

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNA VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

DOĞAL LİF TAKVİYELİ BİYOPOLİMER KOMPOZİT
ÜRETİMİ VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENES BAŞTUĞ

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNA VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI



DOĞAL LİF TAKVİYELİ BİYOPOLİMER KOMPOZİT
ÜRETİMİ VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENES BAŞTUĞ

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

**Bu tez çalışması BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNATÖRLÜĞÜ tarafından 2023FEBE003 nolu proje ile
desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

ENES BAŞTUĞ

.....

ÖZET

DOĞAL LİF TAKVİYELİ BİYOPOLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİ VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELEMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENES BAŞTUĞ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAKİNA VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. YAVUZ KAPLAN)

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Bu çalışmada, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir Polilaktik Asit (PLA) ile hazırlanan kompozit malzemeler, çeşitli doğal lifler eklenerek takviye edilmiştir. Lifler arasında kabak, keten, jut, kenevir, bambu ve ipek bulunmakta olup, bu liflerin PLA matrisine entegrasyonu, ısıtma işlemi ve soğuk pres teknikleriyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda, lif oranları ağırlık olarak %0,5, %1 ve %1,5 olarak ayarlanıp, kompozitler 1 saat 30 dakika süreyle 250°C’ de ısıtma işlemi görmüş ve sonrasında soğuk pres yöntemiyle form verilmiştir. Araştırmanın sonunda, kompozit numunelerin aşınma direnci ve yüzey özellikleri, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) yöntemi ile incelenmiştir.

Yapılan analizler, kompozit malzemelerin aşınma performansını içeriklerindeki doğal lif çeşitliliği ve oranlarına bağlı olarak önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kabak ve ipek lifleri, kompozitlerin aşınma performansını en yüksek düzeyde artıran lifler olarak öne çıkmıştır. Bambu lifi ile takviye edilmiş PLA kompozitlerinin aşınma direnci ve mukavemeti en iyi sonuçları vermiştir. Buna karşılık, jut lifi ile takviye edilen PLA kompozitlerinde, jut lifinin ısıya karşı dayanıklılığının düşük olması nedeniyle yüzeyde sıvanmalar ve yığılmalar gözlenmiş, bu da aşınma performansını azaltmasına yol açmıştır. Keten ve kenevir lifleri de iyi performans göstermiş, ancak kabak ve ipek kadar yüksek aşınma direnci özelliği sunmamıştır. Kenevir lifi ile takviye edilen PLA kompozitleri ise orta düzeyde performans sergilemiştir.

Sonuç olarak, kabak ve ipek lifleri, PLA matrisli kompozitlerde en yüksek aşınma performansı sağlayan lifler olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, doğal liflerin PLA matrisi içinde kullanılarak elde edilen kompozitlerin çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanım potansiyelini ortaya koymaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Polilaktik Asit, Doğal Lif Takviyesi, Polimer Kompozit, Aşınma

ABSTRACT

PRODUCTION OF NATURAL FIBER REINFORCED BIOPOLYMER COMPOSITE AND INVESTIGATION OF ITS WEAR PROPERTIES

**MSC THESIS
ENES BAŞTUĞ**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING
MECHANICAL AND MANUFACTURING ENGINEERING
(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. YAVUZ KAPLAN)**

DENİZLİ, AUGUST 2024

In this study, composite materials prepared with renewable and biodegradable Polylactic Acid (PLA) were reinforced by adding various natural fibers. The fibers included loofah, flax, jute, hemp, bamboo and silk, and the integration of these fibers into the PLA matrix was carried out by heat treatment and cold press techniques. In the studies, the fiber ratios were adjusted as 0.5%, 1% and 1.5% by weight, the composites were heat treated at 250°C for 1 hour and 30 minutes and then formed by cold press method. At the end of the study, the wear resistance and surface properties of the composite samples were examined by Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) method.

The analyzes performed showed that the wear performance of composite materials improved significantly depending on the variety and ratios of natural fibers in their content. According to the results obtained, pumpkin and silk fibers stood out as the fibers that increased the wear performance of the composites at the highest level. The wear resistance and strength of PLA composites reinforced with bamboo fiber gave the best results. On the other hand, in PLA composites reinforced with jute fiber, due to the low heat resistance of jute fiber, surface coating and accumulation were observed, which led to a decrease in wear performance. Flax and hemp fibers also showed good performance, but did not offer as high abrasion resistance as pumpkin and silk. PLA composites reinforced with hemp fiber showed moderate performance.

As a result, pumpkin and silk fibers were determined to be the fibers that provided the highest wear performance in PLA matrix composites. These findings reveal the potential of composites obtained by using natural fibers in PLA matrix in various industrial applications.

KEYWORDS: Polylactic Acid, Natural Fiber Reinforcement, Polymer Composite, Wear

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Araştırması	3
1.2 Literatür Özet	4
1.3 Tezin Amacı	5
2. KOMPOZİT MALZEMELER	7
2.1 Kompozit Malzeme	7
2.2 Kompozit Tarihçesi	7
2.2.1 Matris Yapıları Üretimi ve Çeşitleri	9
2.2.1.1 Matris	9
2.2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	11
2.2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)	13
2.2.1.4 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK).....	14
2.2.1.4.1 Termoset Malzemeler	18
2.2.1.4.2 Termoset Plastik Malzemeler	19
2.3 Biyopolimerler.....	20
2.3.1 Hayvansal Kökenli Biyopolimerler	21
2.3.1.1 Kullanım Alanları.....	22
2.3.1.2 Maliyetler	23
2.3.2 Mikrobiyal Biyopolimerler	23
2.3.2.1 Kullanım Alanları.....	24
2.3.2.2 Özellikler.....	25
2.3.2.3 Maliyetler	25
2.3.3 Bitkisel Kökenli Biyopolimerler.....	26
2.3.3.1 Polilaktik Asit (PLA)	28
2.4 Kompozit Malzemelerin Matris Türleri	31
2.4.1 Epoksi Matrisli Kompozitler	32
2.4.2 Polyester Matrisli Kompozitler.....	33
2.4.3 Vinilester Matrisli Kompozitler.....	34
2.4.4 Fenolik Reçine Matrisli Kompozitler	36
2.5 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	37
2.5.1 Enjeksiyon Yöntemi ile Kompozit Üretimi	37
2.5.2 Püskürtme Yöntemi ile Kompozit Üretimi.....	39
2.5.3 Hazır Kalıplama Yöntemi ile Kompozit Üretimi	41
2.5.4 Elyaf Sarma Yöntemi ile Kompozit Üretimi	42
2.5.5 Ekstrüzyon Yöntemi ile Kompozit Üretimi.....	44
2.5.6 Vakum Yöntemi ile Kompozit Üretimi	46
2.5.7 El Yatırma Yöntemi ile Kompozit Üretimi	47
2.5.8 Sol- Jel Yöntemi İle Kompozit Üretimi.....	49

2.6	Biyokompozitler	50
2.6.1	Takviye Malzemeleri	51
2.6.2	Matris Malzemeleri	52
2.6.3	Üretim Teknikleri	52
2.6.4	Avantajlar ve Uygulamalar	52
2.6.5	Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri	53
2.6.6	Yeşil Kompozitler	53
2.6.7	Doğal Lif Takviyeli Kompozitler	53
2.7	Doğal Lifler	56
2.7.1	İpek Lifi	62
2.7.2	Bambu Lifi	64
2.7.3	Keten Lifi	66
2.7.4	Kenevir Lifi	68
2.7.5	Jut Lifi	71
2.7.6	Kabak Lifi	72
2.8	Aşınma	74
2.8.1	Aşınma Çeşitleri	75
2.8.1.1	Adhesif Aşınma	75
2.8.1.2	Abrasif Aşınma	76
3.	MATERYAL VE YÖNTEM	77
3.1	Lif takviyeli PMK malzemelerin üretimi	77
3.1.1	PMK Üretim İçin Kalıp ve Test Numune Oluşturulması	81
3.1.2	Aşınma Testi	87
3.2	Sertlik Ölçümleri	90
3.2.1	Sertlik Testi	90
4.	BULGULAR	92
4.1	Sertlik Testi Sonuçları	92
4.2	Doğal Liflerin FESEM Görüntülerinin İncelenmesi	93
4.3	Aşınma Deney Sonuçları	96
4.4	FESEM Analizi	103
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	113
6.	KAYNAKLAR	116
7.	ÖZGEÇMİŞ	122

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Gindu 2020).....	8
Şekil 2.2: İnfografikte, metal matrisli kompozitlerin (MMK'ler) yapısı görselleştirilmiştir.....	12
Şekil 2.3 Polimerik matrislerin çekme dayanımları (Biron 2007).....	15
Şekil 2.4: Polimerik matrislerin kullanım sıcaklıkları (Biron 2007).....	17
Şekil 2.5: Biyopolimerlerin sınıflandırılması (Yoruç 2017).....	21
Şekil 2.6: 2018–2019 Yılları dünyadaki küresel biyoplastik üretim kapasitesi (World Biopolymers 2021)	27
Şekil 2.7: PLA'nın doğada döngüsünün şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.8: PLA'nın iki farklı optik izomeri	31
Şekil 2.9: Enjeksiyon ile kalıplama yöntemi şematik görüntüsü	39
Şekil 2.10: Elyaf püskürtme yöntemi şematize görüntüsü (Korkmaz 2014)	40
Şekil 2.11: Hazır kalıplama işlem basamakları (Carruthers 2018).	42
Şekil 2.12: Elyaf sarma yöntemi ile üretim şeması (Bayraktar 2016)	43
Şekil 2.13: Ekstrüzyon yöntemi ile üretimin şematik gösterimi(Saha P.K 2000)	45
Şekil 2.14: Vakum yönteminin şematik görüntüsü (Bayraktar 2016.).....	46
Şekil 2.15: El yatırma yöntemi şematik yöntemi	48
Şekil 2.16: Biyokompozitlerin ömür çevrimi (Vilaplana 2010)	51
Şekil 2.17: Doğal liflerin sınıflandırılması (Sparnins 2009).....	58
Şekil 2.18: Doğal lifin yapısal görünümü (Bhattacharyya 2015)	59
Şekil 2.19: Doğal lif ve sentetik lif arasındaki maliyet farkları	61
Şekil 2.20: İpek lifinin şematik gösterimini	63
Şekil 2.21: İpek kozaları ve SEM görüntüsü(Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergis 2019).....	64
Şekil 2.22: Bambu lifi mikro yapısı ve yetiştirme hali.....	65
Şekil 2.23: Keten lifinin şematik gösterimi (Bos 2006).....	67
Şekil 2.24: Kenevir lifi ve lif kullanımını vurgulaması	69
Şekil 2.25: Kenevir gitkisi görünümü	70
Şekil 2.26: Jut lifi ve bitkisi özgün görünümü	71
Şekil 2.27: Kabak (luffa) bitkisi ve lifi	73
Şekil 2.28: Adhesif aşınma (Varol 2016).....	75
Şekil 2.29: Abrasif aşınma (Varol 2016).	76
Şekil 3.1: Kloroform ile çözdürülmüş PLA	78
Şekil 3.2: İpek lifi.....	79
Şekil 3.3: Çeker ocağı	80
Şekil 3.4: Katı hale gelmiş polimer biyobozunur kompozit	81
Şekil 3.5: Cnc freze tezgâhı	82
Şekil 3.6: Aşınma testi numuneleri üretebilecek özel tasarlanmış kalıp.....	83
Şekil 3.7: Isıl İşlem tezgahı.....	84
Şekil 3.8: Manuel hidrolik pres.....	84
Şekil 3.9: Preslenmiş kompozit kalıbı.....	85
Şekil 3.10: Hidrolik pres	86
Şekil 3.11: Sulu zımpara Makinesi	86
Şekil 3.12: Hassas elektronik Tartı	87

Şekil 3.13: Aşırma test cihazı.....	88
Şekil 3.14: Aşırma test numuneleri	89
Şekil 3.15: Sertlik ölçüm test cihazı.....	91
Şekil 4.1: a) Jut lifi 250x büyütme, b) Jut lifi 1000x büyütme, c) Keten lifi 250x büyütme, d) Keten lifi 1000x büyütme e) İpek lifi 250x büyütme f) İpek lifi 1000x büyütme g) Bambu lifi 250x büyütme h) Bambu lifi 1000x büyütme, j) Kabak lifi 250x büyütme, k) Kabak lifi 1000x büyütme, m) Kenevir lifi 250x büyütme, n) Kenevir lifi 1000x büyütme Fesem Görüntüleri.....	95
Şekil 4.2: İki farklı yük altında hacim grafiği	95
Şekil 4.3: İki farklı yük altında spesifik aşırma oranı grafiği.....	97
Şekil 4.4: Kayma mesafesine göre sürtünme katsayı grafiği	101
Şekil 4.5: Pla + Jut lifi 500X Ve 1000x ait FESEM görüntüsü	103
Şekil 4.6: Pla + Keten lifi 500X Ve 1000X ait FESEM görüntüsü	105
Şekil 4.7: Pla + İpek lifi 500X FESEM görüntüsü	106
Şekil 4.8: Pla + Bambu lifi 500X Ve 1000X ait FESEM görüntüsü	108
Şekil 4.9: Pla + Kabak lifi 250X ve 1000X ait FESEM görüntüsü	109
Şekil 4.10: Pla + Kenevir lifi 250X ve 1000X ait FESEM görüntüsü.....	110
Şekil 4.11: Pla 500X ait FESEM görüntüsü.....	111

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: Plastik matrisli kompozitlerin bazı avantaj ve dezavantajları	16
Tablo 2.2: Bazı polimer matrislere ait mekanik özellikler (Koronis 2013), (McAdam 2020)	27
Tablo 2.3: Bazı termoset malzemelerin sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikleri (Demirel 2008; Yıldızhan 2008)	32
Tablo 2.4: Doğal lif takviyeli kompozitlerin olumlu ve olumsuz durumları (K. L.)Pickering 2016; Huda 2008)	55
Tablo 2.5: Doğal ve sentetik liflerin mekanik özellikleri (Syduzzaman 2020; Abbassi 2020).....	60
Tablo 4.1: Deney Numunelerini Sertlik Değerleri (Shore D)	92
Tablo 4.2: 20N ve 40N yük altında ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri.....	101

SEMBOL LİSTESİ

α	:	Alfa
β	:	Beta
FESEM	:	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
CNC	:	Bilgisayar Sayısal Kontrol
PLA	:	Polilaktik Asit
N	:	Newton Kuvvet Birimi
C	:	Karbon
Pd	:	Paladyum
Au	:	Altın
μs	:	Sürtünme Katsayısı
Fn	:	Normal Kuvvet
g	:	Gram
mm³	:	Milimetre Küp
HRC	:	Rockwell Derecelendirmesi
AISI	:	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
UV	:	Ultraviyole
CO₂	:	Karbondioksit
PE	:	Polietilen
PP	:	Polipropilen
PVC	:	Polivinil klorür
PS	:	Polyester
PHB	:	Polihidroksibütirat

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında bilgi, destek ve emeklerini esirgemeyen kıymetli tez danışmanım Doç. Dr. Yavuz KAPLAN' a, Dr. Öğretim Üyesi Volkan KAPLAN' a ve değerli meslektaşım Furkan UMUT' değerli yardımları ve destekleri için derin teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda, deneylerimi gerçekleştirdiğim Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nin personeline, sundukları katkı ve destekler için minnettarım. Ayrıca, tez çalışma sürecim boyunca her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, eşime sonsuz sevgi ve saygılarımı iletiyorum.

1. GİRİŞ

Polilaktik Asit (PLA), yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyobozunur ve biyouyumlu bir polimerdir. Mısır nişastası, şeker kamışı gibi tarımsal ürünlerden üretilen laktik asit monomerlerinin polimerizasyonu ile elde edilir. PLA, petrokimyasal bazlı plastiklere çevre dostu bir alternatif sunarak, özellikle ambalaj, tek kullanımlık ürünler, 3D baskı filamanı ve biyomedikal uygulamalar gibi alanlarda giderek daha fazla kullanılmaktadır.

PLA'nın gelişimi, 20. yüzyılın başlarına dayanmaktadır, ancak geniş çapta ticari üretimi ve kullanımı 1990'ların sonlarına kadar gerçekleşmemiştir. Çevresel sorunlara olan farkındalığın ve yenilenebilir kaynaklara dayalı ürün talebinin artmasıyla birlikte, PLA petrokimyasal bazlı plastiklere sürdürülebilir bir alternatif olarak ön plana çıkmıştır (Kronis 2013). Özellikle, NatureWorks LLC (daha önce Cargill Dow LLC olarak bilinir) gibi şirketler, PLA'nın ticari ölçekte üretimine öncülük ederek, bu malzemenin geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasını sağlamıştır.

PLA, belirli koşullar altında mikroorganizmalar tarafından metabolize edilebilir ve su ile karbondioksite dönüşebilir. Bu özellik, özellikle tek kullanımlık ürünlerin ve ambalaj materyallerinin çevresel etkisini azaltmada önemlidir. Ayrıca, insan vücudu ile uyumlu olduğundan, biyomedikal uygulamalar için ideal bir materyaldir. Dikiş iplikleri, implantlar ve ilaç salım sistemleri gibi alanlarda kullanılabilir.

PLA, petrokimyasal bazlı plastiklere kıyasla iyi mekanik özelliklere sahiptir. Mukavemet ve sertlik açısından polistiren ve polietilenle karşılaştırılabilir, ancak çeşitli katkı maddeleri veya kopolimerlerle modifiye edilerek özellikleri

iyileştirilebilir. Relatif olarak düşük erime noktası (yaklaşık 150°C- 160°C), düşük ısıda işlenmesini kolaylaştırırken, yüksek sıcaklıklarda şekil bozulmalarına neden olabilir (Huda 2008).

PLA, yenilenebilir kaynaklardan üretilir ve yaşam döngüsü boyunca daha düşük karbon ayak izine sahiptir. Ancak, biyobozunurluğu tam olarak gerçekleşebilmesi için endüstriyel kompostlama tesislerinde işlenmesi gerekmektedir. Bu özellikler, PLA'yı çevre dostu uygulamalar için cazip bir seçenek haline getirirken, bazı sınırlamaları da beraberinde getirir. Özellikle yüksek sıcaklık ve nem koşullarında performansının sınırlı olması, kullanım alanlarını belirli bir ölçüde kısıtlamaktadır. Ancak, devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları, PLA'nın özelliklerini iyileştirerek daha geniş bir uygulama alanında kullanılmasını amaçlamaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, PLA (Polilaktik Asit) malzemesinin performansını iyileştirmek üzerine odaklanmaktadır. Spesifik olarak, doğal lif takviyelerinin PLA matrisine eklenmesi yoluyla malzemenin aşınma direncinin artırılması aşınma ve sertlik değerlerinde olumlu sonuçlar elde etmeyi hedeflemektedir. Doğal lifler hem çevresel sürdürülebilirlik açısından hem de maliyet etkinliği bakımından çekici bir seçenek sunarlar. Bu lifler, Pla'nın aşınma özelliklerini iyileştirirken aynı zamanda biyobozunur karakterini koruyarak, malzemenin çevresel ayak izini daha da azaltmayı vaat etmektedir.

Araştırmanın odak noktası, çeşitli doğal liflerin (örneğin, bambu, keten, jüt) PLA' ya entegrasyonunun malzeme üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu entegrasyon, liflerin yüzey işlemleri, PLA ile uyumları ve optimal lif oranları gibi önemli parametreleri içermektedir. Lif takviyeli PLA kompozitlerinin aşınma direnci sertlik, standart test metodları kullanılarak değerlendirilecektir.

Sonuç olarak, bu araştırmanın amacı, doğal lif takviyeli PLA kompozitlerinin geliştirilmesi yoluyla, çevre dostu ve yüksek performanslı yeni malzemelerin üretimine katkıda bulunmaktır. Bu, hem endüstriyel uygulamalar için yeni malzeme çözümleri sunacak hem de PLA'nın kullanım alanlarını genişletecek bir yaklaşımdır.

1.1 Literatür Araştırması

Son yıllarda, plastiğin çevreye zararları, petrol kaynaklarının tükenme riski ve atık depolama sorunlarının artması nedeniyle çevre dostu polimer ve kompozitlerin endüstriyel kullanımı önem kazanmıştır. Küresel çevre sorunları, yeşil ve doğa dostu malzemelerin kullanılmasını teşvik eden önlemlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, biyobozunur malzemeler ve doğal lif takviyeli polimer kompozitler, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatifler olarak dikkat çekmektedir. Keten, kenevir, kabak, jut, ipek, bambu gibi doğal lifler, tamamen biyobozunur olmaları, yenilenebilir olmaları ve düşük karbon ayak izi nedeniyle sentetik liflere tercih edilmekte, düşük maliyetleri ve petrole olan bağımlılığı azaltma potansiyelleriyle ön plana çıkmaktadırlar.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, doğal liflerin temini maliyeti oldukça düşük olup, ton başına yaklaşık 200 dolar seviyesindedir. Buna karşın, cam ve karbon liflerin elde edilme maliyetleri sırasıyla ton başına 1200 ile 1800 dolar ve 12500 dolar arasında değişmektedir. Ayrıca, doğal liflerin üretimi için gereken enerji tüketimi de gözle görülür derecede azdır; yaklaşık olarak 4 Gigajoule (GJ). Bu rakam, cam lifler için ortalama 30 GJ iken, karbon lifler için enerji tüketimi 130 GJ'ye kadar çıkmaktadır. Bu veriler, doğal liflerin, özellikle enerji verimliliği ve maliyet etkinliği bakımından cam ve karbon liflerine kıyasla önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir (Huda 2008). Doğal lifler, temel olarak hayvansal, mineral ve bitkisel olmak üzere üç ana kaynaktan türetilir. Bitkisel kaynaklı lifler, özellikle dayanıklı kompozit malzemelerin üretiminde, polimer matrislere takviye elemanı olarak entegre edilir. Bu lifler arasında, keten, hint keneviri, rami ve kenevir gibi bast lifler; pamuk ve hindistancevizi gibi tohum bazlı lifler; sabır ağacı, ananas ve abaka gibi yaprak bazlı lifler; çeltik, mısır ve buğday gibi kamış bazlı lifler yer almaktadır. Hayvansal

kaynaklı lifler ise esas olarak protein içeriklidir ve bu nedenle mineral ve bitkisel kaynaklı liflere kıyasla daha düşük mukavemete sahiptirler. Her bir lif türü, özgün özellikleri ile belirli uygulama alanlarında tercih edilir, bu da onları çok yönlü ve değerli hammadde seçenekleri haline getirir (Mohammed 2015).

Biyopolimerler, çevresel dostlukları, düşük sera gazı emisyonları, doğada biyobozunabilirlikleri, sağlık riski taşımamaları ve atık sorunlarını minimize etmeleri sebebiyle petrol türevli polimerlere bir alternatif olarak tercih edilmektedirler. Ancak, bu biyopolimerlerin nem tutma kapasiteleri, ani sıcaklık değişikliklerine duyarlılıkları ve ultraviyole (UV) ışınlarına karşı düşük dayanıklılıkları, kullanım alanlarını sınırlayan faktörler arasında yer almaktadır.

Polilaktik asit (PLA) ise, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve petrol türevli polimerlere bir alternatif olarak yaygın olarak kullanılan termoplastik alifatik polyester tabanlı bir polimerdir. PLA, özellikle polipropilenin yerine sanayi ölçeğinde alternatif bir malzeme olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, biyobozunur olması nedeniyle son yıllarda biyomedikal, paketleme ve otomotiv sektörü gibi çeşitli alanlarda kullanımı artmıştır. PLA, çevresel bir zarara yol açmadan birçok petrol türevli polimerle rekabet edebilecek mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek dayanım, rijitlik, sertlik, düşük toksisite, şeffaflık, biyouyumluluk ve biyobozunurluk gibi üstün özellikleri, PLA'nın tercih edilmesinin başlıca nedenleridir. Ancak, PLA'nın doğal olarak kırılğan yapısı, tek başına ticari uygulamalarda kullanımını sınırlamaktadır. Bunun yanı sıra, PLA'nın petrol türevli polimerlere kıyasla hala daha yüksek maliyetli olması da bir diğer kısıtlayıcı faktördür (González ve Ausejo 2017; Wang 2019).

1.2 Literatür Özeti

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, hafif, dayanıklı, ekonomik ve kolay işlenebilen yeni malzemelerin araştırılması önem kazanmıştır. Artan dünya nüfusu, doğa ve insan sağlığına zarar vermeyen malzemelerin kullanımını zorunlu kılmıştır.

Polimerik malzemeler, hafiflik, kolay işlenebilirlik, kimyasal ve atmosferik koşullara dayanıklılık gibi avantajlarıyla birçok sektörde geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak, petrol kökenli polimerlerin çevresel etkileri, son yıllarda bu malzemelerin biyobozunur alternatiflerine yönelik araştırmaların hız kazanmasına neden olmuştur.

Bu çalışmalarda, biyobozunur polimerlerin kullanımının genişletilmesi özellikle vurgulanmaktadır. Bu malzemeler, çevresel zararları azaltma potansiyeliyle öne çıkmakta ve polimerik malzemelerin avantajlarını korurken ekolojik ayak izlerini minimize etme fırsatı sunmaktadır. Bu yaklaşım, sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak, çevre dostu malzeme çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, artan çevresel sorunlar ve sürdürülebilirlik ihtiyaçları ışığında, yenilikçi ve çevre dostu malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmaktır. Günümüzde, petrokimyasal bazlı plastiklerin çevresel zararları, doğal kaynakların tükenme riski ve artan atık yönetim sorunları, yeşil ve sürdürülebilir alternatiflerin araştırılmasını zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, biyopolimerler ve doğal liflerle güçlendirilmiş kompozit malzemeler, hem endüstriyel uygulamalar için yenilikçi çözümler sunmakta hem de çevresel ayak izini azaltma potansiyeline sahiptir. Doğal liflerin, tamamen biyobozunur olmaları, yenilenebilir kaynaklardan elde edilmeleri ve karbon salınımının düşük olması gibi avantajları, onları petrokimyasal bazlı sentetik liflerin yerine geçen çekici bir alternatif yapmaktadır.

Bu çalışmada, özellikle polilaktik asit (PLA) gibi biyobozunur polimerlerin, doğal liflerle takviyesinin potansiyel yararları incelenecektir. PLA, yenilenebilir kaynaklardan üretilen ve biyobozunurluğu ile öne çıkan bir malzeme olup, doğal liflerle takviye edilerek aşınma ve sertlik özellikleri, aşınma direnci ve işlenebilirliği gibi kritik performans parametreleri iyileştirilebilir. Malzemenin uygulama alanlarını genişleterek, otomotivden inşaat, tekstilden tıpa kadar birçok sektörde petrokimyasal bazlı malzemelere çevre dostu bir alternatif sunabilir.

Son olarak, tez kapsamında yapılan çalışmalar, biyobozunur polimerler ve doğal liflerin takviyesi ile üretilen kompozit malzemelerin, aşınma direnci istenen çeşitli endüstriyel uygulamalarda nasıl bir performans sergilediğinin ve sürdürülebilirlik açısından ne gibi avantajlar sağlayabileceğinin derinlemesine analizini içerecektir. Araştırmanın sonucunda elde edilecek bulgular, sürdürülebilir malzeme geliştirme alanında önemli bir referans kaynağı oluşturmayı ve bu yeni nesil malzemelerin ticari uygulamalara entegrasyonunu teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım hem çevresel sorumluluğu hem de malzeme biliminde inovasyonu ön plana çıkararak, gelecekteki malzeme geliştirme çalışmaları için sağlam bir temel oluşturacaktır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzeme

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan ve bu bileşenlerin kendi başlarına sahip olduklarından farklı özellikler gösteren malzemelerdir. Bu malzemeler, genellikle bir matris (bağlayıcı) ve bir takviye malzemesinden oluşur. Matris, takviye malzemesini bir arada tutar ve dış etkilere karşı korurken; takviye malzemesi, kompozitin mekanik dayanımını, sertliğini ve diğer fiziksel özelliklerini artırır. Kompozit malzemelerin tasarım ve üretimindeki esneklik, onları birçok farklı uygulama için ideal hale getirir (Özkan 2016).

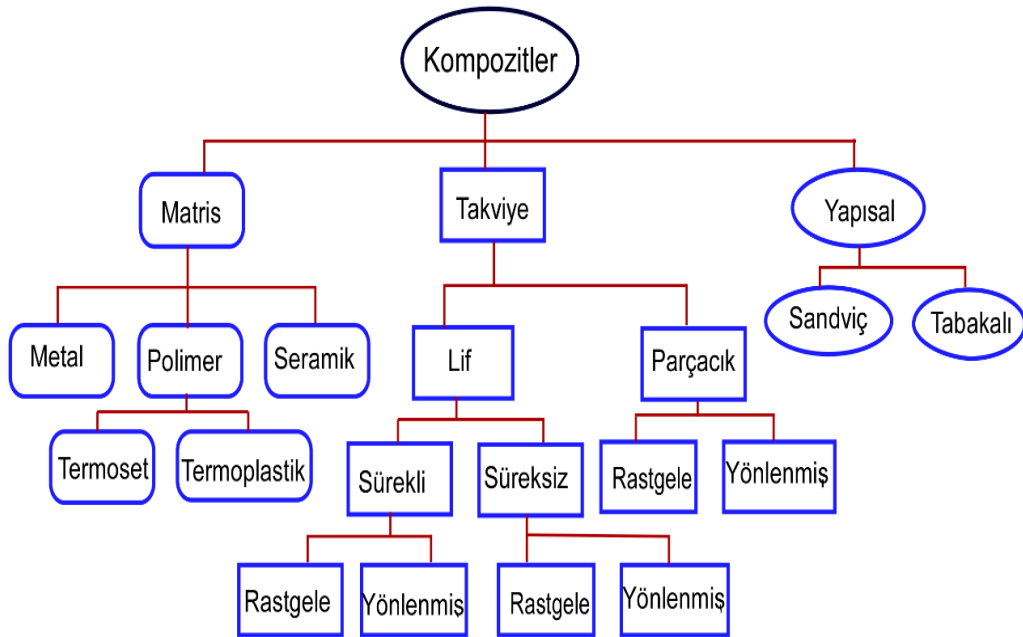
2.2 Kompozit Tarihçesi

Kompozit malzemelerin tarihçesi, insanlık tarihi kadar eski zamanlara dayanır. İlk kompozit malzemeler, farklı malzemelerin bir araya getirilerek daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler elde etme çabasıyla ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler, antik dönemlerden itibaren yapı, silah yapımı ve araçlar gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmıştır. M.Ö. 1500'lere ait Mısır ve Mezopotamya uygarlıklarında, saman veya hayvan kıllarının kil ile karıştırılmasıyla yapı malzemelerinin mukavemetinin artırıldığı bilinmektedir. Bu, erken dönem kompozit malzemelerin bir örneğidir. Aynı zamanda, antik dönemde kullanılan ahşap ve reçine kombinasyonları da erken dönem kompozitler arasında sayılabilir (William 2014).

Orta Çağ'da, Japonların samuray kalkanlarını yapmak için bambu ve deriyi katmanlar halinde birleştirmeleri, Avrupa'da ise metal zırhlar arasına keten kumaşların yerleştirilmesi gibi tekniklerle kompozit malzeme kullanımı görülmüştür. Bu uygulamalar, malzemelerin darbelere karşı dayanıklılığını artırmayı amaçlamıştır.

Modern kompozit malzemelerin gelişimi, 20. yuzyılın başlarında hız kazanmıştır. Özellikle İkinci Dünya Savaşı sırasında, hafif ve yüksek mukavemetli malzemelere olan ihtiyaç, kompozit malzeme araştırmalarını önemli ölçüde teşvik etmiştir. Bu dönemde, cam elyafı takviyeli plastikler (GRP), askeri uygulamalar ve ardından sivil endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (William 2014).

1970'ler ve 1980'lerde, karbon ve aramid fiberler gibi daha gelişmiş takviye malzemeleri kullanılarak üretilen kompozitler, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde devrim yaratmıştır. Bu dönem, kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında geniş çapta kabul gördüğü bir döneme işaret etmektedir (William 2014). Şekil 2.1' de kompozit malzeme sınıflandırılması Şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Gindu 2020)

2.2.1 Matris Yapıların Üretimi ve Çeşitleri

2.2.1.1 Matris

Kompozit malzemelerin matris fazı; metal, polimer veya seramik olabilir. Kompozit malzemelerde matris fazı, beklenen fonksiyonların gerçekleştirilmesinde kritik bir role sahiptir. Matris, kompozite birçok önemli özellik kazandırır: elyafları bir arada tutar, elyafların bağımsız hareketini engeller, dışarıdan uygulanan yükleri elyaflara aktarır ve bu yükleri homojen bir şekilde dağıtarak malzemenin bütünlüğünü korur. Gerilme altında, yükün küçük bir kısmı matris tarafından taşınırken, matrisin sünek olması önem taşır. Böylece, malzeme daha iyi bir darbe emilimi ve hasar toleransı sergiler. Elyaf ve matris arasındaki elastiklik modülü farkı da dikkate değerdir; elyafların elastiklik modülü, matrisinkinden çok daha yüksek olmalıdır ki yükün büyük kısmı takviye elyaflar tarafından taşınabilsin. Bu yapısal düzenleme, kompozit malzemenin performansını optimize eder ve uygulama alanlarının genişlemesine olanak tanır (Gay ve Hoa 2003).

Matrisin kompozit malzemelerdeki bir diğer önemli görevi, elyaf yüzeyini mekanik aşınma ve çevresel faktörlerin neden olabileceği kimyasal reaksiyonlar gibi dış etkenlere karşı korumaktır. Bu dış etkiler genellikle yüzeyde başlar ve zamanla malzemenin içine doğru ilerleyerek kusurlara yol açar. Bu tür kusurlar, malzemenin mukavemetini doğrudan etkileyerek çekme dayanımındaki azalmaya neden olur. Matris, bu nedenle kompozitin yüzey kalitesini koruyarak, dış etkilere karşı bir bariyer görevi görür ve malzemenin bütünlüğünü ve performansını uzun vadede korur (Barut 2015).

Matrisin kompozit malzemelerdeki bir başka önemli işlevi, malzemenin rijitliğinin sağlanmasıdır. Kompozitler, matris ve takviye elemanlarından oluşur, bu

takviye elemanları genellikle fiber formundadır. Kompozit malzemelerin tasarımında, matrisin temel rollerinden biri, fiberleri birbirinden izole edecek şekilde konumlandırılmış olmasıdır. Bu sayede, matris, elyafları birbirinden ayırırken malzemeye ek süneklik ve plastisite kazandırır, bu da malzemenin darbelere ve çeşitli yüklere karşı daha iyi bir dayanım göstermesini sağlar (Türkmen 2012).

Matrisin kompozit malzemelerdeki rolü, çatlakların oluşumu ve yayılmasını kontrol altında tutmak, darbe etkilerini azaltmak ve malzemenin genel sünekliğini ve plastikliğini artırmaktır. Matris, elyaflar arasındaki çatlakların geçişini engelleyerek ani kırılmaları önler ve böylece yapı içerisinde çatlak ilerlemesine karşı bir bariyer görevi üstlenir. Bu özellik, kompozitin bütünlüğünü korur ve elyafın tek tek hasar görmesi durumunda bile tüm kompozitin hasara uğramasını engeller. Bu durum, kompozitin mukavemetini ve dayanıklılığını artırır (Barut 2015).

Matris ve elyaf arasındaki ara yüzey bağ uyumu, kompozitin performansı için hayati öneme sahiptir. Matris ve elyaf seçiminde, aralarındaki uyum, mukavemet ve dayanıklılığı belirleyen önemli bir faktördür. Uyumlu bir ara yüzey bağ kuvveti, kompozitin ne kadar mukavim olacağını doğrudan etkiler (Barut 2015).

Ayrıca, gerilme kuvvetinin düşük dayanımlı matristen yüksek dayanımlı takviyeye etkin bir şekilde iletilmesi gerekmektedir. Bu süreçte, bağ kuvvetinin yüksek olması, kuvvetin takviye elemanlarına doğru ve etkili bir şekilde aktarılmasını sağlayarak kompozitin genel performansını iyileştirir. Bu nedenle, kompozit malzeme tasarımında matris ve elyaf arasındaki etkileşim, malzemenin mekanik özelliklerini optimize etmek için kritik bir unsurdur. (Deniz 2005).

Genellikle üç ana kategoriye ayrılırlar: polimer matris kompozitler (PMK), metal matris kompozitler (MMK) ve seramik matris kompozitler (SMK). Polimer

matris kompozitler, hafiflikleri ve iyi korozyon dirençleri nedeniyle havacılık, otomotiv ve spor ekipmanları gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Epoksi, poliester ve vinil ester gibi termoset polimerler ile polipropilen ve polietilen gibi termoplastik polimerler, polimer matris kompozitlerin üretiminde sıkça tercih edilen matris malzemeleridir (Gay ve Hoa 2003).

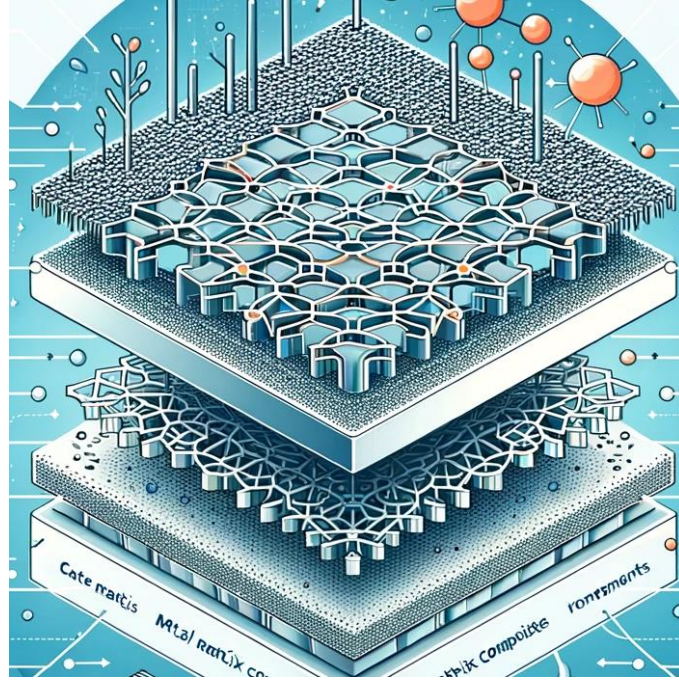
Metal matris kompozitler, yüksek mukavemet, sertlik ve yüksek sıcaklık performansı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Alüminyum, titanyum ve magnezyum alaşımları gibi metaller, takviye malzemeleri (karbon veya seramik fiberler gibi) ile birleştirilerek MMK'lerin üretiminde kullanılır. Seramik matris kompozitler ise özellikle yüksek sıcaklık, aşınma ve korozyona karşı dirençli olmaları gereken uygulamalarda tercih edilir. Bu kompozitler, uzay ve havacılık endüstrisinde, yanma odaları ve türbin kanatları gibi kritik bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır. Seramiklerin kırılma doğası, MMK'lerin geliştirilmesinde önemli bir zorluk oluşturmakla birlikte, fiber takviyeler bu malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilir (Deniz 2005).

2.2.1.2 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler (MMK'ler), metal veya metal alaşımlarından oluşan matris içerisine yerleştirilen takviye malzemeleri ile güçlendirilmiş malzemelerdir. Takviye malzemeleri, fiber, parçacık veya pul formunda olabilir ve genellikle karbon, bor, silikon karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve tungsten gibi yüksek mukavemetli malzemelerden seçilir. Alüminyum, magnezyum, titanyum ve bakır alaşımları gibi metaller matris malzemesi olarak kullanılır ve bu malzemelerin kombinasyonu, kompozitlerin mukavemet, sertlik, ısı ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerini iyileştirir. MMK'ler, hafiflik, yüksek sıcaklıkta mukavemet ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle havacılık, otomotiv, uzay ve askeri uygulamalar gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir (Peters 1998).

Yukarıda metal matris ve içine gömülü takviye malzemeleri- fiberler, parçacıklar veya pullar- arasındaki etkileşim vurgulanmakta, bu takviyelerin metal

matris içinde nasıl dağıtıldığı ve kompozitin mekanik özelliklerini nasıl geliştirdiği gösterilmektedir. Metal matris, takviye malzemeleri ve kompozit yapının geliştirdiği ana özellikler etiketlerle belirtilmiştir. Şekil 2.2' de metal matris kompozit yapısı görselleştirilmiştir.



Şekil 2.2: İnfografikte, metal matrisli kompozitlerin (MMK' ler) yapısı görselleştirilmiştir

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan matris malzemeler arasında en çok tercih edilenler alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, demir, kobalt, molibden ve nikel alaşımlarıdır. Bu alaşımlar, yüksek süneklik ve mukavemet sağlar, aynı zamanda takviye malzemeleri ile uyumlu bir yapı oluşturur. Takviye olarak kullanılan seramik malzemeler ve karbon fiberler, kompozitlere yüksek elastiklik modülü, çekme mukavemeti ve düşük yoğunluk gibi üstün özellikler kazandırır. Bu takviyeler, malzemelerin aşınma direncini, yüksek sıcaklığa dayanımını ve özgül rijitliğini artırır, böylece MMK' ler özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Kompozitlerin tasarımında matris ve takviye arasındaki ara yüzey bağ kuvveti, malzemenin genel performansını belirleyen kritik bir faktördür.

İyi bir ara yüzey uyumu, yüksek dayanım ve mukavemetin yanı sıra, malzemenin kullanım sıcaklığındaki sınırı da belirler. Bu özellikler, MMK' leri uzay, havacılık, otomotiv ve pek çok endüstriyel alanda vazgeçilmez kılar (Peters 1998).

2.2.1.3 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Seramik matrisli kompozitler, gelişmiş teknolojik uygulamalarda kullanılan, seramik esaslı matrisler içerisine yerleştirilen çeşitli takviye malzemeleri barındıran özel malzemelerdir. Bu takviyeler arasında karbon, bor, silikon karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi fiberler bulunur ve bu yapısal bileşenler, seramiklerin doğal olarak sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve kimyasal kararlılık gibi özelliklerini daha da geliştirir. Takviye edilmiş bu seramikler, özellikle yüksek sıcaklıkların hüküm sürdüğü havacılık, uzay ve enerji sektörlerinde, motor bileşenleri ve türbin kanatları gibi kritik parçalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. (Uygur 2004).

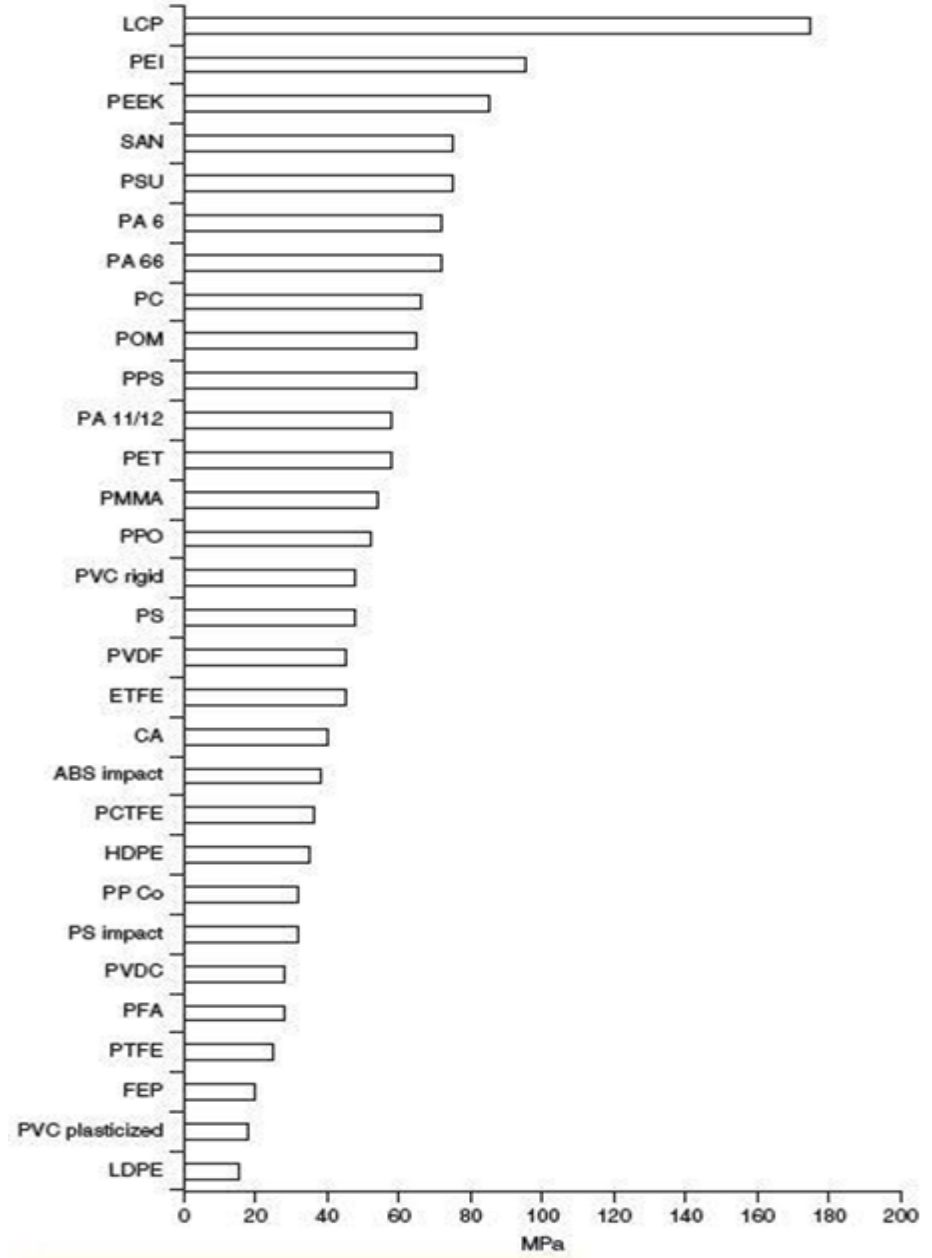
Üretim sürecinde, seramik tozları takviye malzemeleriyle karıştırılarak veya seramik prekürsörleri içine yerleştirilerek yüksek sıcaklıklarda pişirilir ve sinterlenir. Bu yöntemlerle, takviye malzemeleri seramik matris içerisinde eşit olarak dağıtılır ve malzemenin genel tokluğunu ve mukavemetini artırır. Ayrıca, seramik matrisli kompozitlerin gelişimi, seramiklerin kırılgenliğini azaltma ve mekanik özelliklerini iyileştirme amacını taşır, bu sayede daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanımları mümkün olur. Yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda, $1000^{\circ}C$ 'ye kadar olan sıcaklıklarda tercih edilen bu malzemeler, silisyum karbür, alüminyum oksit, cam-seramik ve silisyum nitrür gibi çeşitli seramik esaslı matris malzemeleri içerebilir (Uygur 2004).

Seramikler, yüksek sıcaklıklarda pişirilen kil ve kaolen gibi doğal maddelerden elde edilir ve metal ile ametal bileşiklerinin oluşturduğu organik olmayan yapılardır.

Tuğla, kiremit, porselen gibi geleneksel seramik ürünlerin yanı sıra, oksitler, nitritler, boridler, karbidler, silikatlar ve sülfidler de seramik grubuna dahildir. Kompozit malzemelere katıldıklarında sertlik, yüksek basma dayanımı ve aşınma direnci gibi özellikler kazandıran seramikler, malzemelere üstün mekanik ve termal özellikler sunar. Bu özellikler, seramik matrisli kompozitleri, otomotivden biyomedikale, havacılıktan enerji üretimine kadar geniş bir alanda vazgeçilmez kılar (Peters 1998).

2.2.1.4 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

Polimer matrisli kompozitler (PMK), polimer esaslı bir matris ve genellikle cam, karbon veya aramid fiberleri gibi elyaflar, ya da parçacıklar veya pullar gibi takviye elemanlarından oluşan malzemelerdir. PMK'lerin esneklikleri, düşük yoğunlukları ve mükemmel korozyon dirençleri, onları havacılık, otomotiv, inşaat ve spor malzemeleri gibi geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesinde ideal kılar. Matris malzemesi olarak başlangıçta doymamış poliestherler kullanılırken, zamanla termoset ve termoplastik polimerlerin gelişmesiyle bu matrisler daha da çeşitlendirilmiştir. (Biron 2007). Şekil 2.3' de polimerik matris çekme dayanımları verilmiştir.



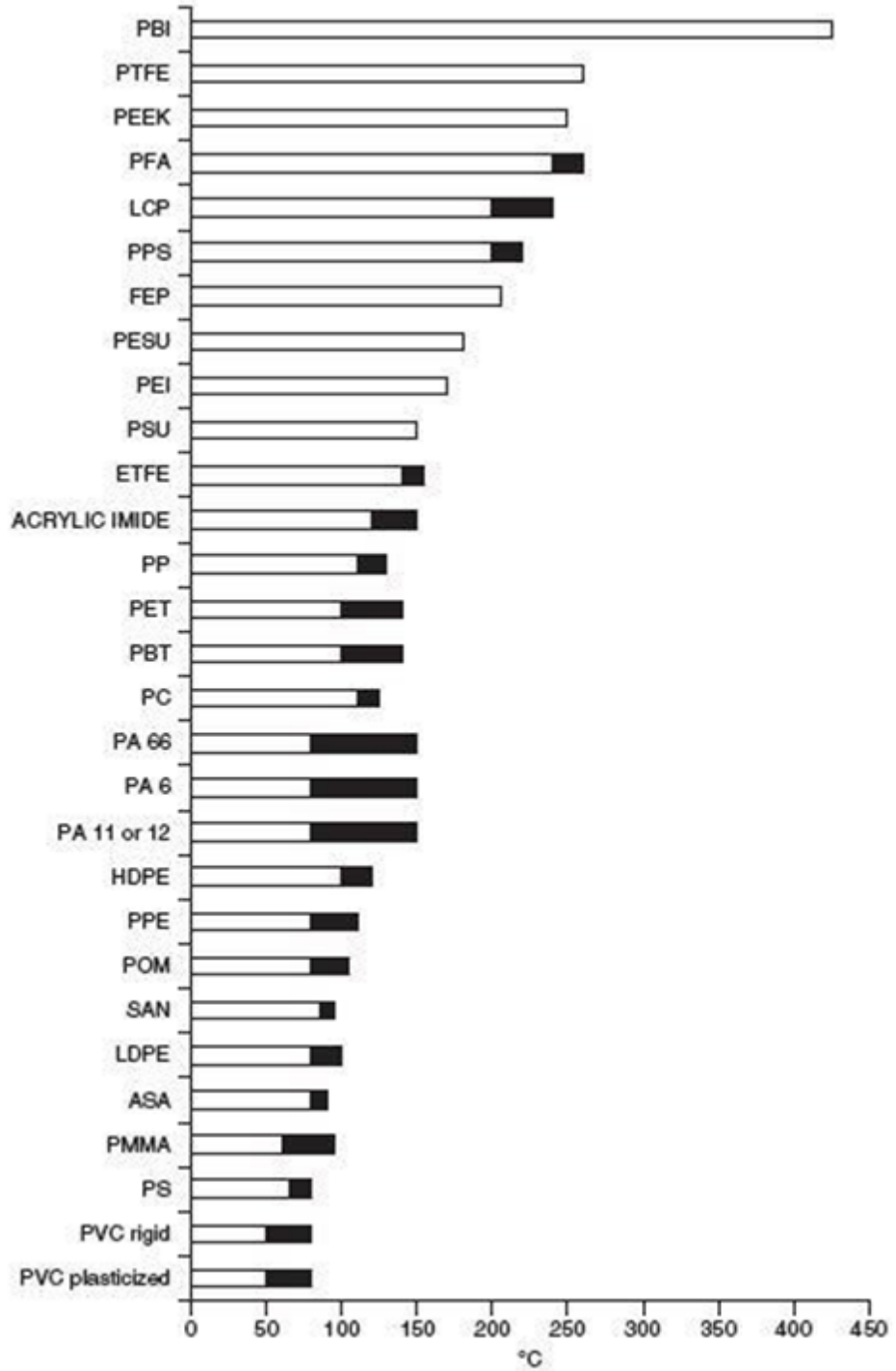
Şekil 2.3 Polimerik matrislerin çekme dayanımları (Biron 2007)

Termoset polimerler, kimyasal reaksiyonlarla kürlenerek sertleşir ve ağ yapısını oluşturur. Bu kategorideki epoksi ve polyester reçineler, yüksek sıcaklıklara ve kimyasal maddelere karşı dayanıklılık gösterirken, termoplastik polimerler ısıtıldığında yumuşama ve şekil değiştirme özelliğine sahiptir. Termoplastikler arasında polipropilen, polietilen, PVC, PS, PA, PMMA ve PC gibi malzemeler, mühendislik plastikleri ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Biron 2007). Tablo 2.1’ de plastik matrisli kompozit avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 2.1: Plastik matrisli kompozitlerin bazı avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek özgül dayanç ve özgül modül	Yeni tasarım ilkelerinin geliştirilmesi ve yeni sayısal yöntemlerin kullanılması
Karmaşık şekilli parçaların kolayca üretilebilmesi	Üretim aşaması için fazladan zaman harcanması
Maliyetlerin azalması	Yeniden tasarlanmış bağlantı elemanları
Konvansiyonel malzemelere göre mükemmel yorulma dayancı	Plastikler matrisler için sınırlı kullanım sıcaklık aralıkları
Uygun malzeme-ortam ikilisi seçildiğinde çok iyi korozyon dayancı	Su absorpsiyonu için özel önlem gereksinimi
Mükemmel elektrik ve ısı izolatörlüğü, manyetik alandan etkilenmemesi	Özel önlemler alınarak UV dayancı artırılabilir
Üretimde son işlem olması ve imalatta finisaj işlemlerine gereksinim olmaması	Geri dönüşümünün zor olması
İstenilen mekanik ve fiziksel özelliklerin elde edilmesi	Seri üretim için özel önlemler alınması, yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesi

PMK' lerin üretim yöntemleri arasında el yatırma, sprej yatırma, RTM, pultrüzyon ve filament sarma gibi işlemler bulunur. Bu yöntemler, malzemenin özelliklerini ve uygulamaya özgü ihtiyaçları karşılamak için takviye malzemelerinin tipini ve dağılımını optimize eder. Hafiflik ve mükemmel mekanik özellikler sunan PMK' ler, enerji verimliliğini artırabilir, malzeme maliyetlerini ve bakım gereksinimlerini düşürebilir, ayrıca geleneksel malzemelere alternatif oluşturabilirler. Bu özellikleri ve termoset ile termoplastik polimerlerin uyumlu kombinasyonları, PMK' leri gelişmiş malzeme çözümleri arasında öne çıkarır (Biron 2007).



Şekil 2.4: Polimerik matrislerin kullanım sıcaklıkları (Biron 2007)

Polimer matrisli kompozitler (PMK), polimer bazlı reçineleri matris olarak kullanarak, bu matrise çeşitli elyafları takviye elemanı olarak entegre eden

malzemelerdir. Kolay üretim süreçleri ve nispeten düşük üretim maliyetleri ile PMK'ler, çok çeşitli uygulamalar için tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Üç ana sınıfa ayrılan PMK'ler, termoset, termoplastik ve elastomer türlerini içerir. Şekil 2.4' de polimerik matris kullanım sıcaklıkları verilmiştir (Deniz 2005).

Termoset polimer matrisli kompozitler, kalıplanmış ve sertleştirildikten sonra eski haline dönemeyen yapıları nedeniyle, yüksek mukavemet ve sertlik gibi özellikleri nedeniyle yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılır. Termoplastik polimer matrisli kompozitler ise ısı uygulandığında yumuşayabilen ve şekillendirilebilen özellikleriyle, tekrar kullanılabilirlik ve tamir edilebilirlik gibi avantajlar sunar. Elastomerler ise esneklik ve darbe emilimi gibi özellikleriyle öne çıkar ve sıklıkla titreşim izolasyonu gibi uygulamalarda kullanılır (Biron 2007).

Bu geniş yelpazedeki PMK'ler, havacılıktan otomotive, inşaatın tıbbi cihazlara kadar geniş bir kullanım alanı sunar. Polimerlerin çeşitliliği, mühendislerin ve tasarımcıların, belirli uygulama gereksinimlerine uygun malzemeleri seçmesine ve özelleştirmesine olanak tanır. Bu esneklik, PMK'leri modern mühendislik ve tasarım çözümlerinde çok yönlü bir seçenek haline getirir (Deniz 2005).

2.2.1.4.1 Termoset Malzemeler

Termosetler, ısı ve basınç altında sertleşen ve bu işlemten sonra orijinal hallerine dönmeyen polimer türleridir. Isıtıldıklarında, moleküler zincirler arasında çapraz bağlar oluşur, bu sayede malzeme sert ve dayanıklı bir yapı kazanır. Ancak bu süreç geri dönüşümsüz olduğundan, termosetler şekillendirildikten sonra tekrar ısıtılsalar bile, ilk haline dönmeleri veya yeniden şekillendirilmeleri mümkün değildir. Bu özellikleri, onları tekrar kullanılamayan ve geri dönüştürülmesi zor malzemeler yapar (Biron 2007).

Termosetlerin bu dayanıklı yapıları, onları mobilya üretiminden denizcilik uygulamalarına, inşaat sektöründeki yapısal elemanlardan otomotiv endüstrisine kadar

geniş bir kullanım alanına sahip kılar. Özellikle, yüksek mekanik mukavemet ve ısı direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Bu malzemeler, ısı ve basınçla birlikte kürlenir ve bu işlemle bir kez şekil aldıklarında, sağlam ve kararlı bir yapı sergileyerek uzun süreli kullanım için ideal hale gelirler. Bu nedenle termoset reçineler, dayanıklılık ve uzun ömür gerektiren çeşitli endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen bir materyal seçeneğidir (Chung 2010).

2.2.1.4.2 Termoset Plastik Malzemeler

Termoset plastik malzemelerin çeşitli tipleri bulunmaktadır ve bunlar genellikle aşağıdaki gibi sıralanır:

- Epoksi reçineler
- Polyester reçineler
- Fenolik reçineler
- Silikon
- Poliamid
- Poliüretan
- Siyanet esterleri

Her biri benzersiz özelliklere sahip olan bu termoset plastik malzemeler, çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Örneğin, epoksi reçineler yüksek mukavemet ve yapışma özelliklerine sahiptir ve genellikle kompozit malzemelerde kullanılırken, polyester reçineler düşük maliyetleri nedeniyle otomotiv ve inşaat endüstrilerinde yaygın olarak tercih edilir. Fenolik reçineler yüksek sıcaklık dayanımı ile öne çıkar ve genellikle yalıtım malzemelerinde kullanılırken, silikonlar su geçirmezlik ve elektrik yalıtımı gibi özellikler için tercih edilir. Poliamidler, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal dirençleri nedeniyle uzay ve elektronik endüstrisinde kullanılırken, poliüretanlar esneklik ve darbe direnci için tercih edilir. Siyanet esterleri ise yüksek

sıcaklık dayanımı ve kimyasal dirençleri ile öne çıkar ve uçak ve uzay araçlarında kullanılır (Biron 2007).

Her bir termoset plastik malzemesi, belirli bir uygulama için uygun özelliklere sahiptir ve bu özellikler, içinde buldukları malzemelere çeşitli avantajlar kazandırır. Bu malzemelerin özelliklerinin doğru şekilde değerlendirilmesi, belirli bir uygulama için en uygun malzemenin seçilmesini sağlar.

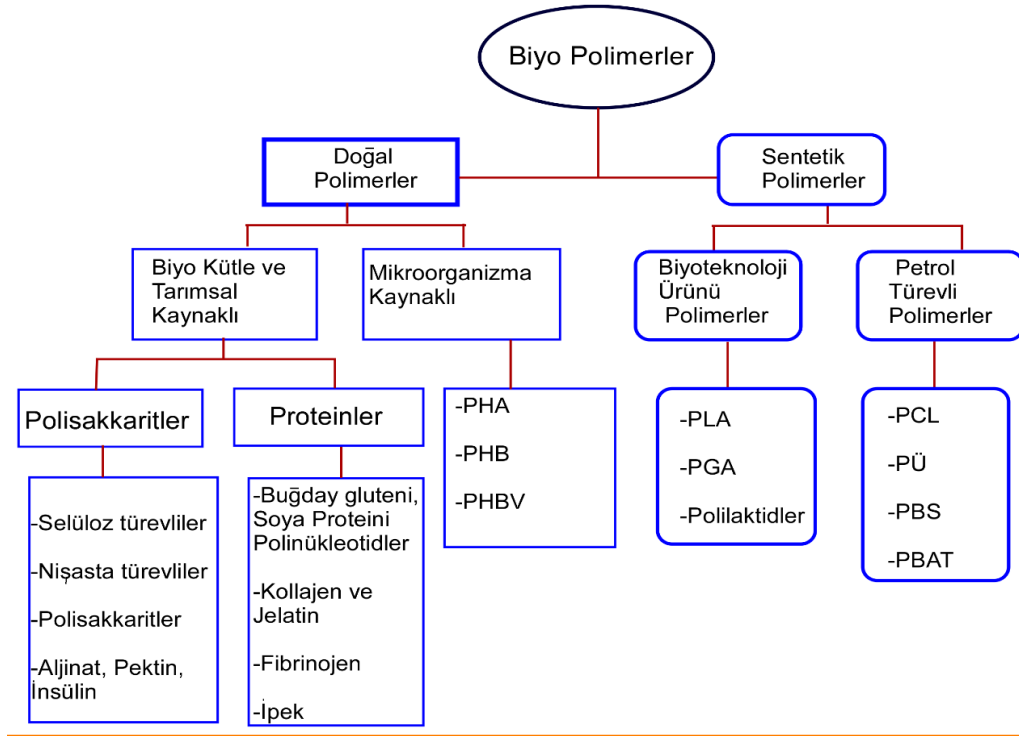
2.3 Biyopolimerler

Biyo-polimerler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen ve biyobozunur özelliklere sahip polimerlerdir. Bu polimerler, bitkisel yağlar, nişasta, selüloz, proteinler ve laktik asit gibi doğal kaynaklardan üretilir. Petrol bazlı plastiklerin yerini alabilecek çevre dostu alternatifler olarak ön plana çıkmaktadırlar (Battezzore 2018).

Biyo-polimerlerin kullanımı, çevresel sürdürülebilirlik, etkin atık yönetimi ve çevresel etkilerin azaltılması gibi alanlarda ciddi avantajlar sağlar. Bu polimerler, doğal kaynaklardan türetilerek yapay yöntemlerle sentezlenebilen veya canlı organizmalar tarafından doğrudan biyolojik süreçlerle üretilen maddelerdir. Biyo-polimerler, petrol tabanlı polimerlere kıyasla yenilenebilir kaynaklardan elde edildikleri için çevre üzerindeki yükü azaltmaya yardımcı olur ve genellikle tamamen biyobozunur özelliklere sahiptirler (Battezzore 2018).

Biyopolimerlerin çoğu, yapısal bileşenleri olarak monomerler içerir ve bu monomerler genellikle nükleotidlerden oluşan nükleik asitler, amino asitlerden oluşan proteinler veya şeker molekülleri olan sakkaritlerden türetilmiş tekrarlayan moleküllerden meydana gelir. Bu yapısal ögeler, biyopolimerlerin fonksiyonel ve fiziksel özelliklerini belirleyen temel bileşenlerdir. Şekil 2.5'te Biyopolimerler türleri ve sınıflandırılması gösterilmiştir. Nükleik asitlerin yapıtaşları olan nükleotidler, genetik bilginin depolanması ve aktarılmasında rol alırken; amino asitler, proteinlerin

yapısal ve işlevsel birimleri olarak hücrel işlevlerde kritik roller üstlenir. Öte yandan, şeker moleküllerinden oluşan sakkaritler, enerji depolama ve hücrel yapıların oluşturulmasında temel bileşenler olarak hizmet eder. Bu çeşitlilik, biyopolimerlerin biyolojik süreçlerdeki çeşitli fonksiyonlarını ve endüstriyel uygulamalarda kullanım potansiyellerini açıklar (Kandola 2020).



Şekil 2.5: Biyopolimerlerin sınıflandırılması (Yoruç 2017)

2.3.1 Hayvansal Kökenli Biyopolimerler

Hayvansal kökenli biyopolimerler, hayvanların dokularından ve atıklarından elde edilen doğal polimerlerdir. Bu biyopolimerler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirler ve çevre dostu malzemeler olarak kabul edilirler. En yaygın hayvansal kökenli biyopolimerler arasında kolajen ve kitin bulunmaktadır.

Kollajen, vücutta deri, kemikler, tendonlar, kıkırdaklar ve diğer bağ dokularında bulunan bir protein polimeridir. Bu protein, fibril yapıları oluşturarak dokuların yapısal dayanıklılığını ve esnekliğini sağlar. Kollajen, medikal ve kozmetik sektörlerde kullanılan önemli bir malzemedir. Yara iyileştirme ürünleri, dikiş iplikleri ve cilt bakım ürünlerinde sıkça kullanılır (Hamamcı 2018).

Kitin, hayvanların ekzoskeletonlarında (kabukları) bulunan bir polisakkarittir. Özellikle kabuklu deniz hayvanlarında ve böceklerde yoğun olarak bulunur. Kitin, dayanıklı, hafif ve biyolojik olarak parçalanabilir bir malzemedir. Bu nedenle, gıda ambalajları, su arıtma filtreleri, tıbbi malzemeler ve tekstil endüstrisinde çeşitli amaçlarla kullanılır. Kitin türevleri olan kitosan, antimikrobiyal ve antioksidan özellikleri nedeniyle sağlık ve gıda endüstrisinde de kullanılmaktadır (Hamamcı 2018).

Hayvansal kökenli biyopolimerler, sürdürülebilir ve çevre dostu malzemelerdir çünkü doğal kaynaklardan elde edilirler ve biyolojik olarak parçalanabilirler. Ayrıca, bazıları insan vücuduyla uyumlu olduğu için tıbbi uygulamalarda kullanılabilirler. Ancak, kollajen gibi bazı biyopolimerlerin alerjik reaksiyonlara neden olabileceği veya kitin kaynağının sınırlı olabileceği gibi bazı dezavantajları da vardır (Hamamcı 2018).

2.3.1.1 Kullanım Alanları

- Tıbbi Uygulamalar: Kollajen, yara iyileştirme ürünleri, dikiş iplikleri, doku mühendisliği ve implant malzemeleri gibi çeşitli tıbbi uygulamalarda kullanılır. Kitin ve kitosan ise yara iyileştirme, kemik rejenerasyonu, deri hastalıklarının tedavisi ve ilaç taşıyıcı sistemler gibi alanlarda kullanılır.

- Kozmetik Endüstrisi: Kollajen, cilt bakım ürünleri, saç bakım ürünleri ve anti-aging ürünlerinde kullanılan önemli bir bileşendir.

- Gıda Ambalajı: Kitin, gıda ambalajlarında kullanılan bariyer filmlerinin ve kaplamalarının üretiminde kullanılır. Bu filmler, gıdaların korunmasına ve raf ömrünün uzatılmasına yardımcı olur.

- Su Arıtma: Kitin ve kitosan, su arıtma filtrelerinde, su arıtma membranlarında ve atık su arıtma sistemlerinde kullanılır. Bu malzemeler, zararlı kirleticilerin giderilmesine yardımcı olur ve suyun kalitesini artırır (Hamamcı 2018).

- Tekstil Endüstrisi: Kitin, antibakteriyel ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle tekstil ürünlerinde kullanılır. Özellikle spor giysileri ve iç çamaşırları gibi hijyenik özellikler gerektiren ürünlerde tercih edilir.

2.3.1.2 Maliyetler

- Üretim Süreci: Hayvansal kökenli biyopolimerler, genellikle doğal kaynaklardan elde edilirler ve bu nedenle üretim süreci karmaşık olabilir. Ancak, endüstriyel ölçekte üretildiklerinde maliyetleri düşebilir.

- Ham Madde Maliyetleri: Kollajen ve kitin gibi hayvansal kökenli biyopolimerlerin ham maddeleri, hayvanların dokularından veya atıklarından elde edildiği için toplama, işleme ve saflaştırma maliyetleri olabilir.

- Uygulama Alanlarına Bağlı Maliyet Farklılıkları: Kullanım alanına ve uygulama şekline bağlı olarak, hayvansal kökenli biyopolimerlerin maliyetleri değişebilir. Örneğin, tıbbi implantlar için kullanılacaksa daha yüksek kalitede ve saflıkta malzemeler gerekebilir, bu da maliyetleri artırabilir.

Genel olarak, hayvansal kökenli biyopolimerlerin maliyetleri, üretim süreci, ham madde kaynağı ve uygulama alanına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Ancak, sürdürülebilirlik ve çevresel dostluk gibi avantajları göz önünde bulundurulduğunda, bu biyopolimerlerin maliyetleri rekabetçi olabilir.

2.3.2 Mikrobiyal biyopolimerler

Mikrobiyal biyopolimerler, mikroorganizmalar tarafından doğal olarak sentezlenen ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan biyopolimerlerdir. Bu

biyopolimerler, genellikle mikroorganizmaların fermantasyon süreçleri sırasında üretilir ve çevre dostu, yenilenebilir ve biyobozunur özelliklere sahiptirler. İşte mikrobiyal biyopolimerlerin kullanım alanları, özellikleri ve maliyetleri hakkında detaylı bilgiler:

2.3.2.1 Kullanım Alanları

- Ambalaj Endüstrisi: Mikrobiyal biyopolimerler, gıda ambalajlarında, özellikle tek kullanımlık plastik ambalajların yerine geçebilecek biyobozunur ambalaj malzemeleri olarak kullanılır. Bu, çevreye zararlı atıkların azaltılmasına ve plastik kirliliğinin önlenmesine yardımcı olabilir (Hamamcı 2018).

- Tarım: Mikrobiyal biyopolimerler, tarım sektöründe toprak iyileştirme, bitki koruma ve gübreleme gibi alanlarda kullanılabilir. Örneğin, polihidroksibutirat (PHB) gibi biyopolimerler, toprakta organik madde olarak kullanılarak verimliliği artırabilir.

- Tıbbi Uygulamalar: Bazı mikrobiyal biyopolimerler, biyomedikal uygulamalarda kullanılır. Örneğin, polihidroksibutirat (PHB), dikiş iplikleri ve biyoimplantlar gibi tıbbi malzemelerin üretiminde kullanılabilir.

- Tekstil Endüstrisi: Mikrobiyal biyopolimerler, tekstil endüstrisinde boyama ve kaplama işlemlerinde kullanılabilir. Ayrıca, tekstil atıklarının azaltılmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olabilirler.

- Su Arıtma: Bazı mikrobiyal biyopolimerler, su arıtma sistemlerinde kullanılarak atık suyun arıtılmasına yardımcı olabilirler. Bu, çevreye zararlı atıkların azaltılmasına ve su kaynaklarının korunmasına katkı sağlar (Hamamcı 2018).

2.3.2.2 Özellikler

- Çevre Dostu: Mikrobiyal biyopolimerler, genellikle doğal kaynaklardan elde edildiği için çevre dostu malzemelerdir. Biyobozunurlukları sayesinde doğada kolayca parçalanabilirler ve çevre kirliliğini azaltabilirler.

- Yenilenebilir: Mikrobiyal biyopolimerler, mikroorganizmalar tarafından üretildiği için yenilenebilir kaynaklardan elde edilirler. Bu, fosil yakıtların kullanımının azaltılmasına ve sürdürülebilir bir geleceğe katkı sağlar.

- Esneklik: Mikrobiyal biyopolimerler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılacak şekilde çeşitli şekil ve yapı özelliklerine sahip olabilirler. Bu, farklı gereksinimlere uygun çözümler sunmalarını sağlar (Hamamcı 2018).

- Biyobozunurluk: Mikrobiyal biyopolimerlerin birçoğu, doğada çevre dostu bir şekilde parçalanabilir. Bu özellikleri, atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerini kolaylaştırır.

2.3.2.3 Maliyetler

- Üretim Süreci: Mikrobiyal biyopolimerlerin üretim süreci genellikle mikroorganizmaların fermantasyonuyla gerçekleşir. Bu, özel ekipmanlar ve kontrol gerektirebilir, bu da üretim maliyetlerini artırabilir.

- Ham Madde Maliyetleri: Bazı mikrobiyal biyopolimerlerin ham maddeleri, özel besin maddeleri veya substratlar gerektirebilir. Bu, üretim maliyetlerini etkileyebilir.

- Pazar Talebi: Mikrobiyal biyopolimerlerin kullanım alanları ve talebi, maliyetler üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Talebin artmasıyla birlikte, ölçek ekonomileri nedeniyle maliyetler genellikle düşer (Hamamcı 2018).

Genel olarak, mikrobiyal biyopolimerlerin kullanımı çevresel ve ekonomik faydalar sağlayabilir. Ancak, üretim süreci, ham madde maliyetleri ve pazar talebi gibi faktörler maliyetleri etkileyebilir ve bu da endüstriyel uygulamalar için rekabetçi bir fiyatlandırmayı etkileyebilir.

2.3.3 Bitkisel Kökenli Biyopolimerler

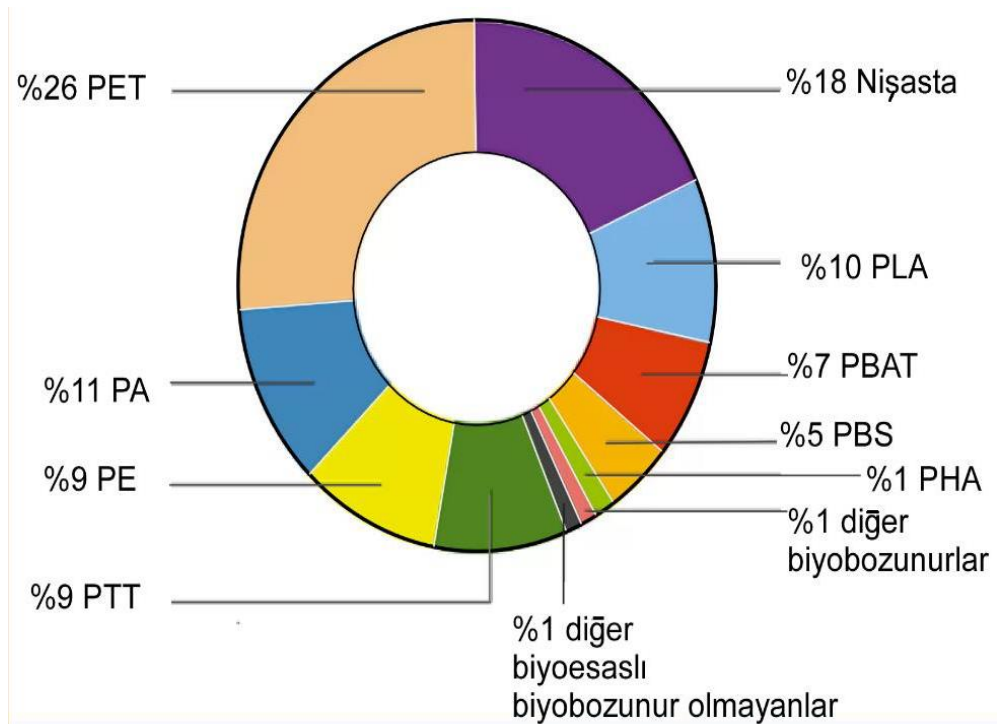
Bitkisel kökenli biyopolimerler, bitkilerden elde edilen doğal polimerlerdir ve genellikle endüstriyel ve çevresel uygulamalarda kullanılan önemli malzemelerdir. Bu biyopolimerler, bitkisel kaynaklardan elde edildikleri için çevre dostu ve yenilenebilir özelliklere sahiptirler.

Biyopolimerler, çevresel uyum açısından biyobozunabilir ve biyobozunmayan olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Bunun yanı sıra, kökenlerine göre sınıflandırmak da mümkündür; bu bağlamda biyopolimerler doğal, mikroorganizma türevli veya sentetik olarak üç farklı gruba ayrılabilir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, doğal biyopolimerler doğadan doğrudan elde edilirken, mikroorganizma kaynaklı biyopolimerler, belirli mikroorganizmaların fermantasyon süreçleri kullanılarak üretilir. Sentetik biyopolimerler ise, kimyasal işlemler aracılığıyla laboratuvar ortamında sentezlenir. Bu çeşitlilik, biyopolimerlerin geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmasını sağlar ve sürdürülebilirlik açısından önemli olan biyobozunabilirlik özelliğine sahip olanlar çevre dostu çözümler sunar (Hamamcı 2018). Şekil 2.6' da küresel biyoplastik üretim kapasitesi verilmiştir.

Biyobazlı biyopolimerler, bitkisel, hayvansal veya mikroorganizma kökenli kaynaklardan üretilebilir. Bununla birlikte, piyasada bulunan biyopolimerler arasında, biyobozunur olanların sayısı, parçalanamayan biyopolimerlerden daha azdır. Bu

durum, biyopolimerlerin çeşitli uygulama alanlarına adaptasyonunu ve çevresel etkilerini etkileyebilir (Liang 2021), (Pornwannachai 2020). PLA büyük ölçüde nişasta ve şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan fermantasyon yöntemiyle üretilse de sentezlenerek üretimi de mümkündür (Akdoğan 2020).

Her yıl dünya çapında üretilen yaklaşık 335 milyon ton plastikten, biyopolimerler sadece yaklaşık %1'lik bir paya sahiptir. Biyopolimer alanında öncü olan Avrupa Biyoplastikler ve Nova-Enstitüsü gibi kuruluşların verilerine göre, küresel biyoplastik üretim kapasiteleri, 2018 yılında yaklaşık 2.11 milyon ton iken, 2023 yılına gelindiğinde bu miktarın yaklaşık 2.62 milyon tona ulaşması beklenmektedir. Özellikle PLA (Polilaktik Asit) üretim kapasitesinin, 2023 yılına kadar mevcut kapasitenin iki katına çıkması öngörülmektedir (Hamamcı 2018).



Şekil 2.6: 2018–2019 Yılları dünyadaki küresel biyoplastik üretim kapasitesi (World Biopolymers 2021)

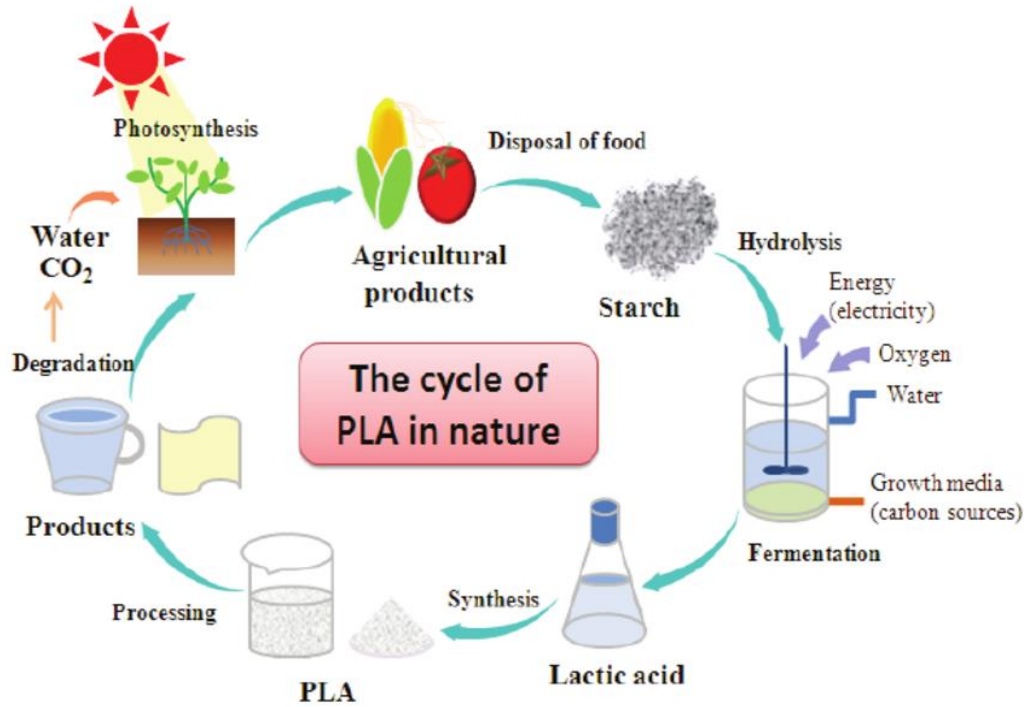
Tablo 2.2: Bazı polimer matrislere ait mekanik özellikler (Koronis 2013; McAdam 2020)

Polimer Matris	Yoğuluk g cm ³	Çekme Dayanımı (Mpa)	Eğme Modülü (Gpa)	Elastiklik Modülü (Gpa)	Uzama (%)
PLA	1.21- 1.25	60-90	4.2	0.3–3.5	2.5-6
PHB	1.18-.1.26	21	2.7	0.9-4	5-8
PHA	1.25	35	--	2.95	2
PLLA	1.25-1.29	15.5-150	--	0.3-4.14	2.5-30

Tablo 2.2’ de yeşil kompozit üretimi için biyoreçinelerle ilgili yapılan çeşitli araştırmalardan toplanan verileri özetlemektedir. Çalışmalar arasında üretim metodolojisi, parametreler ve diğer faktörlerdeki farklılıklar nedeniyle sonuçlar değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, tablo, araştırmalardan elde edilen maksimum ve minimum değerleri içerecek şekilde basitleştirilmiştir.

2.3.3.1 Polilaktik Asit (PLA)

Polilaktik Asit (PLA), mısır nişastasası gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, biyobozunur ve biyoyumlu bir termoplastiktir. Laktik asit monomerlerinin polimerizasyonu yoluyla üretilir ve petrokimyasal bazlı plastiklere sürdürülebilir bir alternatif olarak kabul edilir. PLA'nın özellikleri, üretim sürecindeki parametrelere ve kullanılan katkı maddelerine bağlı olarak değişiklik gösterir, bu da onu çeşitli uygulama alanları için uygun hale getirir. Polilaktik asit (PLA), yüksek termoplastik özellikleriyle bilinen ve bazı basit şekerlerin fermantasyonu yoluyla üretilen biyobozunur bir polimerdir (Garlotta, 2001). Petrol bazlı plastiklerden polistiren (PS) ve polietilen (PE) gibi örnekler doğada 500 ile 1000 yıl arasında bozunma süresine sahipken, PLA ise doğal koşullar altında sadece 2 ay içinde bozunabilir. Şekil 2.7’ de pla doğa döngüsü gösterilmiştir. Bu özellik, PLA'yı çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkarır (Sinclair ve diğ 1996).



Şekil 2.7: PLA' nın doğada döngüsünün şematik gösterimi

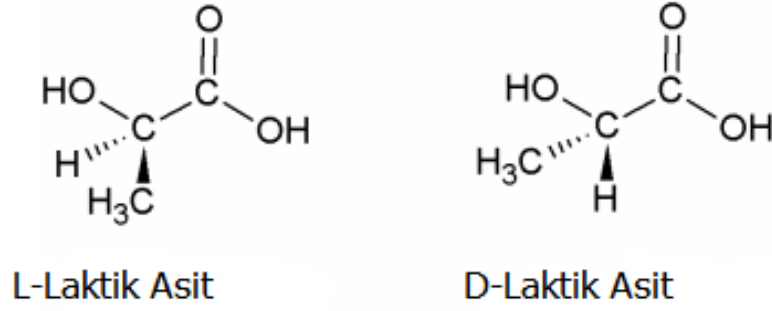
PLA, yaklaşık 150-160°C arasında bir erime noktasına sahiptir, bu da onun düşük sıcaklıkta işlenmesini kolaylaştırır ancak yüksek sıcaklıklarda kullanımını sınırlar. Genel bir değerlendirme yapıldığında, Polilaktik Asit (PLA)'nın çekme dayanımı yaklaşık olarak 50-90 MPa aralığında olup, elastik modülü 3-5 GPa arasında değişmektedir. Ayrıca, kopana kadar olan uzama oranı %3 ile %10 arasında seyrederken, darbe dayanımı seramiklerle benzer şekilde zayıf bir performans sergilemektedir. Bu özellikler, PLA'nın mekanik davranışları hakkında temel bilgiler sunmaktadır. Biyobozunurluğu, PLA'nın çevre üzerindeki etkisini azaltan önemli bir özelliktir; kompost koşullarında, PLA mikroorganizmalar tarafından su ve karbondioksit gibi doğal bileşenlere ayrışabilir (Henton ve diğ 2015).

Mekanik özellikler açısından, PLA orta seviyede mukavemet ve sertlik sunar, ancak darbe direnci nispeten düşüktür. Ticari PLA' nın yoğunluğu yaklaşık 1.20-1.240 g cm³ (Mo 2020), (Bernardes 2020) camsı geçiş sıcaklığı ise yaklaşık 45-62 °C (S.

Sharma 2020), erime sıcaklığı ise 175 °C ve molekül bozunma sıcaklıkları ise 235-255 °C'dir (Shakouri 2018).

Polilaktik Asit (PLA), UV ışığı ve nemin etkisiyle moleküler zincirlerinin bölünmesi sonucu yapısal bozunmaya uğrayabilir. Belirli şartlar altında, özellikle 50°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, birkaç aydan bir yıla kadar değişen sürelerde hidroliz ile biyo-bozunur. Çevresel etki açısından önemli olan, bozunma sürecinde toksik olmayan ürünlerin oluşmasıdır. PLA'nın bu özellikleri, çeşitli katkı maddeleri eklenerek daha da iyileştirilebilir. Şeffaf yapısı sayesinde ambalaj sektöründe tercih edilen PLA, toprakta zararlı olmayan bileşenlere yavaşça ayrışarak atık yönetimine katkıda bulunur. Bozunduğunda, zehirli ya da kanserojen olmayan H₂O ve CO₂'ye dönüşür. Biyoyumluluğu, biyo-bozunurluğu, zehirli gaz salınımının olmaması ve şeffaflığı PLA'nın kullanım alanlarını artırır. PLA'nın sentezi, laktik asit monomerlerinin polimerizasyonu veya katalitik halkalı laktik dimerinin halka açma polimerizasyonu yoluyla gerçekleşir. L ve D izomerlerine sahip PLA, termoplastik özellikleri, yüksek mekanik dayanımı ve biyobozunurluğu ile petrol türevli polimerlere alternatif olarak geniş bir kullanım alanı bulur (Henton ve diğ, 2015).

PLA'nın monomer tipine göre, poli (L-laktik asit) (PLLA), poli (D-laktik asit) (PDLA) veya poli (D, L-laktik asit) (PDLLA) olarak adlandırılır ve farklı ısıl ve yapısal özellikler gösterir. En yaygın kullanılan L laktik asit formu doğal olarak bulunurken, D laktik asit mikroorganizmalar tarafından sentezlenebilir veya polietilen tereftalat (PET) ve polietilen (PE) gibi diğer polimerlerden rasemizasyon yoluyla üretilir. Poli L laktik asit, yüksek gerilme mukavemeti ve düşük uzama ile yarı kristal bir polimerdir, bu özellikleri onu ortopedik uygulamalarda ve yüksek dayanıklılık gerektiren diğer alanlarda kullanıma uygun kılar (Henton ve diğ, 2015). PLA'nın farklı optik izomerlerinin bağ yapıları Şekil 2.8' de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: PLA' nın iki farklı optik izomeri

2.4 Kompozit Malzemelerin Matris Türleri

Kompozit yapıların içerisinde bulunan matrisler, elyafları bir arada tutarak yükün eşit bir şekilde dağılmasını sağlar. Aynı zamanda, matrisler elyaflara dış etkenlerden koruma sağlarlar ve ideal bir matris malzemesi, elyafları sıkıca bir arada tutabilmeyi amaçlar. Kompozit malzemelerde kullanılan matrislerin mekanik özellikleri büyük önem taşır; çünkü bu özellikler, malzemenin dayanıklılığı ve performansı üzerinde doğrudan etkilidir (Bağcı 2005).

Elyaf ve matris arasındaki bağlanma, kompozitin dayanıklılığı için kritiktir; bu nedenle matrisin, elyaflarla yüksek dayanım ve iyi yapışma özelliklerine sahip olması gerekir. Endüstride kullanılan kompozit malzemelerin üretiminde genellikle dört ana grup matris kullanılır: epoksi, polyester, vinilester ve fenolik reçineler. Polyester reçineler, yüksek dayanım gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilirken, daha gelişmiş kompozit malzemelerin üretiminde ise genellikle epoksi reçineler tercih edilir. Bu reçineler, özellikle havacılık, otomotiv ve denizcilik gibi alanlarda kullanılan yüksek performanslı kompozit parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır. (Bağcı 2005). Bazı termoset malzemelerin sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikler Tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3: Bazı termoset malzemelerin sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikleri (Demirel 2008; Yıldızhan 2008)

Malzeme Özellikleri	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm ³)	1.11	1.04-1.46	1.24-1.32
Elastik Modül (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı/mukavemeti (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	4.2	1.5-2.0
Isıl İletkenlik	0.19	0.19	0.15
Isıl genleşme katsayısı (1/°C)	45-65	55-100	68

2.4.1 Epoksi Matrisli Kompozitler

Polilaktik Asit (PLA), UV ışığı ve nemin etkisiyle moleküler zincirlerinin bölünmesi sonucu yapısal bozunmaya uğrayabilir. Belirli şartlar altında, özellikle 50°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, birkaç aydan bir yıla kadar değişen sürelerde hidroliz ile biyo-bozunur. Çevresel etki açısından önemli olan, bozunma sürecinde toksik olmayan ürünlerin oluşmasıdır. PLA'nın bu özellikleri, çeşitli katkı maddeleri eklenerek daha da iyileştirilebilir. Şeffaf yapısı sayesinde ambalaj sektöründe tercih edilen PLA, toprakta zararlı olmayan bileşenlere yavaşça ayrışarak atık yönetimine katkıda bulunur. Bozunduğunda, zehirli ya da kanserojen olmayan H₂O ve CO₂'ye dönüşür. Biyoyumluluğu, biyo-bozunurluğu, zehirli gaz salınımının olmaması ve şeffaflığı PLA'nın kullanım alanlarını artırır (Bağcı 2005).

PLA'nın sentezi, laktik asit monomerlerinin polimerizasyonu veya katalitik halkalı laktik dimerinin halka açma polimerizasyonu yoluyla gerçekleşir. L ve D izomerlerine sahip PLA, termoplastik özellikleri, yüksek mekanik dayanımı ve biyobozunurluğu ile petrol türevli polimerlere alternatif olarak geniş bir kullanım alanı bulur. PLA'nın monomer tipine göre, poli (L-laktik asit) (PLLA), poli (D-laktik asit) (PDLA) veya poli (D, L-laktik asit) (PDLLA) olarak adlandırılır ve farklı ısıl ve yapısal özellikler gösterir. En yaygın kullanılan L laktik asit formu doğal olarak bulunurken, D laktik asit mikroorganizmalar tarafından sentezlenebilir veya polietilen tereftalat (PET) ve polietilen (PE) gibi diğer polimerlerden rasemizasyon yoluyla üretilebilir. Poli L laktik asit, yüksek gerilme mukavemeti ve düşük uzama ile yarı

kristal bir polimerdir, bu özellikleri onu ortopedik uygulamalarda ve yüksek dayanıklılık gerektiren diğer alanlarda kullanıma uygun kılar (Bağcı 2005).

Epoksi reçineler, bu malzemelerin yapısal bütünlüğünü ve uzun ömürlülüğünü garanti eder. İki veya daha fazla epoksi içeren bileşenlerin bazık bir ortamda reaksiyona girerek kürleşmesiyle oluşan bu polimerler, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılıkları (150-200°C'ye kadar) ve düşük büzülme oranları (%2' den az) ile öne çıkar. Ayrıca, aşınma ve kimyasallara karşı yüksek dirençleri ile bilinirler, ancak yüksek viskoziteli polyesterlerle karşılaştırıldığında daha az uygun olabilirler. Her sıcaklıkta sertleşebilme yetenekleri ve genellikle karbon elyafı gibi güçlendirici malzemelerle birlikte kullanılmaları, epoksi reçinelerin çok yönlülüğünü ve endüstriyel uygulamalardaki geniş kabulünü gösterir (Ersoy 2002).

2.4.2 Polyester Matrisli Kompozitler

Polyester reçineler, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılan termoset polimerlerdir. Bu reçineler, mükemmel mekanik özellikler, iyi kimyasal direnç ve kolay işlenebilirlik sunarlar. Özellikle, düşük maliyetleri ve yüksek çekme dayanımları ile dikkat çekerler, bu nedenle kompozit malzemelerin matris fazında sıklıkla tercih edilirler. Polyester reçineler, vinil ester ve epoksi reçinelerle karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklıklarda sertleşme eğiliminde olup, bu özellikleri ile hızlı üretim süreçlerinde avantaj sağlarlar (Bastioli 2005).

Polyester reçinelerin elastik modülleri, genellikle 2.5 ile 4 GPa arasında değişmektedir, bu da onları orta düzeyde yapısal uygulamalar için uygun kılar. Çekme dayanımları ise geniş bir aralıkta, yaklaşık 40 ile 100 MPa arasında değişebilir; bu, reçinenin özel formülasyonuna ve katkı maddelerinin varlığına bağlı olarak farklılık gösterir. Polyester reçineler, genellikle 2-4% arasında bir kopma uzamasına sahiptir, bu da onları darbe direnci gerektiren uygulamalarda değerli kılar (Bastioli 2005).

Isıl iletkenlikleri düşük olan polyester reçineler, elektrik izolasyon uygulamalarında da kullanılmaktadır. Ancak, epoksi reçinelere kıyasla genellikle daha yüksek ısıl genleşme katsayısına sahiptirler, bu da onların sıcaklık değişimlerine karşı daha hassas olduğunu gösterir. Buna rağmen, polyester reçineler maliyet-etkin çözümler sunmaları ve kolay işlenmeleri sayesinde, özellikle inşaat, otomotiv ve denizcilik endüstrilerinde geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Henton ve diğ, 2015).

Kimyasal direnç açısından polyester reçineler, birçok ortamda iyi performans sergilerler, ancak bazı agresif kimyasallara karşı epoksi reçineler kadar dirençli değildirler. Bu durum, kullanım alanlarının belirlenmesinde önemli bir faktör oluşturur. Polyester reçineler ayrıca UV ışığına maruz kaldıklarında bozulma eğiliminde olabilirler, bu nedenle dış mekân uygulamalarında UV stabilizatörleri veya koruyucu kaplamalar gerektirebilir (Bastioli 2005).

Sonuç olarak, polyester reçineler, maliyet-etkinliği, iyi mekanik özellikleri ve kolay işlenebilirlikleri ile birçok uygulamada değerli bir seçenektir. Özellikle, hızlı kürleşme özellikleri ve orta düzeydeki mekanik dayanıklılıkları ile dikkat çekerler, bu da onları özellikle büyük ölçekli üretim işlemleri ve orta yük taşıyan yapısal uygulamalar için cazip kılar.

2.4.3 Vinilester Matrisli Kompozitler

Vinilester reçineler, epoksi ve polyester reçineler arasında bir köprü görevi görür ve bu iki malzemenin bazı en iyi özelliklerini birleştirir. Kimyasal olarak, vinilesterler, ester gruplarının epoksi reçine matrisine vinil grupları aracılığıyla eklenmesiyle oluşur. Bu özel yapı, vinilester reçinelerine mükemmel mekanik özellikler ve yüksek kimyasal direnç sağlar (Bağcı 2005).

Vinilester reçineler, yüksek çekme dayanımı ve darbe direnci ile karakterize edilir, bu da onları özellikle korozyon kimyasallara ve aşıırı hava koşullarına maruz kalabilecek uygulamalarda ideal kılar. Çekme dayanımları tipik olarak 70 ila 100 MPa arasında değişirken, elastik modülleri 3 ila 4 GPa aralığında bulunur. Bu değerler, vinilesterlerin yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanımını destekler (Ersoy 2001).

Vinilester reçinelerin ısı genleşme katsayıları, epoksi reinelerinkine benzer şekilde düşük olup, bu da onları sıcaklık dalgalanmalarına karşı dayanıklı hale getirir. Isıl iletkenlikleri genellikle 0.15 ila 0.25 W/(m·K) arasında değişir, bu da onları yalıtım malzemeleri olarak kullanım için uygun kılar. Düşük büzülme oranları ve yüksek boyutsal stabilite, vinilester reçinelerin hassas bileşenlerin üretiminde tercih edilmesinin başlıca nedenlerindedir (Henton ve diğ, 2015).

Vinilesterlerin kimyasal direnci, özellikle asitler, alkali ve çözücüler karşısında, polyester reinelerinkinden daha üstündür. Bu, onları kimyasal işleme tesisleri, atık su arıtma sistemleri ve deniz uygulamalarında kullanılan tanklar ve borular gibi korozyon ortamlarda kullanım için ideal kılar (Bağcı 2005).

Ayrıca, vinilester reçineler, mkemmell yapışma özellikleri sergiler ve bu da onları kompozit malzemelerin yapımında kullanılan liflerle güçlü bağlar oluşturabilecekleri anlamına gelir. Bu, yapısal bütünlüğü artırır ve malzemenin genel performansını iyileştirir. Vinilester reçineler genellikle cam, karbon ve aramid liflerle güçlendirilerek kullanılır ve bu kombinasyonlar, yüksek mukavemetli, hafif ve dayanıklı kompozit malzemeler üretir (Henton ve diğ, 2015).

Sonuç olarak, vinilester reçinelerin benzersiz özellik kombinasyonu, onları çeşitli endüstriyel uygulamalarda değerli kılar. Yüksek mukavemet, kimyasal direnç

ve mükemmel yapışma özellikleri, onları otomotiv, havacılık, denizcilik ve kimyasal işleme endüstrilerinde öne çıkan bir seçenek haline getirir.

2.4.4 Fenolik Reçine Matrisli Kompozitler

Fenolik reçineler, termoset reçineler ailesinin önemli bir üyesi olarak, yüksek sıcaklığa ve alevlere karşı mükemmel direnç göstermeleriyle bilinirler. Bu reçineler, fenol ve formaldehitin asidik veya bazik katalizörler yardımıyla reaksiyona girmesiyle üretilir. Üretim sürecindeki katalizör tipi ve reaksiyon koşulları, fenolik reçinenin son özelliklerini belirleyici faktörlerdir (Yıldızhan 2008).

Fenolik reçinelerin çekme dayanımı, yaklaşık 40 ila 90 MPa arasında değişebilir, bu da onları mekanik yük altında bile mükemmel performans sergileyen malzemeler yapar. Elastik modülleri, genellikle 3 ila 15 GPa arasında bulunur, bu yüksek sertlik ve mukavemet sağlar. Fenolik reçinelerin termal direnci, 250°C'ye kadar olan sıcaklıklarda bile bozulmadan kalabilen yapılarından kaynaklanır. Bu özellik, yüksek sıcaklık uygulamalarında, özellikle yangın geciktirici malzemeler olarak kullanımlarını önemli hale getirir (Ersoy 2002).

Fenolik reçinelerin ısıl genleşme katsayıları düşüktür, bu da malzemenin sıcaklık değişikliklerine karşı boyutsal stabilitesini sağlar. Ayrıca, bu reçineler yüksek ısıl iletkenliğe sahip olabilirler, bu da onları ısıya dayanıklı yalıtım malzemeleri olarak uygulamalarda değerli kılar. Fenolik reçinelerin diğer bir dikkat çekici özelliği, su ve buhar absorpsiyonunun düşük olmasıdır, bu da nemli ortamlarda bile performanslarını koruyabildikleri anlamına gelir (Yıldızhan 2008).

Kimyasal direnç açısından, fenolik reçineler çoğu organik çözücüye, asit ve alkaliye karşı yüksek direnç gösterirler. Bu kimyasal inertlik, endüstriyel kaplamalar, yapıştırıcılar ve koruyucu katmanlar gibi uygulamalarda onları tercih edilen bir seçenek yapar. Fenolik reçineler, ayrıca mükemmel dielektrik özelliklere sahiptirler, bu da elektrik izolasyon malzemeleri olarak kullanımlarını mümkün kılar. Kompozit malzemelerde matris malzeme olarak kullanıldıklarında, fenolik reçineler liflerle iyi bir adhezyon sağlar ve böylece kompozitin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirir. Cam, karbon ve aramid liflerle güçlendirilmiş fenolik reçineler, yüksek performanslı uygulamalar için ideal malzemeler üretir. Bu kombinasyonlar, alev direnci, düşük duman üretimi ve toksik gaz emisyonu gibi kritik güvenlik gereksinimlerini karşılayan uygulamalarda özellikle değerlidir (Yıldızhan 2008).

Sonuç olarak, fenolik reçinelerin benzersiz kombinasyonu; yüksek sıcaklık ve alev direnci, mükemmel kimyasal ve mekanik özellikler, düşük su absorpsiyonu ve iyi dielektrik özellikleri, onları otomotiv, havacılık, elektrik ve elektronik endüstrileri ile yangın güvenliği gerektiren pek çok alanda vazgeçilmez kılar.

2.5 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler, farklı malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen ve bu bileşenlerin tek başlarına sunamayacağı üstün özelliklere sahip malzemelerdir. Bu malzemelerin üretim yöntemleri, kullanılan matris ve takviye malzemelerinin türüne, istenen malzeme özelliklerine ve uygulama alanlarına göre çeşitlilik gösterir.

2.5.1 Enjeksiyon Yöntemi ile Kompozit Üretimi

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, özellikle termoplastik ve termoset plastik malzemelerin yüksek hacimli üretimi için kullanılan bir üretim teknolojisidir. Bu yöntem, karmaşık geometrilere sahip parçaların hızlı ve etkin bir şekilde üretilmesini sağlar, bu da onu otomotiv, tüketici elektroniği, tıbbi cihazlar ve günlük kullanım ürünleri gibi geniş bir endüstri yelpazesi için ideal kılar.

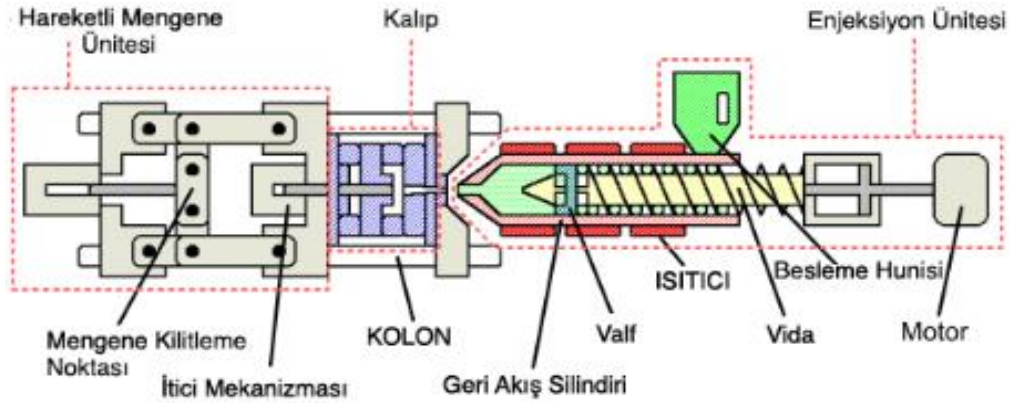
Süreç, plastik granüllerin bir besleme hunisinden bir ısıtma silindrine doğru taşındığı yerden başlar. Bu granüller, silindir içerisinde ısıtılarak eriyik haline getirilir. Eriyik plastik, ardından yüksek basınç altında bir veya birden fazla kalıp boşluğuna enjekte edilir. Plastik, kalıp içerisinde soğutularak katılaşır ve son ürünün şeklini alır. Soğuma süreci tamamlandıktan sonra, kalıp açılır ve ürün dışarı çıkarılır. Enjeksiyon kalıplama, malzeme ve enerji verimliliği, tekrarlanabilirlik ve üretim hızı gibi önemli avantajlar sunar. Ayrıca, bu yöntemle üretilen parçaların yüzey kalitesi yüksektir ve ek işlemlere gerek kalmadan nihai kullanıma uygun hale getirilebilirler (Yıldızhan 2008).

Teknik açıdan, enjeksiyon kalıplama süreci birkaç kritik parametreye bağlıdır. Bunlar arasında eriyik sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, soğuma süresi ve kalıp sıcaklığı bulunur. Eriyik sıcaklığı, malzemenin akışkanlığını ve dolayısıyla kalıp içerisindeki dolum kabiliyetini etkiler. Enjeksiyon basıncı, eriyiğin kalıp boşluklarına tam olarak doldurulmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Soğuma süresi, ürünün kalıptan çıkarılabilmesi için yeterince katılaşmasını sağlar. Kalıp sıcaklığı, ürünün yüzey kalitesini ve soğuma hızını etkileyebilir (Özer 2015).

Bu süreç, malzeme seçimine de büyük önem verir. Termoplastikler, ısıtıldığında eriyebilen ve soğutulduğunda katılaşabilen plastiklerdir. Bu özellik, onları enjeksiyon kalıplama için ideal kılar çünkü işlem tekrar tekrar yapılabilmektedir. Termosetler ise bir kez ısıtıldığında ve şekillendirildiğinde yeniden erimezler, bu da onları tek kullanımlık kalıplama işlemleri için uygun kılar (Yıldızhan 2008).

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, mükemmel mekanik özellikler, yüksek üretim hızı ve karmaşık parça geometrilerinin hassas bir şekilde üretilmesi gibi avantajlar sunar. Ancak, yüksek kalıp maliyetleri ve başlangıç ayarlarının karmaşıklığı, özellikle düşük hacimli üretimler için bir dezavantaj olabilir. Buna rağmen, enjeksiyon kalıplama yöntemi, plastik parçaların seri üretimi için en etkili ve yaygın kullanılan tekniklerden biri olmaya devam etmektedir (Özer 2015). Bu yöntemin şematik temsili,

Şekil 2.9' da görselleştirilmiştir, burada enjeksiyon kalıplama sürecinin ana adımları detaylı bir şekilde sergilenmiştir.



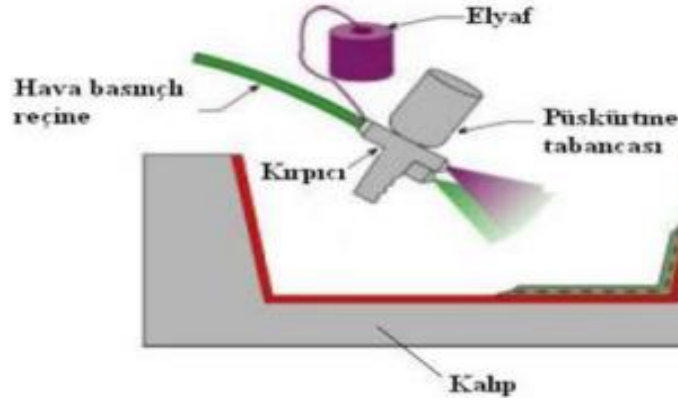
Şekil 2.9: Enjeksiyon ile kalıplama yöntemi şematik görüntüsü (Mold 2021)

2.5.2 Püskürtme Yöntemi ile Kompozit Üretimi

Püskürtme yöntemi ile üretim, özellikle metal ve polimer malzemelerin kaplama ve şekillendirme işlemlerinde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, malzemenin sıvı veya toz formunun yüksek hızda bir yüzeye püskürtülerek uygulanmasını içerir. Püskürtme yöntemi, malzemenin homojen bir tabaka halinde dağıtılmasını sağlar ve bu da ürün yüzeyinin kalitesini artırır (Ersoy 2002).

Metal püskürtme işlemi, metalik malzemelerin eritilmesi ve yüksek hızda bir nozuldan geçirilerek yüzeylere püskürtülmesiyle gerçekleşir. Bu yöntem, özellikle aşınma, korozyon direnci ve termal bariyer kaplamaları gibi özellikleri geliştirmek için kullanılır. Havacılık, otomotiv ve enerji sektörlerinde kritik bileşenlerin ömrünü uzatmak için yaygın olarak tercih edilir. Polimer püskürtme işlemi ise, termoplastik veya termoset polimerlerin eritilmesi ve bir yüzeye püskürtülerek kaplanmasıyla gerçekleşir. Bu yöntem, otomotiv iç ve dış trim parçaları, tüketici elektroniği ve medikal cihazlar gibi birçok alanda kullanılır. Polimer püskürtme, yüksek yüzey kalitesi, hızlı üretim süreci ve karmaşık geometrilerin kolayca şekillendirilmesi gibi

avantajlar sunar (Şahin 2001). Şekil 2.10' da elyaf püskürtme yöntemi şematize görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.10: Elyaf püskürtme yöntemi şematize görüntüsü (Korkmaz 2014)

Püskürtme yöntemi ile üretim, ayrıca toz bazlı malzemelerin kullanıldığı toz püskürtme tekniklerini de içerir. Toz püskürtme, özellikle seramik ve metal tozlarının kullanıldığı uygulamalarda tercih edilir. Bu yöntem, yüksek sıcaklıkta bir fırında sinterlenerek malzemenin yoğunlaştırılması ve mekanik özelliklerinin artırılmasıyla tamamlanır.

Püskürtme yöntemi ile üretim tekniklerinin başarısı, kullanılan malzemenin özellikleri, püskürtme parametreleri (nozül tasarımı, püskürtme basıncı ve sıcaklığı) ve uygulama yüzeyinin hazırlığına bağlıdır. Bu yöntemler, malzeme israfını azaltma, üretim süreçlerini hızlandırma ve ürünlerin performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamalar ve parçalar, yüksek performans gerektiren birçok endüstriyel ve ticari uygulamada kritik rol oynar (İnançer 2015).

2.5.3 Hazır Kalıplama Yöntemi ile Kompozit Üretimi

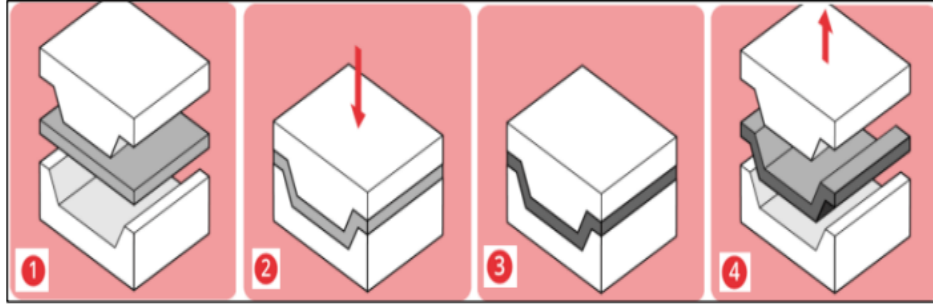
Hazır kalıplama yöntemi (preform molding), kompozit malzeme üretiminde sıklıkla başvurulan bir teknik olarak bilinir. Bu yöntem, önceden şekillendirilmiş kalıplar kullanarak kompozit malzemelerin hassas ve tutarlı bir şekilde üretilmesini sağlar. Bu yöntem, kompozit malzemelerin daha verimli ve kontrollü bir şekilde üretilmesini sağlayarak, yüksek kalite ve performans standartlarının karşılanmasına olanak tanır. Hazır kalıplama yöntemi, önceden şekillendirilmiş ve takviye malzemesiyle zenginleştirilmiş "preform"ların kullanımını içerir. Bu preformlar, son ürünün geometrisine uygun şekilde önceden hazırlanır ve daha sonra matris malzemesiyle birleştirilerek kompozit malzemenin üretimi gerçekleştirilir (Özer 2015).

Bu yöntemde, takviye malzemesi (genellikle fiber veya kumaş formunda) öncelikle istenen şekil ve boyutlarda hazırlanır. Hazırlanan bu preformlar, ardından kalıplama işlemi için kullanılır. Matris malzemesi (genellikle bir reçine), preform malzemenin üzerine uygulanır ve ardından ısı ve basınç altında kürleme (sertleşme) işlemi gerçekleştirilir. Bu süreç, matris malzemesinin preform içerisine nüfuz etmesini ve iki malzemenin homojen bir şekilde birleşmesini sağlar. Sonuçta, yüksek mukavemetli ve hafif kompozit malzemeler elde edilir (İnançer 2015).

Hazır kalıplama yöntemi, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamaların üretiminde tercih edilir. Havacılık, otomotiv, denizcilik ve rüzgâr türbini gibi sektörlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu yöntem, malzemenin mekanik özelliklerini optimize etme, üretim süreçlerini hızlandırma ve malzeme israfını azaltma gibi önemli avantajlar sunar (Özer 2015).

Hazır kalıplama yöntemi, aynı zamanda yüksek üretim verimliliği ve tekrarlanabilirlik sağlar. Önceden hazırlanmış preformların kullanımı, malzeme yerleşiminde tutarlılık sağlar ve kürleme sürecinin daha kontrollü gerçekleştirilmesine olanak tanır. Ayrıca, bu yöntem, üretim sürecinde gereken işçilik maliyetlerini

azaltabilir ve ürün kalitesinin artırılmasına katkıda bulunur. Şekil 2.11’ de hazır kalıplama işlem basamakları verilmiştir.



Şekil 2.11: Hazır kalıplama işlem basamakları (Carruthers 2018).

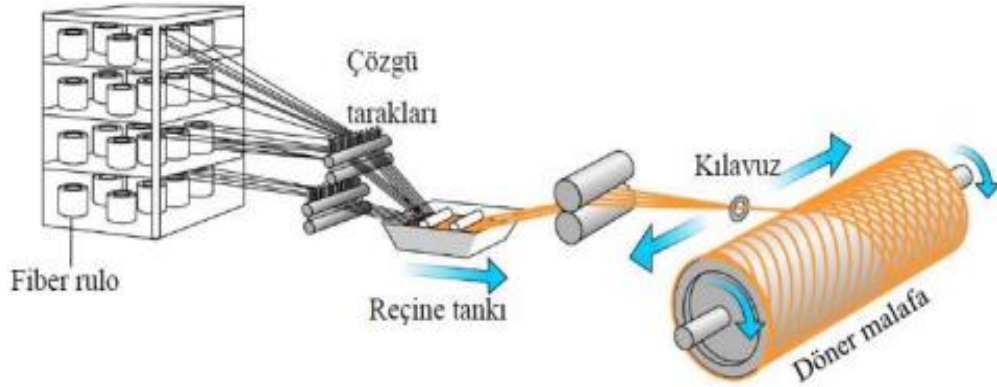
Sonuç olarak, hazır kalıplama yöntemi, modern mühendislik ve üretim alanlarında kritik bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, kompozit malzeme üretiminde verimlilik ve kaliteyi önemli ölçüde iyileştirerek, endüstriyel kullanım için uygun, yüksek performanslı malzemelerin tasarlanmasını ve üretilmesini mümkün kılar.

2.5.4 Elyaf Sarma Yöntemi ile Kompozit Üretimi

Elyaf sarma yöntemi, yüksek mukavemet ve hafiflik özelliklerine sahip kompozit yapıların üretilmesi için tercih edilen bir üretim tekniğidir. Bu yöntem, özellikle yüksek performans gerektiren havacılık, otomotiv, denizcilik ve endüstriyel borulama sistemleri gibi alanlarda tercih edilir. Elyaf sarma yönteminin temel prensibi, sürekli fiberlerin veya elyafların, bir reçine matrisi ile ıslatılarak ve belirli bir açıyla bir mandrel üzerine sarılmasıdır. Bu işlem, son ürünün mekanik özelliklerini ve şeklini belirleyen katmanlı bir kompozit malzeme yapısı oluşturur (İnançer 2015).

Üretim süreci, genellikle bir bilgisayar kontrol sistemi tarafından yönetilen otomatik elyaf sarma makineleri kullanılarak gerçekleştirilir. Makine, elyafları eşit bir şekilde dağıtmak ve istenen açılarda sarabilmek için programlanabilir. Elyafın sarılma

açısı, kompozit malzemenin mukavemet, sertlik ve esneklik gibi özelliklerini doğrudan etkiler. Genellikle, yük taşıma kapasitesini artırmak ve malzemenin belirli yönlerdeki mukavemetini optimize etmek için birden fazla katman ve farklı sarım açıları kullanılır (İnançer 2015). Şekil 2.12’ de elyaf sarma yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Elyaf sarma yöntemi ile üretim şeması (Bayraktar 2016)

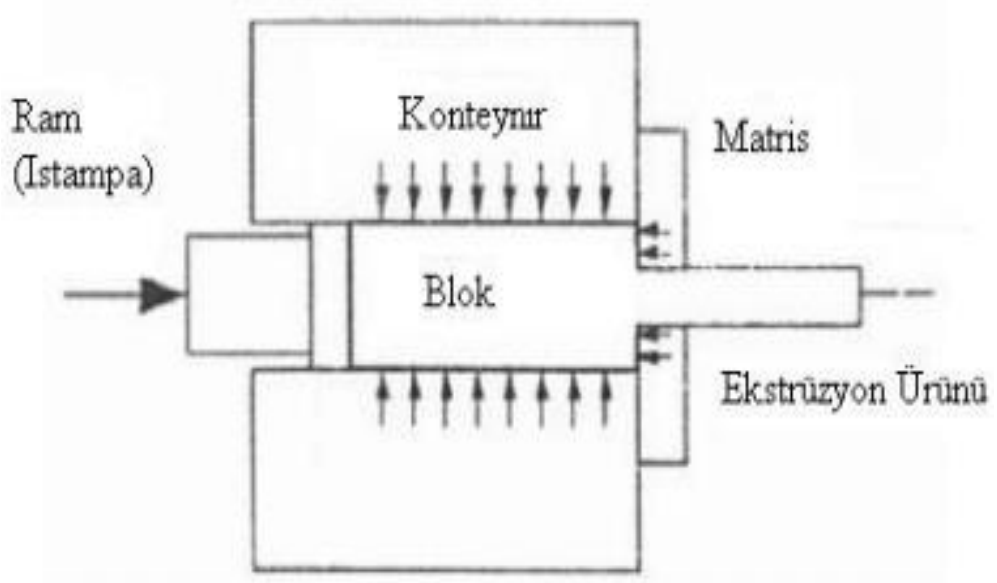
Üretilen kompozit malzemenin karakteristik özellikleri, kullanılan elyaf türüne (örneğin cam, karbon, aramid gibi) ve matris malzemesine (epoksi, polyester, vinilester gibi) bağlıdır. Elyaf sarma yöntemi ile üretilen yapılar, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, üstün korozyon direnci ve özelleştirilebilir tasarım özellikleriyle dikkat çeker. Bu yöntem, yapısal bütünlük ve performansı optimize etmek için elyaf ve matrisin etkileşimini mükemmel bir şekilde yönetir. Bu yöntem, özellikle basınç altında çalışan borular, gaz tüpleri, roket motoru gövdeleri ve spor ekipmanları gibi ürünlerin üretiminde avantajlar sunar. Elyaf sarma sürecinin bir diğer önemli yönü, kürlenme aşamasıdır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra, kompozit malzeme genellikle ısı ve/veya basınç altında kürlenir. Bu işlem, reçinenin sertleşmesini ve elyaf matrisi ile tamamen bütünleşmesini sağlar. Kürlenme süreci, malzemenin nihai mukavemeti, sertliği ve diğer mekanik özelliklerinin belirleyen kritik bir adımdır (Bayraktar 2016).

Elyaf sarma yöntemi, üretim esnekliği, malzeme verimliliği ve yüksek mukavemetli kompozit malzemelerin üretimi açısından önemli avantajlar sunar. Ancak, bu yöntemin uygulanması, yüksek teknik bilgi gerektirir ve üretim sürecinin optimizasyonu için detaylı planlama ve kalite kontrol işlemleri önemlidir. Sonuç olarak, elyaf sarma yöntemi, modern mühendislik ve üretim alanlarında vazgeçilmez bir teknoloji olarak ön plana çıkmaktadır.

2.5.5 Ekstrüzyon Yöntemi ile Kompozit Üretimi

Ekstrüzyon yöntemi, özellikle polimerler, metaller ve yiyecekler gibi farklı malzemelerin sürekli uzunlukta profiller halinde şekillendirilmesi için kullanılan bir üretim tekniğidir. Bu yöntem, malzemenin bir silindir içinde ısıtılarak yumuşatılması ve ardından belirli bir şekle sahip bir kalıptan (diz) zorlanarak geçirilmesi prensibine dayanır. Ekstrüzyon işlemi sırasında malzeme hem şekillendirilir hem de istenen mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklere kavuşturulur. Ekstrüzyon süreci, genellikle bir besleme bölümü, bir ısıtma bölümü, bir vida (vida sistemi) ve bir kalıp bölümünden oluşur. Besleme bölümünde malzeme, genellikle granül veya toz formunda, ekstrüzyon makinesine beslenir. Isıtma bölümünde malzeme, vida tarafından ileri doğru itilirken ısıtılır ve yumuşatılır. Vida, malzemenin hem karıştırılmasını hem de ekstrüzyon kalıbına doğru homojen bir şekilde itilmesini sağlar. Malzeme, yüksek basınç altında kalıptan geçerken şekillendirilir ve sonrasında soğutma bölümüne ulaşır. Soğutma işlemi, malzemenin sertleşmesini ve istenen son şeklinin korunmasını sağlar (İnançer 2015).

Ekstrüzyon yöntemi, çok yönlülüğü ve verimliliği sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Polimer ekstrüzyonu, plastik borular, profiller, levhalar, film ve kaplamalar gibi birçok ürünün üretiminde kullanılır. Metal ekstrüzyonu, alüminyum veya bakır gibi metallerin, yapısal profiller, borular ve çubuklar gibi ürünlere dönüştürülmesi için tercih edilir. Yiyecek ekstrüzyonu ise, makarna, atıştırmalıklar ve bazı hazır yiyeceklerin üretiminde önemli bir rol oynar (Bayraktar 2016). Şekil 2.13' de ekstrüzyon şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Ekstrüzyon yöntemi ile üretimin şematik gösterimi (Saha ve diğ 2000)

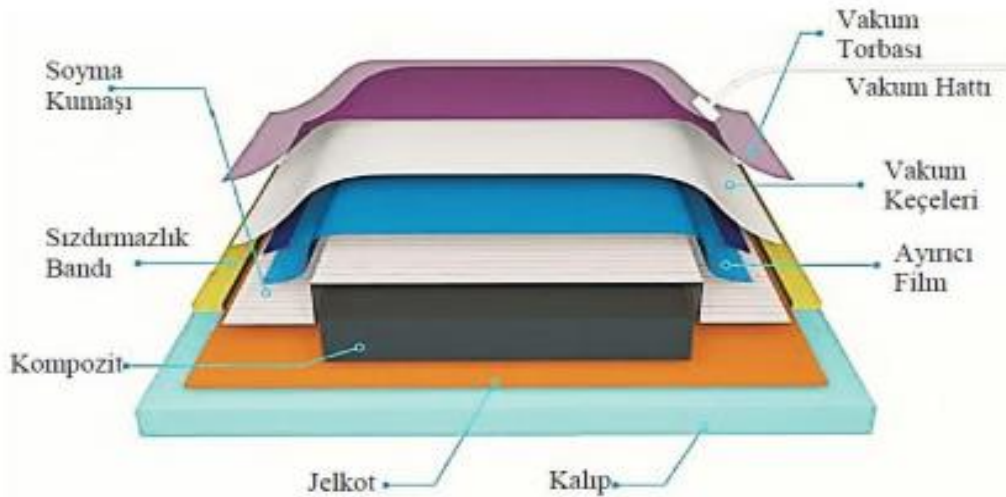
Ekstrüzyonun teknik avantajları arasında, yüksek üretim hızı, malzeme tasarrufu, karmaşık şekillerin ve ince duvarlı yapıların kolayca üretilmesi ve ürün kalitesinin yüksek düzeyde kontrol edilebilmesi bulunur. Ayrıca, ekstrüzyon süreci, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirebilir ve ürünlerin belirli uygulamalara özgü gereksinimlerini karşılayacak şekilde özelleştirilmesine olanak tanır (İnançer 2015).

Ancak, ekstrüzyon sürecinin başarısı, makine ayarlarının doğru yapılmasına, kalıp tasarımının optimize edilmesine ve kullanılan malzemenin özelliklerine bağlıdır. Malzemenin viskozitesi, ısıtma sıcaklığı, vida hızı ve basınç gibi parametreler, son ürünün kalitesini doğrudan etkileyen faktörler arasındadır. Bu nedenle, ekstrüzyon işleminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi, detaylı bir süreç planlaması ve kalite kontrol mekanizmalarının uygulanmasını gerektirir.

2.5.6 Vakum Yöntemi ile Kompozit Üretimi

Vakum yöntemi, kompozit malzeme üretiminde sıklıkla başvurulan bir tekniktir. Bu metod, yüksek kalitede, hafif ve dayanıklılığı yüksek parçaların üretilmesinde özellikle tercih edilen bir yöntem olarak bilinir. Bu sayede, üretim sürecinde malzemenin yoğunluğu artırılarak mükemmel bir yapısal bütünlük sağlanır. Vakum infüzyonu olarak da bilinen bu süreç, reçine transferi yöntemlerinden biridir ve malzemenin kalıp içerisine vakum yardımıyla çekilmesi esasına dayanır.

Üretim süreci, takviye malzemesinin (genellikle fiber kumaş) kalıp üzerine yerleştirilmesiyle başlar. Takviye malzemesi üzerine, vakum torbası adı verilen ve hava geçirmez bir filmle kaplanmış bir alan oluşturulur. Vakum pompası kullanılarak, vakum torbası altındaki hava dışarı çekilir ve bu işlem sırasında atmosferik basınç, reçineyi kalıp içerisindeki takviye malzemesine doğru itmek için kullanılır. Reçine, önceden hazırlanmış bir besleme hattı aracılığıyla, vakumun uygulandığı alana yavaşça akıtılır ve takviye malzemesi boyunca homojen bir şekilde dağıtılır (Schmidt 2008). Şekil 2.14 'de vakum yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.14: Vakum yönteminin şematik görüntüsü (Bayraktar 2016.)

Vakum yöntemi ile üretim, reçinenin takviye malzemesine eşit olarak nüfuz etmesini sağlayarak hava kabarcıklarının ve boşlukların oluşumunu minimize eder.

Buda, malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine ve ürün kalitesinin artırılmasına katkıda bulunur. Ayrıca, bu yöntem malzeme israfını azaltır ve çevre üzerindeki etkisini minimize eder, çünkü reçine sadece gerekli miktarda kullanılır ve aşırı reçine vakumla uzaklaştırılabilir (Bayraktar 2016).

Vakum yöntemi ile üretimin avantajları arasında yüksek kaliteli yüzey kaplamalarının elde edilmesi, daha iyi laminasyon kontrolü, düşük reçine içeriği ile daha hafif ve daha mukavemetli parçaların üretilebilmesi yer alır. Bu yöntem aynı zamanda, büyük ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde de etkilidir (Schmidt 2008).

Bu üretim teknolojisi, havacılık, otomotiv, denizcilik ve rüzgâr türbini gibi sektörlerde kullanılan yüksek performanslı kompozit malzemelerin üretiminde özellikle değerlidir. Vakum yöntemi ile üretim, mühendislerin ve tasarımcıların, belirli performans gereksinimlerini karşılayan özelleştirilmiş malzeme çözümleri geliştirmelerine olanak tanır (Schmidt 2008).

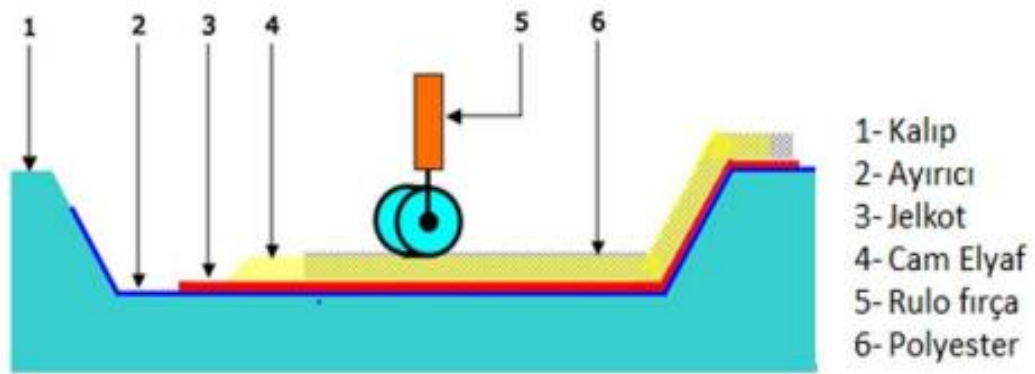
Ancak, bu yöntemin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, vakum seviyesinin doğru bir şekilde kontrol edilmesi, reçine ve takviye malzemesinin uygun şekilde seçilmesi ve kalıp tasarımının optimizasyonu gibi faktörlerin dikkatlice yönetilmesi gerekir. Vakum yöntemi ile üretim, yüksek kaliteli kompozit malzemelerin verimli bir şekilde üretilmesini sağlayan sofistike bir süreçtir (İnançer 2015).

2.5.7 El Yatırma Yöntemi ile Kompozit Üretimi

El yatırma yöntemi, kompozit malzeme üretiminde kullanılan en eski ve en basit tekniklerden biridir. Bu yöntem, düşük ila orta hacimli üretimler için uygundur ve özellikle tek tek veya kısıtlı sayıda üretim gerektiren özel uygulamalarda tercih

edilir. El yatırma yöntemi, fiber takviyeli plastik (FRP) kompozitlerin üretimi için yaygın olarak kullanılır ve genellikle cam elyafı ve polimer matris malzemeleri (örneğin, polyester veya epoksi reçine) ile çalışır (Şahin 2001).

Üretim süreci, kalıbın hazırlanması ile başlar. Kalıp, genellikle ürünün negatif şeklini oluşturan ve yüzey kalitesini doğrudan etkileyen parçadır. Kalıp yüzeyi, yapışmayı önlemek ve yüzey kalitesini artırmak için bir ayrıştırıcı madde ile kaplanır. Daha sonra, takviye malzemesi olan elyaf (genellikle cam elyafı matları veya dokumalar) kalıp üzerine yerleştirilir (Aran 1990). Şekil 2.15’ de el yatırma yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.15: El yatırma yöntemi şematik yöntemi (Dinkci 2020)

Takviye malzemesi kalıba yerleştirildikten sonra, matris malzemesi olan reçine, bir fırça veya spatula kullanılarak elyafın üzerine uygulanır. Reçine, elyafın her yerine nüfuz edecek şekilde dikkatlice yayılır. Bu aşamada, hava kabarcıklarının ve boşlukların oluşumunu önlemek için malzeme üzerinde yeterli basınç uygulanır. Bazen, malzemenin daha iyi nüfuz etmesi ve hava kabarcıklarının çıkarılması için bir silindir veya hava çıkarma aracı kullanılır. El yatırma yönteminin avantajları arasında düşük başlangıç maliyetleri, basit üretim süreci ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilebilmesi yer alır. Ayrıca, bu yöntem, üreticilere malzeme kalınlığını ve takviye düzenini kolayca ayarlama imkânı tanır, bu da özel uygulama gereksinimlerine göre kompozit parçaların özelleştirilmesini sağlar (İnançer 2015).

Ancak, el yatırma yöntemi işçilik yoğun bir süreçtir ve üretim hızı nispeten düşüktür. Ayrıca, ürün kalitesi büyük ölçüde uygulama becerilerine ve deneyimine bağlıdır. Reçine ve elyaf arasındaki tutarlı ve homojen bir karışımın sağlanması, yüksek kaliteli bir kompozit malzeme üretiminin anahtarıdır. Hava kabarcıkları ve boşluklar gibi kusurlar, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir (Aran 1990).

Sonuç itibarıyla, el yatırma yöntemi, özellikle belirli uygulamalara ve düşükten orta hacimli üretime yönelik esnek ve maliyet açısından verimli bir kompozit üretim tekniği olarak öne çıkmaktadır. Bu metot, kompozit malzeme üreticileri tarafından özellikle özel parça ve prototip üretimlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Dinkci 2020)

2.5.8 Sol- Jel Yöntemi ile Kompozit Üretimi

Sol-jel yöntemi, nano boyutta malzemelerin ve kompozitlerin üretilmesi için kullanılan kritik bir kimyasal tekniktir. Bu proses, metal oksitler ya da diğer inorganik malzemelerin yüksek düzeyde saflık ve homojenlikle, ayrıca kontrollü boyutlarda sentezlenmesine imkân tanır. İşlem, genellikle metal alkoksitlerin veya metal tuzlarının bir çözücünde çözünmesiyle başlar ve elde edilen çözelti (sol), bir dizi hidroliz ve polikondenzasyon reaksiyonlarına maruz kalarak jelleşmeye başlar. Bu jelleşme, malzemenin viskozitesinin artışına ve sonucunda katı bir jel oluşumuna sebep olur. Oluşan jel, istenilen forma sokulabilir ve daha sonra kurutularak ve ısıtılarak yoğunlaştırılır, bu işlem sonucunda amorf ya da kristal yapıda bir inorganik ağ yapı ortaya çıkar (Bringker 1990)

Sol-jel yöntemi ile üretilen kompozitler, özellikle optik, elektronik, kataliz ve biyomedikal alanlarında kullanılan fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesinde büyük önem taşır. Bu yöntem, nano ölçekli partiküllerin, fiberlerin veya diğer takviye

malzemelerinin bir matris içerisine homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlar, bu da malzemenin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirebilir.

Sol-jel yönteminin avantajları arasında düşük sıcaklıkta işleme imkânı, yüksek saflıkta ve homojen malzemelerin üretimi, karmaşık şekillerin ve ince filmlerin kolayca oluşturulabilmesi ve malzeme özelliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi yer alır. Ayrıca, bu yöntem, çok fonksiyonlu malzemelerin ve hibrit kompozitlerin tasarlanması ve üretilmesi için geniş bir esneklik sunar (Arkles 2001).

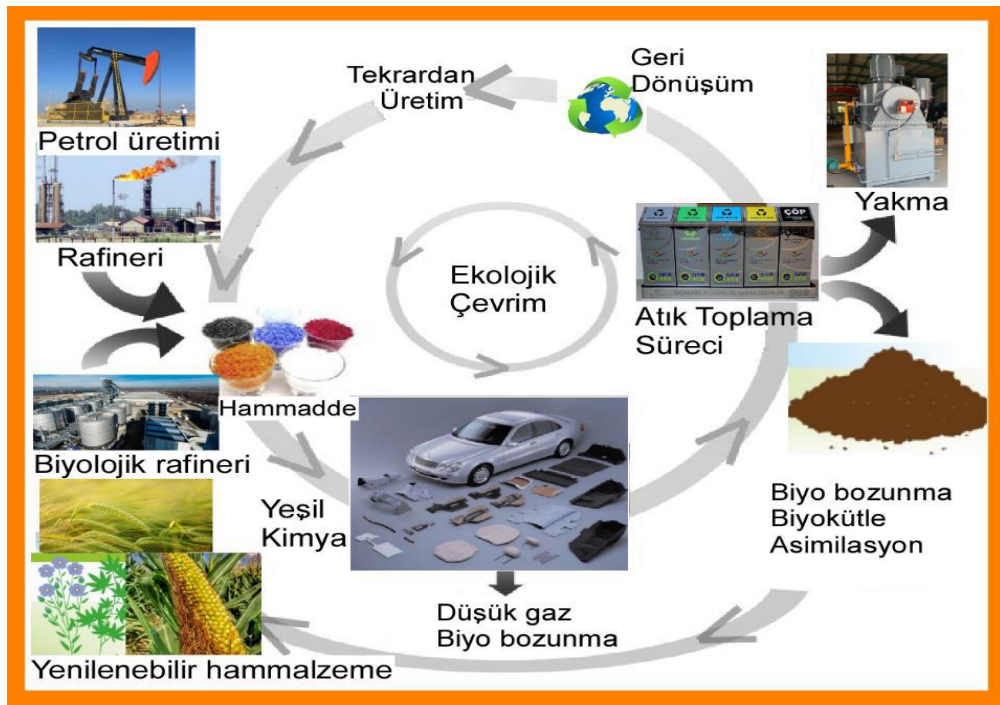
Sol-jel işlemi sırasında, malzemenin mikro yapısı ve özellikleri, kullanılan prekürsörlerin türü, çözücü, su/prekürsör oranı, pH değeri ve işlem sıcaklığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, hedeflenen uygulamalara özel malzemelerin geliştirilmesini sağlar. Son kurutma ve pişirme aşamaları, kompozitin nihai özelliklerini belirleyen kritik adımlardır. Kurutma, jelin çözücü içeriğinin azaltılmasını ve por yapısının oluşumunu sağlar. Pişirme (sinterleme), malzemenin yoğunlaştırılmasını, faz dönüşümlerinin gerçekleşmesini ve kristal yapıların oluşumunu teşvik eder. Bu aşamalar, malzemenin mekanik mukavemetini, kimyasal dayanıklılığını ve fonksiyonel özelliklerini önemli ölçüde etkiler (Woters 2004).

Sol-jel yöntemi ile kompozit üretimi, modern malzeme biliminin önemli bir alanıdır ve bu yöntemle üretilen malzemeler, teknolojinin birçok alanında yenilikçi çözümler sunmaktadır.

2.6 Biyokompozitler

Biyokompozitler, doğal lifler veya biyopolimerler gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen takviye malzemeleri ile sentetik veya doğal matris malzemelerinin birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelerdir.

Bu malzemeler, çevresel sürdürülebilirlik, biyoyumluluk ve yenilenebilirlik gibi avantajlar sunarak geleneksel petrokimyasal bazlı kompozit malzemelerin yerini almayı amaçlar. Biyokompozitlerin geliştirilmesi, özellikle otomotiv, inşaat, ambalaj, tıp ve elektronik gibi endüstrilerde malzeme biliminde bir devrim yaratma potansiyeline sahiptir (Vilaplana 2010). Şekil 2.16' da biyokompozit ömür çevrimi göstermiştir.



Şekil 2.16: Biyokompozitlerin ömür çevrimi (Vilaplana 2010)

2.6.1 Takviye Malzemeleri

Biyokompozitlerin takviye malzemeleri olarak kullanılan doğal lifler, genellikle bitkisel kaynaklardan (örneğin, keten, jüt, bambu, kenevir) elde edilir. Bu lifler, yüksek mukavemet ve sertlik, düşük yoğunluk ve mükemmel çevresel bozunma özellikleri sunar. Doğal lifler, ayrıca karbon ayak izini azaltma ve enerji tüketimini düşürme avantajlarına da sahiptir. Biyopolimerler ise, polilaktik asit (PLA), polihidroksialkanoatlar (PHA), selüloz bazlı polimerler ve protein bazlı polimerler gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen polimerlerdir (Vilaplana 2010).

2.6.2 Matris Malzemeleri

Biyokompozitler, sürdürülebilirlik ve çevresel duyarlılık prensiplerini temel olarak geliştirilen yenilikçi malzemelerdir. Bu malzemeler, polimerik bir matris ve doğal veya sentetik liflerin birleşiminden oluşur, böylece geleneksel kompozit malzemelere alternatif, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir özellikler sunarlar. Matris olarak kullanılan polimerler, hem petrol bazlı sentetik polimerler (örneğin, polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), polyester (PS)) hem de yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyopolimerler (örneğin, polilaktik asit (PLA), polihidroksibütirat (PHB), polihidroksialkanoatlar (PHA)) olabilir. Bu çeşitlilik, biyokompozitlerin geniş bir uygulama yelpazesine uyum sağlamasını mümkün kılar (Koronis 2018).

2.6.3 Üretim Teknikleri

Biyokompozitlerin üretimi için çeşitli işleme teknikleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, el yatırma ve sıkıştırma kalıplama gibi geleneksel kompozit üretim yöntemleri yer alır. Üretim yöntemi, kullanılan takviye malzemesi ve matrisin türüne bağlı olarak seçilir. Bu teknikler, biyokompozit malzemelerin özelliklerini ve uygulama alanlarını belirleyen kritik faktörlerdir.

2.6.4 Avantajlar ve Uygulamalar

Biyokompozitler, doğal kaynaklardan elde edilen lifler ve biyopolimerlerden oluşan, çevre dostu ve sürdürülebilir malzemelerdir. Bu malzemeler, petrol bazlı kompozitlere alternatif olarak geliştirilmiş olup, geri dönüştürülebilir, hafif ve maliyet açısından verimlidirler. Yapıları, doğal liflerin bir polimer matris içinde takviye edilmesiyle oluşturulur ve bu sayede yüksek mukavemet ve biyoyumluluk gibi özellikler sunarlar.

Otomotiv, inşaat, ambalaj ve tıp gibi çok çeşitli sektörlerde kullanılırlar, bu da onları araçların ağırlığını azaltma, çevreye duyarlı yapı malzemeleri sunma, biyolojik olarak parçalanabilir ambalajlar üretme ve biyoyumlu tıbbi uygulamalar geliştirme

konularında ideal kılar. Biyokompozitlerin gelişimi, sürdürülebilir teknolojilerin ve malzemelerin geleceği için büyük önem taşır (Vilaplana 2010).

2.6.5 Zorluklar ve Gelecek Perspektifleri

Biyokompozitlerin geniş çapta kullanımının önündeki engeller arasında yüksek maliyet, sınırlı mekanik özellikler ve takviye malzemelerinin su emme eğilimi yer alır. Ayrıca, doğal liflerin ve biyopolimerlerin üretim süreçlerinin ölçeklendirilmesi ve standardizasyonu konusunda zorluklar bulunmaktadır. Ancak, araştırma ve geliştirme çalışmaları, bu zorlukların üstesinden gelmeye ve biyokompozitlerin performansını artırmaya yöneliktir. Gelecekte, biyokompozitler, sürdürülebilir malzeme çözümleri sağlama konusunda önemli bir rol oynamaya devam edecektir.

2.6.6 Yeşil Kompozitler

Yeşil kompozitler, sürdürülebilirlik ve çevre dostluğu ön planda tutularak geliştirilen yeni nesil malzemelerdir. Bu kompozitler hem takviye malzemeleri hem de polimer matrisler açısından tamamen doğal kaynaklardan üretilirler. Hafiflik ve mukavemet gibi üstün özellikleri sayesinde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler ve aynı zamanda geri dönüştürülebilir veya biyolojik olarak parçalanabilir olmalarıyla öne çıkarlar. Artan çevresel bilinç ve polimer bazlı malzemelere olan talep, yenilenebilir ve biyolojik olarak parçalanabilen bu malzemelere yönelik ilgiyi artırmıştır. Yeşil kompozitler, otomotivden inşaata, ambalajdan tıbbi uygulamalara kadar pek çok alanda kullanılabilir, böylece sürdürülebilir gelişmeye katkıda bulunurlar (Mantia 2011).

2.6.7 Doğal Lif Takviyeli Kompozitler

Doğal lif takviyeli kompozitler, günümüzde çevresel sürdürülebilirlik ve yenilenebilir kaynak kullanımının artan önemi ile büyük ilgi görmektedir. Bu yenilikçi malzemeler, sentetik lifler yerine kenevir, jüt, keten, bambu ve sisal gibi çeşitli doğal

liflerin bir polimer matris içerisinde kullanılmasıyla üretilir. Doğal liflerin seçilmesinin ana nedenleri arasında düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, biyolojik olarak parçalanabilirlik, karbon ayak izinin düşük olması ve enerji tüketiminin az olması gibi avantajlar yer alır. Ayrıca, bu lifler maliyet açısından sentetik liflere kıyasla daha ekonomiktir ve tarımsal yan ürünler olarak değerlendirildiklerinde ekonomik değeri artırır (Mantia 2011).

Doğal lif takviyeli kompozitlerin üretimi, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, sıkıştırma kalıplama ve el yatırma gibi geleneksel kompozit üretim teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Bu süreçler, liflerin polimer matris içerisine homojen bir şekilde dağıtılmasını ve iyi bir adhezyonun sağlanmasını hedefler. Otomotivden inşaat, ambalajdan spor ekipmanlarına kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan doğal lif takviyeli kompozitler, özellikle hafif bileşenlerin üretiminde tercih edilir. Bu malzemeler, araçların ağırlığının azaltılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunarak çevresel etkiyi azaltır (Hatipoğlu 2020). Tablo 2.4' de doğal lif takviyeli kompozit olumlu ve olumsuz durumları verilmiştir.

Ancak, bu malzemelerin geniş kullanım alanlarına rağmen, nem emme eğilimi, lif-matris arayüzeyindeki adhezyonun iyileştirilmesi ve işleme tekniklerinin optimize edilmesi gibi zorluklar da bulunmaktadır. Bu sorunların üstesinden gelmek için yüzey işlemleri ve uyumlaştırıcı ajanların kullanımı gibi stratejiler geliştirilmektedir. Küresel ısınmaya neden olan CO₂ emisyonlarının büyük bir kısmı fosil yakıtlardan kaynaklanmakta olup, Avrupa Birliği gibi bölgeler sera gazı salınımını azaltma yönünde önemli kararlar almıştır. Bu bağlamda, doğal lif takviyeli kompozitler, düşük CO₂ salınımı ve doğal kaynakların kullanımıyla sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adımdır. Doğal lifler, geri kazanımı olmayan ve CO₂ emisyonu yüksek olan cam ve karbon liflerine kıyasla daha çevreci bir alternatif sunar. Lif ve matris arasındaki adhezyonu artırmak ve kompozitlerin mekanik ve ısı özelliklerini iyileştirmek için çeşitli ara yüzey modifikasyon teknikleri kullanılmaktadır (Hassan 2019; Patil 2017; Hatipoğlu 2020; Couture 2016).

Tablo 2.4: Doğal lif takviyeli kompozitlerin olumlu ve olumsuz durumları (Pickering ve Huda 2016)

Olumlu	Olumsuz
Doğal lifler, düşük yoğunluğa ve yüksek özgül dayanıma ve sertliğe sahiptir.	Liflerin yanmasından dolayı matris seçeneğini kısıtlayan daha düşük işlem sıcaklıkları
Doğal liflerin üretimi, minimal enerji tüketimi gerektirir ve büyüme süreçleri sırasında CO ₂ emilip oksijen salınımı sağlar.	Doğal lif takviyeli kompozitler, sentetik lif takviyeli kompozitlere kıyasla genellikle daha düşük dayanıma ve darbe direncine sahiptir; ancak, uygun işleme teknikleri ile bu dayanım belirgin şekilde artırılabilir.
Doğal lifler, sentetik elyaf kompozitlere kıyasla işleme ekipmanında daha az aşındırıcı hasar oluşturan düşük riskli bir üretim sürecine sahiptir.	Neme olan ilgi Özelliklerinin kontrolü çok daha zordur.
Doğal lifler, sentetik liflere kıyasla üretim maliyeti açısından çok daha ekonomiktir; karbon liften yaklaşık %95 daha ucuz ve yaklaşık 4 GJ enerji tüketirler. Ayrıca, kullanım ömrünün sonunda yakıldıklarında daha az zehirli gaz salarlar.	
Sentetik lifli kompozitlere kıyasla üretim ekipmanları daha az aşınır	

Sonuç olarak, doğal lif takviyeli kompozitler, ekolojik dengeyi koruyan, yenilenebilir kaynaklardan üretilen ve yüksek performanslı malzeme çözümleri sunan

geleceğin malzemeleridir. Bu malzemeler, sürdürülebilir gelişmeyi destekleyerek geleneksel malzemelere çevreci bir alternatif oluşturur.

2.7 Doğal Lifler

Doğal lifler, genellikle bitkisel, hayvansal veya mineral kaynaklardan elde edilen, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan liflerdir. Bu lifler, çevresel sürdürülebilirlik, biyobozunurluk ve özgün mekanik özellikler gibi avantajlar sunarlar.

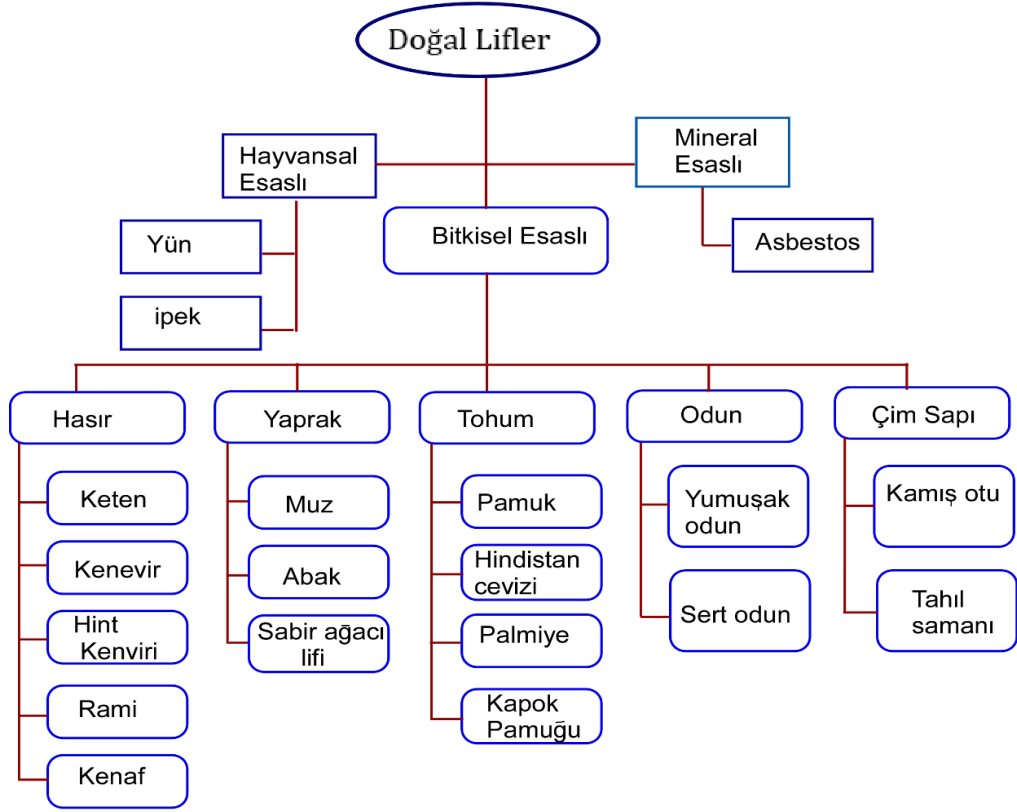
Hayvansal Kaynaklı Lifler, özellikle yün ve ipek gibi, sıcaklık düzenleme kabiliyetleri ve estetik görünümleri ile bilinirler. Yün, doğal kıvrımlı yapısı sayesinde ısıyı iyi tutar ve soğuk havalarda sıcaklık sağlar. İpek ise, parlaklığı ve pürüzsüz dokusu ile lüks tekstil ürünlerinin vazgeçilmez bir bileşenidir (Thakur 2014).

Mineral Kaynaklı Lifler, genellikle inşaat ve izolasyon malzemelerinde kullanılır. Cam ve bazalt lifleri gibi lifler, yüksek sıcaklık direnci ve mukavemet özellikleri ile dikkat çekerler. Bununla birlikte, asbest gibi bazı mineral liflerin sağlık üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle kullanımları ciddi şekilde kısıtlanmış veya tamamen yasaklanmıştır (Koronis ve A 2018).

Bitkisel Kaynaklı Lifler geniş bir yelpazede bulunur ve pamuk, keten, kenevir, jüt ve bambu gibi kaynaklardan elde edilirler. Bu lifler tekstil ve kompozit malzeme üretiminde popülerdir çünkü hava alabilirlik, nemi emme kapasitesi ve iyi ısı yalıtımı gibi özelliklere sahiptirler. Örneğin, keten liflerinin yüksek mukavemeti ve düşük elastikiyeti kumaş ve halat yapımında tercih edilirken, bambu liflerinin hızlı yenilenme oranı ve antimikrobiyal özellikleri onları çevre dostu bir seçenek yapar.

Doğal lifler, dört farklı katmandan oluşan komplike bir yapıya sahiptir ve her katman farklı kalınlıkta ve kimyasal bileşimdedir. Hücre duvarları, bir adet ince birincil duvar ve üç adet daha kalın ikincil duvar ile merkezde, lümen olarak adlandırılan ve hava içeren kalın bir orta bölgeden meydana gelir. Bu boşluk, lifin ısı yalıtım özelliklerini artırır. Her bir doğal lif katmanı, selüloz liflerinin hemiselüloz ve lignin matrisi içine gömülü olduğu bir yapıya sahiptir (Thakur 2014). Selüloz molekülleri genellikle rastgele bir düzende yer alır ve hem molekül içinde hem de moleküller arasında hidrojen bağları oluşturma eğilimindedir. Selülozun yüksek kristallik oranı sayesinde, yapısal olarak %80'e varan bir kısmı kristalin selüloz içerebilir. Bununla birlikte, yapının geriye kalan amorf bölümü daha az sıkı paketlenmiş bir yapıdadır (Thakur 2014).

Doğal lifler, karbon ayak izini düşürme ve yenilenebilir kaynaklar kullanma potansiyeli ile öne çıkarlar. Ancak, nem ve UV ışığına maruz kaldıklarında mekanik özelliklerinde azalma ve renk değişimi gibi sınırlamaları vardır. Otomotiv ve inşaat sektörlerinde hafiflik ve mukavemet özellikleri nedeniyle giderek artan bir popülerliğe sahip olan doğal lif takviyeli kompozitler, geleneksel malzemelere çevre dostu alternatifler olarak sunulmaktadır. Bu alandaki araştırmalar, bu malzemelerin işlenmesi, performansı ve uygulama teknikleri üzerine odaklanmaktadır (Koronis ve A 2018). Şekil 2.17' de doğal liflerin sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.17: Doğal liflerin sınıflandırılması (Sparnins 2009)

Hemiselüloz, pektinin çıkarılmasının ardından selüloza bağlanan, oldukça dallanmış yapıda polisakaritlerden oluşur. Lignin, hücre duvarlarını sertleştirici ve selülozu koruyucu bir bariyer olarak işlev gören, şekilsiz bir bileşendir. Birçok bitkinin kuru ağırlığını, yaklaşık %45-50'si selülozdan oluşur. Bir doğal lifin hücresel yapısının gösterimi, genellikle selülozun yüksek oranda bulunduğu ve rami, kenevir, kenaf, jüt ve keten gibi liflerde selüloz mikrofibrillerinin lif yönünde daha yoğun bir şekilde hizalandığı durumlar için yüksek performansın elde edildiğini ortaya koyar. Keten, kenaf ve kenevir lifleri, diğer bast liflere göre gösterdikleri üstün mekanik özellikler ve yüksek çekme dayanımları sayesinde kompozit uygulamaları için özellikle gelecek vadeden lifler olarak kabul edilmektedir (Koronis ve A 2018).

Doğal liflerin özellikleri, kimyasal bileşimleri ve yapıları üzerinde büyük etkileri olan çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler arasında lifin yetiştirildiği koşullar, hasat zamanlaması, elde etme yöntemleri, işleme teknikleri ve saklama yöntemleri gibi unsurlar doğal liflerin niteliklerini belirleyici rol oynar. Şekil 2.18' de doğal lif yapısı verilmiştir.



Şekil 2.18: Doğal Lifin Yapısal Görünümü (Bhattacharyya 2015)

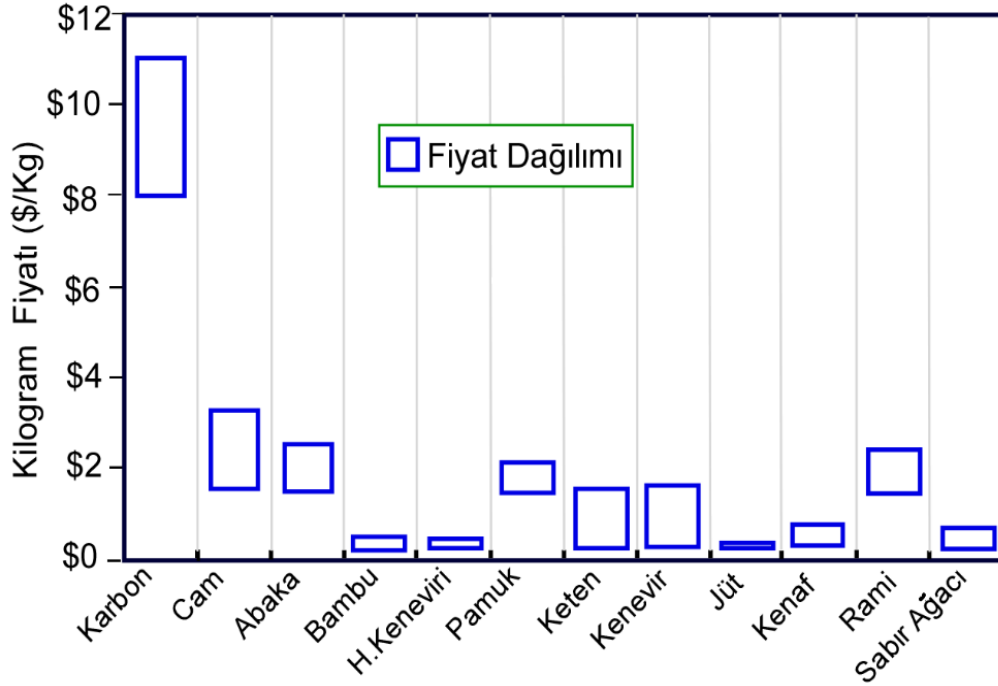
Doğal lifler, genellikle cam liflere kıyasla mukavemet ve sertlik açısından daha düşük değerlere sahip olmalarına rağmen, sertlikleri cam liflerle benzerlik gösterebilir. Özgül elastik modüllerinin cam liflere göre daha yüksek olması, doğal lifleri özellikle hafif uygulamalar için cazip hale getirirken, özgül dayanımları neredeyse aynı düzeydedir. Doğal liflerin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmektedir, toprak kalitesi, saklama koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterir ve bu çeşitlilik, mühendislik uygulamalarında kullanımlarını karmaşıktırabilir. Bitki lifleri doğal kompozit malzemeler olarak kabul edilir ve kimyasal bileşimleri ile, onların genel özelliklerini belirleyen temel faktörlerdir. Liflerin büyük bir kısmı, kristalin selüloz mikrofibrillerle güçlendirilmiş amorf bir lignin ve hemiselüloz matrisinden oluşur. Selüloz, bitki liflerinin en önemli yapısal bileşeni olmasına rağmen, ısı direnci düşüktür. Bitki liflerinin genel özellikleri ayrıca, mikrofibrillerin yönü, hücre boyutları ve lif kusurları gibi faktörler tarafından da etkilenir. Çoğu bitki lifi, pamuk dışında, selüloz, hemiselüloz, lignin ve suda çözünebilir diğer bileşenlerden oluşur. Ayrıca, doğal liflerin çoğu, birim fiyat açısından kullanılan birçok sentetik liften daha uygundur, bu da onları maliyet-etkin alternatifler haline getirir (Bhattacharyya 2015). Tablo 2.5’ de doğal lif ve sentetik lif mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5: Doğal ve sentetik liflerin mekanik özellikleri (Syduzzaman 2020; Abbassi 2020)

	Yoğunluk (g cm ⁻³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Özgül Dayanım (MPa g cm ⁻³)	Özgül Modül (GPa g cm ⁻³)	Uzama (%)	Nem Tutma (%ağ.)
Keten	1.4-1.5	345–2000	27–103	165-1430	19–73	1.2-3.3	8-12
Kendir Otu	1.5	270–1100	23.5–90	180–740	150–495	1-3.5	6.2-12
Hint Keneviri	1.3–1.5	320–800	10–78	245–610	7.1–60	1-1.8	12.5-14
Kenevir	1.2-1.4	223-930	14.5-53	160-665	10-475	1.5-6.9	9-12
Hindistan Cevizi	1.15-1.45	95-230	2.8-6	80-191	2.3-5	15-51	8
Pamuk	1.5–1.6	190–800	5.5–13	190–530	3.5-8.6	3.7–10	7.9-8.5
Bambu	0.6-1.1	140-850	11-32	150-950	12-35	2.5-3.7	8.9
İpek	1.3	100–1500	5–25	100–1500	4–20	18-60	—
Tüy	0.9	100–203	3–10	112–226	3.3–11	—	—

Mekanik performans, maliyet ve çevresel etkiler göz önünde bulundurulduğunda, keten, kenevir ve Hint keneviri gibi doğal lif takviyeli kompozitler, cam ve karbon lif takviyeli kompozitlere alternatif olarak değerlendirilmektedir. Maliyet açısından bakıldığında, doğal liflerin ton başına maliyeti yaklaşık 200 dolar olup, bu, cam liflerin 1200 ila 3000 dolar ve karbon liflerin 8000 ila 12500 dolar arasında değişen ton başı maliyetlerine kıyasla oldukça düşüktür. Ayrıca, keten, kenevir, Hint keneviri ve kenaf gibi doğal lifler, cam ve mineral liflere göre çok daha düşük karbon ayak izine sahiptirler, bu da onları çevre dostu bir alternatif yapmaktadır. Örneğin, bir ton cam lif üretiminin yaklaşık 1,7 ila 2,5 ton CO₂ eşdeğeri gaz salımı yaparken, doğal lifler için bu rakam sadece 0,35 ila 0,55 ton CO₂ eşdeğerindedir, bu da doğal liflerin, cam liflere kıyasla yaklaşık %80 daha az karbon ayak izine sahip olduğunu gösterir. Ayrıca, doğal lif takviyeli kompozitler, cam lif takviyeli kompozitlere kıyasla yaklaşık %50 daha az karbon salımı yapar. Keten, kenevir, Hint keneviri ve kenaf gibi çeşitli doğal liflerin karbon ayak izleri birbirine

benzer düzeydedir (Bhattacharyya 2015). Şekil 2.19' da doğal lif ve sentetik lif maliyetleri verilmiştir.



Şekil 2.19: Doğal lif ve sentetik lif arasındaki maliyetleri (Lotfi ve Li 2021)

2015'te Paris'te gerçekleşen iklim zirvesinde, 2050 yılına kadar endüstriyel karbon salınımını azaltmayı ve karbon ayak izini küçültmeyi hedefleyen yeni üretim teknolojileri, uygulamalar ve çeşitli kısıtlamalar ele alınmıştır. Avrupa Birliği, 1990 yılındaki karbon salınımı seviyelerine göre 2030'a kadar %40 azalma taahhüdünde bulunurken, Amerika Birleşik Devletleri 2025 yılına kadar 2005 yılı salınım seviyelerine göre %28 azalma sözü vermiştir. Almanya, 2035 yılına kadar enerji ihtiyacının %60'ını yenilenebilir kaynaklardan sağlama planlarını duyurmuştur. Karbon salınımının büyük bir kısmı, enerji sektörü başta olmak üzere petrol bazlı ürünlerden kaynaklanmaktadır (Lotfi ve Li 2021).

Gelişmekte olan bir ülke olarak Türkiye, 2030 yılına kadar karbon salınımını %21 azaltmayı hedeflemektedir. Paris İklim Zirvesi'nde 200 ülke, sera gazı salınımını azaltma konusunda taahhütlerde bulunmuş, ancak dünya nüfusunun %5'ini barındıran

ve global karbon salınımının %30'undan sorumlu olan ABD, 2017 yılında bu taahhüdünden çekilmiştir.

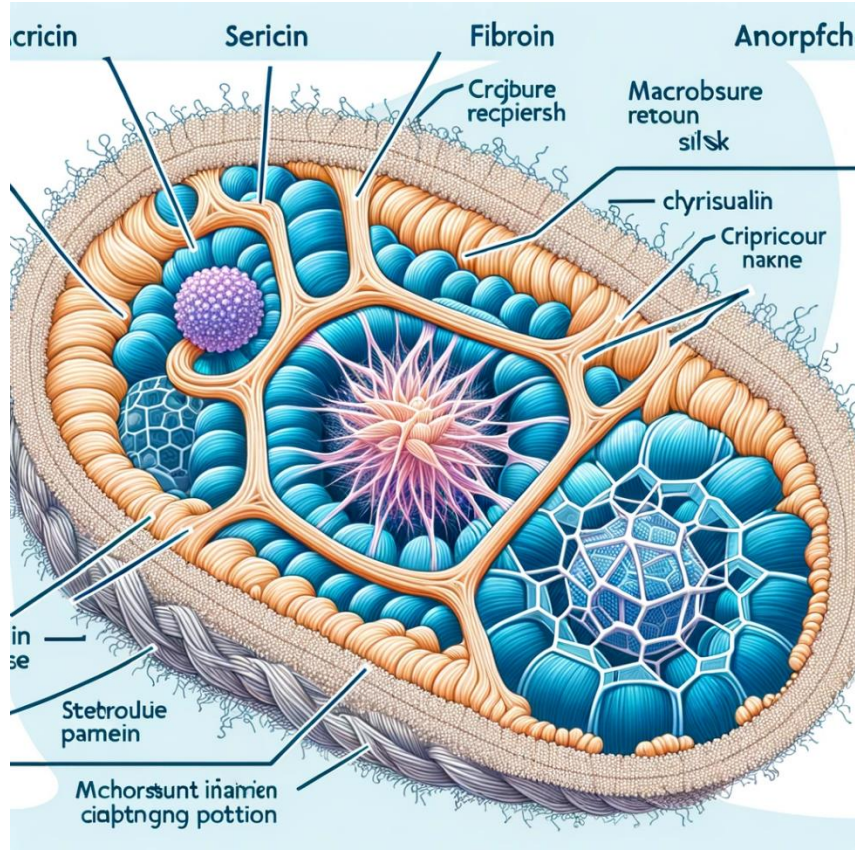
Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) Mart 2021 tarihli verilerine göre, Türkiye'nin toplam sera gazı emisyonları bir önceki yıla kıyasla %3.1 oranında azalarak, 506.1 milyon ton CO₂ eşdeğeri olarak kaydedilmiştir. İnsanlık ve iklimin geleceği için verilen taahhütlerin yerine getirilmesinde, karbon ayak izleri muadillerine kıyasla çok daha düşük olan yeşil kompozitlerin ve malzemelerin geliştirilip endüstriyel ölçekte kullanılması, şüphesiz önemli bir yol olarak öne çıkmaktadır (Thakur 2014).

2.7.1 İpek Lifi

İpek, ipekböceği larvalarının salgıladığı doğal bir protein olan fibroin temelinde oluşan, ince ve parlak bir lif türüdür. Üretimi esas olarak, ipekböceğinin larvalarının beslendiği dut yaprakları üzerinden gerçekleşir. Bu larvaların ördüğü kozalar işlenerek ipek elde edilir. Yüksek mukavemeti, elastikiyeti ve parlak yüzeyi ile dikkat çeken ipek, tekstil endüstrisinde ve teknik uygulamalarda değerli bir malzeme olarak ön plana çıkar.

Dünya genelinde ipek üretimi ağırlıklı olarak Asya'da gerçekleşir. Çin ve Hindistan bu alanda lider ülkeler olup, Tayland, Vietnam, Özbekistan ve Brezilya gibi ülkeler de önemli üreticiler arasında yer alır. İpek üretimi, zaman içinde geleneksel

yöntemlerden modern tekniklere doğru evrilmiş, böylece üretim süreçleri çeşitlenmiş ve geliştirilmiştir. Şekil 2.20’ de ipek lifi şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.20: İpek lifinin şematik gösterimini

Yukarıda İpek lifinin şematik gösterimini içeren görseli oluşturduğum. Bu görsel, ipek lifinin yapısını, dıştaki serisin katmanı ile içteki fibroin protein zincirlerini, fibroinin kristalin bölgelerini ve amorf alanlarını, lifin çap aralığını ve ipek lifinin mukavemet, elastikiyet ve parlaklığa katkıda bulunan mikro yapısını detaylandırıyor

İpek lifinin yapısında, ana yapısal bileşen olan fibroin proteinine serisin proteini eşlik eder. Fibroin, ipeğin yüksek mukavemet ve esnekliğini sağlarken; serisin, lifin parlak ve pürüzsüz yüzeyinin oluşumunda rol oynar. Liflerin çapı genellikle 10 ila 13 mikrometre arasında değişir ve iplik kalitesi, koza işlenirken elde edilen liflerin uzunluğuna bağlı olarak farklılık gösterir.

İpek, ısı ve nem emilimi özellikleriyle yüksek konfor sunar. Teri emip hızla buharlaştırma yeteneği sayesinde, ipek kumaşlar sıcak ve nemli iklimlerde bile rahat bir kullanım imkânı sağlar. Lif mukavemeti, genellikle 3-4 gr/denye arasında olup, kozanın dışından içine doğru gidildiğinde mukavemet artar. Lifin uzama oranı ise % 15-20 civarındadır, bu da ipek kumaşların esneklik ve dayanıklılık açısından üstün özellikler sergilemesine olanak tanır. Şekil 2.21’ de ipek koza ve sem görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.21: İpek kozaları ve SEM görüntüsü (Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi 2019)

Teknik açıdan ipek liflerinin işlenmesi sırasında, lif mukavemetinin korunması ve lifler arası sürtünmenin azaltılması için özen gösterilmesi gerekir. İpek, boyama ve baskı işlemlerine iyi yanıt verse de güneş ışığına maruz kaldığında renk solması riski taşır. Bu benzersiz özellikler, ipek lifini hem geleneksel tekstil ürünlerinde hem de daha yenilikçi uygulamalarda tercih edilen bir malzeme yapar.

2.7.2 Bambu Lifi

Bambu lifi, sürdürülebilirlik, yüksek mukavemet ve esneklik gibi özellikleriyle ön plana çıkan, hızlı büyüme hızına ve yeniden yetişme kapasitesine sahip bir bitkiden elde edilen doğal bir lif türüdür. Bu özellikler bambuyu, tarih boyunca inşaat malzemesi, yazı araçları, giysi ve gıda gibi çeşitli alanlarda kullanılan çevre dostu bir kaynak haline getirmiştir.

Lif çapı, lifin esnekliğini, dayanıklılığını ve tekstil ürünlerindeki hissiyatını doğrudan etkileyen önemli bir özelliktir. İnce lifler daha yumuşak kumaşlar oluştururken, kalın lifler daha sağlam ve dayanıklı ürünler için kullanılır. Lif çapı genellikle mikrometre cinsinden ölçülür ve bitkisel, hayvansal veya sentetik liflerin türüne göre değişiklik gösterir. Bambu liflerinin çapı, kullanıldıkları uygulamalara göre optimize edilebilir ve bu, bambu liflerinin geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlar (Deshpande 2000).

Liflerin mikroskobik yapısı, hücre duvarlarının kalınlığı, iç boşlukların varlığı ve moleküler hizalanma gibi özellikleri içerir. Liflerin kristalin ve amorf bölgeleri, mukavemet ve esneklik gibi mekanik özellikler üzerinde etkilidir. Kristalin bölgeler, moleküllerin düzenli hizalandığı ve lifin mukavemetini artırdığı yerlerdir, amorf bölgeler ise daha esnek yapıdadır. Liflerin hidrofilik veya hidrofobik özellikleri de yapısından kaynaklanır ve bu, liflerin çeşitli uygulamalarda nasıl kullanılabileceğini belirler (Deshpande 2000).

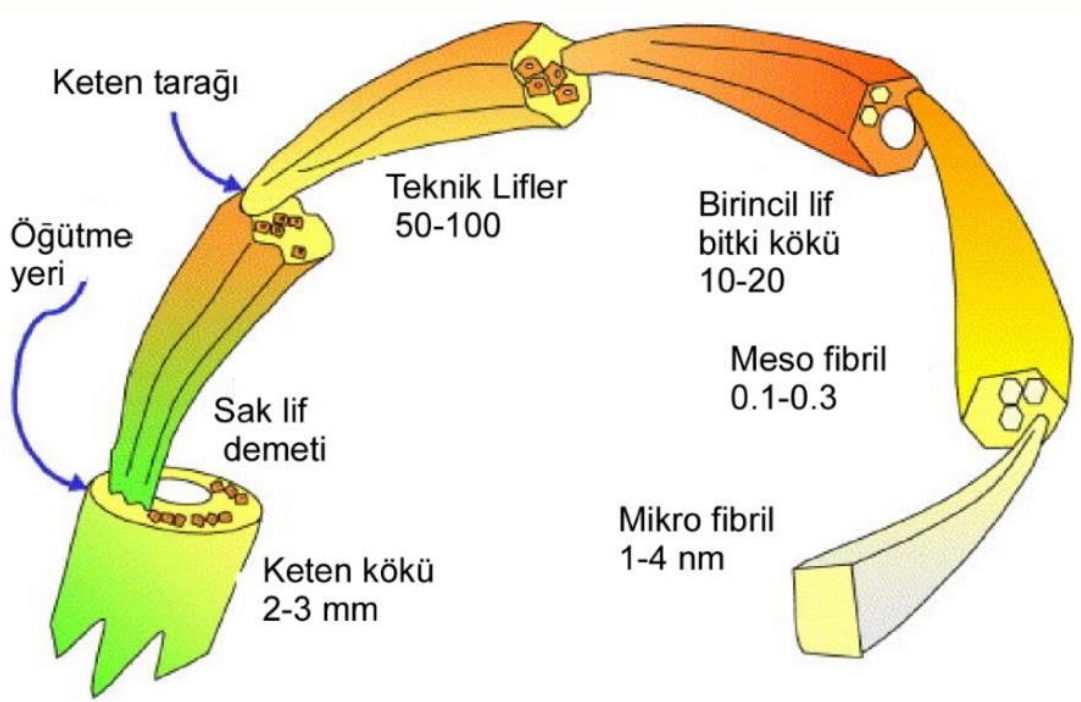
Bambu lifi gibi doğal lifler, tekstil tasarımı ve kompozit malzeme üretimi gibi alanlarda önemli bir yere sahip olup, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatifler sunarlar. Lif çapı ve yapısının detaylı incelemesi, liflerin çeşitli uygulamalarda nasıl kullanılabileceğini ve neden bazı liflerin belirli kullanımlar için daha uygun olduğunu anlamamıza yardımcı olur, bu da bambu lifinin geniş kullanım alanlarını ve potansiyelini ortaya koyar.

2.7.3 Keten Lifi

Keten lifi, keten bitkisinin (*Linum usitatissimum*) saplarından elde edilen ve tarih boyunca kullanılan en eski tekstil liflerinden biridir. Eski Mısır'dan itibaren giysi üretimi, balık ağları ve diğer kullanım alanları için tercih edilmiş, M.Ö. 8000 yıllarına kadar uzanan bir geçmişi vardır. Keten, yüksek kalite ve dayanıklılık simgesi olarak

görülürken, mumyalama işlemlerinde de kullanılmıştır. Şekil 2.23' de keten lifi şematik gösterimi verilmiştir.

Keten lifi, ticari olarak yüksek kaliteli tekstil ürünlerinin üretiminde kullanılır. Serin tutma, nem emme ve hızlı kuruma özellikleri nedeniyle sıcak iklimlerde giysi üretimi için idealdir. Ayrıca sanayi ürünleri, sanat malzemeleri ve kağıt üretiminde de kullanılmaktadır. Çin, Hindistan, Arjantin, Kanada ve ABD gibi çok çeşitli ülkelerde yetişmektedir (Kiliç 2017).



Şekil 2.23: Keten lifinin şematik gösterimi (Bos 2006)

Kanada, 2005-2006 yılları arasında yaklaşık 1035 milyon ton keten üretmiş ve bu miktarın %60'ını Avrupa Birliği'ne, %30'unu ABD'ye ve %4'ünü ise Japonya'ya ihraç etmiştir. Keten, genellikle 0.5 ile 1.25 metre arasında boyu olan, gövde çapı ortalama 16 mm olan, tek yıllık ve otsu gövdeli bir bitkidir. Lif üretimi amacıyla, bitkinin tabanı sararmaya başladığında yaklaşık 100 gün sonra hasat edilir. Keten bitkisi, hem lif hem de tohumlarından elde edilen keten tohumu yağı üretimi için

yetiştirilir ve bitkinin %25'i tohum, %75'i ise sap ve yapraklardan oluşur. Sapın ağırlığının yaklaşık dörtte biri, çeşidine göre 80 ile 150 cm arasında değişebilen sak liflerinden meydana gelir. Liflerin ortalama uzunluğu 33 mm (9 ile 70 mm arası), genişliği ise ortalama 19 µm (5 ile 38 µm arası) olarak ölçülür. Keten lifinin kalitesi ve elde edilen ürün verimi, yetiştirilme ve hasat sırasındaki hava koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir; en iyi kalitenin hafif yağmurlu hava şartlarında ve 18-20 °C sıcaklıkta hasat edildiğinde elde edildiği bilinir (Pickering 2008).

Keten liflerinin mikroyapısını detaylı bir şekilde incelendiğinde, lifin yapı taşlarını oluşturan birincil ve ikincil hücre duvarları ile merkezde yer alan açık bir kanal olan lümen görülebilir. İkincil hücre duvarı, çoğunlukla selüloz ve hemiselülozdan oluşur ve lifin çapının önemli bir kısmını oluşturur. Bu duvarda bulunan selüloz mikrofibrilleri, oldukça kristalin yapıda olup, amorf hemiselüloz fazları tarafından bir arada tutularak yönlendirilir. Keten liflerinin rengi genellikle açık sarıdan gri tonlarına kadar değişiklik gösterir. Ayrıca, bu lifler güçlü ve esnek yapılarıyla dikkat çeker. Uzama oranı düşüktür ve özellikleri, büyüme koşulları, moleküler yapı ve uygulanan çürütme işlemleri gibi faktörlere bağlıdır (Pickering 2008).

Keten lifinin ticari değeri, kalitesi ve ekolojik sürdürülebilirliğiyle ilişkilidir. Az miktarda su ve gübre ile yetiştirilebilir, bitkinin hemen hemen her parçası kullanılabilir. Doğal parlaklığı, düşük elastikiyeti ve pürüzsüz yüzeyi, keten kumaşları lüks tekstil ürünleri için tercih edilen bir seçenek yapar. Keten lifinin doğal güzelliği, dayanıklılığı ve çevresel sürdürülebilirliği, onu tekstil ve diğer sanayi alanlarında vazgeçilmez bir malzeme haline getirmiştir (Bhattacharyya 2015).

2.7.4 Kenevir Lifi

Kenevir lifi, Cannabis sativa bitkisinden elde edilen, antik zamanlardan beri tekstil, halat yapımı ve kağıt üretimi gibi çeşitli alanlarda kullanılan uzun ve çok yönlü bir doğal lif türüdür. M.Ö. 8000 yıllarına kadar uzanan kullanımıyla, dünya genelinde farklı kültürlerde değerli bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Yelken bezleri, çadır

kumaşları, halatlar ve ağlar gibi dayanıklı ürünlerin üretiminde tercih edilen kenevir lifi, günümüzde sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif olarak popülerliğini sürdürmektedir.

Mikroskopik düzeyde incelediğinde, kenevir lifleri yüksek oranda selüloz içerir, içi boş ve uzun hücrelerden oluşur. Bu hücreler birbirine paralel dizilmiş ve oldukça sıkı bir yapı oluşturur. Lifin çapı genellikle 16 ila 50 mikrometre arasında değişirken, uzunluğu birkaç santimetreden bir metreye kadar uzanabilir. Kenevir liflerinin iç yapısı, birincil ve ikincil hücre duvarlarından oluşur, bu duvarlar arasında karmaşık bir mikrofibril ağı bulunur ve lifin içindeki lümen, nem yönetimi özelliklerini artırır (Bhattacharyya 2015). Şekil 2.24’ de kenevir lifi şemastik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.24: Kenevir lifi ve lif kullanımı vurgulaması

Kenevir bitkisi, Avrupa, Kanada, Çin ve benzeri ılıman iklim bölgelerinde yetiştirilir ve yaklaşık 140 gün içerisinde 4,5 metre yüksekliğe ulaşabilir. Kenevirin ve çeşitlerinin yaprakları, esrar üretiminde kullanılan afyon içerikli reçineler

salgıladığından dolayı yetiştirilmeleri sıkı bir şekilde dzenlenmektedir. Bu bitki, bcek ve mantar ilaçlarına çok az ihtiyaç duyar ve neredeyse hiç gbre gerektirmez, bu özellikleriyle çevre dostu bir alternatif sunar. Kenevir, sak lifi üretimi için tercih edilir ve bu lifler, çürütme işleminde elde edilir. İnce, açık renkli, parlak ve güçlü yapısıyla bu lifler özellikle tekstil, selüloz ve kağıt sanayii tarafından kullanılırken, otomotiv sektöründe de değerlendirilmektedir (Bhattacharyya 2015).

Kenevir lifleri, 50 mm'ye kadar uzunluklara ulaşabilir ve suya karşı yüksek dayanıklılık ile iyi gerilme direnci özellikleri sunar. Ketene kıyaslandığında, kenevir lifleri daha kalın yapıda olup ağartılması daha zor olmasına rağmen, mükemmel bir nem direncine sahip olduğu ve suda yavaş çürüdüğü için tercih edilir. Kenevir liflerinin mukavemeti, ketene kıyasla yaklaşık %20 daha fazladır, ancak esneklik açısından düşük uzama oranına sahiptir. Alkali işlem görmüş kenevir liflerinin epoksi matrisle takviye edilerek üretilen kompozitlerin arayüz bağlarının incelenmesi, bu liflerin mühendislik uygulamaları için olan potansiyelini ortaya koymaktadır (Bhattacharyya 2015). Şekil 2.25' de kenevir bitkisi görünümü verilmiştir.



Şekil 2.25: Kenevir bitkisi görselleştirmesi

Bu özellikler kenevir lifini, tekstil ve diğer endüstrilerde değerli bir malzeme olarak öne çıkarırken, sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim süreçleri onu günümüzün önemli bir alternatifi haline getirmektedir.

2.7.5 Jut Lifi

Jut lifi, özellikle Güney Asya'da yaygın olarak yetiştirilen *Corchorus* cinsine ait bitkilerin saplarından elde edilen uzun, yumuşak ve parlak bir doğal lif türüdür. Antik zamanlardan beri kullanılan jut, dünya genelinde ticari olarak en çok kullanılan bitkisel liflerden biridir. Jut lifi, esas olarak çuval, halat, kilim, kaba kumaşlar ve diğer tekstil ürünlerinin üretiminde kullanılmaktadır. Jut lifinin tarihi, Hindistan ve Bangladeş'te başlamak üzere binlerce yıl öncesine dayanır. Bu bölgeler, dünyanın en büyük jut üreticileri olarak kalmaya devam etmektedir. Jut, 19. yüzyılda jütün altın elyafı olarak adlandırıldığı dönemde, paketleme malzemesi olarak büyük popülerlik kazandı (Bhattacharyya 2015). Şekil 2.26' da jut lifi ve bitkisi özgün gösterimi verilmiştir.

Jut lifleri, mikroskopik düzeyde incelendiğinde, oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Lifler, uzun ve ince hücrelerden oluşur; bu hücreler, lifin boyunca paralel olarak dizilmiştir. Jut lifinin çapı genellikle 20 ila 25 mikrometre arasında değişir ve lifler, 1 ila 4 metre uzunluğa kadar büyüyebilir. Lifin iç yapısı, birincil ve ikincil hücre



Şekil 2.26: Jut lifi ve bitkisi özgün görselleştirmesi

duvarlarından oluşur. Bu duvarlar, lifin mekanik özelliklerini belirleyen lifin yapısını oluşturan selüloz ve lignin gibi polimerlerce zengindir.

Jut liflerinin ticari değeri, esnekliği, dayanıklılığı ve biyolojik olarak parçalanabilir olmasıyla artmaktadır. Ayrıca, jut üretimi nispeten düşük enerji tüketimi gerektirir ve karbon emisyonları açısından etkilidir, bu da jutu çevre dostu bir malzeme olarak ön plana çıkarır. Jut lifi, sürdürülebilir bir kaynak olarak değerlendirilmekte ve ekolojik ürünlerin üretiminde giderek daha fazla tercih edilmektedir (Bhattacharyya 2015).

Jut bitkisinin yetiştirilmesi, genellikle yoğun yağış alan ve nemli iklimlerde başarılı olur. Bitki, tohum ekiminden yaklaşık 4 ila 6 ay sonra hasat edilir. Hasat edildikten sonra, jut lifleri, sapsız suya batırılması ve mikrobiyal etkinlik yoluyla liflerin sapsızdan ayrılmasını sağlayan bir çürütme işlemiyle elde edilir. Bu işlem, lifleri yumuşatır ve ticari kullanıma hazır hale getirir.

Jut lifinin kullanımı, geleneksel tekstil ürünlerinden otomotiv endüstrisi ve biyokompozit malzemelerine kadar geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Jut, doğal güzelliği, mukavemeti ve çevresel sürdürülebilirliği sayesinde, modern ve geleneksel uygulamalarda değerli bir malzeme olarak kabul edilmektedir.

2.7.6 Kabak Lifi

Kabak lifi, özellikle Luffa cinsine ait kabak türlerinden elde edilen doğal bir lif türüdür. Bu lifler, kabak bitkisinin olgunlaşmış meyvelerinin kurutulup işlenmesiyle elde edilir ve esnek, dayanıklı bir yapıya sahiptir. Kabak lifleri, geleneksel olarak banyo lifleri, mutfak süngerleri, filtre malzemeleri ve çeşitli el sanatları ürünlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, son yıllarda ekolojik ürünlerin popülerliğinin artmasıyla birlikte, kabak lifi biyolojik olarak parçalanabilir bir alternatif olarak tekstil ve kompozit malzeme endüstrilerinde de ilgi görmeye başlamıştır (Özdemir 2020). Şekil 2.27' de kabak bitkisi ve lifi şematize gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.27: Kabak (luffa) bitkisi ve lifi özgün görselleştirilmesi

Kabak lifinin tarihi, yüzyıllar boyunca çeşitli kültürlerde kullanımını kapsar. Özellikle Asya ve Afrika kıtalarında, kabak lifi çeşitli ev eşyaları ve kişisel bakım ürünlerinin yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. Ticari açıdan kabak lifi, sürdürülebilir ve yenilenebilir bir kaynak olarak değerlendirilmekte, çevre dostu ürünlerin üretiminde tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir (Özdemir 2020).

Mikroskobik düzeyde kabak lifi, iç içe geçmiş uzun hücrelerden oluşur ve bu hücrelerin arasında geniş boşluklar bulunur. Bu yapı, kabak lifinin hafif ancak dayanıklı olmasını sağlar. Lifler, genellikle 1 ila 2 mm çapında ve uzunlukları çeşitlenebilir şekilde, meyvenin boyutuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Kabak

lifinin mikro yapısında, selüloz, lignin ve diğer doğal polimerler bulunur, bu bileşenler lifin su ve hava geçirgenliğini artırır ve mükemmel filtreleme özellikleri sunar (Özdemir 2020).

Kabak lifinin ticari değeri, çevresel sürdürülebilirliği ve biyolojik olarak parçalanabilir yapısıyla artmaktadır. Düşük enerji tüketimiyle üretilebilir ve kullanım sonrası çevreye zarar vermeden doğaya geri dönebilir. Bu özellikler, kabak lifini özellikle organik tarım, sürdürülebilir tekstil üretimi ve ekolojik temizlik ürünleri gibi alanlarda cazip bir alternatif yapmaktadır (Özdemir 2020).

Kabak lifinin kullanımı, doğal güzelliği, işlevselliği ve çevreye olan olumlu katkıları sayesinde, modern uygulamalarda artan bir ilgi görmekte ve sürdürülebilir yaşam tarzlarını destekleyen ürünlerde vazgeçilmez bir malzeme olarak kabul edilmektedir.

2.8 Aşınma

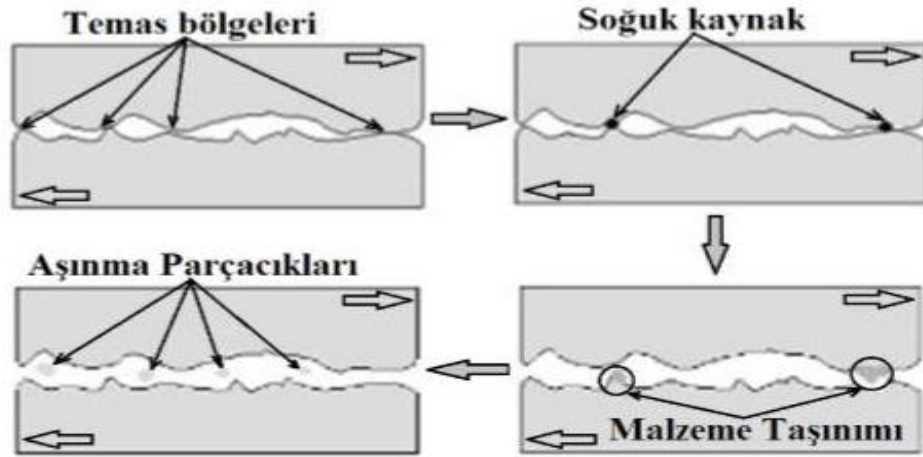
Aşınma, temas halinde bulunan yüzeylerden küçük parçacıkların kopması ve bu yüzeylerde biçimsel değişikliklerin meydana gelmesi olarak tanımlanabilir. Temas yüzeyinde sürtünme meydana geldiğinde, birçok olumsuz etken ortaya çıkabilir. Bunlar arasında, mekanik parçaların işlevlerinde azalma, aşınma nedeniyle çalışma kapasitesinin düşmesi ve sürtünme direncinin kaybolması yer alır. Aşınma genellikle hareket iletim elemanları olan millerde, fren balatalarında, motor pistonları ile silindirlerde, kaymalı ve rulmanlı yataklarda, dişlilerde ve türbin kanatlarında gözlemlenmektedir. Çeşitli teknik malzemelerin ve makine parçalarının ömrü üzerinde önemli bir etkisi olan aşınma, aşınma ortamı, mekanizması, ürün tipi, yük, aşınma oranı gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişir. Aşınma, fiziksel özelliklerden ziyade, sistemsal bir yaklaşım ile ele alınabilir. Bu kapsamda, aşınma, tribolojik sistem olarak adlandırılan bir sistem içinde değerlendirilir. Bu sistemde, temas eden yüzeylerin hız,

termal koşullar ve yük kombinasyonu nedeniyle aşınma durumu ortaya çıkar. (Varol 2016).

2.8.1 Aşınma Çeşitleri

2.8.1.1 Adhesif Aşınma

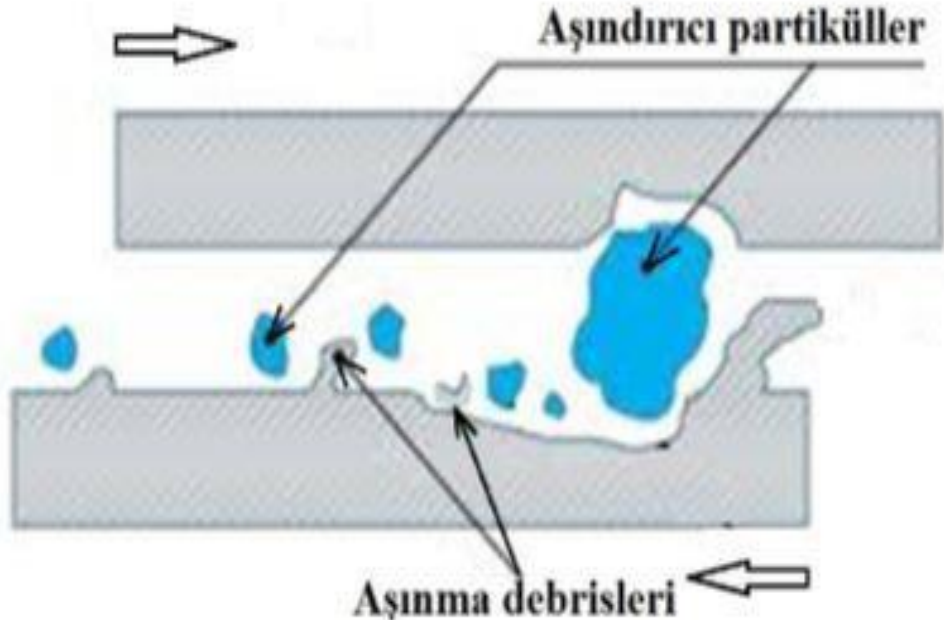
Adhesif aşınma, soğuk kaynak veya bir yüzeye lokal bağlanma nedeniyle bir malzemenin bir yüzeyden diğerine geçişi sırasında oluşur ve bu süreç kayma hareketi nedeniyle malzeme kaybına yol açar, Şekil 2.28’ de adhesif aşınma gösterilmiştir. Temas yüzeyinin pürüzlü kısmında uygulanan basınç, yeterince yüksekse, pürüzlülüğü düşük olan pikler üzerine aşırı basınç uygulanabilir. Bu tür durumlarda, uygulanan gerilim Emery'nin akma dayanımını aşarak, plastik deformasyon, kazıma ve sıvama işlemlerini geçer ve bu da soğuk kaynak olayıyla sonuçlanır. Temas eden yüzeyler hareket ederken, belirli noktalar kırılır ve yüzeylerde malzeme kaybı meydana gelir. Adhesif aşınma, yüzeyler arasındaki malzeme kaybindan kaynaklanır. Bu tür aşınmayı önlemek için yüzey sertleştirme işlemleri ve yağlayıcı sıvıların kullanılması önerilmektedir (Varol 2016).



Şekil 2.28 Adhesif aşınma (Varol 2016).

2.8.1.2 Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, diğer bir adıyla çizik veya yırtılma aşınması, birlikte çalışan malzeme çiftlerine ciddi ve hızlı zararlar verebilen bir aşınma türüdür. Bu aşınma tipi, malzeme yüzeyindeki sert parçacıkların, basınç altında kalan yüzeyden uzaklaştırılmasıyla meydana gelir, Şekil 2.29’ da abrasif aşınma şematize görüntüsü verilmiştir. Sert parçacıkların malzeme yüzeyi ile etkileşimi, yüzeyde çiziklerin veya yırtılmaların oluşmasına neden olur. Örneğin, kötü çalışma koşulları nedeniyle yatak malzemesine giren toz parçacıkları, malzemenin aşınmasına yol açabilir. Üç cisimli aşınma, malzeme çiftleri arasındaki sertlik farkından kaynaklanan aşınmanın yanı sıra, ilave aşındırıcı parçacıkların da etkisiyle meydana gelir. Bu durumda, ek aşındırıcı parçacıklar malzeme yüzeyine zarar verir, böylece aşınma süreci hızlanır ve ciddi hasarlara yol açar (Varol 2016).



Şekil 2.29 Abrasif aşınma (Varol 2016).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, saf PLA, kenevir, ipek, bambu, keten, jut ve kabak lifleri ile takviye edilerek, aşınma direnci yüksek biyobozunur polimer matrisli kompozitlerin üretimi hedeflenmiştir. Granül formdaki PLA, kloroform içerisinde eritilmiş ve ardından ağırlık olarak %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında doğal lifler eklenmiştir. Elde edilen kompozit karışım, pres altında soğutularak şekillendirilmiştir. Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra, kalıptan çıkarılan kompozit numuneler, aşınma testi ve yüzey analizi için laboratuvarında detaylı olarak incelenmiştir.

Hazırlanan numunelerinin aşınmış yüzeylerinin incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır ve bu görüntüler Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinden elde edilmiştir. Numunelerin aşınma dirençleri, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Talaşlı İmalat Laboratuvarı'nda yapılan pin-on-disk aşınma test cihazı ile değerlendirilmiştir. Bu süreçte, farklı oranlarda doğal lif takviyeli PLA kompozitlerinin aşınma performansları detaylı olarak incelenmiştir.

3.1 Lif takviyeli PMK malzemelerin üretimi

Tez çalışması kapsamında numune hazırlığı dört ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, granül halindeki PLA, kloroform kullanılarak çözündürülerek sol-jel yöntemi ile jel formuna dönüştürülmüştür. Bu sürecin sonucunda elde edilen jel kıvamındaki PLA'ya, çeşitli oranlarda (%0,5, %1, %1,5) doğal lif takviyeleri (bambu, keten, jüt, kenevir, ipek ve kabak) eklenmiştir. Bu üç ayrı orandaki doğal lifler, çözülmüş jel halindeki PLA içine eklenerek karıştırılmış homojen dağılımı hale getirilmiştir. Ardından, PLA ve doğal lif karışımı jel formundayken, kloroformun buharlaşarak çıkmasını sağlamak amacıyla oda sıcaklığında katılaşması için bir Petri kabında bekletilmiştir.

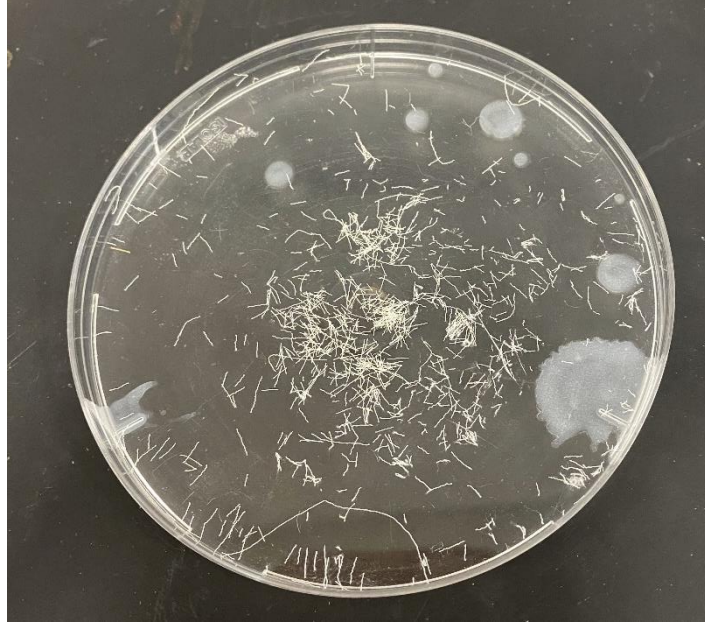
Katılma sürecinin tamamlanmasıyla, odada sıcaklığında katılmış PLA, daha küçük parçalara ayrılarak ikinci aşama tamamlanmıştır. Son olarak, bu küçük parçalara bölünmüş PLA ve doğal lif karışımı, polimer aşınma testi standartlarına uygun olarak tasarlanmış bir kalıba yerleştirilmiş ve kalıp içerisinde ergimesi için fırına alınmıştır. Yaklaşık doksan dakika süren ısıtılma işlemi ardından ısınmış kalıp, presleme işlemine tabi tutulmuştur. Pres işlemi sonucunda elde edilen aşınma numuneleri üzerinde aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Sol Jel yöntemi ile elde edilmek istenen doğal lif takviyeli biyobozunur kompozit hazırlanması süreci başlangıcı, temin edilen (PLA, Kloroform, Beher vb. malzemeler) hassas terazi yardımıyla ölçümü yapılan 100 gram granül PLA ve 500 ml kloroform, sol-jel prosesi için bir beher camına alınmıştır. Bu karışım, jel kıvamına ulaşması amacıyla bir çeker ocağı cihazına yerleştirilmiştir. 24 saatlik bir süre sonunda PLA tamamen jel formuna getirilmiştir. Şekil 3.1' jel formdaki PLA gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Kloroform ile çözündürülmüş PLA

Daha sonra, 10-15 mikron boyutlarına indirgenmiş doğal lif takviyeleri Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Hassas terazide ölçülerek test numunesi gramajına göre (%0,5, %1, %1,5) jel formundaki PLA'ya eklenmiştir.



Şekil 3.2: Kırılmış ipek lifi

Eklenen bu doğal lifler, karışımın homojen bir yapıya kavuşması için dikkatlice karıştırılmıştır. Kloroformun, doğal lif takviyeli jel formundaki PLA'dan uzaklaştırılabilmesi için, karışım tekrar 24 ila 36 saat boyunca çeker ocağı cihazında bekletilmiştir Şekil 3.3 'de çeker ocağı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Çeker ocağı

Bu aşamalar, malzemenin istenen özelliklere sahip kompozit haline gelmesini sağlamak için titizlikle uygulanmıştır. Şekil 3.4’ de Sol-jel yöntemi kullanılarak, jel haline getirilen pla polimeri içerisine doğal lif takviyesi eklenmiş kompozitin içerisindeki kloroform un uçurulması sonucunda elde edilen katı hale gelmiş doğal lif takviyeli biyobozunur kompozit gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Katı hale gelmiş polimer biyobozunur kompozit

Santrifüj işleminin tamamlanmasının ardından, elde edilen doğal lif takviyeli polimer matrisli kompozit, test numunelerinin hazırlanması için özenle makas ve diğer kesici aletler kullanılarak küçük parçalara ayrılmıştır.

3.1.1 PMK Üretim İçin Kalıp ve Test Numune Oluşturulması

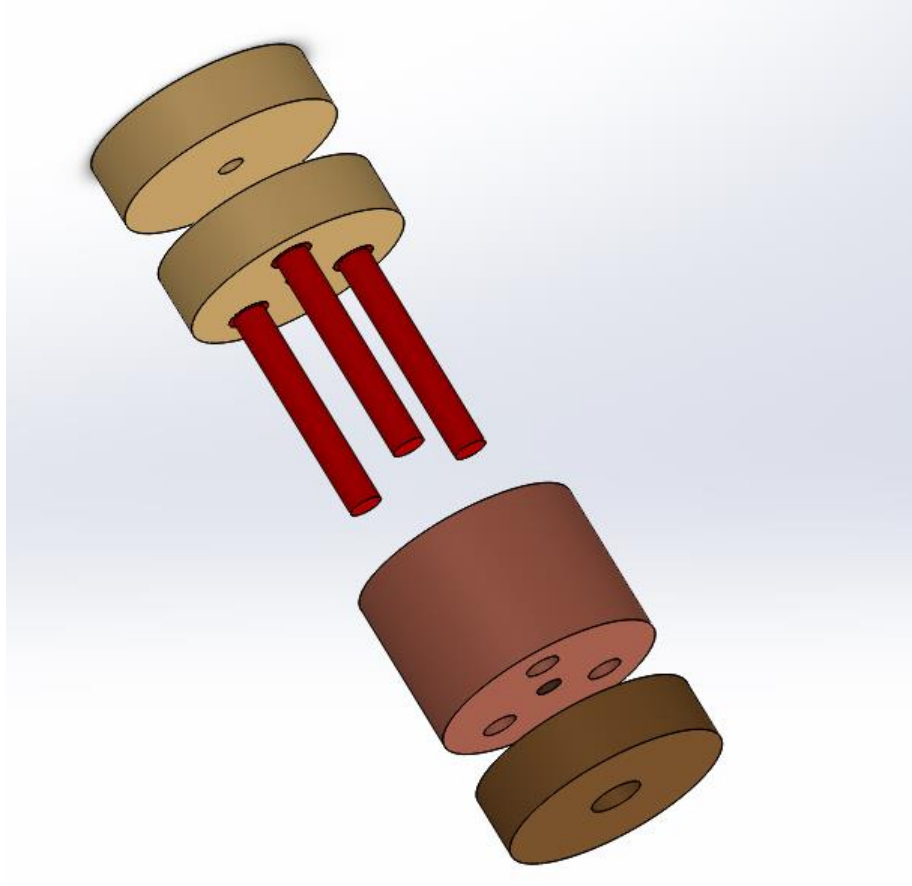
Aşınma testi numunelerini üretmek üzere, standartlara uygun biçimde tasarlanmış olan aşınma testi numunesi kalıbı, Pamukkale Üniversitesi CNC laboratuvarında yer alan CNC freze makinası kullanılarak işlenmiştir. Şekil 3.5’ de CNC freze makinası gösterilmiştir



Şekil 3.5: Cnc freze tezgâhı

Tek seferde üç farklı oranda ağırlık olarak %0,5, %1, %1,5 aşınma testi numuneleri üretebilecek özel tasarlanmış kalıp Şekil 3.6’da gösterilmiştir.

Kalıp toplamda beş parçadan oluşan bir yapıdadır. Üst kapak, eriyik kompozitin sıkıştırılması amacıyla kullanılacak zımbaları yerinde sabitlemek için özel olarak tasarlanmıştır. Zımbalar, erimiş kompoziti etkin bir şekilde sıkıştırmak için kullanılacaktır. Alt kalıp ise, aşınma testi numunelerinin şekillendirilip sıkıştırılacağı dişi kalıp sistemine sahiptir. Kalıp alt kapağı, presleme işlemi sonrasında kompozitin kalıptan rahatça alınabilmesi için çıkarılabilir ve takılabilir şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.6: Aşınma testi numuneleri üretebilecek özel tasarlanmış kalıp

Polimer matrisli ve doğal lif takviyeli kompozit malzemenin küçük parçaları, üç farklı doğal lif oranında aşınma testi numuneleri elde oluşturmak amacıyla tasarlanmış kalıba yerleştirilecektir. Hassas terazi kullanılarak ölçülen kompozit malzeme, kalıbın içindeki bölümlere dikkatlice ve homojen bir şekilde dağıtılmıştır. İşlem sonrasında, kalıp, ön ısıtma işlemine tabi tutulmadan doğrudan ısıtma fırınına alınır. Fırın, 260 dereceye ulaştıktan sonra, kompozit malzemeye 1 saat 30 dakika süreyle ısıtma işlemi uygulanır. Şekil 3.7’de Isıtma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Isıl işlem tezgâhı

Belirlenen sürenin sonunda, ısıl işlemden çıkarılan kalıp, manuel hidrolik pres ile sıkıştırma işlemine tabi tutulur Şekil 3.8’de manuel hidrolik pres gösterilmiştir. 150 bar ile sıkıştırıldıktan sonra, kalıbın soğuması için yaklaşık olarak 3-4 saat bekletilir.



Şekil 3.8: Manuel hidrolik pres



Şekil 3.9: Preslenmiş kompozit kalıbı

Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra, kalıbın alt kapağı açılır ve hidrolik pres yardımıyla zımbalar kullanılarak numuneler kalıptan çıkarılır Şekil 3.10’ da hidrolik pres gösterilmiştir. Elde edilen test numuneleri, yüzeylerinin düzeltilmesi için döner sulu zımpara cihazında, 1200-2400 kum zımpara kâğıdı kullanılarak zımparalanır. Bu süreçler, aşınma testi için numunelerin hassas ve standardize edilmiş şekilde hazırlanmasını sağlar. Şekil 3.11’ de Sulu Zımpara Gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Hidrolik pres



Şekil 3.11: Sulu zımpara makinesi

3.1.2 Aşınma Testi

Sertlik testlerinin tamamlanmasının ardından, doğal lif takviyeli biyobozunur kompozitlerin aşınma testine girmeden önceki ağırlıkları, Şekil 3.12’ de verilen Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği Atölyesi'nde bulunan RADWAG model NAS 220/C/2 markalı hassas elektronik tartı kullanılarak yapılan ölçümler dikkatle kaydedilmiştir. Daha sonra, ağırlık olarak %0,5, %1, ve %1,5 oranlarında doğal lif takviyeli biyobozunur kompozitlerden oluşan aşınma testi numuneleri, ASTM G99 standartına uygun olarak pin-on-disk aşınma test cihazında aşınmaya tabi tutulmuştur. Şekil 3.13’ de Aşınma Test Cihazı verilmiştir. Her bir aşınma testinin sonrasında, numunelerin ağırlıkları yeniden hassas terazi ile ölçülmüş ve bu ölçümler kayıt altına alınmıştır. Şekil 3.14’ de aşınmaya maruz bırakılan test numuneleri verilmiştir.



Şekil 3.12: Hassas elektronik tartı



Şekil 3.13: Aşınma test cihazı

Aşınma testleri esnasında, 60 HRC sertliğindeki AISI 52100 alaşımından üretilmiş aşındırıcı disk tercih edilmiştir. Numuneler, döner metal yüzeye dik bir açıyla temas ettirilerek konumlandırılmıştır. Deneyler, 1 m/s'lik bir kayma hızı üzerinden, 20N ve 40N yükler altında, her işlem 3600 saniye sürecek şekilde yürütülmüştür.



Şekil 3.14: Aşınma test numuneleri

Aşınma testleri sonucunda elde edilen verilerin analizi için hacim kaybı, aşınma oranı ve sürtünme katsayısı değerlerinin hesaplanmasında hesaplanmıştır.

Hacim kaybı eşitliği 3.1' de verilmiştir.

Hacim Kaybı (V)

Hacim kaybı, malzemenin aşındıktan sonra kaybettiği hacmi ifade eder.

$$V = \Delta V / \rho \quad (3.1)$$

V: Hacim kaybı (mm³), Δm : Ağırlık kaybı (g), ρ : Malzemenin yoğunluğu (g/cm³)

Aşınma Oranı eşitliği 3.2' de verilmiştir.

Aşınma Oranı (W)

Aşınma oranı, birim yük ve birim mesafe başına kaybedilen hacmi ifade eder.

$$W = V / (F \times S) \quad (3.2)$$

W: Aşınma oranı ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), V: Hacim kaybı (mm^3), F: Uygulanan kuvvet (N), S: Kayma mesafesi (m),

Sürtünme katsayı eşitliği 3.3' de verilmiştir.

Sürtünme Katsayısı (μ) (3.3)

Sürtünme katsayısı, sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranını ifade eder.

$$\mu: F_s / F_n \quad (3.3)$$

μ : Sürtünme katsayısı

F_s : Sürtünme kuvveti (N)

F_n : Normal kuvvet (N)

3.2 Sertlik Ölçümleri

Sertlik, bir malzemenin yüzeyine uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır ve malzemenin deformasyon karşısındaki direncini ölçer. Sertlik, genellikle bir materyalin çizilme, çökme veya deforme olma direncini belirlemek için çeşitli testler ile ölçülür. En yaygın sertlik ölçüm yöntemleri arasında Rockwell, Vickers ve Brinell sertlik testleri bulunur. Rockwell sertlik testi, malzemeye uygulanan yük altında yüzeyde oluşan kalıcı deformasyonu ölçerken, Vickers sertlik testi, küçük bir piramit şekilli indenter ile yüzeyde oluşan iz alanının büyüklüğünü değerlendirir. Brinell sertlik testi ise, belirli bir yükü büyük bir çelik veya karbür bilye kullanarak malzeme yüzeyinde oluşturulan iz çapını ölçer. Sertlik, malzemenin işlenebilirliğini, dayanıklılığını ve uzun ömürlü kullanımını etkileyen önemli bir özelliktir; dolayısıyla, üretim süreçlerinde ve malzeme seçiminde kritik bir parametre olarak değerlendirilir. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, malzemelerin sertlik değerleri, aşınma, yorgunluk ve performans analizleri için önemli bilgiler sağlar.

3.2.1 Sertlik Testi

Su zımparası ile yüzey düzeltmesi yapılan deney numunelerinin sertlik testleri, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nin Malzeme Metroloji Laboratuvarı'nda bulunan sertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test süreci sırasında, her

numunenin iki farklı yüzeyinde beş ayrı noktada gerçekleştirilen sertlik ölçümleri, numunelerin ortalama sertlik değerlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır.



Şekil 3.15: Sertlik ölçüm test cihazı

Bu ölçümlerden elde edilen değerler (Shore D olarak) ortalama değerler kaydedilmiş ve numunelerin sertlik profilleri çıkarılmıştır. Sertlik testi yapılan cihaz, Şekil 3.15' de sertlik ölçüm test cihazı görselleştirilmiştir.

4. BULGULAR

Doğal Lif Takviyeli Biyobozunur kompozit numuneleri, sertlik, hacim kaybı, aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve aşınmış yüzey FESEM görüntülerinin karşılaştırılması bu bölümde verilmiştir.

4.1 Sertlik Testi Sonuçları

Tablo 4.1: Deney Numunelerini Sertlik Değerleri (Shore D)

Nunumeler							
Ağırlık olarak Takviye Oranları	JUT	KENEVİR	KETEN	BAMBU	KABAK	İPEK	Saf PLA
%0,5	79,08	77,44	99,6	84,1	80,06	81,22	70
%1	81,02	83,62	98,82	79,94	82,72	83,34	70
%1,5	81,18	82,82	99,2	81,6	84,24	82,1	70

Deney numunelerinin yüzeylerinden alınan sertlik değerleri farklılık göstermektedir. Kullanılan liflerin kendi mekanik özellikleri de yüzey sertliklerinde farklılıklara neden olabilir. Örneğin, keten gibi sert ve rijit liflerin bulunduğu bölgelerde sertlik daha yüksek olabilirken, daha yumuşak ipek liflerinin bulunduğu bölgelerde sertlik daha düşük olabilir. Ayrıca, ısıl işlem sırasında uygulanan sıcaklık ve süre, kompozit malzemenin kristallik yapısını ve dolayısıyla sertliğini etkileyebilir. Isıl işlemin homojen olmaması, malzeme içinde farklı bölgelerde farklı kristal yapıların oluşmasına neden olabilir, bu da yüzey sertliğinde farklılıklara yol açabilir. Presleme sırasında uygulanan basıncın ve soğuma hızının yüzeydeki farklı bölgelere eşit olarak dağıtılmaması da yüzeydeki sertlik farklarını artırabilir. Son olarak, numunelerde kullanılan lif oranları (%0,5, %1, %1,5) farklılık gösterebilir ve bu da sertlik üzerinde doğrudan etkili olabilir.

4.2 Doğal Liflerin FESEM Görüntülerinin İncelenmesi

Tez çalışmasında takviye malzemesi olarak kullanılan doğal liflerin 2 farklı büyütmadaki FESEM görüntüleri aşağıdaki Şekil 4.1' de verilmiştir. Aşağıdaki görselde yer alan lifler incelendiğinde, her birinin mikro yapısının kompozit malzeme oluşumunda avantaj ve dezavantajlar sağlayabileceği görülmektedir.

Jut liflerinin (a ve b) yüzeyi, üzerinde gözlemlenen parçacıklarla pürüzlü bir yapı sergilemektedir. Bu parçacıklar kompozit malzeme ile bağlanmada avantaj sağlarken, aşınma sırasında düz yapılara göre daha hızlı kopma eğilimi gösterebilir. Jut lifinin pürüzlü yüzeyi, kompozit matris ile daha güçlü bir mekanik bağ kurabilir, ancak bu lifin mekanik zorlanmalar karşısında daha çabuk hasar görmesi beklenmektedir.

Keten lifleri (c ve d) mikro yapısı oldukça karmaşık bir görünüm sergilemektedir. Lifler arasında belirgin çap farkları gözlemlenmektedir. Bu durum, kompozit malzemeyle bağ kurma sırasında bazı bölgelerde aşınmaya karşı yüksek direnç, diğer bölgelerde ise daha düşük direnç elde edilmesine yol açabilir. Bu çap farklılıkları, lifin homojen bir dayanım sağlamasında zorluklar yaratabilir, bu da kompozit içinde dengesiz aşınma performansına neden olabilir.

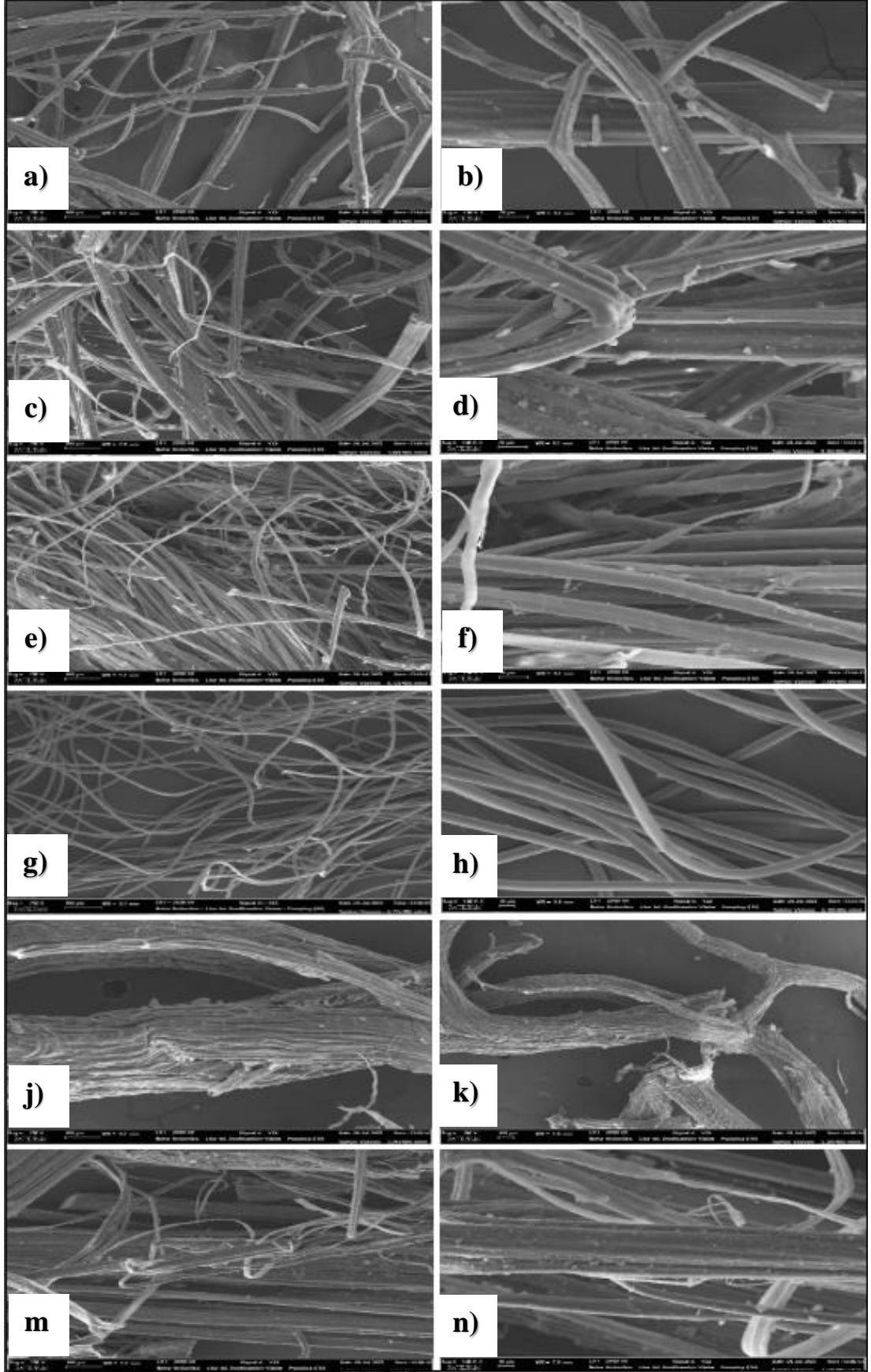
İpek lifleri (e ve f), kullanılan lifler arasındaki tek hayvansal doğal liftir. Lifin dış yapısı protein bazlı olup, diğer liflere kıyasla daha az çap farklılıkları göstermektedir. Dış katmanlarındaki protein yapısı, lifin aşınmaya karşı direnç oluşturmasında etkili olabilir. İpek lifinin düzgün yapısı, kompozit malzemelerde homojen bir dağılım sağlayabilir ve aşınmaya karşı uzun süre dayanıklı kalması beklenmektedir.

Bambu lifleri (g ve h), diğler liflere göre en pürüzsüz yüzeye sahip yapıdadır. Lifin yüzeyinde neredeyse hiç çap farkı bulunmamakta ve oldukça düzgün bir yapı sergilemektedir. Bu pürüzsüzlük, kompozit ile bağ kurmada bir dezavantaj yaratabilir, çünkü mekanik bağlanma yüzeyin girintili çıkıntılı yapısı ile güçlenir. Ancak bambu lifi, düzgün yüzeyi sayesinde kompozitin estetik yüzey gereksinimlerinde kullanılabilir.

Kabak lifleri (j ve k) oldukça odunsu bir yapıdadır ve yüzeyinde büyük çap farkları bulunmaktadır. Bu lifin kompozit malzemeyle bağ kurması, yüzeyindeki girinti ve çıkıntılarının yarattığı avantaj sayesinde beklenenden daha iyi olabilir. Kabak lifi, aralarındaki en sert liftir ve bu sert yapısı, aşınmaya karşı yüksek bir direnç göstermesini sağlayabilir. Ancak, bu sert yapı aynı zamanda yüzeyde deformasyon riskini de artırmaktadır.

Kenevir lifleri (m ve n), çap farkları ve yüzeyde girintili çıkıntılı yapısıyla dikkat çekmektedir. Bu düzensiz yapı, kompozit matris ile güçlü bir bağlanma oluşturabilir ancak homojen bir dayanım sağlamayabilir. Kenevir lifi, kompozit malzemede yer aldığı bölgelerde farklı mukavemet seviyeleri gösterebilir, bu da kompozitin rijitliğini ve dayanıklılığını olumsuz etkileyebilir.

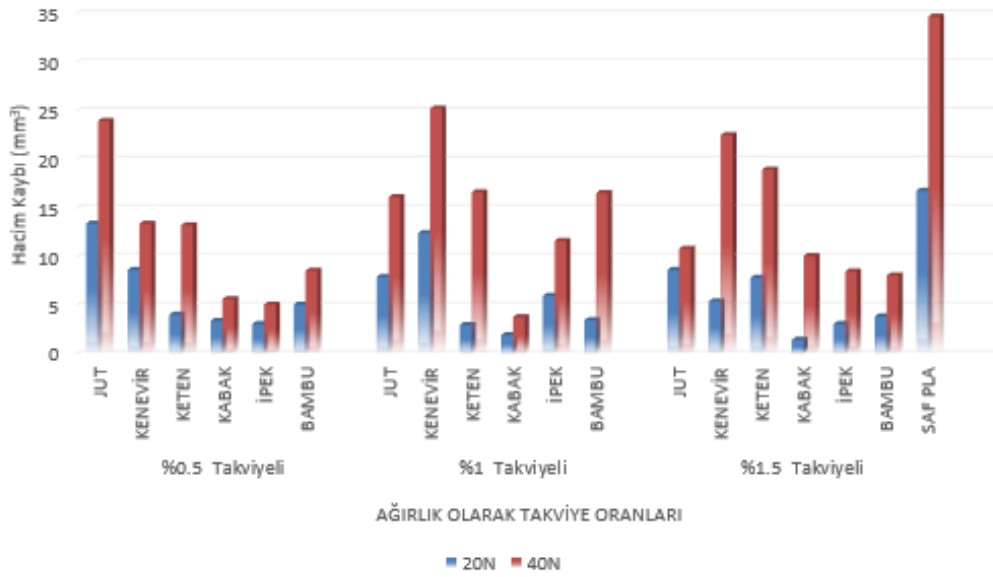
Genel olarak, liflerin mikro yapısındaki bu farklılıklar, kompozit malzemelerin aşınma direnci, mekanik dayanımı ve uzun vadeli performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Pürüzlü ve girintili yapılar mekanik bağlanmayı güçlendirirken, aşınma sırasında daha hızlı bozulma gösterebilirler. Öte yandan, daha düzgün ve homojen yapılar, kompozit malzeme içinde dengeli bir performans sunabilir, ancak bağlanma açısından dezavantaj yaratabilir.



Şekil 4.1 a) Jut lifi 250x büyütme, b) Jut lifi 1000x büyütme, c) Keten lifi 250x büyütme, d) Keten lifi 1000x büyütme e) İpek lifi 250x büyütme f) İpek lifi 1000x büyütme g) Bambu lifi 250x büyütme h) Bambu lifi 1000x büyütme, j) Kabak lifi 250x büyütme, k) Kabak lifi 1000x büyütme, m) Kenevir lifi 250x büyütme, n) Kenevir lifi 1000x büyütme fesem görüntüleri

4.3 Aşınma Deney Sonuçları

Şekil 4.2’ de, farklı deney numunelerinin 20N ve 40N kuvvetler altındaki hacim kayıpları incelenmiştir. Mavi çubuklar 20N, kırmızı çubuklar ise 40N kuvvet altında oluşan hacim kayıplarını temsil etmektedir.



Şekil 4.2 İki farklı yük altında hacim grafiği

Analiz sonucunda, kabak ve ipek numunelerinin her iki kuvvet altında da düşük hacim kaybı gösterdiği, bu malzemelerin aşınmaya karşı daha dirençli olduğu görülmüştür. Bambu numuneleri orta derecede hacim kaybı sergilemiş olup, kuvvet arttıkça hacim kaybı da belirgin şekilde artmıştır. Keten ve kenevir lifleri, 20N kuvvet altında orta düzeyde hacim kaybı gösterirken, 40N kuvvet altında önemli bir artış göstermiştir.

Kabak ve ipek numunelerinin her iki kuvvet altında da düşük hacim kaybı göstermesi, bu malzemelerin aşınmaya karşı daha dirençli olmasının birkaç olası nedeni olabilir. İpek ve kabak lifleri, yapısal olarak yüksek elastikiyet ve mukavemete

sahip olabilir, bu da onların sürtünme sırasında enerji emme kapasitesini artırarak daha az aşınmaya uğramasını sağlayabilir. Ayrıca, bu lifler ile PLA matrisi arasında iyi bir adhezyon sağlanmış olabilir, bu da aşınma sırasında liflerin matrise daha iyi tutunmasını ve hacim kaybını azaltmasını sağlamış olabilir.

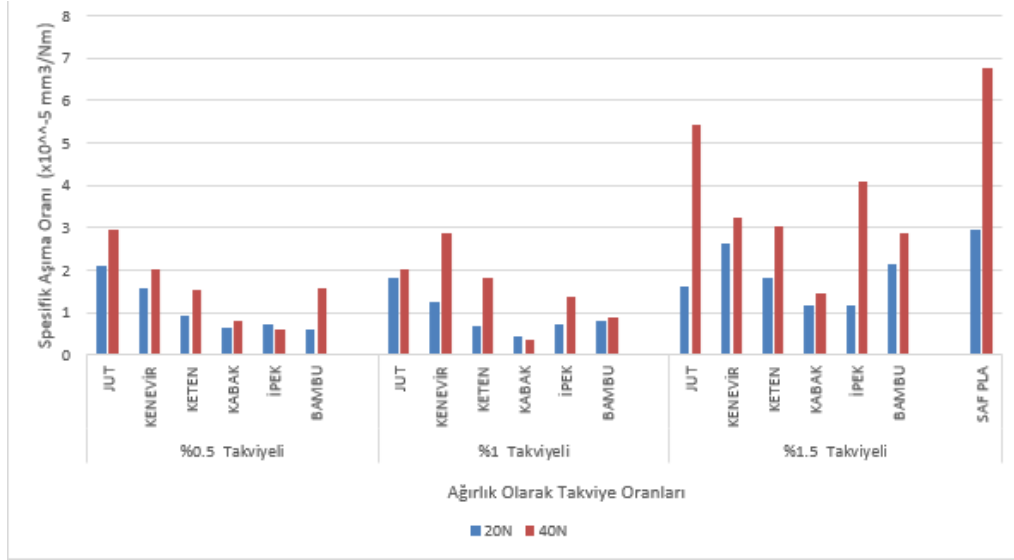
Bambu numunelerinin orta derecede hacim kaybı sergilemesi ve kuvvet arttıkça hacim kaybının belirgin şekilde artması, bambu liflerinin belirli bir kuvvet eşiğine kadar dayanıklılık göstermesi, ancak bu eşğin üzerine çıkıldığında kırılma göstermesiyle açıklanabilir. Bambu liflerinin PLA matrisi ile etkileşimi, belirli bir kuvvetten sonra zayıflayarak hacim kaybının artmasına neden olabilir.

Keten ve kenevir liflerinin 20N kuvvet altında orta düzeyde hacim kaybı gösterirken, 40N kuvvet altında önemli bir artış göstermesi, bu liflerin daha yüksek kuvvetler altında yapısal bütünlüklerini kaybetmeye daha yatkın olabileceğini gösterir. Bu durum, keten ve kenevir liflerinin PLA matrisi içerisinde homojen dağılmamış olmasından veya lif-matris arayüzeyinde zayıf adhezyon nedeniyle daha yüksek kuvvetler altında liflerin matrise yeterince tutunamamasından kaynaklanabilir.

Jut liflerinin özellikle 40N kuvvet altında en yüksek hacim kaybını göstermesi, bu malzemenin aşınmaya karşı daha az dirençli olduğunu işaret eder. Bu durum, jut liflerinin kırılma yapısı, düşük elastikiyet ve PLA matrisi ile zayıf bağlanma özelliklerinden kaynaklanabilir. Jut liflerinin yapısal olarak PLA matrisi içerisinde yeterince güçlü bir şekilde bağlanamaması, kuvvet arttıkça liflerin kolayca ayrılmasına ve hacim kaybının artmasına neden olabilir.

PLA'nın 40N kuvvet altında en yüksek hacim kaybını göstermesi, saf PLA'nın mekanik dayanıklılığının özellikle daha yüksek kuvvetler altında yetersiz kalmasından kaynaklanabilir. PLA, kırılma bir yapıya sahip olduğundan, daha yüksek kuvvetler

altında yapısal bütünlüğünü hızlı bir şekilde kaybedebilir ve bu da hacim kaybının artmasına yol açar. Ayrıca, PLA'nın sürtünme sırasında ısıya karşı duyarlı olması, malzemenin yumuşamasına ve aşınma direncinin azalmasına neden olabilir.



Şekil 4.3 İki farklı yük altında spesifik aşınma oranı grafiği

Şekil 4.3' de grafikte, farklı deney numunelerinin 20N ve 40N yükler altındaki spesifik aşınma oranları incelenmiştir. Mavi çubuklar 20N, kırmızı çubuklar ise 40N yük altında oluşan spesifik aşınma oranlarını temsil etmektedir.

Analiz sonucunda, kabak ve bambu numunelerinin her iki yük altında da düşük spesifik aşınma oranı sergilediği ve bu malzemelerin aşınmaya karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Kabak numuneleri, genel olarak orta derecede aşınma oranına sahip olmasına rağmen, yük arttıkça aşınma oranında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, kabak liflerinin belirli bir yük eşiğine kadar aşınma direncine sahip olduğunu, ancak bu eşiğin aşılmasıyla birlikte aşınma oranının hızla arttığını göstermektedir.

Keten ve kenevir lifleri, 20N yük altında orta düzeyde spesifik aşınma oranı sergilerken, 40N yük altında belirgin bir artış göstermiştir. Bu artış, daha yüksek yükler altında bu liflerin yapısal bütünlüğünü kaybetme eğiliminde olduğunu ve aşınmaya daha yatkın hale geldiğini ortaya koymaktadır. Liflerin PLA matrisi ile olan bağlanma kuvvetinin yüksek yükler altında zayıflayarak, aşınma oranını artırdığı düşünülmektedir.

Jut lifleri, özellikle 40N yük altında en yüksek spesifik aşınma oranını sergilemiştir. Bu, jut liflerinin aşınmaya karşı dirençsiz olduğunu ve daha yüksek yükler altında mekanik özelliklerinin hızla bozulduğunu işaret etmektedir. Jut liflerinin yapısal olarak daha kırılgan olması, yüksek yükler altında liflerin PLA matrisinden kolayca ayrılmasına neden olabilir.

PLA (Polilaktik Asit), 40N yük altında en yüksek spesifik aşınma oranını gösteren numune olmuştur. Bu sonuç, PLA'nın daha yüksek yükler altında mekanik dayanıklılığının zayıf olduğunu ve aşınmaya karşı direncinin düşük olduğunu ortaya koymaktadır. PLA'nın yük altındaki kırılgan yapısı ve sürtünme sırasında oluşan ısının malzemenin yumuşamasına yol açması, bu durumu açıklayan olası faktörlerdir. PLA'nın düşük termal dayanıklılığı, aşınma testlerinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına neden olabilir ve bu da malzemenin hızlı bir şekilde aşınmasına yol açabilir. Bu bulgular, doğal liflerle takviye edilmiş PLA kompozitlerin mekanik performansının, kullanılan lif türüne ve uygulanan yüke bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

Tablo 4.2' deki veriler, farklı doğal lif takviyeli kompozitlerin 20N ve 40N yükler altındaki sürtünme katsayılarını göstermektedir. Bu değerlerin farklılıkları, liflerin yapısal ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

20N yük altında, en yüksek sürtünme katsayısı saf PLA için ölçülmüştür (0,4438), bu da saf PLA'nın diğer lif takviyeli kompozitlere kıyasla daha fazla sürtünmeye maruz kaldığını göstermektedir. Diğer taraftan, bambu (0,1946) ve kenevir (0,1955) en düşük sürtünme katsayılarına sahiptir, bu da bu liflerin daha düşük sürtünme direncine sahip olduğunu ve aşınmaya karşı daha dayanıklı olabileceğini göstermektedir.

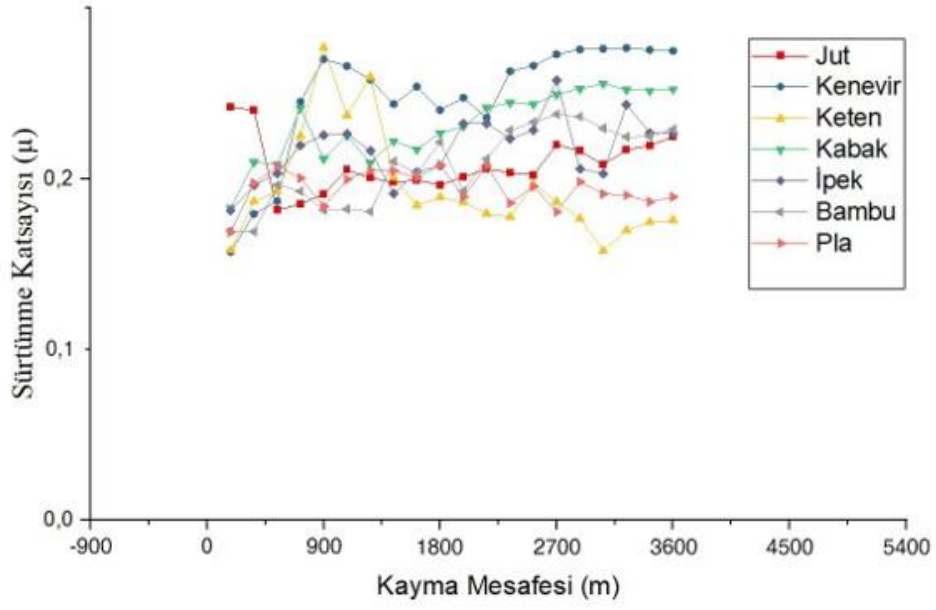
40N yük altında, sürtünme katsayısında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Jut (0,5050) ve kabak (0,4709) lifleri en yüksek sürtünme katsayılarına sahiptir. Bu durum, bu liflerin yüksek yükler altında daha fazla sürtünmeye maruz kaldığını ve muhtemelen yüzey yapılarının bu yükler altında daha fazla deformasyona uğradığını göstermektedir. Bambu (0,3381) yine düşük sürtünme katsayısı ile dikkat çekmektedir, bu da bambunun yüksek yükler altında bile daha az sürtünme direncine sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2: 20N ve 40N yük altında ortalama sürtünme katsayısı (μ) değerleri.

Yük Dağılımı	NUMUNE İSİMLERİ			
	Saf Pla	Jut Takviyeli Pla	Kenevır Takviyeli Pla	Keten Takviyeli Pla
20N	0,22	0,24	0,19	0,23
40N	0,44	0,50	0,46	0,46
Yük Dağılımı	NUMUNE İSİMLERİ			
	Kabak Takviyeli Pla	İpek Takviyeli Pla	Bambu Takviyeli Pla	
20N	0,21	0,20	0,19	
40N	0,47	0,48	0,33	

Sürtünme katsayılarındaki farklılıklar, liflerin mikroyapılarından, yüzey pürüzlülüklerinden ve kimyasal bileşimlerinden kaynaklanabilir. Örneğin, bambu ve kenevir liflerinin düşük sürtünme katsayıları, bu liflerin daha düzgün ve pürüzsüz yüzeylere sahip olmalarından kaynaklanabilir. Jut ve kabak liflerinin yüksek sürtünme katsayıları ise, bu liflerin yüzey pürüzlülüğünün ve mikroyapısal düzensizliklerin daha belirgin olmasından kaynaklanabilir. Ayrıca, liflerin kimyasal bileşimleri ve bu bileşimlerin matris malzemesiyle etkileşimleri de sürtünme katsayısını etkileyebilir.

Bu analizler, farklı doğal liflerin kompozit malzemelerdeki performansını anlamak ve uygulama alanlarına uygun lif-matris kombinasyonlarını seçmek için önemli bilgiler sağlar.



Şekil 4.4 Kayma mesafesine göre sürtünme katsayı grafiği

Her numunenin sürtünme katsayılarının ortalaması alınarak genel bir sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Sürtünme katsayısı arttıkça, numunelerin aşınma kaybı, hacim kaybı ve aşınma oranlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Aşınma testlerinde, devir hızı arttıkça sürtünme kuvveti azalmasına rağmen, testler 1 m/sn hızda ve 60 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda, sürtünme katsayısının başlangıçta yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Şekil 4.4' de Kayma Mesafesine Göre Sürtünme Katsayı grafiği verilmiştir.

Sürtünme katsayısının başlangıçta yüksek olmasının en önemli faktörü yüzey pürüzlülüğüdür. Numunelerin yüzeyindeki mikro pürüzler, sürtünme sırasında daha fazla temas noktası oluşturarak sürtünme kuvvetini artırır. Bu da aşınma kaybı, hacim kaybı ve aşınma oranının başlangıçta daha yüksek olmasına neden olur. Testler

ilerledikçe, yüzey pürüzlülüğü azalır ve daha pürüzsüz bir temas yüzeyi oluşur, bu da sürtünme katsayısının zamanla azalmasına neden olabilir.

Test sonuçlarına göre, sürtünme katsayısının yüksek olduğu numuneler (örneğin, saf PLA ve Jut takviyeli) daha yüksek aşınma kayıpları göstermiştir. Bu durum, bu malzemelerin yüzey yapılarının daha fazla aşınmaya maruz kaldığını ve dolayısıyla daha yüksek hacim kaybı ve aşınma oranı sergilediğini göstermektedir. Öte yandan, bambu ve kenevir gibi daha düşük sürtünme katsayısına sahip numuneler, aşınma testlerinde daha düşük kayıplar göstermiştir.

Bu analiz, yüzey pürüzlülüğünün ve malzeme özelliklerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini vurgulamakta ve farklı malzemelerin aşınma performanslarını anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır. Aşınma testlerinde, malzeme seçimi ve yüzey işleme yöntemleri, aşınma direncini ve sürtünme performansını optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

4.4 FESEM Analizi

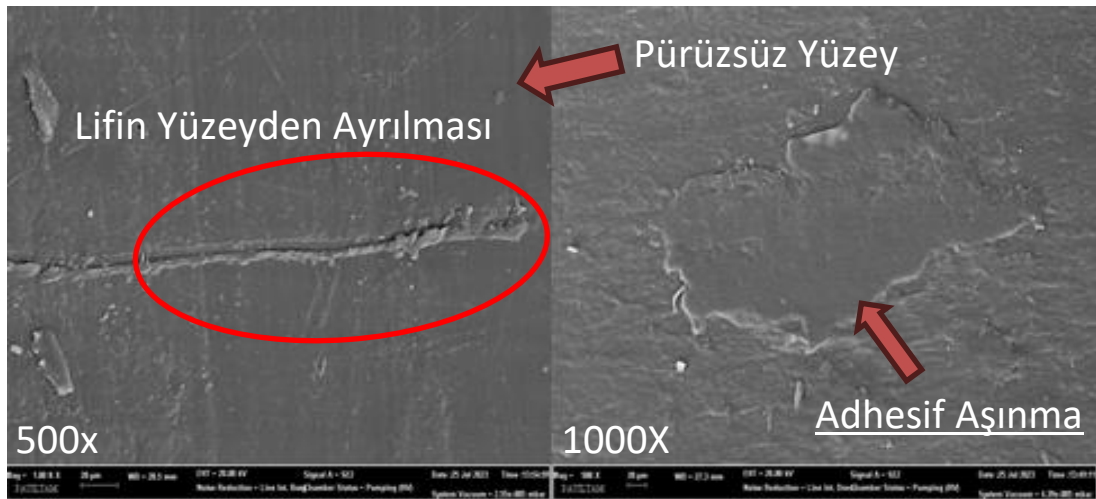
Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM), katı numunelerin yüzeyinde farklı sinyaller üretmek amacıyla yüksek enerjiye odaklanmış elektron ışınları kullanır. Elektron-numune etkileşimi sonucu ortaya çıkan sinyaller, numunenin dış morfolojisi, kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve oryantasyonu gibi çeşitli özellikleri hakkında bilgi sağlar.

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) analizi, numunelerin elementel bileşimini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, taramalı elektron mikroskobu ile uygulanır. İşlem sırasında, numune yüzeyine odaklanmış bir elektron demeti gönderilir. Yüksek enerjili elektronların numune yüzeyine çarpması sonucu, numunedeki atomlardan elektronlar fırlatılır. İç orbitallerden çıkan elektronların yerini

almak üzere dış orbitallerden gelen elektronlar, atomik kararlılığı sağlamak için bu boşluklara atlar. Bu geçiş sırasında, dış orbitallerden gelen elektronlar fazla enerjiyi X-ışınları şeklinde yayarak kaybeder. Bu yayılan X-ışınlarının özellikleri, ilgili atomun yapısı ve enerji seviyeleri hakkında bilgi verir.

Serbest kalan X-ışınları, bir dedektör tarafından algılanır. Dedektör tarafından toplanan veriler, bilgisayar monitöründe tepe noktaları şeklinde görüntülenir ve bu tepe noktalarının analizi, numunenin elementel bileşimini ortaya koyar. Tepe noktalarının altındaki alan, elementlerin miktarı ile orantılıdır ve bu sayede elementlerin konsantrasyonu belirlenir.

Aşağıdaki FESEM görüntüsünde, aşınma testi sonucunda jut lifi takviyeli PLA (Polilaktik Asit) kompozitinin mikroyapısı incelenmektedir. Görüntü, numunenin yüzeyinde oluşan aşınma izlerini ve yüzey hasarlarını detaylı bir şekilde göstermektedir. Şekil 4.5’ de yüzeyleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Pla + Jut lifi 500X ve 1000x ait FESEM görüntüsü

Jut lifi takviyeli PLA kompozitinin aşınma testi sonrası mikroyapısının incelenmesi sonucunda, yüzeyde belirgin aşınma izleri, deformasyonlar ve yüzey

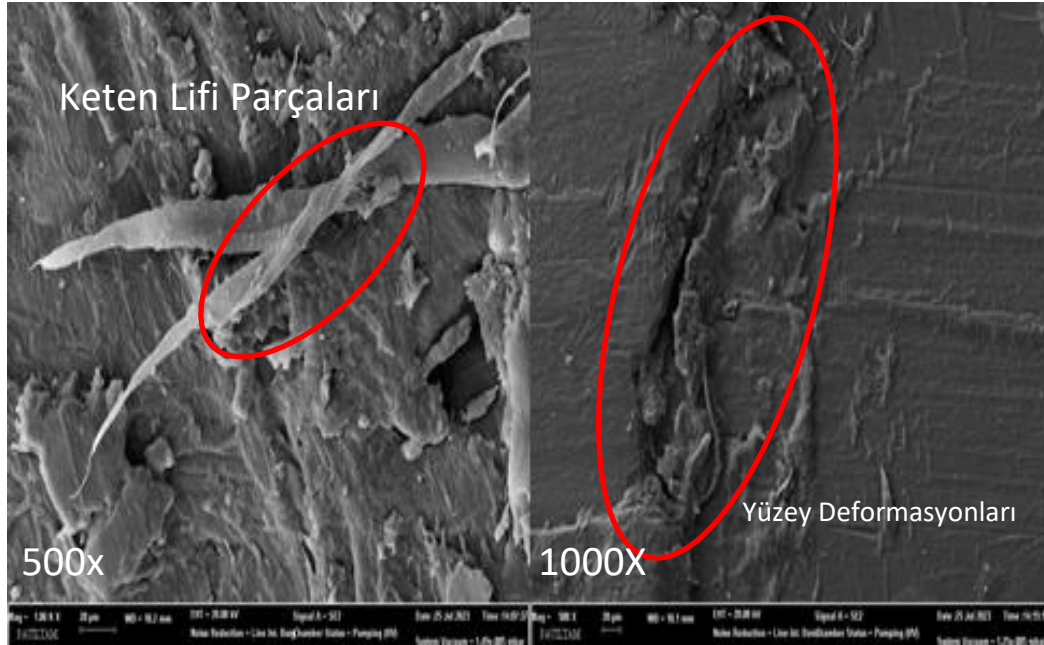
hasarları dikkat çekmektedir. Aşınma izleri, malzemenin kopması, deformasyonu ve mikro çatlakların oluşması gibi aşınma süreci boyunca meydana gelen mekanik zorlanmaların sonucunda ortaya çıkmıştır. Özellikle, bu aşınma izleri ve deformasyonlar, PLA matrisinin ve jut liflerinin aşınmaya karşı direncini test ederken oluşmuş ve liflerin aşınma sırasında davranışını gözler önüne sermiştir.

Jut lifleri, PLA matrisi ile entegre olarak mekanik dayanıklılığı artırmayı hedeflerken, aşınma sırasında liflerin yüzeyden ayrılması veya yüzeye sıvanması gibi istenmeyen durumlar gözlemlenmiştir. Jut liflerinin, PLA ile bağlanma kuvveti, aşınma esnasında azalmakta ve bu da liflerin yüzeyden koparak deformasyon izlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Aşınma testleri sırasında, yüzeydeki mekanik stresler malzeme üzerinde kopmalara yol açarken, liflerin ve kompozit parçalarının yüzeyde yığılma veya yapışma eğilimi gösterdiği de dikkat çekmiştir. Özellikle sıcaklık etkisiyle kopan parçaların yüzeye yeniden yapışması, PLA ve jut liflerinin sürtünme sırasında aşınma direncini azaltan bir faktör olarak görülmektedir.

Görüntüdeki aşınma izleri, adhesif aşınma belirtileri göstermekte ve yüzeyde pürüzlülük, oyuklar ve lif kopmalarıyla birlikte ilerlemektedir. Bu aşınma izlerinin varlığı, mekanik zorlanmaların etkisiyle malzemenin dayanıklılığını kaybettiğini ve yüzeyde deformasyon meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Jut lifleri, PLA matrisi ile birlikte mekanik dayanım açısından bazı avantajlar sağlasa da, aşınma sırasında bağlanma kuvvetlerinin zayıflaması ve liflerin yüzeye tutunamaması sonucunda yüzeyde ciddi hasarlar oluşmuştur.

Adhesif aşınma mekanizmasının baskın olduğu bu aşınma sürecinde, liflerin yer yer yüzeye çıkarak yuvarlanmalar oluşturduğu, bu durumun da aşınma direncini etkilediği

görülmüştür. Sonuç olarak, jut lifleri takviyeli PLA kompozitleri aşınma direncini belirli bir seviyeye kadar arttırmıştır.



Şekil 4.6 Pla + Keten lifi 500Xve 1000x ait FESEM görüntüsü

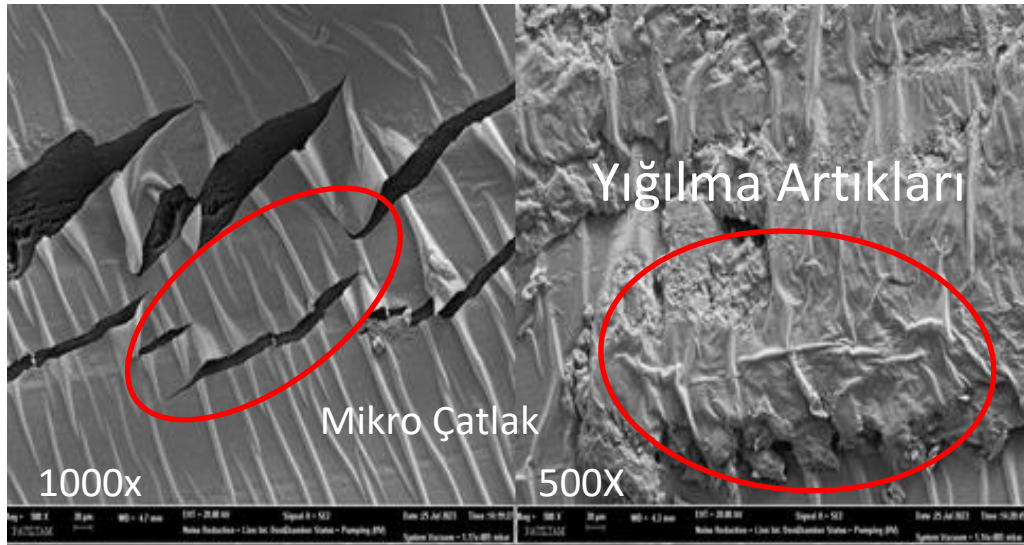
Yukarıdaki FESEM görüntüsünde Şekil 4.6’ da, aşınma testi sonucunda keten lifi takviyeli PLA (Polilaktik Asit) kompozitinin aşınma testi yüzeyini görmekteyiz. Görüntü, numunenin yüzeyinde oluşan aşınma izlerini ve yüzey hasarlarını detaylı bir şekilde incelemektedir. Aşınma izleri, özellikle adhesif aşınma belirtileri göstermektedir ve yüzeyde kopmalar ile deformasyon izleri dikkat çekicidir. Kompozit yüzeyinden kopan lif ve kompozit parçaları, sürtünme ve sıcaklık etkisiyle yüzeyde farklı noktalara yapışmış ve geride döküntü-kırıntılar bırakmıştır. Bu olay, yüzeydeki mekanik zorlanmalar sonucunda yorulma ve mikro kopma aşınma mekanizmalarının devreye girdiğini ve liflerin aşınmaya karşı dayanım göstermekte zorlandığını ortaya koymaktadır.

Keten liflerinin mikroskopik incelenmesi sonucunda, liflerin yüzeylerinin pürüzlü olduğu ve doğal dokusunu koruduğu gözlemlenmiştir. Bu pürüzlülüğün, kompozit malzemelerde mekanik bağlanmayı artırabileceği değerlendirilmektedir.

Lifler, kalınlık açısından çeşitlilik gösterirken, rastgele ve birbirine dolanmış halde oldukları dikkat çekmektedir. Bu tür bir düzen, kompozit malzemelerde izotropik özelliklerin artmasına katkı sağlayabilir. Ancak bazı liflerde gözlemlenen kırıklar ve yüzey hasarları, liflerin mukavemetini azaltan zayıf noktalar oluşturmuş olabilir.

Birleşik olarak değerlendirildiğinde, liflerin yapısal bütünlüğünün ve kompozit malzeme içerisindeki dağılımlarının aşınma direncini doğrudan etkilediği görülmektedir. Aşınma sırasında liflerin yer yer kopması, yüzeye sıvanması ve sıcaklık etkisiyle yeniden yapışması, doğal takviye liflerinin sürtünmeye karşı yeterli direnci sağlayamadığını göstermektedir. Kompozit malzemelerde, liflerin hem bağlanma kuvvetinin hem de yapısal dayanıklılığının bu tür aşınma testlerinde önemli bir rol oynadığı anlaşılmaktadır.

Aşağıdaki FESEM görüntüsünde, aşınma testi sonucunda ipek lifi takviyeli PLA (Polilaktik Asit) kompozitinin mikroyapısı incelenmektedir. Görüntü, numunenin yüzeyinde oluşan aşınma izlerini ve yüzey hasarlarını detaylı bir Şekilde



Şekil 4.7 Pla + İpek lifi 500X ve 1000X ait FESEM görüntüsü

göstermektedir. Şekil 4.7' de İpek lifi 500X ve 1000X ait FESEM görüntüleri verilmiştir.

İpek lifi takviyeli PLA kompozitinin mikroyapısal incelemesi, yüzeyde belirgin aşınma izleri, deformasyonlar ve mikro çatlaklar olduğunu göstermektedir. İpek lifinin ısıya dayanıklılığının düşük olması, sürtünme sırasında yüzeye yığılmasına ve yüzeyde tabakalar oluşturarak yırtılmalara neden olmuştur. Bu yırtılmalar ve çatlaklar, adhesif aşınma belirtileri ile tanımlanmıştır ve malzemenin yüzeyinde ciddi hasarlar bırakmıştır. Özellikle, malzemenin aşınma sırasında sürtünme kuvvetine maruz kalırken, bu tabakaların oluşması, yüzeydeki mikro yapıların bozulduğunu ve yüzeyin mekanik zorlanmalar altında zayıfladığını göstermektedir. Bu süreçte malzeme, aşırı sıcaklık etkisiyle yumuşar ve aşındırıcı etkilere daha duyarlı hale gelir.

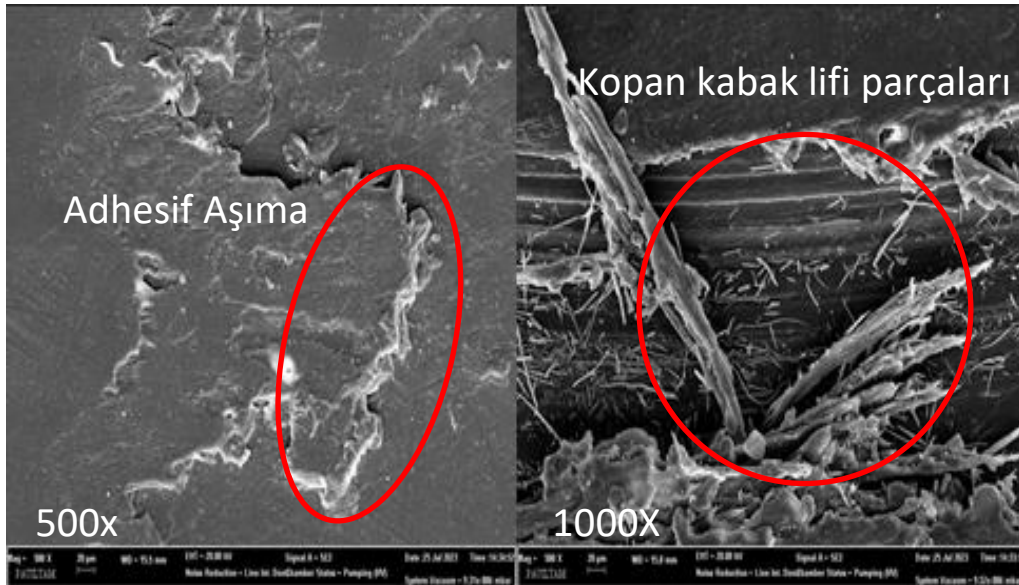
Yüzeyde oluşan aşınma izleri ve mikro çatlaklar, ipek lifi takviyesinin PLA matrisi ile etkileşimi sırasında tam bir bütünlük sağlayamadığını ve özellikle yüksek sıcaklıkta zayıf performans sergilediğini ortaya koymaktadır. İpek lifleri, PLA ile birleştiğinde mekanik dayanımı artırıcı özellikler sergilese de, aşınma sırasında oluşan yüksek sıcaklık ve sürtünme kuvvetlerine karşı yeterince direnç gösterememektedir.

Ayrıca görüntüde, belirgin olarak bazı bölgelerde ipek liflerinin yığılmalar yaptığı gözlemlenmiştir. Bu yığılmalar, özellikle mekanik streslerin yoğunlaştığı bölgelerde gerçekleşmekte ve yüzeyde daha fazla aşınmaya yol açmaktadır. Yığılmaların oluştuğu bu bölgeler, aşınma süreci boyunca mekanik stresin yoğunlaşmasına ve malzemenin daha hızlı aşınmasına neden olmuştur.

Aşınma sırasında yüzeyden kopan lif ve kompozit parçalarının, yüzeye yeniden yapıştığı da tespit edilmiştir. Yüzeyde kopan bu parçalar, sürtünme sırasında sıcaklığın

bambu lifi takviyeli PLA kompozitinin aşınma direncini olumsuz yönde etkileyen başlıca faktörler arasında yer almaktadır. Liflerin yüzeydeki varlığı, sürtünme sırasında hem mekanik dayanıklılığı artırmakta hem de yer yer koparak yüzeydeki hasarları derinleştirmektedir. Bu nedenle, bambu lifi ile takviye edilen PLA kompozitlerin aşınmaya karşı performansı hem liflerin yüzeye yapışma eğilimi hem de aşınma sırasında yüzeyde oluşan deformasyonlar nedeniyle sınırlanmıştır.

Aşağıdaki Şekil 4.9’ da kabak lif takviyeli kompozitin sürtünme yüzeyini incelediğimizde, Adhesif aşınma belirtileri gösterdiğini görmekteyiz. Kabak lifinin yapısal olarak diğer liflere göre daha sert olması, kompozit yüzeyinde belirgin yırtılma izleri ve yırtık içerisine liflerin yapışmasına neden olmuştur. Bu yırtılmalar, aşınma sırasında kopan lif ve kompozit parçalarının yüzeye yapışma eğilimi göstermesiyle ilişkilidir. Liflerin ve kompozit parçalarının yüzeye yeniden yapışması, kabak lifinin sert yapısından kaynaklanmaktadır.

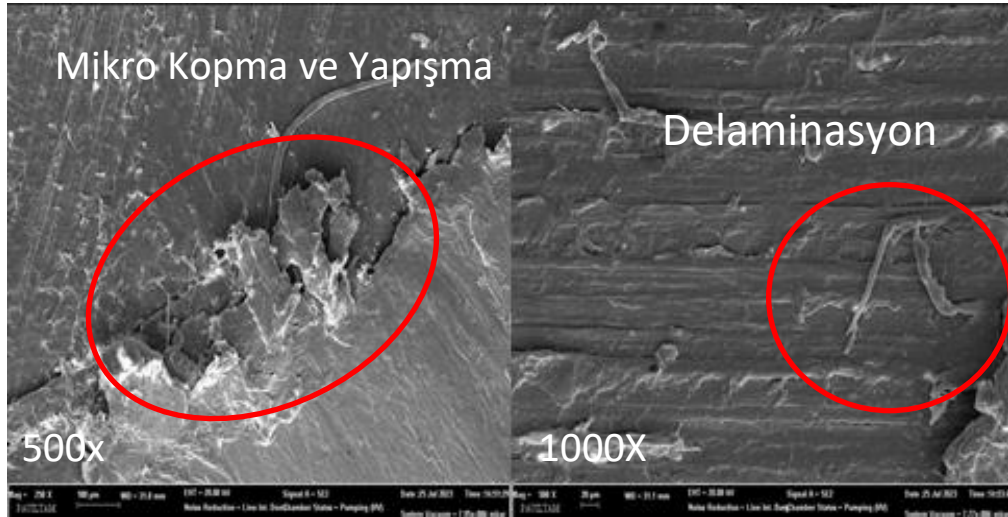


Şekil 4.9 Pla + Kabak lifi 500X ve 1000X ait FESEM görüntüsü

Aynı zamanda, kabak lifinin ısıya dayanıklı olmadığını yüzeye sıvanmasından anlamaktayız. Aşınma sırasında malzemenin deformasyona uğradığı ve kopan parçaların yüzeye yapışarak daha fazla yüzey hasarına neden olduğu görülmektedir.

Kabak lifinin sert yapısı, kompozit ile bağ kurmasında da etkili olmuş, ancak yüzeyde oluşan bu bağ, aşırı mekanik zorlanmalarda zayıflayarak liflerin yüzeye sıvanmasına ve yapışmasına yol açmıştır. Bu bağlanma mekanizması, aşınma direncini artırsa da belirli bir noktadan sonra malzemenin deformasyona uğramasına ve yüzeyde daha fazla hasara yol açmasına neden olmuştur.

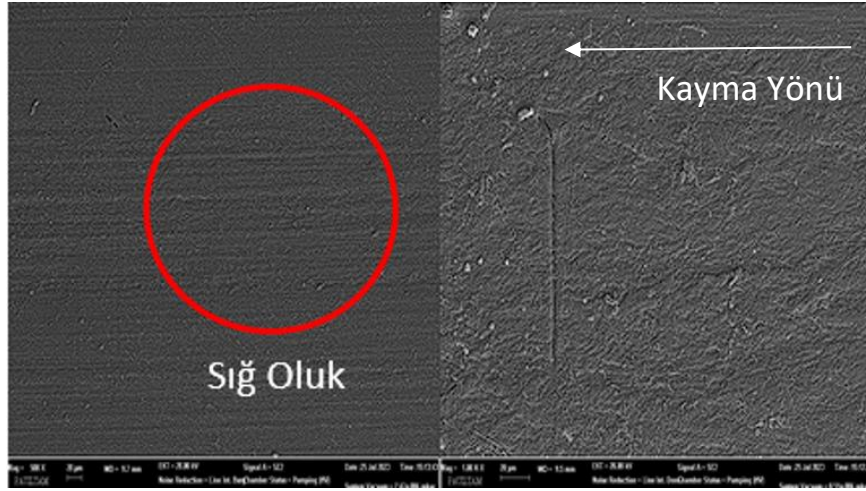
Aşağıdaki Şekil 4.10' da Kenevir lifi takviyeli kompozitin sürtünme yüzeyi incelendiğinde, yüksek düzeyde adhesif aşınma belirtileri olduğu gözlemlenmektedir. Kenevir lifinin ısıya dayanıklılığının düşük olması ve sürtünmeye karşı zayıf bir direnç göstermesi, yüzeydeki yoğun sıvanma izlerinden anlaşılmaktadır. Düşük aşınma koşullarında, aşındırıcı parçacıkların neden olduğu mikro kesme mekanizması baskınken, artan kayma mesafesiyle birlikte delaminasyon ve yorulma aşınma mekanizmalarının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Bu mekanizmalar, yüzeyde yırtılmalara, mikro çatlaklara ve deformasyonlara yol açarak kompozitin aşınma direncini olumsuz etkilemiştir.



Şekil 4.10 PLA + Kenevir lifi 250X ve 1000X ait FESEM görüntüsü

PLA yüzeyinde küçük çizikler oluşmakta ancak bu çizikler yüzeye ciddi bir zarar vermemektedir. Buna rağmen, kenevir liflerinin yüzeye sıvanma ve yığılma eğilimi mekanik stresleri artırmış ve aşınma direncini düşürmüştür. Sürtünme

katsayıları incelendiğinde, kenevir lifinin kompozit verimliliği üzerinde büyük bir olumsuz etkisinin olmadığı, ancak yüzeyde oluşan aşınmanın kontrol altında tutulması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.11 Pla 500X ait FESEM görüntüsü

Yukarıda Şekil 4.11’ de Saf Pla sürtünme yüzeyini görmekteyiz. Yüzeyde aşınma olduğunca fazla görünmekte. Pla ısıyla beraber yüzeyine sıvandığı için yüzey çok daha pürüzsüz gözükmekte. Kılcal çizilmeler ve sürtünme izleri görülmekte. Saf halde sürtünmeye karşı direncinin lif takviyesiz kompozit durumuna göre düşük olduğunu göstermekte. Bunun başlıca nedenlerinden biri, PLA'nın düşük termal dayanıklılığıdır. Sürtünme sırasında oluşan ısının yüzeyinde yumuşamaya neden olması, malzemenin sürtünme kuvvetlerine karşı dayanıklılığını azaltır. Bu durum, malzemenin yüzeyinde deformasyonlara ve aşınmaya yol açtığını gözlemlenmiştir. Ayrıca, PLA'nın sürtünme sırasında yeterli miktarda enerji emememesi, malzemenin yüzeyinde daha hızlı bir aşınma sürecine yol açabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, polilaktik asit (PLA) matrisi ile doğal liflerin kullanımıyla elde edilen biyopolimer kompozitlerin mekanik özelliklerini ve aşınma davranışlarını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda, PLA ile kenevir, keten, kabak, jut, bambu ve ipek liflerinin başarılı bir şekilde birleştirilerek biyobozunur polimer matrisli kompozitler elde edilmiştir. Bu liflerin PLA matrisiyle kombine edilmesi, kompozit malzemelerin performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir.

Çalışmada yer alan doğal lifler, kompozitlerin aşınma direnci özelliklerinin artırılmasında etkili olmuştur. Özellikle kabak ve ipek liflerinin kompozit malzemelerin sürtünme performansını en yüksek düzeyde artırdığı tespit edilmiştir. Bu lifler, kompozitlerin aşınma direncini ve yüzey dayanıklılığını artırmış ve malzemenin rijitliğini ve mukavemetini iyileştirmiştir.

Elde edilen sonuçlar özetle şu şekildedir:

- En yüksek sertlik oranı, ağırlık olarak %1,5 takviyeli kabak lifi takviyeli PLA kompozitte görülmüştür. Bu kompozit, saf PLA'ya göre %20 daha sert bir yapıya sahiptir.

- En düşük sertlik oranı, ağırlık olarak %0,5 takviyeli kenevir lifi takviyeli kompozitte gözlenmiştir ve bu kompozit, saf PLA'ya göre %10 daha sert bir yapıda elde edilmiştir.

- En yüksek hacim kaybı, 40N yük altında aşınmaya maruz kalmış %1 takviyeli kenevir lifi takviyeli kompozitte gözlemlenmiştir. Saf PLA'ya göre %37 daha düşük hacim kaybı ile sonuçlanmıştır.

- En düşük hacim kaybı, 20N yük altında aşınmaya maruz kalmış %1,5 takviyeli kabak lifi takviyeli kompozitte gözlemlenmiştir. 20N'da aşınmaya maruz kalmış saf PLA'ya göre %88 daha düşük hacim kaybı ile sonuçlanmıştır.

Yapılan FESEM analizleri, liflerin PLA matrisi ile iyi bir uyum sağladığını ve homojen bir dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Jut lifi, ısıya karşı dayanıklılığı düşük olduğundan, sürtünme sırasında yüzeye sıvanmış ve yüzeyde tabakalar oluşturmuştur. Bu durum, aşınma sırasında yüzeyde yırtılmalar ve yığılmalara yol açmıştır. Ayrıca, aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde adhezif aşınma mekanizmasının daha baskın olduğu ve takviye edilen liflerin yüzeye çıkıp aşınmayı azalttığı belirlenmiştir.

Çalışmanın bulguları ışığında, biyopolimer kompozitlerin mekanik performansını ve aşınma direncini artırmak için farklı lif oranlarının kullanıldığı daha fazla deney yapılması önerilmektedir. Özellikle kabak ve ipek gibi yüksek performanslı liflerin oranları optimize edilerek daha dayanıklı kompozitler üretilebilir. Ayrıca, bu çalışmada incelenmeyen diğer doğal liflerin de PLA matrisi ile kombine edilerek incelenmesi, malzeme biliminde yeni ufuklar açabilir.

Kompozit malzemelerin uzun vadeli çevresel dayanıklılığı da incelenmelidir. Farklı ortam koşullarında (nem, sıcaklık, UV ışınları vb.) malzemelerin performanslarının nasıl değiştiği belirlenmelidir. Endüstride kullanım alanlarını genişletmek için çekme, eğme, darbe testleri gibi mekanik testler yapılabilir. PLA kompozitin farklı ortamlardaki korozyon davranışları incelenebilir. Bu, kompozitlerin gerçek dünya uygulamalarında nasıl davranacaklarını anlamak için kritik öneme sahiptir. Doğal liflerle takviye edilen PLA kompozitin doğada çözünme süreçleri gözlemlenebilir.

Sonuç olarak, doğal lif takviyeli PLA kompozitlerinin yüksek performanslı ve çevre dostu malzemeler olarak geniş bir uygulama alanına sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışma, biyopolimer kompozitlerin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması için önemli bir temel oluşturmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu malzemelerin daha da optimize edilmesi ve farklı sektörlerde etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. Bu sayede, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından önemli katkılar sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akdoğan, A. ve Vanlı, A. S., “Natural Fiber Thermoplastic Composites in Terms of New Production Technologies: A Review”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (1), 30-36, (2020).
- Anandarajah, C., “Manufacture and charecterization of natural fiber biocomposites for automative applications”, Doktora Tezi, *IowaEyalet Üniversitesi*, Amerika Birleşik Devletleri, (2020).
- Aran, A., “Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler”, *İ.T.Ü.*, İstanbul, (1990).
- Arkles B., “Commercial applications of sol-gel-derived hybrid materials”, *MRS Bulletin*, 26 (5), 402-408, (2001).
- Barut, C., “Aramid esaslı kompozit malzemelerin balistik performanslarının ve mekanik davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı*, Afyonkarahisar, 5-34, (2015).
- Bastioli, C. (ed.), *Handbook of Biodegradable Polymers*, 3, Almanya: De Gruyter, 183-209, (2005).
- Battegazzore, D., Frache, A., Abt, T. ve Maspoch, M. L., “Epoxy coupling agent for PLA and PHB copolymer-based cotton fabric bio-composites”, *Composites Part B: Engineering*, 148, 188-197, (2018).
- Bayraktar, Ö., ”Ön Gerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 18-24, (2016).
- Bernardes, G. P., da Rosa Luiz, N., Santana, R. M. C. ve de Camargo Forte, M. M., “Influence of the morphology and viscoelasticity on the thermomechanical properties of poly(lactic acid)/thermoplastic polyurethane blends compatibilized with ethylene-ester copolymer”, *Journal of applied polymer science*, 137 (31), 1-10, (2020).
- Bhattacharyya, D., Subasinghe, A. ve Kim, N. K., “Natural fibers: Their composites and flammability characterizations”, *Multifunctionality of Polymer Composites*, 1 (1), 102-143, (2015).

- Biron, M., *Thermoplastics and thermoplastic composites*, 1, Amsterdam, Hollanda: Elsevier, (2007).
- Bos, H. L., Müssig, J. ve van den Oever, M. J., "Mechanical properties of short-flax-fibre reinforced compounds", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37 (10), 1591-1604, (2006).
- Brinker, C.J., Scherer G.W., *Sol-gel science: the physics and chemistry of sol-gel processing*, Cambridge, Amerika Birleşik Devletleri: Academic Press, (1990).
- Callister Jr, W. D. ve Rethwisch, D. G., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9, New York, United States: John Wiley & Sons Inc, (2014).
- Carruthers, J., "What is compressinmoulding", *Coventive Composites*, 19(07), (2018).
- Chung, D. D. L., *Composite materials: science and applications*, 2, Berlin, Almanya: Springer Science+Business Media, 14-21, 25-26, (2010).
- Couture, A., Lebrun, G. ve Laperrière, L., "Mechanical properties of polylactic acid (PLA) composites reinforced with unidirectional flax and flax-paper layers", *Composite Structures*, 154, 286-295, (2016).
- Deniz, M.E., "Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işleme presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı", Doktora Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Şanlıurfa, 4, 32-47, (2005).
- Deshpande, A.P., Bhaskar Rao, M. ve Lakshmana Rao, C., "Extraction of bamboo fibers and their use as reinforcement in polymeric composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 76 (1), 83-92, (2000).
- Dinkci, H., "Vakum Torbalamada Basınç Değişkeninin Karbon Elyaf Matrisli Epoksi Yapılarda Estetik ve Mekanik Özelliklere Etkisi", *Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Tasarım Dergisi*, 1 (1), 1-21, (2020).
- Drumright, R. E., Gruber, P. R. ve Henton, D. E., "Polylactic acid thecnology", *Advanced Materials*, 12 (23), 1841-1846, (2000).
- El-Abbassi, F. E., Assarar, M., Ayad, R., Bourmaud, A. ve Baley, C., "A review on alfa fibre (Stipa tenacissima L.): From the plant architecture to the reinforcement of polymer composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 128, (2020).
- Ersoy, H. Y., *Kompozit Malzeme*, 1, İstanbul, Türkiye :Literatür Yayıncılık, (2001).

- Ersoy, M. S., “Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş, (2002).
- Gay, D., *Composite Materials Design and Applications*, (Çev: S. V. Hoa ve S.W.Tsai), CRC Press, 15-20,151,168,187-209, (2003).
- González-Ausejo, J., Sanchez-Safont, E., Lagaron, J. M., Olsson, R. T., Gamez-Perez, J. ve Cabedo, L., “Assessing the thermoformability of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)/poly(acid lactic) blends compatibilized with diisocyanates”, *Polymer Testing*, 62, 235-245, (2017).
- Hamamcı, B., Çiftçi, M. ve Aktaş, T., “Yeşil Kompozitlerde Biyopolimerlerin Kullanımının Önemi”, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 12-24, (2018).
- Hassan, M. E. S., Bai, J. ve Dou, D. Q., “Biopolymers; Definition, classification and applications”, *Egyptian Journal of Chemistry*, 62 (9), 1725-1737, (2019).
- Hatipoğlu, A., “Preparation And Characterization Of Poly (Lactic Acid) / Barite Composites”, Yüksek Lisans Tezi, *Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi*, Adana, (2019).
- Huda, M. S., Drzal, L. T., Ray, D., Mohanty, A. K. ve Mishra, M., “Natural-fiber composites in the automotive sector”, (ed: K. L. Pickering), *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, Sawston, Birleşik Krallık: Woodhead Publishing, 221-268, (2008).
- İnançer, G., “Farklı takviye malzemeli plastik kompozitlerin darbe davranışına çevrenin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 13-25, (2015).
- Kandola, B. K., Pornwannachai, W. ve Ebdon, J. R., “Flax/PP and Flax/PLA thermoplastic composites: Influence of fire retardants on the individual components”, *Polymers*, 12 (11), 1-19, (2020).
- Kılınç, A. Ç., Durmuşkahya, C. ve Seydibeyoğlu, M. Ö., “Natural fibers”, (eds: M. Ö. Seydibeyoğlu, A. K. Mohanty ve M. Misra), *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 1, Sawston, Birleşik Krallık: Woodhead Publishing, 209-235, (2017).
- Korkmaz, N., “Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma”, Yüksek

- Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 4, (2013).
- Koronis, G., Silva, A. ve Fontul, M., “Green composites: A review of adequate materials for automotive applications”, *Composites Part B: Engineering*, 44 (1), 120-127, (2013).
- La Mantia, F. P. ve Morreale, M., “Green composites: A brief review”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (6), 579-588, (2011).
- Liang, Z., Wu, H., Liu, R. ve Wu, C., “Preparation of long sisal fiber-reinforced polylactic acid biocomposites with highly improved mechanical performance”, *Polymers*, 13 (7), 1124, (2021).
- Lotfi, A., Li, H., Dao, D. V. ve Prusty, G., “Natural fiber-reinforced composites: A review on material, manufacturing ve machinability”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34 (2), 238-284, (2021).
- McAdam, B., Brennan Fournet, M. B., McDonald, P. ve Mojicevic, M., “Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and factors impacting its chemical and mechanical characteristics”, *Polymers*, 12 (12), 2908, (2020).
- Mo, X. Z., Wei, F. X., Tan, D. F., Pang, J. Y. ve Lan, C. B., “The compatibilization of PLA-g-TPU graft copolymer on polylactide/thermoplastic polyurethane blends”, *Journal of Polymer Research*, 27 (2),33, (2020).
- Mohammed, L., Ansari, M. N., Pua, G., Jawaid, M. ve Islam, M. S., “A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications”, *International Journal of Polymer Science*, 2015 (1),1-12, (2015).
- Özdemir, Y., “Biyo-Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,(2019).
- Özer, H., “Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *BursaUludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 10-37, (2015).
- Özkan, A., Şişik, N. Ve Öztürk, U., “Kompozit Malzemelerin Ağız, Yüz, Çene Cerrahisinde Kullanımı ve Malzeme Uygunluklarının Belirlenmesi Araştırma Makalesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*,4 (1), 227-242, (2016).

- Patil, A., Patel, A. ve Purohit, R., “An overview of polymeric materials for automotive applications”, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2), 3807-3815, (2017).
- Peters, S. T. (ed.), *Handbook of Composites*, 2, New York, Amerika Birleşik Devletleri: Springer Science+Business Media, (1998).
- Pickering, K. L. (ed.), *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, Sawston, Birleşik Krallık: Woodhead Publishing, (2008).
- Pickering, K. L., Efendy, M. A. ve Le, T. M. “A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112, (2016).
- Pornwannachai, W., Ebdon, J. R. ve Kandola, B. K., “Fire-resistant flax reinforced polypropylene/polylactic acid composites with optimized fire and mechanical performances”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33 (7), 898-914, (2020).
- Saha, P.K., *Aluminium Ekstrüzyon Technology*, Ohio, Amerika Birleşik Devletleri: ASM International The Material Information Society, (2000).
- Schmidt, T.M., Goss, T.M., Amico, S.C. and Lekakou, C., “Permeability of Hybrid Reinforcements and Mechanical Properties of their Composites Molded by Resin Transfer Molding”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(23), 2839-2850, (2008).
- Shakouri, Z., Nazockdast, H., “Microstructural development and mechanical performance of PLA/TPU blends containing geometrically different cellulose nanocrystals”, *Cellulose*, 25, 7167-7188, (2018).
- Sharma, S., Singh, A. A., Majumdar, A. ve Butola, B. S., “Harnessing the ductility of polylactic acid / halloysite nanocomposites by synergistic effects of impact modifier and plasticiser”, *Composites Part B: Engineering*, 188, (2020).
- Sparnins, E., “Mechanical Properties of Flax Fibers and Their Composites”, Doktora Tezi, *Luleå Teknoloji Üniversitesi*, İsveç, (2009).
- Syduzzaman, M., Al Faruque, M. A., Bilisik, K. ve Naebe, M., “Plant-based natural fibre reinforced composites: A review on fabrication, properties and applications”, *Coatings*, 10 (10), 1-34, (2020).
- Şahin, Y., *Kompozit Malzemelere Giriş*, Ankara, Türkiye :Gazi Kitabevi, (2001).

- Thakur, V. K., Thakur, M. K. ve Gupta, R. K., “Review: Raw Natural Fiber Based Polymer Composites”,*International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 19 (3),256-271, (2014).
- Türkmen, İ., “Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 6-9, 23-24, (2012).
- Uygur, İ. U., Saruhan, H., “Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri”, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 167-174(2004).
- Varol, T., “*Aşınma Deneyi*” Karadeniz Teknik Üniversitesi, Laboratuvar Föyü, Trabzon, (2016).
- Vilaplana, F., Strömberg, E. ve Karlsson, S., “Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites”,*Polymer Degradation and Stability*, 95 (11), 2147-2161, (2010).
- Wang, Y., Mei, Y., Wang, Q., Wei, W., Huang, F., Li Y., Li, J. Ve Zhou Z., “Improved fracture toughness and ductility of PLA composites by incorporating a small amount of surface-modified helical carbon nanotubes”,*Composites Part B: Engineering*, 162, 54-61, (2019).
- Web 1, “Biodegradable Plastic and World Biopolymers Market 2019-2020 [online]”, (24 Ekim 2021), <https://ect-center.com/blog/biopolymers-market-2019>, (2020).
- Web 2, “Plastik Enjeksiyon Nedir? [online]” (2 Eylül 2024), <https://plastixmold.com/plastik-enjeksiyon-nedir/>, (2021).
- Woters, M.E.L., Wolfs D.P., Van der Linde M.C., Hovens J.H.P., Tinnemans A.H.A., “Transparent UV Curable Antistatic Hybrid Coatings on Polycarbonate Prepared by the Sol–Gel Method”, *Progress in Organic Coatings*, 51 (4), 312-319, (2004).
- Yıldızhan, H., “Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 5-6, (2008).
- Yoruç, A. H. ve Uğraşkan, V., “Green Polymers and Applications”,*Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 17 (1), 318-337, (2017).