



T.C.

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİYOMÜHENDİSLİK VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**BİYOMALZEME OLARAK KULLANILABİLECEK POLİLAKTİK
ASİT (PLA)'İN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BÜŞRA AKDUMAN

**TEZ DANIŞMANI
PROF.DR. HÜLYA DEMİRÖREN**

ÇANAKKALE - 2023



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOMÜHENDİSLİK VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİYOMALZEME OLARAK KULLANILABİLECEK POLİLAKTİK
ASİT (PLA)'İN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Yüksek Lisans Tezi

Büşra AKDUMAN

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hülya DEMİRÖREN

Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon kurumu tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 4129

Çanakkale - 2023



T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Büşra AKDUMAN tarafından Prof. Dr. Hülya DEMİRÖREN yönetiminde hazırlanan ve **18/08/2023** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**BİYOMALZEME OLARAK KULLANILABİLECEK POLİLAKTİK ASİT (PLA)’İN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS YETERLİK TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Hülya DEMİRÖREN

(Danışman)

Prof. Dr. Necati KAYA

Dr. Öğr. Üyesi Betül ÇİÇEK ÖZKAN

.....

.....

.....

Tez No : 10570518

Tez Savunma Tarihi : 18/08/2023

.....
Prof. Dr. Ahmet Evren ERGİNAL

Enstitü Müdürü

.././20..

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Büşra AKDUMAN

18/08/2023

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, çalıŐmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Prof. Dr. Hlyla DEMİRÖREN'e, çalışma süresince tüm zorlukları benimle birlikte göğüsleyen M. Kutkan DOğANEL'e, tecrübelerinden yararlanmamı sağlayan, duygusal desteklerinden ötürü Nilay ERTUğRUL ve Merve SIRTIKARA'ya, hayatımın her evresinde bana destek olan canım kardeŐim Erdem AKDUMAN'a; maddi ve manevi destekleri, sonsuz sevgileri için ve baŐarılarım çıkan her yolda bana pusula olan değerli aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Büşra AKDUMAN

anakkale, 2023

ÖZET

BİYOMALZEME OLARAK KULLANILABİLECEK POLİLAKTİK ASİT(PLA)'İN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Büşra AKDUMAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hülya DEMİRÖREN

18/08/2023, 44

Günümüzde polimer malzemelerinin kullanım alanları oldukça geniştir. Petrol bazlı polimerlerin geri dönüşümleri mümkün değildir. Sentetik polimerlerin geniş kullanım alanlarının olması; sentetik polimerleri çevre kirliliği açısından en önemli neden yapmaktadır. Özellikle tek kullanımlık ürünlerin sentetik polimer malzemedan üretilmesi ve daha sonra doğada geri dönüşümünün uzun yıllar sürmesi; bizi bu soruna çözüm aramaya itmiştir. Aynı zamanda günden güne azalan petrol kaynakları, petrol bazlı ürünlerin üretimi açısından hammadde tehlikesi oluşturmaktadır. Bu yüzden otomotiv, ev aletleri, gıda ve ilaç paketlenme gibi birçok endüstride kullanılan sentetik polimerlerin, kullanımını minimuma indirmek ve biyopolimer çalışmalarının artmasına katkı sağlamak hedeflenmektedir. Bu çalışmada doğal bir polimer olan Polilaktik Asit üretimi ve mekanik karakterizasyonu yapılmıştır. Doğal bir polimer olmasının yanı sıra aynı zamanda biyobozunur bir polimer olan PLA'nın, birçok sektörde sentetik polimerlere alternatif oluşturmasının mümkün olduğu düşünülmektedir. Katkısız doğal PLA numuneleri enjeksiyon cihazı ile kalıplanmış ve mekanik karakterizasyonu yapılmıştır. Çekme ve 3 nokta eğme testlerinin sonuçları yorumlanmıştır. PLA'nın mekanik testleri sonucunda, mekanik özellikleri iyileştirmeye yönelik kestane kabuğu kullanılarak biyokompozit üretilmiş ve bu biyokompozitin mekanik özellikleri incelenmiştir. %25 kestane kabuğu takviyesinin PLA'nın mekanik özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sentetik Polimer, Doğal Polimer, PLA, Biyobozunur, Biyokompozit

ABSTRACT

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF POLYLACTIC ACID (PLA) THAT CAN BE USED AS A BIOMATERIAL

Büşra AKDUMAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Bioengineering and Materials Engineering Master Thesis

Advisor: Prof. Dr. Hülya DEMİRÖREN

18/08/2023, 44

Today, the usage areas of polymer materials are quite wide. Petroleum-based polymers are not recyclable. The wide usage areas of synthetic polymers; makes synthetic polymers the most important cause of environmental pollution. In particular, it takes many years to produce disposable products from synthetic polymer material and then recycle them in nature; has led us to seek a solution to this problem. At the same time, petroleum resources, which are decreasing day by day, pose a raw material hazard for the production of petroleum-based products. Therefore, it is aimed to minimize the use of synthetic polymers used in many industries such as automotive, household appliances, food and pharmaceutical packaging and to contribute to the increase of biopolymer studies. In this study, the production and mechanical characterization of Polylactic Acid, a natural polymer, was carried out. PLA, which is a biodegradable polymer as well as being a natural polymer, is thought to be an alternative to synthetic polymers in many sectors. Undoped natural PLA samples were molded with an injection device and mechanically characterized. The results of the tensile and 3-point bending tests are interpreted. As a result of the mechanical tests of PLA, a biocomposite was produced by using chestnut bark to improve the mechanical properties and the mechanical properties of this biocomposite were investigated. It was concluded that 25% chestnut shell reinforcement improved the mechanical properties of PLA.

Keywords: Synthetic Polymer, Biopolymer, PLA, Biodegradable, Biocomposite

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK BEYAN.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1

1.1. Polimer	1
1.1.1. Elde Edilişlerine Göre Polimerler	2
Doğal Polimerler.....	2
Sentetik Polimerler.....	3
1.1.2. Yapılarına Göre Polimerler.....	3
Homopolimerler.....	3
Kopolimerler.....	4
1.1.3. Bağ Yapılarına Göre Polimerler.....	4
Doğrusal Lineer Polimerler.....	4
Dallanmış Polimerler.....	4
Çapraz Bağlı Polimerler.....	4
Ağ Yapılı Polimerler	5
1.1.4. Sentez Yöntemlerine Göre Polimerler.....	5
Kondenzasyon Polimerleri.....	5
Zincir (Katılma) Polimerleri.....	6
1.1.5. Son Kullanım Yerlerine Göre Polimerler.....	6
1.1.6. İşlenme Şekillerine Veya Çözücülere Karşı Gösterdikleri Davranışlara Göre Polimerler.....	6

1.6.1. Termoplastik Polimerler.....	6
1.6.2. Termoset Polimerler.....	7
1.2. Polilaktik Asit (PLA)	7
1.2.1. PLA'nın Biyobozunur Özelliği.....	9
1.2.2. PLA'nın İşlenebilirlik Özelliği.....	10
1.3. Kestane Meyvesi	10
1.3.1. Kestanenin Besin Değeri	12
1.3.2. Kestane Ağacının Önemi.....	13

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 15

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM 23

3.1. Araştırma Materyalleri.....	23
3.2. Yöntem.....	25
3.3. Numunelerin Üretimi.....	25
3.3.1. Enjeksiyon Cihazı.....	26
3.3.2. Etüv.....	27
3.3.3. Ekstrüzyon Cihazı.....	28
3.4. Test Aşaması.....	29
3.4.1. Çekme Cihazı.....	29
3.4.2. 3 Nokta Eğme Testi.....	31

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI 33

4.1. Çekme Testi Bulguları.....	33
4.2. 3 Nokta Eğme Testi Bulguları.....	35

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER 38

KAYNAKÇA	40
----------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

PLA	Polilaktik Asit
DNA	Deoksiribo Nükleik Asit
PHB	Polihidroksibutirat
PTT	Poli (trimetilen tereftalat),
Biyope	Biyopolietilen
%	Yüzde İşareti
PE	Polietilen
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
PU	Poliüretan
PET	Polietilen tereftalat
PVC	Polivinil klorür
PI	Poliimid
PB	Polibüten
CO ₂	Karbon Dioksit
FDA	ABD Gıda ve İlaç Dairesi
LA	Laktik Asit
PEG	Polietilen Glikol
PCL	Poli-ε-kaprolakton.
PHAs	Polihidroksialkanoat
m	Metre
A Vitamini	Retinol
C Vitamini	Askorbik Asit
PGA	Poliglikolik Asit
L-	PLA İzomeri
D-	PLA İzomeri
L-laktid	PLA Monomeri
SR	Silikon Kauçuk
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
ASTM D882	Çekme Testi Standartı
ASTM D638	Çekme Testi Standartı
l -PLA	Poli- l -laktik asit
mm	Milimetre
FDM	Fused Deposition Modelling/Eriyik Yığılma Modelleme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
°	Açı birimi - Derece
CaCO ₃	Kalsiyum Karbonat
°C	Santigrat derece
MPa	Megapaskal
TGA	Termo Gravimetrik Analiz

FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
O ₂	Oksijen
ASTM D3039	Çekme Testi Standartı
ISO 527	Çekme Testi Standartı
ASTM D412	Çekme Testi Standartı
ASTM C297	Çekme Testi Standartı
ASTM E8	Çekme Testi Standartı
ASTM D790	Eğme Testi Standartı
ASTM D6272	Eğme Testi Standartı
ASTM D7264	Eğme Testi Standartı
ISO 178	Eğme Testi Standartı
ISO 14125	Eğme Testi Standartı
ASTM C1161	Eğme Testi Standartı
ASTM C393	Eğme Testi Standartı
ε	Kirişin dış yüzeyindeki şekil değiştirme
D	Kirişin maksimum sehim
d	Kiriş kesitinin yüksekliği
L	Destekler arası mesafe

TABLolar DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Çalışmanın Temel Aşamaları	25
Tablo 2	Saf PLA Numunelerinin Çekme Testi Sonuçları	33
Tablo 3	Biyokompozit Numunelerinin Çekme Testi Sonuçları	34
Tablo 4	Saf PLA Numunelerinin 3 Nokta Eğme Testi Sonuçları	36
Tablo 5	Biyokompozit Numunelerinin 3 Nokta Eğme Testi Sonuçları	36



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Polimerlerin Sınıflandırılması	2
Şekil 2	Bağ Yapılarına Göre Polimerlerin Şematik Gösterimi	5
Şekil 3	Web of Science'da 2007-2016 Yılları Arasında Yayınlanan PLA Çalışmaları	8
Şekil 4	Biyozunur olan ve olmayan Biyopolimer Miktarlarının 2015-2019 Yılları Arasındaki Üretim Oranları	9
Şekil 5	Türkiye'de Yetişen Kestane Üretim Haritası	11
Şekil 6	Kestane Ağacı	11
Şekil 7	Kestane Meyvesi ve Yumağı	12
Şekil 8	Kestane Şekeri	13
Şekil 9	Kestane Ağacından Üretilmiş Masa	13
Şekil 10	Kestane Balı	14
Şekil 11	PLA, PGA, PCL, PHB Biyopolimerlerinin Yapısal Formülleri	17
Şekil 12	Granül Formundaki Filameon Marka PLA	23
Şekil 13	Kurutulmuş ve Dondurucudan Çıkarılmış Bartın İlinde Yetişen Kestane	24
Şekil 14	Çalışmada Kullanılan Kestane Kabukları	24
Şekil 15	Granül PLA	26
Şekil 16	BOY Marka Enjeksiyon Cihazı	26
Şekil 17	TORUN Marka Enjeksiyon Cihazı	27
Şekil 18	Enjeksiyon İle Kalıplanmış Test Numuneleri	27
Şekil 19	Etüv	28
Şekil 20	Öğütülmüş PLA + Kestane Kabukları	28
Şekil 21	Estrüzyon İşlemi	29
Şekil 22	Çekme Testi için Hazırlanan Numunenin Şematik Gösterimi	29

Şekil 23	SHIMADZU Marka Çekme Cihazı	30
Şekil 24	ZWICK Marka Çekme Cihazı	30
Şekil 25	Test Numuneleri	31
Şekil 26	3 Nokta Eğme Testinin Şematik Gösterimi	31
Şekil 27	3 Nokta Eğme Testi Numuneleri	32
Şekil 28	Saf PLA Numunelerinin Çekme Testi Öncesi ve Sonrası Görüntüleri	34
Şekil 29	Biyokompozit Numunelerinin Çekme Testi Öncesi ve Sonrası Görüntüleri	35
Şekil 30	Saf PLA Numunelerinin 3 Nokta Eğme Testi Öncesi ve Sonrası Görüntüleri	37
Şekil 31	Biyokompozit Numunelerinin 3 Nokta Eğme Testi Öncesi ve Sonrası Görüntüleri	37
Şekil 32	Polimerlerin Mekanik Değerlerinin Karşılaştırılması	39

BİRİNCİ BÖLÜM

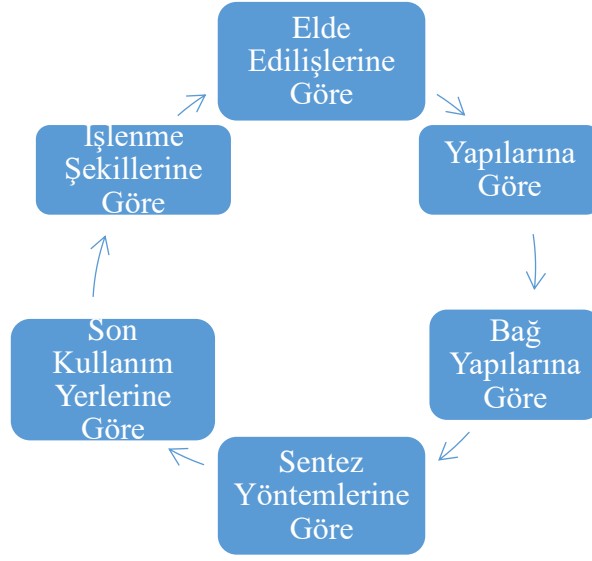
GİRİŞ

Kullanım alanları günden güne artan ve geri dönüşümü mümkün olmayan petrol bazlı polimerlere alternatif arama çalışmaları yıllardır devam etmektedir. Çevreye ve doğaya verilen zararın yanı sıra; insan sağlığı ve diğer canlılar için de ciddi tehdit unsuru taşıyan petrol bazlı polimerlerin, teknolojinin gelişimiyle üretiminin de azalacağı umulmuştur. Sentetik polimerlerin kullanımının bu kadar yaygın olması ve geri dönüştürülememesi çevre kirliliği, ekolojik düzenin bozulma tehlikesi, deniz canlılarının yaşam tehlikesi gibi birçok soruna yol açmaktadır. Ancak ucuz ve kolay üretilebilme özelliği, yıllardır sentetik polimerleri birçok sektörde vazgeçilmez yaptığı gibi kullanım alanları da genişlemiştir. Sentetik polimerlerin tek kullanımlık ürünlerin üretiminde kullanılmaya başlanması ile çevre kirliliğinde çığır aşılmıştır. Bu tez çalışmasında sentetik polimerlere birçok alanda alternatif olabilecek doğal polimer Polilaktik Asitin mekanik özellikleri incelenecektir. Biyopolimer çalışmalarında literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır.

1.1. Polimer

Polimer kelime olarak yunanca ‘poly’ ve ‘meros’ kelimelerinden türemiş olup anlamları; ‘çok’ ve ‘parça’dır. Polimer, sayıca fazla aynı parçaların veya birbirinden farklı parçaların kimyasal bağlarla düzenli veya düzensiz olarak birleşmesi sonucu elde edilen üründür. Elde edilmesinde kullanılan her bir birime monomer adı verilir. İnsanlık tarihinin ilk zamanlarından beri dünya üzerinde polimerler ile karşılaşmak mümkündür. Her canlının yapısında polimerler bulunduğu gibi doğada da bir sürü örnekle karşılaşılabilir.

Örneğin; buğday ve patatesin temel maddesi olan nişasta polimerdir, yün, ipek, pamuk, saç ve tırnağın temel yapıları da polimer malzemedir. Polimerler kendi aralarında 6 sınıfa ayırabilmek mümkündür.



Şekil 1. Polimerlerin sınıflandırılması

1.1.1. Elde Edilişlerine Göre Polimerler

Doğal Polimerler

Biyopolimer olarak da adlandırabileceğimiz doğal polimerler, kendiliğinden oluşmuş malzemelerdir. Biyopolimer örnekleri ile doğada, çevremizde veya insan bedeninde karşılaşmak mümkündür. Dünyada insan yaşamı başladığı andan itibaren doğal polimerlerden bahsedebiliriz. Ağaçlarda bulunan selülozun, vücudumuzdaki enzim ve DNA yapılarının, birer biyopolimer olduğunu söylemek mümkündür. Biyopolimerler endüstriyel yaşama uyarlandığında avantajları başlıca şu ifadeler ile özetlenebilir; geri dönüşümlerinin mümkündür, biyobozunur özelliklerinden dolayı insan sağlığı için sorun teşkil etmezler ve doğada çözünmeleri uzun yıllara dayanmamaktadır.

Biyopolimerler yenilenebilir kaynaklardan üretildikleri için biyolojik çözünme süreçleri vardır, çözünme sonrası doğaya karıştıkları düşünüldüğünde yenilenebilir kaynakların korunması açısından önemli birer unsurdurlar. Biyopolimerler sürdürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilirler (Thomason ve Vlug, 1996; Chang ve Lees, 1988). İyileştirilmiş malzeme performansı ile biyopolimerlerin biyomedikal, yapısal, elektrik ve diğer tüketici ürünlerinde kullanılması öngörülmektedir. Günden güne biyopolimerler ile yapılan çalışmalar arttığı gibi, sektörlerin biyopolimer kullanma oranları da artmaktadır.

Bu nedenle, biyobazlı ve biyobozunur polimerlere yönelik giderek artan talebi karşılamak için, yeni yeşil polimerik malzemeleri keşfetmeye yönelik çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Günümüz dünyasında en yaygın olarak bilinen biyoplastiklerden bazıları polilaktik asit (PLA), polihidroksibutirat (PHB), soya bazlı plastikler, selüloz polyesterler, nişasta bazlı biyoplastikler, bitkisel yağdan türetilen biyoplastikler, PTT (Poli (trimetilen tereftalat)), BiyoPE (biyopolietilen) vb. dünyadaki birçok bilim insanı ve mühendisi büyük ölçüde ilgilendiriyor ve araştırmalar devam etmektedir (Chang ve Lees, 1988; Malnati, 2007; Yılmaz ve Cansever, 2002).

Sentetik Polimerler

Sentetik polimerler, yapay olarak insanlar tarafından üretilen polimerlerdir. Ticari endüstride genellikle plastik veya kauçuk olarak isimlendirilirler (Berry, 2021). Sentetik polimerler veya yaygın kullanılan ismine göre plastiklerin seri üretimi yaklaşık olarak 70 yıla dayanmaktadır. 70 yıllık geçmişe rağmen kullanım alanları hızla arttı ve üretiminde çığır açıldı. Şimdiye kadar üretilmiş olan polimerlerin %95'ini sentetik polimerler oluşturmaktadır. Üretilen 7 milyar ton plastik atığın ise güncel durumları hakkında tahmini bilgiler bulunmaktadır; %10'u geri dönüştürülmüş, % 14'ü yakılmış ve geriye kalan % 76'lık büyük bir kısmı çöplüklerde ve yaşam alanımız olan doğada bulunmaktadır (Roland, 2020).

1.1.2. Yapılarına Göre Polimerler

Homopolimerler

Aynı monomer yapıların bir araya gelerek oluşturduğu polimerler homopolimerler olarak adlandırılır. Tek çeşit monomerlerin kimyasal bağlarla bağlanarak tekrarlanması ile oluşur. Örneğin etilen grubunun tekrarlanarak oluşturduğu polimere polietilen(PE) adı verilir. Tekstil, inşaat, kozmetik gibi birçok alanda kullanılan PE, ekonomik, hafif ve kolay şekillendirilebilme özelliğinden ötürü çeşitli sektörlerde kullanılır.

Kopolimerler

Birbirinden farklı monomer gruplarının oluşturduğu polimerlere ise kopolimer ismi verilir. Polimeri oluşturan monomerler birbirinden farklıdır.

1.1.3. Bağ Yapılarına Göre Polimerler

Doğrusal (Lineer) Polimerler

Monomer yapılarının dallanma olmaksızın lineer bir şekilde bağlanarak oluşturduğu polimerlerdir (Baysal, 1994). Lineer polimerler farklı ve uygun çözücüler ile çözündürülebilir, eritilebilir ve tekrar tekrar şekillendirilebilir.

Örneğin; yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) lineer bir yapıdan oluşmaktadır.

Dallanmış Polimerler

Dallanmış polimerde lineer polimerden farklı olarak; monomer yapılarının oluşturduğu ana zincire bağlanmış olan yan zincir grupları da bulunmaktadır.

Örneğin; düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek yoğunluklu polietilenin (HDPE) aksine kısa yan zincir gruplarını yapısında bulundurur.

Çapraz Bağlı Polimerler

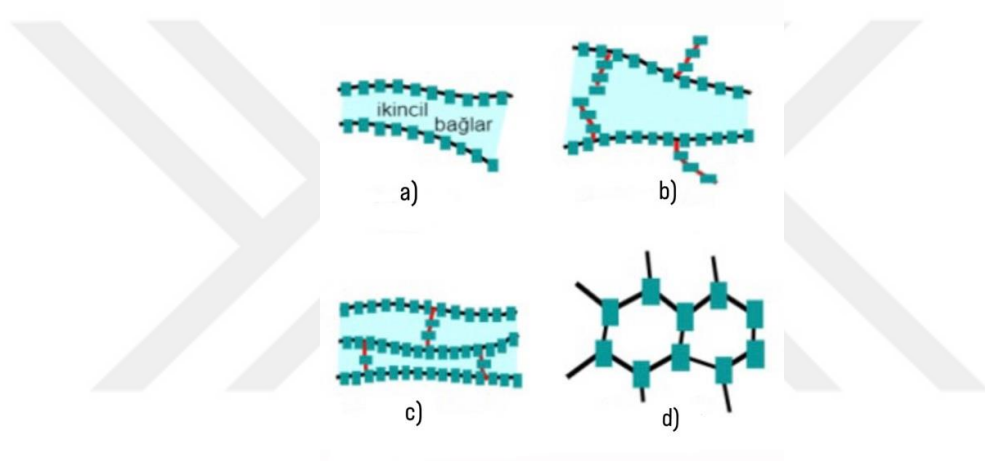
Ana monomer zincirinin yan bağlarla çapraz bağ yaparak oluşturduğu polimerlere çapraz bağlı polimerler adı verilir. Ana zincirlerin başla yapılarla çapraz bağlanması polimer yapısına üç boyutlu ağ yapısı kazandırır.

Örneğin; Vulkanize kauçuklar, vulkanizasyon işlemi sonrası çapraz bağlar oluştururlar.

Ağ Yapılı Polimerler

Monomer zincirlerinin üç boyutlu ağ yapısı oluşturacak şekilde kovalent bağlarla bağlanarak oluşturdukları polimer çeşididir. Bir başka deyişle yüksek miktarda çapraz bağlı yapı bulunduran polimerlere ağ yapılı polimerler denir. Ağ yapılarından dolayı bu gruptaki polimerlerin her birinin kendine özgü karakteristik özellikleri vardır.

Örneğin; epoksi, PU (poliüretan) gibi ağ yapısına sahip polimerlerin kendilerine özgü mekanik ve ısıl değerlere sahiptirler (Ankara Üniversitesi).



Şekil 2. Bağ yapılarına göre polimerlerin şematik gösterimi a) Lineer, b) Dallanmış, c) Çapraz Bağlı, d) Ağ Yapılı (Ankara Üniversitesi, 2023)

1.1.4. Sentez Yöntemlerine Göre Polimerler

Kondenzasyon Polimerleri

Kondenzasyon tepkimesi; farklı veya aynı birimlerin tepkimesi sonucunda nihai ürünün yanı sıra suyun da açığa çıktığı tepkime türüdür. Kondenzasyon polimerleri ise monomerlerin tepkimesi sonucunda oluşan polimerin yanı sıra suyun da açığa çıktığı polimer çeşididir.

Örneğin; Polietilen tereftalat (PET) kondenzasyon polimerlerinden en bilindik örnektir.

Zincir (Katılma) Polimerleri

Zincir polimerlerinin sentez reaksiyonları, bir çift bağın açılması ve monomer birimlerin birbirlerine çift veya üçlü bağlarla bağlanması ile gerçekleşir. Oluşan polimerin deneysel formülü yapıyı oluşturan monomer ile daima aynıdır.

Örneğin; PE (Polietilen) bir katılma polimeridir (Saçak, 2002).

1.1.5. Son Kullanım Yerlerine Göre Polimerler

Polimerleri kullanım yerlerine göre sınıflandırmak mümkündür.

Örneğin; plastikler, kauçuklar, fiberler, kaplamalar ve yapıştırıcılar polimerlerin kullanım alanlarını özetleyebildiği gibi, son kullanım yerine göre polimerleri adlandırılmasında yardımcı olmaktadır.

1.1.6. İşlenme Şekillerine veya Çözücülere Karşı Gösterdikleri Davranışlara Göre Polimerler

Monomerlerin birbirine bağlanmış oldukları kimyasal bağ çeşidine bakılarak polimerleri termoplastik ve termoset polimer olarak sınıflandırmak mümkündür.

Termoplastik Polimerler

Termoplastik polimerler, ısıtıldıklarında yapılarında büyük değişiklikler olmaksızın yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Yapılarında genellikle Wan der Waals bağları bulunur ve uzun zincir yapılarına sahiptir. Isı veya yüksek basınç uygulandığında eriyik yapılarda olabilirler ve istenilen kalıpta soğutularak şekillendirilebilirler. Tekrar tekrar kullanılabilme özelliği termoplastiklerin en önemli özelliğidir.

Örnek; PE, Nylon, PVC

Termoset Polimerler

Termoset polimerler şekillendirilme işlemlerinden sonra tekrar şekillendirilemeyen polimerlerdir. Polimerleşme esnasında oluşan çapraz bağlar sebebiyle polimer akma özelliğini kaybeder, tekrar şekillendirilemez dolayısıyla geri dönüşümleri mümkün değildir. Çok yüksek sıcaklıklarda ısıtılınca bozulan termoset polimerler, polimerleşme tamamlanmadan önceki aşamada 'reçine' olarak adlandırılırlar.

Örnek; PU, PI, PB (Ünal ve Kurt, 2011)

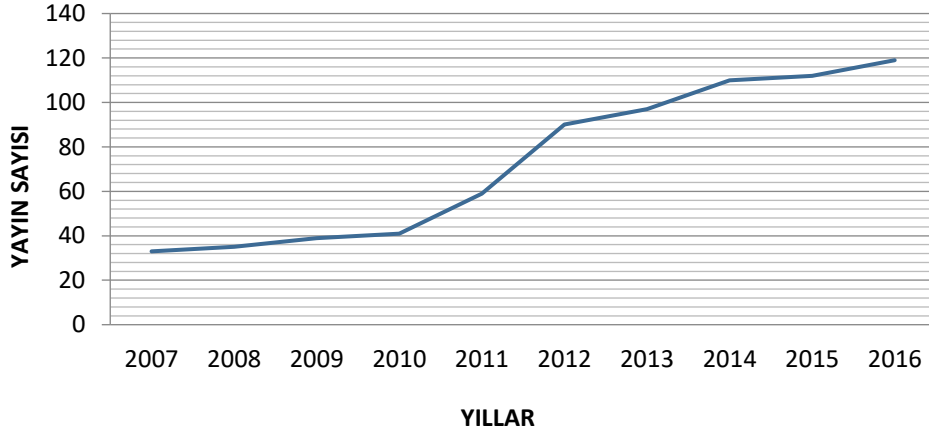
1.2. Polilaktik Asit (PLA)

Polilaktik Asit mısır nişastası veya şeker kamışından üretimi sağlanan, doğal, biyobozunur, alifatik bir polyesterdir. Günümüzde birçok sektörde yaygın olarak kullanılan ve sıklıkla karşılaştığımız PET, PVC gibi polimerlerin petrol bazlı olduğunu unutmamak gerekmektedir ve bu sentetik polimerlerin geri dönüşümünün mümkün olmadığı bilinmektedir. Çevre kirliliğini önlemek adına sentetik polimerlerin bir kısmı yakılmaktadır ve yakılmaları sonucunda ortaya çıkan CO₂ gazı sebebi ile küresel ısınmaya yol açmaktadır. Çevre kirliliği, iklim değişimi ve azalan petrol kaynakları sentetik polimerlere alternatif aranmasına yol açan en temel sebeplerdir (Pang vd., 2010). Son 20 yıldır artan biyopolimer çalışmalarında en çok kullanılan ve umut vaat eden biyopolimer ise PLA'dır. PLA'yı diğer biyopolimerlerden öne çıkaran başlıca özellikleri;

- Kolay şekillenebilirliği,
- Biyoyumluluğu sayesinde biyomalzeme alanında da kullanılabilme özelliği,
- Biyobozunur olması sayesinde geri dönüşüm sorununun bulunmaması,
- Düşük maliyetli olması

Yukarıdaki maddeler araştırmalarda bu kadar çok kullanılmasının başlıca avantajlarından. Ayrıca 1970 yılında PLA ve PLA bazlı üretilmiş ürünlerin biyolojik sıvılar ile direkt temasının uygunluğu ABD Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından onaylanmış ve kabul edilmiştir. Bunun sonucunda PLA'nın kullanılabilirlik alanlarına tıp ve biyomedikal alanlarını eklemiştir (Singhvi vd., 2019). Son yıllarda da biyopolimer

çalışmalarında sıkça adı geçen PLA'nın sentetik polimerlere alternatif olabileceği alanlar ve yapılan çalışmalar artmaktadır. Üretim çeşidinde farklı yollar arama, termal özelliklerinde iyileştirme ve farklı polimerler ile karıştırma gibi birçok araştırma alanı bulunmaktadır. Web of Science veritabanının paylaştığı verilere de bakıldığında PLA araştırma çalışmaları artarak devam etmektedir (Şekil 2) (Hamad ve Kotiba, 2018).



Şekil 3. Web of science'da 2007-2016 yılları arasında yayınlanan PLA çalışmaları (Hamad ve Kotiba, 2018).

Ticari olarak ulaşımı mümkün olan sınırlı sayıda biyopolimer vardır. Bunlardan en çok tercih edileni ise PLA'dır. 2019 yılından bu yana üretilmiş PLA miktarı 190.000 tondur. Endüstriyel olarak sentetik polimerlere alternatif olabileceği bazı sektörler keşfedilmiş ve yeni sektörlerin araştırma çalışmaları halen devam etmektedir (Ahsan, 2022). PLA üretiminde şu an lider konumunda bulunan şirket Amerika'da bulunan NatureWorks LLS'dir. PLA'nın ticarileştirilmiş ismi ise kaynaklarda Ingeo™ olarak geçmektedir. NatureWorks LLS'nin Nebraska'da bulunan PLA üretim tesisinin yıllık üretim kapasitesi 150.000 ton/yıllık olduğu bilinmektedir (Bressanin ve Marcon, 2022).

Mısır ve şeker kamışında bulunan laktik monomerlerinden oluşan PLA üretimi için ilk olarak laktik asit elde edilir. Laktik asit (LA), ticari olarak kullanılmak için ilk kez 1985'te Almaya'da bulunan Ingelheim Eczanesi'nde üretilmiştir (Berninga ve Harm, 1990). İlk aşamada şekerin fermantasyonu ile başlayan işlem, hidrolizi ile devam eder ve PLA üretimi için laktik asit monomeri elde edilmiş olunur (Li ve Ge, 2020).

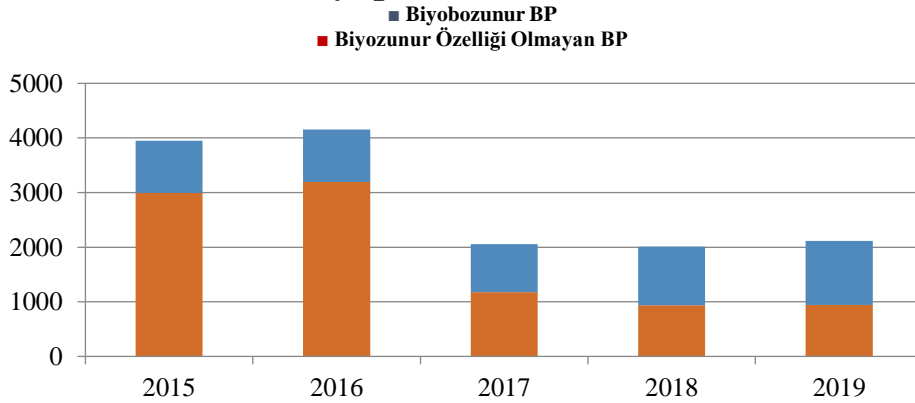
1.2.1. PLA'nın Biyobozunurluk Özelliği

Her biyobozunur polimer biyopolimerdir ancak her biyopolimer biyobozunur değildir. Hem biyopolimer hem de biyobozunur olan PLA'nın iki grubu da temsil etmesi, PLA'yı biyopolimer sınıfında lider konumuna koymaktadır.

Çevre kirliliğinin azaltılması için başlatılan biyopolimer çalışmalarında kullanılacak olan polimerin biyobozunur olması büyük bir avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda biyopolimerin bozunma süresi de malzeme seçiminde ana etken konumundadır. Elde edilen verilere göre 2015 yılında dünya genelinde üretilen biyobozunur olmayan biyopolimer oranı %64 iken biyobozunur polimerlerin üretim oranı ise % 36'dır.

İlerleyen yıllardaki oranlara bakıldığında ise biyobozunur polimerlerin üretim oranı gittikçe artmakta ve öncelikli olarak biyobozunur polimerlerin tercih edilmeye başlandığı sonucuna varılmaktadır (Şekil 2.2). Üretimi hızla artan biyopolimer pazarında öncelik biyobozunur polimerlere verilmeye başlanmıştır (Ncube ve Lindani, 2020).

2015-2019 Yıllarına Ait Biyozunur Özellikte Bulunmayan ve Biyozunur Olan Biyopolimer Miktarı



Şekil 4. Biyozunur olan ve olmayan biyopolimer miktarlarının 2015-2019 yılları arasındaki üretim oranları (Ncube ve Lindani, 2020)

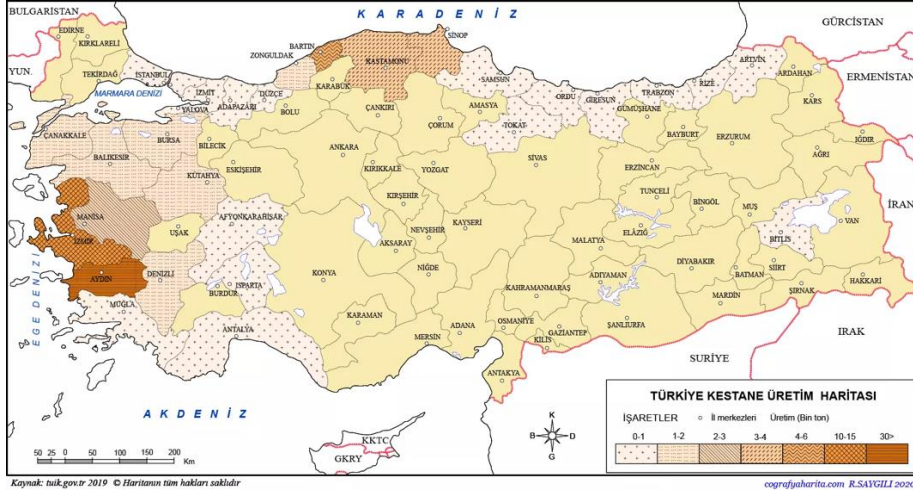
Çevre dostu olarak bilinen biyolojik olarak doğada çözünebilir PLA'nın çözünme süresi birkaç ay ile 2 yıl arasındadır. Doğada çözünmesi 500-1000 yıl sürdüğü bilinen petrol bazlı polimerlere kıyasla PLA'nın çözünme süresi biyolojik çözücüler kullanılarak 3 haftaya kadar düşürülebilmektedir. Bozunma süresinin iyileştirilebilirliğinden sonra PLA'nın, raf ömrü kısa olan yiyeceklerin paketlemelerinde kullanılabilirliği araştırılmaya başlandı. Paketlemede kullanılan ambalajların tek kullanımlık olmaları, sentetik polimerlerin çevre kirliliğinde çığır aşmasına neden olmuştur. Ancak gıda ambalajlarında dikkat edilmesi gereken faktörler oldukça fazladır; mikrop, su buharı, oksijen, ışık... Yapılan çalışmalar PLA'nın tek başına tüm bu özelliklere sahip olmadığını göstermiş olsa da , uygun katkı ve dolgu malzemeleriyle kullanımını mümkün kılmak için araştırmalar devam etmektedir (Bressanin ve Macron, 2022; Ncube ve Lindani, 2020).

1.2.2. PLA'nın İşlenebilirlik Özelliği

Petrol bazlı birçok polimer ile karşılaştırıldığında PLA'nın termal işlenebilirliğinin daha iyi olduğu bilinmektedir (Farah vd., 2016). PLA'nın termoplastik bir polimer olması, standart termoplastik üretim yöntemleri ile üretilebilmesine imkân sağlamakta ve ürün çeşitliliği sunmaktadır (Ermedyan vd., 2019). Ayrıca sahip olduğu işlenebilirlik özelliğinden ötürü dökme film, ekstrüzyon, lif çekme, şişirme gibi üretim yöntemleri ile üretilmesi onu birçok biyopolimerden üstün kılmaktadır. Bu üretim yöntemleri ile PLA şekillendirilebildiği gibi, literatürde en çok karşılaşılan PEG, PCL ve PHAs biyopolimerleri şekillendirilememektedir (Boyacıoğlu, 2017)

1.3. Kestane Meyvesi

Kestane, zengin bitki örtüsüne sahip olan ülkemizde yetişen çeşitli meyveden biridir. Toprak verimliliği göz önüne alındığında, Türkiye ve Kafkasya bölgelerinde bulunan ormanlarda kestane ağacına sıklıkla rastlanır. Fagaceae familyasına ait bir bitkidir. Kestanenin Türkiye'de yetişen türleri çeşitli kaynaklarda *Castanea Sativa* Mill olarak geçer (Taner vd., 2017).



Şekil 5. Türkiye’de yetişen kestane üretim haritası (TÜİK, 2023)

Yetiştığı coğrafyaya göre gövde uzunluğu ve yaprak şekli farklılık gösterir. Ülkemizdeki ormanlarda yetişen kestane ağaçlarının gövde uzunluğu 30 m – 35 m arasında değişir. Yeşil, dikenli sert bir kabuğun içerisinde yetişen kestane meyvesi, meşe ve kayın gibi ağaçlar ile de aynı ortamda yetişebilir. Gövdesinin sert ve dayanıklı olması, farklı iklim koşullarında yetişmesine imkân kılar (Taner vd., 2017).



Şekil 6. Kestane ağacı

Ülkemizde yetişen kestane ağaçları eylül ve ekim ayları arasında meyve verir. Olgunlaşmaya başlayan dikenli kestane yumaklarının ağzını açması ile kestanenin olgunlaşmaya başladığı anlaşılır. Aynı ağaçta yetişmiş olsalar dahi, her bir yumağın gelişim süresi farklılık gösterir. Dalın ağaca göre konumu, yumağın ışık aldığı konum ve süresi gibi

etkenlerden ötürü, yumaklar aynı anda olgunlaşmazlar. Yeterince olgunlaşan ve kestanesi hasat için hazır olan yumaklar, daldan ayrılarak yere düşerler. Kestane hasatı yere düşen dikenli yumakların toplanması ile gerçekleştirilir. Yere düşen yumakta bulunan kestanelerin neminin kaybolmaması için, daldan ayrıldıktan sonra 1 gün içerisinde toplanması idealdir (Taner vd., 2017).



Şekil 7. Kestane meyvesi ve yumağı (Çevre Bilinci Platformu, 2023)

1.3.1. Kestanenin Besin Değeri

Sert kabuğu ile meyvesi korunan kestane, diğer sert kabuklu meyveler gibi yüksek yağ oranına sahip değildir. Besin değerinde yüksek karbonhidrat içerir. Bir kestane ortalama olarak %40 - 45 oranlarında nem, %5 protein, %5 yağ ve yine % 40 - % 45 oranlarında karbonhidrat besin değerlerine sahiptir. İçeriği vitamin olarak da zengin olan kestane yüksek ölçüde, C ve A vitaminlerine sahiptir.

Yüksek nem oranı kestane için farklı tüketim koşullarına olanak sağlar. Suda haşlama, ateşte veya fırında közleme veya çiğ yenme olarak çeşitli şekilde tüketilir. Ülkemizin çeşitli bölgelerinde şeker ile tatlandırılarak, kestane şekeri olarak da tüketilir (Atasoy ve Altıngöz, 2011).



Şekil 8. Kestane şeker (Haber 365, 2023)

1.3.2. Kestane Ağacının Önemi

Ülkemizde birçok konumda doğal olarak ormanlarda yaygınlaşmış olan kestane ağacının, meyvesi dışında da kullanım alanları oldukça geniştir. Mobilya, kozmetik, gıda ve boya gibi birçok sektörde önemli bir konuma sahiptir. Yüksek nem oranı sayesinde su direnci bulunan kestane ağacı, mobilya ve tekne yapımında sıklıkla tercih edilir (Çıklaçiftci, 2023). Kolay işlenir ve farklı ortamlarda bozulmaya karşı dirençlidir. Yüksek dayanıklılık, boya tutuculuk özelliği sayesinde dekorasyon sektöründe de tercih edilir (3A Orman Ürünleri, 2023). Yakılması sonucunda yüksek enerji ortaya çıkmasından dolayı, yaygın olduğu Karadeniz bölgesinde fırın sektöründe yakıt olarak kullanılır. Yine Karadeniz bölgesinde kestane balı yetiştiriciliği ve ticareti oldukça yaygındır. Lifli yapısı ve içerisinde bulundurduğu mineraller kalp ve damar hastalıkları, kolesterolü düşürmede etkilidir. Sert kabuğu boya endüstrisinde kahverengi elde etmek için kullanılır (Çıklaçiftci, 2023).



Şekil 9. Kestane ağacından üretilmiş masa (3A Orman Ürünleri, 2023)

Gövdesi, yaprakları ve kabuğu dahil olmak üzere tüm bölümlerinden yararlanılan kestane ağaçları, özellikle ülkemizde önemli bir yere sahiptir. Kestane kültürel olarak da ülkemizle bağdaşmıştır ve ülkemiz ekonomisine, kültürel zenginliğine katkı sağlamaktadır. Kolay işlenmesi, ülkemizde geniş alanlarda yetişmesinden dolayı biyokompozit çalışmalarında da kullanılır (Çıklaçiftci, 2023).



Şekil 10. Kestane balı (Toros Dağı, 2023)

İKİNCİ BÖLÜM

KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

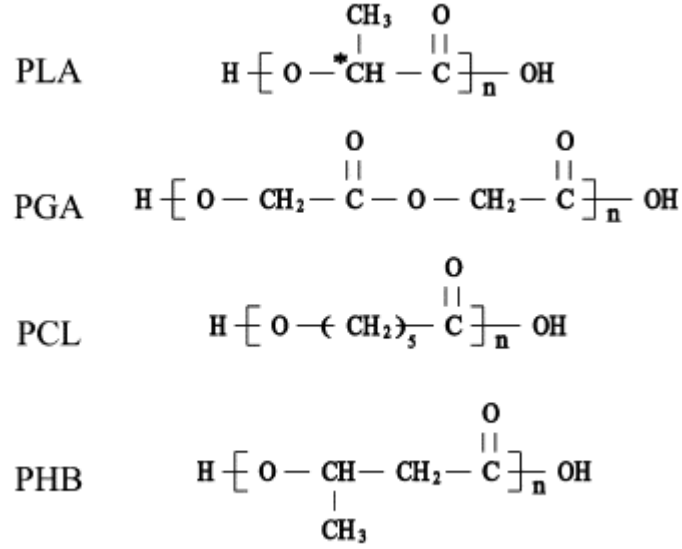
Polilaktik Asit (PLA) ve Poliglikolik Asit (PGA) gibi alifatik biyopolimerler birbirleri ile karıştırılabilir. Sentezlenecek olan bir biyopolimer veya biyokompozit karışımı için dolgu maddesi olarak da kullanılabilirler. Elde edilen karışımda bulunan bileşenler PLA, PGA gibi doğal bir polimer olduğunda biyolojik olarak parçalanabilirler ve çevre kirliliği için tehdit oluşturmazlar. Mikroorganizmalar tarafından doğal bir süreçle parçalanabilen bu biyopolimer grupları ile yapılan bilimsel çalışmalar son 20 yılda oldukça artmış ve biyopolimerler büyük önem kazanmıştır (Gümüş, 2016).

Yapılan akademik çalışmalarda en sık kullanılan biyopolimer PLA'dır. Ulaşımının kolay olması, kolay şekillendirilebilmesi, ekonomik olması ve bugüne dek yapılan çalışmalar sonucunda sentetik polimerlere birçok sektörde rakip olabileceğinin düşünülmesi PLA çalışmalarını her geçen gün arttırmaktadır. PLA ilk olarak Laktik Asit(LA) formu ile 1845 yılında Fransız kimyager Theophile – Jules Pelouze tarafından keşfedilmiştir. Keşfinden sonra yapılan çalışmalar PLA'nın molekül ağırlığını düşürmeyi hedeflemiştir. Du Pont firmasının kimyageri Wallace Hume Carothers PLA'nın molekül ağırlığını düşürmeyi başarmış ve PLA'nın ticarileştirilmesi yolundaki büyük adımı atmıştır (Yıldız, 2012). 140 yıl devam eden araştırma sürecinden sonra ilk defa 1986 yılında Lipinsky E. S. ve Sinclair R. G. PLA'yı plastik olarak adlandırmışlardır. Sentetik plastiklere rakip olabileceği konusundaki ilk fikri bulmuşlar ve potansiyeli keşfetmişlerdir. PLA'nın biyobozunurluğu keşfedildikten sonra yapılan çalışmalar ivme kazanmış ve PLA 2001 yılında ticarileştirilmiştir (Gümüş, 2016).

Biyobozunur polimerler sentetik polimerler ile karşılaştırıldığında ekonomik olarak dezavantajlı konumdadırlar. Bunun yanısıra biyobozunur polimerlerin iyileştirilmesi gereken çok fazla özellikleri bulunur. Bu sebeple birçok biyobozunur polimer araştırma ve geliştirme aşamasında olup, şu an için yalnızca literatür çalışmalarında kullanılırlar. PLA'nın yapısında bulunan L- ve D- izomerlerinin miktarı yapısal özelliklerini etkilemektedir. İşlenebilirlik, kristalizasyon ve bozunma davranışı bu izomerlerin yapıda buldukları miktara göre değişebilir. Bu çalışmada üretilen PLA'nın yapısında bulunan L-laktid miktarının yoğunluğunu, erime sıcaklığını ve camsı geçiş sıcaklığını etkilediği

keşfedilmiştir. Yapıda bulunan izomerlerin değişimi bulunduktan sonra PLA'ya Silikon Kauçuk (SR) eklenmiş ve ekstrüder ile karıştırılmış ve enjeksiyon cihazı ile kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Sibel Y.'nin 2012 yılında yapmış olduğu çalışmada PLA'nın düşük darbe dayanımını ve kırılma dayanımını iyileştirmek amacı ile SR takviye olarak kullanılmıştır. SR seçilmesinin nedenleri ise şöyle sıralanabilir; SR'nin biyouyumlu olması, kolay işlenebilir olması, yüksek elastikiyete sahip olması ve polimerlerin darbe dayanımını arttırmak için sıklıkla takviye malzemesi olarak kullanılıyor olması. Darbe dayanımı yüksek malzeme üretiminin amaçlandığı bu çalışmada, PLA ve SR 4 farklı oranda ekstrüderde karıştırılmış, enjeksiyonda kalıplanmışlardır. Kalıplanan numuneler ısıl, yapısal ve morfolojik analizleri yapılarak incelenmiştir. Ardından mekanik testleri yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre SR PLA'nın akışkanlığını arttırmıştır. DSC sonuçlarına göre, PLA + SR kompozitinde SR matris için çekirdeklenme ajanı olmuş ve soğuk kristalleşme başlangıç sıcaklığını düşürmüştür. Mekanik davranışlar yorumlandığında PLA'nın gevrek kırılma davranışı SR ilavesi ile sünek kırılma olarak dönüştürülmüştür. Karışımda bulunan SR'nin oranı arttıkça kopma dayanımındaki düşüşü engellemek hedeflenmiş; bir miktar düşüş gözlemlenmiş ancak tamamen engellenememiştir. Son olarak PLA'ya SR katkılı bir kompozit üretimi sonucunda darbe dayanımı önemli ölçüde arttırılmıştır. Asıl amaç olan darbe dayanımı yüksek kompozit üretimi gerçekleştirilmiş ve yapılan çalışma sonucunda hedefe ulaşılmıştır (Yıldız, 2012).

K.V. Vande ve P. Kiekens'in yapmış olduğu 'Biyopolimerler Uygulamalarındaki Çeşitli Özelliklere ve Sonuçlara Genel Bakış' isimli çalışma incelendiğinde; yapılan biyopolimer çalışmalarının temel amacında biyobozunur polimer araştırmalarının olduğu ve kompozit imalatında malzeme seçiminde daha çevresel duyarlılık oluşmasının hedeflendiği görülmektedir. Biyopolimerler verilerinin kısıtlı olması, son 10 yılda biyopolimer çalışmalarının sayısını oldukça arttırmıştır. Biyopolimer çalışmaları önemli literatür kaynağı konumuna ulaşmıştır. Biyobozunur polimerlerin çoğu iyi film oluşturma özelliğine sahiptirler, dolayısıyla yüksek performanslı ürünler için uygundur. Yapılan bu çalışmada biyobozunur olan PLA, PLA'nın farklı formları, PGA, PCL VE PHB kullanılmış, mekanik özellikleri incelenmiştir ve keten elyaf takviyeli bir kompozit için ideal biyobozunur polimer matris araştırılmıştır. 4 temel biyopolimerin yapısal formülleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 11. PLA, PGA, PCL, PHB biyopolimerlerinin yapısal formülleri (Velde vd., 2002)

Bu biyopolimerlerin mekanik özellikleri ASTM D882, ASTM D638 standartlarına göre test edilmiştir. Bulunan sonuçlara göre, en yüksek yoğunluğa sahip PGA polimerinin gerilme mukavemetinin en yüksek olduğu görülmüştür. En düşük yoğunluğa sahip olan PCL'nin ise en düşük gerilme mukavemetine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İncelenen makalede PHB ve kopolimerlerinin yoğunluklarının matris kullanımı için uygun olduğu ancak düşük camsı geçiş sıcaklığının üretimde sorun olabileceği sonucuna varılmıştır. Mekanik parametreler göz önüne alındığında L-PLA'nın optimum koşullar sağladığı ancak ekonomik olarak ulaşımının kolay olmaması tercih sırasına 2. Sıraya yerleştirildiği görülmüştür. PLA'nın ticari üretiminin bulunması ve daha kolay ulaşılabilir olması bu çalışma için en optimum biyopolimer olduğu sonucuna varılmıştır.

PGA erime noktasının ve yoğunluğunun yüksek olması, üretim koşullarını kısıtlandıracağından matris olarak kullanılması zordur. PCL'nin tercih edilmeme sebebi ise erime sıcaklığı, yüksek sıcaklıklara maruz kalabileceği ortamlar için uygun olmamasıdır (Velde vd., 2002).

PLA: Polilaktik asit veya polilaktit.

l-PLA: Poli- l -laktik asit veya poli- l -laktid .

PGA: Poliglikolik asit veya poliglikolit.

PCL: Poli-ε-kaprolakton.

PHB: Polihidroksibutirat.

A. Rubio-López vd. Yaptığı tamamen biyobozunur PLA ve keten üretimi, darbe mukavemeti ve kalıntı testi çalışmasında PLA/ keten laminantların kalınlığı parametre olarak belirlenmiş ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Laminant kalınlığına bağlı olarak darbe sonrası değişim, gözle zor görülebilen hasardan delik oluşumuna kadar görülmüştür. 20 mm çapındaki numuneye kıyasla, 12,7 mm çapı bunan numunenin basınç dayanımının daha yüksek olduğu bulgularına ulaşılmıştır. PLA/keten numunesinin çapının arttırılması ile, hasar alacak ve enerjinin emileceği alanın artması, basınç dayanımını düşürmüştür. Tamamen parçalanabilen PLA/Keten kompozitinin mekanik özellikleri geleneksel kompozitler ile karşılaştırılmış; PLA/Keten kompozitinin bazı özelliklerinin daha avantajlı olduğu görülmüştür. Darbe mukavemeti sonuçlarına bakıldığında, PLA/Keten biyobozunur kompozitlerinin endüstriyel uygulamalar için kullanılabileceği ama daha fazla çalışma yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Lopez, 2017).

A.K. Bledzki vd.'nin yapmış olduğu 'Sentetik Selüloz ve Abaka lifleri İçeren PLA Kompozitlerinin Mekanik Özellikleri' adlı çalışmada, PLA'nın katkı maddeleri ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada PLA / sentetik selüloz / abaka bitkisi kalıplanarak, kompozit üretimi yapılmıştır. Takviyesiz PLA ile % 30'u sentetik selüloz % 70'i PLA olan kompoziti karşılaştırıldığında, takviyeli PLA'nın Charpy darbe direncinin 3,60 kat arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmanın amacı, diğer biyopolimer çalışmaları gibi sentetik polimerlerin ekolojik zararlarını azaltmak ve biyopolimer kullanımını yaygınlaştırmaktır. Sentetik selülozun yanında çalışmada bir diğer araştırma grubu olarak PLA ve abaka lifleri ile kompozit üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çekme dayanımının en yükseğe ulaştığı grup biyokompozit grubu yani PLA+ Abaka lifidir. Takviyesiz PLA ile karşılaştırıldığında PLA + abaka lifinden oluşan biyokompozitin çekme mukavemetinde 1,2 kat arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Charpy darbe dirençleri karşılaştırıldığında en iyi sonuç sentetik selüloz + PLA kompozitinde elde edilmiştir (Bledzki vd., 2009).

Burak S.E.'nin 2021 yılında yaptığı çalışmada PLA filamentleri satın alınmış, FDM (Fused Deposition Modeling) tipli 3 boyutlu yazıcıda kalıplanmıştır. Kalıplanan numunelerin mekanik davranışları incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü, aşınma testi ve SEM görüntüsü sonuçları yorumlanmıştır. Yapılan çalışmada amaç 3 boyutlu yazıcı kullanımının yaygınlaştırılması ve imalat yönüne göre numunelerin mekanik davranışlarındaki değişimi kanıtlamaktır.

Numuneler, boyun paralel olduğu eksen, enin paralel olduğu eksen ve kalınlığın paralel olduğu eksen olarak 3 farklı şekilde üretilmiş ve adlandırılmıştır.

3 farklı yönde üretim sonucu elde edilen numunelerin boyut olarak eş oldukları ve birbirlerinin 90° döndürülmüş halleri oldukları ilk aşamada gözlemlenmiştir. 3 farklı yön X,Y ve Z yönleri olarak isimlendirilmiştir. Mekanik özellikleri için çekme, eğme ve basma testleri yapılmıştır. Numuneler cihaz tablasına 6 farklı yönde yerleştirilmek üzere, her test için 6 numune üretilmiş ve numuneler XYZ, YXZ, XZY, YZX, ZXY ve ZYX olarak adlandırılmıştır. Numunelerin üretim konumları aşağıdaki gibidir;

- XYZ: X' düzlemine paralel
- YXZ: Y düzlemine paralel
- XZY: X ve Z düzlemine paralel
- YZX: Y ve Z düzlemine paralel
- ZXY: Z ve X düzlemine paralel
- ZYX: Z ve Y düzlemine paralel

Elde edilen sonuçlara göre 3 boyutlu yazıcıda üretilen numunelerin konumu mekanik özellikleri etkilediği anlaşılmıştır. SEM görüntüleri de elde edilen sonuçları desteklemiştir. XZY ve YZX gibi dikey konumda üretilen numuneler maksimum aşınma gösterirken; XYZ ve YXZ gibi yüzeye yatay konumda üretilen numunelerde minimum aşınma ile karşılaşılmıştır. Ancak mekanik özelliklerde tam tersi sonuçlara ulaşılmıştır. Çekme dayanımı, elastite modülü, eğilme dayanımı ve eğilme modülü; XZY ve YZX gibi yüzeye dikey konumda üretilen numunelerde, yatay konumda üretilen numunelere göre çok daha yüksek çıkmıştır (Elmas, 2021).

PLA'nın kolay işlenebilirliği ve günümüzde ekonomik fiyatlara sahip olması en büyük avantajlarından biridir. Ancak düşük darbe direnci ve kırılabilirliği, sentetik polimerlere rakip olabilme konusunda dezavantajlarıdır. Yapılan çalışmalarda PLA'ya dolgu maddesi ekleyerek veya kompozit üretiminde kullanarak bu özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. PLA ve sentetik polimerlerin karıştırılarak kompozit üretimi yapıldığı çok sayıda çalışma vardır. Aynı zamanda PLA'nın en büyük avantajlarından biri olan biyobozunur özelliğini korumak adına biyomalzemeler ile karıştırılarak biyokompozit üretimi yapılan çalışmalar da vardır. Bu çalışmada M. Bijirami vd. PLA'nın biyobozunur özelliğini korumak adına PLA'ya yumurta kabuğu ekleyerek biyokompozit üretmişlerdir. Yumurta kabuğunun özellikle hayvancılığın yaygın olduğu ülkelerde atık sorununa yol açar ve sonrasında herhangi bir işleme tabii tutulmaz.

Yumurta kabuğunun atık konumunda olması tercih edilmesinin ilk sebebidir. Ayrıca kimyasal yapısı ve yapısında CaCO_3 (Kalsiyum Karbonat) bulunması sayesinde de dolgu maddesi olarak tercih edilmiştir. Yapılan çalışmada PLA'nın karakterizasyonunu yapmak, atık olan yumurta kabuğunu değerlendirmek ve PLA'nın dolgu maddesi ile maliyetini düşürmek hedeflenmiştir. Çalışmada matris konumunda olan PLA'ya 5 farklı oranda yumurta kabuğu eklenmiştir. %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında yumurta kabuğu ilave edilmiştir. Elde edilen numuneler, mekanik, termal ve kimyasal olarak test edilmiştir. Mekanik özellikler incelendiğinde en yüksek darbe dayanımı %60 PLA + %40 yumurta kabuğu oranlarındaki biyokompozitte görülmüştür. %40 yumurta kabuğu oranındaki numuneye kadar çekme mukavemetinde artış gözlemlenmiş ancak %50 oranında yumurta kabuğu bulunan numunede, artan dolgu miktarının matris – takviye arasındaki bağı zayıflattığından dolayı çekme mukavemetinde düşüşe rastlanmıştır. %60 PLA + %40 yumurta kabuğu biyokompozitinin çekme mukavemeti 5.42 MPa iken %50 PLA + %50 yumurta kabuğu bileşenlerine sahip biyokompozitin çekme mukavemeti 5.37 MPa olarak ölçülmüştür. Termal özellikleri TGA termogramında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, yumurta kabuğunun eklenme oranı arttıkça ısıl dayanımının da aynı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen 5 farklı numunenin kimyasal özellikleri ise FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)'de kimyasal yapıları incelenmiştir. FTIR'dan elde edilen spektrumlar PLA'nın kendi spektrumu ile aynı çıkmış ve kimyasal bir değişim olmadığı karışımın fiziksel boyutta kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile yüzeyleri incelenerek morfolojik karakterizasyon yapılmıştır. Elde

edilen SEM görüntüleri yorumlandığında PLA ve yumurta kabuğu parçaları numune yüzeyine ne kadar eşit oranlarda yayılırsa, o kadar pürüzsüz bir yüzey elde edildiği görülmüştür (Bijarimi, 2023).

M. Bhayana vd. Yapmış olduğu çalışmada PLA'nın düşük darbe direncini iyileştirmek için ahşap kullanılmıştır. Çevre dostu olması, sağlam yapısı ve mobilya sektöründe kullanıldığından dolayı biyokompozit üretimi için ahşap tozları tercih edilmiştir. PLA ve ahşap tozlarının karışımı ile filament üretimi gerçekleştirilmiştir. Numuneler hazırlanan filament kullanılarak FDM 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Yapılan çalışmada ekstrüzyon ve kalıplama gibi geleneksel üretim yöntemleri kullanılmamıştır. Amaç teknolojik gelişmelerden faydalanarak yeni üretim yöntemlerini denemek ve üretilen biyokompozitlerin karakterizasyonunu yapmaktır. 3 boyutlu yazıcı ile numune üretimi için dikkat edilmesi gereken birçok parametre vardır.

Bu parametreler;

- Baskı hızı,
- Filament besleme hızı,
- Numunenin bağlı olduğu yüzeyin ve ortamın sıcaklığı,
- Numunenin üretim yönü,
- Dolgu yüzdesi,
- Tabaka kalınlığı,
- Üretim yüzeyinin geometrisi,
- Hava Boşluğu ve ortamın maruz kaldığı O₂ miktarı

Yapılan çalışmada optimum parametreler sağlanarak PLA'ya %15 ve %25 ahşap tozu ilave ederek 2 farklı numune elde edilmiştir. İlk olarak PLA filamentini 3 boyutlu yazıcıda kalıplanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda 3 boyutlu yazıcı ile üretilen PLA'nın mekanik özelliklerinin, geleneksel yöntemler ile üretilen PLA'dan düşük çıkmıştır. 3 boyutlu yazıcı ile üretimi yapılan biyokompozit numunelerinde ahşap yüzdesi arttıkça mekanik mukavemetinin de düşüş gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Mekanik davranışlarda düşüş görülmesinin sebebi PLA ve ahşap tozunun erime sıcaklığının farklı olması ve homojen olarak karıştırılamama olarak yorumlanmıştır. 3 boyutlu yazıcı ile kalıplanan saf PLA ve PLA + ahşap tozu biyokompozitlerinin yüzeyleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Saf

PLA'nın yüzeyi pürüzsüz ve boşluksuz yapısının varlığı gözlemlenmiştir. PLA + ahşap tozu biyokompozitinin ise, kümeler halinde bulunan ahşap tozları, gözenek ve pürüzler görülmüştür (Bhayana, 2023).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA MATERYALLERİ VE YÖNTEM

3.1. Araştırma Materyalleri

Yapılan tez çalışmasında mısır nişastasından üretilmiş Filameon marka PLA kullanılmıştır. PLA granül formunda Riiz Makine Arge Proje Dan. Ve İnş. San. Ve Tic. Ltd. Şti. adlı işletmeden tedarik edilmiştir. Tercih edilen PLA opak renkte, enjeksiyon ile üretime uygun olarak seçilmiştir. Kestane kabuğu için Bartın ilinde yetişen, 2022 Eylül tarihinde kurutularak dondurucuda bekletilen kestane kullanılmıştır. Kullanılan ürünlerin görselleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



Şekil 12. Granül formundaki filameon marka PLA



Şekil 13. Kurutulmuş ve dondurucudan çıkarılmış bartın ilinde yetişen kestane



Şekil 14. Çalışmada kullanılan kestane kabukları

3.2. Yöntem

Çalışma toplamda 4 adımda gerçekleştirilmiştir. Saf PLA'nın enjeksiyon ile kalıplanması, mekanik testlerinin yapılması, PLA + kestane kabuğu biyokompozitinin üretimi, biyokompozitin mekanik testlerinin yapılması. Yapılan çalışmanın aşamalarını özetleyen tablo Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1

Çalışmanın temel aşamaları

1. KISIM	Saf PLA'nın Enjeksiyon Cihazı İle Kalıplanması
	Üretilen Numunelerin Çekme ve 3 Nokta Eğme Testlerinin Yapılması
2. KISIM	PLA + Kestane Kabuklarının Öğütülmesi
	Ürünlerin Etüvde Nemlerinin Alınması
	Hassas Terazide Tartılarak Karışımın Hazırlanması
	Estrüder ile Profil Üretimi
	Numunelerin Enjeksiyon İle Kalıplanması
	Biyokompozit Numunelerinin Çekme ve 3 Nokta Eğme Testlerinin Yapılması

Saf PLA numunelerinin mekanik değerlerini iyileştirmek için Kestane kabuğu takviyeli PLA biyokompozit numunelerinin üretimi yapılmıştır. Granül PLA ve kestane kabukları mekanik karıştırıcıda öğütülmüş ve aynı boyutlara getirilmiştir. Karışımın %75'i PLA, %25 kestane kabuğu olacak şekilde hazırlanmış ve karışım DENSİ marka hassas terazide tartılmıştır.

3.3. Numunelerin Üretimi

Çalışmamızda ilk olarak erime sıcaklığı 175 °C olan mısır nişastasından üretilmiş granül haldeki PLA kullanılmıştır.



Şekil 15. Granül PLA

3.3.1. Enjeksiyon Cihazı

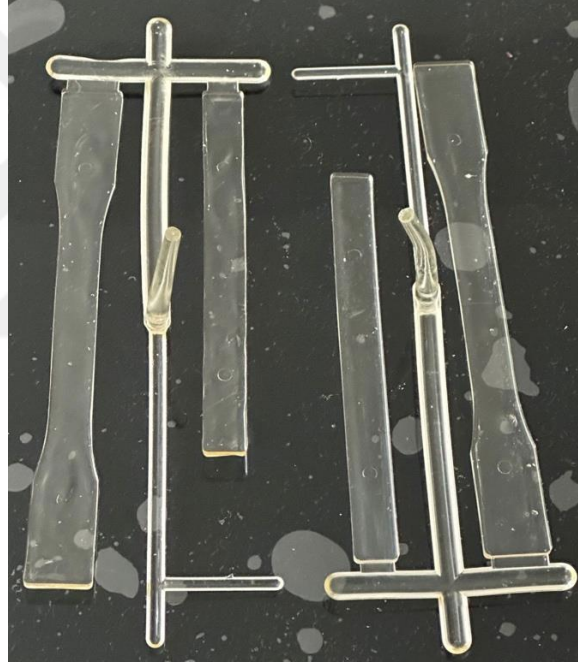
Granül haldeki polimer malzemelerin basınç ve sıcaklık ile eritilerek kalıplandığı cihazdır. Besleme bölgesinden granüller eklenir, erimiş hale getirilir. Erimiş sıvı formunda bulunan polimer malzeme kalıp kısmına aktararak şekillendirilir. Verilecek şekil kalıp değiştirilerek çeşitlendirilebilir. Plastik işleme yöntemlerinden en yaygın olarak kullanılan yöntem, enjeksiyon ile kalıplama yöntemidir. Çalışmamızda granül haldeki PLA ve kestane kabuğu takviyeli PLA kompoziti farklı enjeksiyon cihazları ile kalıplanmıştır. Saf PLA'nın kalıplanması için BOY marka 22A modeli laboratuvar tipli enjeksiyon cihazı kullanılmıştır (Şekil 16). Kestane kabuğu takviyeli PLA kompozitlerinin kalıplanması TORUN marka enjeksiyon cihazı ile yapılmıştır (Şekil 17).



Şekil 16. BOY Marka enjeksiyon cihazı



Şekil 17. TORUN marka enjeksiyon cihazı



Şekil 18. Enjeksiyon ile kalıplanmış test numuneleri

3.3.2. Etüv

Etüv, polimer malzemelerin üretim öncesi neminin alınması için kullanılan laboratuvar fırınıdır. Etüvler nemi alınacak malzemeye göre farklı sıcaklıklarda ayarlanabilir. Malzemenin neminin alınması, ısıtılması ve pişirilmesi gibi üretim öncesi hazırlık işlemi için kullanılır (Kurnaz, 2019). Kestane kabuklarının 2022 eylül döneminde dondurucuya konulmadan kurutulmasından dolayı, kabuklar öğütücü öncesi tekrar kurutulmamıştır.

Ekstrüzyon öncesi karışım 24 saat 105 °C'de INSTRON marka etüvde bekletilmiş (Şekil 3.6) ve nemleri alınmıştır.



Şekil 19. Etüv



Şekil 20. Öğütülmüş PLA + kestane kabukları

3.3.3. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon çubuk, boru, şerit ve profil yapıların üretiminin yapıldığı plastik şekillendirme yöntemidir. Basınç ve sıcaklık ile polimer malzemeler eritilir ve şekillendirme bölümüne ilerletilerek profil şeklinde malzemeler üretilir. Özellikle boru üretimi için en sık kullanılan üretim yöntemidir. Ekstrüzyon ile üretim yönteminde karmaşık ürünler de dahil olmak üzere, üretilen ürün çeşidi oldukça fazladır (Bayram, 2008). Çalışmamızda etüvde bekletilmiş ve nemleri alınmış PLA + kestane kabuğu karışımı ekstrüzyon (Şekil 21) ile profil olarak şekillendirildi ve suya daldırılarak soğutuldu. Üretilen profiller kesilerek granül hale getirildi. Kalıplanan numunelerin görselleri aşağıda gösterilmiştir.



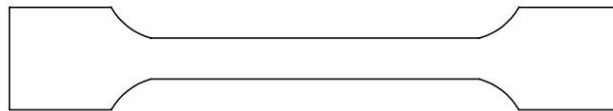
Şekil 21. Ekstrüzyon cihazı

3.4. Test Aşaması

Enjeksiyon cihazı ile kalıplanan numunelere çekme ve 3 nokta eğme testi yapılmıştır. Uygulanan testler sonucunda eğilme mukavemeti (MPa), eğilme modülü (MPa), çekme dayanımı (MPa) ve çekme modülü (MPa) bilgilerine ulaşılmıştır.

3.4.1. Çekme Cihazı

Metal, polimer, kauçuk, kumaş ve seramikler gibi birçok ürünün gerilme kuvveti etkisindeki davranışlarını ve dayanımını ölçmek için çekme testi uygulanır. Numuneye aksenal yönde kuvvet uygulayarak boyunun uzama miktarı ve kopma noktasında uygulanan kuvvet dikkate alınır. Böylelikle malzemenin dayanabileceği maksimum kuvvete ulaşılmış olur (Malzeme Bilimi.Net, 2023). Çekme testi yapılacak farklı malzemeler için belirlenen standartlar vardır. ASTM D3039, ASTM D638, ISO 527, ASTM D412, ASTM C297, ASTM E8 bu standartlardan bazılarıdır (İnnoma, 2023). Çalışmamızda numuneler ISO 527 standartına göre hazırlanmış (Şekil 22) ve test edilmiştir.



Şekil 22. Çekme testi için hazırlanan numunenin şematik gösterimi

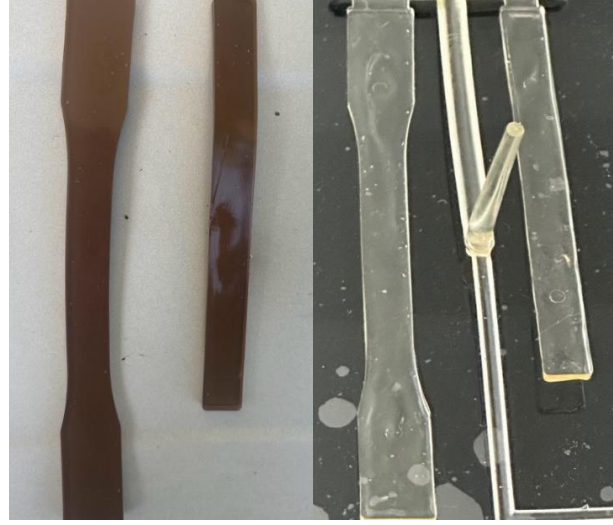
Kalıplanan Saf PLA numuneleri için SHIMADZU marka, kestane kabuğu takviyeli PLA biyokompozit numuneleri için ZWICK marka çekme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 23. SHIMADZU marka çekme cihazı



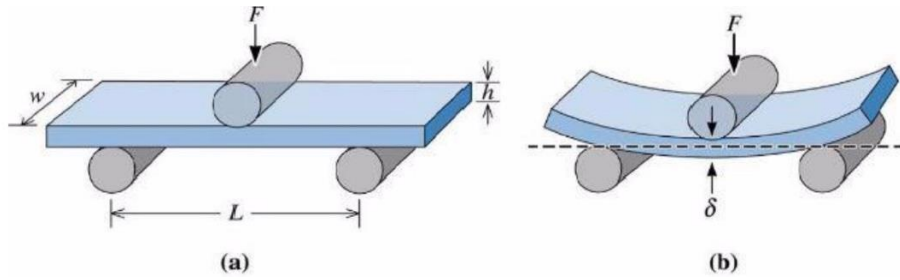
Şekil 24. ZWICK marka çekme cihazı



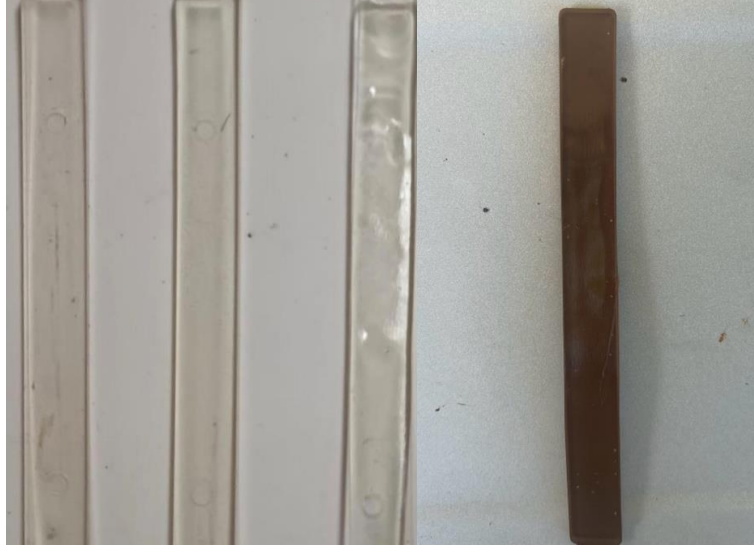
Şekil 25. Test numuneleri

3.4.2. 3 Nokta Eğme Testi

3 nokta eğme testi malzemenin mekanik değerlerini incelemek için yapılan testlerden biridir. 3 nokta eğme testi ile malzemenin eğilme mukavemetine ve eğilme modülüne ulaşılır (Öztürk, 2020). 3 nokta eğme testi için ASTM D790, ASTM D6272, ASTM D7264, ISO 178, ISO 14125, ASTM C1161, ASTM C393 standartları vardır (İnnoma, 2023). Çalışmamızda numuneler ISO 178 standartına göre üretilmiş ve test edilmiştir. Çekme testi için kullanılan cihazların aynısı 3 nokta eğme testi için de kullanılmıştır. Saf PLA için SHIMADZU marka, kestane kabuğu takviyeli PLA biyokompozit numuneleri için ZWICK marka çekme cihazı kullanılmıştır. Test yapılacak numune tabla üzerine yerleştirilir ve orta noktasından kuvvet uygulanır. Uygulanan kuvvet sonucundaki şekil değişimi dikkate alınarak eğme mukavemeti hesaplanır. Test esnasında numuneye farklı yönlerden kuvvet uygulandığından, numune hem basma hem de çekme gerilmesine maruz kalır (Öztürk, 2020). 3 nokta eğme testinin şematik gösterimi aşağıdaki gibidir (Şekil 26).



Şekil 26. 3 Nokta eğme testinin şematik gösterimi (Öztürk, 2020)



Şekil 27. 3 Nokta eğme testi numuneleri

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Çekme Testi Bulguları

Saf PLA ve kestane kabuğu takviyeli PLA biyokompozitine ait çekme testi değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 1 ve Tablo 2). Her grup için 6 numune üretilmiş ve sonuç ortalama değer kabul edilmiştir. Çekme testi sonucunda çekme dayanımı ve çekme modülü/elastite modülüne ulaşılmıştır. Her iki yönden kuvvet uygulanarak çekilen numuneye kopmadan önce uygulanan kuvvet çekme dayanımını verir. Elastite modülü, numunenin şekil değiştirmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Çekme deneyinde kullanılan cihazın modeline göre ulaşımı değişebilir. Bazı cihazlar test sırasında hesaplama yaparak elastite modülü değerini verirken bazı cihazlar elastite modülünü hesaplamak için gerekli verileri verir. Elastite modülü uygulanan kuvvetin birim şekil değişimine oranı ile bulunur (Aydemir, 2019).

Tablo 2

Saf PLA numunelerinin çekme testi sonuçları

Numune Adı	Numune Kalınlığı (mm)	Numune Genişliği (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Birim Şekil Değişimi (mm)	Çekme Modülü (Gpa)
Saf PLA 1	3.27	12.69	57.50	15.54	3.70
Saf PLA 2	3.2	12.67	57.40	25.98	2.21
Saf PLA 3	3.21	12.59	61.00	15.32	3.98
Saf PLA 4	3.22	12.64	59.90	24.95	2.40
Saf PLA 5	3.2	12.59	54.80	15.65	3.50
Saf PLA 6	3.22	12.64	60.60	18.36	3.30
Ortalama Değer			58.53	19.3	3.18



Şekil 28. Saf PLA Numunelerinin Çekme Testi Öncesi ve Sonrası Görüntüleri

Tablo 3

Biyokompozit numunelerinin çekme testi sonuçları

Numune Adı	Numune Kalınlığı (mm)	Numune Genişliği (mm)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Birim Şekil Değişimi (mm)	Çekme Modülü (Gpa)
%25 KK + %75					
PLA 1	3.2	12.55	186.42	14.86	12.54
%25 KK + %75					
PLA 2	3.3	12.62	192.5	15.26	12.61
%25 KK + %75					
PLA 3	3.0	12.59	182.2	15.20	11.98
%25 KK + %75					
PLA 4	3.18	12.69	198,70	15.68	12.67
%25 KK + %75					
PLA 5	3.21	12.65	179.5	14.94	12.01
%25 KK + %75					
PLA 6	3.23	12.67	187.93	14.7	12.78
Ortalama Değer			187.87	15.1	12.43



Şekil 29. Biyokompozit Numunelerinin Çekme Testi Öncesi ve Sonrası Görüntüleri

4.2. 3 Nokta Eğme Testi Bulguları

Tablo 3 ve Tablo 4’te saf PLA ve biyokompozit numunelerinin 3 nokta eğme testi sonuçları verilmiştir. Her bir grup için 6 numune kalıplanmış ve sonuç ortalama değer kabul edilmiştir. Tablolarda numuneye uygulanan maksimum kuvvet, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü değerleri verilmiştir. Numunenin şekil değişimi öncesi uygulanan kuvvet maksimum kuvvet olarak adlandırılır ve malzemenin tokluk ölçüsü olarak da adlandırılabilir. Numunenin kırılma öncesi kuvvete direnme miktarı da tokluk ve gevrekliği hakkında bilgi verir. Kopma öncesi malzemenin uygulanan kuvvete direnci yüksek ise malzeme sünek, düşük ise malzeme gevrek olabiliriz (Bursa Teknik Üniversitesi, 2016).

Tablo 4

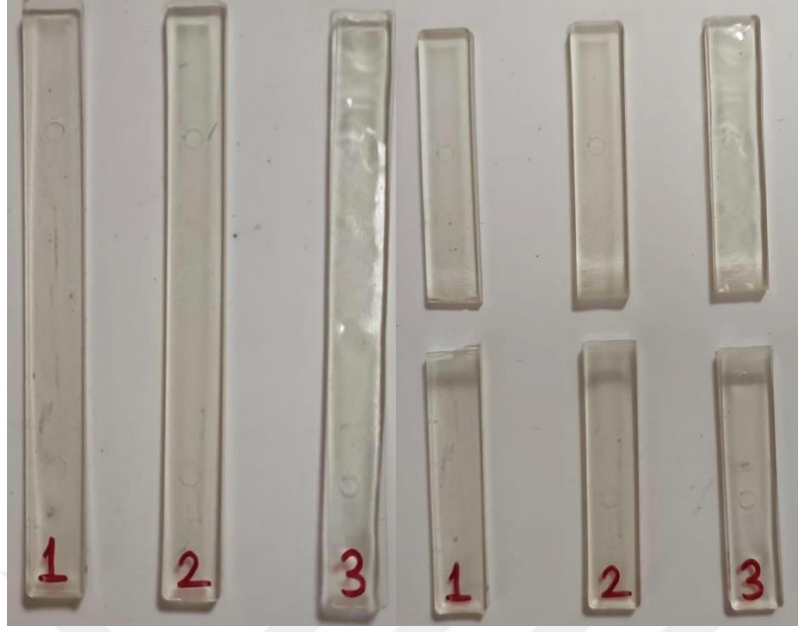
Saf PLA numunelerinin 3 nokta eğme testi sonuçları

Numune Adı	Numune Kalınlığı (mm)	Numune Genişliği (mm)	Maksimum Kuvvet (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Modülü (Mpa)
Saf PLA 1	3.19	12.33	163.50	246.28	462.03
Saf PLA 2	3.20	12.36	163.53	244.20	514.77
Saf PLA 3	3.17	12.23	152.19	234.05	454.84
Saf PLA 4	3.21	12.39	157.44	233.08	499.85
Saf PLA 5	3.17	12.33	154.19	235.20	521.28
Saf PLA 6	3.24	12.36	151.22	220.27	482.97
Ortalama Değer			157.01	235.51	489.3

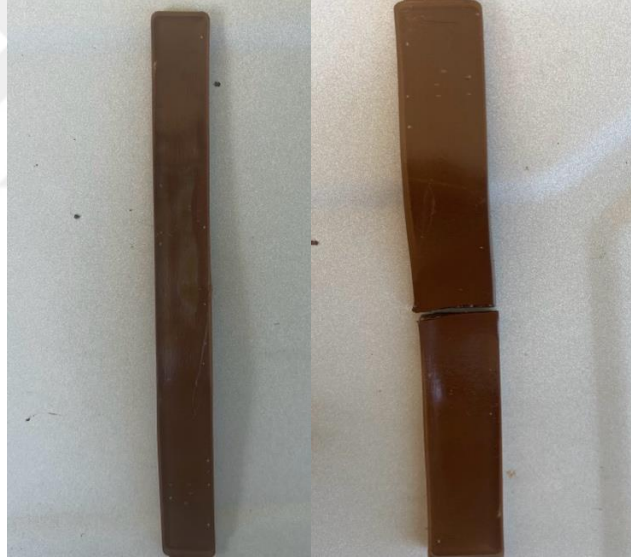
Tablo 5

Biyokompozit numunelerinin 3 nokta eğme testi sonuçları

Numune Adı	Numune Kalınlığı (mm)	Numune Genişliği (mm)	Maksimum Kuvvet (Mpa)	Eğilme Mukavemeti (Mpa)	Eğilme Modülü (Mpa)
%25 KK + %75					
PLA 1	3.12	12.25	320.19	803.47	1302,25
%25 KK + %75					
PLA 2	3.23	12.33	332.54	828.43	1286.38
%25 KK + %75					
PLA 3	3.15	12.27	328.17	825.36	1329.75
%25 KK + %75					
PLA 4	3.18	12.36	338.42	827.23	1244.56
%25 KK + %75					
PLA 5	3.14	12.37	345.8	834.20	1402.07
%25 KK + %75					
PLA 6	3.16	12.29	328.16	810.52	1272.24
Ortalama Değer			342.29	821.53	1306.20



Şekil 30. Saf PLA numunelerinin 3 nokta eğme testi öncesi ve sonrası görüntüleri



Şekil 31. Biyokompozit numunelerinin 3 nokta eğme testi öncesi ve sonrası görüntüleri

BEŞİNCİ BÖLÜM

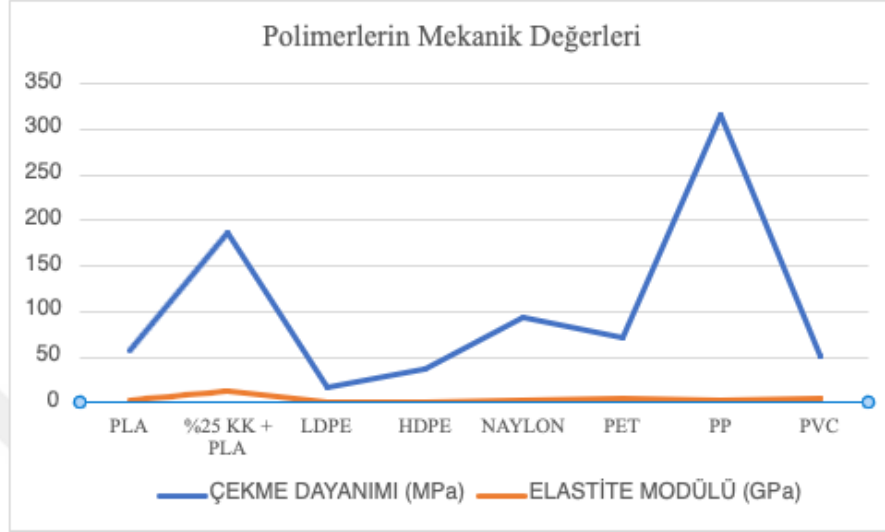
SONUÇ VE ÖNERİLER

Sürdürülebilirlik ve çevreyi koruma konusundaki acil ihtiyaçlar nedeniyle, doğaya kolayca karışabilen ve yenilenebilir malzemelerin geliştirilmesine yönelik sürekli artan bir ilgi vardır. Polilaktik asit (PLA) sahip olduğu birçok avantaj nedeniyle, mühendislik ve biyomedikal alanlarda kullanılmak üzere yüksek performanslı ve çevre dostu malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında saf PLA'nın ve kestane kabuğu takviyeli PLA biyokompozitlerinin mekanik davranışları incelenmiştir. Mekanik değerlere ulaşmak için çekme ve 3 nokta eğme testleri yapılmış ve sonucunda; Çekme dayanımı, çekme modülü (elastite modülü), eğme dayanımı, eğme modülü verilerine ulaşılmıştır.

- 1- İlk olarak saf PLA enjeksiyon ile kalıplanmış ve elde edilen sonuçlar saf PLA'nın düşük mekanik özellikler gösterdiğini ve endüstriyel sektörlerde sentetik polimerlere rakip olamayacağı sonucuna varılmıştır. PLA'nın mekanik özelliklerini iyileştirmek için biyobozunurluk özelliğini kaybetmeyecek şekilde doğal bir katkı maddesi araştırılmış ve kestane kabuğu kullanılmaya karar verilmiştir.
- 2- Kestane kabuğu takviyeli PLA biyokompozitinin de çekme ve 3 nokta eğme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kestane kabuğu PLA'nın mekanik dayanımını arttırmıştır.
- 3- Biyokompozit numunelerine uygulanan kuvvet arttırılmış ve buna rağmen numunenin şekil değiştirme miktarında azalma gözlemlenmiştir. % 25 kestane kabuğu takviyesi PLA'nın çekme dayanımını yaklaşık 3 kat, elastite modülünü yaklaşık 4 kat arttırmıştır.
- 4- 3 nokta eğme testi sonucunda elde edilen verilere göre, kestane takviyesi PLA'nın eğme mukavemetini yaklaşık 3.5 kat, eğilme modülünü ise yaklaşık 2.5 kat arttırmıştır.

- 5- Yapılan test esnasında malzemenin şekil değişimi gözlemlenmiş ve PLA'nın ve kestane takviyeli PLA kompozitinin yüksek şekil değiştirme miktarlarından dolayı sünek oldukları sonucuna varılmıştır.



Şekil 32. Polimerlerin mekanik değerlerinin karşılaştırılması

Değişmez kırılma, düşük nem emme kapasitesi ve daha az darbe dayanımı gibi bazı olumsuzlukları, mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygun katkı maddeleri veya takviyelerinden birinin eklenmesiyle yapılan bu çalışma, böyle önemli bir malzemenin geliştirilmesinde atık durumda olan kestane kabuğunun değerlendirilebileceğini göstermiştir. İklim ve çevre korumanın başlıca konularından biri olan geri dönüşüme de hizmet etmiştir. Malzemelerin ekonomik olarak ulaşılabilir olması ve ülkemizde kestane miktarının yüksek olması hem konunun sürdürülebilirliğini hem de ülke kaynaklarının endüstriyel hayatta iyi bir şekilde değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Bu tezin, nihayetinde endüstriyel uygulamalarını genişletecek ve yenilenebilir malzemelerin sürdürülebilir kullanımını teşvik edecek olan PLA' in üretim sürecini ve özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan araştırma çabalarını teşvik edeceği umulmaktadır.

KAYNAKÇA

- 3A Orman Ürünleri. (2023). "Kestane Ağacı Özellikleri". Erişim: 30 Mayıs 2023. <https://www.3aorman.com/blog/kestane-agaci-ozellikleri>
- Ankara Üniversitesi (2023). Açık Ders Malzemeleri. 'KMU 345 Yeni Malzemeler'. Erişim:15 Mayıs 2023. <http://acikders.ankara.edu.tr>
- Atasoy, E., ve Altıngöz, Y. (2011). "Dünya ve Türkiye'de kestanenin önemi ve üretimi." *Coğrafya Dergisi 1*, 22 (2), 1-13.
- Aydemir, B., Elmas, B.S., ve Ayan, E. (2019). "Çekme deneyinde elastisite modülü hesap yöntemleri ve hata kaynakları." *4th International Mediterranean Science And Engineering Congress*.
- Bayram, H. (2008). Ekstrüzyon Yönteminde Sıcaklık, Ekstrüzyon Hızı ve Sürtünme Parametrelerinin Profil Kalitesine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baysal B., (1994). *Polimer Kimyası*. (Genişletilmiş 2. Baskı), Orta Doğu Teknik Üniversitesi: Ankara.
- Benninga, H. (1990). "A history of lactic acid making: a chapter in the history of biotechnology". *Springer Science & Business Media*. Vol. 11.
- Berry, P. (2021). Doğal ve Sentetik Polimerler Arasındaki Fark, strephonsays.com.
- Bhayana, M., Singh, J., Sharma, A., and Gupta, M. (2023). "A review on optimized FDM 3D printed Wood/PLA bio composite material characteristics." *Materialstoday: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.029>
- Bijarimi, M., Syaidatul, A.A., Norazmi, M., Normaya, E., and Mat Desa, M.S.Z. (2023). "Sustainable green poly (lactic acid) (PLA)/eggshell powder (ESP) biocomposites." *Materialstoday: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.265>
- Bledzki, A. K., Jaszkiwicz, A., and Scherzer, D. (2009). "Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibres." *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. 40 (4), 404-412.

- Boyacıoğlu, S. (2017). Plastikleştirilmiş Poli (Laktik Asit) / Termoplastik Poliüretan Karışımlarının Mekanik, Termal Özellikleri ve Şekil Hafıza Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Kocaeli.
- Bressanin, J.M., Sampaio, I. L. M., Geraldo, V. C., Klein, B. C., Chagas, M.F., Bonomi, A., Filho, R.M., and Cavalett, O. (2022). "Techno-economic and environmental assessment of polylactic acid production integrated with the sugarcane value chain." *Sustainable Production and Consumption*, 34, 244-256, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.09.009>
- Bursa Teknik Üniversitesi (2016). Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 3 Nokta Eğme Deneyi Föyü. Bursa.
- Çevre Bilinci Platformu (2023). 'Kestane Ağacı Nasıl Yetiştirilir? Kestanenin Faydaları Nelerdir?'. Erişim: 30 Mayıs 2023. <http://www.cevrebilinci.com/kestanenin-faydalari-nelerdir-kestane-agaci-nasil-yetistirilir/>
- Çıklaçifci, H. (2023). Bartın yöresinde yetişen kestane meyve kabuklarındaki gallik asitin derin ötektik çözücülerle eldesi. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Doğa Dergisi. (2023). 'Kestane Ağacı Özellikleri ve Yetiştigi Yerler'. Erişim 30 Mayıs 2023. <https://www.dogadergisi.com/kestane-agaci-ozellikleri-ve-yetistigi-yerler/>
- Elmas, B. S. (2021). Üç boyutlu (3D) Yazıcıda Üretilen Polilaktik Asit (Pla) Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Ermeydan, M. A., ve Aykanat, O. (2019). "Pla/Boynuz biyokompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi." *Engineering Sciences* 14(4), 226-231.
- Farah, S., Anderson, D. G., and Langer, R. (2016). "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review." *Advanced drug delivery reviews* 107, 367-392.

- Geyer, R. (2020). "Production, use, and fate of synthetic polymers. Plastic waste and recycling". *Academic Press*, 13-32. Doi:10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5
- Gümüş, H. (2016). Polilaktik asit ve polihidroksibutirat biyopolimer nanokompozit karışımlarının hazırlanması ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Haber 365. (2023). 'Kestane Şekeri Nasıl Yapılır? Kolay Kestane Şekeri Tarifi'. Erişim: 30 Mayıs 2023. <https://www.haber365.com.tr/kestane-sekeri-nasil-yapilir-kolay-kestane-sekeri-tarifi-h234639>
- Hamad, K., Kaseem, M., Ayyoob, M., Joo, J., and Deri, F. (2018). "Polylactic acid blends: The future of green, light and tough." *Progress in Polymer Science* ,85, 83-127.
- İnnoma İnovatif Malzeme Teknolojileri San. Ve Tic. Ltd. 'Mekanik Testler'. (2023). Erişim:20 Haziran 2023 <http://www.innoma.com.tr/mekanik-testler/>
- Kurnaz, U. (2019). Çok Katlı Poliamid Kompozit Borunun Extrüzyon İle Üretiminde Alev Uygulamasının Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kurt, M. (2011). Yüksek Performanslı Endüstriyel Termoplastiklerin Yüksek Sıcaklıklardaki Tribolojik Davranışları. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Li G., Zhao M., Xu F., Yang B., Li X., Meng X., and Li Y. (2020). "Synthesis and biological application of polylactic acid". *Molecules*. " 25(21), 5023.
- Malnati, P. (2007). "Composite engine subframe a popular option on open-cockpit supercar." *High Performance Composites*, 15(4), 54.
- Malzeme Bilimi.Net. (2023). 'Çekme testi nedir? Neden uygulanır? Nasıl yapılır?'. Erişim: 19 Haziran 2023. <https://malzemebilimi.net/cekme-testi-nedir-neden-uygulanir-nasil-yapilir.html>

- Mehmood, A., Raina, N., Phakeenuya, V., Wonganu, B., and Cheenkachorn, K., (2023). "The current status and market trend of polylactic acid as biopolymer: Awareness and needs for sustainable development." *Materials Today: Proceedings*, 72(6), 3049-3055
- Ncube, L.K., Ude, A.U., Ogunmuyiwa, E.N., Zulkifli, R., and Beas, I.N. (2020). "Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials." *Materials*, 13(21), 4994.
- Okan, T., Köse, C., Aksoy, E. B., Köse, N., ve Wall, J. (2017). "Türkiye’de kestane (*castanea sativa* mill. ve kullanımını üzerine geleneksel terimler". *Avrasya Terim Dergisi*, 5(1), 19-27.
- Öztürk, B. (2020). 3 Boyutlu Yazıcı İle Üretilen Sandviç Yapıların Statik Ve Dinamik Yük Altında Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Pang X, Zhuang X, Tang Z, and Chen X. (2010). Polylactic acid (PLA): research, development and industrialization. *Biotechnol J*. Nov;5(11):1125-36. doi: 10.1002/biot.201000135. PMID: 21058315.
- Rubio-López, A., Guerrero, J. A., Sánchez, J. P., and Santiuste, C. (2017). "Compression after impact of flax/PLA biodegradable composites." *Polymer Testing* 59, 127-135.
- Saçak, M. (2002). *Polimer Kimyası*, Gazi Kitapevi: Ankara.
- Singhvi, M.S., Zinjarde, S.S., and Gokhale, D.V. (2019). "Polylactic acid: synthesis and biomedical applications". *J. Appl Microbiol*. Dec;127(6):1612-1626. doi: 10.1111/jam.14290. Epub 2019 Jun 17. PMID: 31021482.
- Thomas, S., Abraham, J., Manayan, P., A., Krishnan, A., Maria, H. J., Ilschner, B., and McCullough, R. L. (2016). "Composite materials Ullmann’s encyclopedia of industrial chemistry." *Wiley-VCH*.
- Thomason, J.L., and Vlug, M. A. (1996). *Comp. Part A: App. Sei. Manuf*, 27 (6), 477-484.

- Toros Dağı. (2023). 'Kestane Balı Bilinmeyen 10 Faydası'. Erişim: 30 Mayıs 2023.
<https://www.torosdagibal.com/blog/icerik/kestane-bali-bilinmeyen-10-faydasi>
- TÜİK Verileri. 'Türkiye Kestane Üretim Haritası'. Erişim: 30 Mayıs 2023.
<http://cografyaharita.com>
- Velde, V. K., and Kiekens. P. (2002). "Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications." *Polymer testing*, 21(4), 433-442.
- Yıldız, S. (2012). Poli (Laktik Asit)'İN Silikon Kauçuk ile Toklaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Yılmazer, U., ve Cansever, M. (2002). "Effects of processing conditions on the fiber length distribution and mechanical properties of glass fiber reinforced nylon-6," *Polymer Composites*, Vol. 23, 61-71.