuçları ise Tablo 6'da verilmiştir.

Biyopolimerler kullanılarak yapılan ilk çalışmada Brito ve ark. PLA-BiyoPE esaslı polimer karışımının hazırlanmasında EMA-GMA ve etilen-glisidil metakrilat (E-GMA) uyumlaştırıcılarını kullanmıştır [54]. Araştırmacılar aynı çalışmayı sonraki yıllarda tekrarlayarak, üretilen polimer karışımlarına farklı analizler uygulamıştır [57]. Her iki çalışmada da yapılan testler sonucunda, uyumlaştırıcıların polimer fazlarının homojen dağılmasını sağlayarak, bileşenlerinin bağlanma özelliklerini olumlu etkilediği ve darbe dayanımı değerlerini önemli ölçüde arttırdığı, fakat Young modülü değerini azalttığı tespit edilmiştir.

PLA ve BiyoPE kullanılarak gerçekleştirilen bir diğer çalışmada Araujo ve ark. uyumlaştırıcı kullanmadan çeşitli polimer karışımları hazırlamıştır [55]. Çalışmada üretilen polimer karışımlarının yalnızca reolojik özellikleri ve kristallik derecesi incelenmiş, sonuçta BiyoPE'nin PLA'nın kristallik derecesini önemli ölçüde etkilemediği tespit edilmiştir. Farklı bir çalışmada Enriquez ve ark. polimer karışımı oluşturmak için %37 oranında biyolojik esaslı içeriği olan politrimetilen tereftalat (PTT) ile BiyoPE kullanmıştır [56]. Herhangi bir uyumlaştırıcı ajan kullanılmayan çalışmada, farklı oranlarda PTT/BiyoPE karışımları hazırlanarak, örneklerin mekanik, morfolojik ve termal özellikleri incelenmiştir. Sonuçta en iyi mekanik özelliklerin %80/20 PTT/BiyoPE karışımından elde edildiği saptanmıştır.

**Tablo 5.** BiyoPE kullanılarak üretilen polimer karışımları

Karışımlarda Kullanılan Polimerler ve Kullanım Oranları		Uyumlaştırıcılar/ Modifikasyon Malzemeleri	Üretim Yöntemi	Referans
PLA %80	BiyoPE %20	EMA-GMA E-GMA	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Brito vd. 2012 [54]
PLA %95-85	BiyoPE %5-15	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Araujo vd. 2014 [55]
PTT %20-40-50-60-70-80-90	BiyoPE %10-20-30-40-50-60-80	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Enriquez vd. 2016 [56]
PLA %80	BiyoPE %20	EMA-GMA E-GMA	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Brito vd. 2016 [57]
PCL %10-20-30	BiyoPE %90-80-70	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Bezerra vd. 2018 [58]
PCL %10-20-30	BiyoPE %90-80-70	PegAA <sup>1</sup>		Bezerra vd. 2019 [50]
PCL %10-20-30	BiyoPE %90-80-70	PEgMA		Bezerra vd. 2019 [51]
PLA %5-10-15-20	BiyoPE %95-90-85-80	PEgMA, PE-ko-GMA <sup>2</sup> MLO <sup>3</sup> , DCP	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Carrillo vd. 2019 [52]
BiyoPA %70	BiyoPE %30	Gallik asit, MLO <sup>3</sup> , PE-ko-AA <sup>4</sup>		Carrillo vd. 2019 [53]
BiyoPE %50-60-70-80-90	BiyoPE %10-20-30-40-50	-	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Oliveira vd. 2020 [59]
PLA %80	BiyoPE %20	PVA <sup>5</sup> , EVA <sup>6</sup> , DCP	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve enjeksiyon kalıplama	Ferri vd. 2020 [60]
*BiyoPE %100	-	Gallik asit	Ekstrüzyon ( <i>çift vidalı</i> ) ve dökme film hattı	Carrillo vd. 2020 [61]

\*BiyoPE gallik asit ile modifiye edilerek film üretiminde kullanılmıştır.

<sup>1</sup>Akrilik asit graflanmış polietilen, <sup>2</sup>Poli (etilen-ko-glisidil metakrilat), <sup>3</sup>Maleinlenmiş keten tohumu yağı, <sup>4</sup>Poli (etilen-ko-akrilik asit), <sup>5</sup>Polivinil alkol, <sup>6</sup>Polietilen vinil asetat



Bezerra ve ark. sentetik bir biyopolimer olan PCL ve BiyoPE kullanarak polimer karışımları üretmişlerdir [51-58]. PCL sentetik bir poliester olmasına rağmen biyolojik olarak bozunabilme özelliğine sahip olması nedeniyle biyopolimer sınıfında yer almaktadır. Araştırmacılar üç farklı çalışmada sırasıyla; uyumlaştırıcı olmadan, PEgAA uyumlaştırıcısıyla ve PEgMA uyumlaştırıcısı kullanarak polimer karışım örnekleri üretmiştir. Çalışmaların tümünde PCL miktarı %10-20-30 olarak ayarlanmıştır. Uyumlaştırıcı olmadan üretilen karışımlarda; PCL ilavesinin kopma uzaması değerini önemli ölçüde düşürdüğü diğer mekanik özelliklere ise ciddi bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir [58]. PEgAA uyumlaştırıcısının BiyoPE/PCL karışımlarının darbe dayanımı değerini düşürdüğü, ısı sapma sıcaklığı (HDT) değerini ise arttırdığı anlaşılmıştır [50]. PEgMA uyumlaştırıcısının ise darbe dayanımı değerini genellikle arttırdığı ve %20 PCL içeren biyokompozitler dışında HDT değerine önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir [51].

Carrillo ve ark. yürüttükleri farklı çalışmalarda, çeşitli uyumlaştırıcı malzemelerin PLA/BiyoPE [52] ve BiyoPA/BiyoPE [53] karışımlarına olan etkisini incelemiştir. Yapılan ilk çalışmada ağırlıkça %5-10-15-20 PLA ve PEgMA, PE-ko-GMA, MLO ve DCP katkı malzemelerini kullanılmışlardır [52]. Yapılan testler sonucunda PLA ilavesinin, Young modülü değerini, çekme dayanımı değerini ve karışımın sertliğini arttırdığı, kopma uzaması değeri ile darbe dayanımı değerini ise azalttığı görülmüştür. MLO ilavesinin darbe dayanımı değeri dışında mekanik özelliklere tek başına olumlu bir etkisi olmamasına rağmen optimum karışımın DCP+MLO ile elde edildiği belirtilmiştir [52]. Aynı araştırmacıların gerçekleştirdikleri diğer polimer karışım çalışmasında ise polimer matris olarak BiyoPA ve uyumlaştırıcı malzeme olarak gallik asit, MLO ve PE-ko-AA kullanılmıştır. Yapılan testlerde, herhangi bir ön işlem uygulanmadan kullanılan BiyoPE ilavesinin, mekanik özellikleri olumsuz etkilediği ancak gallik asit ile fonksiyonelleştirildiğinde termal stabiliteyi artırarak malzeme işleme sıcaklığı aralığını genişlettiği görülmüştür. Ayrıca tüm bileşimlerde mekanik özelliklerin saf BiyoPA'ya göre azaldığı saptanmıştır [53]. Polimer karışım çalışmaları dışında Carrillo ve ark. BiyoPE'yi gallik asit ile fonksiyonelleştirerek film üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır [61]. Gerçekleştirdikleri çalışmada, gallik asidin BiyoPE filmlerin UV ışık stabilitesini arttırdığını ve bu sayede elde edilen BiyoPE filmlerinin sürdürülebilir gıda ambalaj uygulamaları için potansiyel bir ürün olabileceği belirtilmiştir.

Yakın zamanda yapılan farklı bir çalışmada Oliveira ve ark., lineer düşük yoğunluklu BiyoPE ve yüksek yoğunluklu BiyoPE olmak üzere iki tür BiyoPE'yi farklı konsantrasyonlarda birleştirerek polimer karışımları üretmiştir [59]. Polimer karışımlarındaki lineer düşük yoğunluklu BiyoPE miktarı arttıkça, karışımın kristallik derecesinin, çekme dayanımı ve Young modülü değerlerinin azaldığı, ancak darbe dayanımı değerinin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir.

PLA ve BiyoPE kullanılarak polimer karışım üretilen bir diğer çalışmada Ferri ve ark., üç farklı uyumlaştırıcı malzemenin,

polimer karışımlara olan etkisini incelemiştir [60]. Yapılan testlerde tüm örneklerin saf PLA'ya göre çekme dayanımı ve Young modülü değerlerinin daha düşük, kopma uzaması değerinin ise daha yüksek olduğu ve uyumlaştırıcıların PLA/BiyoPE karışımlarının sünekliliğini arttırdığı tespit edilmiştir. Yazarlar çalışma neticesinde en ideal sonuçların polietilen vinil asetat (EVA) uyumlaştırıcısı kullanılarak üretilen örneklerden elde edildiğini raporlamıştır.

Makale kapsamında incelenen polimer karışım çalışmalarından elde edilen erişilebilir çekme testi sonuçları ve darbe dayanım testi sonuçları Tablo 6'da gösterilmektedir. Araştırmacılar çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde "ASTM D638" [51, 57-59] ve "ISO 527" standartlarını [52, 53, 60, 61] uygulamışlardır. Tablo 6 incelendiğinde polimer karışımlarından elde edilen Young modülü değerlerinin, incelenen biyokompozit örneklerinden genellikle düşük olduğu fark edilmektedir. Bunun yanı sıra PLA kullanılarak gerçekleştirilen polimer karışım çalışmaları içerisinde [52, 57, 60], özellikle yüksek miktarda PLA içeren karışımların [57, 60] diğer polimer karışımlarına kıyasla çok yüksek Young modülü değeri sağladıkları görülmektedir. Ayrıca PLA/BiyoPE karışımlarında kullanılan farklı uyumlaştırıcı malzemelerin tümünün darbe dayanımını arttırdığı anlaşılmaktadır.

Tablo 6'da yer alan çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, PLA/BiyoPE karışımları dışındaki diğer polimer karışım çalışmalarının [51, 53, 58] birbirine yakın değerler sağladıkları görülmektedir. PCL/BiyoPE karışımları [51, 58] incelendiğinde, PEgMA uyumlaştırıcısının, bu karışımların kopma uzaması değerlerini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Polimer karışım çalışmalarından elde edilen termal veriler değerlendirildiğinde ise; PCL kullanımının karışımın erime sıcaklığında önemli bir etkisinin olmadığı [51, 58], gallik asit kullanılan çalışmalarda ise hem BiyoPA/BiyoPE karışımının [53], hem de saf BiyoPE'nin [61] termal stabilitesinin ve işleme sıcaklığı aralığının gallik asit kullanımı ile birlikte arttığı görülmüştür. Ayrıca iki farklı BiyoPE'nin kullanıldığı çalışmada [59], karışımlardaki LLDPE miktarının artması ile birlikte erime sıcaklığının düştüğü belirtilmiştir.

#### 2.4 BiyoPE Esaslı Biyokompozitlerin ve Polimer Karışımlarının Kullanım Alanları

Biyo-esaslı ve/veya biyobozunur özellikteki biyopolimerlerin üretimi ve tüketimi, çevre bilincinin artması ve gelişen teknolojinin etkisiyle birlikte sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesinde önem kazanmıştır. Dünya genelinde 2012 yılında yaklaşık 1,5 milyon ton olan biyoplastik üretimi 2019 yılında yaklaşık 2,11 milyon tona ulaşmıştır ve bu rakamın 2024'de 2,41 milyon tona çıkması beklenmektedir. Benzer şekilde 2005 yılında 77 milyon dolar olarak tespit edilen küresel ölçekte biyo-esaslı ürün satışının 2020 yılında 250 milyon dolara ulaşacağı, uygulama alanlarının ve kullanım miktarlarının da bu doğrultuda artacağı tahmin edilmektedir [23, 73].

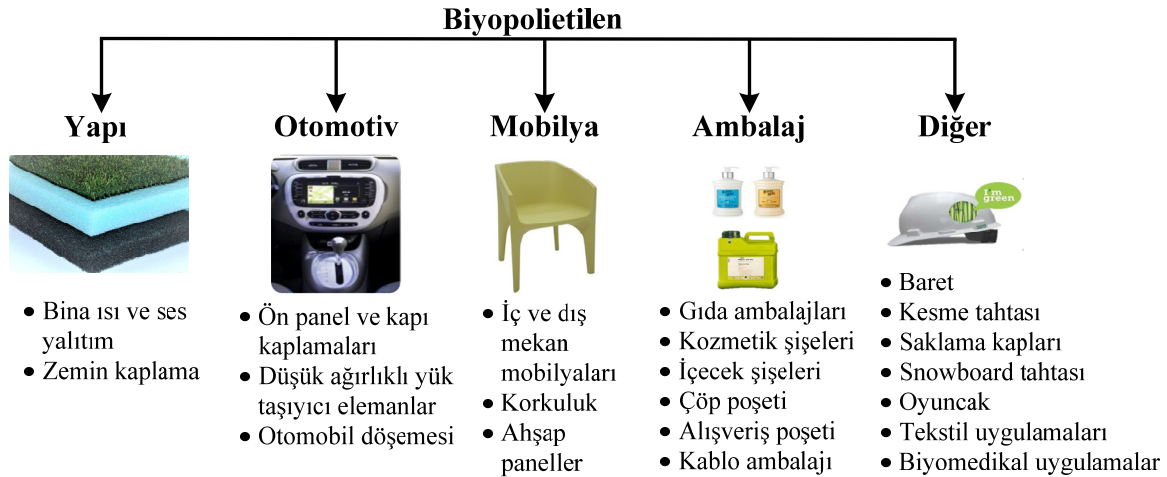
**Tablo 6.** BiyoPE kullanılarak hazırlanan farklı polimer karışımlarının mekanik özellikleri

Polimer Karışım Oranları	Uyumlaştırıcı Miktarları	Çekme Testi Sonuçları			Darbe Dayanımı	Referans
		Young Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)		
%80 PLA+%20 BiyoPE	-	2,3	39,1±0,8	7,6±0,8	24,2±1,9 J/m	[57]
%80 PLA+%20 BiyoPE	5 phr E-GMA	2±0,1	37,5±0,7	16,7±1,2	65,4±2 J/m	
%80 PLA+%20 BiyoPE	5 phr EMA-GMA	2	34,8±0,6	10,4±0,9	77,6±6 J/m	
%90 BiyoPE+%10 PCL	-	0,4676±0,0159	23,6±0,3	252,5±20,6	-	[58]
%80 BiyoPE+%20 PCL	-	0,4654±0,0069	23,7±0,3	-	-	
%70 BiyoPE+%30 PCL	-	0,4262±0,0066	23,3±0,2	13,8±0,9	-	
%90 BiyoPE+%10 PCL	10 phr PEgMA	0,4128±0,0119	23,2±0,4	425,9±34,6	36±1,9 J/m	[51]
%80 BiyoPE+%20 PCL	10 phr PEgMA	0,4308±0,0101	23±0,5	475,1±15,4	79,3±2,8 J/m	
%70 BiyoPE+%30 PCL	10 phr PEgMA	0,3653±0,0101	21,5±0,2	-	68,1±5 J/m	
%80 BiyoPE+%20 PLA	-	0,563±0,0103	23,2±0,3	54±6,09	1,70±0,2 kJ/m <sup>2</sup>	[52]
%80 BiyoPE+%20 PLA	5phr MLO+1phr DCP	0,582±0,607	22±0,2	23,2±1,16	3,71±0,5 kJ/m <sup>2</sup>	
%70 BiyoPA+%30 BiyoPE	0,8 phr Gallik asit	0,266±0,023	26,1±0,5	134,3±11,7	3,7±0,6 kJ/m <sup>2</sup>	[53]
%70 BiyoPA+%30 BiyoPE	0,8 phr Gallik asit+5phr MLO	0,2375±0,012	23,3±0,6	139,6±9,1	4,3±0,5 kJ/m <sup>2</sup>	
%70 BiyoPA+%30 BiyoPE	0,8 phr Gallik asit+phr PE-ko-AA	0,2401±0,019	30,6±0,4	150,8±14,8	3,5±0,2 kJ/m <sup>2</sup>	
0,3 phr Gallik asit	-	0,2221±0,0242	20,1±0,6	18,6±2,1	-	[61]*
0,8 phr Gallik asit	-	0,2436±0,0315	20,8±0,9	20,2±2,3	-	
%90 BiyoPE (HDPE)+%10 BiyoPE (LLDPE)	-	0,7924±0,0667	18,7±0,1	-	32,9±2,9 J/m	[59]
%70 BiyoPE (HDPE)+%20 BiyoPE (LLDPE)	-	0,6381±0,041	16,8±0,1	-	40±3,5 J/m	
%70 BiyoPE (HDPE)+%30 BiyoPE (LLDPE)	-	0,5347±0,0385	15±0,1	-	71,4±2,8 J/m	
%80 PLA+%20 BiyoPE	-	2,3	49,4	-	13,8 kJ/m <sup>2</sup>	[60]
%80 PLA+%20 BiyoPE	5 phr EVA	2	46	%13	22,5 kJ/m <sup>2</sup>	

\* BiyoPE gallik asit ile modifiye edilerek film üretiminde kullanılmıştır.

İncelenen çalışmalar içerisinde, BiyoPE kullanılarak üretilen kompozitlerin; zemin kaplamaları, döşemeler, otomobil iç parçaları, iç ve dış mekân mobilyaları ile korkuluk üretiminde [34, 36], binaların iç ve dış duvarları ile tavanlarında ses ve ısı yalıtımı uygulamalarında [48], saklama kapları ve kesme tahtası gibi sert mutfak malzemelerinin imalatında [52] ve gıda ambalaj malzemelerinin üretiminde [61] kullanılabilirliği belirtilmiştir. Beatriz Luz'un biyopolietilenin çevresel sürdürülebilirliğiyle

ilgili raporunda, [74] alanında önde gelen firmaların otomobil döşemesi, otomobil ön panel ve kapı panelleri (Kia, Toyota, Mitsubishi), içecek şişeleri (Coca-Cola, Unilever), kozmetik ve kişisel bakım ürün ambalajları (L'Oréal, Shiseido, Johnson&Johnson, Procter&Gamble), çamaşır makinesi parçaları (Electrolux), kablo koruyucu iç ve dış kılıfları (Samsung), kimyasal ambalajları (BASF) gibi ürünlerin üretiminde BiyoPE'yi kullandıkları belirtilmiştir (Şekil 5).



**Şekil 5.** BiyoPE esaslı kompozit ve polimer karışımlarının uygulama alanları

### 3. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Azalan petrol rezervleri ve doğada bozunmayan plastik atıkların yarattığı çevre kirliliğine yönelik artan farkındalık, her geçen gün daha fazla araştırmacının sürdürülebilir ve çevreci üretim yöntemlerine odaklanmasını sağlamaktadır. Makale kapsamında, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen bir biyopolimer olan BiyoPE'nin biyokompozit ve polimer karışımı gibi sürdürülebilir ve çevresel etkisi düşük yeni malzemelerin geliştirilmesini amaçlayan çalışmalar değerlendirilmiştir.

BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmalarında, üretim yöntemi olarak çoğunlukla ekstrüzyon veya termo-kinetik karıştırıcı kullanılmış, kalıplama içinse enjeksiyon kalıplama yöntemi tercih edilmiştir, daha az sayıdaki çalışmada sıkıştırarak kalıplama ve üç boyutlu yazdırma yöntemi kullanılmıştır. Biyokompozit ve polimer karışımı örneklerinin karakterizasyonu amacıyla hemen her çalışmada morfolojik özelliklerin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) veya alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanılmıştır. Termal özellikler için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), dinamik mekanik termal analiz (DMA/DMTA) kullanılırken, mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testi, Shore D sertlik testi, Charpy darbe dayanım testi ve üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Ayrıca kompozitlerin arayüzey özelliklerinin incelenmesi için temas açısı ölçümü, işlenebilirliği ölçmek için reolojik analiz, vicat yumuşama testi ve erime akış indeksi testi uygulanmıştır. Daha az sayıdaki çalışmada ise yatay yanma testi, mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılabilirliğin incelendiği kompostlama testi, hızlandırılmış yaşlanma testi ile geri dönüştürülebilirlik testi gerçekleştirilmiştir. Lignoselülozik takviye malzemesi içeren birçok biyokompozit çalışmasında, takviye malzemesinin hidrofilik yapısı sebebiyle su emme testi de uygulanmıştır.

Petrol türevli polietilene kıyasla maliyetinin daha yüksek olması, BiyoPE'nin en önemli dezavantajı olarak gösterilmektedir. Makale kapsamında incelenen biyokompozit çalışmalarının büyük bir kısmında maliyetin azaltılması amacıyla araştırmacılar, ucuz ve kolay ulaşılabilir malzemeler olarak farklı doğal takviye malzemelerini kullanmayı tercih etmişlerdir. Takviye malzemesi olarak çoğunlukla endüstriyel ve tarımsal atıkların kullanıldığı BiyoPE esaslı biyokompozit çalışmalarının yaklaşık dörtte üçünde, en az bir çeşit uyumlaştırıcı malzemenin (arayüzey/katkı malzemeleri) kullanıldığı, bunun sebebinin de çoğunlukla matris/takviye fazlarının farklı hidrofilik karakterlerde olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Polietilenin hidrofobik yapısı ve birçok biyokompozit çalışmasında takviye malzemesi olarak hidrofilik bitkisel kaynaklı liflerin kullanıldığı göz önüne bulundurulduğunda, bu hidrofilik davranış farklılıklarının bağlanma özelliği üzerindeki olumsuz etkileri ve bağlanma özelliğini geliştirmek için uyumlaştırıcıların kullanılması gerektiğini daha da net ortaya çıkarmaktadır. Çalışmalarda uyumlaştırıcı olarak genellikle tercih edilen maleik anhidrit graflanmış polietilenin, fazlar arasındaki bağlanma özelliğini iyileştirdiği rapor edilmiştir.

Kullanım alanına, üretim yöntemine ve kullanılan polimer türüne göre polimer esaslı ürünlerden istenen performans özellikleri çok

çeşitlilik göstermekle birlikte, BiyoPE esaslı biyokompozitlerin mekanik özellikleri değerlendirildiğinde, örneklerin çoğunun saf BiyoPE'nin mekanik özelliklerine benzer veya daha iyi mekanik özellik gösterdiği gözlenmiştir. Dolayısıyla atıkların bertaraf edilmesi yerine ikincil ham maddeler olarak tekrar üretime dahil olması sağlanan bu malzemeler, BiyoPE'nin iyi mekanik özelliklere sahip olmasının talep edildiği uygulama alanlarında kullanılma potansiyeline sahiptirler.

Petrol türevli polietilenin aynı karakteristik özelliklerine ve performansına sahip BiyoPE ile gerçekleştirilen çevresel etki değerlendirme çalışmalarının sayısının artmasının da etkisiyle, BiyoPE'nin uygulama alanlarının sayısının da doğru orantılı olarak arttığı, biyo-esaslı olması nedeniyle daha çok üretici tarafından benimsenerek, gönüllü ürün sertifikasyonu ve etiketlemede tercih edildiği söylenebilir. Şeker kamışı gibi yenilenebilir bir kaynaktan elde edilen BiyoPE, petrol türevli polietilene kıyasla endüstriyel üretimde sürdürülebilirliği sağlaması ve çevresel etkisi azaltılmış, katma değeri yüksek ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlaması açısından önemli bir alternatif olarak kabul edilmektedir. BiyoPE kullanılarak üretilen kompozitlerin performansı ve maliyeti, kullanılan takviye malzemesi ve miktarı, BiyoPE'nin türü, uyumlaştırıcıların kullanımı, üretim yöntemi gibi birçok parametreyle doğrudan ilgili olması nedeniyle, sürdürülebilir üretim süreçlerinin oluşturulması kapsamında geliştirilmeye açık bir araştırma konusudur.

### KAYNAKLAR

1. Saçak, M., (2012), *Polimer Teknolojisi*, Gazi Kitabevi, Ankara.
2. AlMaadeed, M. A. A., Ponnamma, D., El-Samak, A. A., (2020), *Polymer Science and Innovative Applications: Chapter 1-Polymers to improve the world and lifestyle: physical, mechanical, and chemical needs*, Elsevier.
3. Geyer, R., (2020), *Plastic Waste and Recycling: Chapter 2- Production, use, and fate of synthetic polymers*, Academic Press.
4. Kumaran, S. K., Chopra, M., Oh, E., Choi, H. J., (2020), *Polymer Science and Nanotechnology: Fundamentals and Applications: Chapter 11-Biopolymers and natural polymers*, Elsevier.
5. Zhu, Y., Romain, C., Williams, C. K., (2016), *Sustainable polymers from renewable resources*, Nature, 540, 7633, 354-362.
6. Plastics Europe. *Plastics-the Facts 2019 an Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data*, [https://www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL\\_web\\_version\\_Plastics\\_the\\_facts2019\\_14102019.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf), 12.05.2020
7. Wang, Z., Ganewatta, M. S., & Tang, C., (2020), *Sustainable polymers from biomass: Bridging chemistry with materials and processing*, Progress in Polymer Science, 101, 101197.
8. Alessi, E., *Out of the Plastic Trap: Saving the Mediterranean from Plastics Pollution*, [http://ocean.panda.org.s3.amazonaws.com/media/OUT%20OF%20THE%20PLASTIC%20TRAP/WWF\\_Plastics\\_MED\\_WEB.pdf](http://ocean.panda.org.s3.amazonaws.com/media/OUT%20OF%20THE%20PLASTIC%20TRAP/WWF_Plastics_MED_WEB.pdf), 12.05.2020.

9. Yoruç, A. B. H., Uğraşkan, V., (2017), *Yeşil Polimerler ve Uygulamaları*, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17, 1, 318-337.
10. Köksal, Ö., Er, B. A., Ardalı, Y., Sağlam, M., (2019), *Biyoplastiklerin Biyodegradasyonu*, Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4, 2, 151-167.
11. Zhong, Y., Godwin, P., Jin, Y., Xiao, H. (2020), *Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review*, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 3, 1, 27-35.
12. Heidbreder, L. M., Bablok, I., Drews, S., Menzel, C., (2019), *Tackling the plastic problem: A review on perceptions, behaviors, and interventions*, Science of the total environment, 668, 1077-1093.
13. Jiang, Y., Loos, K., (2016), *Enzymatic synthesis of biobased polyesters and polyamides*, Polymers, 8, 7, 243.
14. Aslan, B., Ramaswamy, S., Raina, M., Gries, T., (2012), *Biyokompozitler: Termoplastik Biyopolimerlerin ve Endüstriyel Doğal Liflerin Kompozit Uygulamaları İçin Stapel Lif Harmanından Tekstil Yüzeyine Kadar Üretimi*. Tekstil ve Mühendis, 19, 85, 47-51.
15. Ashter, S. A., (2016), *Introduction to bioplastics engineering: Chapter 5-Types of Biodegradable Polymers*, William Andrew Publishing.
16. Luyt, A. S., Malik, S. S., (2019), *Plastics to Energy: Chapter 16-Can biodegradable plastics solve plastic solid waste accumulation?*, William Andrew Publishing.
17. European Bioplastics. *What are bioplastics?*, <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>, 12.05.2020.
18. Lackner, M., (2000), *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology: Bioplastics-Biobased plastics as renewable and/or biodegradable alternatives to petroplastics*, John Wiley & Sons.
19. Babu, R. P., O'connor, K., Seeram, R., (2013), *Current progress on bio-based polymers and their future trends*, Progress in Biomaterials, 2, 1, 8.
20. PAGEV. *Dünya ve Türkiye Polietilen Raporu 2016*, <https://www.pagev.org/upload/files/Hammadde%20Yeni%20Tebli%20C4%9F%20Bilg.%203/D%3%BCnya%20ve%20T%3%BCrkiye%20Polietilen%20Raporu%202016.pdf>, 13.05.2020.
21. Mendieta, C.M., Vallejos, M.E., Felissia, F.E., Chinga-Carrasco, G., Area, M. C., (2020), *Review: Bio-polyethylene from Wood Wastes*, Journal of Polymers and the Environment 28, 1, 1-16.
22. Liptow, C., Tillman, A. M., (2012), *A comparative life cycle assessment study of polyethylene based on sugarcane and crude oil*, Journal of Industrial Ecology 16, 3, 420-435.
23. European Bioplastics. *Bioplastics market data 2019*, [https://docs.european-bioplastics.org/publications/market\\_data/Report\\_Bioplastics\\_Market\\_Data\\_2019.pdf](https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2019.pdf), 05.08.2020.
24. Bajpai, P., (2019), *Biobased polymers: properties and applications in packaging: Chapter 3-Properties of biobased packaging material*, Elsevier.
25. Kikuchi, Y., Hirao, M., Narita, K., Sugiyama, E., Oliveira, S., Chapman, S., Arakaki, M. A., Cappa, C.M., (2013), *Environmental Performance of Biomass-Derived Chemical Production: A Case Study on Sugarcane-Derived Polyethylene*, Journal of Chemical Engineering of Japan, 46, 4, 319-325.
26. Niaounakis, M., (2013), *Biopolymers: reuse, recycling, and disposal: Chapter 10- Economic Evaluation and Environmental Impacts*. William Andrew.
27. Castro, D. O., Ruvolo-Filho, A., Frollini, E., (2012), *Materials prepared from biopolyethylene and curaua fibers: Composites from biomass*. Polymer Testing, 31, 7, 880-888.
28. Castro, D. O., Frollini, E., Marini, J., Ruvolo-Filho, A., (2013), *Preparação e caracterização de biocompósitos baseados em fibra de curauá, biopolietileno de alta densidade (BPEAD) e polibutadieno líquido hidroxilado (PBHL)*, Polímeros: Ciência e Tecnologia, 23, 1, 65-73.
29. Castro, D. O., Passador, F., Ruvolo-Filho, A., Frollini, E., (2017), *Use of castor and canola oils in "biopolyethylene" curauá fiber composites*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 95, 22-30.
30. Castro, D. O., Frollini, E., Ruvolo-Filho, A., Dufresne, A., (2015), *"Green polyethylene" and curaua cellulose nanocrystal based nanocomposites: effect of vegetable oils as coupling agent and processing technique*, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 53, 14, 1010-1019.
31. Kuciel, S., Jakubowska, P., Kuźniar, P., (2014), *A study on the mechanical properties and the influence of water uptake and temperature on biocomposites based on polyethylene from renewable sources*, Composites Part B: Engineering, 64, 72-77.
32. Samper-Madrugal, M. D., Fenollar, O., Dominici, F., Balart, R., Kenny, J. M., (2015), *The effect of sepiolite on the compatibilization of polyethylene-thermoplastic starch blends for environmentally friendly films*, Journal of Materials Science, 50, 2, 863-872.
33. Escocio, V. A., Visconte, L. L. Y., Cavalcante, A. D. P., Furtado, A. M. S., Pacheco, E. B. A. V., (2015), *Study of mechanical and morphological properties of bio-based polyethylene (HDPE) and sponge-gourds (Luffa-cylindrica) agrosidue composites*, AIP Conference Proceedings. 0600121-0600125, Mayıs, ABD.
34. Ferrero, B., Fombuena, V., Fenollar, O., Boronat, T., Balart, R., (2015), *Development of natural fiber-reinforced plastics (NFRP) based on biobased polyethylene and waste fibers from Posidonia oceanica seaweed*, Polymer Composites, 36, 8, 1378-1385.
35. Garcia-Garcia, D., Carbonell-Verdu, A., Jordá-Vilaplana, A., Balart, R., Garcia-Sanoguera, D., (2016), *Development and characterization of green composites from bio-based polyethylene and peanut shell*, Journal of Applied Polymer Science, 133, 37, 43940.
36. Ferrero Penadés, B., (2017), *"Desarrollo de nuevos materiales ecológicos basados en matrices poliméricas de origen renovable y refuerzos de alga de Posidonia Oceánica"*, Doktora Tezi, Universitat Politècnica de València, Valensiya, İspanya, [https://riunet.upv.es/handle/10251/86283\\_](https://riunet.upv.es/handle/10251/86283_)
37. Ouali, A. A., Rinberg, R., Nendel, W., Kroll, L., Siegel, C., Buchelt, B., Wagenführ, A., Trommler, K., Schreiter, K., John, R., Spange, S., (2017), *Natural unidirectional sheet processes for fibre reinforced bioplastics*, AIP Conference Proceedings. 0600051-0600055.
38. Jordá-Vilaplana, A., Carbonell-Verdú, A., Samper, M. D., Pop, A., Garcia-Sanoguera, D., (2017), *Development and characterization of a new natural fiber reinforced thermoplastic (NFRP) with Cortaderia selloana (Pampa grass) short fibers*, Composites Science and Technology, 145, 1-9.

39. John, R., Trommler, K., Schreiter, K., Siegel, C., Simon, F., Wagenführ, A., Spange, S., (2017), *Aqueous poly (N-vinylformamide-co-vinylamine) as a suitable adhesion promoter for wood veneer/biopolyethylene composite materials*, *BioResources*, 12, 4, 8134-8159.
40. Tarrés, Q., Melbø, J. K., Delgado-Aguilar, M., Espinach, F. X., Mutjé, P., Chinga-Carrasco, G., (2018), *Bio-polyethylene reinforced with thermomechanical pulp fibers: Mechanical and micromechanical characterization and its application in 3D-printing by fused deposition modelling*, *Composites Part B: Engineering*, 153, 70-77.
41. Filgueira, D., Holmen, S., Melbø, J. K., Moldes, D., Echtermeyer, A. T., Chinga-Carrasco, G., (2018), *3D printable filaments made of biobased polyethylene biocomposites*, *Polymers*, 10, 3, 314.
42. Uitterhaegen, E., Parinet, J., Labonne, L., Mérian, T., Ballas, S., Véronèse, T., Merah, O., Talou, T., Stevens, C.V., Chabert, F., Evon, P., (2018), *Performance, durability and recycling of thermoplastic biocomposites reinforced with coriander straw*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, 254-263.
43. Willberg-Keyriläinen, P., Orelma, H., Ropponen, J., (2018), *Injection molding of thermoplastic cellulose esters and their compatibility with poly (lactic acid) and polyethylene*, *Materials*, 11, 12, 2358.
44. Montanes, N., Garcia-Sanoguera, D., Seguí, V. J., Fenollar, O., Boronat, T., (2018), *Processing and characterization of environmentally friendly composites from biobased polyethylene and natural fillers from thyme herbs*, *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 3, 1218-1230.
45. Montanes, N., Balart, R., Fombuena, V., Fenollar, O., Boronat, T., (2018), *Modelización reológica mediante Cross-WLF de un nuevo material compuesto elaborado con bioPE y Thyme*, *Materiales Compuestos*, 2, 3, 22-27.
46. John, R., Schreiter, K., Trommler, K., Siegel, C., Wagenführ, A., Spange, S., (2019), *Maleic anhydride copolymers as adhesion promoting reagent in wood veneer/biopolyethylene composite materials*, *Polymer Composites*, 40, 5, 1979-1988.
47. Dominici, F., García García, D., Fombuena, V., Luzi, F., Puglia, D., Torre, L., Balart, R., (2019), *Bio-Polyethylene-Based Composites Reinforced with Alkali and Palmitoyl Chloride-Treated Coffee Silverskin*, *Molecules*, 24, 17, 3113.
48. Vasconcelos, G. C. M. S., Carvalho, L. H., Barbosa, R., Alves, T. S., (2019), *Evaluation of the morphology, mechanical and thermal properties of cork and green polyethylene eco-composites*, *Materials Research Express*, 6, 9, 095331.
49. Serra-Parareda, F., Tarrés, Q., Delgado-Aguilar, M., Espinach, F. X., Mutjé, P., Vilaseca, F., (2019), *Biobased Composites from Biobased-Polyethylene and Barley Thermomechanical Fibers: Micromechanics of Composites*, *Materials*, 12, 24, 4182.
50. Bezerra, E. B., França, D. C., Morais, D. D. S., Siqueira, D. D., Araújo, E. M., Wellen, R. M. R., (2019), *Toughening of bio-PE upon addition of PCL and PegAA*, *REM-International Engineering Journal*, 72, 3, 469-478.
51. Bezerra, E. B., França, D. C. D., Morais, D. D. S., Silva, I. D. D. S., Siqueira, D. D., Araújo, E. M., Wellen, R. M. R., (2019), *Compatibility and characterization of Bio-PE/PCL blends*, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 29, 2, e2019022.
52. Quiles-Carrillo, L., Montanes, N., Jorda-Vilaplana, A., Balart, R., Torres-Giner, S., (2019), *A comparative study on the effect of different reactive compatibilizers on injection-molded pieces of bio-based high-density polyethylene/polylactide blends*, *Journal of Applied Polymer Science*, 136, 16, 47396.
53. Quiles-Carrillo, L., Montanes, N., Fombuena, V., Balart, R., Torres Giner, S., (2020), *Enhancement of the processing window and performance of polyamide 1010/bio-based high-density polyethylene blends by melt mixing with natural additives*, *Polymer International*, 69, 1, 61-71.
54. Brito, G. F., Agrawal, P., Araújo, E. M., de Melo, T. J. A., (2012), *Polylactide/biopolyethylene bioblends*, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 22, 5, 427-429.
55. Araujo, A. P., Agrawal, P., Cavalcanti, S. N., Alves, A. M., Brito, G. F., de Melo, T. J., (2014), *Blendas de Pla/Bio-PE: Efeito Do Teor De Bio-PE Na Cristalinidade E Propriedades Reológicas*, *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 6902-6908, 9-13 Kasım, Cuiabá, Brezilya.
56. Enriquez, E., Mohanty, A. K., Misra, M., (2016), *Biobased polymer blends of poly (trimethylene terephthalate) and high density polyethylene*, *Materials & Design*, 90, 984-990.
57. Brito, G. F., Agrawal, P., Melo, T. J., (2016), *Mechanical and morphological properties of PLA/BioPE blend compatibilized with E-GMA and EMA-GMA copolymers*, *Macromolecular Symposia*, 367, 1, 176-182.
58. Bezerra, E. B., de França, D. C., Morais, D. D. S., Siqueira, D. D., Araújo, E. M., Wellen, R. M. R., (2018), *Characterization of ecologically friendly blends: Bio polyethylene/polycaprolactone*, *Brazilian Congress on Engineering and Material Science*. 7513-7524, Kasım, Foz do Iguacu, Brezilya.
59. Oliveira, A. D., Freitas, D. M., Araújo, J. P., Cavalcanti, S. N., Câmara, D. S., Agrawal, P., Melo, T. J., (2020), *HDPE/LLDPE blends: rheological, thermal, and mechanical properties*, *Materials Research Innovations*, 24, 5, 289-294.
60. Ferri, J. M., Garcia-Garcia, D., Rayón, E., Samper, M. D., Balart, R. (2020), *Compatibilization and Characterization of Polylactide and Biopolyethylene Binary Blends by Non-Reactive and Reactive Compatibilization Approaches*, *Polymers*, 12, 6, 1344.
61. Quiles-Carrillo, L., Montava-Jordà, S., Boronat, T., Sammon, C., Balart, R., Torres-Giner, S., (2020), *On the Use of Gallic Acid as a Potential Natural Antioxidant and Ultraviolet Light Stabilizer in Cast-Extruded Bio-Based High-Density Polyethylene Films*, *Polymers*, 12, 1, 31.
62. Karahan Toprakçı H. A., Turgut ., Toprakçı O., (2019), *Termoplastik Nişasta Esaslı Biyokompozitlerin Üretimi için Yeni Bir Yaklaşım*, *Tekstil ve Mühendis*, 26, 115, 216-223.
63. Matsuda, D. K. M., Verceheze, A. E. S., Carvalho, G. M., Yamashita, F., Mali, S. (2013), *Baked foams of cassava starch and organically modified nanoclays*, *Industrial Crops and Products*, 44, 705-711.
64. Araújo, A. P. M., Agrawal, P., Cavalcanti, S. N., Alves, A. M., Brito, G. F., Melo, T. J. A., (2014), *Bionanocomposite obtained from poly (lactic acid)/biopolyethylene blend and clay*, *Macromolecular Symposia*, 59-64,343.
65. Carbonell-Verdú, A., García-García, D., Jordá, A., Samper, M. D., Balart, R., (2015), *Development of slate fiber reinforced high density polyethylene composites for injection molding*, *Composites Part B: Engineering*, 69, 460-466.

66. Boronat, T., Fombuena, V., Garcia-Sanoguera, D., Sanchez-Nacher, L., Balart, R., (2015), *Development of a biocomposite based on green polyethylene biopolymer and eggshell*, Materials & Design, 68, 177-185.
67. Agrawal, P., Alves, A. M., Brito, G. F., Cavalcanti, S. N., Araújo, A. P. M., Mélo, T. J. A., (2018), *Effect of ethylene-methyl acrylate compatibilizer on the thermo-mechanical, rheological, and morphological properties of poly (Lactic acid)/ biopolyethylene/ clay biocomposites*, Polymer Composites, 39, S1, 164-173.
68. Hanken, R. B. L., Arimatéia, R. R., Farias, G. M. G., Agrawal, P., Santana, L. N. L., Freitas, D. M. G., de Mélo, T. J. A., (2019), *Effect of natural and expanded vermiculite clays on the properties of eco-friendly biopolyethylene-vermiculite clay biocomposites*, Composites Part B: Engineering, 175, 107184.
69. Hanken, R. B. L., Cavalcanti, S. N., Araújo, A. P. M., Alves, A. M., Arimatéia, R. R., Freitas, D. M. G., Agrawal, P., Santana, L. N. L., de Mélo, T. J. A., (2019), *Effect of the organically modified vermiculite clay loading on the rheological and flammability properties of biopolyethylene-vermiculite clay biocomposites*, Journal of Thermoplastic Composite Materials, <https://doi.org/10.1177/0892705719883336>.
70. Matta, A. K., Rao, R. U., Suman, K. N. S., Rambabu, V., (2014), *Preparation and characterization of biodegradable PLA/PCL polymeric blends*, Procedia materials science, 6, 1266-1270.
71. Utracki, L. A., Mukhopadhyay, P., Gupta, R. K., (2003), *Polymer Blends Handbook: Chapter 1- Polymer Blends: Introduction*, Springer, Dordrecht.
72. Ajitha, A. R., Thomas, S., (2020), *Compatibilization of Polymer Blends: Chapter1-Introduction: polymer blends, thermodynamics, miscibility, phase separation, and compatibilization*, Elsevier.
73. Choudhury, A. K. R., (2018), *Biopolymers and biomaterials: Chapter 1- Biopolymers in textile industry*, Apple Academic Press, Toronto.
74. Luz, B. *Product Sustainability I'm Green™ Polyethylene*, ([https://polydistuk.com/\\_uploads/wygwam/Braskem\\_PE\\_Product\\_Sustainability\\_Summary\\_July\\_2014\\_Resintrade.pdf](https://polydistuk.com/_uploads/wygwam/Braskem_PE_Product_Sustainability_Summary_July_2014_Resintrade.pdf)) 21.05.2020