



EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE FİLAMENT OLARAK KULLANILAN POLİMERİK MALZEMELER

Ümit TAYFUN^{1,a,*}, Volkan Murat YILMAZ^{2,b}, Çağrıalp ARSLAN^{3,c}

¹Temel Bilimler, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye.

²Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye.

³Tekstil Mühendisliği, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın,
Türkiye

^autayfun@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5978-5162

^bmyilmaz@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0001-8203-2900

^ccarslan@bartin.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5993-2983

(Geliş/Received: 01.09.2023; Kabul/Accepted: 20.09.2023)

ÖZET

Bir akıllı üretim sistemi olarak kabul gören eklemeli imalat (Eİ) tekniği, çeşitli uygulamalar için karmaşık ve verimli parçalar geliştirmek için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Eİ işlemlerinde filament malzemesi olarak tercih edilen çoğuz (polimer) çeşitleri, istenilen yüzey, yapışma ve mekanik özellikleri sağlamaları açısından sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada, üç boyutlu yazıcılarda kullanılan çoğuzlar ve özellikleri, örnek çalışmalar incelenerek derlenmiştir. Mevcut kullanılan polimerik malzemelere ek olarak, Eİ yöntemine entegre edilen yeni nesil çoğuz kompozitler, medikalden yapı malzemelerine kadar birçok endüstriyel alanda kullanım örnekleri çeşitlendirilerek paylaşılmıştır. Her geçen gün yenilikçi uygulamalar geliştirilen ve geleceğin imalat teknolojisi olarak öngörülen Eİ işlemlerinin teknolojik gelişimine, filament malzemesi olarak kullanılacak özgün polimerik malzemelerin üretimi ivme katma potansiyelindedir.

Anahtar Kelimeler: Üç boyutlu yazıcı, polimer kompozitler, akıllı üretim, eklemeli imalat, termoplastikler.

POLYMERIC MATERIALS USED AS FILAMENTS IN ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

ABSTRACT

The additive manufacturing (AM) technique, accepted as an intelligent manufacturing system, is widely used to develop complex and efficient parts for various applications. The polymer types preferred as filament material in AM processes are limited in their ability to provide the desired surface, adhesion, and mechanical properties. This study compiled the polymers used in 3D printers and their properties by examining case studies. In addition to the currently used polymeric materials, new-generation polymer composites have been integrated into the AM method, and usage examples in many industrial areas, from medical to building materials, have been diversified and shared. The production of unique polymeric materials to be used as filament material has the potential to accelerate the technological development of AM processes, which are being developed with innovative applications daily and are foreseen as the future manufacturing technology.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

Atf (Citation): Tayfun Ü., Yılmaz V. M., Arslan Ç., "Eklemeli İmalat Yönteminde Filament Olarak Kullanılan Polimerik Malzemeler", Akıllı Sistemler Dergisi 2(1): 45-67, 2023

Geliş (Received): 01/09/2023

Kabul (Accepted): 20/09/2023

Yayın (Published): 26/12/2023

Keywords: 3D printing, polymer composites, smart manufacturing, additive manufacturing, thermoplastics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

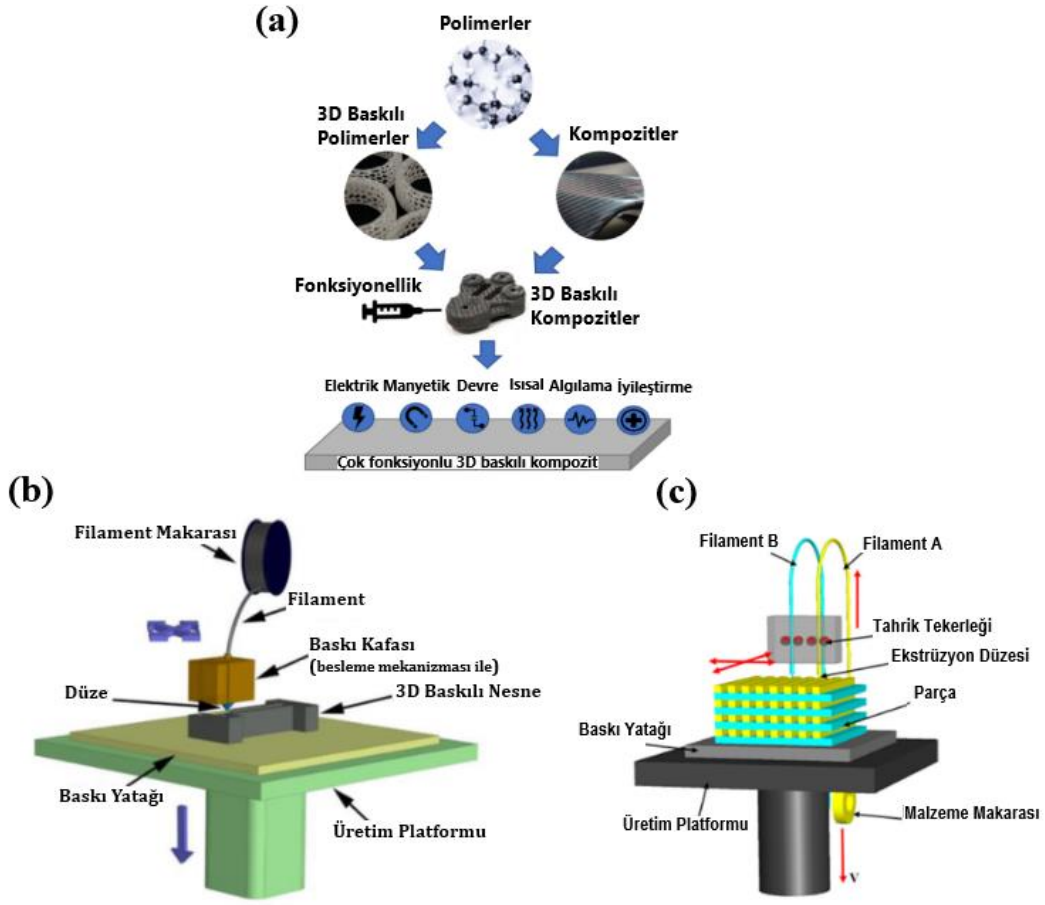
Üç boyutlu yazıcıların uygun fiyatlı olması ilgili alandaki teknoloji ve malzemeler açısından hızla gelişim sağlamasına olanak vermiştir. Genellikle üç boyutlu baskı (3D) olarak bilinen eklemeli imalat, malzemelerin eklenmesiyle geometrik bir modelden fiziksel öğeler meydana getirilen bir tür dijital üretim tekniğidir [1]. Geleneksel eksiltmeli imalat süreçlerinden farklı olarak, bu yöntemde ihtiyaç kadar malzeme kullanılmakta ve parçalar katman-katman üretilmektedir [2]. Eklemeli imalat işlemi, önceden hızlı prototipleme veya popüler kullanımı 3D baskı olarak bilinen ifadenin günümüzde resmileştirilmiş halidir. Yönetim danışmanları ve yazılım mühendislerinin yaygın olarak kullandığı hızlı prototipleme terimi, iş ve yazılım geliştirme sürecinde müşterilerin ve diğer paydaşların fikirleri ve geri bildirimlerini test etmesine olanak sağlayan kademeli çözümler şeklinde tanımlanmıştır. Bu yöntemin temel prensibi, başlangıçta üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım (BDT) kullanılarak oluşturulan sistemin, süreç planlamasına ihtiyaç duyulmadan doğrudan üretilebilir olmasıdır. İlk bakışta görüldüğü kadar basit olmasa da gerçekte eklemeli imalat, doğrudan BDT verilerinden karmaşık 3D nesnelere üretimini önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Diğer imalat yöntemlerinde, farklı özellikte parçalar üretebilmek için ek araç ve süreçler gibi parça geometrisinin dikkatli ve ayrıntılı analizi gerekmektedir. Eklemeli imalat tekniği için temel boyut bilgisi, makinenin nasıl çalıştığını bilmek ve az miktarda malzeme gereksinimi ile parçayı oluşturmak mümkündür [3].

Eklemeli imalatın son 50 yılda hızla yaygınlaşmasıyla, gelişen imalat sektörüne hızlı bir prototipleme tekniği olarak tasarım ve modelleme entegre edilmiştir [4]. Endüstriyel uygulama potansiyeline sahip birçok üretim tekniğini (toz yatağı füzyonu, doğrudan enerji depolama, malzeme ekstrüzyon, bağlayıcı püskürtme, kütleme, laminasyon vb.) kapsamaktadır. Katmanlı imalat teknolojilerinin hızlı ilerlemesinin arkasındaki itici güç, gelişen düşük maliyetli makineler, artan malzeme çeşitliliği ve geniş uygulama alanları araştırma odağından kaynaklanmaktadır [5]. Bu yöntemle elde edilen ürünler yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, iyi darbe dayanımı gibi mekanik özelliklere sahiptir ayrıca birçok sektör için kritik önem arz eden tasarım esnekliği de yöntemin avantajları olarak değerlendirilebilir. Bu üstün özelliklerinden dolayı otomotiv, tıp, uzay ve havacılık, inşaat, savunma sanayi, kalıpcılık, askeri donanım, eğitim, gıda, kuyumculuk, heykelticilik ve kişisel araç-gereç gibi endüstrinin birçok sektöründe uygulama alanına sahiptir [6,7].

Metaller, seramikler, çoğuzlar ve kompozitler 3D baskı için kullanılmaktadır. Çoğu endüstriyel ve bilimsel ilgi, üst düzey teknolojik uygulamalarından dolayı metal baskıya odaklansa da çoğuzlar, eklemeli imalat yönteminde kullanımıyla birlikte diğer tüm malzeme kategorileri içinde 3D baskı için en fazla tercih edilen malzemelerdir [8]. Hızlı prototip için tercih edilen polimerik malzemeler; termoplastikler, termosetler, elastomerler, hidrojel, çoğuz karışımlar, biyolojik sistemler ve çoğuz esaslı kompozitlerdir. Bu çoğuzlar, çok yönlü ve çok işlevli malzemelerin 3D yazma işlemi için önemli bir avantaj sunmaktadır [9].

Eklemeli imalat hem hızlı bir işleme hem de üretim teknolojisi haline gelen, dördüncü sanayi devrimi olarak isimlendirilmekte olup, gelecekte önemli bir konumda kendisine yer bulmuştur. Bu yaklaşım, çok yönlü, esnek ve son derece özelleştirilebilir olması nedeniyle endüstriyel üretimin çoğu sektörü için oldukça uygundur. Eklemeli imalatın öncelikli odak noktası düşük hacimli, hızlı üretilen katma değeri yüksek ürünlerdir. Önde gelen otomobil üreticileri artık bu yöntemle motor bileşenleri imal etmeye başlamış; uluslararası uzay istasyonu, uzayda parça ve bileşen yapımı için eklemeli imalat makineleri kullanmaktadır [10].

Katmanlı Üretim ve Hızlı Prototipleme olarak da bilinen 3D yazdırma, doğrudan 3 boyutlu dijital verilerden prototiplerin veya son kullanım bileşenlerinin üretimi için kullanılan bir süreçtir. 3D yazdırma, geleneksel üretim sisteminde kullanılan çıkarma ve birleştirme işlemlerinin aksine, malzeme yığınlarının katman katman istiflenmesi ilkesiyle çalışmaktadır. 3D yazdırma süreci, Creo, Auto Cad, Catia, Solidworks gibi uygun bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak çizilebilen ürünün kavramsal üç boyutlu modeli ile başlamaktadır. Üç boyutlu yazdırma, malzemenin CAD modeline göre katman katman biriktirilmesini içeren hızlı bir prototip oluşturma işlemidir [11-13]. 3B baskı işleminin çok yönlü karakterinden dolayı, yani malzeme ve ekipman çeşitliliği, seçici biriktirme gibi nedenlerle, işlevsellikler baskı sırasında isteğe göre tasarlanabilir ve seçici olarak bir yapıya dahil edilebilir [14] (Şekil 1-a). En popüler 3D yazıcı türleri, Erimiş Yığıma/Biriktirme Modelleme (FDM), Stereolitografi (SLA), Dijital Işık İşleme (DLP), Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Lazer Eritme (SLM), Lamine Nesne Üretimi (LOM) ve Dijital Işın Erime (EBM)'dir [11-13]. Her tekniğin malzeme, parametreler veya bileşik ürün işlevselliğinden kaynaklanabilecek kendi avantajları ve dezavantajları mevcuttur. FDM, çoğuz harmanların 3D yazdırılması için temel ve en çok kullanılan yöntemdir [12].



Şekil 1. (a) 3D baskıdaki multifonksiyonel konseptin grafiksel gösterimi [14] (b) Yazıcı bileşenlerinin görsel sunumu [12] ve (c) Eriyik Yığıma Modelleme (FDM) kurulumunun şematik gösterimi [11].

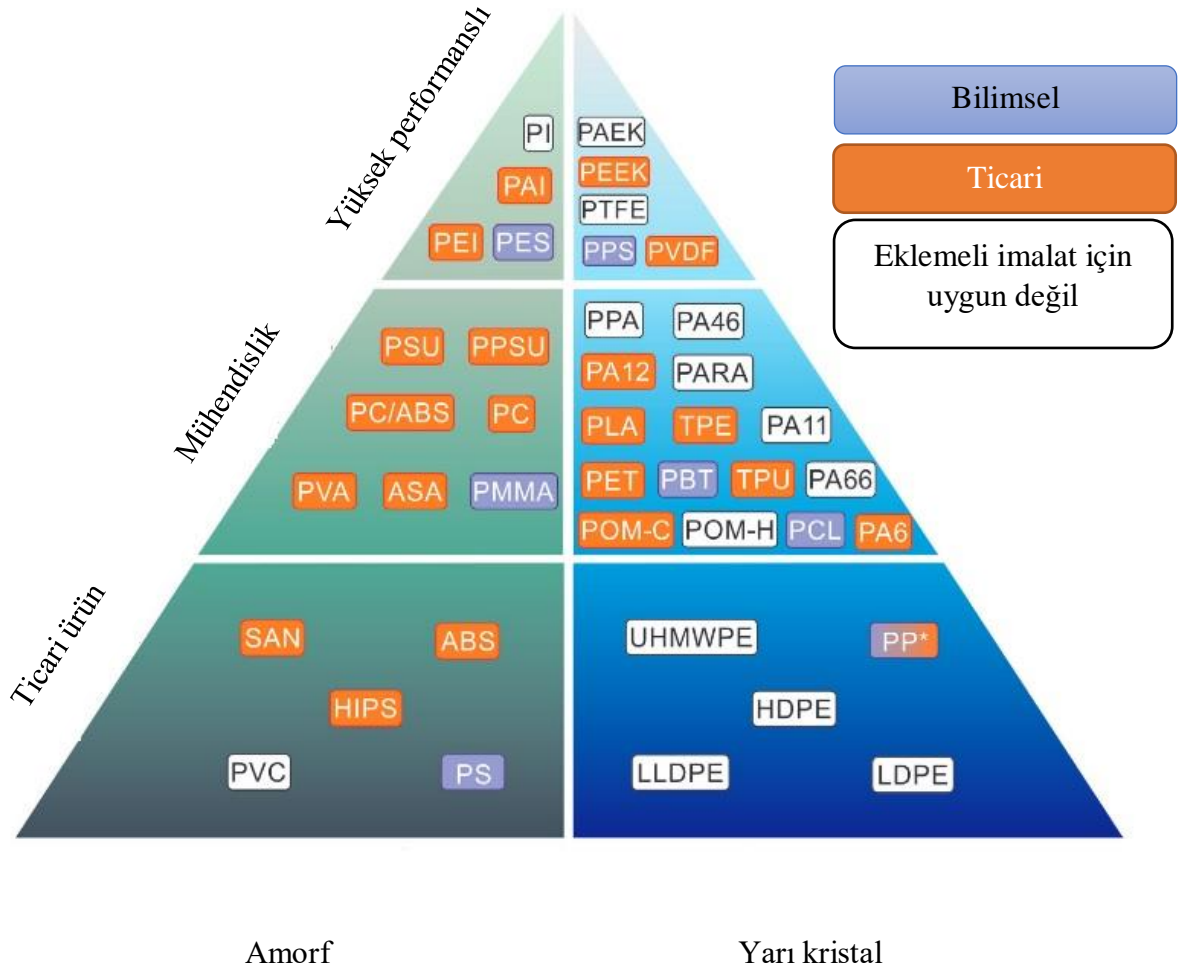
Düşük erime sıcaklığı ve iyi akışkanlık gibi iyi işlem özelliklerine sahip termoplastik çoğuzlar, FDM işlemi için hammadde olarak kullanılmaktadır [14]. Bu yöntemde, belirli çaplardaki çoğuz filamentler, yazıcının baskı kafasına beslenir, burada erir ve son parçaya katılacağı kadar taban platformu üzerinde nozülün katman katman ekstrüde edilir. Yazdırma parametreleri, katmanın yönünü, kalınlığını, açısını ve hava boşluğunu kontrol eder [12] (Şekil 1-b ve 1-c). FDM'nin başlıca faydaları, düşük maliyetli, hızlı prototip oluşturma ve prosedürdeki basitliktir. Çok işlevli parçalar üreten iki nozül kullanılarak aynı anda farklı malzemeler de basılabilir. FDM tekniği, özellikle polimerik kompozitlerde bazı dezavantajlara da sahiptir. Ekstrüzyon sırasında çoğuzdaki dolgu maddesi parçacıklarının bağdaşık (homojen) dağılımını korumak zordur. FDM genellikle termoplastik polimerler için kısıtlı kaldığından, başka bir sorun da malzeme sınırlamasıdır. Çünkü bu süreçte kullanılan malzemenin hızlı bir şekilde katılmasının yani sıra ekstrüde etmek için uygun bir viskoziteye de sahip olması

gerekmektedir [12, 14]. Yüksek gözeneklilik, zayıf arayüzey bağı ve sınırlı malzeme çeşitliliği, FDM'nin başlıca handikapları arasında yer almaktadır [14].

2. EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİNDE ÇOĞUZ SEÇİMİ (POLYMER SELECTION IN ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY)

Çoğuzlar 3D yazdırma işlemi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak günümüzde 3D yazdırma için kullanılan hammaddeler, gereksinimlere göre nihai ürünün farklı özelliklerini elde etmek amacıyla farklı çoğuz kompozitlerden oluşmaktadır [11-31]. Günümüzde, 3D yazdırma işlemi için polilaktit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve poliamid (PA) gibi sınırlı termoplastik çoğuzlar mevcuttur. Bununla birlikte, 3D yazdırma işlemi, saf polimerik malzemelerin mukavemet ve yük taşımasından yoksun oldukları için düşük özelliklerinden dolayı hala kavramsal prototip tasarımı ve modellemesi ile sınırlıdır. Saf çoğuzların bu eksiklikleri pratik uygulamalarını kısıtlamaktadır. Saf 3D yazdırılmış çoğuzların yapısal ve fonksiyonel özelliklerindeki iyileştirmeler, farklı özelliklerdeki dolgu malzemelerinin çoğuz içerisine eklenmesiyle elde edilebilir [12]. Çoğuz matrisli kompozitler, yüksek fiziksel ve mekanik özellikler sergiledikleri için partiküller, lifler veya nanomalzemeler ile takviyelendirilerek üretilirler. Karmaşık geometrilerde polimerik veya çoğuz kompozit parça üretimleri geleneksel olarak kalıplama ve diğer işleme süreçleriyle üretilmektedirler. Bu süreçler ve yöntemler iyi organize edilebilmektedir ancak karmaşık içyapıları kontrol edilemezler. Öte yandan, eklemeli imalat tasarım bilgisayar yazılımı tarafından kontrol edildiğinden, karmaşık geometrileri minimum malzeme israfı ve yüksek doğrulukla imal etmek için bir platform sağlamaktadır [11-14].

Termoplastik çoğuzlar, orta düzey mekanik özellikleriyle birlikte maliyet etkinliği nedeniyle günlük hayatta en çok kullanılan ticari plastik grubudur. Başlıcaları; polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilklorür (PVC), polistiren (PS) ve bunların kopolimerleri ticari plastik olarak kullanılmakta ve halihazırda toplam termoplastik malzeme tüketiminin yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Ekstrüzyon kullanılarak eklemeli imalat için en yaygın tercih edilen hammaddeler polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) çoğuzlarıdır [15]. Bununla birlikte, polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET), polikarbonat (PC), polieterimid (PEI), polifenil sülfon (PPSF), poliamid (PA), yüksek darbeye dayanıklı polistiren (HIPS), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polikaprolakton (PCL), PC-ABS karışımları, termoplastik elastomerler (TPE), poliarileterketonlar (PAEK), suda çözünür polivinil alkol (PVA), polivinil butiral (PVB) ve polivinil asetat (PVAc) piyasada bulunan diğer plastik malzemelerdir [16].



Şekil 2. Ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat pazarında bulunan malzemelerin bir fonksiyonu olarak polimerik malzeme piramidi. (The polymeric material pyramid as a function of material availability in the ME-AM market) [17].

Ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat malzemeleri en önemli çoğuz türleri Şekil 2’de özetlenmiştir. Hem endüstrinin hem de araştırmacıların malzeme portföyünü genişletmeyi vurgulamaları nedeniyle birçok çoğuz türü (turuncu renkte gösterilen) halihazırda ticarileştirilmiştir. Poli laktik asit (PLA) ve akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) kopolimerinin yanı sıra, özellikle poli (etilen tereftalat) (PET) ve polikarbonat (PC), günümüzde standart eklemeli imalat malzemeleri olarak ifade edilebilmektedir. Diğer malzemelerin çoğu, hatta ticari olarak bulunabilenler bile, her zaman sorunsuz kullanılamamakta ve çok fazla uygulamalı deneyim gerektirmektedir. Bu nedenle, incelenen çeşitli filament türlerinde gösterildiği gibi, parça işlenebilirliği, kararlılık ve doğruluk açısından halen iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır [17].

2.1. Polipropilen (PP)

Polipropilen (PP), petrol rafine etme işleminin nispeten ucuz bir yan ürünü olan propen kullanılarak türetilen bir termoplastik çoğuzdur. PP ticari termoplastikler arasında, iyi derecede mekanik ve biyolojik özellikleri, işlenebilirliği, kimyasal dayanımı, kararlılığı ve düşük maliyeti nedeniyle teknik ürünlere uygulanan en yaygın yarı kristal hammadde olarak bilinir. Buna ek olarak PP, kopolimerizasyon ve dolgu maddeleri ile bileşik oluşturma yoluyla, çeşitli uygulamalar için uyarlanabilmektedir. Ayrıca, amorf PP (aPP) veya amorf poliolefinler, yumuşatıcı bir madde olarak veya bir karışımın parametrelerini belirlemek için izotaktik PP ile geniş bir aralıkta harmanlanabilir. Benzer bir prensiple, PP kopolimerleri veya polietilen (PE) ile karışımları da PP'nin performansını arttırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özellikler, PP'yi, malzeme ekstrüzyonu gibi eklemeli imalat teknikleriyle ürünler üretmek için önemli bir aday haline getirmiştir [15,17].

Son yıllarda PP, hem standart termoplastik olarak kullanıldığı bilimsel çalışmalarda, hem de mühendislik plastikleri ve metallerinin yerini alma potansiyeline sahip olduğundan üretim ve kullanımda büyük bir büyüme göstermiştir. PP'nin düşük maliyetine (kabaca 1,2 €/kg) karşılık, iyi bir çekme mukavemeti (25-40 MPa) ve Young modülü (1300-1800 MPa), yüksek tokluk (kopma anında > %50 uzama), darbe ve aşınma dayanımı gibi tatmin edici mekanik özellikleri ile yaklaşık 0,9 g/cm³'lük düşük yoğunlukla birleştiğinde, bu da PP'yi ekstrüzyon bazlı eklemeli imalat için özellikle çekici kılmaktadır. PP kolayca özelleştirilebilir bir çoğuz olduğundan, mekanik özelliklerini geliştirmek/değiştirmek için farklı yaklaşımlar mevcuttur. Zincir düzeni ve dağılımı, tekniği, zincir oryantasyonu veya ortalama zincir uzunluğu, mevcut ihtiyaçlara göre ayarlanabilmekte ve çok geniş aralıkta düzenleme imkânı sunmaktadır [17].

PP dahil tüm poliolefinler doğası gereği çok düşük su ve nem emilimi göstermektedir. Popüler eklemeli imalat malzemeleri olan PLA ve ABS ile karşılaştırıldığında, PP'nin su emilimi daha düşüktür [18]. Buharlaşan su, baskı işlemini karmaşık hale getirmeye aksine daha az boşluk ve daha iyi bir yüzey kalitesi sağlar [19]. Üstelik düşük nem emilimi, geleneksel ekstrüzyon bazlı eklemeli imalat için mümkün olmayan, nemli ortamlardaki zorlu uygulamalarda bileşenlerin ömrünü uzatmaktadır [20]. Bu bağlamda, PP'nin düşük su emme özelliği, baskıdan önce ek kurutma adımları gerektirmediği için maliyetten tasarruf sağlamaktadır [18].

2.2. Poli laktik asit (PLA)

Biyo-bozunur özellikteki, polilaktit (PLA), harman üretimde kullanımını her geçen gün arttıran çevre dostu ve doğal kaynaklardan üretilen yeni nesil bir çoğuz olarak karşımıza çıkmaktadır. Sahip olduğu bu yüksek potansiyelle matriks malzemesi olarak kullanıldığı kompozit malzemelere ilgiyi arttırmış ve bu malzemelerde performans arttırmaya yönelik çalışmaların sayısı da her geçen gün yükselmektedir [21-24]. En önemli avantajları arasında biyo-uyumluluk, biyo-bozunur karakteristik ve yüksek mekanik dayanım yer almaktadır [25-28]. Su sevmez (hidrofobik) yapısı, düşük bozunma oranı ve zayıf tokluk gibi özellikleri kullanımını sınırlandıran dezavantajlar olarak görülmektedir. Bu kısıtlamalar dikkate alındığında, endüstriyel ölçekte kullanımını arttırmak için PLA'nın özelliklerini iyileştirme amaçlı

çalışmalar hız kazanmıştır [29-31]. Bununla birlikte, geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak eklemeli imalat yönteminde 3D yazıcı filamentini şeklinde kullanımı giderek artan bir eğilim göstermektedir [32-36].

Literatür incelendiğinde, PLA ve PLA esaslı kompozitlerin 3D yazıcı kullanılarak FDM ile şekillendirilmesi ve performans analizi üzerine birçok çalışma mevcuttur [33-42]. Nasir ve ark. FDM 3D yazdırma işlemi için ürettikleri PLA/şeker kamışı lifi kompozit filamentlerde şeker hurma lifine uyguladıkları kimyasal modifikasyon işleminin malzeme performansına etkilerini incelemişlerdir [33]. Sang ve ark. geliştirdikleri kısa bazalt lifi (BF) takviyeli PLA kompozitlerin 3D yazdırma işleminde kullanılabilir potansiyelini incelemişlerdir. Bu çalışmada, kullanılan BF lif demetleri karıştırma işlemi öncesi lif-matriks arayüz özelliklerini iyileştirmesi amacıyla amino-silan (KH550) ile yüzey modifikasyon işlemine tabi tutulmuştur. PLA/BF kompozitlerde ağırlıkça %5, 10 ve 20 BF konsantrasyonlarında çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, 3D yazdırma işleminde, kısa BF uzunluğundaki ve yükleme oranındaki artışla birlikte, düşük doldurma performansı ve mikro-hasarlar oluştuğu görülmüştür. Bu durum mekanik özelliklerde düşüşle sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, üretilen PLA/BF kompozit filamentlerin, kompleks ve çeşitli boyutlardaki 3D yazdırma uygulamaları için mekanik yönden gelişmiş ve düşük maliyetli bir hammadde potansiyeli oluşturduğu belirtilmiştir [34,35].

Tsou ve ark. 3D yazdırma uygulamaları için pirinç kabuğunu (ağırlıkça %20-50 oranlarında) ve PLA'yı birleştirmişlerdir [37]. Lee ve Wu, temin ettikleri karbon elyaf ile güçlendirilmiş PLA esaslı kompozit filamentleri 3D yazıcıda şekillendirmişler ve 3D yazdırma proses parametrelerinin elde ettikleri kompozit yapıların mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Eldeki bulgular, yatak sıcaklığının, PLA/karbon elyaf kompozitin çekme mukavemeti üzerinde en etkili parametre olduğunu ortaya koymuşken, yatak sıcaklığı ve yazdırma oryantasyonunun kompozitin darbe mukavemeti üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 45°'lik oryantasyon ile üretilen 3D baskılı kompozitlerin 90°'lik oryantasyonla üretilenlerden çok daha iyi mekanik özellik sergilediği rapor edilmiştir [38]. Olam ve Tosun, PLA/hidroksiapatit/titanya kompozit filamentler üreterek, bu filamentleri 3D yazdırma işlemiyle şekillendirmişlerdir. Ürettikleri kompozit yapıların mekanik, ısıl ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir [41].

Kapsamlı bir literatür araştırması neticesinde; 3D yazdırma işleminde kullanılan polimerik malzemelerden, özellikle biyo-bozunur karakteristiği sayesinde, en çok tercih edilenlerden birinin PLA olduğu ve bu çalışmalarda PLA'nın hem saf halde hem de elastomerler ile de karışım halde kullanıldığı, FDM ile 3D yazdırma prosesinde kullanılmak üzere üretilen PLA esaslı kompozit filamentlerde güçlendirme elemanı olarak karbon, cam ve bazalt elyaflarının kullanıldığı, 3D yazdırma ile üretilmiş kompozitlerin mekanik performansları, geleneksel yöntemlerle üretilmiş kompozitlerle kıyaslanmıştır. Mekanik özelliklere etkiyen parametreler, kullanılan takviye/dolgu malzemesi konsantrasyonu, kompozitteki eklenti/matris arayüz özellikleri ve baskı sıcaklığı, yatak sıcaklığı ve yazdırma oryantasyonu gibi 3D yazdırma işlem parametreleri özelinde dikkate alınmıştır.

2.3. Termoplastik Poliüretan (TPU)

TPU sert bölümler ve alternatif elastik ağlar olarak bilinen, sert blok kısımlarından veya öncelikle diizosiyanatın zincir genişleticiyle reaksiyonuyla poliol tarafından üretilen yumuşak segmentlerden oluşmaktadır. Sert ve yumuşak bölgelerin farklı kimyasal bileşimleri ve termodinamik uyumsuzlukları nedeniyle TPU'nun yapısında faz ayrımı görülebilir. TPU'nun moleküler yapısı, sert ve yumuşak segmentler arasında geçiş yaparak, ona gelişmiş darbe dayanıklılığı ve yüksek mukavemet gibi avantajlı mekanik özellikler kazandırır. Son zamanlarda TPU, ulaşım, elektronik cihazlar, inşaat, medikal, spor malzemeleri, havacılık ve lojistik dahil olmak üzere çok çeşitli mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, TPU'nun sınırlı UV direnci, yüksek maliyeti ve suya karşı zayıf toleransı bazı uygulamalarını sınırlandırmaktadır [43-46].

TPU esaslı kompozitlerin eklemeli imalat ile üretilmesi, esneklik, katman yapışması, çekme mukavemeti ve destek yapısı gibi parametreler açısından kullanım kolaylığı sağlamaktadır [47-52]. Kaynak ve Varsavas, enjeksiyon kalıplama ve 3D yazıcıyla ürettikleri saf PLA ve onun TPU karışım ve cam elyaf takviyeli kompozitlerinin performanslarını kıyasladıkları çalışmada, saf PLA ve PLA/TPU karışımın şekillendirilmesinde 3D yazdırmanın oldukça yararlı olduğu aktarılmıştır. Ancak, güçlendirme elemanı olarak kullanılan cam elyafın oryantasyonundaki farklılıklardan ötürü PLA/cam elyaf ve PLA/TPU/cam elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerinde bazı düşüşler olabileceğini belirtmişlerdir [53]. Wang ve ark. saf PLA, saf TPU ve PLA/TPU karışımı filamentler kullanarak FDM ile 3D yazıcıda ürettikleri malzemelerin çekme özelliklerini analiz etmişlerdir [54]. Poliüretan köpük artık malzemeleri TPU matrisine eklenerek 3 boyutlu baskı yöntemiyle parça üretimi Gama ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir [55]. Çeşitli çalışmalarda, TPU kullanılarak eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçaların izotropik özellikleri incelenmiştir [56,57].

2.4. Akrilonitril-bütadien-stiren kopolimer (ABS)

Akrilonitril-butadien-stiren terpolimer (ABS), yaygın uygulama alanına sahip bir mühendislik plastiğidir. ABS, sürekli faz olarak stiren-akrilonitril (SAN) kopolimerinden ve dağılmış faz olarak polibütadienden oluşan iki segmentli bir sistemdir ve bu özelliği darbe direncini iki katına çıkarken çoğuza mükemmel mekanik özellikler kazandırır. ABS'nin bileşenleri, hacimli yapısına bazı farklı özellikler kazandırır; örneğin, akrilonitril fazı kimyasal direnç ve hava koşullarına dayanıklılık için ana bileşen iken, bütadien esaslı esnek kısım dayanıklılık özelliğine sahiptir ve stiren fazı parlaklık, işlenme kolaylığı ve ekonomik avantajlar sunar [58-60].

ABS bileşenlerinin oranı, çeşitli uygulamaların gerekliliklerini karşılamak üzere değiştirilebilir özelliğindedir. ABS, çekme mukavemeti, eğilme modülü ve sertlik gibi mekanik özellikleri geliştirmek için fiber takviyesiyle birlikte kullanılarak, yapı ve inşaat, kişisel bakım ürünleri, oyuncaklar, bilgisayar ve iş ekipmanları, tıbbi cihazlar ve otomotiv iç bileşenlerinde uygulamalara olanak sağlar. İlgili alanlarda ABS'yi kullanmanın bir başka nedeni de yaygın

olarak kullanılan düşük fiyatlı termoplastikler ile yüksek maliyetli, performans odaklı mühendislik plastikleri arasında yer alan fiyatıdır [61-64].

ABS esaslı filamentler ticari olarak kabul görmüştür ve farklı çap ve renklerde ABS filament çeşitleri farklı üreticiler tarafından piyasaya sürülmüştür. Buna ek olarak, literatürde ABS kopolimerinin özelliklerini değiştirerek eklemeli imalatda daha etkin ve kusursuz kullanımını amaçlayan çalışmalar yapılmıştır [65-70]. Rodriguez ve ark. FDM tekniğiyle ürettikleri tek yönlü ABS malzeme ve ABS tekli filamentin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Eldeki sonuçlar, tekli filament formuna göre, FDM ile üretilen ABS malzemenin daha düşük mukavemet sergilediğini ortaya koymuştur [65]. Vicente ve ark. katmanlararası soğuma süresi, düşe çapı, dolgu yoğunluğu, raster açısı ve katman kalınlığı gibi FDM yazdırma işlem parametrelerinin bu teknikte üretilen ABS parçaların mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır [66]. Karabeyoğlu ve ark. dolgu deseni ve yoğunluğunun FDM tekniği ile üretilmiş ABS parçaların aşınma performansına etkilerini incelemişlerdir [69]. Shubham ve ark. katman kalınlığının FDM ile üretilmiş 3D yazdırılmış ABS çoğuzunun mekanik özelliklerine etkisi üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma sonucu artan katman kalınlığının 3D yazdırılmış parçaların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür [70]. Bentonit [71], cam elyaf [72], bazalt elyaf [73], karbon elyaf [74,75], genişletilmiş perlit minerali [76], asidik ve bazaltik pomza tozu [77] takviyelerinin ABS esaslı kompozitlerin eriyik akış ve mekanik performanslarına etkisi araştırılmıştır. Özellikle mineral eklemelerinde ABS esaslı kompozitlerin eriyik akışlarında belirgin değişimler gözlemlenmediğinden dolayı, mineral tozları içeren ABS filamentlerin Eİ işlemleri için uygun ve düşük maliyetli olacağı değerlendirilmiştir.

Detaylı bir inceleme sonucu literatürden elde edilen bulgular; 3D yazdırma işleminde kullanılan polimerik malzemelerden, yapısı gereği işlenebilirliği kolay olması ve işlem kolaylığı sağlaması bakımından en çok tercih edilenlerden birinin ABS olduğunu ortaya koymuştur. Literatür araştırmasından da görüldüğü üzere, gerek saf halde fazlasıyla, gerekse de içerisinde kullanılacak geniş dolgu malzemesi çeşitliliğiyle ABS kopolimeri, 3D yazdırma işleminde halen popüleritesini koruyan polimerik bir malzemedir.

2.5. Poli (etilen tereftalat) (PET)

Yaygın kullanıma sahip plastiklerden biri olan PET, eklemeli imalat yöntemine polietilen tereftalat glikol (PET-G) formunda uyarlanmıştır. Ticarileşen biyo-çoğuzlardan biri olan PET-G, homopolimer olan PET'in kopolimerizasyonundan elde edilir. PET-G, 3D yazma uygulamaları için filament olarak kalıptan çekilebilen şeffaf amorf bir termoplastiktir. Bu çoğuz, işlenebilirlik, tokluk, yüksek darbe direnci ve parlaklık gibi üstün özelliklere sahiptir [78,79].

PET-G, özellikle karbon elyaf ile güçlendirilerek filament formunda üretilmiş ve mekanik dayanımı yüksek 3D parçalar üretilmiştir [80-84]. Havacılık ve uzay sektöründe yüksek performans gerektiği için bu kompozitlere ihtiyaç duyulmaktadır [85]. Karbon elyaf takviyeli

PET-G filamentler, piyasada ticari olarak da bulunabilmektedir. Dezavantaj olarak; karbon elyafın yüksek maliyeti, bu filament çeşidinin fiyatının fazla olmasına sebebiyet vermektedir.

Aktifleştirilmiş karbon atığı [86], titanyum dioksit [87], sepiolit minerali [88], ipek elyaf [89] ve nanokil [90,91] eklentileri PET-G ile harmanlanmış ve hızlı modelleme ile üretilen 3D parçaların özellikle mekanik dayanımlarında iyileşmeler saptanmıştır.

2.6. Diğer çoğuzlar

Eklemeli imalat işlemlerinde filament malzemesi olarak kullanılan poliamid (PA) türevleri, yüksek darbe dayanımı, ısıl kararlılık ve yüksek çekme mukavemeti nedeniyle tercih edilmiş olup, kullanımı sınırlayan dezavantaj olarak nem biriktirme kapasitesi ön plana çıkmaktadır [92-95].

Popüler yüksek performans termoplastiklerinden biri olan polieter-eter-keton (PEEK), 3D filament olarak tercih edilmesinin yansıra, hızlı prototipleme uygulamalarında taban malzemesi olarak da geniş kullanım alanı bulmuştur [96-101]. Ayrıca, karbon elyaf ile güçlendirildiğinde PEEK filamentler, üst düzey özellikler gerektiren havacılık ve uzay araçları uygulamalarında talep edilen ticari bir ürün haline gelmiştir [102-105].

Benzer özelliklere sahip bir termoplastik olan Polieterimide (PEI), kimyasallara ve ısıya karşı dayanıklı yapısına ek olarak dielektrik özelliklere sahip olduğundan medikal ve ulaşım sektörlerinde tercih edilmektedir [106-109]. PEI filamentler, ULTEM ticari adıyla farklı varyasyonlarda piyasada ticarileşmiştir.

Suda çözünebilir bir çoğuz olan polivinil alkol (PVA), yapılan bilimsel çalışmalar neticesinde 3D yazılabilir hale getirilmiş olup, çoğunlukla dışçılık, ilaç salınımı ve biyo-yazıcı gibi sağlık alanındaki uygulamalarda kendine yer edinmiştir [110-116]. Biyomedikal ve doku mühendisliği alanında tercih edilen polikarbonat (PC), eklemeli imalata uyarlanan diğer bir gözde termoplastiktir [117-121].

Bunların dışında, eklemeli imalat işlemlerinde tercih edilen çoğuzların çeşitli oranlardaki harmanları (blends) da gerek bilimsel gerek ise ticari olarak kabul görmüştür. Bu harmanların en popülerleri PLA/ABS, PC/TPU, PEI/PET-G, PEEK/PVA ve ABS/TPU gibi faz ayrımı göstermeyen çoğuz karışım formundaki filamentlere ek olarak çeşitli polimerik uyumlaştırıcı içeren ABS, PC ve PLA esaslı malzemelerdir [122-126].

3. GÜNCEL EĞİLİMLER VE GELECEK GÖRÜNGELERİ (RECENT TRENDS AND FUTURE PERSPECTIVES)

Bir akıllı üretim çeşidi olan eklemeli imalat teknolojisi, gerek uygulama alanı gerek kullanılan malzemeler açısından her geçen gün artan bir ivme ile gelişim göstermektedir. Gerçekleştirilen güncel bir çalışmada, ticari filament olarak üretilmiş çoğuz ile aynı malzemenin granül formu kullanılarak 3D yazdırılan parçaların mekanik dayanımları kıyaslanmış ve sonuçlar

incelendiğinde birbirine yakın performans değerleri saptanmıştır [127]. Bu çalışma, 3D filament denemelerinde granül formunda üretilen kompozit malzemelerin, yazıcıya entegre edilen pelet ekstrüder kullanımının yaygınlaşacağını göstermektedir. Geleneksel enjeksiyonlu kalıplama ve eklemeli imalat yöntemlerinin kıyaslandığı çalışmalarda ise, Eİ ile 3D yazdırılan parçaların boşluklar içerdiğinden mekanik dayanım açısından bazı düşüşler gözlemlendiği raporlanmıştır [128-130].

Sürdürülebilir çevre ve atık değerlendirme kapsamında, tarımsal, endüstriyel, deniz biyokütle atıklarına ek olarak doğal ürünler kullanılarak geliştirilen çevreyle uyumlu malzemelerin eklemeli imalat işlemine entegrasyonu son yıllarda artış göstermiştir. Bu kapsamdaki araştırmalarda, yenilikçi ve çevresel döngüye uyumlu 3D yazdırılmış parçaların imalatı gerçekleştirilerek performans özellikleri ortaya konmuştur. Son yıllarda ilgili yaptırımların artması, yeşil kompozit olarak da adlandırılan çevreye uyumlu polimerik filamentlerin kullanımına ilginin yoğunlaşmasına neden olmuştur. Bu eğilimin gelecekte de giderek artış göstermesi beklenmektedir [131-144]. Özellikle robotik, süperkapasitör, giyilebilir tekstil ve biyomedikal alanlarındaki yeni nesil uygulamalarda, bir akıllı üretim yöntemi olan eklemeli imalat teknolojisine ilgi katlanarak artmaktadır [145-148].

Gelişen teknoloji ile birlikte daha uygun fiyata sahip hale gelecek olan eklemeli imalat sürecinin mevcut endüstriyel işlemlere ve insan yaşamına entegre olmaya devam edeceğine dair birçok çıkarım mevcuttur. Sonuç olarak, teknolojideki ilerlemelerinin yanı sıra ilgili polimerik malzemelerin geliştirilmesiyle birlikte hızlı prototipleme alanındaki uygulamaların katlanarak büyümesi öngörülmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI REDDİ

Bu çalışma ile hiçbir şekilde çıkar elde edilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Jadhav A., Jadhav V.S., A review on 3D printing: An additive manufacturing technology, *Materials Today: Proceedings* 2022; 62(4): 2094-2099.
2. Jiang J., Lou J., Hu G., Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes, *Virtual and Physical Prototyping* 2019; 14(4): 308-315.
3. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M., Chapter 1-Introduction and Basic Principles, *Additive Manufacturing Technologies*; 2020: 1-21.
4. Gao W., Zhang Y., Ramanujana D., Ramani K., Chenc Y., Williams C.B., Charlie Wang, C.C.L., Shina, Y.C., Zhang, S., Zavattieri, P.D., The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design* 2015; 69: 65-89.

5. Pereira T., Kennedy J.V., Potgieter J., A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job, *Procedia Manufacturing* 2019; 30: 11-18.
6. Bozkurt Y., Gülsoy H., Karayel E., Eklemeli imalat teknolojilerinin tıbbi ekipmanların üretiminde kullanımı, *El-Cezeri* 2021; 8(2): 962-980.
7. Erener Ş., Boz S., Modern üretim tekniklerinde eklemeli imalat sistemlerinin yeri ve kullanım alanları, *Turkish Journal of Fashion Design and Management* 2021; 3(1): 47-56.
8. Jasiuk I., Abueidda D.W., Kozuch C., Pang S., Su F.Y., McKittrick, J., An overview on additive manufacturing of polymers, *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* 2018; 70: 275-283.
9. Ligon S.C., Liska R., Stampfl J., Gurr M., Mulhaupt R., Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing, *Chemical Reviews* 2017; 117(15): 10212.
10. Leon A.C., Chen Q., Palaganas N.B., Palaganas J.O., Manapat J., Advincula R.C., High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *Reactive and Functional Polymers* 2016; 103: 141-155.
11. Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D., 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering* 2017; 110: 442-458.
12. Saroia J., Wang Y., Wei Q., Lei M., Li X., Guo Y., Zhang K., A review on 3D printed matrix polymer composites: its potential and future challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2019; 106(5-6): 1695-1721.
13. Singh B., Kumar R., Singh J.C., Polymer matrix composites in 3D printing: A state of art review. *Materials Today: Proceedings* 2020; 33: 1562-1567.
14. Bekas D.G., Hou Y., Liu Y., Panesar A., 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering* 2019; 179: 107540.
15. Jin M., Neuber C., Schmidt H.W., Tailoring polypropylene for extrusion-based additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 2020; 33: 101101.
16. González-Henríquez C.M., Sarabia-Vallejos M.A., Rodríguez-Hernandez J., Polymers for additive manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications. *Progress in Polymer Science* 2019; 94: 57-116.
17. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J., Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *Journal of Applied Polymer Science* 2020; 137(12): 48545.
18. Verma N., Awasthi P., Gupta A., Banerjee S.S., Fused deposition modeling of polyolefins: Challenges and opportunities. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2023; 308(1): 2200421.

19. Zaldivar R.J., Mclouth T.D., Ferrelli G.L., Patel D.N., Hopkins A.R., Witkin D., Effect of initial filament moisture content on the microstructure and mechanical performance of ULTEM 9085 3D printed parts, *Additive Manufacturing* 2018; 24: 457-466.
20. Kim E., Shin Y.J., Ahn S.H., The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: Fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal* 2016; 22: 887-89.
21. Auras R., Harte B., Selke S., An overview of polylactides as packaging materials. *Macromolecular Bioscience* 2004; 4(9): 835-864.
22. Bajpai P.K., Singh I., Madaan J., Development and characterization of PLA-based green composites:A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2014; 27(1): 52-81.
23. Nagarajan V., Mohanty A.K., Misra M., Perspective on polylactic acid (PLA) based sustainable materials for durable applications: Focus on toughness and heat resistance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2016; 4(6): 2899-2916.
24. Rasal R.M., Janorkar A.V., Hirt D.E., Poly (lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science* 2010; 35(3): 338-356.
25. Cisneros-López E.O., Pal A.K., Rodriguez A.U., Wu F., Misra M., Mielewski D.F., Kiziltas A., Mohanty A.K., Recycled poly (lactic acid)-based 3D printed sustainable biocomposites: A comparative study with injection molding. *Materials Today Sustainability* 2020; 7: 100027.
26. Ilyas R., Zuhri M.Y.M., Aisyah H.A., Asyraf M.R.M., Hassan S.A., Zainudin E.S., Sapuan S.M., Sharma S., Bangar S.P., Jumaidin R., Nawab Y., Natural fiber-reinforced polylactic acid, polylactic acid blends and their composites for advanced applications. *Polymers* 2022; 14(1): 202.
27. Murariu M., Dubois P., PLA composites: From production to properties. *Advanced drug delivery reviews* 2016; 107: 17-46.
28. Siakeng R., Jawaid M., Ariffin H., Sapuan S.M., Asim M., Saba N., Natural fiber reinforced polylactic acid composites: A review. *Polymer Composites* 2019; 40(2): 446-463.
29. Ahmad F., Choi H.S., Park M.K., A review: Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties. *Macromolecular Materials and Engineering* 2015; 300(1): 10-24.
30. Akampumuza O., Wambua P.M., Ahmed A., Li W., Qin X.H., Review of the applications of biocomposites in the automotive industry. *Polymer Composites* 2017; 38(11): 2553-2569.
31. Chauhan V., Kärki T., Varis J., Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2022; 35(8): 1169-1209.

32. Musa L., Kumar N. K., Abd Rahim S.Z., Rasidi M.S.M., Rennie A.E.W., Rahman R., Azmi A.A., A review on the potential of polylactic acid based thermoplastic elastomer as filament material for fused deposition modelling. *Journal of Materials Research and Technology* 2022; 20: 2841-2858.
33. Nasir M.H.M., Taha M.M., Razali N., Ilyas R.A., Knight V.F., Norrahim M.N.F., Effect of chemical treatment of sugar palm fibre on rheological and thermal properties of the PLA composites filament for FDM 3D printing. *Materials* 2022; 15(22): 8082.
34. Sang L., Han S., Li Z., Yang X., Hou W., Development of short basalt fiber reinforced polylactide composites and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Composites Part B: Engineering* 2019; 164: 629-639.
35. Tayfun Ü., Arslan Ç., Doğan M., Bazalt elyaf yüzeyindeki silan katmanının polilaktit kompozitlerine güçlendirme etkinliğinin değerlendirilmesi. *Journal of Materials and Mechatronics: A* 2023; 4(1): 87-99.
36. Odera R.S., Idumah C.I., Novel advancements in additive manufacturing of PLA: A review. *Polymer Engineering & Science* 2023; DOI: 10.1002/pen.26450.
37. Tsou C.H., Yao W.H., Wu C.S., Tsou C.Y., Hung W.S., Chen J.C., Guo J., Yuan S., Wen E., Wang R.Y., Suen M.C., Preparation and characterization of renewable composites from Polylactide and Rice husk for 3D printing applications. *Journal of Polymer Research* 2019; 26: 227.
38. Lee D., Wu G.Y., Parameters affecting the mechanical properties of three-dimensional (3D) printed carbon fiber-reinforced polylactide composites. *Polymers* 2020; 12(11): 2456.
39. Moetazedian A., Gleadall A., Han X., Ekinçi A., Mele E., Silberschmidt V.V., Mechanical performance of 3D printed polylactide during degradation. *Additive Manufacturing* 2021; 38: 101764.
40. Singamneni S., Behera M.P., Truong D., Le Guen M.J., Macrae E., Pickering K., Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form. *Journal of Materials Research and Technology* 2021; 15: 936-949.
41. Olam M., Tosun N., 3D-printed polylactide/hydroxyapatite/titania composite filaments. *Materials Chemistry and Physics* 2022; 276: 125267.
42. Yang J., Li W., Mu B., Xu H., Hou X., Yang Y., Simultaneous toughness and stiffness of 3D printed nano-reinforced polylactide matrix with complete stereo-complexation via hierarchical crystallinity and reactivity. *International Journal of Biological Macromolecules* 2022; 202: 482-493.
43. Thomas S., Datta J., Haponiuk J.T., Reghunadhan A., *Polyurethane Polymers: Composites and Nanocomposites*, Elsevier, Amsterdam, 2017.
44. Atiqah A., Mastura M.T., Ali B. A.A., Jawaid M., Sapuan S.M., A review on polyurethane and its polymer composites. *Current Organic Synthesis* 2017; 14(2); 233-248.

45. Engels H.W., Pirkl H.G., Albers R., Albach R.W., Krause J., Hoffmann A., Casselmann H., Dormish J., Polyurethanes: Versatile materials and sustainable problem solvers for today's challenges. *Angewandte Chemie* 2013; 52(36): 9422-9441.
46. Das A., Mahanwar P., A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 2020; 3(3): 93-101.
47. Desai S.M., Sonawane R. Y., More A.P., Thermoplastic polyurethane for three-dimensional printing applications: A review. *Polymers for Advanced Technologies* 2023; 34(7): 2061-2082.
48. Rodríguez-Parada L., de la Rosa S., Mayuet P.F., Influence of 3D-printed TPU properties for the design of elastic products. *Polymers* 2021; 13(15): 2519.
49. Kechagias J.D., Vidakis N., Petousis M., Parameter effects and process modeling of FFF-TPU mechanical response. *Materials and Manufacturing Processes* 2023; 38(3): 341-351.
50. Xiao J., Gao Y., The manufacture of 3D printing of medical grade TPU. *Progress in Additive Manufacturing* 2017; 2: 117-123.
51. Shin E.J., Park Y., Jung Y.S., Choi H.Y., Lee S., Fabrication and characteristics of flexible thermoplastic polyurethane filament for fused deposition modeling three-dimensional printing. *Polymer Engineering & Science* 2022; 62(9): 2947-2957.
52. Nace S.E., Tiernan J., Holland D., Ni Annaidh A., A comparative analysis of the compression characteristics of a thermoplastic polyurethane 3D printed in four infill patterns for comfort applications. *Rapid Prototyping Journal* 2021; 27(11): 24-36.
53. Kaynak, C., Varsavas S.D., Performance comparison of the 3D-printed and injection-molded PLA and its elastomer blend and fiber composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2018; 32(4): 501-520.
54. Wang F., Ji Y., Chen C., Zhang G., Chen Z., Tensile properties of 3D printed structures of polylactide with thermoplastic polyurethane. *Journal of Polymer Research* 2022; 29(8): 320.
55. Gama N., Ferreira A., Barros-Timmons A., 3D printed thermoplastic polyurethane filled with polyurethane foams residues. *Journal of Polymer and Environment* 2020; 28: 1560-1570.
56. Hohimer C., Christ J., Aliheidari N., Mo C., Ameli A., 3D printed thermoplastic polyurethane with isotropic material properties. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites* 2017; 10165, 213-221.
57. Lin X., Hao M., Ying J., Wang R., Lu Y., Gong M., Zhang L., Wang D., Zhang L., An insight into the tensile anisotropy of 3D-printed thermoplastic polyurethane. *Additive Manufacturing* 2022; 60: 103260.
58. Moore J.D., Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)-a review. *Composites* 1973; 4 (3): 118-130.

59. Krache R., Debbah I., Some Mechanical and thermal properties of PC/ABS blends. *Materials Sciences and Applications* 2011; 2: 404-410.
60. Kulshreshtha A.K., A review of commercial polyblends based on PVC, ABS, and PC. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 1993; 32(6): 551-578.
61. Kim H., Woo S.S., Recent Developments and Perspectives in ABS Resin. *Polymers and Other Advanced Materials: Emerging Technologies and Business Opportunities* 1995; 185-188.
62. Cirmad H., Tirkes S., Tayfun U., Evaluation of flammability, thermal stability and mechanical behavior of expandable graphite-reinforced acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2022; 147: 2229-2237.
63. Arslan C., Dogan M., Effect of fiber amount on mechanical and thermal properties of (3-aminopropyl) triethoxysilane treated basalt fiber reinforced ABS composites. *Materials Research Express* 2019; 6(11): 115340.
64. Olivera S., Muralidhara H.B., Venkatesh K., Gopalakrishna K., Vivek C.S., Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: A review. *Journal of Materials Science* 2016; 51: 3657-3674.
65. Rodríguez J.F., Thomas J.P., Renaud J.E., Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials experimental investigation. *Rapid Prototyping Journal* 2011; 7(3): 148-158.
66. Vicente C.M., Martins T.S., Leite M., Ribeiro A., Reis L., Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts. *Polymers for Advanced Technologies* 2020; 31(3): 501-507.
67. Rashid A.A., Koç M., Fused filament fabrication process: A review of numerical simulation techniques. *Polymers* 2021; 13(20): 3534.
68. Olivera S., Muralidhara H.B., Venkatesh K., Gopalakrishna K., Vivek C.S., Plating on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) plastic: A review. *Journal of Materials Science* 2016; 51: 3657-3674.
69. Karabeyoglu S.S., Eksi O., Yaman P., Kucukyildirim B.O., Effects of infill pattern and density on wear performance of FDM-printed acrylonitrile-butadiene-styrene parts. *Journal of Polymer Engineering* 2021; 41(10): 854-862.
70. Shubham P., Sikidar A., Chand T., The influence of layer thickness on mechanical properties of the 3D printed ABS polymer by fused deposition modeling. *Key Engineering Materials* 2016; 706: 63-67.
71. Alhallak L.M., Tirkes S, Tayfun U., Mechanical, thermal, melt-flow and morphological characterizations of bentonite-filled ABS copolymer. *Rapid Prototyping Journal* 2020; 26(7): 1305-1312.

72. Bodaghi M., Sadooghi A., Bakhshi M., Hashemi S.J., Rahmani K., Keshavarz Motamedi M., Glass fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene composite gears by FDM 3D printing. *Advanced Materials Interfaces* 2023; 2300337. DOI: 10.1002/admi.202300337
73. Arslan C., Dogan M., The effects of fiber silane modification on the mechanical performance of chopped basalt fiber/ABS composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2020; 33(11): 1449-1465.
74. Tandon S., Kacker R., Singh S.K., Correlations on average tensile strength of 3d-printed acrylonitrile butadiene styrene, polylactic acid, and polylactic acid+ carbon fiber specimens. *Advanced Engineering Materials* 2023; 25(9): 2201413.
75. Akar A.O., Yildiz U.H., Tirkes S., Tayfun U., Hacivelioglu F., Influence of carbon nanotube inclusions to electrical, thermal, physical and mechanical behaviors of carbon-fiber-reinforced ABS composites. *Carbon Letters* 2022; 32(4): 987-998.
76. Alghadi A.M., Tirkes S., Tayfun, U., Mechanical, thermo-mechanical and morphological characterization of ABS based composites loaded with perlite mineral. *Materials Research Express* 2019; 7(1): 015301.
77. Tayfun Ü., Tirkeş S., Doğan M., Tirkeş S., Zahmakıran M., Comparative performance study of acidic pumice and basic pumice inclusions for acrylonitrile–butadiene–styrene-based composite filaments. *3D Printing and Additive Manufacturing* 2022; DOI: 10.1089/3dp.2022.0228
78. Kechagias J.D., Fountas N.A., Ninikas K., Petousis M., Vidakis N., Vaxevanidis N., Surface characteristics investigation of 3D-printed PET-G plates during CO2 laser cutting. *Materials and Manufacturing Processes* 2022; 37(11): 1347-1357.
79. Soleyman E., Aberoumand M., Rahmatabadi D., Soltanmohammadi K., Ghasemi I., Baniassadi M., Abrinia K., Baghani M., Assessment of controllable shape transformation, potential applications, and tensile shape memory properties of 3D printed PETG. *Journal of Materials Research and Technology* 2022; 18: 4201-4215.
80. Bhandari S., Lopez-Anido R.A., Gardner, D.J., Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing* 2019; 30: 100922.
81. Alarifi I.M., PETG/carbon fiber composites with different structures produced by 3D printing. *Polymer Testing* 2023; 120: 107949.
82. Kasmi S., Ginoux G., Allaoui S., Alix, S., Investigation of 3D printing strategy on the mechanical performance of coextruded continuous carbon fiber reinforced PETG. *Journal of Applied Polymer Science* 2021; 138(37): 50955.
83. Alarifi I.M., Mechanical properties and numerical simulation of FDM 3D printed PETG/carbon composite unit structures. *Journal of Materials Research and Technology* 2023; 23: 656-669.

84. Kannan S., Ramamoorthy M., Sudhagar E., Gunji B., Mechanical characterization and vibrational analysis of 3D printed PETG and PETG reinforced with short carbon fiber. *AIP Conference Proceedings* 2020; 2270(1): 030004.
85. Valvez S., Silva A.P., Reis P.N., Compressive behaviour of 3D-printed PETG composites. *Aerospace* 2022; 9(3): 124.
86. Balou S., Ahmed I., Priye A., From waste to filament: Development of biomass-derived activated carbon-reinforced PETG composites for sustainable 3D printing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2023; 11(34): 12667-12676.
87. Veselý P., Froš D., Hudec T., Sedláček J., Ctibor P., Dušek, K., Dielectric spectroscopy of PETG/TiO₂ composite intended for 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping* 2023; 18(1): e2170253.
88. Kim H., Ryu K.H., Baek D., Khan T.A., Kim H.J., Shin S., Hyun J., Ahn J.S., Ahn S.J., Kim H.J., Koo J., 3D printing of polyethylene terephthalate glycol-sepiolite composites with nanoscale orientation. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2020; 12(20): 23453-23463.
89. Vijayasankar K.N., Bonthu D., Doddamani M., Pati F., Additive manufacturing of short silk fiber reinforced PETG composites. *Materials Today Communications* 2022; 33: 104772.
90. Mahesh V., George J.P., Mahesh V., Chakraborty H., Mukunda S., Ponnusami S.A., Dry-sliding wear properties of 3D printed PETG/SCF/OMMT nanocomposites: Experimentation and model predictions using artificial neural network. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2023; DOI: 10.1177/073168442311888.
91. Mahesh V., Joseph A.S., Mahesh V., Harursampath D., VN C., Investigation on the mechanical properties of additively manufactured PETG composites reinforced with OMMT nanoclay and carbon fibers. *Polymer Composites* 2021; 42(5): 2380-2395.
92. Calignano F., Lorusso M., Roppolo I., Minetola P., Investigation of the mechanical properties of a carbon fibre-reinforced nylon filament for 3D printing. *Machines* 2020; 8: 52.
93. Singh R., Singh J., Singh, S., Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament. *Measurement* 2016; 78: 253-259.
94. Farina I., Singh N., Colangelo F., Luciano R., Bonazzi G., Fraternali F., High-performance nylon-6 sustainable filaments for additive manufacturing. *Materials* 2019; 12: 3955.
95. Aslanzadeh S., Saghlatoon H., Honari M.M., Mirzavand R., Montemagno C., Mousavi P., Investigation on electrical and mechanical properties of 3D printed nylon 6 for RF/microwave electronics applications. *Additive Manufacturing* 2018; 21: 69-75.
96. Wang P., Zou B., Xiao H.C., Ding S.L., Huang C.Z., Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK. *Journal of Materials Processing Technology* 2019; 271: 62-74.

97. Dua R., Rashad Z., Spears J., Dunn G., Maxwell M., Applications of 3d-printed peek via fused filament fabrication: A systematic review. *Polymers* 2021; 13(22): 4046.
98. Liu Z., Wang G., Huo Y., Zhao W., Research on precise control of 3D print nozzle temperature in PEEK material. *AIP Conference Proceedings* 2017; 1890: 040076.
99. Kang J., Zhang J., Zheng J., Wang L., Li D., Liu S., 3D-printed PEEK implant for mandibular defects repair-a new method. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2021; 116: 104335.
100. Rinaldi M., Cecchini F., Pigliaru L., Ghidini T., Lumaca F., Nanni F., Additive manufacturing of polyether ether ketone (PEEK) for space applications: A nanosat polymeric structure. *Polymers* 2021; 13: 11.
101. Wickramasinghe S., Do T., Tran P., FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers* 2020; 12: 1529.
102. Rodzeń K., Harkin-Jones E., Wegrzyn M., Sharma P.K., Zhigunov A., Improvement of the layer-layer adhesion in FFF 3D printed PEEK/carbon fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2021; 149: 106532.
103. Stepashkin A.A., Chukov D.I., Senatov F.S., Salimon A.I., Korsunsky A.M., Kaloshkin S.D., 3D-printed PEEK-carbon fiber (CF) composites: Structure and thermal properties. *Composites Science and Technology* 2018; 164: 319-326.
104. Gómez-García D., Díaz-Álvarez A., Youssef G., Miguélez H., Díaz-Álvarez J., Machinability of 3D printed peek reinforced with short carbon fiber. *Composites Part C* 2023; 100387.
105. Han X., Yang D., Yang C., Spintzyk S., Scheideler L., Li P., Li D., Geis-Gerstorfer J. and Rupp F., Carbon fiber reinforced PEEK composites based on 3D-printing technology for orthopedic and dental applications. *Journal of Clinical Medicine* 2019; 8(2): 240.
106. Blanco I., Rapisarda M., Portuesi S., Ognibene G., Cicala G., Thermal behavior of PEI/PETG blends for the application in fused deposition modelling (FDM). *AIP Conference Proceedings* 2018; 1981: 020181.
107. El Magri A., Vanaei S., Vaudreuil S., An overview on the influence of process parameters through the characteristic of 3D-printed PEEK and PEI parts. *High Performance Polymers* 2021; 33(8): 862-880.
108. Cicala G., Ognibene G., Portuesi S., Blanco I., Rapisarda M., Pergolizzi E., Recca G., Comparison of Ultem 9085 used in fused deposition modelling (FDM) with polyetherimide blends. *Materials* 2018; 11: 285.
109. Yılmaz M., Yılmaz N.F., Kalkan, M.F., Rheology, crystallinity, and mechanical investigation of interlayer adhesion strength by thermal annealing of polyetherimide

(PEI/ULTEM 1010) parts produced by 3D printing. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2022; 31(12): 9900-9909.

110. Capel A.J., Rimington R.P., Lewis M.P., Christie S.D., 3D printing for chemical, pharmaceutical and biological applications. *Nature Reviews Chemistry* 2018; 2: 422-436.

111. Angjellari M., Tamburri E., Montaina L., Natali M., Passeri D., Rossi M., Terranova M.L., Beyond the concepts of nanocomposite and 3D printing: PVA and nanodiamonds for layer-by-layer additive manufacturing. *Materials & Design* 2017; 119: 12-21.

112. Matijašić G., Gretić M., Vinčić J., Poropat A., Cuculić L., Rahelić T., Design and 3D printing of multi-compartmental PVA capsules for drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 2019; 52: 677-686.

113. Xu X., Zhao J., Wang M., Wang L., Yang J., 3D printed polyvinyl alcohol tablets with multiple release profiles. *Scientific Reports* 2019; 9(1): 12487.

114. Cotabarren I., Gallo, L., 3D printing of PVA capsular devices for modified drug delivery: design and in vitro dissolution studies. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 2020; 46(9): 1416-1426.

115. Duran C., Subbian V., Giovanetti M.T., Simkins J.R., Beyette Jr F.R., Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol. *Rapid Prototyping Journal* 2015; 21(5): 528-534.

116. Wei C., Solanki N.G., Vasoya J.M., Shah A.V., Serajuddin A.T., Development of 3D printed tablets by fused deposition modeling using polyvinyl alcohol as polymeric matrix for rapid drug release. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 2020; 109(4): 1558-1572.

117. Park S.J., Lee J.E., Lee H.B., Park J., Lee N.K., Son Y., Park S.H., 3D printing of bio-based polycarbonate and its potential applications in ecofriendly indoor manufacturing. *Additive Manufacturing* 2020; 31: 100974.

118. Bahar A., Belhabib S., Guessasma S., Benmahiddine F., Hamami A.E.A., Belarbi R., Mechanical and thermal properties of 3D printed polycarbonate. *Energies* 2022; 15(10): 3686.

119. Gómez-Gras G., Abad M.D., Pérez, M.A., Mechanical performance of 3D-printed biocompatible polycarbonate for biomechanical applications. *Polymers* 2021; 13(21): 3669.

120. Kodali D., Umerah C.O., Idrees M.O., Jeelani S., Rangari V.K., Fabrication and characterization of polycarbonate-silica filaments for 3D printing applications. *Journal of Composite Materials* 2021; 55(30): 4575-4584.

121. Ai J.R., Vogt B.D., Size and print path effects on mechanical properties of material extrusion 3D printed plastics. *Progress in Additive Manufacturing* 2022; 7(5): 1009-1021.

122. Feng P., Jia J., Peng S., Yang W., Bin S., Shuai C., Graphene oxide-driven interfacial coupling in laser 3D printed PEEK/PVA scaffolds for bone regeneration. *Virtual and Physical Prototyping* 2020; 15(2): 211-226.

123. Blanco I., Rapisarda M., Portuesi S., Ognibene G., Cicala G., Thermal behavior of PEI/PETG blends for the application in fused deposition modelling (FDM). *AIP Conference Proceedings* 2018; 1981: 020181.
124. Zander N.E., Gillan M., Burckhard Z., Gardea F., Recycled polypropylene blends as novel 3D printing materials. *Additive Manufacturing* 2019; 25: 122-130.
125. Kaynak C., Varsavas, S.D., Performance comparison of the 3D-printed and injection-molded PLA and its elastomer blend and fiber composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2019; 32(4): 501-520.
126. Spreeman M.E., Stretz H.A., Dadmun M.D., Role of compatibilizer in 3D printing of polymer blends. *Additive Manufacturing* 2019; 27: 267-277.
127. Liu H., Gong K., Portela A., Cao Z., Dunbar R., Chen Y., Granule-based material extrusion is comparable to filament-based material extrusion in terms of mechanical performances of printed PLA parts: A comprehensive investigation. *Additive Manufacturing* 2023; 75: 103744.
128. Lay M., Thajudin N.L.N., Hamid Z.A.A., Rusli A., Abdullah M.K., Shuib R.K., Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering* 2019; 176: 107341.
129. Paganin L.C., Barbosa, G.F., A comparative experimental study of additive manufacturing feasibility faced to injection molding process for polymeric parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2020; 109: 2663-2677.
130. Franchetti M., Kress, C., An economic analysis comparing the cost feasibility of replacing injection molding processes with emerging additive manufacturing techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017; 88: 2573-2579.
131. Sanchez F.A.C., Boudaoud H., Hoppe S., Camargo, M., Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing* 2017; 17: 87-105.
132. Gopinathan J., Noh, I., Recent trends in bioinks for 3D printing. *Biomaterials Research* 2018; 22: 1-15.
133. Anukiruthika T., Moses J.A., Anandharamakrishnan C., 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *Journal of Food Engineering* 2020; 265: 109691.
134. Qahtani M., Wu F., Misra M., Gregori S., Mielewski D.F., Mohanty A.K., Experimental design of sustainable 3D-printed poly (lactic acid)/biobased poly (butylene succinate) blends via fused deposition modeling. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2019; 7(17): 14460-14470.
135. Qiu L., Zhang M., Bhandari B., Chitrakar B., Chang, L., Investigation of 3D printing of apple and edible rose blends as a dysphagia food. *Food Hydrocolloids* 2023; 135: 108184.

136. Han S.N.M.F., Taha M.M., Mansor M.R., Thermal and melt flow behaviour of kenaf fibre reinforced acrylonitrile butadiene styrene composites for fused filament fabrication. *Defence S&T Technical Bulletin* 2019; 12(2): 238-247.
137. Lap M.O., Kanbur Y., Tayfun Ü., The use of mussel shell as a bio-additive for poly (lactic acid) based green composites. *Chemistry and Chemical Technology* 2021; 15(4): 621-626.
138. Nasir M.H.M., Taha M.M., Razali N., Ilyas R.A., Knight V.F., Norrahim M.N.F., Effect of chemical treatment of sugar palm fibre on rheological and thermal properties of the PLA composites filament for FDM 3D printing. *Materials* 2022; 15(22): 8082.
139. Torun A.R., Dike A.S., Yıldız E.C., Sağlam İ., Choupani N., Fracture characterization and modeling of Gyroid filled 3D printed PLA structures. *Materials Testing* 2021; 63(5): 397-401.
140. da Silva S.P.M., Antunes T., Costa M.E.V., Oliveira J.M., Cork-like filaments for Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing* 2020; 34: 101229.
141. Mogan J., Harun W.S.W., Kadirgama K., Ramasamy D., Foudzi F.M., Sulong A.B., Tarlochan F., Ahmad F., Fused deposition modelling of polymer composite: A progress. *Polymers* 2023; 15(1): 28.
142. Javaid M., Haleem A., Singh R.P., Suman R., Rab, S., Role of additive manufacturing applications towards environmental sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 2021; 4(4): 312-322.
143. Şahin O., İlcan H., Ateşli A.T., Kul A., Yıldırım G., Şahmaran, M., Construction and demolition waste-based geopolymers suited for use in 3-dimensional additive manufacturing. *Cement and Concrete Composites* 2021; 121: 104088.
144. Romani A., Suriano R., Levi, M., Biomass waste materials through extrusion-based additive manufacturing: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production* 2022; 386: 135779.
145. Park S., Shou W., Makatura L., Matusik W., Fu K.K., 3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications. *Matter* 2022; 5(1): 43-76.
146. Altıparmak S.C., Yardley V.A., Shi Z., Lin J., Extrusion-based additive manufacturing technologies: State of the art and future perspectives. *Journal of Manufacturing Processes* 2022; 83: 607-636.
147. Arif Z.U., Khalid M.Y., Noroozi R., Hossain M., Shi H.H., Tariq A., Ramakrishna S., Umer R., Additive manufacturing of sustainable biomaterials for biomedical applications. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences* 2023; 18(3): 100812.
148. Li M., Zhou S., Cheng L., Mo F., Chen L., Yu S., Wei J., 3D printed supercapacitor: Techniques, materials, designs, and applications. *Advanced Functional Materials* 2023; 33(1): 2208034.