



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİGNİN DESTEKLİ ATIK POLİSTİREN KOMPOZİTLERİNİN
HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

AHMET KESKİN

DANIŞMAN

PROF. DR. DENİZ AYDEMİR

İKİNCİ DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ ORHAN KELLEÇİ

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LİGNİN DESTEKLİ ATIK POLİSTİREN KOMPOZİTLERİNİN
HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet KESKİN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman : Prof. Dr. Deniz AYDEMİR
Üye : Doç. Dr. Eser SÖZEN
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süheyla Esin KÖKSAL
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Orhan KELLEÇİ
Üye : Doç. Dr. Ömer Ümit YALÇIN

BARTIN-2024

KABUL VE ONAY

Ahmet KESKİN tarafından hazırlanan “LİGNİN DESTEKLİ ATIK POLİSTİREN KOMPOZİTLERİNİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu çalışma, 24.06.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Deniz AYDEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Orhan KELLEÇİ danışmanlığında hazırlamış olduğum “LİGNİN DESTEKLİ ATIK POLİSTİREN KOMPOZİTLERİNİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

24.06.2024

Ahmet KESKİN

ÖNSÖZ

Çalışmamın hazırlanması aşamasında desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Deniz AYDEMİR hocam ve yardımcı danışmanlığımı üstlenen sayın Dr. Öğr. Üyesi Orhan KELLEÇİ hocama teşekkür ederim. Desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli aileme şükranlarımı sunarım

Ahmet KESKİN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİGNİN DESTEKLİ ATIK POLİSTİREN KOMPOZİTLERİNİN HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU

Ahmet KESKİN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Deniz AYDEMİR

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Orhan KELLEÇİ

Bartın-2024, sayfa: 66

Bu çalışmada laboratuvar ortamında Derin Eutektik Çözücü (DES) yöntemi ile elde edilen ve piyasadan satın alınan lignin, polistiren polimeri içerisinde dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada, ligninin polistiren malzemenin mekanik, fiziksel ve morfolojik özelliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, dünyada en fazla kullanılan termoplastik malzemelerden birisi olan polistirenin doğal bir polimer olan lignin kullanılarak daha çevreci hale getirilmesini sağlamak ve polistirenin mekanik direnç özelliklerini artırmaktır. Polistiren doğada yüzlerce yıl bozulmadan kalabilir. Bu maksatla çalışmada atık polistiren kullanılmıştır. Böylece polistirenin geri dönüşümü de amaçlanmıştır.

Çalışmada yöntem olarak polistiren ve lignin karışımı çözücü içerisinde eritilmiş ve kauçuk kıvamında karışım hazırlanmıştır. Karışı kalıplandıktan sonra fırın içerisinde çözücü uzaklaşana kadar bekletilmiştir. Çözücü aseton kompozit içerisinde uzaklaştığında, kompozit sertleşmiştir. Fırından alınan kompozitler, ebatlanarak analiz örnekleri hazırlanmıştır.

Lignin dolgulu polistiren kompozitin mekanik karakterizasyonunda eğilme, eğilmede elastikiyet modülü, çekme ve şok analizleri gerçekleştirilmiştir. Fiziksel karakterizasyonunda su alma, şişme ve yoğunluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Morfolojik analiz yöntemlerinde ise stereo elektron mikroskop kullanılarak kompozitlerin yüzey ve matris iç yüzeyi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre lignin dolgulu polistiren kompozitlerin eğilme dirençlerinde iyileşme tespit edilmiştir. Eğilme dirençlerdeki iyileşmeye rağmen lignin ilavesi kompozitin çekme dirençlerini azaltmıştır. Kopmada uzama oranları ticari ligninde azalırken DES (Deep Eutectic Solvents) yöntemiyle elde edilen lignin kullanımında artmıştır. Kompozitlerin fiziksel özelliklerinden kalınlığına şişme ve su alma miktarları artarken yoğunluklar düşmüştür. Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde polistiren polimerlerin lignin gibi doğal bir polimer ile takviye edilmesinden olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ahşap, geri dönüşüm, lignin, polimer kompozit, polistiren.

Bilim Alanı Kodu: 120413, 120419, 120420

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

LIGINE PRODUCTION AND ASSESSMENT IN POLYSTYRENE COMPOSITE PRODUCTION

Ahmet KESKİN

Bartın University

Graduate School

Department of Forest Industry Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Deniz AYDEMİR

Second Advisor: Assist. Prof. Dr. Orhan KELLEÇİ

Bartın-2024, pp: 66

In this study, lignin obtained in the laboratory and purchased from the market was used as a filler in polystyrene polymer. How lignin affects the mechanical, physical and morphological properties of polystyrene material was investigated. The aim of the study is to make polystyrene, one of the most used thermoplastic materials in the world, more environmentally friendly by using lignin, a natural polymer, and to increase the mechanical resistance properties of polystyrene. Polystyrene can remain intact in nature for hundreds of years. For this purpose, waste polystyrene was used in the study. Thus, it also aimed to recycle polystyrene.

As a method in the study, the polystyrene acetone lignin mixture was melted in the solvent and the rubber-like mixture was molded and kept in the oven until the solvent was removed. When the solvent acetone moved away from the composite, the composite hardened. Composites taken from the furnace were sized and analysis samples were prepared.

In the mechanical characterization of lignin-filled polystyrene composite, bending, modulus of elasticity in bending, tensile and shock analyzes were carried out. In physical characterization, water uptake, swelling and density analyzes were performed. In morphological analysis methods, the surface and matrix inner surface of the composites were examined using a stereo electron microscope.

According to the results obtained, an improvement in the bending strength of lignin-filled polystyrene composites was detected. Despite the improvement in bending strengths, the addition of lignin reduced the tensile strengths of the composite. While elongation rates at break decreased in commercial lignin, they increased in the use of lignin obtained by the DES (Deep Eutectic Solvents) method. As the physical properties of the composites increase, the swelling and water absorption amounts increase, while the densities decrease. When the results obtained are evaluated in general, positive results were obtained from the reinforcement of polystyrene polymers with a natural polymer such as lignin.

Keywords: Lignin, polymer composite, polystyrene, recycling, wood.

Scientific Field Code: 120413, 120419, 120420

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Kompozit Malzemeler.....	2
1.2 Kompozitlerin Sınıflandırılması	3
1.2.1 Metal Matrisli Kompozitler.....	3
1.2.2 Polimer Matrisli Kompozitler	3
1.2.3 Seramik Matrisli Kompozitler (CMC).....	3
1.2.4 Partikül Dolgulu Kompozitler	4
1.2.5 Lif Kompozitler	5
1.2.6 Doğal Lif Dolgulu Polimer Kompozitler	6
1.3 Çevre ve İnsan Sağlığı Açısından Kompozit Malzemeler	7
1.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	7
1.5 Lignin Üretimi, Uygulamaları, Ürünleri ve Çevresel Etkileri	11
1.6 Lignin izolasyonu	13
1.7 Lignin Delignifikasyon Yöntemleri.....	14
1.8 Makro/Mikro Destek Materyalleri	15
1.9 Polimer Matriks/Destek Materyal Arasındaki Etkileşimler	16
1.9.1 Polimer Matriks Kompozitlerde Yüzeyler ve Fazlar Arası İlişkiler	17
1.9.2 Islanma, Yapışma ve Dispersiyon (Yayılma).....	18
1.10Yapışma Teorileri	19
1.10.1 Kimyasal Bağlanma	19
1.10.2 Elektrostatik Bağlanma.....	19
1.10.3 Mekanik Bağlanma	20

1.10.4 Materyaller Arası Difüzyon	21
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	22
2.1 Lignin Dolgulu Polistiren Kompozitler Üzerine Yapılmış Çalışmalar	22
3. MATERYAL VE METOT	27
3.1 Materyal.....	27
3.1.1 Şişirilmiş Polistren (EPS)	27
3.1.2 Ekstrüde Edilmiş Polistren (XPS).....	28
3.1.3 Aseton	29
3.1.4 Lignin	29
3.2 Metot	30
3.2.1 EPS ve XPS'lerin çözündürülmesi ve örneklerin hazırlanması.....	30
3.2.2 Eğilme Direnci.....	32
3.2.3 Çekme Direnci ve Çekmede Elastikiyet Modülü.....	33
3.2.4 Yoğunluk	34
3.2.5 Su Alma ve Kalınlığına Şişme	34
3.2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	35
3.2.7 Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre (FTIR).....	36
3.2.8 İstatistik Yöntem	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
4.1 Mekanik Özellikler.....	38
4.1.1 Eğilme Direnci.....	38
4.1.2 Eğilmede Elastikiyet Modülü	40
4.1.3 Çekme Direnci.....	41
4.1.4 Çekmede Elastikiyet Modülü	42
4.1.5 Kopmada Uzama Oranı	43
4.2 Fiziksel Özellikler.....	44
4.2.1 Kalınlığına Şişme miktarı.....	44
4.2.2 Su alma miktarı.....	45
4.2.3 Yoğunluk	46
4.3 Morfolojik ve Yapısal Özellikler	47
4.3.1 SEM mikroskop Analizi	47
4.3.2 FTIR Analizi.....	49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	52

KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	66



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Polistren malzemeden üretilmiş ahşap görünümlü akustik panel.....	1
1.2: Polimer matrisli kompozit (Hand-lay-up) üretim şeması (Beşergil, 2024).....	3
1.3: CMC'lerin takviye malzemelere göre sınıflandırılması (Beşergil, 2024).....	4
1.4: Partikül dolgulu kompozitler (a) büyük partikül dolgulu (b) nano partikül dolgulu kompozit şeması	5
1.5: Lif takviyeli kompozitlerin şematik diyagramı (a) süreksiz uzun lifli ve yönlendirilmiş (b) süreksiz kısa lifli ve yönlendirilmiş (c) süreksiz kısa ve rastgele yönelimli	5
1.6: Dolgulu polimer kompozitler (Gülbeyaz, 2024).....	6
1.7: Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi ve önem seviyesi (Şerifi vd., 2018).....	9
1.8: Lignin izolasyonu üretiminin genel şeması (Holladay vd., 2007).....	13
1.9: Delignifikasyon genel şeması (Olgun, 2019)	14
1.10: Polietilen Matriks ve Odun Arasındaki Kötü (a) ve İyi (b) Bağlanma (Oksman ve Bengtsson, 2007).	17
1.11: Odun Polimer Kompozitlerin Enine Kesitlerinde Yüzeyler ve Fazlar Arası Bölgelerin Şematik Tarifi (Niska ve Sanadi, 2008).	18
1.12: Masif Bir Yüzeyde Bir Damlanın Temas Açısı, Islanma (a) ve Islanmama Durumu (b) (Aydın 2004).....	18
1.13: Farklı Yapışma Mekanizmaları: (a) Interdifüzyon sonrası moleküler birleşmeyle oluşan bağlanma, (b) Elektrostatik çekimle oluşan bağlanma, (c) Yüzeydeki polimer oriyantasyonuyla oluşan anyonik yüzeyi çeken moleküllerin sonunda katyonik grupların oluşması, (d) Bir yüzeydeki A grupları ile diğer yüzeydeki B grupları arasındaki kimyasal bağlanma, (e) Sıvı bir polimer, katı bir yüzeyi ıslattığında oluşan mekanik bağlanma (Niska ve Sanadi, 2008).	20
3.1: Pentan ve sıcak buhar uygulanarak şişirilmiş EPS	27
3.2: Ekstrüder kullanılarak üretilmiş XPS	28
3.3: PS'nin çözündürülmesinde kullanılan aseton	29
3.4: Satın alınan ticari lignin	30
3.5: Analiz örneklerinin hazırlanması (a) lignin aseton karışımı, (b) EPS ve XPS'nin çözündürülmesi, (c) çözündürülmüş örnek, (d) Farklı oranlarda lignin	

içeren örnekler, (e) çözeltinin kalıplanması, (f) çözücünün uzaklaştırılması için fırınlama, (g) PS kontrol örneği, (h) hazırlanan diğer örnekler	31
3.6: Eğilme analizi test düzeneği	33
3.7: Çekme analizi test düzeneği.....	34
3.8: Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	36
3.9: FTIR analiz cihazı	36
4.1: Eğilme direnci diyagramı.....	39
4.2: Eğilmede elastikiyet modülü diyagramı.....	40
4.3: Örneklerin çekme dirençleri diyagramı	41
4.4: Çekmede elastikiyet modülü	42
4.5: Örneklerin kopmada uzama oranı.....	43
4.6: Kalınlığına şişme miktarı tayini	45
4.7: Su alma miktarı tayini	46
4.8: Yoğunluk analiz sonuçları	47
4.9: SEM analizi	48
4.10: FTIR analizi sonuçları	50

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Polimer matrisler ve uygulama alanları	10
3.1: EPS malzemesinin içeriği	28
3.2: EXP malzemesinin içeriği.....	28
3.3: Örnek deseni	32
4.1: Örneklerin mekanik analiz sonuçları	38
4.2: Fiziksel özellikler	44



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

km	: kilometre
m	: metre
m ²	: metrekare
m ³	: metreküp
nm	: nanometre
p	: korelasyon katsayısı
r	: serbestlik derecesi
χ^2	: ki kare dağılımı

KISALTMALAR

ANOVA	: Analysis of Variance
CLT	: Cross Laminated Timber
PS	: Polistren
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
MOR	: Eğilme Direnci (Modulus of Rupture)
MOE	: Eğilmede elastikiyet modülü (Modulus of Elasticity)
LSS	: Kopmada Uzama Direnci (Lap Shear Strength)
ANOVA	: Varyans Analizi (ANalysis Of VAriance)
SPSS	: İstatistik Programı (Statistical Package for the Social Sciences)
WPC	: Odun Plastik Kompozit
PAEK	: Poliakrileterketon
PEI	: Polieterimid
PEKK	: Polieterketon keton
EMI	: Elektromanyetik girişim
GFRP	: Glass Fiber Grafted Polimer
CMC	: Seramik Matrisli Kompozit
DES	: Derin Eutektik Çözücü

1. GİRİŞ

İnsan nüfusundaki hızlı artış dünya kaynaklarının hızla tüketilmesine neden olmuştur. Özellikle orman kaynaklarımız insan nüfusundaki artıştan son derece olumsuz etkilenmiştir. Son 300 bin yıl içerisinde yaşanan nüfus artışı son 300 yıl içerisinde yaşanmıştır. Bu durum kişi başına düşen odun kullanım miktarı azalsa bile toplamda kullanılan odun miktarını artırmıştır. Orman endüstrisi odun ihtiyacını karşılamak için odun kompozit malzemelerin üretimine başlamıştır. Odun kompozitler sanayi artıklarının da kullanımına imkan tanınması bakımından çevreci bir üretim olduğu söylenebilir. Fakat odun kompozitlerin yapımında sentetik tutkalların kullanılması formaldehit emisyonuna neden olmaktadır. Formaldehit ise kanserojen bir polimer olduğu için kompozit malzemeler içerisindeki miktarının azaltılması üzerine çok sayıda araştırma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir (Ghani vd., 2018; Movahedi vd., 2021; Kord vd., 2022).

Bu araştırmaların yanı sıra polistren gibi bazı termoplastik polimerlerin dolgu maddeleri ile güçlendirilerek ahşap malzeme yerine kullanımı üzerine üretimler gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Polistren malzemeden üretilmiş ahşap görünümlü akustik panel

Polistiren dünyada en fazla kullanılan termoplastik polimerlerden birisidir. Doğada geri dönüşümü oldukça güçtür ve çevre kirliliğine neden olmaktadır (Prachi Patel 2022). Polistirenin geri dönüştürülmesi için daha sürdürülebilir alternatif yöntemler bulunmaktadır.

Polistireni daha değerli bileşiklere parçalamak için kimyasal geri dönüşüm işlemleri geliştirilmiştir. Bazı araştırmacılar polistiren bağlarını katalitik olarak parçalamak için ışık kullanan düşük maliyetli süreçleri keşfetmişlerdir (Musivand vd., 2023). Başka araştırmacılar ise pirolizi ve hidrotermal sıvılaştırmayı içeren termokimyasal geri dönüşüm metodunu kullanarak polistireni geri dönüştürmeye çalışmışlardır. 400-600 °C sıcaklıklardaki piroliz işleminden, %40 stiren içeren yağ ve gaz üretebilir (Lopes ve Botaro 2014). 360 °C'de 4 saat boyunca hidrotermal sıvılaştırma, polistireni tamamen aromatik bileşiklerden oluşan ve suda çözünebilen bileşiklere ayrıştırabilir (Linden 2002). Bu yöntemler polistirenin geri dönüştürülmesi ve çevresel etkisinin azaltılması için potansiyel çözümler sunmaktadır. Bu sebeple polistirenin geri dönüştürülmesi önem arz etmektedir.

Bu çalışmada atık polistiren lignin dolgu maddesi ile güçlendirilerek polimer kompozit elde edilmiştir. Aşağıda polimer kompozit malzemeler hakkında bilgi verilerek konunun kapsamı ve literatürdeki yeri irdelenmiştir.

1.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler “kullanılan herhangi bir bileşenden daha iyi özellikler gösteren iki veya daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde herhangi bir kombinasyonundan oluşur” şeklinde tanımlanmaktadır. Kompozitler, matris ve takviye edilen malzeme bileşenlerinden oluşur. Takviyeler genelde matrisin mekanik özelliklerini artırma niyetiyle kullanılır fakat bazı durumlarda mekanik özellikleri düşürdüğü bilinmektedir (Türkmen 2019).

Kompozitin yapısını oluşturan büyük kısmına 'Matris' denir. Takviye (dolgu) malzemeleri matris içerisine belirli oranlarda ilave edilerek matris malzemesi ile mekanik, fiziksel, kimyasal veya elektriksel bağ yapması sağlanır. Kompozit malzemeler üretirken malzemede faz değişimleri gözlemlenebilir. Kompozit malzemelerin matris kısmı polimer, metal ve seramik malzemelerden oluşabilir. Kompozitlerde kompozitin güçlendirilmesi ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla bazı katkı maddeleri kullanılır ve bu işleme 'Güçlendirme' denir. Takviye olarak malzemelerin özelliklerini etkilemek için farklı türde takviye malzemeleri kullanılabilir.

1.2 Kompozitlerin Sınıflandırılması

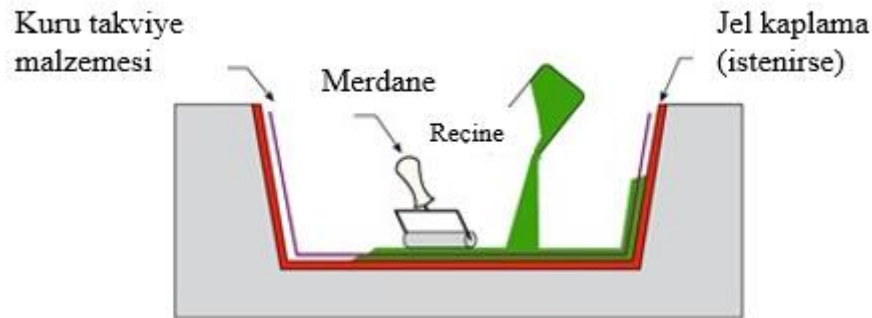
Beşergil (2024)'e göre kompozit malzemeler matris yapısına ve içeriğindeki takviye malzemesinin yapısına göre sınıflandırılırlar. Matris malzemesine göre bazı kompozitler aşağıda verilmiştir.

1.2.1 Metal Matrisli Kompozitler

Fe, Al, Mg ve Cu gibi metalik matrislerden oluşurlar. Mühendislik özellikleri nedeniyle metal matrisli kompozitler popüler hale gelmişlerdir. Önemli özellikleri ise diğer metal ve metal alaşımlarına göre daha sert ve hafif olabilmeleridir (Chawla ve Shen 2001).

1.2.2 Polimer Matrisli Kompozitler

Farklı uygulamaları nedeniyle metal matrisli veya seramik matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında önemli ve değerli bir kompozit grubu olarak kabul edilmektedir. Termoplastikten (polietilen, polistiren, polipropilen, polivinil klorür) oluşan ve cam karbon, Kevlar elyafları ve çelik veya ısıyla sertleşen (polyester, poliüretan, üre formaldehit epoksi) içeren matristen oluşurlar (Şekil 1.2) (Beşergil 2024).

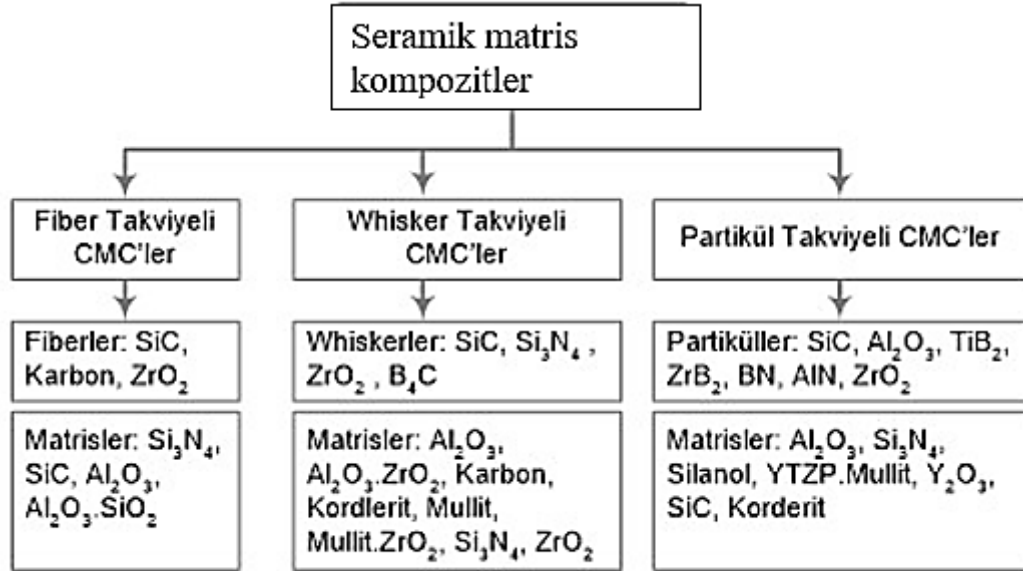


Şekil 1.2: Polimer matrisli kompozit (Hand-lay-up) üretim şeması (Beşergil 2024)

1.2.3 Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)

Bu tür kompozitler, dağınık fazlı yapıda olan seramikten oluşurlar. Yeni teknolojiler ve yeni işleme yöntemleri geliştikçe oldukça popüler olmuşlardır. SiCp /Al₂O₃ SiCf /Al₂O₃ Al₂O₃f /Al₂O₃ Al₂TiO₅ / Al₂O₃ ZrB₂p/ZrC polimerlerini seramik matrisli polimerlere örnek olarak

verebiliriz (Şekil 1.3). Seramik matrisli kompozitlerde yüksek performanslı ürünler üretilmesine rağmen kırılmalık hala seramik malzemenin büyük bir dezavantajı olmaya devam etmektedir (Devaiah vd., 2012).

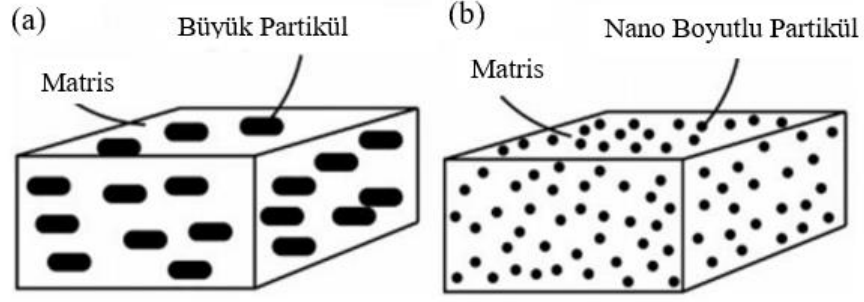


(Tipik bazı takviye ve matris örnekler verilmiştir)

Şekil 1.3: CMC'lerin takviye malzemelere göre sınıflandırılması (Beşergil 2024)

1.2.4 Partikül Dolgulu Kompozitler

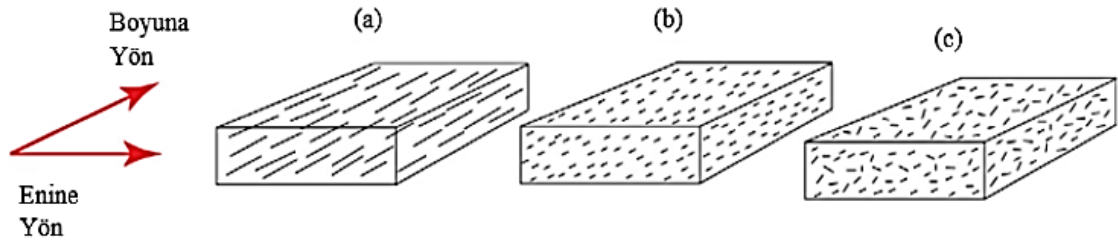
Dolgu malzemesi olarak kullanılan materyaller partikül halindedir. Partiküller küresel, kübik, diğer düzenli veya düzensiz şekillerde olabilirler. Genel olarak parçacıklar kırılma direncini arttırmada çok etkili değildir ancak kompozitin sertliğini artırma konusunda etkilidirler. Parçacık dolgu maddeleri, termal ve elektriksel iletkenlikleri değiştirmek, yüksek sıcaklıklarda performansı artırmak, sürtünmeyi azaltmak, aşınma ve aşınma direncini arttırmak, işlenebilirliği arttırmak, yüzey sertliğini geliştirmek gibi matris malzemelerinin özelliklerini geliştirmek için belirli oranlarda (%1-49) matris içerisinde kullanılır (Şekil 1.4) (Suzuki vd., 1995).



Şekil 1.4: Partikül dolgulu kompozitler (a) büyük partikül dolgulu (b) nano partikül dolgulu kompozit şeması

1.2.5 Lif Kompozitler

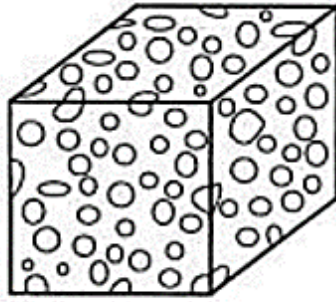
Kalınlığının yaklaşık 100 katı uzunluğa sahip olan malzemelere lifsel yapıda malzemeler denilmektedir. Bu malzemeler içerisinde bulunduğu matrise mekanik direnç kazandırır. Son zamanlarda elyaf liflerinin termoset reçineler içerisinde kullanılması ile dayanıklı ve hafif kompozitler üretilmektedir. Bu malzemeler deniz araçlarından kara araçlarına havacılıktan uzay araştırmalarına kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Lifleri doğal ve sentetik lifler olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Doğal lifler pamuk, ahşap ve kaşmir gibi bitkisel, hayvansal ve mineral kaynaklı malzemelerden elde edilebilir. Bilim insanları doğal liflere alternatif olarak sentetik liflerde geliştirmişlerdir. Cam ve karbon lifleri bunlara örnek olarak gösterebiliriz. Lifler matris içerisinde yönlendirilmiş veya rasgele şekilde bulunabilir (Şekil 1.5) (Haghdan ve Smith 2015; Mohammed vd., 2015; Hall vd., 2022).



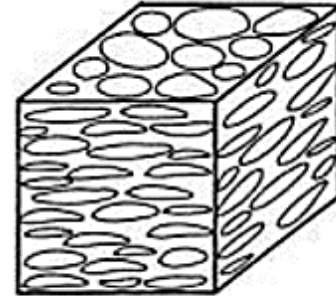
Şekil 1.5: Lif takviyeli kompozitlerin şematik diyagramı (a) süreksiz uzun lifli ve yönlendirilmiş (b) süreksiz kısa lifli ve yönlendirilmiş (c) süreksiz kısa ve rastgele yönelimli

1.2.6 Doğal Lif Dolgulu Polimer Kompozitler

Son yıllarda, termoplastik polimerlerin içerisinde dolgu materyali olarak kullanılan cam gibi sentetik elyaf takviyelerinin yanında doğal bitki lifleri de kullanılmaya başlanmıştır (Wambua vd., 2003; Tserki vd., 2005). Bitkisel liflerin düşük yoğunluklu ve maliyetinin düşük olması, birçok kullanım alanı ile ilgili yeterli çekme veya eğilme mukavemetine sahip olması, iyi ısı yalıtımı, yenilenebilir kaynaklardan üretilebilmesi, çevresel olumsuz etkilerinin bulunmaması, geri dönüşümün mümkün olması ve biyolojik olarak parçalanma özelliği bulunması bakımından tercih edilmektedir (Li vd., 2000; Baiardo vd., 2004). Literatürde mikro ölçekten nano ölçeğe kadar doğal liflerin özelliklerine yönelik pek çok çalışmanın mevcut olduğu görülmektedir. Doğal lifler polimer matris içerisinde partikül, lamel veya lif halinde bulunabilir (Şekil 1.6) (Fahlén ve Salmén 2005; Fernández-Blázquez vd., 2013).



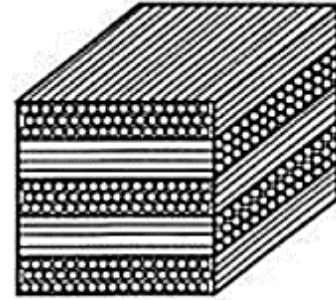
Partikül takviyeli
kompozit



Lamel esaslı
kompozit



Fiber takviyeli
kompozit



Laminant kompozit

Şekil 1.6: Dolgulu polimer kompozitler (Gülbeyaz 2024)

1.3 Çevre ve İnsan Sağlığı Açısından Kompozit Malzemeler

Çevre ve insan sağlığını olumsuz etkileyen en önemli konulardan birisi termoplastik atıklardır. Plastiklerin artan nüfus artışıyla paralel olarak daha fazla miktarda kullanılmaya başlanması geri dönüşüm problemini ortaya çıkarmıştır. Uygun koşullarda geri dönüştürülmeyen termoplastikler çevre kirliliğine neden olmaktadır. Dünyada en fazla kullanılan termoplastik polimerlerden birisi polistirendir. Polistiren petrol bazlı bir polimerdir. Son 30 yılda (Bajwa vd., 2019), petrol bazlı maddeleri azaltmak amacıyla plastik üretiminde yüksek performanslı termoplastikler (Gao vd., 2012; Iram vd., 2021) oluşturmak için lignin gibi biyolojik olarak parçalanabilen bileşenleri polimerlere entegre etmek için önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu sayede polistirenin doğada çabuk bozulması ve çevre kirliliğine neden olmaması sağlanabilir. Ancak uygulamada bazı zorluklar bulunmaktadır. Lignin amorf, dallanmış bir yapıya sahiptir. Bu durum onun sert ve kırılgan olmasına neden olur. Bu da ticari polimer uygulamalarında etkili kullanım için gerekli olan düşük işlenebilirliğe ve diğer polimerik malzemelerle zayıf uyumluluğa yol açar (Kun ve Pukánszky 2017; Rumpf vd., 2021). Diğer bir husus da ligninin, önemli aromatik yapıya ve polar fonksiyonel grup içeriğine sahip karmaşık bir kimyasal bileşime sahip olmasıdır (Kai vd., 2016; Kumar vd., 2020a; Kocaturk vd., 2023). Dallanmış yapı ve polar fonksiyonel grup içeriği dolayısı ile hidrofobik bir malzeme olan lignin polistirene eklendiğinde uyumluluk problemleri olabilir. Bu sorunları çözmek için, işlevselliği artırmak (Li vd., 2015; Dehne vd., 2016; Sun vd., 2016; Chen vd., 2020; Esakkimuthu vd., 2022) ve lignindeki dallanmayı azaltmak için çeşitli kimyasal yöntemler kullanılmaktadır (Wang vd., 2009, 2013; Amusa vd., 2020). Bu modifikasyonlar, sentetik polimerlerle uyumluluğu arttırmayı ve termal özellikler, mekanik özellikler gibi genel malzeme özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır.

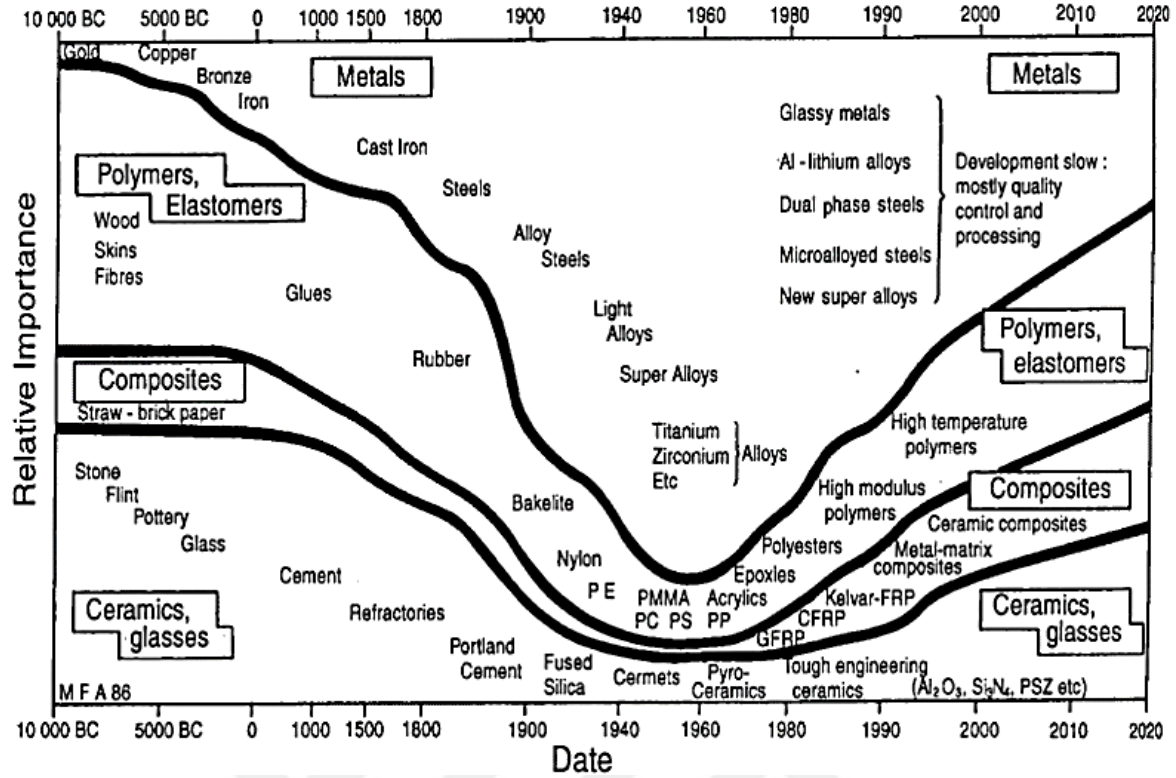
1.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler, mekanik dayanım, termal kararlılık ve maliyet gibi üstün özelliklerinden dolayı çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Lebedeva ve Sipkina 2022; Wu vd., 2023). Kompozitler havacılık, uzay, otomotiv, askeri, medikal, tarım ve endüstriyel alanlarda polimerlere farklı özellikler kazandırılarak kullanılmaktadır (Chairi vd., 2023). Üretim süreci polimer kompozitlerin kalitesi ve performansında önemli bir rol oynar (Elias ve Mülhaupt 2015). Kompozit ürünlerin kullanım süresi içerisindeki davranışını

ve kalitesini iyileştirmek için yüzey kaplama ve dolgu maddelerinden faydalanılmaktadır (Gupta vd., 2017). Her bir dolgu maddesi kompozite farklı bir özellik kazandırmaktadır. Bu özelliklerin belirlenmesi kompozitlerin kullanım yerlerindeki uygunluğunun belirlenmesi için önemlidir. Genellikle bu özelliklerin belirlenmesi için fiziksel, mekanik, morfolojik, yapısal ve termal analizler kullanılmaktadır.

Havacılık, uzay, otomobil, tıp ve sağlık, askeri ve diğer alanların hızla gelişmesiyle birlikte, polimer kompozitlerin yüksek spesifik sertlik, mukavemet, korozyon direnci ve hafiflik özellikleri üzerine pek çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar neticesinde polimer kompozitler, çelik ve diğer geleneksel ağır metallerin yerini alabilecek durumdadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde hafif tasarımların elde edilmesi amacıyla hibrit elektrikli araçların ve elektrikli araç akülerinin üretiminde çok sayıda polimer kompozit kullanılmaktadır (Muhammad vd., 2021). Polimer kompozit malzemeler esas olarak takviye (genellikle karbon elyafı, cam elyafı, aramid elyafı vb. gibi yüksek performanslı elyaflar) ve matris malzemeleri (epoksi reçine vb. gibi) ile yapılmaktadır. Polimer kompozitlerin matrisi normalde termoplastik veya termoset olmak üzere ikiye ayrılır. Bunların her ikisi de havacılık, biyotıp, otomotiv parçaları, elektrotlar ve paketleme malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Hsissou vd., 2021).

Gelişmiş polimer kompozitlerin otomotiv endüstrisindeki ilk kullanımı, Chevrolet Corvette otomobilinin sergilendiği 1953 yılına kadar uzanabilir. O tarihten bu yana, cam elyaf takviyeli plastikler (GFRP) otomotiv endüstrisinde büyük ilgi görmüştür. Otomobil ızgara panelleri, fren sistemleri, bagaj kapakları ve gövde takviyeleri, otomobil gövde parçaları, kapı panelleri, kaportalar, iç yapılar, motor çerçeveleri, T bağlantıları, uçakta sinyal iletimi, uçak kanatları, güvenlik tesisleri ve diğer parçalar polimer kompozitler kullanılarak imal edilmeye başlanmıştır (Saba vd., 2016; Hiremath vd., 2020; Muhammad vd., 2021). Daha sonra 1970'li yıllarda polimer kompozit sektörü olgunlaşmaya başlamıştır. Şekil 1.7'de çeşitli malzemelerin tarih boyunca kullanım durumları gösterilmiştir (Şerifi vd., 2018).



Şekil 1.7: Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi ve önem seviyesi (Şerifi vd., 2018)

Karbon fiberleri, SiC fiberleri, alümina fiberleri ve aramid fiberleri içeren yüksek performanslı takviye malzemeleri geliştirilmiş ve reçineler, metaller ve seramikler için takviye materyali olarak kullanılmaya başlanmıştır. Tablo 1.1’de termoset ve termoplastik matrislerin bazı özellikleri ve uygulama alanları verilmiştir.

Uzay araçlarının ısı kalkanında yanmaz ve ısı yalıtım malzemesi olarak fenolik reçine ve karbon fiber takviyeli kompozitler kullanılmaya başlamıştır (Saba vd., 2016). Günümüzde savunma sanayinin kullandığı teknolojiden medikal alana kadar her alanda ileri kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Örneğin, PAEK ailesi üyelerinin plastikleri askeri ve sivil amaçlar için kullanılmaktadır; bunların arasında karbon fiberlerle güçlendirildiğinde yüksek mekanik özelliklere ve yüksek sıcaklık stabilitesine sahip olan polieterketon keton (PEKK) kompozitleri (Rivière vd., 2016) havacılıkta yüksek sıcaklık bileşenleri olarak kabul edilmektedir (Tadini vd., 2017). Mükemmel yangın direncine sahip polieterimit (PEI) kompozitler havacılıkta da kullanılmaktadır (Saba vd., 2016).

Tablo 1.1: Polimer matrisler ve uygulama alanları

Polimer	Matris tipi	Özellik	Uygulama
Epoksi (Pulci vd., 2010)	Termoset matris	Mükemmel fiziksel, mekanik ve elektriksel yalıtım özellikleri, yapışma özellikleri, işleme esnekliği, kırılğan	Kaplamalar, kompozit malzemeler, döküm malzemeleri, yapıştırıcılar, kalıplama malzemeleri ve enjeksiyon kalıplama malzemeleri, elektronik, inşaat mühendisliği, havacılık, otomotiv
Polyester reçine (Muhammad vd., 2021)	Termoset matris	İyi üretilebilirlik, oda sıcaklığında kürlenme, normal basınçta kalıplama	Genel sivil sanayi, otomotiv, gemi, kimya, elektronik
Fenolik reçine (Pulci vd., 2010)	Termoset matris	Epoksiden daha ucuz, yüksek sıcaklığa, suya ve aside karşı iyi direnç, yüksek büzülme oranı	Toz presleme plastikleri, cam elyaf takviyeli plastikler, ablatif malzemeler, iç dekorasyon, elektrik mühendisliği malzemeleri
Poli Akril Eter Keton (PAEK) (Rivière vd., 2016)	Thermoplastic matrix	Mekanik, yüksek sıcaklık, korozyon ve UV direncinde mükemmel özellikler.	Zorlu bir ortama maruz kalan havacılık, otomotiv, elektronik ve mekanik bileşenler
Polieterimid (PEI) (Saba vd., 2016)	Termoplastik matris	Isı direnci, doğal alev geciktiricilik, son derece yüksek mukavemet ve sertlik, korozyon direnci, kalıplama işleminde mükemmel performans	Sofra takımları, tıbbi cihaz ve ekipmanlar, havacılık, otomotiv

Polimer kompozitler biyomedikal uygulamalarda giderek büyük ilgi görmeye başlamıştır (Krishnakumar ve Senthilvelan 2021) çünkü polimerler klinik uygulamalarda matris ve güçlendirici ajanlar olarak kullanılabilirler (Safavi vd., 2021a). Polimer malzemelerin (doğal ve sentetik) kullanımı, implant imalatlarında kullanılırlar. Polimer implantın mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi, kişiselleştirilmiş hasta bakımını mümkün kılmaktadır. İmplantasyondan sonra insan vücuduna zarar böylece önlenmiş olunur. Proses parametrelerinin kontrol edilmesiyle üretilen polimer parçaların mekanik özelliklerinin optimize edilmesi mümkündür (Szymczyk-Ziółkowska vd., 2020). İyi biyouyumlulukları, biyoaktiviteleri, biyostabiliteleri, sürtünmeleri, aşınma performansları ve korozyon

dirençleri bu alanda kullanılmalarına olanak sağlamaktadır (Mahalingam vd., 2020; Safavi vd., 2021b, 2022). Polilaktik asit (PLA), polikaprolakton (PCL), poliglutamik asit (PGA), laktik asit/glikolik asit kopolimeri (PLGA) ve polisanya metil karbonat (PTMC) gibi termoplastik polimerler, kompozit olarak üretildikten sonra tıbbi cerrahide kemik iskelelerinin ana malzemeleri haline geldiler (Gong vd., 2021). Son zamanlarda implant malzemesi olarak polietereeterketon (PEEK) kompozit malzemelerden yapılan yapay organlar, insan vücudunun önemli bölümlerinin operasyonlarında yaygın olarak kullanılmakta olup (Kumar vd., 2020b; Maruthi vd., 2021) PEKK da yeni bir diş implantı ve diş restorasyon malzemesi olarak kullanılmaktadır (Farea vd., 2021). Bazı yeni polimer kompozitler geliştirildikten sonra mekanik özellikleri, elektriksel iletkenlikleri ve ısı iletkenlikleri uygun şekilde kontrol edilmiştir. Aynı zamanda elektrot cihazlarında (Han vd., 2020; Yu ve Manthiram 2021), elektromanyetik girişim (EMI) koruyucu cihazlarda (Wang vd., 2020; Anderson vd., 2021; Deeraj vd., 2021; El-Morsy vd., 2022), sensörlerde (Lee ve Yoo 2016; Alqarni vd., 2020; Wang vd., 2020), paketlenme malzemelerinde (Lee ve Yoo 2016) ve enerji depolama cihazlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Almeida Neto vd., 2021). Polimer kompozit ürünlerin kalitesi yalnızca kompozitin hazırlanmasıyla sınırlı değildir, aynı zamanda üretim teknolojisinden de etkilenir (Pang ve Zhitomirsky 2005; Mohandesnezhad vd., 2022).

1.5 Lignin Üretimi, Uygulamaları, Ürünleri ve Çevresel Etkileri

Lignin yeryüzünde en çok bulunan ikinci doğal polimerdir. Ticari olarak kağıt ve etanol üretiminden atık ürün olarak üretilir. Dünya çapında lignin üretimi yaklaşık 100 milyon ton/yıl olup 2015 yılında 732,7 milyon ABD doları değerindedir. Bu üretimin 2025 yılında %2,2 bileşik yıllık büyüme oranıyla (CAGR) 913,1 milyon ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Ligninin iki ana kategorisi ligno-sülfonat (%88) ve kraft ligninleridir (%9), ancak yeni bir kategori olan organosolv (%2) ikinci nesil biyoyakıtların (biyoetanol) üretimi nedeniyle popülerlik kazanmaktadır. Organosolv lignin polimerinin, 2016'dan 2025'e kadar %5'in üzerinde en yüksek büyümeyi yaşaması bekleniyor. Kimyasal olarak lignin, poliaromatik bir makromoleküldür. Fonksiyonel gruplarının karmaşıklığı ve zenginliği, onu yüksek performanslı karbon elyaf, biyo-yağ, vanilin ve fenolik reçine gibi çeşitli katma değerli ürünlere dönüştürmeye elverişli hale getirmektedir. Yıllar boyunca lignin ağırlıklı olarak ısı elde etmek için yakıt olarak kullanıldı. Mevcut ligninin %2'den azı, katma değeri

yüksek ürünlerde (yapıştırıcılar ve yüzey aktif maddelerin formülasyonunda) kullanıldı (Agrawal vd., 2014; Luo ve Abu-Omar 2017; Bajwa vd., 2019).

Son on yılda, yeniliği yakalamak isteyen kağıt hamuru ve kağıt fabrikalarının ürün portföylerini çeşitlendirmeleri gerektiğinden lignin bazlı araştırma ve yeni ürün geliştirme çalışmaları önemli bir ivme kazandı. Ortaya çıkan biyoyakıt/biyoeenerji teknolojileri, süreçlerini daha uygun maliyetli hale getirmenin bir yolu olarak lignin ve biyo-yagdan katma değerli ortak ürünler geliştirmek için çalışılmaktadır. Günümüzde bağlayıcılar, yapıştırıcılar, biyoplastikler, beton katkıları ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere lignin talebinde bir artış söz konusudur. Aktif karbon, karbon dolgu, reçineler vb. lignin kullanımını yönlendiren diğer bir Pazar konumundadır (Bajwa vd., 2019).

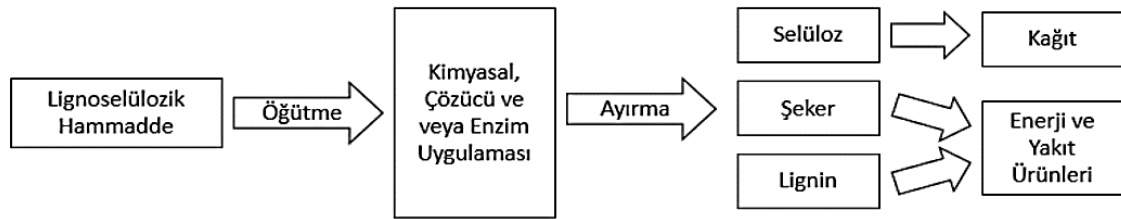
“Lignin” terimini ilk kez 1813 yılında İsviçreli botanikçi A.P. Candolle kullanmıştır (Agrawal vd., 2014). Kelime “odun” anlamına gelen lignum kelimesinden türemiştir. Lignin lignoselülozik biyokütlenin ana bileşenlerinden biridir. Biyokütlenin diğer iki ana bileşeni selüloz ve hemiselülozdur. Bu üç bileşenin biyokütlerdeki tipik yüzdesi bitki kaynağına göre değişmektedir (Ragauskas ve diğerleri, 2014). Örneğin, çimenler ağırlıkça %17-24 lignin içerir, yumuşak ağaçlar ağırlıkça %18-25 lignin içerir ve sert ağaçlar ağırlıkça %27-33 lignin içerir (Kılıç vd., 2010). Ligninin pek çok potansiyel uygulamaya sahip olmasına ve yüksek değerli lignin türevi ürünlerin çıkarılması için çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen, lignin henüz endüstriyel ölçeklerde kullanılmamaktadır. Ligninin benzersiz kimyasal reaktivitesi, içeriğindeki çeşitli organik ve inorganik maddeler ligninin endüstriyel ölçekte kullanımını zorlaştırmaktadır (Tezcan 2016; Melro vd., 2021; Ali Shah vd., 2023; Sand ve Tuteja 2023; Xiao vd., 2023).

Dünyadaki biyokütle rezervinin yaklaşık $1,85-2,4 \times 10^{12}$ ton olduğu ve bu biyokütle miktarının %20'sinin lignin olduğu tahmin edilmektedir (Dem RTA ve Vedat 2007). Yenilenebilir bir bileşen olarak lignin, karbon elyafı, fenolik bileşikler, farklı oksitlenmiş ürünler, çok işlevli hidrokarbon ve halihazırda petrolden elde edilen sentez gazı gibi çeşitli ürünlerin üretiminde kullanılmaktadır (Karabulut ve Yemiş 2019). Lignin, petrol türevleri ile karşılaştırıldığında daha çevre dostu olması yanı sıra, hafif bir malzemedir, yakıt açısından verimlidir ve daha da önemlisi içerisinde kullanıldığı polimerin maliyetini düşürme özelliğine sahiptir (Roopan 2017). Örneğin otomotiv endüstrisi çelik yerine karbon

fiber kullanma eğilimindedir çünkü karbon fiber çeliğe kıyasla daha hafiftir ve daha yüksek mukavemete sahiptir. Karbon elyafın ABD'de 15 ABD doları/kg gibi yüksek maliyete sahip olması , otomotiv endüstrisinde karbon elyafın kullanımını zorlaştırmaktadır. Öte yandan, lignin türevi karbon elyafın maliyeti yaklaşık 7 ABD doları/kg olabilmektedir (Nurul Farhana Roszaini ve Othman 2023).

1.6 Lignin izolasyonu

Lignin izolasyonu, lignoselülozik hammaddelerden ya polisakkaritleri hidrolize ederek veya çözerek geriye lignini bırakan yöntemlerle ya da selüloz liflerinin ayrılması için lignini çözerek uzaklaştırma yöntemiyle gerçekleştirilir. Bu işlem sonucunda elde edilen siyah çözelti, organik madde açısından zengin ve dünya genelinde yıllık yaklaşık 500 milyon ton üretilmektedir. Lignin izolasyonunda Klason lignini yöntemi hala yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak bu yöntemle lignin yapısının değişebileceği bildirilmiştir (Li, 2011; López vd., 2010).



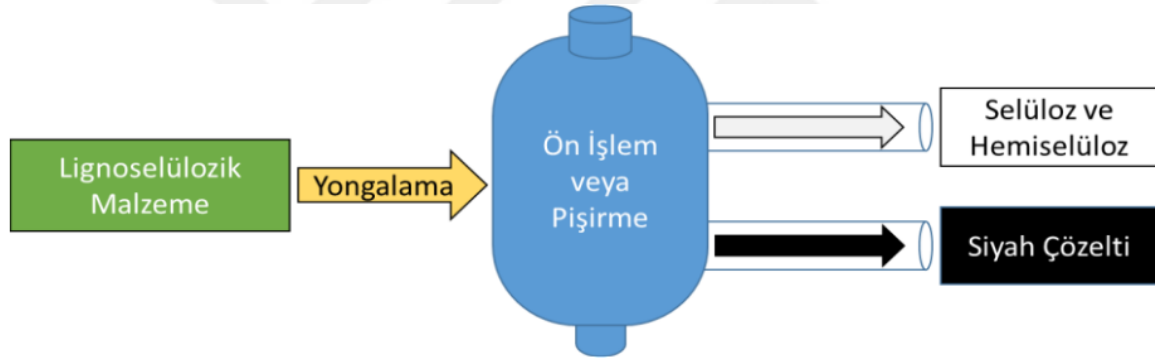
Şekil 1.8: Lignin izolasyonu üretiminin genel şeması (Holladay vd., 2007)

Lignin izolasyon yöntemlerinden buhar patlatması yöntemi, lignoselülozik hammaddelerdeki polisakkaritlerin hidrolizinde kullanılan bir başlangıç adımdır. Bu yöntem, yüksek sıcaklık ve basınç altında suyun etkisiyle yapısal şekerlere indirgenen selüloz ve hemiselülozları oluşturan bağların bozulmasını sağlar ve lignin üzerinde çeşitli kimyasal değişimlere neden olur (Şekil 1.8). Sonuç olarak elde edilen lignin, organik çözücülerde çözünebilir ve düşük molekül ağırlığına sahip olabilir, bu da organosolv ligninine benzer özellikler sergiler (Chung ve Washburn, 2015). Başka bir yöntemde lignin, lignoselülozik hammaddelerden biyo-etanol üretimi öncesi uygulanan zayıf asit çözeltisi ile muamele edilerek elde edilebilir. Bu yöntem, düşük maliyetle yüksek çözünürlüklü bir lignin eldesini sağlar (Chung ve Washburn, 2015).

1.7 Lignin Delignifikasyon Yöntemleri

Lignin, ısı ve kimyasal etki ile çözülerek uzaklaştırılabilmektedir, bu yöntemlerde genellikle çözünen lignin atık çözeltiden titrasyonla veya çözücü uzaklaştırılması yoluyla geri kazanılmaktadır. Bu yöntemler, endüstriyel kağıt hamuru üretimi ve lignin yapısının araştırılması gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Öğütülmüş Odun Lignini (Milled Wood Lignin=MWL), lignin yapısının araştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir; örnekler, ekstraktiften arındırıldıktan sonra öğütülür ve su ve dioksan karışımında bekletilerek elde edilir. Özellikle kimyasal kağıt hamuru üretimi, selüloz ve hemiselülozlara mümkün olduğunca az zarar vererek lignini çözerek uzaklaştırmayı hedefler ve çözünen lignin, kağıt hamuru pişirmesi sonrası elde edilen siyah çözeltide bulunur (Şekil 1.9) (Wegener ve Stoll 1976).



Şekil 1.9: Delignifikasyon genel şeması (Olgun 2019)

Kağıt hamuru üretiminde en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi kraft yöntemidir ve genellikle sodyum sülfür ve sodyum hidroksit ile yapılan alkali pişirme işlemiyle gerçekleştirilir. Bu yöntemle elde edilen kağıt hamurunun siyah çözeltisi yüksek miktarda lignin içerir ve asitlendirme ile lignin geri kazanılabilir, çünkü diğer bileşenler suda çözünür (Tran ve Vakkilainen 2008).

Diğer bir yöntem ise soda pişirme yöntemidir. Soda yöntemi, kraft yönteminden farklı olarak sadece sodyum hidroksit kullanır ve çevresel etkileri azaltmak, kükürt içermeyen lignin ve nano kristalin selüloz üretimi gibi hedeflere yöneliktir. Bu yöntemde, alkali koşullarda fenolik olmayan β -O-4 bağlarının ayrılması en önemli delignifikasyon reaksiyonudur ve pişirme işlemi sırasında karbonhidratlarda hidroliz ve soyulma reaksiyonları gerçekleşir, bu

da selüloz liflerinin polimerizasyon derecesinde önemli düşüşlere neden olur (Dimmel ve Gellerstedt 2009).

Son yıllarda yaygın olarak araştırılan yeni bir delignifikasyon yöntemi, iyonik sıvıların kullanımudur. Bu yöntemde, oda koşullarında veya altında erime noktalarına sahip organik tuzlar, lignoselülozik hammaddelerin kimyasal bileşenlerini ayrıştırmak için kullanılır. İyonik sıvılar, yüksek kimyasal stabilite ve çözücü özelliklerine sahip olmaları nedeniyle "yeşil çözücüler" olarak adlandırılır ve çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkarlar. Çözünmüş ligninler, iyonik sıvılardan kolaylıkla ayrılabilen çözücüler yardımıyla çökeltilir ve geri kazanılabilir, böylece iyonik sıvı tekrar kullanılabilir. İyonik sıvılarla elde edilen ligninler, organosolv ligninlerle benzer özellikler gösterir ve aynı uygulama alanlarına sahip olabilir (Fasching vd., 2008; Fernandez-Costas vd., 2014).

1.8 Makro/Mikro Destek Materyalleri

Polistiren matris içerisinde makro, mikro veya nano ölçekte dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Matris içerisinde kullanılan dolgu maddelerinin boyutları polimerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Farklı yapısal destek materyalleri, kompozit malzemelerin özelliklerini çeşitlendirmek ve maliyetleri azaltmak için polimer endüstrisinde sıkça kullanılmaktadır. Bu materyaller metalik tozlar, seramikler, organik bileşikler veya polimerler olabilir. Kompozitin yapısal ağınlı etkileyen faktörler arasında ise destek materyallerinin türü, boyutu, sertliği, şekli ve dağılımı bulunmaktadır.

Az miktarda partikül kullanıldığında, partiküller arasındaki uzaklık artar ve bu nedenle partiküllerin homojen olarak dağılması veya yönlendirilmesi polimer matrikte sınırlı olabilir. Örneğin, tanecikli mineral partiküller genellikle sertliği artırırken, çatlama direncini ve elastikiyetini düşürebilirler (Ray ve Easteal 2007).

Geçmişte, destek materyallerinin ticari kullanımı çeşitli yeniliklere yol açmıştır. Örneğin, Goodrich'in lastiğe karbon karası eklemesi ve Baekland'ın fenol formaldehit plastiklerine odun unu katması gibi örnekler bu yeniliklerden bazılarıdır (Harnby N vd., 1992).

Bu değişiklikler, materyallerin performansını artırmak ve yeni uygulamalar için kapıları açmak için yapılmıştır. Bu nedenle, destek materyallerinin seçimi ve uygulanması, kompozit

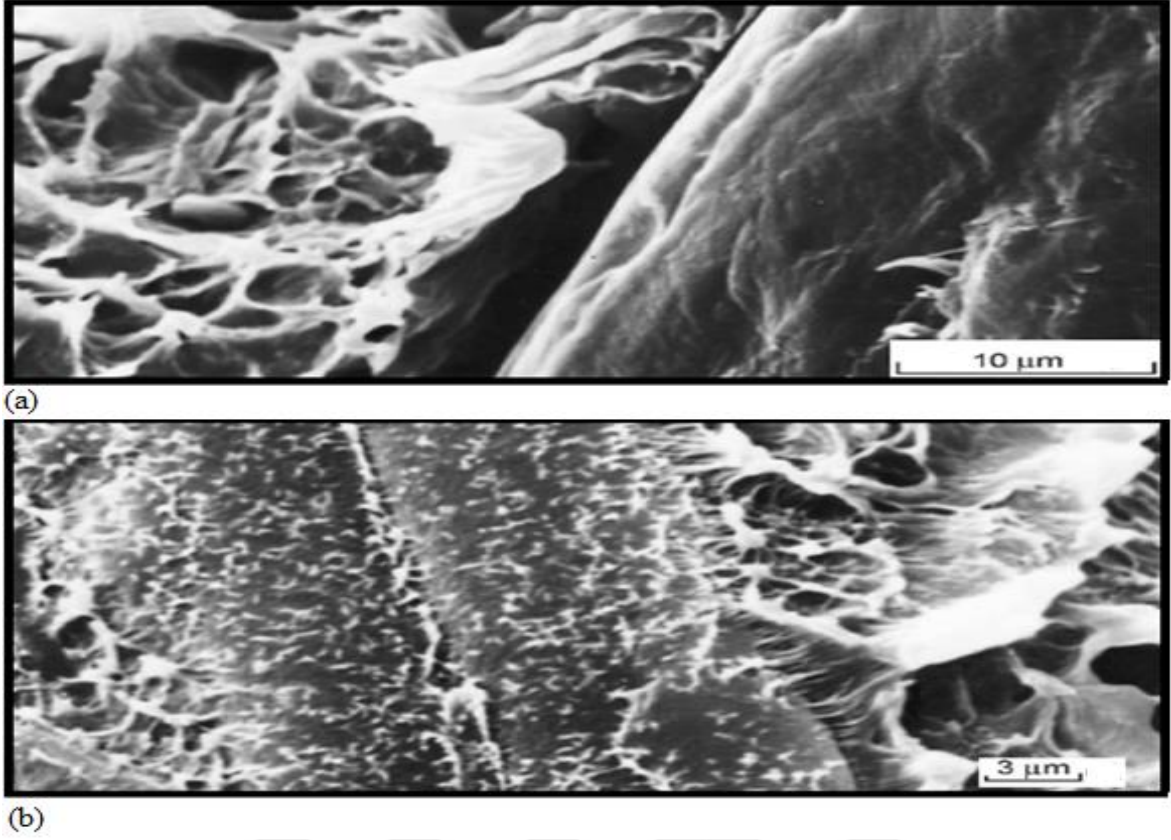
malzemenin nihai özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır.

1.9 Polimer Matriks/Destek Materyal Arasındaki Etkileşimler

Farklı partiküllerle desteklenen polimer matriks kompozitlerin yapısı ve özellikleri, kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Genellikle, partikül ve polimer matriks arasındaki bağlanma ve fazlar arası etkileşim, kompozitin sertliğine çok az etki eder. Ancak, bağlanma ve fazlar arası etkileşimin niteliği, nem stabilizasyonunu, uzun süreli yorulma gibi özellikleri, kırılabilirlik ve direnç gibi özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bağlanma, birleştirme veya uyumluluk sağlayan kimyasallar kullanılarak iyileştirilebilir (Oksman ve Bengtsson 2007; Niska ve Sanadi 2008).

Partikül yüzeyleri, polimer matriksle farklı etkileşimler gösterebilir. Yapılan çalışmalar, odununu gibi lifsel partiküllerin ve doğal destek materyallerinin heterojen yapılarından dolayı birçok yapışma problemine yol açabileceğini ortaya koymuştur. Bu değişkenlik, doğal partiküller üzerinde hem düşük hem de yüksek yüzey enerjilerinin bulunmasından kaynaklanmaktadır. Bazı bölgeler matriksle herhangi bir etkileşim göstermezken, diğer kısımlar polimer molekülleriyle spesifik etkileşim alanları sağlar. Bazı liflerin yüzeyleri kaba veya düzgün bir yapıya sahip olabilir. Bu durumda, kötü etkileşimlerden kaynaklanan sorunlar lif yüzeylerinin modifiye edilmesiyle iyileştirilebilir (Ruckenstein 1969; Niska ve Sanadi 2008; Pizzi ve Mittal 2017).

Şekil 1.10'da, odun-polimer kompozitlerinin iç yapılarının elektron mikroskobu görüntüleri verilmektedir. Bu şekilde polietilen odun kompozitlerinde iyi ve kötü yüzeyler arası yapışma farkı net bir şekilde görülebilir. Şekil 1.10 (a), uyumsuzluk giderici kullanılmadığı zaman odun-polimer kompozitlerinin mikro yapısını gösterir. Burada odun lif yüzeyleri oldukça düz ve temizken, polietilen matriks oldukça kaba görünmektedir. Üstelik, lif ve matriks polimer arasında boşluklar veya çukurlar göze çarpmaktadır, bu da yapışmanın zayıf olduğunu gösterir. Şekil 1.10 (b) ise uyum sağlayıcı eklendiği zaman polietilen odununu kompozitlerinin mikro yapısını gösterir.



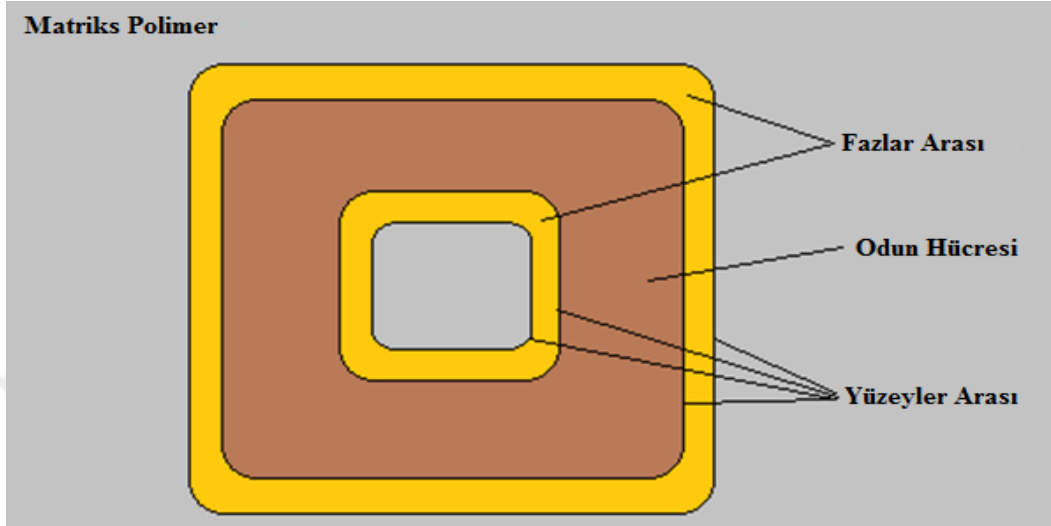
Şekil 1.10: Polietilen Matriks ve Odun Arasındaki Kötü (a) ve İyi (b) Bağlanma (Oksman ve Bengtsson 2007).

Bu şekilde, uyum sağlayıcılar kısmen kaplanmış olan odun ununu polimer matriksten ayırmak daha zor hale gelir. İki bileşen arasında boşluklar veya küçük yarıklar bulunmaz, bu da kompozitin iç yüzeyinde güçlü bir yapışma olduğunu gösterir (Niska ve Sanadi 2008).

1.9.1 Polimer Matriks Kompozitlerde Yüzeyler ve Fazlar Arası İlişkiler

Yüzeyler arası etkileşim, iki malzemenin yüzeylerinin arasında meydana gelen etkileşimlerdir ve genellikle iki boyutlu yüzeylerde gerçekleşir. Fazlar arası etkileşim ise, lif veya partikül ile polimer matriks arasındaki üç boyutlu topaklanmış bölgelerdeki etkileşimleri ifade eder. Polimer matriks ve partiküller arasındaki zayıf etkileşim, aralarındaki yapışmayı azaltır (Ruckenstein 1969; Pizzi ve Mittal 2017). Şekil 1.11, bir polimer kompozitin enine kesitinde yüzeyler ve fazlar arası yapıyı şematik olarak gösterir. Şekilde iki yüzeyin olduğu görülmektedir: biri fazlar ve odun hücreleri arasında, diğeri ise fazlar ve polimer matriks arasındadır. Şekil incelendiğinde, bir kompozitte meydana gelebilecek farklı yıkım senaryoları görülebilir. En basit durumda, partikül fazı arası yüzey,

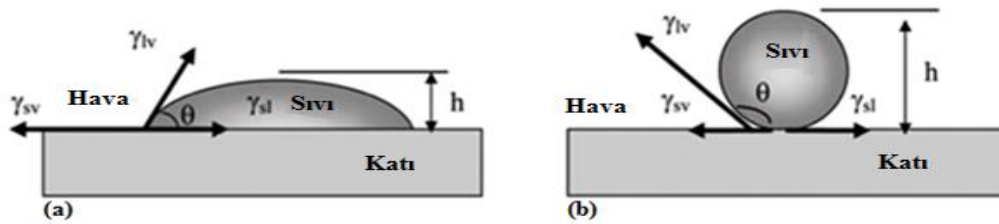
matriks fazı arası yüzey veya fazlar arasında yapışma hatası (kohezif) olabilir. Ancak, genellikle odun-polimer kompozitlerde hatalar çok daha karmaşıktır. Bu durum, kompozit yüzeylerin eğri ve dengesiz doğasından kaynaklanmaktadır (Niska ve Sanadi 2008).



Şekil 1.11: Odun Polimer Kompozitlerin Enine Kesitlerinde Yüzeyler ve Fazlar Arası Bölgelerin Şematik Tanımı (Niska ve Sanadi 2008).

1.9.2 Islanma, Yapışma ve Dispersiyon (Yayılma)

Islanma ve yayılma, iki farklı faz arasında sağlam bir yapışma oluşturmak için büyük öneme sahiptir. Islanma, bir sıvının bir yüzeyle temas ettiğinde yaptığı açıyı tanımlar (Şekil 1.12) (Jabbari ve Peppas 1994; Aydın 2004). Odun termoplastik kompozitlerinde, odun ve polimer yüzeyleri arasındaki doğrudan temas açısı, iki materyal arasındaki yapışmayı karakterize eder. Yapışma, yükün iki materyal arasında aktarılabilirdiği iki yüzeyin birleşmesidir ve bu, iki yüzeyin ayrılması için gereken iş miktarıyla belirlenebilir. Dispersiyon derecesi ise, bir kolloidal sistemde karışımın derecesini gösterir (Mitchell 2004; Niska ve Sanadi 2008).



Şekil 1.12: Masif Bir Yüzeyde Bir Damlanın Temas Açısı, Islanma (a) ve Islanmama Durumu (b) (Aydın 2004).

1.10 Yapışma Teorileri

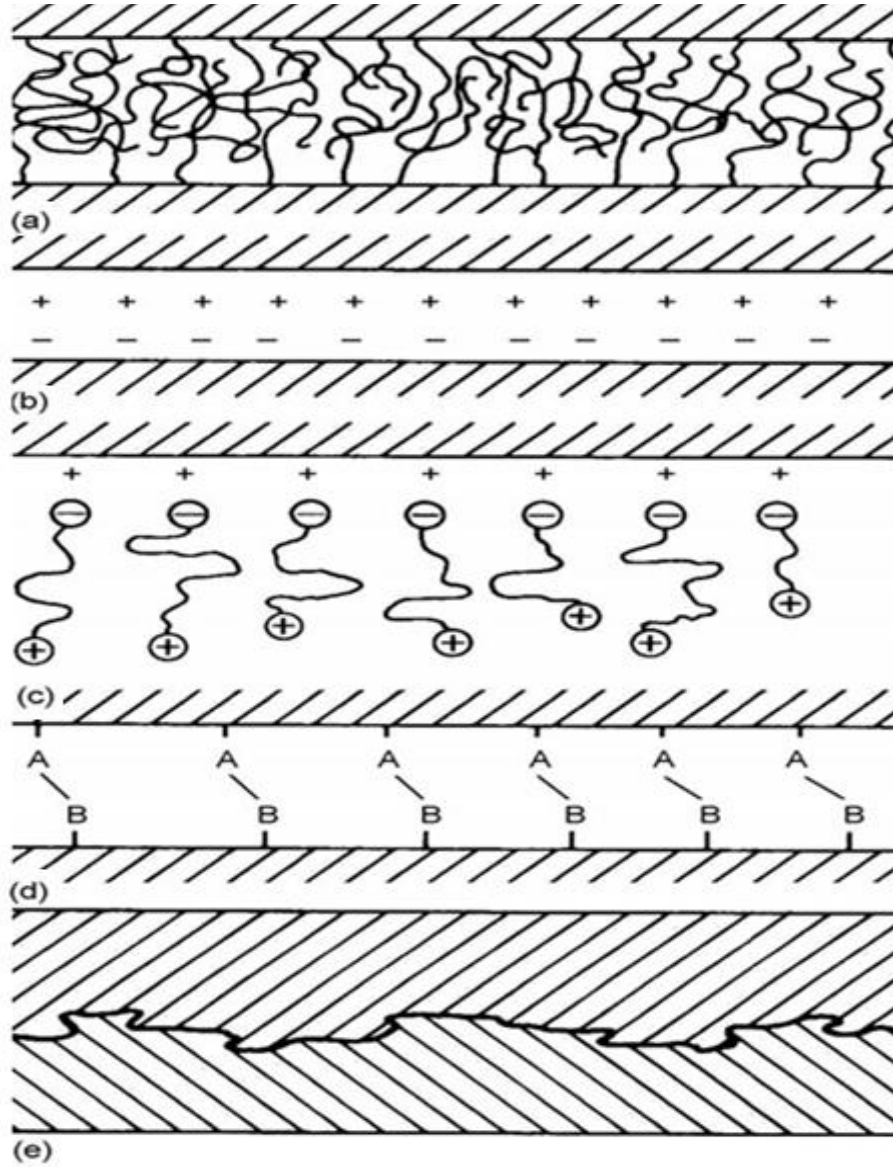
Atomların, moleküllerin, polimerlerin, malzemelerin, gök cisimlerinin, gezegenlerin, yıldızların ve hatta galaksilerin birbirlerine çekim kuvveti uygulayarak bağlandıkları düşünüldüğünde bağlanma olayının arka planında gerçekleşen mekanizmanın iyi bilinmesi oldukça önemli bir konudur. Bu sayede moleküller dahil tüm malzeme ve cisimlerin davranışları hakkına bilgi sahibi olabiliriz.

1.10.1 Kimyasal Bağlanma

Kovalent bağlanma, uygun kimyasal grupların polimer matrikste ve partikül yüzeylerinde bulunması durumunda meydana gelir. Kimyasal bağlanma, partikül yüzeyleri ve matriks arasındaki belirli moleküller arasında oluşur (Mitchell 2004). Yüzeyler arası direnç, kimyasal bağ sayısı ve türüne bağlıdır. Polimer kompozitlerde, silan gibi gruplar matriks ve partiküller arasında kimyasal bir köprü oluşturabilir. Silan, partikül yüzeyinde bir siloksan köprüsü oluştururken, diğer ucu polimerle etkileşime girer (Oksman ve Bengtsson 2007). Maleatlanmış poliolefinler, partikül yüzeyinde kimyasal bağ oluşturmak için kullanılabilir ve anhidrit aşılantı polimer moleküllerinin diğer ucu fiziksel olarak matriks polimerle birleşir (Oksman ve Clemons 1998).

1.10.2 Elektrostatik Bağlanma

Materyallerde, bir yüzeyi negatif yüklü hale getiren ve diğerini pozitif yüklü hale getiren farklı akımlar, çekim kuvvetleriyle birlikte oluşabilir. Yüzeyler arası direnç, bu bağların sayısı ve yoğunluğuna bağlı olarak değişebilir. Bu kuvvetler arasında iyonik etkileşimler, hidrojen bağları, asit-baz etkileşimleri, dipol-dipol ve polar etkileşimler, ve Van der Waals kuvvetleri bulunur (Şekil 1.13) (Dillard DA ve Pacius 2002; Niska ve Sanadi 2008).



Şekil 1.13: Farklı Yapışma Mekanizmaları: (a) Interdifüzyon sonrası moleküler birleşmeyle oluşan bağlanma, (b) Elektrostatik çekimle oluşan bağlanma, (c) Yüzeydeki polimer oriyantasyonuyla oluşan anyonik yüzeyi çeken moleküllerin sonunda katyonik grupların oluşması, (d) Bir yüzeydeki A grupları ile diğer yüzeydeki B grupları arasındaki kimyasal bağlanma, (e) Sıvı bir polimer, katı bir yüzeyi ıslattığında oluşan mekanik bağlanma (Niska ve Sanadi 2008).

1.10.3 Mekanik Bağlanma

Mekanik bağlanma, iki yüzeyin fiziksel olarak birbirine kenetlenmesiyle oluşabilir. Bu tür durumlarda, makaslama sürtünmesi önemli bir rol oynar. Yüzey kabalığı, yapışmayı artırarak yüzey alanını artırır. Bu tür mekanik bağlanma, tek veya her iki faz sıvı olduğunda oluşabilir ve moleküler düzeyde zayıf ikincil bağlantılar olmasa bile yük transferi mümkün olabilir (Dillard DA ve Pacius 2002).

Odun-polimer kompozitlerinde, matriks polimer düşük viskoziteye sahip olduğuunda bu bağlanma meydana gelebilir ve bu mekanizma önemli bir şekilde yük transferine katkıda bulunabilir (özellikle uyum sağlayıcılar veya yüzey aktif maddeler kullanılmadığında). Ancak, bu durumlarda mekanik yük transferi yüksek olabilirken, uzun vadeli özellikler gibi yorma gibi özellikler veya odun lifine su absorpsiyon oranı gibi özelliklerde çok az veya hiç iyileşme görülmemiştir (Dillard DA ve Pacius 2002) .

1.10.4 Materyaller Arası Difüzyon

İki polimer arasında etkileşimlerin oluşması, moleküler birleşmeden kaynaklanabilir. Yapışma ve etkileşim seviyesi, moleküler birleşme miktarına bağlıdır ve bu birleşme düzeyi difüzyon seviyesine bağlıdır. Minimum polimerizasyon derecesi, yapışma direncinin artırılması için gereklidir. Örneğin, maleatlanmış propilen (MAPE) anhidrit polimeri, maleik gruplarıyla odun lif yüzeyleri arasında kimyasal bağlanma oluşturabilir. Ayrıca, MAPE'nin diğer ucu polietilen (PE) matriks içinde yüzeyler arası difüzyona yol açabilir (Oksman ve Clemons 1998).

Polimer zincirinin uzun olması, moleküler birleşme sürecinde optimal yük transferi sağlamak için gereklidir. Matriks ve odun lifleri arasında daha güçlü bir moleküler etkileşim, daha büyük yapışma direnci ve daha iyi bir yük transferi etkisi sağlayabilir. Kovalent bağlar en güçlü yapışma türüdür; bunlar lif ve birleştirme kimyasalı veya matrikslerin kendisi arasında oluşabilir. Yüzeyler arası modifikasyonlarla, bu tür etkileşimler elde edilebilir. Hidrojen bağları, asit-baz etkileşimleri, dipol-dipol etkileşimleri ve dispersiyon kuvvetleri gibi etkileşimler, yapışmanın iyileştirilmesine katkıda bulunabilir. Kovalent bağların avantajları, odun lifi ve polipropilen arasındaki birçok deneyde belirlenmiştir (Nikolic vd., 2015).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde; sorunun doğuşundan bugünkü bilgi düzeyine gelinceye kadar, yayın taraması yoluyla elde edilen bilgiler, tarih sırasına göre kısa ve öz olarak verilmiştir.

2.1 Lignin Dolgulu Polistiren Kompozitler Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Aydemir vd., (2024) çevre dostu üretim süreci kullanarak ligninden aktif karbon (AC) üretmek için ve choline chloride-lactic acid içeren derin ötürük çözelti (DES) ile lignin partikülleri üretmeyi başarmışlardır. Çalışmada, DES ile elde edilen ligninden (DES-Lig) ve ticari ligninden üretilen AC'nin malzeme ve yapısal özellikleri inceler ve en iyi morfolojik yapıya ve yüzey alanına sahip AC'nin, 900°C'de DES ile işlenmiş ligninden elde edildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, lignin değerlendirilmesinde ve AC üretiminde DES kullanımının potansiyelini ortaya koymuştur.

Azhar vd., (2020) farklı oranlarda lignin içeriğine sahip polistiren (PS)/lignin karışımlarının mekanik, reolojik ve morfolojik özelliklerini araştırmışlardır. Lignin ilavesinin eğilme ve çekme modüllerinin yanı sıra karışımın gerilme özellikleri üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Aynı zamanda uyumlaştırıcı kullanımının çekme özellikleri üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Çalışma, lignin içeriğinin artmasıyla eğilme ve elastikiyet modülünün arttığını, çekme kuvvetlerinin ise azaldığını bulmuşlardır. Bununla birlikte, uyumlaştırıcı eklenmesi gerilme özelliklerini iyileştirmiştir. Karışımların reolojik davranışını incelediklerinde; viskozite, dinamik modüller ve aktivasyon enerjisinin hem lignin hem de uyumlaştırıcı içeriklerine duyarlı olduğunu rapor etmişlerdir.

Schorr vd., (2014) saf ve maleatlanmış Kraft ligninleri ile güçlendirilmiş geri dönüştürülmüş polistiren (RPS) kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Morfolojik analiz sonucunda, saf Kraft ligninlerinin RPS ile uyumluluğunu ortaya koyarken, maleatlı ligninlerin eklenmesi, uyumluluğun iyileştirilmesi için bir yüzey işlemi gerektirdiğini rapor etmişlerdir. Değiştirilmemiş Kraft ligninlerinin eklenmesinin, maleatlı Kraft ligninlerine kıyasla daha iyi mekanik ve termal özelliklere yol açtığını vurgulamışlardır; bu, maleatlı ligninlerin gözenekli yapısına atfedilebilir. Araştırmacılar yumuşak ağaç Kraft ligninlerinin aromatik halkaları ve daha yüksek moleküler kütleleri nedeniyle RPS kompozitleri için dolgu maddeleri olabileceğini belirtmişlerdir.

Barzegari vd., (2013) polistiren/lignin kompozitlerinin termal özelliklerini hem uyumlulaştırıcı hem de uyumlulaştırıcı olmadan geniş bir lignin içeriği aralığında çalışmışlardır. Araştırmada, bir bağdaştırıcının (stiren/etilen/bütillen kopolimer) karışımların gerilme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, lignin içeriğinin artmasıyla bükülme ve burulma modüllerinin arttığını, çekme özelliklerinin ise azaldığını rapor etmişlerdir. Uyumlulaştırıcının eklenmesi gerilme özelliklerini iyileştirmiştir.

Lisperguer vd., (2013) lignin bazlı kompozitlerin yapısı, termal özellikleri ve farklı polimerlerle uyumluluğu, lignin içeriğinin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini ve ligninin polimer matrislerde dolgu maddesi veya genişletici olarak potansiyelini araştırmışlardır. Geri dönüştürülmüş polistirene (rPS) maleatlı ligninin eklenmesi, işlenmemiş PS ile karşılaştırıldığında daha yüksek cam geçiş sıcaklıklarına (T_g) neden olmuştur. %2 ve %5 maleatlı lignin içeren rPS'nin termal stabilitesinin, işlenmemiş PS'den biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir; bu, tüketim sonrası PS'nin iyi termal özelliklere sahip kompozit malzemeler elde etmek için kullanılabileceğini göstermektedir. Ligninin farklı polimerlerle karışabilirliğinin değişiklik gösterdiği bulunmuştur. Ligninin polietilen oksit (PEO) ve polietilen tereftalat (PET) ile karışabilirken, polipropilen (PP) ve polivinil alkol (PVA) ile karışmadığı, modifiye edilmemiş ligninin, polivinil klorür (PVC) içeren karışımların darbe mukavemetini azalttığı ve PVC kontrolüne kıyasla hava koşullarına karşı stabiliteyi düşürdüğü rapor edilmiştir.

Chavidel ve Fatehi (2019), sürdürülebilir ve yüksek performanslı malzemelerin üretimi için lignin ve polistirenin polimerizasyon sürecine ilişkin, lignin içeren polistiren kompozitler geliştirmişlerdir. Araştırmada, lignin içeren polistirenin, sulu sistemlerdeki bakır iyonları gibi diğer maddelerle uyumluluğunu, gözenekliliğini ve yüzey enerjisini, lignin katılımının kompozitin adsorpsiyon performansı üzerindeki sinerjistik etkisini ve lignin içeren polistiren üzerindeki bakır iyonlarının soğurma mekanizmasını araştırmışlardır. Kraft lignininin (KL) polistirene (PS) dahil edilmesi, yüzey enerjisinde ve oksijen içeriğinde bir artışa yol açarak sulu sistemlerde bakır iyonlarıyla daha iyi uyumluluğa yol açtığını bildirmişlerdir. Bakır iyonlarının KL ile birleştirilmiş PS (KL-PS) üzerindeki adsorpsiyon performansının tek başına PS ve KL ile karşılaştırıldığında gözle görülür derecede daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Bakır iyonlarının KL-PS üzerindeki soğurma mekanizması, öncelikle

Cu(II)'nin KL-PS'nin hidroksil grupları ve ayrıca KL-PS'nin dört kutuplu sistemi ile koordinasyonuna atfedilmiştir.

Pérez-Guerrero vd., (2014), değiştirilmiş ligninin geri dönüştürülmüş polistiren bazlı malzemelerin (rPS) morfolojisi ve termo-mekanik özellikleri üzerindeki etkisini, esterleşmiş lignin fonksiyonel gruplarındaki yapısal değişiklikler ve bunların rPS kompozitlerinin özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda, ligninin plastikleştirici etkisini, eriyik karıştırma işlemi sırasında tork değerlerinde azalmaya yol açtığını bildirmişlerdir. rPS kompozitlerinde parçacık boyutunun küçültüldüğünü ve asetillenmiş ve maleatlanmış ligninin daha homojen bir şekilde dağıldığını ve bunların morfolojilerinin iyileştirildiğini bildirmişlerdir. Termal davranış analizi, lignin varlığında rPS'nin cam geçiş sıcaklığında önemli bir değişiklik olmadığını göstermiş, bu da iki malzemenin uyumluluğunu göstermiştir. Esterleştirilmiş lignin ilavesiyle rPS kompozitlerinin depolama modülü, termal kararlılığı ve bükülme modülündeki iyileşmeyi vurgulayarak termo-mekanik özelliklerinin arttığını rapor etmişlerdir.

Phillips vd., (1972), yaptıkları çalışmada stiren ve kraft yumuşak ağaç lignininin radyasyonla indüklenen aşırı kopolimerizasyonu ile lignini değiştirmek ve çözünürlüğünü ve reaktivitesini geliştirmek için yeni bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Farklı solventlerin ve metanol konsantrasyonlarının reaksiyon derecesi üzerindeki etkilerini değerlendirerek, lignin erişilebilirliğinin ve bunun aşılama üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmuşlardır. Araştırma sonucunda, stiren ve ligninin aşırı kopolimerizasyonunun, ligninin stiren homopolimeri için çözücüler içinde ekstrakte edilebilir hale gelmesine neden olduğu bulunmuşlardır. Aşırı kopolimerinin daha yüksek dozlarda bozunduğunu; bunun beklenmedik bir durum olduğunu ve başarılı aşılama için radyasyon dozajının optimize edilmesinin gerektiğini vurgulamışlardır. Aşırı kopolimerizasyon işleminde çözücü olarak dioksan ve N,N'-dimetilformamidin kullanılması, jelleşmenin önlenmesine ve ligninin çözünürlüğünün artmasına neden olarak daha başarılı aşılama reaksiyonlarına yol açtığını rapor etmişlerdir.

Zafar vd., (2019), dolgu maddesi olarak buğday kabuğu, pirinç kabuğu ve hardal kabuğu kullanılarak doğal elyaf takviyeli polistiren kompozitlerin mekanik karakterizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Farklı dolgu maddesi yüklemelerinin ve boyutlarının kompozitlerin çekme mukavemeti, bükülme mukavemeti, sertlik ve su emme gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçlarda, 250-355 µm dolgu boyutunun ve %5

yüklemenin kompozitlerin mekanik özellikleri için maksimum değerleri verdiğini belirlemişlerdir.

Washburn ve Chung (2018), ligninin farklı bileşenlere olan afinitesinin anlaşılmasını geliştirerek, dağıtıcı maddeler ve matris malzemeleri gibi çeşitli uygulamalara yönelik bir bileşim olarak lignin içeren polimerlerin geliştirilmesine ilişkin çalışmalar yapmışlardır. Doğal elyaf dolgulu polistiren kompozitler üzerine yaptıkları araştırmada, tarımsal atık malzemelerin polimer kompozitlerde sürdürülebilir dolgu maddeleri olarak kullanılmasına katkıda bulunmuşlardır. Buğday kabuğu, pirinç kabuğu ve hardal kabuğu gibi doğal elyaf dolgu maddeleri içeren polistiren kompozitleri sentezlemek için yerinde polimerizasyon tekniğini kullanmışlardır. Farklı dolgu yüklemelerinin (%5, %10 ve %15) ve dolgu boyutlarının (250-355 μ , 355-500 μ , 500-710 μ) kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kompozitlerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, sertlik ve su emiciliği ölçmüşlerdir. Numunelerin yüzeyini incelemek, kompozit yapıya ve kırılma davranışına ilişkin görsel bilgiler sağlamak için SEM analizi yapmışlardır. Dolgu maddelerinin beklenen takviye etkisinin aksine, kompozitlerin çekme mukavemeti ve bükülme mukavemetinin artan dolgu maddesi yüklemesi ile azaldığını bildirmişlerdir. Kompozitlerin mekanik özelliklerinin dolgu maddelerinin boyutundan etkilendiğini, daha küçük dolgu boyutlarının daha yüksek çekme mukavemeti ve bükülme mukavemeti sağladığını bulmuşlardır. Kompozitlerin su emiciliğinin artan dolgu maddesi yüküyle arttığını rapor etmişlerdir. SEM analizi sonucunda kompozitlerin içerisindeki dolgu materyalinin matris içerisinde iyi bir bağlama oluşturmadığını belirlemişlerdir.

Barzegari vd., (2012a) Polistiren içerisine lignin dolgu maddesi kullanmış ve elde ettiği kompozitin mekanik ve reolojik davranışlarını incelemiştir. PS/lignin karışımlarının mekanik özellikleri lignin içeriğinden etkilendiğini; lignin içeriği arttıkça bükülme ve bükülme modülleri arttığını ve gerilme özellikleri azaldığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, bir uyumlulaştırıcının (SEBS kopolimeri) eklenmesinin, karışımın gerilme özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Karışımların reolojik davranışı hem lignin hem de bağdaştırıcı içeriklerine duyarlı olup viskozite, dinamik modüller ve aktivasyon enerjisi etkilenmiştir. Morfolojik analiz, lignin parçacıkları ile PS matrisi arasındaki dağılım ve arayüzey yapışma durumunu ortaya çıkarmıştır. Çalışma, bizim çalışmamız ile benzer olarak

polistirenin özelliklerinin iyileştirilmesinde yenilenebilir ve çevre dostu bir malzeme olarak ligninin potansiyelinin anlaşılmasına katkıda bulunmaktadır. Farklı olarak çalışmamız ile farklı bir yöntem kullanarak polimer kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde; araştırmada kullanılan materyal ve yöntem ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Araştırma verileri açıklanıp, çalışmaların nasıl yürütüldüğü ve verilerin hangi yöntemlerle değerlendirildiği belirtilmiştir.

3.1 Materyal

Çalışmada kullanılan polistren (PS) atık olarak değerlendirilen malzemeden elde edilmiştir. Bu maksatla geri dönüşüm kutularından atık EPS (expanded polystyrene) ve XPS (extruded polystyrene) toplanmıştır. EPS ve XPS arasında üretim yöntemi bakımından farklılık bulunmaktadır.

3.1.1 Şişirilmiş Polistren (EPS)

Ülkemizde EPS strafor veya köpük olarak adlandırılmaktadır. EPS termoplastik bir polimerdir. Pentan gazı aşılansmış PS polimeri sıcak buhar ile muamele edilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Pentan ve sıcak buhar uygulanarak şişirilmiş EPS

Sıcaklık ile pentan gazı PS polimerini şişirir. Böylece polimerinin hacmi 100 kata kadar genişletilebilir. EPS üretimi ön genişletme, şartlandırma, kalıplama ve şekillendirme aşamalarından oluşur. Yoğunluğu 100 kata kadar azaltılan PS hafif yapısı ile ısı ve ses

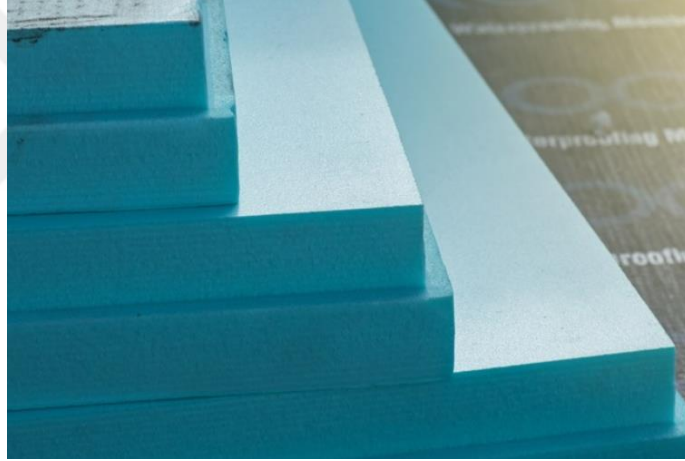
yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. EPS'nin içeriği Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: EPS malzemesinin içeriği

Bileşen	Kimyasal formülü	Oran (%)
Polistren	$(C_8H_8)_n$	95-98
Pentan	C_5H_{12}	2-5

3.1.2 Ekstrüde Edilmiş Polistren (XPS)

XPS ekstrüzyon makinesi kullanılarak üretilir (Şekil 3.2). PS polimeri bazı şişirici ajanlar ile muamele edilir ve ısı etkisi altında ekstrüderden geçirilir. Isı etkisi ile PS şişer ve istenilen kalınlıkta makinenin çıkış kısmından kalıp şeklinde çıkar.



Şekil 3.2: Ekstrüder kullanılarak üretilmiş XPS

XPS'nin yoğunluğu PS içerisine eklenen şişirici ajan miktarı ile ayarlanır (Tablo 3.2). Bu yöntem ile kapalı hücre yapısına sahip levha şeklinde hafif XPS üretilir.

Tablo 3.2: EXP malzemesinin içeriği

Bileşen	Kimyasal formül	Oran
Polistren	$(C_8H_8)_n$	En fazla % 90
Karıştırılmış şişirici ajan	CO_2	En fazla % 10

3.1.3 Aseton

Atık polistirenin eritilmesinde aseton kullanılmıştır. Aseton online alışveriş (SEM Kimya) sitesinden satın alınmıştır (Şekil 3.3). Satın alınan aseton piyasada Aseton, Propan-2-one, Propan-2-on, Dimetil Keton, Propanon ev Dimetil Karbonil olarak da bilinmektedir. Kimyasal formülü C_3H_6O , CAS numarası 67-64-1 ve görünüşü renksiz ve sıvı yapıdadır.



Şekil 3.3: PS'nin çözündürülmesinde kullanılan aseton

3.1.4 Lignin

Aseton kullanılarak eritilen (çözündürülen) PS içerisinde dolgu maddesi olarak 2 farklı türde (DES yöntemi ile üretilen ve ticari olarak satın alınan) lignin kullanılmıştır. Lignin Sigma-Aldrich markası ile merck firmasından satın alınmıştır. Satın alınan lignin 1,3 g/cm³ yoğunlukta katı formda ve CAS numarası 8068-05-1'dir.

DES lignini laboratuvar ortamında üretilmiştir. DES'ler, iki veya daha fazla bileşiğin, belirli bir oranda karıştırıldığında, bileşenlerin her birinin erime noktalarından daha düşük bir sıcaklıkta sıvı hale geldikleri çözücülerdir. Bu çözücüler, lignin gibi biyomoleküllerin ekstraksiyonunda kullanılır. DES yöntemi ile lignin üretimi, biyokütleden lignin ekstraksiyonunu sağlamak için derin eutektik çözücülerin kullanıldığı bir yöntemdir. İşlem genel hatlarıyla şu adımlardan oluşur:

- DES Hazırlığı: DES, belirli bir oranda karıştırılan iki veya daha fazla bileşenden oluşur. Bu bileşenler genellikle hidrojen bağı verici ve hidrojen bağı alıcı

bileşiklerdir (örneğin, kolin klorür ve bir organik asit).

- **Biyokütlenin Hazırlanması:** Lignin elde edilecek biyokütle (odun, tarımsal atıklar vb.) küçük parçalara ayrılır ve işleme hazır hale getirilir.
- **Ekstraksiyon:** Biyokütle, hazırlanan DES ile karıştırılır ve belirli bir sıcaklıkta ısıtılır. Bu aşamada DES, biyokütledeki lignini çözerek ekstrakte eder.
- **Ayrıştırma:** DES ile çözülmüş lignin, biyokütleden ayrıştırılır. Bu işlem genellikle filtrasyon veya santrifüj gibi fiziksel ayırma yöntemleri ile yapılır.
- **Ligninin Saflaştırılması:** Ayrıştırılan lignin, DES'ten ayrılarak saflaştırılır. Bu işlem, çözücünün buharlaştırılması veya başka bir çözücü ile çöktürme yöntemleri ile gerçekleştirilebilir.
- **Lignin'in Kurutulması:** Son aşamada, saflaştırılan lignin kurutularak toz veya granül formunda elde edilir (Şekil 3.4).

Bu yöntem, lignin üretiminde çevre dostu ve enerji verimliği sunan bir yöntemdir. DES'lerin biyolojik olarak parçalanabilir olmaları ve düşük toksisiteleri, bu yöntemin sürdürülebilirlik açısından avantajlı olmasını sağlar.



Şekil 3.4: Satın alınan ticari lignin

3.2 Metot

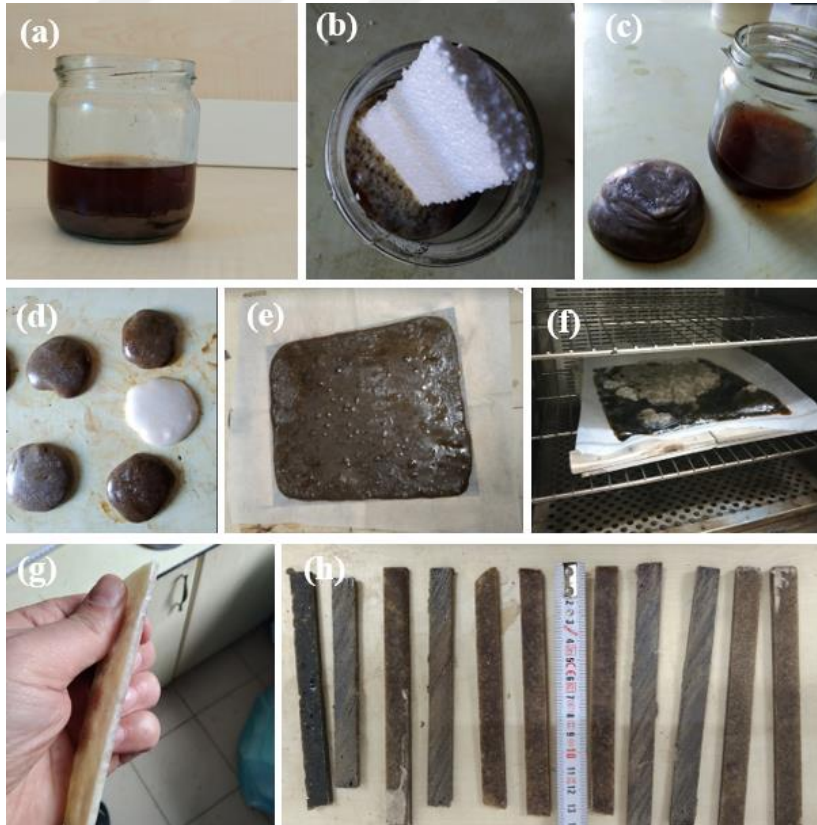
Analiz örneklerinin hazırlanması, fiziksel, mekanik ve morfolojik analiz yöntemleri ile ilgili ayrıntılar aşağıda konu başlıkları halinde verilmiştir.

3.2.1 EPS ve XPS'lerin çözündürülmesi ve örneklerin hazırlanması

Atık EPS ve XPS malzemesi eşit karışım da aseton kullanılarak çözündürülmüştür. 100 g malzeme 50 g aseton içerisinde çözündürülmüştür. Ligninin PS matris içerisinde homojen

dağılımının sağlanması için PS ilavesinden önce lignin aseton ile karıştırılmıştır (Şekil 3.5a). Aseton lignin karışımı içerisine PS ilave edilerek çözünmesi sağlanmıştır (Şekil 3.5b). Çözelti cam kap içerisinde yapılmıştır. Farklı oranlarda lignin ilavesi ile PS kompozitler hazırlanmıştır (Şekil 3.5c, d). Karışım oranları Tablo 3.3'te verilmiştir. Çözündürülen PS içerisindeki asetonun matris içerisinden uzaklaştırılması için örnekler bir geniş tabanlı bir kalıba dökülmüştür (Şekil 3.5e). Kalıp içerisindeki PS çözeltisi 150 °C'de 45 dk fırınlanarak PS matris içerisindeki asetonun tamamen uzaklaştırılması sağlanmıştır (Şekil 3.5f). Fırından alınan örnekler sıcak halde iken esnekliğinden yararlanılarak tekrar kalıplanmış ve basınç (15 bar) uygulanarak son şekli verilmiştir (Şekil 3.5g, h).

Hazırlanan örnekler analiz yöntemlerine göre daire testere kullanılarak son ölçülerine (130 mm x 10 mm x 1,3 mm) kesilmiştir. Hazırlanan örneklerin mekanik karakterizasyonu için eğilme, eğilmede elastikiyet modülü, çekme, çekmede elastikiyet modülü analizleri ASTM D 638 (2022)'e göre yapılmıştır.



Şekil 3.5: Analiz örneklerinin hazırlanması (a) lignin aseton karışımı, (b) EPS ve XPS'nin çözündürülmesi, (c) çözündürülmüş örnek, (d) Farklı oranlarda lignin içeren örnekler, (e) çözeltinin kalıplanması, (f) çözücünün uzaklaştırılması için fırınlama, (g) PS kontrol örneği, (h) hazırlanan diğer örnekler

Tablo 3.3: Örnek deseni

Örnekler	Açıklama	PS Miktarı (g)	Çözücü (Aseton) Miktarı (g)	Lignin miktarı (g)	Fırın sıcaklığı (°C)	Fırında Bekleme Süresi (dk)
PS-C	Saf polistiren	100	50	—	150	45
PU-1LCML	Polistiren + %1 Ticari lignin	99	50	1	150	45
PU-2LCML	Polistiren + %2 Ticari lignin	98	50	2	150	45
PU-4LCML	Polistiren + %4 Ticari lignin	96	50	4	150	45
PU-1LDES	Polistiren + %1 DES lignin	99	50	1	150	45
PU-1LDES	Polistiren + %2 DES lignin	98	50	2	150	45
PU-1LDES	Polistiren + %4 DES lignin	96	50	4	150	45

3.2.2 Eğilme Direnci

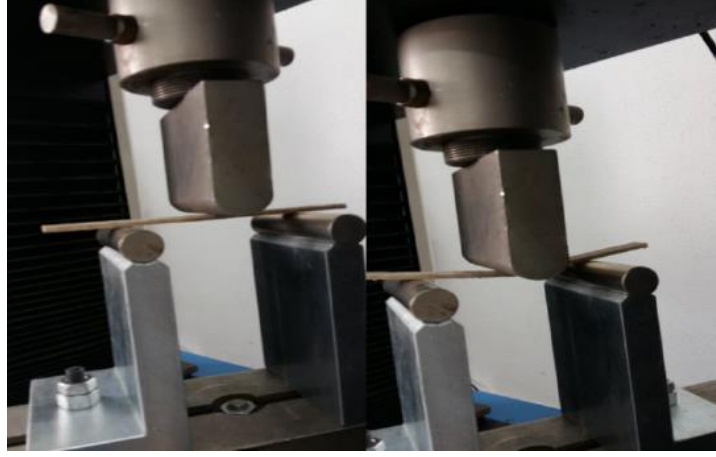
Analiz örneklerinin hazırlanmasında her örnekten 7 adet hazırlanmıştır. Örnekler daire testerede 130 mm x 13 mm x 1,3 mm olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Eğilme dirençleri UTEST Universal test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Cihazda örneklerin yerleştirildiği mesnet açıklığı 12cm olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.6). Analiz örneklerinin eğilme dirençlerinin belirlenmesi için kuvvet 3mm/dk hız ile uygulanmıştır. Makine çalışırken aynı ana ölçülen kuvvet miktarı cihaza bağlı bilgisayara anlık kaydedilmiştir. örneklerin kırılma anındaki uygulanan kuvvet belirlenerek örneklerin eğilme direnci (σ_e) ve elastikiyet modülü (E) belirlenmiştir. Eğilme direncinin ve eğilmede elastikiyet modülü hesaplanması için Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılmıştır.

$$\sigma_e = \frac{3.F.L}{2.b.d^2} (MPa) \quad (1)$$

$$E = \frac{F.L^3}{4.b.d^3.\Delta} (Mpa) \quad (2)$$

Burada;

F : Kırılma anında uygulanan maksimum kuvvet, L : Mesnetler arasındaki açıklık, d : Örnek kalınlığı, b : Örnek genişliği, Δ : Eğilme miktarıdır.



Şekil 3.6: Eğilme analizi test düzeneği

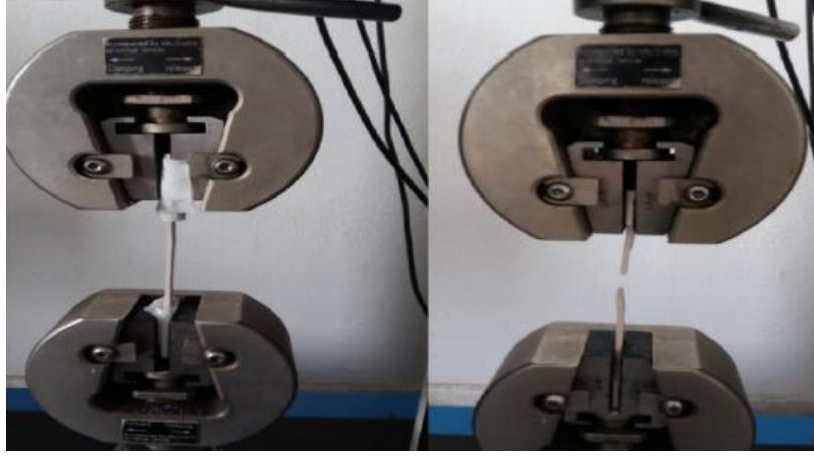
3.2.3 Çekme Direnci ve Çekmede Elastikiyet Modülü

Çekme analizi için her örnek gurubundan 7 adet örnek kullanılmıştır. Örnekler 130mm x 10 mm x 2 mm ölçülerinde kesilmiştir. Çekme direncinin belirlenmesinde UTEST Universal test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.7). 0,01 mm hassaslıkta ölçüm yapılarak kuvvete maruz kalan örneklerin çekme analizi yapılmıştır. Analiz örneklerinin kopma anındaki uygulanan kuvvet cihaza bağlı olan bilgisayar yardımı ile kaydedilmiştir. Bilgisayar vasıtası ile Eşitlik 3 kullanılarak örneklerin çekme dirençleri Eşitlik 3 kullanılarak çekmede elastikiyet modülü belirlenmiştir.

$$\text{ÇD} = P_{\max}/(a.b) \quad (3)$$

Burada;

ÇD: çekme direnci (Mpa), $P_{\max}$: Maksimum kuvvet (Newton), a ve b : Örneklerin en kesit alanlarıdır (mm^2).



Şekil 3.7: Çekme analizi test düzeneği

3.2.4 Yoğunluk

Kompozitlerin yoğunluklarının belirlenmesi için ASTM D 792-98 (2000) standardı kullanıldı. 20x15x2mm boyutlarındaki örneklerin tamamen kuruması için 24 saat boyunca 103±2°C sıcaklıkta etüvde bekletildi. Yoğunluk hesaplamaları için, etüvden alınan örneklerin ağırlıkları hassas terazide ölçülerek kaydedildi. Kalınlık, genişlik ve uzunluk ölçümlerinden yararlanılarak, Eşitlik 4 kullanılarak yoğunluklar hesaplandı.

$$Yoğunluk (d) = \frac{M}{V} \quad (4)$$

Burada;

d : Kompozitlerin yoğunluğu.

M : Kompozitlerin etüvden çıktıktan sonra tartılan ağırlıkları.

V : Kompozitlerin etüvden çıktıktan sonraki hacimleri.

3.2.5 Su Alma ve Kalınlığına Şişme

Örneklerin su alma testleri ASTM D 1037 (2020) standardına uygun olarak gerçekleştirildi, kalınlığına şişme testleri ise EN 317 (1999) standardına uygun şekilde yapıldı. Her bir karışım için 20x15x2mm boyutlarında 7 adet test örneği hazırlandı. Test öncesi örnekler 24 saat boyunca 50±2 °C sıcaklıkta etüvde bekletildi. Etüvden çıkarılan örnekler, hassas (Prceisa marka) terazide üç haneli hassasiyetle tartıldı ve ardından ölçümleri yapılan örnekler Memmert marka su banyosuna konuldu. Örnekler tamamen suya daldırıldı ve suyun

üst yüzeyine çıkmaları önlenerek 20 gün sonra çıkarıldı. Kalınlık ve ağırlık ölçümleri yapıldı. Aynı işlem 50. ve 250. günlerde tekrarlandı.

Literatürde belirtildiği üzere odun plastik kompozitlerin 2 saat ile 120 güne kadar su alma miktarları ölçülmüştür (Najafi vd., 2007; Yatigala vd., 2018; Chang., 2009). Örneklerin su alma miktarları Eşitlik 5 formülü kullanılarak hesaplandı.

$$W (\%) = \left(\frac{W_{son} - W_{ilk}}{W_{ilk}} \right) \times 100 \quad (5)$$

W : Kompozitlerin yüzde (%) cinsinden su alma değeri.

W_{son} : Örneklerin su ile doymuş ağırlıkları.

W_{ilk} : Örneklerin tam kuru ağırlıkları.

Su alma deneyinde kullanılan örnekler, kalınlığına şişme miktarlarının belirlenmesi için kullanıldı. Ağırlıkları ölçülen örneklerin yanı sıra, kumpas kullanılarak kalınlık, uzunluk ve genişlik değerleri ölçülerek kaydedildi. Örneklerin kalınlığına şişme miktarları Eşitlik 6 kullanılarak hesaplandı.

$$G (\%) = \left(\frac{K_{son} - K_{ilk}}{K_{ilk}} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Burada;

G : Kompozitlerin yüzde (%) cinsinden kalınlığına şişme değeri.

K_{son} : Su içerisinde çıkarıldıktan sonra ölçülen kalınlık.

K_{ilk} : Kompozitlerin tam kuru haldeki kalınlıkları.

3.2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Örnekler, elektron mikroskobu analizleri için sıvı azot içerisinde bekletildi ve kırılabilir hale getirildi. Sonrasında kırılarak temiz bir kırık yüzey elde edildi. Pürüzsüz yüzeylerin parlaklığını önlemek için altın tozu ile kaplandılar. Tescan marka (MAIA3 XMU) (Şekil 3.8) cihazı kullanılarak test örnekleri incelendi ve elde edilen veriler CD'ye kaydedildi.



Şekil 3.8: Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.2.7 Fourier Transform Infrared Spektrofotometre (FTIR)

Örnek analizleri için Shimadzu IRAffinity-1 marka cihaz kullanıldı. Her bir örnek için 32 tarama gerçekleştirildi ve çözünürlük 4 cm⁻¹ olarak ayarlandı. FTIR analizi ile kompozitlerin moleküler yapıları incelendi. Moleküler titreşim hareketlerinin frekansları analiz edilerek kompozitlerin kimyasal yapıları hakkında bilgi elde edildi. Ölçüm yapılan cihaz Şekil 3.9'de gösterilmiştir.



Şekil 3.9: FTIR analiz cihazı

3.2.8 İstatistik Yöntem

Kompozitlerin analizleri sonucunda elde edilen veriler, basit varyans analizi (BVA)

kullanılarak değerlendirildi. Örnekler arasındaki değişimlerin anlamlılığı incelendi ve anlamlı farklılıklar için DUNCAN testi uygulandı. İstatistiksel analizler için SPSS 16.0 paket programı tercih edildi. Ayrıca, örneklere ait verilerin aritmetik ortalamaları, standart sapmaları ve varyasyon katsayıları, Microsoft Office Programları kullanılarak hesaplandı. Analizler, %95 güven aralığında gerçekleştirildi.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Lignin dolgusunun polistren polimerinin mekanik, fiziksel ve yapısal özelliklerini nasıl etkilediği analiz sonuçları ile ortaya konulmuştur. Bulgular hem kendi içinde hem de daha önce bilinenlerle karşılaştırılarak tartışılmıştır ve bilime ve uygulamaya katkısı ortaya konulmuştur.

4.1 Mekanik Özellikler

Örneklerin mekanik analiz sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Lignin dolgusunun örneklerin eğilme ve çekme dirençlerinde farklılıklara neden olduğu belirlenmiştir. Eğilme ve çekme dirençleri ayrı başlıklar halinde aşağıda tartışılmıştır.

Tablo 4.1: Örneklerin mekanik analiz sonuçları

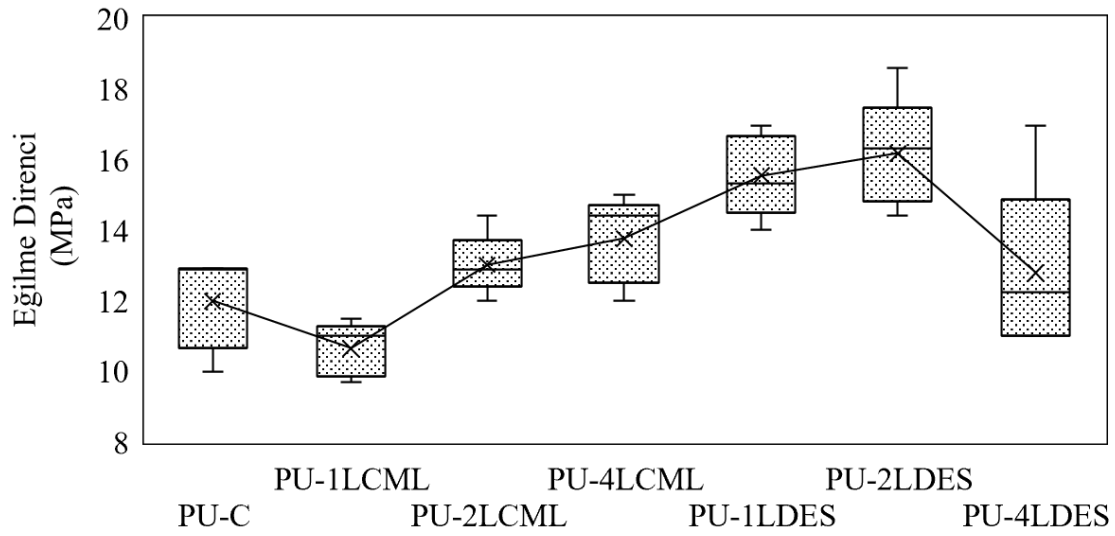
Örnekler	Eğilme Direnci (MPa)	Eğilmede Elastikiyet Modülü (MPa)	Çekme Direnci (MPa)	Çekmede Elastikiyet Modülü (MPa)	Kopmada Uzama (%)
PS-C	12.0 ($\pm 1,3$) AB	982 (± 76) C	11.9 ($\pm 1,3$) CD	686 (± 120) A	2.85 ($\pm 0,4$) ABC
PU-1LCML	10.7 ($\pm 0,8$) A	1000 (± 113) C	11.1 ($\pm 0,9$) C	892 (± 138) B	3.34 ($\pm 0,2$) CD
PU-2LCML	13.0 ($\pm 0,9$) B	1003 (± 115) C	7.1 (± 1) A	773 (± 82) AB	2.84 ($\pm 0,3$) A
PU-4LCML	13.8 ($\pm 1,2$) BC	816 (± 105) B	7.0 ($\pm 1,2$) A	758 (± 83) AB	2.62 ($\pm 0,4$) AB
PU-1LDES	15.5 ($\pm 1,2$) CD	1008 (± 99) C	8.9 ($\pm 1,1$) B	723 (± 94) A	3.11 ($\pm 0,4$) BCD
PU-1LDES	16.2 ($\pm 1,6$) D	1013 (± 85) C	12.8 (± 2) D	1087 (± 126) C	3.39 ($\pm 0,2$) D
PU-1LDES	12.8 ($\pm 2,4$) B	663 (± 98) A	11.0 ($\pm 1,3$) C	1079 ($\pm 83,3$) C	3.27 ($\pm 0,6$) CD

4.1.1 Eğilme Direnci

Şekil 4.1 incelendiğinde lignin dolgusunun genel olarak eğilme dirençlerini artırdığı belirlenmiştir. Yalnızca %1 ticari lignin eklenen örneğin (PU-1LCML) kontrol örneğinden (PU-C) % 11 düşük olduğu belirlenmiştir. Diğer tüm örneklerde lignin dolgusu eğilme direncinde % 7-35 oranında iyileşmeye neden olmuştur. Eğilme direnci grafiği incelendiğinde %4 DES lignin ekli (PU-4LDES) örneğin diğerlerinden farklı olduğu görülmektedir. Çünkü diğer örneklerde lignin oranı arttıkça eğilme direncinde artış görülürken (PU-1LCML), PU-2LCML, PU-4LCML, PU-1LDES ve PU-2LDES) bu örnekte (PU-4LDES) düşüş kaydedilmiştir. Bazı araştırmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (González Sánchez ve Alvarez 1999; Reza Barzegari vd., 2012b; Barzegari vd., 2013).

Lignin ilavesi PS polimer içerisinde hava kabarcıklarını oluşmasına neden olmuştur. Bu boşluklar bazı örneklerde fazla bazı örneklerde azdır. PU-4LDES örneğinde bu boşlukların fazla olduğu ve bunun da eğilme dirençlerini olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır.

Ligninin polar yapısı ve hidrojen bağı tipi molekül içi bağlantılar oluşturma eğilimi, polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi polar olmayan poliolefinlerle bağ yapmasını zorlaştırır. Bazı araştırmacılar, polimerlere eklenen ligninin yararları konusunda çelişkili sonuçlar bulmuşlardır. Gonzáles ve Espósito (1999), termo plastik polimer içerisine kraft lignini katarak düşük arayüzey yapışması sağladığını ve lignin içeriği arttıkça fiziko-mekanik özelliklerin azalmasına yol açtığını rapor etmiştir. Başka bir çalışmada ise lignin miktarı arttıkça eğilme direncinin arttığı rapor edilmiştir. Araştırmacılar lignin ilavesinin PS karışımlarını eğilmeye karşı (%50-60) daha sert hale getirdiğini bildirmişlerdir (Reza Barzegari vd., 2012b).

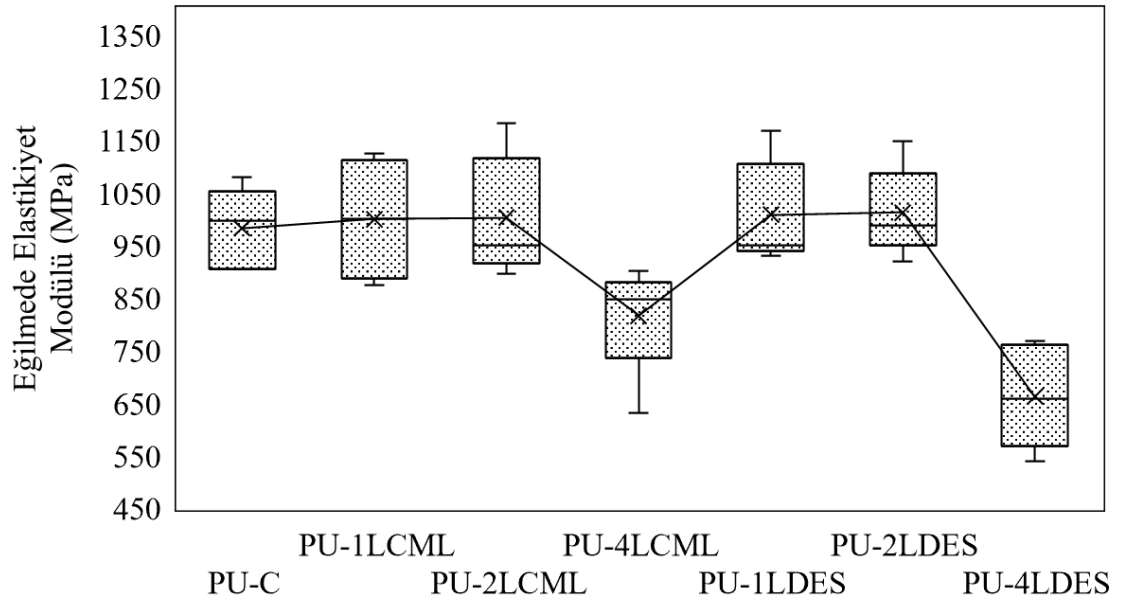


Şekil 4.1: Eğilme direnci diyagramı

Lignin ve PS molekülleri arasındaki bağ kuvvetinin artırılması amacıyla bazı uyumlaştırıcılar da kullanılabilir. Bu uyumlaştırıcıların eğilme direncini artırdığı bilinmektedir. % 1-2 oranında kullanılan uyumlaştırıcının optimum olduğu fazla kullanım oranının ise olumsuz etki yarattığı bildirilmiştir (Reza Barzegari vd., 2012b). Çalışmamızda herhangi bir uyumlaştırıcı kullanılmamıştır. Kullanılması durumunda eğilme dirençlerinde daha fazla artış elde edileceği değerlendirilmektedir.

4.1.2 Eğilmede Elastikiyet Modülü

Örneklerin eğilmede elastikiyet modüllerinin lignin ilavesi ile değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde % 4 lignin ilavesinin (hem DES hemde Ticari lignin ilavesinde) eğilmede elastikiyet modülünü düşürdüğü görülmektedir. % 1 ve % 2 lignin ilavesinin örneklerin elastikiyet modüllerinde kısmen (982 MPa’dan 1013 MPa’ya) bir artışa neden olduğu söylenebilir. Farklı çalışmalarda lignin dolgusunun artıkça elastikiyet modülünün arttığı belirlenmiştir (Chung vd., 2013; Kubo ve Kadla, 2004). Zhang vd., (2019) yaptığı çalışmada % 14 lignin ilavesine kadar elastikiyet modülünün arttığını bildirmiştir.

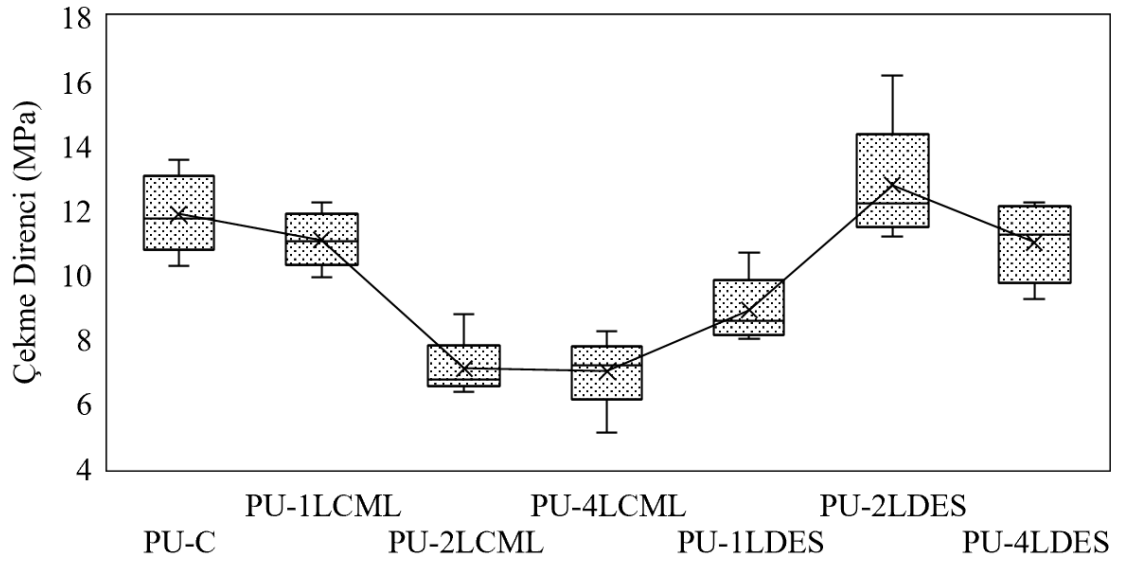


Şekil 4.2: Eğilmede elastikiyet modülü diyagramı

Yukarıda belirtilen çalışmaların aksine, Masri vd., (2019) yaptıkları bir çalışmada lignin dolgu miktarı (% 5-12) arttıkça PS kompozitin eğilmede elastikiyet modülünün azaldığını rapor etmişlerdir. Benzer sonuçlar Joseph (1999), Masri vd., (2019), Masri vd., (2018) ve Rozman vd., (2000) tarafından da rapor edilmiştir. Bu durumda, lignin miktarındaki artış bazı çalışmalarda eğilmede elastikiyet modülünü artırmış bazı çalışmalarda ise düşürmüştür. Bizim çalışmamızda ise % 3 lignin dolgusundan sonra elastikiyetin düştüğü görülmektedir (Şekil 4.2). Bu farklılıklara lignin üretim yöntemi veya kullanılan uyumlaştırıcılar veya polistiren kompozitlerin yoğunlukları neden olmuş olabilir. Elastikiyet modülünün nasıl etkilendiği konusunda daha fazla araştırma yapılmalıdır.

4.1.3 Çekme Direnci

Şekil 4.3 incelendiğinde lignin ilavesinin örneklerin çekme dirençlerini (PU-2LDES hariç) düşürdüğü görülmektedir. Ticari lignin ilave edilen PS örneklerinde lignin miktarı arttıkça çekme dirençleri azalmıştır. fakat aynı durum DES yöntemi ile elde edilen lignin ilavesi için geçerli değildir. % 2 DES lignin ilavesi (PU-2LDES) çekme direncini % 1 ilaveli (PU-1LDES) olana göre % 30 artırmıştır. Fakat lignin ilavesi % 4'e çıkartıldığında (PU-4LDES) çekme direnci % 2 ilaveli olana (PU-2LDES) göre % 14 azalmıştır. Benzer sonuçlar Reza Barzegari (2012b) tarafından da rapor edilmiştir. Lignin dolgulu polistirende lignin miktarı arttıkça kompozitin daha kırılgan bir yapıya sahip olduğu ve çekme dirençlerinin azaldığını bildirmişlerdir. Uyumlaştırıcılar kullanılarak lignin ve PS arasındaki bağ yapısı artırılabilir ve çekme direnci iyileştirilebilir (Reza Barzegari vd., 2012b).



Şekil 4.3: Örneklerin çekme dirençleri diyagramı

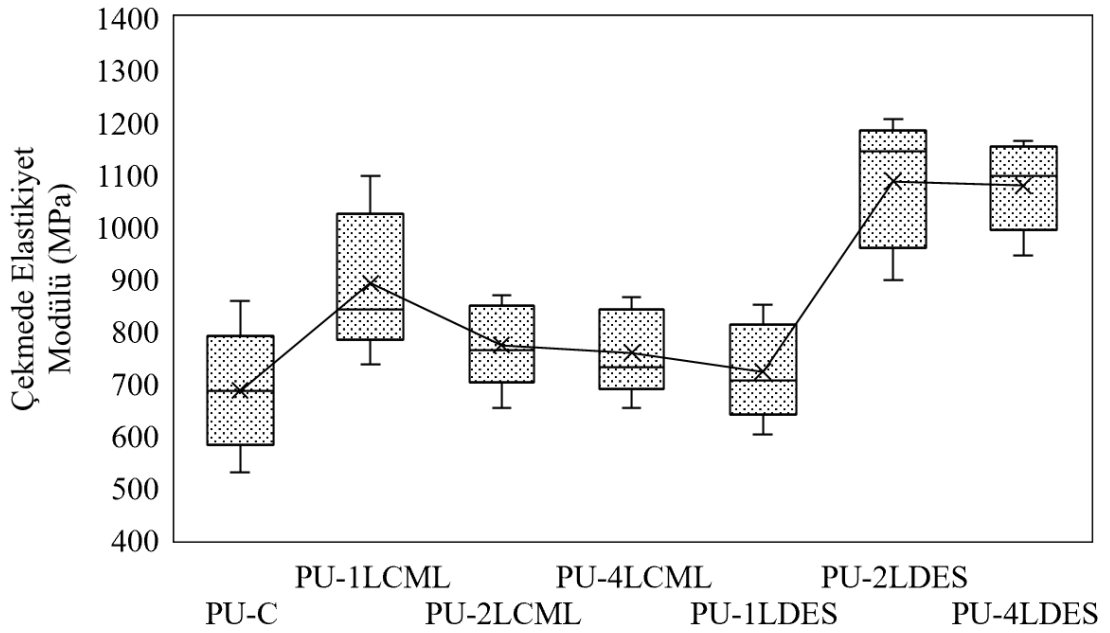
Polistiren kompozitlerin mekanik dirençlerini artırmak için lignin ucuz, kolayca bulunabilen ve çevre dostu bir biyopolimer olduğundan, polimer bilim adamları, geleneksel polistiren veya poliolefin plastik fazının yerine ligninin termoplastiklere ve termoplastik elastomer kompozitlere uygulanmasına yönelik çalışmalar yapmaktadırlar .

Yapılan çalışmalardan birisinde lignin miktarı artırıldıkça çekme direncinin arttığı bildirilmiştir (Zhang vd., 2019). Yapılan başka bir çalışmada ise Co(II)-lignin kompleksinin PS içerisine eklenmesinin, elde edilen polimer kompozitin çekme direncini arttırdığı ve cam

geçiş sıcaklığının azaldığı gözlenmiştir (El-Zawawy vd., 2011). Elde edilen sonuçlara göre lignin ilavesi PS kompozitlerin çekme dirençlerini bazı çalışmalarda artırdığı ve bazı çalışmalarda azalttığı belirlenmiştir. Bizim çalışmamızda ise lignin ilavesi çekme direncini azaltmıştır. Bunun sebebinin lignin üretim yöntemi olabileceği düşünülmektedir. Çünkü iyonik sıvılar ile yapılan delignifikasyon yöntemi ile elde edilen ligninin PS kompozitlerde çekme direncini artırdığı rapor edilmiştir (El-Zawawy vd., 2011).

4.1.4 Çekmede Elastikiyet Modülü

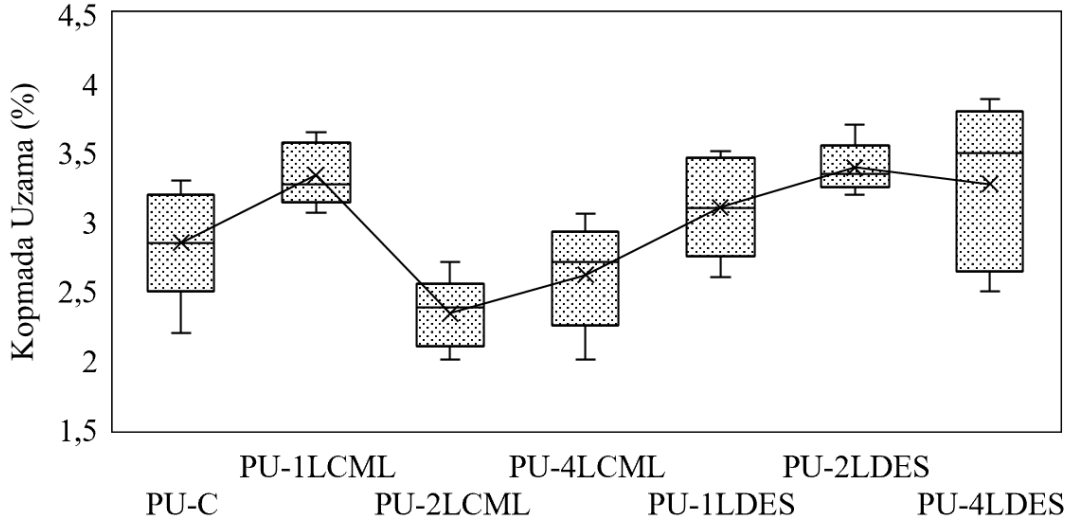
Şekil 4.4 incelendiğinde ticari ve DES lignini ilavesinin PS kompozitin çekmede elastikiyet modülünü artırdığı görülmektedir. Lignin ilavesi kompozite daha esnek bir yapı kazandırmıştır. PS kompozitin kırılma yapısı daha elastik hale gelmiştir. Bu ise kompozitte hem yoğunluklarda azalmaya neden olmuş hemde çekme direncinin azalmasına neden olmuştur. Kompozit malzemeler kullanım yerine göre genelde elastikiyet modüllerinin yüksek olması istenir. Burada lignin ilavesi çekmede elastikiyeti artırmıştır. Bu olumlu bir etki olmasına rağmen çekme direncini azaltması olumsuz bir durumdur. Eğilme dirençlerinde ise tam tersi bir durum söz konusudur. Lignin ilavesi ile eğilme dirençleri artış gösterirken eğilmede elastikiyet modüllerinde aynı artış gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.4: Çekmede elastikiyet modülü

4.1.5 Kopmada Uzama Oranı

Şekil 4.5 incelendiğinde lignin ilavesinin örneklerin kopmada uzama miktarını genel olarak artırdığı görülmektedir. % 2 ve % 4 ticari lignin ilavesi dışında diğer lignin ilavesi kopmada uzama miktarını artırmıştır. Polistren polimerler üzerine yapılan bir araştırmada PS içerisine ligno selülozik dolgu maddeleri ilave edilmiş ve örneklerin mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarında dolgu maddelerinin PS kompozitin kopmada uzama miktarını azaldığını fakat çekme ve eğilme direncinin arttığı rapor edilmiştir (Reza Barzegari vd., 2012a). Bizim çalışmamızda ise yalnızca 2 örnekte kopmada uzama miktarı azalmıştır. Diğer 4 örnekte kopmada uzama miktarı artmıştır. Başka bir çalışmada, R. Gosselin vd. (2006), lignoselülozik dolgu maddesi olarak sarı huş odun liflerini (425-1168 µm boyutlarında), polimer malzeme olarak polietilen/polipropileni (85:15 oranında), köpük ajanı olarak azodikarbonamidi ve uyum sağlayıcı olarak Maleik anhidridle muamele edilmiş polipropileni (MAPP) kullanarak, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle hem köpüklü hem de köpüksüz odun plastik kompozitleri üretmişlerdir. Kopmada uzama değerinin odun unu oranı azaldıkça arttığını ve köpüklendirme ile azaldığını belirlemişlerdir.



Şekil 4.5: Örneklerin kopmada uzama oranı

Kopmada uzama miktarı üzerine yapılan başka bir araştırmada polistren içerisine ilave edilen (%30) odun unu, buğday sapı ve fıstık kabuklarının kompozitin kopmada uzama miktarını azalttığı rapor edilmiştir (Karakuş vd., 2011).

4.2 Fiziksel Özellikler

Lignin dolgulu PS kompozitlerin fiziksel karakterizasyonu Tablo 4.2’de verilmiştir.

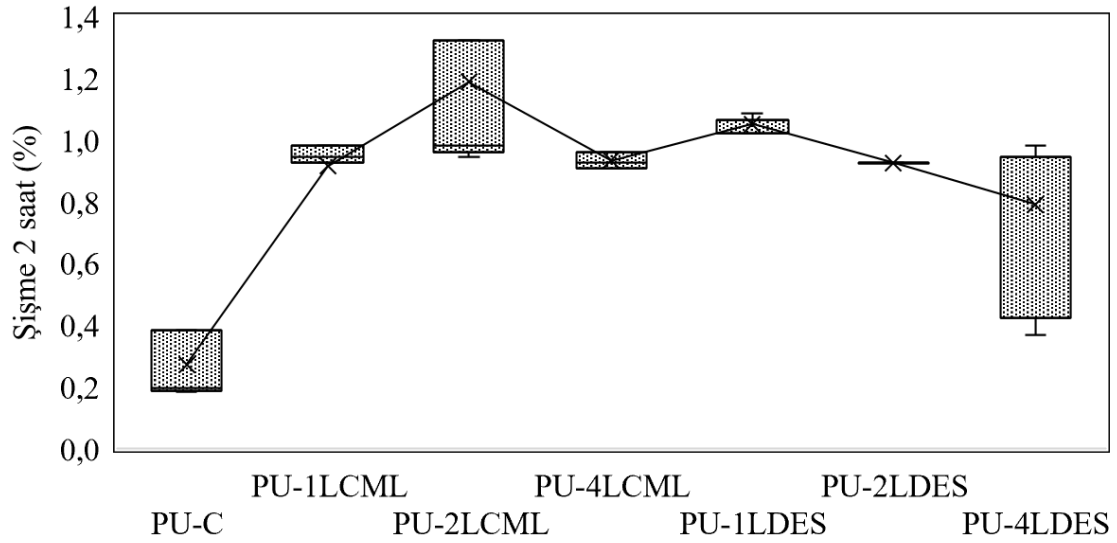
Tablo 4.2: Fiziksel özellikler

Örnekler	Şişme (2 saat) (%)	Su alma (2 saat) (%)	Yoğunluk (kg/m ³)
PS-C	0,3 (±0,1) A	0,3 (±0,01) AB	448 (±0,02) C
PU-1LCML	0,9 (±0,1) BC	0,2 (±0,16) A	366 (±0,06) AB
PU-2LCML	1,2 (±0,4) D	0,2 (±0,06) A	330 (±0,09) A
PU-4LCML	0,9 (±0,02) BC	0,4 (±0,17) B	422 (±0,03) BC
PU-1LDES	1,1 (±0,02) CD	0,4 (±0,03) AB	376 (±0,06) ABC
PU-1LDES	0,9 (±0,01) BC	0,4 (±0,16) B	439 (±0,03) C
PU-1LDES	0,8 (±0,3) B	0,5 (±0,18) B	386 (±0,06) ABC

4.2.1 Kalınlığına Şişme miktarı

Şekil 4.6 incelendiğinde iki saatlik kalınlığına şişme miktarları en az olan örneğin kontrol (PU-C) örneği olduğu görülmektedir. Lignin ilavesi PS kompozitin kalınlığına şişme miktarını %0,3’ten % 0,8 – 1,2 arasına çıkarmıştır. Şekilde PU-2LCML ve PU-4LDES örneklerinin standart sapma değerlerinin diğer örneklerden daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı yüksek sapma değerinin örnek yoğunluklarında da gözlemlenmiştir. Lignin PS kompozitin daha fazla köpüklenmesine ve köpüklenen kompozitlerin yoğunluk ve kalınlığına şişme miktarlarında farklılıklara neden olmuştur.

Kalınlığına şişme miktarları istatistiksel olarak incelendiğinde ($P < 0,05$) örnekler arasında anlamlı farklılıklar olduğu belirlenmiştir (Tablo 4.2). Ticari lignin ile DES lignini PS kompozitinin kalınlığına şişme miktarını benzer şekilde artırmıştır. Her iki lignin türünde de dolgu miktarı % 4’e çıkarıldığında şişme miktarı azalmıştır. (% 1,2’den % 0,8’e). Örneklerin şişme miktarları arasında farkın % 1,2’den % 0,8’e düşmesi anlamlı bir farklılık gibi gözükse de aradaki % 0,4’lük fark kalınlığına şişme miktarında ihmal edilebilir.

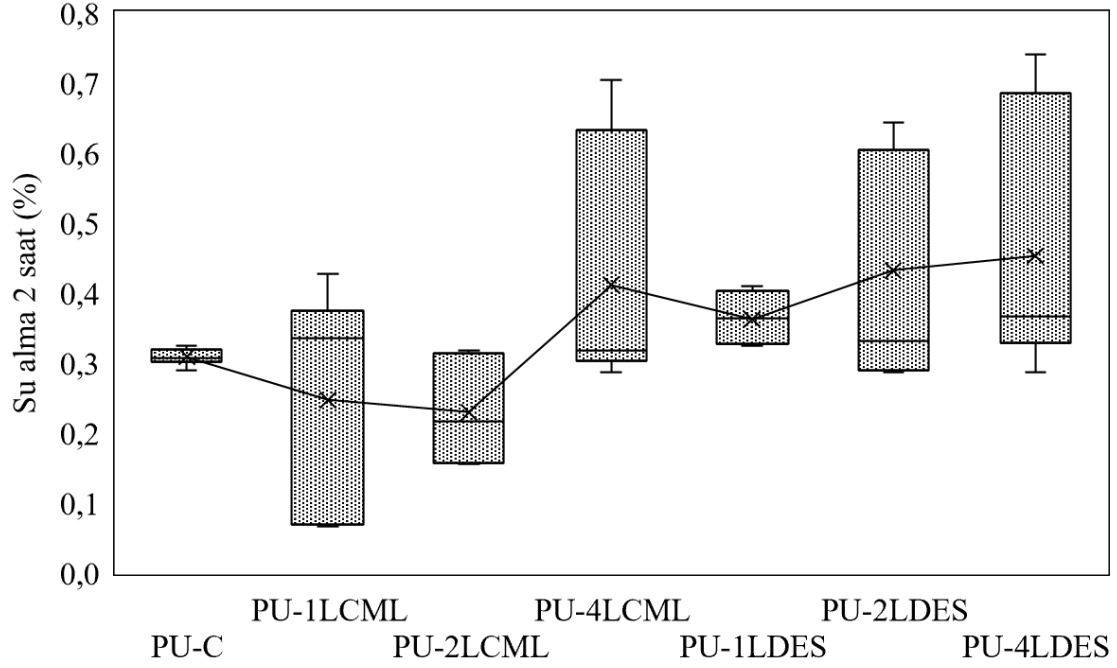


Şekil 4.6: Kalınlığına şişme miktarı tayini

Goliszek vd. (2019) yaptıkları bir çalışmada, Lignin dolgusunun, kompozit malzemelerin fonksiyonel gruplarla etkileşime girmesini sağlayarak, çözücülerle olan etkileşimlerini artırdığını bildirmişlerdir. Genellikle, lignin içeriği arttıkça, kompozitlerin şişme eğilimi de artar. Şişme katsayıları, özellikle aseton ve kloroform gibi çözücülerde daha yüksektir. Bu bulgular, lignin dolgusunun kompozit malzemelerin şişme davranışını önemli ölçüde etkileyebileceğini ve bu etkileşimin lignin tipi, fraksiyonu ve modifikasyonuna bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir (Goliszek vd., 2019).

4.2.2 Su alma miktarı

Örneklerin su alma miktarları incelendiğinde en düşük su alma miktarının PU-2LCML örneğinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.7). Ticari ligninin su alma miktarı DES ligninine göre daha az bulunmuştur. Saf PS kompozitin su ala miktarı % 0,309 bulunmuştur. Bu oran % 1 ticari lignin eklenmesi ile % 0,247'ye, % 2 ticari lignin eklenmesi ile % 0,230 düşmüş fakat % 4 ticari lignin ilavesi ile % 0,412'ye çıkmıştır. Yapılan tek yön Anova analizi ile örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Kalınlığına şişme analizine benzer şekilde örneklerin standart sapma değerleri yüksek çıkmıştır. Buna köpüklenen matrisin homojenliğinin bozulmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.7: Su alma miktarı tayini

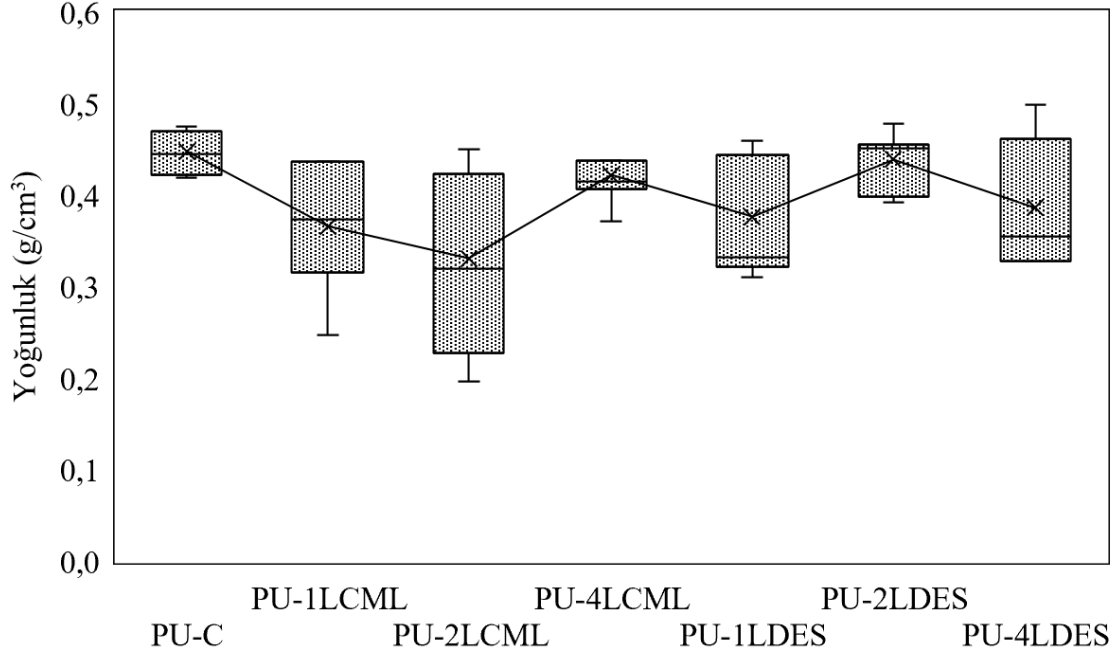
Goliszek vd. (2019) iki farklı (yumuşak ağaç (*Picea abies* L.) ve sert ağaç (*Eucalyptus grandis*) ligninlerinin PS kompozitlerin su alma miktarlarını azalttığını rapor etmiştir. Bunun sebebini, lignin fraksiyonlarının polimer matris içinde çapraz bağlanma yeteneği ile ilişkilendirmişlerdir. Bu durumda ticari ligninin DES ligninine göre az da olsa PS matris ile daha güçlü bağ yaptığı söylenebilir. Goliszek vd. (2019) ise yumuşak ve sert ağaçlardan elde ettiği lignin türlerinin arasında su alma miktarı bakımından anlamlı fark olmadığını rapor etmişlerdir. Bu durumda lignin türünden ziyade lignin elde etme yönteminin su alma miktarı üzerine etkisi olduğu söylenebilir.

4.2.3 Yoğunluk

Şekil 4.8 incelendiğinde yoğunluğu en düşük olan örneğin PU-2LCML olduğu görülmektedir. Lignin ilavesi tüm örneklerde yoğunluğun düşmesine neden olmuştur. Bu duruma lignin ilavesinin PS kompoziti köpüklendirmesi neden olmuştur. Ticari lignin ilave edilen örneklerin ortalama yoğunluğu $0,373 \text{ g/cm}^3$ ve DES ile üretilen lignin ilave edilen örneklerin ortalama yoğunluğu $0,401 \text{ g/cm}^3$ tespit edilmiştir. Bu durumda DES ile üretilen lignin, Ticari lignine göre % 7,5 yoğunluk artışına neden olmuştur.

Kompozitlerin yoğunluklarının düşük olması buna karşılık mukavemet özelliklerinin yüksek olması aranan bir özelliktir. Bu çalışmada, lignin ilavesinin PS kompozitlerin genel olarak

mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve yoğunlukları azalttığı düşünüldüğünde kompozitlerin genel olarak özelliklerinin yükseltildiği söylenebilir.



Şekil 4.8: Yoğunluk analiz sonuçları

Yapılan başka bir çalışmada lignin ilavesi, kompozitlerin yoğunluğunu artırmıştır. Özellikle, lignin içeren kopolimer kaplaması yapılan odun dolgulu kompozitler, kaplama yapılmayan kontrol örneklerine göre daha yoğun olduğu bildirilmiştir (Adcock vd., 2003).

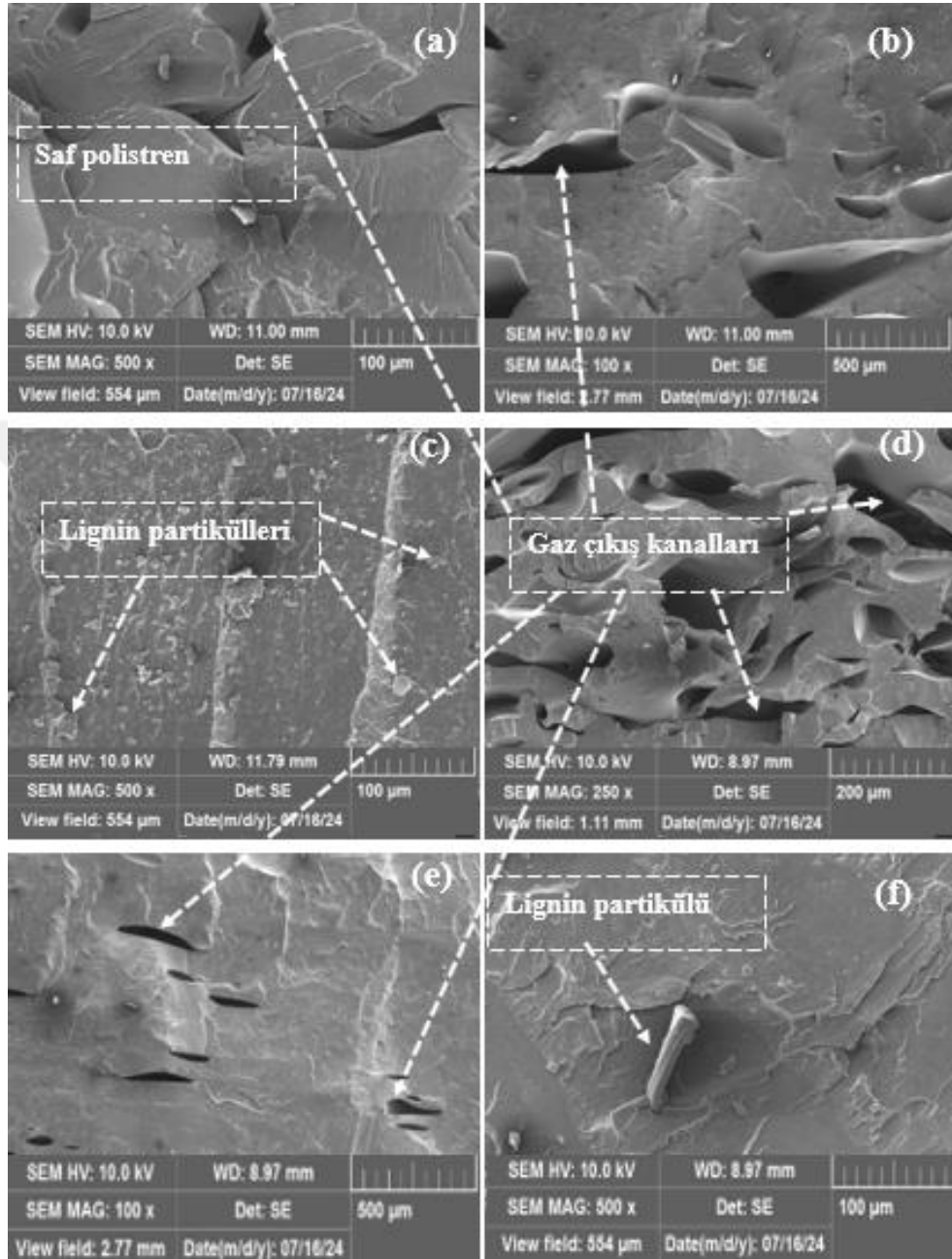
4.3 Morfolojik ve Yapısal Özellikler

Lignin dolgusunun kompozitin kimyasal yapısında meydana getirdiği değişiklikleri izlemek için FTIR analizi yapılmıştır. SEM mikroskobu ile lignin partiküllerinin matris içerisindeki dağılımları belirlenmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.3.1 SEM mikroskop Analizi

Şekil 4.9a'da gösterildiği gibi, saf polistirenin yüzey morfolojisi homojen bir yapı sergilemiş ve pürüzsüzlüğüdür. Daha yüksek bir büyütmede, lignin eklenmiş polistirenin parçaları daha iyi görünerek ortaya çıkmış ve çatlak, parçacıklar veya bölünmeler belirlenmemiştir. Bu da polimer matrisinin eşit durumunu gösterir (Şekil 4.9c). Şekil 4.9c ve 4.9f, polimer matrisine

gömülü lignin çatlaklarının varlığını kanıtlamıştır. Lignin polistiren matris içerisinde dağılmış, bu da kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri etkilenmiştir.



Şekil 4.9: SEM analizi

Şekil 4.9a, 4.9b, 4.9d, 4.9e kompozit malzeme içindeki gaz çıkış kanallarını göstermektedir. Asetonun ısının etkisi altında buharlaşması bu kanalların oluşmasına neden olmuştur. Bu tür kanallar malzemenin bütünlüğünü ve performansını etkileyebilir.

Şekil 4.9c'de, polimer matristeki lignin parçacıklarının dağılımını farklı bir büyütme

oranında gösterilmiştir. Bu parçacıkların hizalanması ve dağılımı, kompozitin özelliklerini tanımlamada önemli bir rol oynamıştır (Rukmanikrishnan vd., 2020).

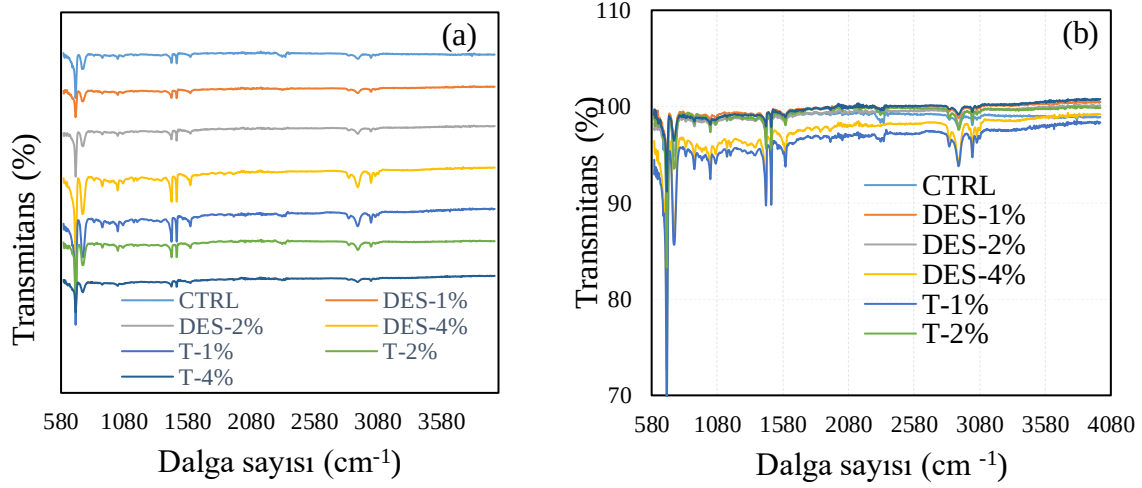
Şekil 4.9f'de, polimer matris içindeki tek bir lignin parçacığının yakın çekimi bulunmaktadır. Ayrıntılı görünüm, parçacığın şeklini ve yüzey dokusunu gözlemlemeyi sağlamıştır; bu, lignin ve polimer matris arasındaki etkileşimi anlamak için önemlidir (Rukmanikrishnan vd., 2020).

SEM görüntüleri, lignin parçacıklarının eklenmesinin gaz çıkış kanalları gibi belirli morfolojik özelliklerde değişim meydana geldiğini ortaya çıkarmıştır. Bunların kompozitin mekanik özelliklerini etkileyebileceğini göstermiştir. Bu tür kompozitlerin mikro yapısal özelliklerini anlamak, belirli uygulamalar için özelliklerini optimize etmek açısından önemlidir; örneğin, artan mukavemet, termal kararlılık veya biyolojik olarak parçalanabilirlik bunlardan bazılarıdır (Shen vd., 2022; Ural, 2021; Zor vd., 2023).

4.3.2 FTIR Analizi

Şekli 4,10'da polistiren ve lignin karışımlarının FTIR spektrumları ayrı ayrı (Şekil 4.10a) ve üst üste (Şekil 4.10b) verilmiştir. Her spektrum, belirli bir dolgu oranı için dalga sayısına göre geçirgenliğin değişimini göstermektedir. Saf polistirenin spektrumunda karakteristik bantlar gözlemlenmiştir. Aromatik C=C gerilme titreşimleri 1600 cm^{-1} civarında ve C-H gerilme titreşimleri 3000 cm^{-1} üzerinde görülmüştür (Villegas-Camacho vd., 2024).

Saf polistirene kıyasla lignin içeren polistirenin spektrumlarında yeni bantlar gözlemlenmiştir. Örneğin, karbonil (C=O) gerilme titreşimleri 1700 cm^{-1} civarında ve geniş O-H gerilme titreşimleri $2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$ aralığında belirlenmiştir (Ahmad ve Ayub, 2022).



Şekil 4.10: FTIR analizi sonuçları

DES-1%, DES-2%, DES-4% ve T-1%, T-2%, T-4% spektrumları, bazı bantların yoğunluğunun lignin oranının artmasıyla arttığını göstermiştir. Bu, ligninin polistiren matrisine başarılı bir şekilde entegre edildiğini gösterir.

Şekil 4.10b'de görüldüğü gibi, polistiren ve lignin karışımlarının FTIR spektrumları, %4 lignin eklenmesi dışında örtüşmektedir. Böylece, farklı dolgu oranlarının ve tiplerinin spektrumları karşılaştırılmıştır. Tüm spektrumlar genellikle benzer bir desen sergilemiştir, dolgu oranına ve tipine bağlı olarak küçük farklılıklar oluşmuştur. Saf polistirenin (CTRL) spektrumuyla karşılaştırıldığında, lignin içeren spektrumlarda 1800-1500 cm^{-1} ve 3000-2800 cm^{-1} aralığında önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. Karbonil (C=O) gerilme titreşimleri 1800-1500 cm^{-1} aralığında gözlemlenmiştir. Bu bantların yoğunluğu, lignin eklenmiş polistiren örneklerinde artmış ve bu da lignindeki karbonil gruplarının varlığını ve polimer matrisine entegrasyonunu göstermiştir (Adamu vd., 2023). 3000-2800 cm^{-1} aralığında, geniş O-H gerilme titreşimleri gözlemlenmiştir. Lignin içeren örneklerde bu bantların yoğunluğundaki artış, ligninin hidroksil gruplarının polistirenle etkileşime girdiğini göstermiştir (Gaabour, 2021).

Lignin içeriği arttıkça geçirgenlik değerlerinde bir azalma gözlemlenmiştir. Bu, lignin moleküllerinin polistiren matrisinde daha fazla yer kapladığını ve daha az ışığın geçmesine neden olduğunu göstermiştir (Villegas-Camacho vd., 2024). Polistiren matrisine lignin eklenmesi, polimerin kimyasal yapısında bazı değişikliklere yol açmıştır. FTIR spektrumları, ligninin varlığının polistirenin kimyasal bileşimini değiştirdiğini ve yeni

fonksiyonel grupların oluştuğunu göstermiştir. DES ve T lignin tipleri arasındaki spektrum farklılıkları, ligninin polimere entegrasyonunun kaynağına ve işleme yöntemine bağlı olarak farklı olduğunu göstermiştir (Adamu vd., 2023).



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada polistiren aseton kullanılarak eritilmiş ve içerisine lignin dolgu maddesi ilave edilmiştir. İki farklı lignin ve 3 farklı dolgu oranı kullanılmıştır. Ticari lignin ve DES yöntemi ile elde edilen lignin %1-2-4 oranında ilave edilmiştir. Örnekler fırın içerisinde sıcak havada bekletilerek çözücü uzaklaştırılmış ve katı halde polistiren-lignin karışımı kompozit üretilmiştir. Örneklerin fiziksel ve mekanik karakterizasyonu ilgili TSE ve ASTM standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda verilmiştir.

- Lignin dolgusunun genel olarak eğilme dirençlerini artırdığı belirlenmiştir. Ancak, sadece %1 ticari lignin eklenen örneğin eğilme direnci, kontrol örneğine göre %11 daha düşüktür. Diğer tüm örneklerde lignin dolgusu eğilme direncinde %7-35 oranında iyileşme sağlamıştır. Eğilme direnci grafiğinde %4 DES lignin ekli örneğin diğerlerinden farklı olduğu görülmektedir; diğer örneklerde lignin oranı arttıkça eğilme direnci artarken, bu örnekte bir düşüş kaydedilmiştir. Genel olarak lignin dolgu maddesinin eğilme dirençlerini artırdığı söylenebilir. Lignin dolgu maddesi farklı fraksiyonlarda ve oranlarda polistiren ile yaptığı bağ yapısının incelenmesi için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Polistiren termoplastik malzemesinin dünyada en fazla kullanılan polimerlerden birisi olduğu düşünüldüğünde lignin gibi doğada en fazla bulunan doğal dolgu maddesi ile güçlendirilmesi oldukça mantıklıdır. Bu konuda aha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.
- %4 lignin ilavesi, örneklerin elastikiyet modüllerinin %18-35 oranında azalmasına neden olmuştur. Ancak, farklı çalışmalarda lignin dolgusunun arttıkça elastikiyet modülünün arttığı belirlenmiştir. Çalışmalar arasında farklı sonuçlara rastlanılmaktadır. Bu farklılıkların sebeplerinin incelenmesi için ayrı bir çalışma yapılması gereklidir.
- Lignin ilavesinin, PU-L2DES hariç, örneklerin çekme dirençlerini düşürdüğü görülmektedir. Ticari lignin ilave edilen PS örneklerinde lignin miktarı arttıkça çekme dirençleri azalmış, ancak DES yöntemi ile elde edilen lignin ilavesinde bu durum gözlemlenmemiştir. %2 DES lignin ilavesi çekme direncini %1 ilaveli olana göre %30 artırmıştır. Ancak lignin ilavesi %4'e çıktığında çekme direnci %2 ilaveli olana göre %14 azalmıştır. Benzer sonuçlar Reza Barzegari (2012) tarafından da rapor edilmiştir; lignin dolgulu polistirende lignin miktarı arttıkça kompozitin daha

kırılgan hale geldiği ve çekme dirençlerinin azaldığı bildirilmiştir. Uyumlaştırıcılar kullanılarak lignin ve PS arasındaki bağ yapısı artırılabilir ve çekme direnci iyileştirilebilir. Lignin ilavesi kompoziti daha esnek yapmıştır, bu da yoğunluk ve çekme direncinde azalmaya neden olmuştur. Genelde elastikiyet modülünün yüksek olması istenirken, burada lignin ilavesi çekmede elastikiyeti artırmıştır. Eğilme dirençlerinde ise lignin ilavesi ile artış görülmüş, ancak eğilmede elastikiyet modülünde aynı artış gözlemlenmemiştir. Polistiren polimerler ile dolgu maddeleri arasındaki bağ yapısının güçlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple bazı uyumlaştırıcılar kullanılabilir.

- %2 ve %4 ticari lignin ilavesi dışında, diğer lignin ilaveleri kopmada uzama miktarını artırmıştır. Çalışmamızda, yalnızca iki örnekte kopmada uzama miktarı azalmış, diğer dört örnekte artmıştır. Lignin dolgu maddesinin oranının artırılması ile kopmada uzama miktarının nasıl değiştiğinin belirlenmesi gerekir.
- Kontrol (PU-C) örneği, en az kalınlık şişme miktarına sahip örnek olmuştur. Lignin ilavesi, PS kompozitinin kalınlık şişme miktarını %0,3'ten %0,8-1,2 arasına çıkarmıştır. PU-2LCML ve PU-4LDES örneklerinde, diğer örneklerle göre daha yüksek standart sapma değerleri gözlemlenmiştir; aynı durum yoğunluklarında da görülmüştür. Lignin, PS kompozitinin daha fazla köpüklenmesine neden olmuş ve bu da yoğunluk ve kalınlık şişme miktarlarında farklılıklara yol açmıştır.
- Kalınlık şişme miktarları istatistiksel olarak incelendiğinde ($P < 0,05$) örnekler arasında anlamlı farklılıklar belirlenmiştir (Tablo 4.2). Ticari lignin ve DES lignini, PS kompozitinin kalınlık şişme miktarını benzer şekilde artırmıştır. Her iki lignin türünde de dolgu miktarı %4'e çıkarıldığında şişme miktarı %1,2'den %0,8'e düşmüştür. Örneklerin şişme miktarlarındaki %0,4'lük fark, kalınlık şişme miktarında ihmal edilebilir düzeydedir. Lignin polistiren polimerler için uygun bir dolgu maddesidir. Kalınlığına şişme miktarını artırmış olsa bile bu artış oldukça düşüktür (% 0,9'dan % 1,2'ye). Bu sebeple lignini polistiren dolgu maddesi olarak önerilir.
- Örneklerin su alma miktarları incelendiğinde, en düşük su alma miktarının PU-2LCML örneğinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.5). Ticari lignin, DES ligninine göre daha az su almıştır. Saf PS kompozitin su alma miktarı %0,309 iken, %1 ticari lignin eklenmesiyle %0,247'ye, %2 ticari lignin eklenmesiyle %0,230'a düşmüş, ancak %4 ticari lignin ilavesiyle %0,412'ye çıkmıştır. Tek yön ANOVA analizi,

örnekler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu göstermiştir. Kalınlık şişme analizine benzer şekilde, örneklerin standart sapma değerleri yüksek çıkmıştır, bu durumun köpüklenen matrisin homojenliğinin bozulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Su alma miktarları incelendiğinde polimer matrisin lignin dolgusu ile iyi bir bağlanma sağladığı söylenebilir. Bu sonuca su alma miktarlarının düşük olması kanıt olarak gösterilebilir. Bu durumda su alma miktarları göz önüne alındığında polistiren polimerlerin lignin dolgu ile güçlendirilmesi önerilir.

- En düşük yoğunluğa sahip örneğin PU-2LCML olduğu görülmüştür. Lignin ilavesi, tüm örneklerde yoğunluğun düşmesine neden olmuştur. Bu durum, lignin ilavesinin PS kompozitini köpüklemesinden kaynaklanmıştır. Ticari lignin ilave edilen örneklerin ortalama yoğunluğu $0,373 \text{ g/cm}^3$, DES lignin ilave edilen örneklerin ortalama yoğunluğu ise $0,401 \text{ g/cm}^3$ olarak tespit edilmiştir. DES lignini, ticari lignine göre %7,5 oranında daha yüksek yoğunluğa neden olmuştur. Yoğunluklar polimer malzemeler için oldukça önemli bir konudur. Havacılık, deniz taşımacılığı ve hatta uzay araştırmalarında hafif ve dayanıklı polimerlerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada da lignin ilavesinin polimerin yoğunluğunu azaltması ve direnç özelliklerini artırması bakımından önemli olduğu düşünülmektedir. Yoğunluklar göz önüne alındığında polistiren polimerlerin lignin ile takviye edilmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- Adamu, Y., Bello, T.K., Shehu, U., Bello, A., Tanimu, G. ve Isa, M.T. (2023). Effect of Jute Nanofibre on the Properties of Waste Polypropylene/Polystyrene/Natural Rubber (wPP/PS/NR) Ter-Polymer Blend. *Research square (Preprint)*: 1–31.
- Adcock, T., Shah, V., Chen, M. ve Meister, J.J. (2003). Graft copolymers of lignin as hydrophobic agents for plastic (wood-filled) composites. *Journal of Applied Polymer Science* 89 (5): 1266–1276.
- Agrawal, A., Kaushik, N. ve Biswas, S. (2014). Derivatives ve applications of lignin—an insight. *The Scitech Journal* 1 (7): 30–36.
- Ahmad, A. ve Ayub, H. (2022). Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Technique for Food Analysis and Authentication. In: *Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables*, 103–142. Springer Nature Singapore, Singapore.
- Ali Shah, T., Zhihe, L., Zhiyu, L. ve Andong, Z. (2023). Composition and Role of Lignin in Biochemicals. In: *Lignin - Chemistry, Structure, and Application*, IntechOpen.
- Almeida Neto, G.R. de, Gonçalves Beatrice, C.A., Leiva, D.R. ve Pessan, L.A. (2021). Polyetherimide-LaNi5 composite films for hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (46): 23767–23778.
- Alqarni, S.A., Hussein, M.A., Ganash, A.A. ve Khan, A. (2020). Composite Material–Based Conducting Polymers for Electrochemical Sensor Applications: a Mini Review. *BioNanoScience* 10 (1): 351–364.
- Amusa, A., Ahmad, A. ve Adewole, J. (2020). Mechanism and Compatibility of Pretreated Lignocellulosic Biomass and Polymeric Mixed Matrix Membranes: A Review. *Membranes* 10 (12): 370.
- Anderson, L., Govindaraj, P., Ang, A., Mirabedini, A. ve Hameed, N. (2021). Modelling, fabrication and characterization of graphene/polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications. *Carbon Trends* 4: 100047.
- ASTM. (2000). *D792-98, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. West Conshohocken.
- ASTM. (2020). *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, Section: 23, ICS Code: 79.040*.
- ASTM. (2022). *D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ICS Code: 83.080.01*.
- Aydemir, D., Ergun, M.E., Gulsoy, S.K., Ozan, Z.E. ve Gunduz, G. (2024). Lignin activated carbon obtained by a environmentally friendly green production process using deep eutectic solvents. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 18 (1): 251–264.

- Aydın, İ. (2004). Çeşitli Ağaç Türlerinden Elde Edilen Kaplamaların Islanabilme Yeteneği ve Yapışma Direnci Üzerine Bazı Üretim Şartlarının Etkileri. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1–300pp.
- Azhar, N.A., Adrus, N., Wan Rahman, W.A. ve A. Majid, R. (2020). Lignin-Coated Polystyrene/Trichloromethylsilane Absorbent for Oil Spill Cleanup. *Sains Malaysiana* 49 (09): 2141–2148.
- Baiardo, M., Zini, E. ve Scandola, M. (2004). Flax fibre–polyester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35 (6): 703–710.
- Bajwa, D.S., Pourhashem, G., Ullah, A.H. ve Bajwa, S.G. (2019). A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. *Industrial Crops and Products* 139: 111526.
- Barzegari, M.R., Alemdar, A., Zhang, Y. ve Rodrigue, D. (2013). Thermal Analysis of Highly Filled Composites of Polystyrene with Lignin. *Polymers and Polymer Composites* 21 (6): 357–366.
- Beşergil, B. (2024). *Seramik Matris Kompozitler, CMC (ceramic matrix composites, CMC)*. [bilsenbesergil.blogspot.com](https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_59.html). Downloaded from https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_59.html on 18 March 2024.
- Chairi, M., El Bahaoui, J., Hanafi, I., Mata Cabrera, F. ve Di Bella, G. (2023). Composite Materials: A Review of Polymer and Metal Matrix Composites, Their Mechanical Characterization, and Mechanical Properties. *In: Next Generation Fiber-Reinforced Composites - New Insights*, IntechOpen.
- Chawla, N. ve Shen, Y.L. (2001). Mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. *Advanced engineering materials* 3 (6): 357–370.
- Chen, N., Liu, W., Huang, J. ve Qiu, X. (2020). Preparation of octopus-like lignin-grafted cationic polyacrylamide flocculant and its application for water flocculation. *International Journal of Biological Macromolecules* 146: 9–17.
- Chung, H. ve Washburn, N.R. (2015). Extraction and types of lignin. O. Faruk & M. Sain (Eds.) *Lignin in polymer composites*, (pp. 13-25) William Andrew Publishing, New York, ABD. .
- Chung, Y.-L., Olsson, J. V., Li, R.J., Frank, C.W., Waymouth, R.M., Billington, S.L. ve Sattely, E.S. (2013). A Renewable Lignin–Lactide Copolymer and Application in Biobased Composites. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 1 (10): 1231–1238.
- Deeraj, B.D.S., George, G., Dhineshababu, N.R., Bose, S. ve Joseph, K. (2021). Electrospun ZrO₂ carbon nanofiber mats and their epoxy composites as effective EMI shields in Ku band. *Materials Research Bulletin* 144: 111477.
- Dehne, L., Vila Babarro, C., Saake, B. ve Schwarz, K.U. (2016). Influence of lignin source and esterification on properties of lignin-polyethylene blends. *Industrial Crops and Products* 86: 320–328.

- Dem RTA, M. ve Vedat, G.Ü.N. (2007). Avrupa ve Türkiye’deki biyokütle enerjisi. *Celal Bayar University Journal of Science* 3 (1): 49–56.
- Devaiah, M., Santhosh Kumar, S., Srihari, T. ve Rajasekharan, T. (2012). SiCp/Al₂O₃ Ceramic Matrix Composites Prepared by Directed Oxidation of an Aluminium Alloy for Wear Resistance Applications. *Transactions of the Indian Ceramic Society* 71 (3): 151–158.
- Dillard DA and Pacius, A. (2002). Adhesion Science and Engineering. In: *Surfaces, Chemistry and Applications*, 1–781. Elsevier, Netherland.
- Dimmel, D. ve Gellerstedt, G. (2009). Chemistry of Alkaline Pulping. C. Heitner, D. Dimmel, J. Schmidt. Lignin and Lignans: Advances in Chemistry (pp.349- 392). CRC Press, Boca Raton, FL. .
- Elias, H. ve Mülhaupt, R. (2015). Plastics, General Survey, 4. Polymer Composites. In: *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 1–17. Wiley.
- El-Morsy, M.A., El-Sharnouby, M., El Askary, A., Awwad, N.S., Ibrahim, H.A., Menazea, A.A. ve El-Morsy, M.A. (2022). Investigation on optical properties and electrical conductivity behavior of Chitosan/PVP/Se NPs NPs composite produced via one-potential laser ablation for optoelectronic applications. *Optical and Quantum Electronics* 54 (10): 661.
- El-Zawawy, W.K., Ibrahim, M.M., Belgacem, M.N. ve Dufresne, A. (2011). Characterization of the effects of lignin and lignin complex particles as filler on a polystyrene film. *Materials Chemistry and Physics* 131 (1–2): 348–357.
- Esakkimuthu, E.S., DeVallance, D., Pylypchuk, I., Moreno, A. ve Sipponen, M.H. (2022). Multifunctional lignin-poly (lactic acid) biocomposites for packaging applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 10.
- Fahlén, J. ve Salmén, L. (2005). Pore and Matrix Distribution in the Fiber Wall Revealed by Atomic Force Microscopy and Image Analysis. *Biomacromolecules* 6 (1): 433–438.
- Farea, M.A., Mohammed, H.Y., Shirsat, S.M., Sayyad, P.W., Ingle, N.N., Al-Gahouari, T., Mahadik, M.M., Bodkhe, G.A. ve Shirsat, M.D. (2021). Hazardous gases sensors based on conducting polymer composites: Review. *Chemical Physics Letters* 776: 138703.
- Fasching, M., Schröder, P., Wollboldt, R.P., Weber, H.K. ve Sixta, H. (2008). A new and facile method for isolation of lignin from wood based on complete wood dissolution. *Hfsg* 62 (1): 15–23.
- Fernández-Blázquez, J.P., Setzer, S. ve del Campo, A. (2013). Nanostructured Polymer Fibers with Enhanced Adhesion to Epoxy Matrices. *Plasma Processes and Polymers* 10 (3): 207–212.
- Fernandez-Costas, C., Gouveia, S., Sanroman, M.A. ve Moldes D. (2014). Kraft lignins from spent cooking liquors: structural and biotechnological application, F. Lu,

(Eds.), . .

- Gaabour, L.H. (2021). Effect of addition of TiO₂ nanoparticles on structural and dielectric properties of polystyrene/polyvinyl chloride polymer blend. *AIP Advances* 11 (10).
- Gao, G., Dallmeyer, J.I. ve Kadla, J.F. (2012). Synthesis of Lignin Nanofibers with Ionic-Responsive Shells: Water-Expandable Lignin-Based Nanofibrous Mats. *Biomacromolecules* 13 (11): 3602–3610.
- Ghani, A., Ashaari, Z., Bawon, P. ve Lee, S.H. (2018). Reducing formaldehyde emission of urea formaldehyde-bonded particleboard by addition of amines as formaldehyde scavenger. *Building and Environment* 142: 188–194.
- Ghavidel, N. ve Fatehi, P. (2019). Synergistic effect of lignin incorporation into polystyrene for producing sustainable superadsorbent. *RSC Advances* 9 (31): 17639–17652.
- Goliszek, M., Podkościelna, B., Sevastyanova, O., Gawdzik, B. ve Chabros, A. (2019). The Influence of Lignin Diversity on the Structural and Thermal Properties of Polymeric Microspheres Derived from Lignin, Styrene, and/or Divinylbenzene. *Materials* 12 (18): 2847.
- Gong, K., Zhou, K., Qian, X., Shi, C. ve Yu, B. (2021). MXene as emerging nanofillers for high-performance polymer composites: A review. *Composites Part B: Engineering* 217: 108867.
- González Sánchez, C. ve Alvarez, L.E. (1999). Micromechanics of lignin/polypropylene composites suitable for industrial applications. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* 272 (1): 65–70.
- Gosselin, R., Rodrigue, D. ve Riedl, B. (2006). Injection Molding of Postconsumer Wood–Plastic Composites II: Mechanical Properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 19 (6): 659–669.
- Gülbeyaz, F. (2024). *Seramik Matrisli Kompozitler*. <https://malzemebilimi.net/seramik-matrisli-kompozitler.html>. .
- Gupta, R., Noraziah, A., Gupta, A. ve Abdalla, A.N. (2017). Overview of Simulation in Wood Plastic Composites Manufacturing. *Indian Journal of Science and Technology* 10 (7): 1–5.
- Haghdan, S. ve Smith, G.D. (2015). Natural fiber reinforced polyester composites: A literature review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 34 (14): 1179–1190.
- Hall, S.E., Centeno, V., Favela, S., Lopez, A., Gallardo, A., Pellicotte, J., Torres, Y., Coverdell, D., Torres, S., Choudhuri, A., Lin, Y. ve Hassan, M.S. (2022). Mechanical Properties of High-Temperature Fiber-Reinforced Thermoset Composites with Plain Weave and Unidirectional Carbon Fiber Fillers. *Journal of Composites Science* 6 (7): 213.

- Han, Q., Liu, S., Liu, Y., Jin, J., Li, D., Cheng, S. ve Xiong, Y. (2020). Flexible counter electrodes with a composite carbon/metal nanowire/polymer structure for use in dye-sensitized solar cells. *Solar Energy* 208: 469–479.
- Harnby N, Edwards MF and Nienow AW. (1992). *Mixing in the Process Industries*. In Dekker, M. (ed.) oxford, .
- Hiremath, N., Young, S., Ghossein, H., Penumadu, D., Vaidya, U. ve Theodore, M. (2020). Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications. *Composites Part B: Engineering* 198: 108156.
- Holladay, J.E., White, J.F., Bozell, J.J. ve Johnson, D. (2007). *Top value-added 224 chemicals from biomass, Vol. II—results of screening for potential candidates from biorefinery lignin*. U.S. Department of Energy, Washington DC. .
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M. ve Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite Structures* 262: 113640.
- Iram, A., Berenjian, A. ve Demirci, A. (2021). A Review on the Utilization of Lignin as a Fermentation Substrate to Produce Lignin-Modifying Enzymes and Other Value-Added Products. *Molecules* 26 (10): 2960.
- Jabbari, E. ve Peppas, N.A. (1994). Polymer-Polymer Interdiffusion and Adhesion. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews* 34 (2): 205–241.
- Joseph, P. (1999). Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Science and Technology* 59 (11): 1625–1640.
- Kai, D., Tan, M., Chee, P.L., Chua, Y.K., Yap, Y.L. ve Loh, X.J. (2016). Towards lignin-based functional materials in a sustainable world. *Green Chemistry* 18 (5): 1175–1200.
- Karabulut, G. ve Yemiş, O. (2019). Fenolik Bileşiklerin Bağlı Formları ve Biyoyararlılığı. *Akademik Gıda* 17 (4): 526–537.
- Karakuş, K., Şeker, B., Kılıç, İ., Ciobanu, R.C. ve Mengeloğlu, F.L. (2011). Lignoselülozik Esaslı Atıkların Termoplastik Kompozit Üretiminde Değerlendirilmesi. *I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*: 645–650.
- Kılıç, A., Sariusta, S.E. ve Hafızoglu, H. (2010). Sarıçam, Karaçam ve Kızılçam basınç odununun kimyasal yapısı. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi* 12 (18): 33–39.
- Kocaturk, E., Salan, T., Ozcelik, O., Alma, M.H. ve Candan, Z. (2023). Recent Advances in Lignin-Based Biofuel Production. *Energies* 16 (8): 3382.
- Kord, B., Movahedi, F., Adlnasab, L. ve Ayrilmis, N. (2022). Effect of novel scavengers based on phenolic compounds on formaldehyde emission and physical-mechanical properties of particleboard. *Wood Material Science & Engineering* 17 (6): 954–964.

- Krishnakumar, S. ve Senthilvelan, T. (2021). Polymer composites in dentistry and orthopedic applications-a review. *Materials Today: Proceedings* 46: 9707–9713.
- Kubo, S. ve Kadla, J.F. (2004). Poly(Ethylene Oxide)/Organosolv Lignin Blends: Relationship between Thermal Properties, Chemical Structure, and Blend Behavior. *Macromolecules* 37 (18): 6904–6911.
- Kumar, A., Anushree, Kumar, J. ve Bhaskar, T. (2020)a. Utilization of lignin: A sustainable and eco-friendly approach. *Journal of the Energy Institute* 93 (1): 235–271.
- Kumar, D., Moharana, A. ve Kumar, A. (2020)b. Current trends in spinel based modified polymer composite materials for electromagnetic shielding. *Materials Today Chemistry* 17: 100346.
- Kun, D. ve Pukánszky, B. (2017). Polymer/lignin blends: Interactions, properties, applications. *European Polymer Journal* 93: 618–641.
- Lebedeva, O. V. ve Sipkina, E.I. (2022). Polymer composites and their properties. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology* 12 (2): 192–207.
- Lee, D.W. ve Yoo, B.R. (2016). Advanced silica/polymer composites: Materials and applications. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 38: 1–12.
- Li, H., Pang, Z., Gao, P. ve Wang, L. (2015). Fe(iii)-catalyzed grafting copolymerization of lignin with styrene and methyl methacrylate through AGET ATRP using triphenyl phosphine as a ligand. *RSC Advances* 5 (67): 54387–54394.
- Li, J. (2011). Isolation of lignin from wood. Bachelor's Thesis, Saimaa University of Applied Sciences, Imatra Unit of Technology, Degree Programme in Paper Technology, Finlandiya. .pp.
- Li, Y., Mai, Y.-W. ve Ye, L. (2000). Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology* 60 (11): 2037–2055.
- Linden, A. (2002). Recycling of polystyrene. .
- Lisperguer, J., Nunez, C. ve Perez-Guerrero, P. (2013). Structure And Thermal Properties of Maleated Lignin-Recycled Polystyrene Composites. *Journal of the Chilean Chemical Society* 58 (4): 1937–1940.
- Lopes, R. ve Botaro, V.R. (2014). An example of sustainability: use of recycled polystyrene for treating wood of Pinus sp. ve Eucalyptus sp. *Journal of the Indian Academy of Wood Science* 11 (2): 100–108.
- López, M., Huerta-Pujol, O., Martínez-Farré, F.X. ve Soliva, M. (2010). Approaching compost stability from Klason lignin modified method: Chemical stability degree for OM and N quality assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 55 (2): 171–181.
- Luo, H. ve Abu-Omar, M.M. (2017). Chemicals From Lignin. In: *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 573–585. Elsevier.

- Mahalingam, S., Matharu, R., Homer-Vanniasinkam, S. ve Edirisinghe, M. (2020). Current methodologies and approaches for the formation of core–sheath polymer fibers for biomedical applications. *Applied Physics Reviews* 7 (4).
- Maruthi, N., Faisal, M. ve Raghavendra, N. (2021). Conducting polymer based composites as efficient EMI shielding materials: A comprehensive review and future prospects. *Synthetic Metals* 272: 116664.
- Masri, T., Ounis, H., Benchabane, A. ve Sedira, L. (2019). Effect of Lignin on the Mechanical Properties of a Composite Material Based on Date Palm Leaflets and Expanded Polystyrene Wastes. *TECNICA ITALIANA-Italian Journal of Engineering Science* 63 (2–4): 393–396.
- Masri, T., Ounis, H., Sedira, L., Kaci, A. ve Benchabane, A. (2018). Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes. *Construction and Building Materials* 164: 410–418.
- Melro, E., Filipe, A., Sousa, D., Medronho, B. ve Romano, A. (2021). Revisiting lignin: a tour through its structural features, characterization methods and applications. *New Journal of Chemistry* 45 (16): 6986–7013.
- Mitchell, B. (2004). The structure of Materials. In: *An Introduction to Materials Engineering and Science: For Chemical and Materials Engineering*, 1–907. John Wiley and Sons Inc., USA.
- Mohammed, L., Ansari, M.N.M., Pua, G., Jawaid, M. ve Islam, M.S. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. *International Journal of Polymer Science* 2015: 1–15.
- Mohandesnezhad, S., Etminanfar, M., Mahdavi, S. ve Safavi, M.S. (2022). Enhanced bioactivity of 316L stainless steel with deposition of polypyrrole/hydroxyapatite layered hybrid coating: Orthopedic applications. *Surfaces and Interfaces* 28: 101604.
- Movahedi, F., Adlnasab, L. ve Ayilimis, N. (2021). Decreasing Formaldehyde Emission from Particleboard Panels Fabricated by Adding Newly Phenolic Compounds as a Scavenger to Urea Formaldehyde Resin. *Research square-preprint*.
- Muhammad, A., Rahman, Md.R., Bains, R. ve Bin Bakri, M.K. (2021). Applications of sustainable polymer composites in automobile and aerospace industry. In: *Advances in Sustainable Polymer Composites*, 185–207. Elsevier.
- Musivand, S., Bracciale, M.P., Damizia, M., De Filippis, P. ve de Caprariis, B. (2023). Viable Recycling of Polystyrene via Hydrothermal Liquefaction and Pyrolysis. *Energies* 16 (13): 4917.
- Nikolic, M., Lawther, J.M. ve Sanadi, A.R. (2015). Use of nanofillers in wood coatings: a scientific review. *Journal of Coatings Technology and Research* 12 (3): 445–461.
- Niska, K.O. ve Sanadi, A.R. (2008). Interactions between wood and synthetic polymers. In: *Wood–Polymer Composites*, 41–71. Elsevier.

- Nurul Farhana Roszaini and Othman, S.A. (2023). The Investigation of General Properties of Carbon Fiber (CF) Composites - Preliminary Study. *Journal of Applied Science & Process Engineering* 10 (1): 59–65.
- Oksman, K. ve Clemons, C. (1998). Mechanical properties and morphology of impact modified Polypropylene-wood flour composites. *Journal of Applied Polymer Science* 67: 1503–1513.
- Oksman, K. ve Bengtsson, M. (2007). Wood Fiber Thermoplastic Composites: Processing, Properties, and Future Developments. In: *Handbook of Engineering Biopolymers*, 655–671. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München.
- Olgun, Ç. (2019). Farklı lignin yapılarına sahip hammaddelerden lignin esaslı karbon lifi üretimi. Doktora tezi, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, 1–246pp.
- Pang, X. ve Zhitomirsky, I. (2005). Electrodeposition of nanocomposite organic–inorganic coatings for biomedical applications. *International Journal of Nanoscience* 04 (03): 409–418.
- Pérez-Guerrero, P., Lisperguer, J., Navarrete, J. ve Rodrigue, D. (2014). Effect of Modified Eucalyptus nitens Lignin on the Morphology and Thermo-mechanical Properties of Recycled Polystyrene. *BioResources* 9 (4).
- Phillips, R.B., Brown, W. ve Stannett, V.T. (1972). The graft copolymerization of styrene and lignin. II. Kraft softwood lignin. *Journal of Applied Polymer Science* 16 (1): 1–14.
- Pizzi, A. ve Mittal, K.L. (2017). *Handbook of adhesive technology*. CRC press. CRC press, .
- Prachi Patel, special to C. (2022). Cheap catalysts recycle polystyrene into valuable products. *C&EN Global Enterprise* 100 (13): 9–9.
- Pulci, G., Tirillò, J., Marra, F., Fossati, F., Bartuli, C. ve Valente, T. (2010). Carbon–phenolic ablative materials for re-entry space vehicles: Manufacturing and properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41 (10): 1483–1490.
- Ray, S. ve Easteal, A.J. (2007). Advances in Polymer-Filler Composites: Macro to Nano. *Materials and Manufacturing Processes* 22 (6): 741–749.
- Reza Barzegari, M., Alemdar, A., Zhang, Y. ve Rodrigue, D. (2012)a. Mechanical and rheological behavior of highly filled polystyrene with lignin. *Polymer Composites* 33 (3): 353–361.
- Reza Barzegari, M., Alemdar, A., Zhang, Y. ve Rodrigue, D. (2012)b. Mechanical and rheological behavior of highly filled polystyrene with lignin. *Polymer Composites* 33 (3): 353–361.
- Rivière, L., Caussé, N., Lonjon, A., Dantras, É. ve Lacabanne, C. (2016). Specific heat capacity and thermal conductivity of PEEK/Ag nanoparticles composites

determined by Modulated-Temperature Differential Scanning Calorimetry. *Polymer Degradation and Stability* 127: 98–104.

- Roopan, S.M. (2017). An overview of natural renewable bio-polymer lignin towards nano and biotechnological applications. *International Journal of Biological Macromolecules* 103: 508–514.
- Rozman, H.D., Tan, K.W., Kumar, R.N., Abubakar, A., Mohd. Ishak, Z.A. ve Ismail, H. (2000). The effect of lignin as a compatibilizer on the physical properties of coconut fiber–polypropylene composites. *European Polymer Journal* 36 (7): 1483–1494.
- Ruckenstein, E. (1969). The wetting of a solid surface by a liquid. *Chemical Engineering Science* 24 (8): 1223–1226.
- Rukmanikrishnan, B., Kim, S.S. ve Lee, J. (2020). Flexible and compatible polymer composite blends based on polyurethane/sodium ionomer/lignin and their properties. *Journal of Applied Polymer Science* 137 (29).
- Rumpf, J., Do, X.T., Burger, R., Monakhova, Y. ve Schulze, M. (2021). Types of lignin, properties, and structural characterization techniques. In: *Lignin-Based Materials for Biomedical Applications*, 105–158. Elsevier.
- Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O.Y. ve Paridah, M.T. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials* 106: 149–159.
- Safavi, M.S., Surmeneva, M.A., Surmenev, R.A. ve Khalil-Allafi, J. (2021)a. RF-magnetron sputter deposited hydroxyapatite-based composite & multilayer coatings: A systematic review from mechanical, corrosion, and biological points of view. *Ceramics International* 47 (3): 3031–3053.
- Safavi, M.S., Walsh, F.C., Visai, L. ve Khalil-Allafi, J. (2022). Progress in Niobium Oxide-Containing Coatings for Biomedical Applications: A Critical Review. *ACS Omega* 7 (11): 9088–9107.
- Safavi, M.S., Walsh, F.C., Surmeneva, M.A., Surmenev, R.A. ve Khalil-Allafi, J. (2021)b. Electrodeposited Hydroxyapatite-Based Biocoatings: Recent Progress and Future Challenges. *Coatings* 11 (1): 110.
- Sand, A. ve Tuteja, J. (2023). *Lignin - Chemistry, Structure, and Application*. In Sand, A. ve Tuteja, J. (eds.) IntechOpen, .
- Schorr, D., Rodrigue, D., Niokhor Diouf, P. ve Stevanovic, T. (2014). Recycled Polystyrene Composites Reinforced With Esterified and Non-Esterified Kraft Lignins. *Journal of Materials Science Research* 4 (1).
- Šerifi, V., Tarić, M., Jevtić, D., Ristovski, A. ve Isović, M.Š. (2018). Historical development of composite materials. The Annals of the University of Oradea. Econ. Sci, 1-8. *Econ. Sci, 1-8.*: 1–8.

- Shen, T., Li, M., Zhang, B., Zhong, L., Lin, X., Yang, P., Li, M., Zhuang, W., Zhu, C. ve Ying, H. (2022). Enhanced Mechanical Properties of Polyvinyl Chloride-Based Wood-Plastic Composites With Pretreated Corn Stalk. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 9.
- Sun, Y., Ma, Y., Fang, G., Li, S. ve Fu, Y. (2016). Synthesis of acid hydrolysis lignin-g-poly-(acrylic acid) hydrogel superabsorbent composites and adsorption of lead ions. *Bioresource* 11 (3): 5731–5742.
- Suzuki, S., Leinfelder, K.F., Kawai, K. ve Tsuchitani, Y. (1995). Effect of particle variation on wear rates of posterior composites. *American journal of dentistry* 8 (4): 173–178.
- Szymczyk-Ziółkowska, P., Łabowska, M.B., Detyna, J., Michalak, I. ve Gruber, P. (2020). A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques. *Biocybernetics and Biomedical Engineering* 40 (2): 624–638.
- Tadini, P., Grange, N., Chetehouna, K., Gascoin, N., Senave, S. ve Reynaud, I. (2017). Thermal degradation analysis of innovative PEKK-based carbon composites for high-temperature aeronautical components. *Aerospace Science and Technology* 65: 106–116.
- Tezcan, E. (2016). Delignifikasyon İçin Yeni Bir Teknoloji Geliştirilmesi. Doctoral Dissertation, , İTÜ , 1–97pp.
- Tran, H. ve Vakkilainen, E.K. (2008). *The kraft chemical recovery process. Tappi Kraft Pulp Short Course*, 1-8. .
- TSE EN 317. (1999). *Yonga levhalar ve lif levhalar-Su içerisine daldırma işleminden sonra kalınlığına şişme tayini. Türk standartları enstitüsü, Ankara.* Ankara, .
- Tserki, V., Zafeiropoulos, N.E., Simon, F. ve Panayiotou, C. (2005). A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36 (8): 1110–1118.
- Türkmen, M. (2019). Wood waste recycling for the production of wood polymer composites .Master thesis, Izmir Katip Celebi Universitypp.
- Ural, N. (2021). The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. *Open Geosciences* 13 (1): 197–218.
- Villegas-Camacho, O., Alejo-Eleuterio, R., Francisco-Valencia, I., Granda-Gutiérrez, E., Martínez-Gallegos, S. ve Illescas, J. (2024). FTIR-Plastics: A Fourier Transform Infrared Spectroscopy dataset for the six most prevalent industrial plastic polymers. *Data in Brief* 55: 110612.
- Wambua, P., Ivens, J. ve Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology* 63 (9): 1259–1264.

- Wang, P., Li, M., Zhang, J., Dong, L. ve Lu, H. (2020). High-yield water-phase exfoliated few-defect graphene for high performance polymer nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science* 137 (48).
- Wang, S., Wang, K., Liu, Q., Gu, Y., Luo, Z., Cen, K. ve Fransson, T. (2009). Comparison of the pyrolysis behavior of lignins from different tree species. *Biotechnology Advances* 27 (5): 562–567.
- Wang, Y., Liu, Q., Yan, L., Gao, Y., Wang, Y. ve Wang, W. (2013). A novel lignin degradation bacterial consortium for efficient pulping. *Bioresource Technology* 139: 113–119.
- Washburn, N.R. ve Chung, H. (2018). Lignin-containing polymers and compositions including lignin-containing polymers. .
- Wegener, G. ve Stoll, M. (1976). Eine schnelle Isolierung von Milled Wood Lignin mit Hilfe von Ultraschall. *Cellulose chemistry and technology*. 10:611–616. 10: 611–616.
- Wu, C., Xu, F., Wang, H., Liu, H., Yan, F. ve Ma, C. (2023). Manufacturing Technologies of Polymer Composites—A Review. *Polymers* 15 (3): 712.
- Xiao, Y., Wang, N. ve Zhang, Z. (2023). Research progress on the isolation and purification of ligninase. *Journal of Computing and Electronic Information Management* 10 (1): 54–56.
- Yu, X. ve Manthiram, A. (2021). A review of composite polymer-ceramic electrolytes for lithium batteries. *Energy Storage Materials* 34: 282–300.
- Zafar, M.F. ve Siddiqui, M.A. (2019). Mechanical Characterization of the Natural Fiber Reinforced Polystyrene Composite. *Materials Science Forum* 969: 152–156.
- Zhang, Z., Mulyadi, A., Kuang, X., Liu, W., Li, V., Gogoi, P., Liu, X. ve Deng, Y. (2019). Lignin-polystyrene composite foams through high internal phase emulsion polymerization. *Polymer Engineering & Science* 59 (5): 964–972.
- Zor, M., Şen, F., Yazıcı, H. ve Candan, Z. (2023). Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Cellulose/Lignin Nanocomposites. *Forests* 14 (9): 1715.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : .

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller :

Bilimsel Faaliyet/Yayınlar :

Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :

Projeler ve Kurs Belgeleri :

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih :