

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİYO-REÇİNE ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERİNİN PERFORMANS
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Semih ÖZKÜR

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BİYO-REÇİNE ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERİNİN PERFORMANS
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Semih ÖZKÜR
503171820**

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Tekstil Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi İpek YALÇIN ENİŞ

HAZİRAN 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503171820 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Semih ÖZKÜR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BİYO-REÇİNE ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERİNİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi İpek YALÇIN ENİŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ömer Berk BERKALP**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem SELVER
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Teslim Tarihi : 09 Haziran 2021
Savunma Tarihi : 25 Haziran 2021





Aileme ve sevdiklerime,



ÖNSÖZ

Öncelikle, yüksek lisans eğitimine başlamaya teşvik eden, bu sürecin her aşamasında yol gösteren ve bu sürecin belki de en zor kısmı olan tez aşamasındaki titiz, nitelikli ve bir o kadar kolaylaştırıcı rehberliği için danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İpek YALÇIN ENİŞ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm bu süreçler boyunca ihtiyaç duyduğum her an bilgisini ve desteğini cömertçe sunan Öğr. Gör. Dr. Hande SEZGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimine başladığım andan itibaren bu sürecin her aşamasında maddi manevi her türlü desteği ile bu süreci kolaylaştıran Esen ÖZDEMİR'e teşekkürü borç bilirim.

Bu süreçte ve hayat boyu daima yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım kapsamında Erasmus Öğrenci Hareketliliği Programı ile Slovenya, Ljubljana Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Tekstil ve Konfeksiyon Mühendisliği Bölümü'nde geçirdiğim süre boyunca akademik danışmanlığımı üstlenen ve çalışmalarım için bölümün laboratuvar altyapısını kullanmamı sağlayan Prof. Dr. Andrej Demsar ile laboratuvar çalışmalarına destek veren Mirjam LESKOVŠEK'e ve Barbara GOLJA'ya teşekkür ederim.

Çalışmamın bir kısmını yurtdışında bir üniversitede gerçekleştirerek yeni şeyler öğrenmemi ve farklı bir perspektif kazanmama katkı sağlayan Erasmus sürecini mümkün kılan ve bu sürece finansal destek sağlayan Erasmus Öğrenci Hareketliliği Programı'na teşekkür ederim.

Başta Dekanımız Prof. Dr. Ömer Berk BERKALP olmak üzere tüm İTÜ Tekstil Teknolojileri ve Tasarımı Fakültesi yönetimine Erasmus Programı'nın sunduğu fırsatları değerlendirebilmeme olanak tanıdıkları ve yüksek lisans eğitimime verdikleri destekler için teşekkürlerimi sunarım.

Jüri üyelerim Prof. Dr. Ömer Berk BERKALP ve Doç. Dr. Erdem SELVER'e vakit ayırıp jürimde yer almayı kabul ettikleri ve bakış açıları ile teze sundukları katkı dolayısıyla teşekkür ederim.

Son olarak, tüm yüksek lisans eğitimim boyunca ders aldığım hocalarıma ve bu süreci benim için kolaylaştıran çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tez kapsamında yer alan araştırmalar, İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP; Proje no: 40598) tarafından desteklenmiştir. Bu katkılarından ötürü İTÜ BAP birimine teşekkür ederim.

Haziran 2021

Semih ÖZKÜR
(Tekstil Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT YAPILAR.....	5
2.1 Kompozit Malzemeleri.....	5
2.1.1 Matris malzemeleri	5
2.1.2 Takviye malzemeleri.....	9
2.2 Kompozit Üretim Teknikleri.....	12
3. BİYO-KOMPOZİTLER.....	17
4. MEVCUT ÇALIŞMALAR.....	23
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	33
5.1 Malzeme	33
5.2 Metot	34
5.2.1 Kompozit malzeme tasarımı ve üretimi	34
5.2.2 Performans analizleri	37
5.2.2.1 Fiziksel analizler	37
5.2.2.2 Mekanik analizler.....	38
5.2.2.3 Enstrümantal analizler.....	40
5.2.2.4 Morfolojik analizler	42
5.2.2.5 İstatistiksel analiz	43
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
6.1 Değişen AESO Reçine Oranının Biyo-kompozitin Nihai Özellikleri Üzerindeki Etkisine Dair Sonuçlar.....	45
6.1.1 Fiziksel analizler	45
6.1.1.1 Yoğunluk ve elyaf ağırlık oranı	45
6.1.1.2 Su emme testi	46
6.1.2 Mekanik analizler.....	48
6.1.2.1 Charpy darbe testi	48
6.1.2.2 Düşen ağırlık darbe testi.....	49
6.1.2.3 Çekme mukavemeti testi	51
6.1.2.4 Üç nokta eğilme testi.....	54
6.1.3 Enstrümantal analizler.....	55
6.1.3.1 DSC analizi	55
6.1.3.2 FTIR analizi	56
6.1.4 Morfolojik analizler	58

6.2 Seçilen AESO Reçine Oranları İle Üretim ve Kür Sıcaklıklarının Biyo-kompozitin Nihai Özellikleri Üzerindeki Etkisine Dair Sonuçlar.....	59
6.2.1 Fiziksel analizler	59
6.2.1.1 Yoğunluk ve elyaf ağırlık oranı	59
6.2.1.2 Su emme testi	60
6.2.1.3 Su temas açısı testi	62
6.2.2 Mekanik analizler	64
6.2.2.1 Düşen ağırlık darbe testi.....	64
6.2.2.2 Charpy darbe testi.....	67
6.2.2.3 Üç nokta eğilme testi.....	68
6.2.2.4 Çekme mukavemeti testi	69
6.2.3 Enstrümantal analizler	71
6.2.3.1 DMA analizi	71
6.2.3.2 DSC analizi	79
6.2.4 Morfolojik Analizler	81
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	99

KISALTMALAR

1-IM	: 1-metil İmidazol
AESO	: Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasülyesi Yağı
AESO-15ST-4D-VAC	: Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasülyesi Yağı, %15 Stiren ve 4 Kat Denim Kumaştan Oluşan Vakum İnfüzyon ile Üretilmiş Kompozit
AESO-15ST-COM	: Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasülyesi Yağı ve %15 Stiren'den Oluşan Basınçlı Kalıplama ile Üretilmiş Kompozit
AESO-30ST- 4D-VAC	: Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasülyesi Yağı, %30 Stiren ve 4 Kat Denim Kumaştan Oluşan Vakum İnfüzyon ile Üretilmiş Kompozit
AESO-30ST-3D1J-RTM	: Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasülyesi Yağı, %30 Stiren, 3 Kat Denim ve 1 Kat Jüt Kumaştan Oluşan Reçine Transfer Kalıplama ile Üretilmiş Kompozit
AESO-30ST-4D-COM	: Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasülyesi Yağı, %30 Stiren, 4 Kat Denim Kumaştan Oluşan Basınçlı Kalıplama ile Üretilmiş Kompozit
AESO-4D-COM	: Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasülyesi Yağı ve 4 Kat Denim Kumaştan Oluşan Basınçlı Kalıplama ile Üretilmiş Kompozit
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
BF	: Bambu Lifi
BMC	: Sıcak Pres Kalıplama Hamuru
CNC	: Sayısal Kontrollü Freze Tezgahı
COM	: Basınçlı Kalıplama
DETA	: Dietilentriamin
DGEBA	: Bisfenol-A diglisidil Eter
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
DMTA	: Dinamik Mekanik Termal Analiz
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
E_a	: Absorbe Edilen Enerji
E_i	: Darbe Enerjisi
ELV	: Ömrünü Tamamlamış Araç

EMI	: 2-etil-4-metilimidazol
EPOXY-3D1J-RTM	: Epoksi, 3 Kat Denim ve 1 Kat Jüt Kumaştan Oluşan Reçine Transfer Kalıplama ile Üretilmiş Kompozit
EPOXY-4D-HND	: Epoksi ve 4 Kat Denim Kumaştan Oluşan El Yatırma ile Üretilmiş Kompozit
EPOXY-4D-VAC	: Epoksi ve 4 Kat Denim Kumaştan Oluşan Vakum İnfüzyon ile Üretilmiş Kompozit
ES	: Ethylene-Propylene Side by Side
ESO	: Epoksitlenmiş Soya Fasulyesi Yağı
FTIR	: Fourier-Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
GTMA	: Gliseril Trimetakrilat
GTMA-20	: Ağırlıkça %20 Gliseril Trimetakrilat
GTMA-30	: Ağırlıkça %30 Gliseril Trimetakrilat
GTMA-40	: Ağırlıkça %40 Gliseril Trimetakrilat
H5SP10	: %10 Sisal Parçacık ve %5 Sertleştirici İçeren Kompozit
HF	: Kenevir Lifi
HND	: El Yatırma
IDT	: Bozunma Başlangıç Sıcaklığı
LFRC	: Liyosel Elyaf Takviyeli Kompozitler
MAA	: Metakrilik Anhidrit
MCC	: Mikro Kristalin Selüloz
MHHPA	: Metilheksahidroftalik Anhidrit
MI	: Metakrilat İzosorbit
MI-AESO	: Metakrilat İzosorbit İçeren Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasulyesi Yağı
MI-MAESO	: Metakrilat İzosorbit İçeren Metakrilatlı Epoksitlenmiş Soya Fasulyesi Yağı
MTHPA	: Metiltetrahidroftalik Anhidrit
MVA	: Metakrilat Vanilil Alkolü
MVA-AESO	: Metakrilat Vanilil Alkollü Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasulyesi Yağı
MVA-MAESO	: Yüksek Doymamışlıkta Metakrilat Vanilil Alkollü Akrilatlanmış Epoksitlenmiş Soya Fasulyesi Yağı
PET	: Polietilen Tereftalat
PLA	: Polilaktik Asit
PVA	: Polivinil Alkol

rPET-B-P-ES	: Polyester, Bambu, Polietilen Tereftalat ve Ethylene-Propylene Side By Side Liflerinin İğneleme Yöntemi ile Oluşturulmuş Dokusuz Yüzeyleri
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
SCRIMP	: Seemann Kompozit Reçine İnfüzyon Kalıplama İşlemi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
SMC	: Sac Kalıplama Hamuru
SOPERMA	: Soya Fasulyesi Yağı Pentaeritritol Gliserid Maleatlar
SRIM	: Yapısal Tepkimeli Enjeksiyon Kalıplama
SS	: Standart Sapma
Styrene-30	: Ağırlıkça %30 Stiren
TA	: Temas Açısı
TBPB	: Tert-butyl Peroksi Benzoat
TETA	: Trietilentetramin
T_g	: Camısı Geçiş Sıcaklığı
TGA	: Termogravimetrik Analiz
T_{max}	: Bozunma Bitiş Sıcaklığı
VAC	: Vakum İnfüzyon
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
VE	: Vinil Ester
VFRC	: Viskon Elyaf Takviyeli Kompozitler



SEMBOLLER

μ	: Viskozite
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat
$\text{C}=\text{C}$	: Karbon-Karbon Çift Bağı
d	: Yoğunluk
GPa	: Gigapaskal
Hz	: Hertz
J	: Jul
kJ	: Kilo Jul
MPa	: Megapaskal
mPa.s	: Milipaskal saniye
p	: Güven Aralığı
w_d	: Kuru Ağırlık
w_w	: Islak Ağırlık
$\sim$	: Yaklaşık



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Üretim prosesi seçim kriterleri (maliyet kategorisi, üretim ekipmanı tam kapasitede çalışırken gösterilir) (Mazumdar, 2002).....	14
Çizelge 3.1 : Doğal ve sentetik polimerlerin sınıflandırılması (John ve Thomas, 2008).....	18
Çizelge 5.1 : Jüt kumaş özellikleri	33
Çizelge 5.2 : Artan AESO reçine oranına göre üretilen biyo-kompozit numunelerine ait numune kodları ve tasarım bileşenleri.....	35
Çizelge 5.3 : Üretim ve kür sıcaklıklarına göre üretilen biyo-kompozit numunelerine ait numune kodları ve tasarım bileşenleri	36
Çizelge 6.1 : Biyo-kompozit numunelerin elyaf ağırlık oranları	45
Çizelge 6.2 : Biyo-kompozit numunelerin su emme oranları ve test sonrası numune görselleri.....	47
Çizelge 6.3 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi sonuçları	49
Çizelge 6.4 : Biyo-kompozit numunelerin yoğunlukları ve elyaf ağırlık oranları	60
Çizelge 6.5 : Biyo-kompozit numunelerin su emme testi sonuçları.....	61
Çizelge 6.6 : Biyo-kompozit numunelerin su emme testi sonrası görselleri.....	62
Çizelge 6.7 : Biyo-kompozit numunelerin su temas açısı testi sonuçları.....	62
Çizelge 6.8 : Biyo-kompozit numunelerin kayıp modülü ve tan delta eğrilerinden elde edilen T_g değerleri.....	75



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kompozit malzeme üretim yöntemleri (Mazumdar, 2002).....	13
Şekil 3.1 : Biyo-kompozitlerin sınıflandırılması (Mohanty ve diğ, 2005).....	18
Şekil 5.1 : AESO, epoksi, sertleştirici ve jüt kumaş.....	33
Şekil 5.2 : Seemann kompozit reçine infüzyon kalıplama yöntemi.....	34
Şekil 5.3 : İklimlendirme fırını.....	35
Şekil 5.4 : Sayısal kontrollü freze tezgahı ve test numune görseli.....	36
Şekil 5.5 : Yoğunluk ölçüm cihazı	37
Şekil 5.6 : (a)Su emme testi, (b)Su temas açısı testi	38
Şekil 5.7 : (a)Düşen ağırlık darbe testi, (b)Charpy darbe testi.....	39
Şekil 5.8 : (a)Çekme mukavemeti testi, (b)Üç nokta eğilme testi.....	40
Şekil 5.9 : Dinamik mekanik analiz cihazı.....	41
Şekil 5.10 : Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı.....	41
Şekil 5.11 : Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopi.....	42
Şekil 5.12 : Taramalı elektron mikroskobu	42
Şekil 6.1 : Biyo-kompozit numunelerin Charpy darbe test sonuçları	48
Şekil 6.2 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi kuvvet-zaman eğrileri.....	50
Şekil 6.3 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi enerji-zaman eğrileri.....	50
Şekil 6.4 : Düşen ağırlık darbe testi sonucunda biyo-kompozit numunelerinde oluşan hasar görselleri	51
Şekil 6.5 : Biyo-kompozit numunelerin çekme testi sonuçları.....	52
Şekil 6.6 : Biyo-kompozit numunelerin kopma uzaması sonuçları.....	53
Şekil 6.7 : 0BIO, 30BIO, 60BIO ve 90BIO numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	53
Şekil 6.8 : Biyo-kompozit numunelerin eğilme mukavemeti sonuçları.....	54
Şekil 6.9 : Biyo-kompozit numunelerin eğilmegerilimi-uzama eğrileri	55
Şekil 6.10 : 0BIO, 50BIO ve 100BIO numunelerin DSC eğrileri.....	55
Şekil 6.11 : AESO reçinesinin FTIR analizleri	56
Şekil 6.12 : Epoksi reçinenin FTIR analizleri.....	57
Şekil 6.13 : Jüt kumaşın FTIR analizleri.....	57
Şekil 6.14 : (a)100BIO (75x), (b)0BIO (75x), (c)100BIO (500x) ve (d)0BIO (500x) numunelerinin SEM görselleri.....	58
Şekil 6.15 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe dayanımı test sonuçları.....	65
Şekil 6.16 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi enerji-zaman eğrileri.....	66
Şekil 6.17 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi sonrası oluşan hasar görselleri.....	66
Şekil 6.18 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi kuvvet-deformasyon eğrileri.....	67

Şekil 6.19 : Biyo-kompozit numunelerin Charpy darbe dayanımı test sonuçları.....	68
Şekil 6.20 : Biyo-kompozit numunelerin eğilme mukavemeti test sonuçları.....	69
Şekil 6.21 : (a)20°C’de kürlleme, (b)90°C’de kürlleme, (c)120°C’de ardıl-kürlleme numunelerinin AESO içeriğine göre gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	70
Şekil 6.22 : Biyo-kompozit numunelerine ait ısıtıl işlem etkisini gösteren gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (a)0BIO, (b)30BIO, (c)50BIO, (d)70BIO, (e)100BIO.....	71
Şekil 6.23 : Oda sıcaklığında üretilmiş biyo-kompozit numunelerinde artan AESO içeriğinin depolama modülüne etkisi.....	72
Şekil 6.24 : Üretildikten sonra oda sıcaklığında 3 ay beklemiş numune görselleri (a)tüm numuneler (soldan sağa 0BIO’dan 100BIO’ya; önden arkaya oda sıcaklığında kürlenenden 120°C’de ardıl-kürlenene). (b)0BIO, (c)50BIO, ve (d)100BIO numuneleri.....	73
Şekil 6.25 : Kürlleme sıcaklığının depolama modülü üzerindeki etkisi (a)0BIO, (b)30BIO, (c)50BIO, (d)70BIO, (e)100BIO numuneleri.....	74
Şekil 6.26 : Oda sıcaklığında üretilen biyo-kompozit numunelerinde artan AESO içeriğinin kayıp modülü değerleri üzerindeki etkisi.....	75
Şekil 6.27 : Kürlenme sıcaklığının 0BIO numunelerinin kayıp modülü değerleri üzerindeki etkisi.....	76
Şekil 6.28 : Kürlenme sıcaklığının (a)30BIO, (b)50BIO, (c)70BIO, (d)100BIO numunelerinin kayıp modülü değerleri üzerindeki etkisi.....	76
Şekil 6.29 : Oda sıcaklığında üretilen biyo-kompozit numunelerde artan AESO içeriğinin tan delta değerleri üzerindeki etkisi.....	77
Şekil 6.30 : Kürlenme sıcaklığının 0BIO numunelerinin tan delta değerleri üzerindeki etkisi.....	78
Şekil 6.31 : Kürlenme sıcaklığının (a)30BIO, (b)50BIO, (c)70BIO, (d)100BIO numunelerinin tan delta değerleri üzerindeki etkisi.....	79
Şekil 6.32 : Oda sıcaklığında kürlenene biyo-kompozit numunelerin DSC analizleri.....	80
Şekil 6.33 : 90°C’de kürlenene biyo-kompozit numunelerin DSC analizleri.....	80
Şekil 6.34 : 120°C’de kürlenene biyo-kompozit numunelerin DSC analizleri.....	81
Şekil 6.35 : (a)0BIO, (b)0BIO-90, (c)0BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 1000x).....	82
Şekil 6.36 : (a)30BIO, (b)30BIO-90, (c)30BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).....	82
Şekil 6.37 : (a)50BIO, (b)50BIO-90, (c)50BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).....	83
Şekil 6.38 : (a)70BIO, (b)70BIO-90, (c)70BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).....	84
Şekil 6.29 : (a)100BIO, (b)100BIO-90, (c)100BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).....	84
Şekil 6.40 : (a)50BIO, (b)100BIO numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 100x).....	85

BİYO-REÇİNE ESASLI TEKSTİL KOMPOZİTLERİNİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde sürekli gelişen teknoloji ve insanların artan talepleri yenilikçi malzemelere olan ilgiyi artırmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, kompozit malzemeler metal ve ahşap gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında olağanüstü özellikleri ile en çok tercih edilen malzeme seçeneklerinden biri olmuştur. Kompozitlerde, takviye malzemesi olarak çoğunlukla cam, karbon ve aramid gibi sentetik lifler ve matris malzemesi olarak da epoksi, polyester, vinilester, fenolikler, siyanat esterler, bismaleimidler ve poliimidler gibi petrol-bazlı reçineler kullanılmaktadır.

Küresel çevre sorunları, çevre dostu malzemelere olan talebi artırmıştır. Buna bağlı olarak günümüzde, makul bir maliyetle geri dönüştürülebilir veya biyolojik olarak parçalanabilen, yenilenebilir hammaddelerden biyo-esaslı malzeme üretimine ilgi yoğunlaşmıştır. Ömrünün sonunda bertaraf edilemeyen yani yenilenemeyen hammaddelerden üretilen kompozit malzemelerin çevresel açıdan önemli bir sorun teşkil etmeye başlamasıyla, kompozitleri yoğun olarak kullanan otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde çevre dostu malzemelerden üretilen alternatif kompozitlerin kullanımı öne çıkmıştır. Araştırmacılar da bu ihtiyaca yönelik olarak, doğal liflerle takviye edilmiş doğal veya sentetik reçinelerden oluşan biyo-kompozitlerin geliştirilmesine odaklanmaya başlamıştır.

Jüt; dayanıklı, çevre dostu ve anti-statik bir elyafıdır. Jütün yüksek modülü, iyi termal ve elektriksel yalıtım özellikleri, biyobozunur yapısı, yüksek özgül mukavemeti, ticari olarak kolay bulunabilirliği ve düşük maliyeti onu, kompozitler için en çok tercih edilen doğal takviye malzemelerinden biri yapar. Elyaf takviyeli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan reçineler, termoplastik veya termoset olabilmektedir. Termoset reçineler; termal ve boyutsal kararlılık, iyi sertlik ve yüksek elektriksel direnç ile kimyasal ve çözücülere karşı dayanım gibi özellikleri sayesinde elyaf takviyeli kompozitlerde matris sistemini oluşturmada önemli bir yer tutmaktadır. Termoset bir reçine olan epoksi, elyaf takviyeli kompozitlerde, matris malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak petrol-bazlı bu reçinelerin hem petro-kimya endüstrisindeki sürdürülebilirlik sorunundan hem de çevreye olan zararlarından dolayı çevre dostu reçine arayışları artmış ve bunun sonucunda bitkisel yağlardan elde edilen reçineler hem biyobozunur olmaları hem de büyük miktarda ve ucuz bir şekilde tedarik edilebilmeleri ile ön plana çıkmıştır. Bitkisel yağlar arasında, özellikle epoksitlenmiş soya fasulyesi yağı (ESO), son 30 yıldır ticari kullanıma sahiptir ve çeşitli ticari isimler altında satılmaktadır. Akrilatlanmış epoksitlenmiş soya fasulyesi yağı (AESO) önemli bir başka soya fasulyesi yağı türüdür ve ESO'ya kıyasla üstün mekanik ve termal özelliklere sahiptir.

Söz konusu gelişmeleri dikkate alan bu tez de biyo-kompozitlere odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında dört kat jüt dokuma kumaş takviyeli AESO/epoksi hibrit reçine sistemine sahip biyo-kompozitler tasarlanarak vakum infüzyon yöntemiyle

üretimiştir. İki aşamalı olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ilk aşamasında artan biyo-reçine oranının kompozit malzemenin nihai özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla oda sıcaklığında on farklı AESO oranında (0BIO, 10BIO, 20BIO, 30BIO, 40BIO, 50BIO, 60BIO, 70BIO, 80BIO, 90BIO ve 100BIO; rakamlar reçine sistemi içerisindeki AESO oranını vermektedir.) AESO/epoksi reçine sistemine sahip biyo-kompozitler üretilmiştir. İkinci aşamada ise, artan AESO içeriği ile birlikte üretim sıcaklığının kompozit malzemenin nihai özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla seçili beş farklı AESO oranı (0BIO, 30BIO, 50BIO, 70BIO, ve 100BIO) ile üç farklı kürleme sıcaklığı (20°C, 90°C ve 120°C) değişken olarak tanımlanmıştır. Her iki aşamada da üretilen biyo-kompozit numuneler atkı ve çözgü yönünde olmak üzere fiziksel (elyaf ağırlık oranı, su emme oranı, su temas açısı), mekanik (çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, düşen ağırlık darbe dayanımı ve Charpy darbe mukavemeti), enstrümantal (diferansiyel taramalı kalorimetri, dinamik mekanik analiz, Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi) ve morfolojik (taramalı elektron mikroskopu) analizlere tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar şunları göstermektedir;

- Reçine sistemindeki artan AESO miktarı, yüksek viskozitesi sebebiyle düşük elyaf ağırlık oranına yol açmıştır.
- Ağırlıkça %30'un üzerinde AESO miktarı ile, kompozitlerin sünekliğinin artması ve aşırı plastikleşme nedeniyle kopma uzaması artarken, çekme ve eğilme mukavemeti değerleri azalmaktadır.
- Ağırlıkça %50'nin üzerinde AESO içeriğine sahip biyo-kompozitler üstün darbe özellikleri göstermişlerdir.
- Oda sıcaklığında kürlenmiş numunelerin kayıp modülü eğrilerinden hesaplanan T_g değerleri -2 ile 71°C arasında, tan delta eğrilerinden elde edilen T_g değerleri ise 11 ile 80°C arasında değişmektedir.
- DSC eğrileri, AESO içeriğindeki artışla birlikte kompozitlerin T_g değerlerinin daha düşük değerlere kaydığını göstermektedir.
- Numuneler arasında en yüksek depolama ve kayıp modülleri 100BIO numunesi için elde edilirken en düşük değerler 0BIO numunesi için elde edilmiştir.
- En yüksek tan delta değeri 100BIO numunesi için elde edilirken, en düşük değerler karışım reçineli numunelerde elde edilmiştir, bu da iki farklı matris malzemesinin kullanımının lif-matris arayüzünü iyileştirdiğini kanıtlamaktadır.
- FTIR analizinde, lif-matris arayüzünü güçlendiren, biyo-reçinelerin -OH ve -COO grupları ile hidrojen bağı oluşturan jüt liflerinin -OH gruplarının karakteristik pikleri gözlenmiştir.
- SEM görsellerinde, 0BIO ve 30BIO numuneleri için kırılkan bir matris fazı gözlemlenirken, %50'den fazla biyo-reçine içeren numunelerde akışkan matris fazları fark edilir hale gelmiştir.
- 90°C'de kürleme ve 120°C'de ardıl-kürleme işlemlerinin kompozit malzemeyi kırılkan hale getirdiği ve buna bağlı olarak darbe dayanımını azalttığı ve eğilme dayanımını artırdığı görülmüştür.

- Isıl işlemin kompozit malzemenin çapraz bağ oranını arttırdığı ve buna bağlı olarak malzemenin su emme özelliğini azaltırken, su temas açısını artırdığı görülmüştür.
- Yüksek sıcaklıkta kür ve ardıl-kürleme işlemleri ile kompozit numunelerin çekme mukavemetinde ve elastik modülünde bir artış gerçekleşmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen tüm bulgular dikkate alındığında tez kapsamında tasarlanan ve üretilen biyo-kompozitlerin, petrol-bazlı hammaddelere dayalı ürünlerin hakim olduğu pazarda rekabet edebilecek güçte, sürdürülebilir ve eko-verimli bir ürün portföyü sunan umut verici malzemeler oldukları sonucuna varılmıştır. Kompozit tasarım bileşenlerinin ve üretim parametrelerinin ise son kullanma alanında üründen beklenen performans özellikleri dahilinde seçilmesi önerilmektedir.





INVESTIGATION OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF BIO-RESIN BASED TEXTILE COMPOSITES

SUMMARY

Today, developing technology and increasing demands of people increase the interest in innovative materials. From this point of view, composite materials have become one of the most preferred material options with their extraordinary properties compared to traditional materials such as metal and wood. Composite structures consist of two main components called 'matrix material' and 'reinforcement material'. Properties of the composites such as strength and hardness are mostly related to the reinforcement material which is mostly a textile construction in the form of fiber, yarn, fabric, and their advanced combinations. The use of textile materials in composite structures is increasing day by day due to their high performance as well as their relatively low cost. Fibers used in composite structures are categorized into two main groups such as natural and synthetic fibers. Glass, carbon, and aramid are among the main synthetic fibers used in composite structures. Although synthetic fibers used as reinforcement materials have superior properties compared to natural fibers, their density and cost are higher than natural fibers and they are not biodegradable.

Global environmental problems have increased the demand for environmentally friendly materials. Accordingly, today there is a growing interest in the production of bio-based materials. Natural fibers traditionally used in textile industries attract attention with their low density and biodegradability, unlike synthetic fibers. Today, with the increasing demand for environmentally friendly products, more and more natural fibers are used as reinforcements in polymer matrix composites. Bast fibers (hemp, jute, flax, kenaf, ramie, etc.) which have superior mechanical properties such as high strength and stiffness compared to other plant fibers, are therefore the most widely used natural fiber reinforcement materials. Among them, jute is a durable, environmentally friendly, and anti-static fiber. Jute's high modulus, good thermal and electrical insulating properties, biodegradability, high specific strength, availability, and low cost make it one of the most preferred natural reinforcing materials for composites.

Resins used as matrix materials in fiber-reinforced composites can either be thermoplastic or thermoset. Thermoset resins are mostly preferred in matrix systems of fiber-reinforced composites, thanks to their properties such as enhanced thermal and dimensional stability, good hardness, high electrical and chemical resistance. The most common resin materials used in thermoset matrix composites are epoxy, polyester, vinyl ester, phenolics, cyanate esters, bismaleimides, and polyimides. Among these resins, epoxy which is widely used in many application areas, is one of the most preferred resins, thanks to its excellent chemical resistance, superior tensile, fatigue, and compressive strengths, and electrical insulation properties. However, due to the sustainability problem of these petroleum-based resins in the petrochemical industry and their harm to the environment, the need for environmentally friendly raw materials has increased. In this manner, vegetable oils stand out as an important environmentally

friendly alternative for these petroleum-derived raw materials. Vegetable oils can be chemically modified to produce epoxidized vegetable oils. These polymeric products obtained by the polymerization of bio-based epoxides are potentially biodegradable thanks to the hydrolytic cleavage of the glycerol ester bonds in their structures. Among vegetable oils, soybean oil can be supplied in high quantities and at a low cost. Epoxidized soybean oil (ESO) has been in commercial use for the past 30 years and is available under a variety of trade names. Acrylate epoxidized soybean oil (AESO) is another important soybean oil derivative and has superior mechanical and thermal properties compared to ESO.

Composite materials produced from petroleum-based components cannot be recycled at the end of their life and start to pose important environmental problems. Thus, the use of alternative composites produced from renewable and environmentally friendly materials has come to the fore in sectors such as automotive and aviation, which use composites extensively. To meet this need, researchers have started to focus on the development of bio-composites consisting of natural or synthetic resins reinforced with natural fibers.

Considering these developments, this thesis focuses on bio-composites. Within the scope of this study, bio-composites with four layers of jute woven fabric reinforced AESO/epoxy hybrid resin system were designed and produced by the vacuum infusion method. In the first stage of the two-stage experimental studies, bio-composites with AESO/epoxy resin system were produced at ten different AESO ratios (0BIO, 10BIO, 20BIO, 30BIO, 40BIO, 50BIO, 60BIO, 70BIO, 80BIO, 90BIO, and 100BIO; the numbers represent the ratio of AESO in the resin system.) at room temperature in order to examine the effect of increasing bio-resin ratio on the final properties of the composite material. In the second stage, selected five different AESO ratios (0BIO, 30BIO, 50BIO, 70BIO, and 100BIO) and three different curing temperatures (20°C, 90°C, and 120°C) were defined as variables in order to examine the effect of production temperature with increasing AESO content on the final properties of the composite materials. Bio-composite samples produced in both stages (in the weft and warp direction) were analyzed by physical (fiber weight ratio, water absorption ratio, water contact angle), mechanical (tensile strength, bending strength, drop weight impact resistance, and Charpy impact resistance), instrumental (differential scanning calorimetry, dynamic mechanical analysis, Fourier-transform infrared spectroscopy) and morphological (scanning electron microscopy) tests. The obtained results indicate the following outcomes;

- The increased amount of AESO in the resin system resulted in a low fiber weight ratio due to its high viscosity.
- With the amount of AESO over 30% by weight, the tensile and flexural strength values decreased while the elongation at break increased due to the increase in ductility of the composites and excessive plasticization.
- Bio-composites with more than 50% AESO content by weight showed superior impact properties.
- The T_g values calculated from the loss modulus curves of the samples cured at room temperature varied between -2 and 71°C, and the T_g values obtained from the tan delta curves varied between 11 and 80°C.
- DSC curves showed that the T_g values of the composites shift to lower values with the increase in AESO content.

- Among the samples, the highest loss and storage moduli were obtained for the 100BIO sample, while the lowest loss modulus values were obtained for the 0BIO sample.
- The highest tan delta value was achieved for the 100BIO sample, while the lowest values were obtained for samples with hybrid resin, proving that the use of two different matrix materials improved the fiber-matrix interface.
- In the FTIR analysis, characteristic peaks of -OH groups of jute fibers that strengthen the fiber-matrix interface and form hydrogen bonds with the -OH and -COO groups of bio-resins were observed.
- In the SEM images, a brittle matrix phase was observed for the 0BIO and 30BIO samples, while the fluid matrix phases became noticeable in the samples containing more than 50% bio-resin.
- Curing at 90°C and post-curing at 120°C processes make the composite materials brittle and accordingly reduced the impact strength and increased the bending strength.
- It was observed that heat treatment increased the crosslinking rate of the composite materials and accordingly decreased the water absorption property of the material while increasing the water contact angle.
- An increase was observed in the tensile strength and elastic modulus of the composite samples with high-temperature curing and post-curing processes.

In the light of these findings, it was concluded that the 30BIO samples cured at 90°C showed better tensile behavior than the 0BIO samples, with a tensile strength of approximately 60 MPa and a tensile elongation of 5%, and bending strength of around 400 MPa, and it had sufficient impact strength values. In addition, 30BIO samples cured at 90°C are hydrophobic with a water contact angle of 93° and have a water absorption rate of 9.25%. With a density of 1,020 g/cm³, these samples can be a suitable alternative for lightweight designs where improved tensile properties are important.

On the other hand, 50BIO samples cured at 90°C stand out especially with their high impact strength (the energy absorbed in the drop-weight impact test is 3.85 J, the Charpy impact resistance is 10.84 kJ/m²). This set of samples has a tensile strength of about 40 MPa and an elongation at a break of 8%. In addition, these samples with hydrophobic surface character can absorb about 17% water when kept in water. With a density of 0.945 g/cm³, this sample is a lightweight material alternative, especially for applications where impact resistance is required.

Although it is very important to prefer completely bio-resin-containing composites in terms of environmental impact, the performance of 100BIO is limited according to the results of the tests and it was found to be insufficient for use alone. In addition, unfortunately, after the increased AESO ratio exceeded a certain percentage, it created difficulties during curing and despite the increased impact strength, samples with high AESO content were found unsatisfactory for industrial applications due to their very low tensile strength. Even so, just by replacing the epoxy resin with AESO at a rate of 30-50%, an increase in performance can be achieved besides making a significant contribution to a livable world thanks to its eco-friendly content. In particular, 30BIO and 50BIO samples with T_g values around 55°C and 40°C are the most suitable for use at room temperature among mixed resin samples. For this reason, it is thought that

these samples, which exhibit superior properties compared to other samples, will be an alternative for many end-use areas from sports equipment (snowboard, longboard, skateboard body, etc.) to vehicle composites.

Considering all the findings obtained within the scope of this thesis, it is seen that bio-composites are promising materials that offer a sustainable and eco-efficient product portfolio that can compete with the market dominated by products based on petroleum-based raw material.



1. GİRİŞ

Malzemeler, herhangi bir imalat endüstrisinin temel unsuru olarak kabul edilirler. İmalat endüstrisinde saf metallere alaşımlara ve kompozitlere kadar çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Saf metal ve alaşımların özelliklerinin modern ürünlerin beklentilerini karşılamada yetersiz kalmaları kompozit malzemelerin üretim endüstrisindeki kullanım alanını giderek artırmıştır. Kompozit malzemeler, yüksek özgül dayanım, güçlü sönümleme kapasitesi ve yüksek özgül modül gibi umut verici özellikleri sayesinde günümüzde imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle lif takviyeli kompozitler; yüksek mukavemet, hafiflik, su direnci, kimyasal direnç, yüksek dayanıklılık, elektrik, yanma ve korozyon direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı otomotiv ve uçak endüstrileri başta olmak üzere çeşitli endüstrilerde ve altyapı ile yapısal uygulamalarda yerini almaktadır (Kerni ve diğ, 2020). İlk başlarda, düşük maliyetleri ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle sadece sentetik elyaf takviyeli (cam ve karbon gibi) ve sentetik reçine ile üretilmiş lif takviyeli kompozitler kullanılmaktaydı (Jariwala ve Jain, 2019). Ancak geleneksel petrol-bazlı enerji ve hammadde kaynaklarının sınırlılığı ve artan çevresel kaygılar nedeniyle, yeni bileşenlerin geliştirilmesi için yenilenebilir hammaddelere yönelmenin zorunlu hale geldiği görülmektedir (Biagiotti ve diğ, 2004).

Öte yandan, içinde bulunduğumuz iklim krizi, çevresel sorunların ne denli arttığı ve artık dünya için geri dönüşü güç bir dönemece girildiğinin göstergesi olmuştur. Bu noktada hemen hemen tüm sektörlerde sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm gibi kavramlar bir ihtiyaçtan öte gereklilik haline dönüşmüştür (Sarıkaya ve diğ, 2019). Özellikle petrol-bazlı takviye malzemesi ve reçinelerin kullanıldığı kompozit sektörü de bu durumdan hayli etkilenmiştir. Bu durum, kompozit yapıların üretiminde doğal malzemelerin kullanımına atfedilen önemi artırmış ve biyo-kompozit üretimi için çeşitli biyo-malzeme arayışlarının hız kazanmasına vesile olmuştur (Roy ve diğ, 2020).

En genel tanımıyla biyo-kompozitler, doğal lifler ile petrol-bazlı veya biyolojik olarak parçalanabilen polimerlerden üretilen kompozit malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Diğer bir ifade ile “biyo-kompozit” terimi genellikle kısmen doğal bileşenlere sahip kompozitler için kullanılmakta; yani ya matris ya da takviye malzemesinden birisinin doğal malzemelerden olması gerekmektedir. Bununla birlikte, bir kompoziti gerçekten biyo-kompozit olarak adlandırmak için her iki bileşenin (matris ve takviye malzemesi) de doğal olduğu bir kombinasyonun sağlanması esastır (Jiang, 2015) ve bu tip kompozitler yeşil kompozitler olarak tanımlanmaktadır (John ve Thomas, 2008).

Takviye malzemeleri açısından jüt, keten, sisal ve kenevir başta olmak üzere lignoselülozik lifler 1970’li yıllardan itibaren kompozit uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilir hale gelmiştir (Sarasini ve Fiore, 2018). Bitkilerin gövdelerinden, yapraklarından veya tohumlarından elde edilen bu doğal lifler, yüksek özgül mukavemet ve modül, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve düşük maliyet gibi birçok avantaja sahiptir (Liu ve diğ, 2019). Diğer bitki liflerinden daha üstün mekanik özelliklere sahip olan gövde lifleri, takviye malzemesi olarak en çok kullanılan doğal liflerdir (Romanzini ve diğ, 2013; Shah, 2013). Gövde lifleri arasında kompozit üretiminde en çok tercih edilen lif ise jüttür (Ahmad ve diğ, 2015). Jüt lifi; yüksek modül, iyi termal ve elektriksel yalıtım, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve yüksek özgül mukavemet gibi özelliklerinin yanı sıra düşük maliyet ve ticari bulunabilirlik açısından da ön plana çıkmaktadır (Acha ve diğ, 2005; Tripathy ve diğ, 2000). Ayrıca, jüt lifinin yüksek selüloz içeriği ve düşük mikrofibril açısı değerleri, kompozit malzemelerde kullanılmasının en önemli sebepleri arasındadır (Dungani ve diğ, 2016).

Biyo-kompozit üretmek için sadece doğal bir takviye malzemesi kullanmak yeterli gibi görünse de, kompozit malzemelerin yarattığı çevresel ayak izinin takviye malzemesinden ziyade matris malzemesi olarak petrol-bazlı polimerlerin kullanımından kaynaklandığı bilinmektedir. Bu bağlamda firmalar ve bilim insanları yenilenebilir kaynaklardan elde edilen alternatif matris malzemeleri aramaya yönelmiş ve böylece biyo-bazlı polimerler ortaya çıkmıştır (Faruk ve diğ, 2014). Petrol-bazlı malzemeler yerine daha ucuz, yenilenebilir ve biyobozunur malzemelerden biyo-bazlı polimerlerin geliştirilmesi, ekonomi ve çevre üzerinde önemli etkilere sahiptir. Birçok avantajlı özelliğine ek olarak, biyo-bazlı polimerlerin en önemli özelliği, genel olarak düşük toksisiteyledir (Johns ve diğ, 2016). Petrol-bazlı epoksi reçine, düşük maliyeti, kullanım kolaylığı ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan termoset reçinelerdir. Ancak petrol kaynakları, fiyatları ve çevre üzerindeki etkileri konusundaki belirsizlikler, epoksi kullanımının azaltılması ve onun

yerine biyo-malzemelerin ikame edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Abu Bakar ve diğ, 2018). Bu noktada, bitkisel yağlardan, karbonhidratlardan ve ligninden elde edilen biyo-bazlı reçineler, geleneksel termosetlerin yerini almaya başlamıştır (O'Donnell ve diğ, 2004). Biyo-reçineler üretim sırasında toksik özellik göstermezler ve tüm sentetik reçinelerle karışım halinde kullanılabilirler. Ayrıca kokusuzdurlar ve boyutsal stabiliteye sahiptirler (Jiang, 2015). Doğal bitkisel yağlar ve türevleri, rekabetçi maliyetleri, dünya çapında bulunabilirliği, düşük toksisitesi ve bozunabilirliği nedeniyle en kolay erişilebilir alternatif yenilenebilir matris malzemeleri olarak dikkat çekmektedir (Fei ve diğ, 2019; Wang ve diğ, 2016). Doymamış trigliseritler olan bitkisel yağlardan (soya fasulyesi yağı, keten tohumu yağı, keten tohumu yağı, palm yağı, kolza yağı vb.) elde edilen reçineler arasında akrilatlanmış epoksitlenmiş soya fasulyesi yağı (AESO), kompozit malzemelerde ticari olarak en çok tercih edilen reçinedir. Soya yağına uygulanan epoksidasyon ve akrilasyon işlemleri, reaktif çift ($C=C$) bağ ile AESO oluşumunu sağlar ve böylece AESO kendi kendine polimerleşebilir (Liu ve diğ, 2019). Ancak petrol-bazlı reçinelere kıyasla yüksek viskozitesi ve yetersiz reaktif grupları nedeniyle bileşiklerde matris malzemesi olarak saf AESO kullanmak henüz mümkün değildir. Bu nedenle AESO ile birlikte kullanılabilecek alternatif reçinelerle ilgili çalışmalar devam etmektedir. Literatürde yer verilen AESO-epoksi matris sistemleri üzerine yapılmış çalışmalar ümit vadecici olarak görülmekle birlikte yeterli kapsamda olmadığı göze çarpmaktadır. Epoksi reçineye ikame olabilmesi için AESO-epoksi hibrit matris sistemlerinin özelliklerinin detaylıca incelenmesi önem teşkil eder.

Tez kapsamında, dört kat jüt dokuma kumaş takviyeli AESO/epoksi hibrit reçine sistemine sahip biyo-kompozitler tasarlanarak, vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. İki aşamalı olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında ilk olarak artan biyo-reçine oranının kompozit malzemenin nihai özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla oda sıcaklığında on farklı AESO oranında AESO/epoksi reçine sistemine sahip biyo-kompozitler üretilmiştir. İkinci kısımda ise artan AESO içeriği ile birlikte üretim sıcaklığının kompozit malzemenin nihai özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla seçili beş farklı AESO oranı ile üç farklı kürleme sıcaklığı ($20^{\circ}C$, $90^{\circ}C$ ve $120^{\circ}C$) değişken olarak tanımlanmıştır. Her iki aşamada da üretilen biyo-kompozit numuneler atkı ve çözgü yönünde olmak üzere fiziksel (elyaf ağırlık oranı, su emme oranı, su temas açısı), mekanik (çekme

mukavemeti, eğilme mukavemeti, düşen ağırlık darbe dayanımı ve Charpy darbe dayanımı), enstrümantal (diferansiyel taramalı kalorimetri, dinamik mekanik analiz, Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopi) ve morfolojik (taramalı elektron mikroskobu) analizlere tabi tutulmuştur. Ayrıca sonuçların istatistiksel anlamlılıkları da test edilmiştir.



2. KOMPOZİT YAPILAR

Günümüzde, sürekli gelişen teknoloji ve insanların artan talepleri, yenilikçi malzemelere olan ilgiyi artırmaktadır (Raghavendra ve diğ, 2015). Bu açıdan bakıldığında, kompozit malzemeler, metal ve ahşap gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında olağanüstü özellikleri ile en çok tercih edilen yeni malzeme seçeneklerinden biri olmuştur. Bilinenin aksine, kompozit malzemeler insanlar tarafından keşfedilmemiştir; doğada kendiliğinden bulunurlar. Örneğin, bulut, sis ve yağmur; hava ile sudan oluşan kompozitlerdir. Ahşap, lignin adı verilen doğal yapışkan matrisin içindeki selüloz liflerinden oluşan bir kompozittir. Salyangoz ve istiridye gibi omurgasızların kabukları da birer kompozit örneğidir (Milton, 2004). Öte yandan, insanlar tarihsel süreçte ihtiyaçları doğrultusunda çeşitli malzemeleri bir arada kullanarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Kabuk, kil ve saman gibi malzemeleri kullanarak yaptıkları ev ya da pişirme kapları bunlara örnek verilebilir. Bu bağlamda kompozit malzeme üretmek en genel haliyle, iki veya daha fazla malzemeyi, daha iyi ya da benzersiz özellikte bir ürün elde etmek için birleştirmektir (Mazumdar, 2002). Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, aralarında farklı arayüzler bulunan, bir matrise gömülü veya matrisle bağlanmış genellikle yüksek mukavemetli ve modüllü liflerden oluşur. Bu formda, hem lifler hem de matris malzemesi fiziksel ve kimyasal kimliklerini korurken, bileşenlerden herhangi biri ile tek başına elde edilemeyen bir özellik kombinasyonu üretirler. Genel olarak, lifler ana yük taşıyıcı elemanlardır, lifleri çevreleyen matris ise hem lifler arasında bir yük aktarım ortamı görevi görür hem de lifleri istenen yerde ve yönde tutar, ayrıca yüksek sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerden kaynaklanan zararlardan korur (Mallick, 2007).

2.1 Kompozit Malzemeleri

2.1.1 Matris malzemeleri

Matris, lifleri çevreler ve böylece bu lifleri kimyasal ve çevresel etkilere karşı korur. Liflerin maksimum yükü taşıması için, matrisin takviye malzemesinden daha düşük bir modüle ve daha fazla uzamaya sahip olması gerekmektedir. Matris malzemesinin başlıca işlevleri; lifleri yapıda tutmak, yükleri dağıtmak veya aktarmak, lifleri hem

yapıda hem de üretim sırasında korumak, kompozitin elektriksel ve kimyasal özelliklerini kontrol etmektir. Kompozitin kullanım amacına bağlı olarak matristen beklenen özellikler; nem emilimini en aza indirmesi, düşük çekme oranına sahip olması, düşük ısı genleşme katsayısı, elyafa tamamen nüfuz etmesi ya da bağlanması, yeterli mukavemet, modül ve uzamaya (uzama değeri liften daha büyük olmalıdır) sahip olması, yükü liflere aktarabilmek için yeterli elastikiyette olması, mükemmel kimyasal dirence ve boyutsal kararlılığa sahip olmasıdır (Peters, 1998).

Kompozit yapılar, matris sistemlerine göre üç temel gruba ayrılabilir. Bunlar; metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitlerdir. Polimer matris malzemeleri de termoset ve termoplastik olarak ikiye ayrılmaktadır (Campbell, 2010). Bu tez kapsamında termoset polimer matrisli elyaf takviyeli kompozitler ele alınacaktır.

Termoset reçineler

Termoset reaksiyon, genişletilmiş bir ağ yapısı oluşturmak için birçok küçük molekülün kimyasal reaksiyonla birleştirilmesidir. Bu proses bir polimerizasyon olmasına rağmen, birçok ayrı uzun zincir oluşturan polimerizasyon tipinden farklıdır; termoset reaksiyon, tüm bileşen monomerleri, tek bir büyük molekülde birleştirir (Penn ve Wang, 1998).

Termoset malzemeler sertleştikten sonra yeniden eritilemez veya yeniden biçimlendirilemez. Kürleme sırasında, çapraz bağlanma adı verilen üç boyutlu moleküler zincirler oluştururlar. Bu çapraz bağlar nedeniyle moleküllerin esnekliği düşer. Çapraz bağ sayısı ne kadar yüksekse, malzeme o kadar sert ve termal olarak kararlı olacaktır. Kauçuklarda ve diğer elastomerlerde, çapraz bağların yoğunlukları çok daha azdır ve bu nedenle esnektirler. Termosetler, yüksek sıcaklıklarda bir dereceye kadar yumuşayabilirler. Ancak, termosetler doğası gereği kırılğandır ve genellikle bir çeşit dolgu veya takviye malzemesi ile kullanılırlar. Termoset malzemeler termal ve boyutsal kararlılık, iyi sertlik ve yüksek elektriksel ve kimyasal direnç sunar. Termoset matrisli kompozitlerde kullanılan en yaygın reçine malzemeleri epoksi, polyester, vinilester, fenolikler, siyanat esterler, bismaleimidler ve poliiimidlerdir (Mazumdar, 2002).

Epoksi

Epoksi reçine, bir termoset sistemi oluşturmak için reaksiyona girebilen iki veya daha fazla alfa-epoksi grubu içeren herhangi bir molekül olarak tanımlanabilir (Drzal,

1986). Epoksi reçineler, mükemmel kimyasal dirençleri, olağanüstü yapışma, yüksek çekme ve basma dayanımları, elektriksel yalıtım özellikleri ve üstün yorulma dayanımları sayesinde birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılan malzeme sınıfıdır (Pascault ve Williams, 2010).

Havacılıktan spor malzemelerine, birçok alanda tercih edilen epoksi reçinelerin farklı performans gereksinimlerini karşılamak için farklı özellikte olanları vardır. Formülasyon değiştirilerek epoksilerin bazı özellikleri (kürlenme oranı, işlem sıcaklığı gereksinimi, döngü süresi, tokluk, vb.) değiştirilebilir. Ayrıca, belirli bir performans ihtiyacını karşılamak için diğer epoksilerle karıştırılarak da kullanılabilirler. Epoksiler aminler, anhidritler, fenoller, karboksilik asitler ve alkollerle kimyasal reaksiyona girerek kürlenirler. Kürlenme (çapraz bağlanma) reaksiyonu, bir kürleme ajanı (örn. dietilentriamin; DETA) ilave edilerek gerçekleştirilir. Kürlenme sırasında bisfenol-A diglisidil eter (DGEBA) molekülleri, birbirleriyle çapraz bağ oluşturur. Bu çapraz bağlar, üç boyutlu bir ağda büyür ve sonunda katı bir epoksi reçine oluşturur. Kür hızları, uygun sertleştirici ve/veya katalizör seçimi ile kontrol edilebilir. Her sertleştirici, nihai ürüne farklı kür özellikleri ve farklı özellikler sağlar (Mazumdar, 2002).

Bitkisel yağ bazlı reçineler

Bitkisel yağlar, düşük erime noktalarına sahip, esas olarak uzun zincirli hidrokarbonlar halinde bulunan ve değişen derecelerde doymamışlığa sahip bir lipid sınıfıdır. Bitkisel yağlar kimyasal olarak heterojendir. Bununla birlikte, bu yağların çoğu, yüksek miktarlarda trigliserid içerir (>%80), yağın geri kalanı esas olarak di- ve mono-akrilgliseroller, fosfolipidler, terpenler, steroller ve yağda çözünen vitaminlerdir. Bu nedenle bitkisel yağlar, her yağın benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri olmasına rağmen, biyolojik kökenlerine göre adlandırılır. Örneğin, soya yağı ve hint yağı gibi. Bitkisel yağlar boyalar, sabunlar, kozmetikler, yağlayıcılar ve kaplamalar için uzun süredir hammadde olarak kullanılmaktadır (Chen ve diğ, 2016).

Yakın zamanlarda bitkisel yağlar, petrolden türetilen polimerler gibi ürünlere alternatif bir kaynak olarak da öne çıkmıştır. Hem petrokimya endüstrisindeki sürdürülebilirlik sorunu, hem de çevreye daha zararsız kaynaklara olan talep dolayısıyla diğer endüstriyel hammadde kaynaklarına ihtiyaç artmıştır. Hurma yağı, soya fasulyesi, kanola (kolza tohumu), kamelya, keten, kenevir, ayçiçeği, aspir, pamuk tohumu gibi doymamış bitkisel yağlar, epoksitlenmiş bitki yağları üretmek için kimyasal olarak

modifiye edilebilir. Bu epoksitlenmiş yağlar, petrol esaslı muadilleri gibi hatta daha da fazla modifiye edilebilir veya termoset epoksi reçinelerine dönüştürülebilir (Omonov ve Curtis, 2016).

Biyo-bazlı epoksitlerin polimerizasyonu ile elde edilen polimerik ürünler, geleneksel petrokimya esaslı muadillerine kıyasla nispeten zayıf mekanik performans gösterirler. Biyo-bazlı epoksitlerin bu zayıf mekanik davranışı, epoksi gruplarının düşük reaktivitesi ile ilgilidir ve bu da düşük derecede çapraz bağlanmaya yol açar. Bununla birlikte, bitkisel yağ bazlı polimerler, trigliserid yağlarında bulunan gliserol ester bağlarının hidrolitik bölünmesi sayesinde potansiyel olarak biyolojik parçalanabilir yapıdadır. Şu anda, bitkisel yağ bazlı epoksitler, polimer ve kompozitlerin imalatında petrol bazlı epoksitlerle birlikte kullanılmaktadır, böylece nihai ürünün petrol-bazlı epoksit miktarı azaltılıp yenilenebilir içeriği artırılırken, kabul edilebilir mekanik performansı da korunur (Dotan, 2014).

Akrilatlanmış epoksilenmiş soya fasülyesi yağı

Bitkisel yağlar arasında, özellikle soya fasulyesi yağı bol ve ucuz bir şekilde tedarik edilebilmektedir. Soya fasulyesi yağının yaklaşık %80'i gıda endüstrisi tarafından, %6'sı hayvan yemi için ve kalan %14'ü ise sabun, kayganlaştırıcı ve diğer gıda dışı üretimler için kullanılmaktadır. Diğer bitkisel ve hayvansal yağlar gibi, soya fasulyesi yağının da ana bileşeni trigliseriddir. Trigliseridler doymuş ve doymamış yağ asitlerini içerebilir. Doymamışlık; yağ asidi tipi ile birlikte trigliserid reaktivitesini belirleyen çift bağların ($C=C$) varlığını ifade eder (Yılmaz ve diğ, 2017).

Soya fasulyesi yağında bulunan çift bağların ($C=C$) sayısı nispeten yüksektir. Bununla birlikte, çift bağlar serbest radikal polimerizasyon reaksiyonu için gereken reaktivite seviyesine sahip değildir. Bu nedenle, bu çift bağlar daha reaktif olan ve serbest radikal polimerizasyon reaksiyonlarında kullanılabilen epoksitler, akrilatlar ve hidroksiller gibi fonksiyonel gruplara dönüştürülmelidir. Trigliseridlere kimyasal işlevsellik kazandırarak polimerizasyonu mümkün kılan bu dönüşüm kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Sonrasında bu şekilde modifiye edilmiş trigliseridler petrol-bazlı polimerlere uygulanan teknikler kullanılarak polimerize edilebilir. Epoksitlenmiş soya fasulyesi yağı (ESO) son 30 yıldır ticari kullanıma sahiptir ve çeşitli ticari isimler altında satılmaktadır (Saithai ve diğ, 2013; Hong ve Wool, 2005).

Akrilatlanmış epoksitlenmiş soya fasülyesi yağı (AESO) önemli bir başka soya fasülyesi yağı türevidir ve ESO'ya kıyasla üstün mekanik ve termal özellikler sunar.

AESO, ESO'nun akrilatlanmış halidir. Dolayısıyla AESO, soya fasulyesi yağından iki işlem adımıyla üretilir; ilk adım soya fasulyesi trigliseridinin epoksidasyonu ile ESO üretilmesi ve ikinci adım ESO'nun akrilatlanmasıdır. AESO, kompozitlerin üretiminde reçine olarak kullanılabilir ve reçine transfer kalıplama (RTM) kompozit üretim yöntemi ve varyasyonları için idealdir (Yılmaz ve diğ, 2017).

2.1.2 Takviye malzemeleri

Kompozit yapılar iki ana bileşenden oluşur ve bunlar 'matris malzemesi' ile 'takviye malzemesi' olarak adlandırılır. Kompozitin, mukavemet ve sertlik gibi özellikleri daha çok takviye malzemesi ile ilişkilidir. Polimer matris kompozitlerde, takviye malzemesi olarak çoğunlukla tekstil yapıları kullanılmaktadır. Tekstil malzemelerinin kompozit yapılarda kullanımı, yüksek performanslarının yanı sıra nispeten düşük maliyetli olmaları sayesinde günden güne artmaktadır (Sezgin, 2018).

Elyaf takviyeli kompozitin ilk örneği; II. Dünya Savaşı'ndan sonra petrokimya endüstrisi için polimerik reçine kullanılarak üretilmiş olan cam elyaf takviyeli bir kompozit malzemedir (Bakis ve diğ, 2002). O tarihten beri, düşük maliyetli, yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü liflere sahip hafif polimerler kullanılarak çok çeşitli mekanik ve teknolojik ihtiyacı karşılayabilen kompozit malzemeler geliştirilmiş ve otomotiv, tıp, havacılık, savunma, denizcilik endüstrisi gibi sayısız sektörde uygulama alanı bulmuştur (Trostyanskaya, 1995).

Kompozit yapılarda kullanılan lifler, doğal ve sentetik lifler olarak iki ana kategoriye ayrılır. Kompozit yapılarda kullanılan sentetik liflerin başlıcaları arasında cam, karbon ve aramid gelir. Cam elyaf, takviye malzemesi olarak en geniş kullanım alanına sahip lif olmasına rağmen 1960'ların sonlarından itibaren, karbon, poliaramid ve pek çok diğer takviye malzemesi çeşitli uygulamalarda cam elyafının yerini almıştır. Takviye malzemesi olarak sentetik lifler her ne kadar doğal liflerden daha üstün özelliklere sahip olsalar da yoğunlukları ve maliyetleri doğal liflerinden daha yüksektir ve biyolojik olarak parçalanamazlar (Delmonte ve diğ, 1998). Geleneksel olarak tekstil endüstrilerinde kullanılan doğal lifler, düşük yoğunlukları ile dikkat çekerler ve sentetik liflerin aksine biyo-bozunur yapıdadırlar. Günümüzde artan çevreye zararsız ürün talebi ile polimer matrisli kompozitlerde giderek daha fazla doğal lif takviyesi kullanılmaktadır (Charlet, 2012).

Doğal lifler

Doğal lifler bitkisel, hayvansal ve mineral lifler olarak üç grupta incelenir. Hayvansal kökenli lifler proteinlerden oluşur, ipek ve yün bunlara örnek verilebilir. Mineral lifler genellikle ekstraksiyon sırasında insan sağlığını etkileyen faktörler nedeniyle çok küçük miktarlarda kullanılır, asbestos bunlara bir örnektir. Bitkisel lifler ise selüloz esaslıdır. Selülozik malzemeler, dünyada biyo-kütlenin en bol bulunan formudur ve sadece ekolojik ve ekonomik nedenlerle değil, aynı zamanda yüksek mekanik ve termal performansları sayesinde kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu sebeple bitkisel lifler, ekolojik (çevreye duyarlı), sürdürülebilir, yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir olma özellikleri ile kompozit üretiminde, yirmi birinci yüzyılın en çok ihtiyaç duyulan malzemeleri arasında yer alır (Nishino, 2000).

Bitkisel lifler yüksek uzunluk/çap oranına sahiptir ve bu özellik, kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir; matris ile takviye malzemesi arasındaki yük aktarımının daha homojen olmasını sağlar ve olası çatlak yayılımını engeller. Ayrıca doğal liflerin yüzeylerinin pürüzlü olması kompozit yapıdaki matrise iyi yapışmalarını sağlar. Bitkisel kökenli doğal liflerin en büyük avantajlarından biri de, dünya genelinde bulunabilmeleri, sürdürülebilir olarak üretilibilmeleri ve ucuz olmalarıdır. Selüloz, hemiselüloz, lignin ve pektinden oluşan bitki lifleri beş ana kategoriye ayrılır: sak lifleri, yaprak lifleri, tohum lifleri ve diğer tüm lifler (Da Rosa ve Guerra, 2012; Charlet, 2012).

Sak lifleri, bazı doğal bitkilerin yüzeyinden veya gövdenin iç kabuğundan toplanır. Bu kategorideki başlıca lifler kenevir, jüt, keten, kenaf ve ramidir. Bu lifler diğer bitkisel liflere göre üstün mekanik özelliklere (yüksek mukavemet ve sertlik gibi) sahiptirler ve bu nedenle en çok kullanılan doğal lif takviye malzemeleridir (Shah, 2013).

Jüt lifi

Jüt, üretim ve kullanım bakımından pamuktan sonra gelen en önemli bitki liflerindendir. Sıcak ve nemli iklimlerde gelişir. Tropik ve subtropik iklimlerde yetişen bu bitkinin üretimi Güney Amerika'dan Uzak Doğu'ya kadar geniş bir coğrafyaya yayılmıştır. Günümüzde jüt bitkisinin büyük bir kısmı, Hindistan ve Bangladeş'te Ganj Nehri ve Bramhaputra Nehri'nin oluşturduğu deltada üretilmektedir, ayrıca Brezilya, Tayland ve Çin de önemli üreticiler arasındadır. Jüt tamamen lifleri için yetiştirilen ve tarih öncesi çağlardan beri insanlar tarafından kullanılan bir bitkidir. Jüt, 2 ila 3,5 m yüksekliğe kadar büyüeyebilen ve 2 ila 3 cm çapında sapa sahip, otsu ve yıllık bir

bitkidir. Jüt lifleri çokgen bir kesite sahiptir ve hücre çeperlerinin boyutları değişiklik gösterir. Hücre çeperlerinin kalınlığındaki bu düzensizlikler nedeniyle, liflerin mukavemetleri de büyük ölçüde değişir. Jütün, kimyasal ve fotokimyasallara karşı dayanımı düşüktür; jüt, asitlere karşı çok az direnç gösterirken, güneş ışığına maruz kaldığında çekme mukavemetini kaybeder. Jüt, en higroskopik bitki lifidir ve dolayısıyla nem direnci azdır, bu özellik onu çürümeye karşı savunmasız kılar ancak mikroorganizmalara karşı dirençli olan jüt lifi kuru tutulursa dayanımı çok yüksektir (Bismarck ve diğ, 2005; Da Rosa ve Guerra, 2012).

Sak liflerinin ve diğer odunsu-selülozik liflerin bitki hücre duvarları esas olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşur. Bu üç bileşenin miktarları, farklı sak lifleri arasında önemli ölçüde farklılık gösterir. Örneğin, keten nispeten yüksek selüloz ve düşük lignin içeriğine sahipken; jüt nispeten yüksek bir lignin içeriğine sahiptir. Jüt, %58-63 selüloz, %21-24 hemiselüloz, %12-14 lignin, %0,8-1,5 azotlu maddeler, %0,6-1,2 inorganik maddeler, %0,4-0,8 yağ ve mum içerir. Jüt liflerinin karakteristik özellikleri çoğunlukla selülozun özellikleriyle benzerdir. Jüt lifleri güçlü ama kırılgandır ve bu kırılgan yapısının sebebi liflerin düşük selüloz içeriğinin yanında yüksek lignin içeriğidir, ayrıca jüt lifleri düşük bir kopma uzamasına sahiptir (yaklaşık %1,7).

Jüt dayanıklı, çevre dostu ve anti-statik bir elyafıdır. Jütün yüksek modülü, iyi termal ve elektriksel yalıtım özellikleri, biyolojik olarak parçalanabilirliği, yüksek özgül mukavemeti, ticari olarak kolay bulunabilirliği ve düşük maliyeti, onu, valiz, halı ve çeşitli zemin kaplamaları için tercih edilen lif; panel, asma tavan, mobilya ve kompozitler için en çok tercih edilen doğal takviye malzemelerinden biri yapar. Tüm bu avantajların yanı sıra, jüt lifinin düşük uzayabilirlik, düşük aşınma direnci, yüksek oranda homojen olmama, düşük nem direnci, nemliken mikrobiyal saldırılara karşı düşük koruma ve düşük ıslanabilirlik gibi bazı dezavantajları da vardır. Ayrıca, tüm bitki lifleri gibi, jüt lifinin özellikleri de yetiştirme koşullarına, coğrafi kökenine ve işleme tekniklerine göre değişmektedir (Frollini ve diğ, 2004; Acha ve diğ, 2005; Hasan ve diğ, 2016).

Kompozit yapılarda tekstil malzemeleri; sürekli ya da kesikli lif formunda kullanılabilir. Kesikli lif takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, düzensiz hizalanmaları nedeniyle genellikle sürekli lif takviyeli kompozitlerden daha düşüktür. Sürekli lifler tek, çift veya çok yönlü olarak düzenlenebilir. Dokuma, örme veya diğer

kumaş konstrüksiyonları çift ya da çok yönlü lif yapılarıdır (Lee ve Suh, 2006; Mallick, 2007; Campbell, 2010). Kompozit yapılarda jüt lifi genellikle düşük sıklıklarda dokunan bezayağı kumaş formunda kullanılır.

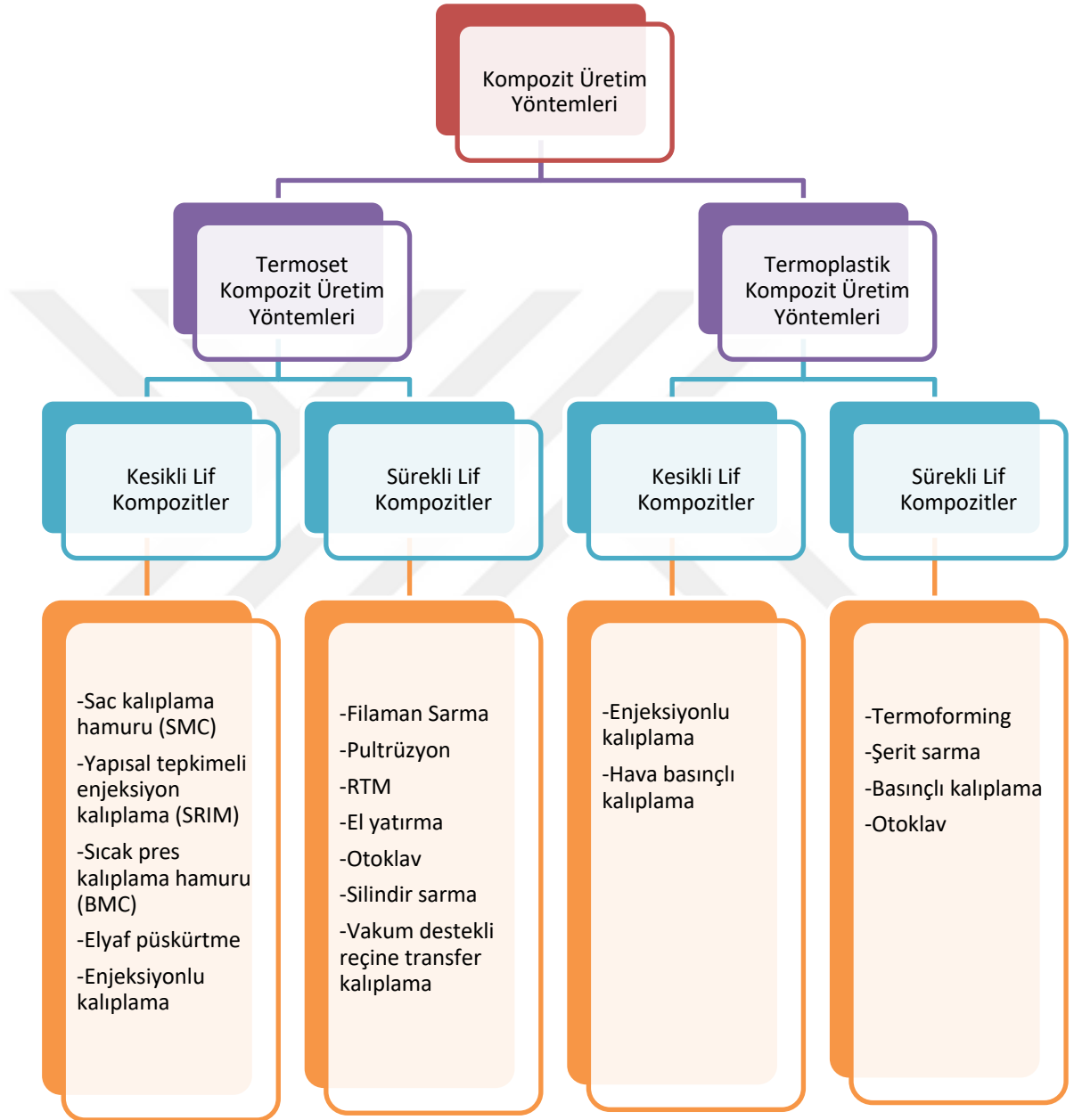
Kumaş takviyeli kompozitler, düzenli hizalanmaları ve yüksek yük taşıma kapasiteleri ile lif takviyeli kompozitlere göre üstün özelliklere sahiptir. Dokuma kumaş, tüm kumaş yapıları (dokuma, örme ve dokusuz yüzey) arasında, bütünlük ve boyutsal stabilite gibi özelliklerinden dolayı en çok tercih edilen takviye formlarından biridir (Lee ve Suh, 2006; Mallick, 2007; Campbell, 2010). Dokuma kumaşlar desenlerine göre bezayağı, dimi ve saten olarak üç ana sınıfa ayrılır. Dengeli iplik dağılımına sahip bezayağı dokuma kumaşlar simetriktir ve bu sayede düzlem içi kesme hareketlerine daha dayanıklıdır. Bu özelliği bezayağı dokuma kumaşları takviye olarak elverişli tekstil yapıları haline getirir (Jose ve diğ, 2012; Campbell, 2010).

2.2 Kompozit Üretim Teknikleri

Her malzeme benzersiz fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir ve bu nedenle malzemeyi son şekle dönüştürmek için uygun bir üretim tekniği kullanılmalıdır. Kompozit üretiminde elyaf, reçine, kumaş ve prepreg gibi çok farklı türde ve özellikte malzemeler kullanılmaktadır ve buna bağlı olarak birbirinden farklı üretim teknikleri tercih edilebilmektedir. Her üretim tekniği, farklı malzeme bileşenleri, farklı işleme koşulları ve parça imalatı için farklı araçlar gerektirir. Şekil 2.1’de, yaygın olarak kullanılan kompozit üretim tekniklerinin bir listesi yer almaktadır.

Bir üretimin başarısı, üretim tekniğinin doğru seçimine ve üretim parametrelerinin uygun olarak belirlenmesine bağlıdır. Üretim tekniğinin seçimi ise parçanın son kullanım alanı başta olmak üzere, üretim hızına, maliyetine, mukavemetine, boyut ve şekline göre farklılaşabilir. Çizelge 2.1’de her bir üretim yöntemi, belirtilen faktörlere göre irdelenmiştir (Mazumdar, 2002). Ayrıca doğru üretim tekniğinin seçimini belirleyen önemli ölçütlerden biri de üretimin güvenilirliği yani her seferinde aynı kalitede üretimin gerçekleştirilebilmesidir. Her tekniğin, parça boyutu, parça şekilleri, parça maliyeti vb. açısından kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin elyaf takviyeli kompozitler için ilk üretim yöntemi olan el yatırma, güvenilir bir süreç olarak tekne üretiminde kullanılır ama doğası gereği çok yavaştır ve yoğun emek gerektirir ve bu nedenlerle özellikle otomotiv başta olmak üzere çeşitli endüstrilerdeki seri üretim ihtiyacını karşılamaktan uzaktır. Bu endüstrilerde ağırlıklı olarak basınçlı

kalıplama, reçine transfer kalıplama, pultrüzyon ve filaman sarma gibi nispeten yüksek üretim oranlarında karmaşık şekillere sahip kompozit parçalar üretme kabiliyeti olan üretim teknikleri kullanılır (Mallick, 2007).



Şekil 2.1 : Kompozit malzeme üretim yöntemleri (Mazumdar, 2002).

Bu tez çalışmasında, belirtilen kriterler çerçevesinde, kompozit üretimi için bir çeşit vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi olan SCRIMP (Seemann Kompozit Reçine İnfüzyon Kalıplama İşlemi) seçilmiştir.

Çizelge 2.1 : Üretim prosesi seçim kriterleri (maliyet kategorisi, üretim ekipmanı tam kapasitede çalışırken gösterilir) (Mazumdar, 2002).

Proses	Üretim Hızı	Maliyet	Mukavemet	Boyut	Şekil	Hammadde
Filaman sarma	Yavaş ila hızlı	Düşük ila yüksek	Yüksek	Küçük ila geniş	Silindirik ve simetrik eksenli	Epoksi ve polyester reçineli sürekli lifler
Pultrüzyon	Hızlı	Düşük ila orta	Yüksek (boyuna yön boyunca)	Uzunluk kısıtlaması yok; kesit küçük ila orta boy	Sabit kesit	Genellikle polyester ve vinilester reçineli sürekli lifler
El yatırma	Yavaş	Yüksek	Yüksek	Küçük ila geniş	Basit ila karmaşık	Epoksi reçineli prepreg ve kumaş
Elyaf püskürtme	Orta ila hızlı	Düşük	Düşük	Küçük ila orta	Basit ila karmaşık	Katalize reçineli kesikli lifler
RTM	Orta	Düşük ila orta	Orta	Küçük ila orta	Basit ila karmaşık	Vinilester ve epoksi ile kalıp ve kumaş
SRIM	Hızlı	Düşük	Orta	Küçük ila orta	Basit ila karmaşık	Poliizosiyanürat reçineli kumaş veya kalıp
Basınçlı kalıplama	Hızlı	Düşük	Orta	Küçük ila orta	Basit ila karmaşık	Kalıplanmış bileşik (ör. SMC, BMC)
Enjeksiyonlu kalıplama	Hızlı	Düşük	Düşük ila orta	Küçük	Karmaşık	Paletler (termoplastik kesikli lifler)
Silindir sarma	Orta ila hızlı	Düşük ila orta	Yüksek	Küçük ila orta	Boru	Prepregler

Vakum destekli reçine transfer kalıplama

Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM), RTM yönteminin bir uyarlamasıdır. Reçine transfer kalıplama özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kabul gören, karmaşık hava motorları ve otomotiv parçaları üretmek için çok sayıda avantaja sahip bir üretim yöntemidir. Aynı şekilde çok yüksek kalitede üretim imkanı sunan otoklav da bu endüstrilerde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak otoklav, yüksek oranda emek gerektiren, zaman alıcı ve maliyetli bir işlemdir. Öte yandan, RTM'de kullanılan metal kalıp takımları da hem maliyetlidir hem de tasarım açısından oldukça karmaşıktır. Dolayısıyla, vakum destekli reçine transfer kalıplama, maliyeti düşürmek ve tasarım zorluklarını azaltmak için geliştirilmiş bir kompozit üretim yöntemidir (Bodaghi, 2020).

RTM'de kullanılan kalıp takımı yerine, VARTM'de tek bir kalıp kullanımı söz konusu olup bu durum maliyet avantajı sağlar. Ayrıca bu yöntem yüksek basınç ve sıcaklık gerektirmediği için kullanılan kalıbın metal olması gerekmemektedir, dolayısıyla bu

da kalıp maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır. VARTM’de kalıbı kapatmak için esnek bir vakum torbası kullanıldığından büyük bileşenlerin kalıp tasarımında çok avantajlıdır. Bu nedenle VARTM, gemi gövdeleri, yel değirmeni bileşenleri ve türbin kanatları gibi büyük kompozit yapıların üretilmesi için, en uygun maliyetli üretim yöntemi olarak kabul edilir (Shah ve Chaudhary, 2020). Bu yöntemin diğer avantajları; malzeme seçiminde ve tasarımında esneklik sağlaması, büyük ve karmaşık kompozit parçalarının yüksek kalitede üretilme imkanı ve organik bileşik buharlaşmasının sadece reçine karıştırma sürecinde oluşmasıdır. VARTM işleminin bu avantajlarının yanı sıra, hatalı elyaf hizalaması ve nihai ürünün boşluklar içermesi gibi kusurları vardır ve hatasız üretim imkansızdır. Özellikle boşluk oluşumu birincil kusurdur. Süreç sırasında reçine akışı, basınç veya sıcaklık değişiklikleri gibi faktörler boşluk oluşumunu başlatır. Malzemedeki boşluk içeriği kompozitlerin mukavemet ve modülünü azaltır ve yük altında erken hasar görmelerine neden olur. Dolayısıyla birincil kusurların (boşluklar) etkisi bilinmeli, tasarım boşlukların oluşumu ile birlikte düşünülmelidir (Dhimole ve diğ, 2021).

Genel olarak, VARTM tekniği, malzeme ve ekipmanları hazırlama süreci de dahil, infüzyon öncesi, infüzyon ve infüzyon sonrası olmak üzere üç adıma ayrılabilir. İnfüzyon öncesi süreçte kalıplar temizlendikten sonra, kalıp ayırıcı sıvı ile kaplanır, sonrasında kalıba takviye malzemesi yerleştirilir ve üzerine ayırıcı kumaş ile üretim tekniğine bağlı olarak akış filesi yerleştirilir. İnfüzyon öncesindeki son adımda kalıp, sızdırmaz bant kullanılarak vakum naylonuyla kaplanır. İnfüzyon aşamasında, vakum pompası tarafından oluşturulan basınç farkı sayesinde reçinenin, kalıbın başından sonuna ilerleyerek takviye malzemesine nüfuz etmesi sağlanır. Emdirilen reçine oda sıcaklığında ya da belirlenmiş olan bir sıcaklıkta kürlenmeye bırakılır, kürlenme süresi seçilen sıcaklığa göre değişkenlik gösterir. Kürlenme tamamlandıktan sonra yani infüzyon sonrası aşamada üretilen parça, kalıptan ayrılır.

Reçineyi takviye malzemesi boyunca dağıtmak için farklı yöntemlerin kullanıldığı VARTM işleminin birkaç çeşidi vardır. Bu yöntemlerden birisi, reçine dağıtımına yardımcı olmak için ayırıcı kumaşının üzerine iletimi yüksek bir tabakanın yerleştirildiği Seemann kompozit reçine infüzyon kalıplama işlemidir. Akış filesi olarak adlandırılan bu katman, reçinenin takviye malzemesinin yüzeyi boyunca hızlı bir şekilde akmasına ve takviye malzemesinin kalınlığı boyunca ıslanmasına olanak tanır (Shah ve Chaudhary, 2020; Dhimole ve diğ, 2021).



3. BİYO-KOMPOZİTLER

Küresel çevre sorunları, çevre dostu malzemelere olan talebi artırmıştır. Buna bağlı olarak günümüzde, makul bir maliyetle geri dönüştürülebilen veya biyolojik olarak parçalanabilen, yenilenebilir hammaddelerden biyo-esaslı malzeme üretimine ilgi yoğunlaşmıştır. Bu çerçevede otomotiv, havacılık gibi kompozitlerin yoğun olarak kullanıldığı endüstriyel sektörler de kullandıkları petrol bazlı geleneksel kompozitlerin yerine yenilenebilir ve çevre dostu malzemeler kullanılarak üretilen alternatif kompozit malzemeler kullanmaya başlamışlardır. Buna göre hem endüstriyel sektörler hem de araştırmacılar doğal liflerle takviye edilmiş doğal veya sentetik reçinelerden oluşan kompozitlerin, yani biyo-kompozitlerin, geliştirilmesine odaklanmaya başlamıştır (John ve Thomas, 2008).

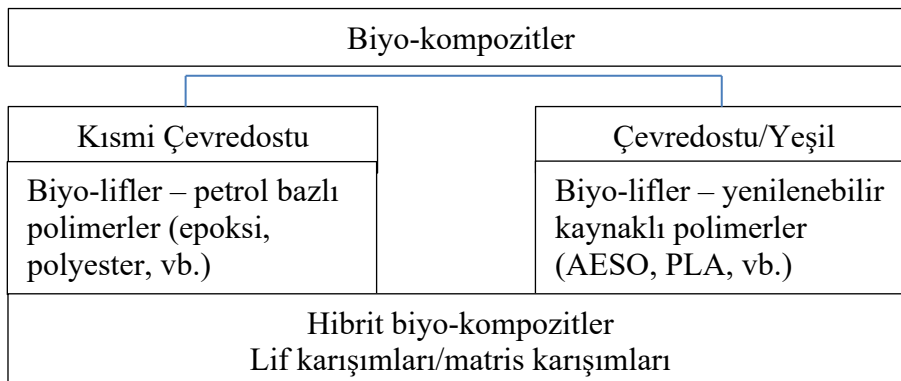
Biyo-kompozitler, biyolojik bir kaynaktan türetilmiş bir veya daha fazla fazı içeren kompozit malzemelerdir (Fowler ve diğ, 2006). Diğer bir ifadeyle biyo-kompozitler, takviye malzemesi ya da matris malzemesinden en az birisinin yenilenebilir kaynaklardan elde edildiği kompozitlerdir. Elyaf takviyeli biyo-kompozitler, takviye malzemesi biyolojik kaynaklıyken (doğal lifler) matris malzemesi biyolojik olarak parçalanamayan polimerlerden üretilebileceği gibi hem takviye hem matris malzemesi biyolojik kaynaklı olarak, yani biyo-polimerler ve doğal elyaf bileşenleri ile de üretilir (Fowler ve diğ, 2006; Mohanty ve diğ, 2005).

Takviye malzemesi olarak kullanılan doğal lifler, pamuk, keten, kenevir, jüt ve benzerleri gibi bitkisel lifleri, geri dönüştürülmüş odun ya da atık kağıttan elde edilen lifleri veya gıda mahsullerinden elde edilen yan ürünleri içerebilir. Biyolojik olarak parçalanabilen doğal polimerler canlı organizmalarda bulunan veya onlar tarafından oluşturulan polimerlerdir. İki ana doğal polimer türü vardır: canlı organizmalardan gelenler (bunlar karbonhidrat ve protein içerir) ve polimerleştirilmesi gereken ancak yenilenebilir kaynaklardan gelenler (örneğin laktik asit ve trigliseritler). Her iki tip de biyo-polimer üretiminde kullanılmaktadır (John ve Thomas, 2012). Biyolojik olarak parçalanamayan polimerler ise petrolden türetilmiş olanlardır. Doğal polimerlerin ve yaygın kullanılan sentetik polimerlerin listesi Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Doğal ve sentetik polimerlerin sınıflandırılması (John ve Thomas, 2008).

Doğal Polimerler	Sentetik Polimerler
Polisakkaritler Nişasta Selüloz Kitin	Poli(etilen teraftalat)
Proteinler Kolajen/jelatin Kazein, albumin, fibrojen, ipek	Polietilen
Polyesterler Polihidroksialkonatlar	Poli(vinil klorid)
Diğer polimerler Lignin Yağlar Şellak (gomolaka) Doğal kauçuk	Polipropilen Polistiren Poli(tetrafloretilen) Poliüretan Poliamid Poliakrilamid

Son zamanlarda araştırmalar, biyo-kompozitler içinde yeni bir sınıf olarak isimlendirilen “yeşil” kompozitler üzerinde yoğunlaşmıştır. Yeşil kompozitler, doğal lifleri, biyolojik olarak parçalanabilir reçinelerle birleştirerek, biyolojik olarak tamamen parçalanabilen şekilde üretilmiş biyo-kompozitlerdir. Yeşil kompozitlerle ilgili en önemli unsurlar sürdürülebilir kaynaklardan üretilmeleri ve tamamen parçalanabilir; yani ömrünün sonunda, çevreye zarar vermeden kolayca bertaraf edilebilir veya kompostlanabilir olmalarıdır (Baillie, 2004; John ve Thomas, 2008). Bu doğrultuda, biyo-kompozitlerin bileşenlerine göre sınıflandırılmasına, Şekil 3.1’de yer verilmiştir.



Şekil 3.1 : Biyo-kompozitlerin sınıflandırılması (Mohanty ve diğ, 2005).

Biyo-kompozitlerin uygulama alanları

Kompozitler, eğlence sektöründen inşaat sektörüne kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılan ve kullanımı giderek artan önemli bir mühendislik malzemeleri sınıfıdır. Sentetik kompozitler olarak bildiğimiz "modern" kompozitler, yirminci yüzyılın başlarında cam elyafın ticari olarak piyasaya sürülmesi ve eşzamanlı olarak doymamış polyesterler ile epoksiler gibi "soğuk sertleşen" sentetik reçinelerin ya da sentetik polimerlerin keşfinden beri mükemmel spesifik özellikleri sayesinde özellikle otomotiv, nakliye ve havacılık gibi ağırlık faktörünün maliyetler üzerinde kayda değer etkisi olan sektörlerde, yoğun biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, ömrünün sonunda bertaraf edilemeyen, yenilenemeyen fosil-bazlı hammaddelerden üretilen bu kompozit malzemeler çevresel açıdan önemli bir sorun teşkil etmektedirler. Bu durum, doğal ve yenilenebilir kaynaklara dayalı, ömrünün sonunda bertaraf edilebilen veya geri dönüştürülebilen biyo-kompozit malzemelere yönelinmesine yol açmıştır (Hughes, 2004).

Eski çağlarda, saman takviyeli kerpiçlerden kompozit yaylara kadar, çok sayıda örneği bulunabilecek biyo-kompozitlerin kullanımı söz konusudur (Gordon, 1999). Günümüzde ise doğal lif takviyeli biyo-kompozitlerin kullanımı neredeyse tüm alanlara yayılmıştır ama endüstriyel uygulamada özellikle gıda ambalajı, otomotiv, inşaat, kozmetik, havacılık, elektrik ve elektronik sektörlerinde kullanılmaktadır (Saba ve diğ, 2014). Elyaf takviyeli polimer biyo-kompozitler, inşaat alanında bina bölümleri için yapısal panel olarak kullanılmalarının yanı sıra köprü ve binalardaki yük taşıyıcı elemanlar için de ekonomik yapı malzemelerini oluşturmaktadır. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin kullanımından bu yana inşaat sektörünün güvenliği, ekonomisi ve işlevselliği gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında önemli başarılar elde edilmiştir. Elyaf takviyeli kompozitlerin inşaat sektöründe kullanımı polimer matris ile kısıtlı kalmamakta, elyaf takviyeli çimentolar da bu alanda önemli avantajları sebebiyle tercih edilir olmaktadır. Çimentonun kenevir, keten ve jüt gibi doğal liflerle takviye edilmesine yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur. Söz konusu çalışmalarda, çimentonun doğal elyaflarla güçlendirilmesinin çimento harcının fiziksel ve mekanik özelliklerini artırdığı görülmüştür (Mokhothu ve John, 2017). Öte yandan literatürdeki çalışmalarda bir başka inşaat sektörü uygulama alanı olarak çatı yapılarında da geri dönüştürülmüş karton kutulardan elde edilen selüloz lifi takviyeli soya yağı bazlı

reçineli biyo-kompozitlerin kullanılabilceğı sonucuna varılmıştır (Dweib ve diğ, 2006).

Son birkaç on yılda, endüstriyel ürünlerin imalatında doğal elyaf takviyeli kompozitin kullanımı çok hızlı bir şekilde artmış ve otomotiv endüstrisi, doğal elyaf takviyeli kompozitlerin kullanımına öncülük eden en önemli sektör haline gelmiştir. Otomotiv endüstrisi, otomobil bileşenlerini ve aksesuarlarını üretmek için çok büyük miktarda ve çeşitlilikte malzeme kullanan bir endüstridir. Son zamanlarda Ford, Chevy gibi Amerikan otomotiv devlerinin otomobillerinde farklı polimerik matris malzemelerinin kenaf, lif, kenevir, jüt ve sisal lifleri gibi doğal lifler ile takviye edildiğı biyo-kompozitlerin kullanımı önemli oranda artmıştır (Potluri ve Krishna, 2020).

Yapımında yoğun olarak biyo-kompozit malzemeler kullanan ilk araba Doğu Almanya'da üretilen "Trabant" olup, bu arabanın gövdesi, galvanizli çelikten oluşan alt çerçevesine vidalanan, polyester matris içine gömülü pamuk liflerinden üretilmiş biyo-kompozit panellerden oluşmaktadır (Suddell ve Evans, 2005). Bununla birlikte, doğal elyaf takviyeli kompozit bileşenleri otomotiv uygulamalarına dahil etme eğilimi, ciddi anlamda ancak 1990'ların ortalarında başlamıştır. Geleneksel olarak kullanılan cam elyafı yerine doğal elyafların kullanılmasında, ağırlık tasarrufu (doğal elyafın yoğunluğu, cam elyafının yoğunluğunun yaklaşık %60'ıdır), hammadde maliyetinin düşürülmesi, malzemenin geri dönüştürülebilme yeteneğı ve "çevre dostu" oluşunun bir pazarlama etkisi yaratması gibi avantajlar görülmüştür (Hughes, 2004). Almanya'daki neredeyse tüm büyük otomobil üreticileri (Daimler Chrysler, Mercedes, Volkswagen, Audi Group, BMW, Ford ve Opel) çeşitli uygulamalarda biyo-kompozit malzemeleri tercih etmektedir. Daimler Chrysler, polipropilen ve doğal liflerin kullanıldığı gösterge ve kapı panelleri gibi iç kaplama bileşenlerinde biyo-kompozit kullanırken, Mercedes, 1996 yılında E sınıfı araçlarında jüt bazlı kapı panelleri kullanmıştır. Audi de 2000 yılında, kapı döşeme panellerinin, keten/sisal karışımı ile güçlendirilmiş poliüretandan yapıldığı A2 model orta sınıf otomobilini piyasaya sürmüştür (Ashori, 2008; Pervaiz ve Sain, 2003). Otomotiv endüstrisinde dış mekan uygulamaları için de biyo-kompozit kullanımı söz konusudur. Örneğin Daimler Chrysler buna yönelik olarak keten takviyeli polyester kompozitler üzerinde çalışmalar yürütmektedir (Ashori, 2008).

Otomotiv sektörü tüm dünyada endüstriyel atığın yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. Ömrünü tamamlamış araçlar (ELV) tehlikeli atık olarak sınıflandırılmakla birlikte, bu

araçların bertaraf edilmesi ya da geri dönüşümü uygun şekilde gerçekleştirilmediği takdirde, ciddi çevresel kirliliğe yol açmaktadırlar. 2020 yılı için ELV sayısının yılda yaklaşık 80 milyon birime yükseleceği öngörülmüştür. Avrupa Birliği'nin Ömrünü Tamamlamış Araç Direktifi bu hızla büyüyen atık akışını etkin bir şekilde yönetmek için çıkarılan yasalardan biridir (Karagöz ve diğ, 2019). Bu direktif, 2000 yılında yürürlüğe girmiş ve üye ülkelere tanınan uyum süreci sonunda 2005 yılında birliğe üye ülkelerde uygulanmaya başlanmıştır. Bu direktif üreticilere ömrünü tamamlamış araçların bertarafından doğacak maliyetin önemli bir kısmını ya da tamamını karşılama zorunluluğu getirdiği gibi araçlarda yeniden kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanım (enerji geri kazanımı dahil) oranının toplamda %95 olmasını şart koşturmaktadır. Özünde bu mevzuat, üreticilerin atık haline geldiklerinde ürünlerinin sorumluluğunu üstlenmeleri, araçlarında tehlikeli maddelerin kullanımını sınırlandırmaları, araçlarını giderek daha fazla geri dönüşümlü olarak tasarlamaları ve buna bağlı olarak araçlarında daha fazla geri dönüştürülmüş veya dönüştürülebilir malzeme kullanması gerektiği anlamına gelir (Kirwan ve Wood, 2012). Bu durumun üreticileri, araçların tasarlandığı, üretildiği ve nihayetinde imha edildiği yöntemler hakkında radikal düşünmeye zorlayacağı ve bunun bir sonucu olarak da biyo-kompozitlerin daha fazla kullanılmasına olanak tanıyacağı aşîkardır.

Biyo-kompozitlerin bir diğfer önemli kullanım alanı havacılık sektörüdür. Bu alanda, karbon fiber, metal alaşımları ve hibrit laminatlar gibi geleneksel olarak kullanılan malzemelerin yerine doğal elyaf takviyeli kompozitlerin kullanılması; yüksek özgül mukavemet ve sertlik, aerodinamik tasarım avantajı, düşük ağırlık sayesinde yakıt tüketiminde ve emisyonunda azalma, biyo-bozunurluk ve korozyon sorunu olmadığı için havayolu bakım maliyetinin düşük olması gibi avantajlar sunar. Havacılık sektöründe potansiyel olarak yapısal uygulamalarda kullanılabilen ilk kompozitlerden biri "Gordon-Aerolite" tır. Bu, fenolik reçine ile emdirilmiş keten ipliğinden oluşan bir kompozit olup bu malzemeden bir dizi prototip uçak yapısal bileşeni üretilmiştir. Bunlardan ilki, Bristol Blenheim için bir kanat direğidir. Bunun yanı sıra, Supermarine Spitfire avcı uçağı için deneysel bir uçak gövdesi üretimi de söz konusudur. Ne var ki sağladıkları birçok avantaja rağmen biyo-kompozitlerin performansları yapısal parçalarda aranan uçuşa elverişlilik ve güvenlik standartlarını karşılayamamaktadır. Bu sebeple havacılık sektöründeki biyo-kompozitler kabin içi paneller gibi yapısal olmayan ya da yarı yapısal uygulamalarda enerji verimliliğini ve yakıt ekonomisini

artırmaya yardımcı malzemeler olarak kullanılmaktadır. Havacılık, otomotiv, spor malzemeleri, tüketim malları ve yapılarda kullanılabilecek biyo-kompozit ürün pazarlarını büyütmek için, biyo-kompozitlerin güvenilirlik standartlarına, daha yüksek performansa ve servis edilebilirliğe ulaşması gerekir (Mokhothu ve John, 2017; Hughes, 2004).



4. MEVCUT ÇALIŞMALAR

Williams ve Wool (2000) yaptıkları çalışmada değişen oranlarda keten ve kenevir lifleri ile AESO'nun ağırlıkça 100:45:5 oranında stiren ve divinilbenzen ile harmanlanmasıyla elde edilen reçinesini kullanarak, RTM işlemi ile biyo-kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretimi bir saat boyunca 90°C'de kür işlemi uygulayarak gerçekleştirmiş ve sonrasında yine bir saat boyunca 110°C'de ardıl-kürleme gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, keten lifli kompozitler içinde en yüksek çekme dayanımı 30 MPa ile %34'lük lif içeriğinde elde edilirken, çekme modülü lif içeriği arttıkça artış göstermiş ve en yüksek değer %40 lif içeriğinde 4,7 GPa olarak gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en iyi eğilme akma mukavemeti ve eğilme elastisite modülü sırası ile 64 MPa ve 4,2 GPa ile %34'lük lif içeriğinde ölçülmüştür. Kenevir içerikli kompozitlerde ise benzer değerler %20 lif içeriğinde gözlenmiştir. Ürettikleri biyo-kompozitlerin mekanik özellikleri göz önüne alındığında; bu malzemelerin otomotiv endüstrisi, tarım araçları, mobilya, inşaat endüstrisi ve ayrıca ofis ürünleri gibi birçok alanda kullanılabilecek yüksek performanslı malzemeler olduğunu belirtmişlerdir.

Hong ve Wool (2005) yaptıkları çalışmada keratin lifleri ve farklı soya fasulyesi yağlarının (AESO ve soya fasulyesi yağı pentaeritritol gliserid maleatlar; SOPERMA) ağırlıkça %33 stiren komonomeri ile hazırlanmış reçinelerinden, VARTM yöntemi ile biyo-bazlı ve çevre dostu kompozit malzemeler geliştirmişlerdir. Kullanılan farklı modifikasyon ve aktivasyon ajanlarının farklı kürleşme dinamikleri oluşturması dolayısıyla AESO ve SOPERMA reçineleri ile üretilen kompozitler sırasıyla 90°C'de 3 saat ve 120°C'de 3,5 saatte kürlenmiş, sonrasında yine sırası ile 120°C'de 2 saat ve 150°C'de 1 saat ardıl-kürleme yapılmıştır. Keratin liflerinin boşluklu yapısı nedeniyle kompozitlerin lif içeriği arttıkça, yoğunluğu 1g/cm³'den az olan kompozitler üretilebilmiştir. Kompozitin su emiciliği, hidrofobik AESO varlığına rağmen, lif içeriğinin artması ile artarak %0,5'ten %6 seviyesine çıkmıştır; dolayısıyla kompozitlerin difüzyon katsayılarının keratin lifi içeriğine bağlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca lif içeriğinin artmasıyla AESO kompozitinin depolama modülünde anlamlı bir

artış görülmüştür (Lif içeriği ağırlıkça %30 olan kompozitin depolama modülü, saf AESO polimerine kıyasla %58,8 artmıştır). Lif içeriğinin değişmesi ile kompozitin camsı geçiş sıcaklığında (T_g) bir değişim olmazken, kompozitlerin kırılma tokluğu ve kırılma enerjisinde artış gözlenmiştir. Üretilen kompozitlerin, otomotiv, tarım ekipmanları, savunma, havacılık, altyapı, konut inşaatı uygulamalarında önemli olan mukavemet, sertlik, titreşim sönümleme ve yoğunluk gibi fiziksel performans özellikleri taşıdıkları görülmüştür.

Grishchuk ve Karger-Kocsis (2011) yaptıkları çalışmada stirenle (ağırlıkça ~%30 seyreltilmiş stiren) çapraz bağlanabilir bisfenol-A tipi vinil ester (VE) ve AESO'dan oluşan ve VE/AESO oranının ağırlıkça 75/25, 50/50 ile 25/75 olduğu hibrit matris sistemleri üretmişlerdir. Üretilen malzemelerin yapısı, dinamik mekanik termal analiz (DMTA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), çeşitli mekanik testler ve termogravimetrik analiz (TGA) ile incelenmiştir. Sonuçlar, hibrit matris sisteminden elde edilen malzemelerin içe geçen bir ağ yapısına sahip olduğunu göstermiş ve buna bağlı olarak artan AESO içeriği ile malzemenin modülünün ve çekme mukavemetinin yanı sıra T_g 'nin azaldığı, sünekliğinin ise arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, artan AESO içeriği ile hem kırılma tokluğu hem de kırılma enerjisi artmıştır. Hibrit matris sisteminin, termal bozulmaya karşı direnç açısından saf VE ve AESO'dan daha iyi performans gösterdiği de gözlemlenmiştir.

Ratna'nın (2001) yaptığı çalışmada epoksi reçinelere kırılma dayanıklılığı kazandırmak için faz ayrımı yapabilme özelliği sebebiyle kullanılan ancak oksidatif ve kanserojen etki gösteren reaktif sıvı kauçuk, termoplastik malzeme veya çekirdek-kabuk parçacıklarına alternatif olarak, yeni bir reçine sistemi tasarlanmıştır. Bu reçine sistemi için sertleştirici (trietilentetramin, TETA) ile ortam sıcaklığında kürlenen epoksi (DGEBA) ve ESO farklı karışım oranlarında bir araya getirilmiş, bu karışım oranlarının termo-mekanik özelliklere ve morfolojiye etkisi incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, artan ESO oranı ile karışım reçinelerin T_g değerinin düştüğü, çekme mukavemetinin kademeli olarak azaldığı, kopma uzama yüzdesinin ise arttığı gözlenmiştir. Eğilme özellikleri de benzer sonuçlara sahiptir. Bu bulgulara ek olarak ESO, doğrudan epoksi reçine ile karıştırıldığında ve oda sıcaklığında sertleştirici ile kürlendiğinde, faz ayrımı gerçekleşmemiş ve ESO'nun plastikleştirici görevi üstlendiği görülmüştür. Ancak kırılma yüzeyi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendiğinde, ESO'nun amin sertleştirici ile ön-polimerizasyonundan sonra

kullanımında faz ayrılması sağlandığı gözlenmiştir. Faz ayrımlı ağların, tek fazlı morfolojiye sahip ağlardan daha yüksek darbe dayanımı gösterdiği ve ağırlıkça %20 ESO oranında, en iyi darbe dayanımı performansını verdiği sonucuna varılmıştır.

Sahoo ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada epoksi (DGEBA) ve %20 ESO içeren reçineyi ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında kısa sisal lifleriyle takviye edip sertleştirici (TETA) ile kürleyerek çeşitli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Epoksi/ESO karışımı kompozitlerin, ESO'nun plastikleştirme etkisi ve düşük çapraz bağ yoğunluğu nedeniyle, saf epoksiye kıyasla çekme dayanımının ve çekme modülünün sırasıyla 55,1'den 30,2 MPa'ya ve 2,10'dan 1,35 GPa'ya düştüğü görülmüştür. Sisal liflerinin matrise kademeli dahil edilmesi, matristen liflere gerilim aktarımına neden olmuş, böylece çekme modülünü kademeli olarak artırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, ağırlıkça %15 lif içeriğinde, %83,4 modül artışı elde edildiği görülmüştür. Benzer şekilde, kopma uzaması ile çekme mukavemetinde de %15'lik bir gelişme gözlenmiştir. Ayrıca, ESO'nun ve sisal liflerinin dahil edilmesinin, ısıl bozulma oranını azalttığı ve aynı zamanda bozunma sıcaklığını daha yüksek değere kaydıracağı, böylelikle biyo-kompozitin gelişmiş termal stabilite sağladığı görülmüştür. Kompozitin depolama modülü liflerin katılımı ile iyileşmiş, tan delta eğrisi ise genişlemiştir ki bu durum, liflerin daha fazla stres taşıdığını göstermektedir. ESO ve sisal liflerinin eklenmesiyle saf epoksiye göre temas açısının 77°'den 67°'ye düştüğü görülmüştür. Ayrıca yapılan morfolojik incelemede, liflerin harman reçine ile iyi bir arayüzey yapışmasını gerçekleştirdiği görülmüştür. Tüm bunların sonucunda üretilen biyo-kompozitin, otomotiv ve inşaat uygulamaları için yeterli mukavemet, modül ve tokluğa sahip olduğu ve de üretilen parçaların daha hafif olmasının araçların yakıt verimini artıracığı belirtilmiştir.

O'Donnell ve diğ. (2004) yaptıkları çalışmada keten, selüloz, geri dönüştürülmüş kağıt hamuru ve kenevirden yapılmış doğal elyaf içerikli yüzeyler ve AESO reçinesi ile büyük yapılarda (evler, kamyonlar ve otomotiv parçaları) kullanıma yönelik kompozit paneller üretmişlerdir. AESO reçinesini ilk önce artan oranda stiren ile karıştırarak özelliklerini test etmişler ve artan stiren oranının saf AESO'nun depolama modülü ile T_g değerini artırdığını görmüşlerdir. Optimum özellikleri ağırlıkça %33,3 stiren içeren karışımda elde etmişlerdir. Daha sonra bu reçine karışımına başlatıcı olarak ağırlıkça %3 kumil peroksit eklenmiştir. Bu karışım oranında hazırladıkları AESO reçinesinin T_g değeri 66°C ve depolama modülü 1,1 GPa olarak tespit edilmiştir. Doğal elyaf

takviyesi ağırlıkça yaklaşık %20-57 aralığında kullanılmıştır. Büyük ölçekli kompozitlerin, yüksek sıcaklıkta kürlemesi maliyet açısından verimsiz olacağından, kürleme oda sıcaklığında ve büyük yapılar için en verimli üretim yöntemlerinden biri olan VARTM yöntemi kullanarak gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemesinin, %33,3 stiren içerikli AESO'nun 66°C'lik T_g 'sinde anlamlı bir değişikliğe neden olmadığı ancak kullanılan takviye malzemesine bağlı olarak, %33,3 stiren içerikli AESO'nun 1,1 GPa olan depolama modülünü 1,5 ile 6 GPa arasındaki bir aralığa yükselttiği görülmüştür. Boşluk içeriğinin, vakum infüzyonu kullanılarak yapılan kompozitler için kabul edilebilir bir aralık içinde olduğu tespit edilen bu düşük maliyetli biyo-kompozitlerin, inşaat malzemeleri, mobilya ve otomotiv gibi uygulamalar için uygun mekanik dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir.

Ramamoorthy ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada matris malzemesi olarak AESO ile ağırlıkça %2 oranında çapraz bağlayıcı (tert-butyl peroksi benzoat, TBPB), takviye malzemesi olarak ise Liyosel ve viskon içerikli dokusuz yüzeyler kullanarak biyo-kompozitler üretmişlerdir. Lif içeriği, ağırlıkça %40-60 olacak şekilde yalnızca Liyosel veya viskon lifinden ya da bu liflerin karışımından oluşmaktadır. Çekme, üç nokta eğilme, Charpy darbe testi ve dinamik mekanik analiz (DMA) analizlerinden elde edilen sonuçlarda, artan Liyosel takviye oranının çekme mukavemeti ile modülünü artırdığı görülmüş ve en yüksek değerler, sırasıyla yaklaşık 135 MPa ve 17 GPa'lık olarak, ağırlıkça %60 lif içeriğine sahip yani sadece liyosel takviyesi içeren kompozitlerde (LFRC) tespit edilmiştir. DMA sonuçları, LFRC'in iyi viskoelastik özelliklere sahip olduğunu gösterirken, viskon elyaf takviyeli kompozitlerin (VFRC) ise yüksek bir uzama yüzdesine sahip olduğu ve ayrıca nispeten iyi bir darbe mukavemeti ve eğme modülü sergiledikleri sonucuna varılmıştır. Ayrıca SEM analizi değerlendirildiğinde, matrisin her iki lif ile de uyumlu olduğu ancak VFRC'nin, LFRC'den daha az gözenekli ve de daha geniş bir arayüz alanına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Altuna ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada epoksinin (DGEBA) artan miktarlarda ESO ile değiştirilmesiyle elde edilen reçinelerin özelliklerine odaklanmışlardır. Çapraz bağlama maddesi olarak stoikiyometrik miktarda metiltetrahidroftalik anhidrit (MTHPA) ve katalizör olarak katalitik miktarda (anhidrit ağırlığına göre ağırlıkça %3) 1-metil imidazol (1-MI) kullanılmıştır. Reçine formülasyonlarında DGEBA'nın yerini almak için ağırlıkça %20, 40, 60, 80 ve 100 ESO kullanılmıştır. Üretilen malzemelere

DMA'nın yanı sıra DSC, Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve Charpy darbe dayanımı analizleri de yapılmıştır. DMA analiz sonuçlarından elde edilen veriler, camsı geçiş bölgesinde depolama modülünün ve T_g değerinin ESO miktarının artması ile azaldığını ve plastik bölgede depolama modülünün hemen hemen sabit kaldığını göstermiştir. Kayıp modülü veya $\tan \delta$ eğrilerinde T_g dışında başka hiçbir termal olay tespit edilmemiştir. Mekanik özellikleri incelendiğinde, %40 ESO içeren formülasyonun en iyi özellikleri sergilediği görülmüştür; camsı geçiş bölgesinde depolama modülü saf DGEBA'nın %93'ü olarak gözlemlenmiş yani saf DGEBA'ya kıyasla neredeyse değişmemişken, darbe dayanımı saf DGEBA'ninkine ($0,29 \pm 0,08 \text{ J/m}^2$) kıyasla yaklaşık %38 yükselmiş ve T_g yalnızca 11°C azalmıştır. Performans özellikleri ve çevreci yanı göz önüne alındığında ESO'nun, petrol bazlı matris sistemleri yerine kullanılmasının mümkün olabileceği belirtilmiştir.

Seabra ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada yenilenebilir malzemelerden (reçine olarak AESO, takviye malzemesi olarak jüt ve dolgu malzemesi olarak sisal parçacıkları) yeşil bir kompozit üreterek kimyasal (ATR-FTIR), fiziksel (su emicilik) ve mekanik (çekme mukavemeti ve sertlik) performanslarının yanı sıra malzemelerin geri dönüştürülebilirlik ve yeniden kullanım özelliklerini incelemişlerdir. Takviye olarak kullanılan jüt kumaş tüm üretimlerde 5 kat olacak şekilde uygulanmış, matris ise AESO ile ağırlıkça %0, %5 ve %10 sisal parçacıkları ve ağırlıkça %2, %5 ve %10 sertleştiricinin (TBPB) kombinasyonları şeklinde hazırlanmıştır. Geri dönüşüm işlemi, kürlenmiş AESO reçine ve kompozit numunelerinde, yedi organik çözücü, (etanol, 1-butanol, aseton, metil asetat, etil asetat, diklorometan ve kloroform) kullanılarak oda sıcaklığı ve atmosferik basınçta gerçekleştirilmiştir; numuneler 20 ml saf çözücü içeren kaplara daldırıldıktan sonra çözünme ve matris parçalanması, 24 saat süreyle izlenmiştir. Ayrıca geri dönüştürülmüş kaynaklar kullanılarak tekrar kompozitler üretilmiş ve bu kompozitlerin performans özellikleri de incelenmiştir. Takviye malzemesi içermeyen numunelere yapılan testlerde sertleştirici miktarının değişimi AESO'nun su emiciliğini etkilemezken (%2, %5 ve %10 sertleştirici oranları için sırasıyla 0,27, 0,29 ve 0,31) sisal parçacıkları eklemesi su emiciliği belirgin şekilde artırmıştır (değişen sertleştirici oranına bağlı olarak %5 eklemede 2-2,7 arasında, %10 eklemede 3,9-4,8 arasında). Hem sertleştirici hem de sisal parçacık eklentisinin artması sertliği artırırken, çekme mukavemetini düşürmüştür. %5 sertleştirici ve %10 sisal (H5SP10) içeren numunelerin en iyi Shore A sertlik (91) ve çekme mukavemeti

(10,6 MPa) değerlerine sahip olduğu sonucu elde edilmiştir. Öte yandan, geri dönüştürülmüş numunelerde sertlik değerlerinin yaklaşık %4 daha düşük olmasına ve çekme mukavemetinin bileşime göre değişmesine rağmen, su emilimi anlamlı ölçüde azalmıştır (%22 ila 51 aralığında). Bu sonuç, geri dönüştürülmüş yeşil kompozitlerin başta nakliye, paketleme ve mobilya gibi alanlar olmak üzere birçok kompozit uygulamasına uygun olabileceğini göstermiştir.

Liu ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada biyo-kompozitlerin üretimi için matris olarak dört farklı biyo-bazlı termoset reçine (AESO, bir komonomer olarak metakrilat izosorbit (MI) içeren AESO (MI-AESO), MI içeren metakrilatlı AESO (MI-MAESO) ve MI) ve takviye malzemesi için iki farklı doğal lif (bambu lifleri (BF) ve kenevir lifleri (HF) kullanmıştır. Sertleştirici olarak tüm termosetlerde ağırlıkça %2 TBPB eklenmiştir. Elyaf tipi ve reçine bileşiminin, elde edilen kompozitler üzerindeki sinerjistik etkileri; elyaf ve reçinelerin özelliklerinin analizlerinin yanı sıra kompozitlerin yoğunluk, eğilme dayanımı, dinamik mekanik özellikleri ve su emme kapasiteleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar lif ve reçine özellikleri ile bunların ara yüzey bağlanmasının, elde edilen kompozitlerin nihai özelliklerinde önemli rol oynadığını göstermiştir. HF kompozitler, daha yüksek selüloz içeriği, uzunluk-genişlik oranı ve üstün arayüzey yapışması sayesinde BF kompozitlere göre çok daha yüksek fiziksel ve mekanik özellikler ve su direnci göstermiştir. Daha yüksek çapraz bağlanma yoğunluğuna ve sertliğe sahip reçinelerle, yani MI-AESO, MI-MAESO ve MI ile üretilmiş kompozitlerin, AESO reçinesi ile üretilmiş kompozitlere kıyasla ölçüde daha yüksek mukavemet, modül ve T_g 'ye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, elyaf özelliklerinin reçine bileşimine kıyasla kompozitlerin su emilimi üzerinde daha fazla etkisinin olduğu görülmüştür. Sonuç olarak üretilen biyo-kompozitlerin, yüksek biyo-bazlı içeriğine rağmen, petrol bazlı benzerleriyle karşılaştırılabilir veya üstün özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir.

Fei ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, AESO bazlı, suda çözünebilen, stiren içermeyen ve üstün mekanik özellikler sergileyen termoset kompozitler üretmişlerdir. Takviye malzemesi olarak, ağırlıkça %30 geri dönüştürülmüş polietilen tereftalat (PET), %15 bambu, %30 polyester ve %25 ES (Ethylene-Propylene Side by Side) elyafının iğneleme yöntemi ile oluşturulmuş dokusuz yüzeylerini (rPET-B-P-ES) kullanmışlardır. Matris sisteminde AESO'yu sertleştirmek için toksik stirenin yerine metakrilik anhidrit (MAA) ile sentezlenmiş gliseril trimetakrilat (GTMA)

kullanmışlardır ve ağırlıkça %20 (GTMA-20), %30 (GTMA-30), %40 (GTMA-40) konsantrasyonlarında üretilen kompozit numunelerin özelliklerini %30 stiren (Stryene-30) ile hazırlanan kompozit numunelerin özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Kimyasal analizler için FTIR, reolojik özellikler için akışölçer (reometre), mekanik ve ısı özellikler için DSC, DMA ve TGA testlerinin yanı sıra üretilen kompozitlerin uçuculuk ve suda çözünürlük analizleri de gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre buharlaşma dolayısıyla oluşan ağırlık kaybı GTMA'larda hem çok uzun sürede (600 dakika) gerçekleşmiş hem de yok denecek oranda (yaklaşık %4) bulunmuşken bu süre Stryene-30'da 69 dakika ve oran %16 olarak elde edilmiştir. Üstelik stiren içeriğinin yarıdan fazlasının (%51,03) buharlaştığı görülmüştür. Hazırlanan GTMA'ların üstün tokluk ($\sim 50 \text{ kJ/m}^2$ darbe dayanımı), yeterli çekme mukavemeti ($\sim 30 \text{ MPa}$) ve T_g ($>110^\circ\text{C}$) sergilediği görülmüş ve bu değerlerin (GMTA'nın artan içeriğine paralel olarak artan) Stryene-30'ununkiye neredeyse denk ya da daha iyi olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber, kompozitteki çapraz bağlanmış polimer matrislerin kullanım sıcaklığında stabil kaldığı ancak suda 190°C 'de otokatalitik bir şekilde bozundukları görülmüştür. Bu durumun, sürdürülebilir taleplerin karşılanması için yenilenebilir ve geri dönüştürülebilir polimer kompozitler geliştirmek adına ümit vadeci olduğu sonucuna varılmıştır.

Chen ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada vanilil alkolden MAA ile solvent içermeyen bir yöntemle sentezledikleri biyo-bazlı bir monomer olan metakrilat vanilil alkolü (MVA), AESO ile kopolimerize ederek biyo-bazlı bir reçine (MVA-AESO) hazırlamışlardır. Ayrıca MVA sentezinin fazla MAA'sını kullanarak daha yüksek bir doymamışlık derecesine sahip reçine (MVA-MAESO) hazırlamışlardır. MVA-AESO ve MVA-MAESO'yı viskozite, kürlenme performansı, mekanik ve ısı özellikleri açısından saf AESO ve MVA reçineleri ile karşılaştırmışlardır. MVA-AESO ve MVA-MAESO reçineleri, MVA'nın seyreltilmesi nedeniyle saf AESO'dan çok daha düşük viskozite göstermiştir. MVA-MAESO reçinesinde, daha yüksek düzeyde C=C bağları gözlenmiştir. Buna ek olarak, reçineye MVA'nın dahil edilmesi kürlenme sıcaklıklarını ve aktivasyon enerjilerini düşürmüş ve bu da MVA-AESO ile MVA-MAESO'nun saf AESO'dan daha yüksek bir kürlenme derecesine sahip olmasını sağlamıştır. MVA ve MAA modifikasyonunun birleşimiyle, esnek AESO ağları üstün eğilme özellikleri (eğilme mukavemeti ve eğme modülü sırasıyla yaklaşık 35 MPa ve 2000 MPa), depolama modülü (2110 MPa), T_g ($145,8^\circ\text{C}$) ve termal stabilite sergilemiştir. Ayrıca,

biyo-bazlı reçinelerin biyolojik olarak parçalanması da araştırılmış ve sonuçlar, monomer ilavesinin ve C=C bağlarının içeriğindeki artışın, AESO'nun biyolojik olarak parçalanabilirliğini önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Elde edilen tüm bu bulgular, yüksek verimde üretilebilirliği, yenilenebilirliği, bozunabilirliği ve düşük uçucu organik bileşeni ile çevre dostu bu reçinenin petrol-bazlı termosetlerin yerini alabileceğini göstermiştir.

Abu Bakar ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada ESO içeriğinin, epoksi (DGEBA) reçinenin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Epoksi/ESO reçinelerini 100/0, 90/10, 80/20, 70/30 ve 60/40 oranlarıyla harmanladıktan sonra metilheksahidroftalik anhidrit (MHHPA) ve 2-etil-4-metilimidazol (EMI) ile 1:1 karışım oranında karıştırıp, 1,5 saat ısıtma işlemine tabi tutmuşlar ve üretilen malzemelerin mekanik (çekme ve eğilme testleri), ısı ve morfolojik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre ESO, epoksiye eklendiğinde, karışımların esneklik ve genleşme özelliğinde hafif bir artış görülmüştür. Çekme mukavemeti değerleri ESO10'da, ESO0'a oranla %7 oranında artmış; ESO20'de aynı değerde kalmış ve ESO içeriği %30 ve üzerine çıktığında azalma göstermiştir. Bunun da ötesinde, %40 ESO ilavesinin karışım reçinelere süneklik kazandırdığını gösteren boyun oluşumu gözlenmiş ve bu durum ESO'nun düşük reaktivitesi nedeniyle kurlama maddesiyle kısmen reaksiyona girdiğine ve reaksiyona girmemiş kısmın karışımlardaki epoksi reçineleri plastikleştiği yönünde değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, ESO0'a göre ESO10'nun eğilme mukavemeti çok az yükselerek tüm reçineler arasında en iyi değer olan 36,87 MPa olarak gözlenmiştir fakat ESO içeriği arttıkça karışımların eğilme mukavemeti ve elastik modülü değerleri sistematik olarak azalmıştır. Darbe dayanımı verilerine göre, ESO içeriği arttıkça darbe dayanımı artmış ve saf epoksiye kıyasla yaklaşık %44 daha yüksek olacak şekilde, en yüksek darbe dayanımı (3,21 kJ/m) %40 ESO içeriğinde gözlenmiştir. Darbe testleri sonrası numunelerin yüzeyi SEM analizi ile incelenmiş ve epoksi içindeki ESO içeriğinin, yüksek darbe dayanımı özelliğini, deformasyona ve çatlak yayılmasına direnen kıvrımlı çatlaklar oluşturarak sağladığı sonucuna varılmıştır. Yapılan TGA analizlerinde termal stabilite değerleri olan bozunma başlangıç sıcaklığı (IDT) ve bozunma bitiş sıcaklığı (T_{max}) ısıları ESO içeriği arttıkça bir miktar düşüş göstermiştir (IDT: 190'dan 178°C'ye ve T_{max} : 457,27'den 421,48°C'ye).

Temminck ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, yapısal uygulamalar için, tüketici sonrası denim kumaş ve termoset biyo-reçinelerle ürettikleri kompozitleri incelemişlerdir. Takviye malzemesi olarak %100 pamuk içerikli denim kumaş ve jüt kumaş, matris malzemesi olarak ise iki farklı biyo-reçine ve referans olarak polyester reçine kullanmışlardır. Biyo-reçinelerden birinin içeriğini, üretim tekniğine göre değişen oranlarda, AESO, tert-bütül peroksi benzonat ve stiren kombinasyonu, diğerininkini ise yenilenebilir kaynaklardan elde edilmiş biyo-epoksi (SuperSAP ONE) ve biyo-sertleştiricisi (SuperSAP ONF) oluşturmuştur. RTM, basınçlı kalıplama (COM), vakum infüzyon (VAC) ve el yatırma (HND), olarak 4 farklı üretim tekniği kullanılarak üretilen tüm kompozitlerde 4 kat kumaş kullanılmıştır. RTM, VAC ve HND tekniklerinde elyaf hacmi %38 ila %45 iken, COM tekniğinde %45 ila %60 arasındadır. Yapısal uygulamalara uygunluğunu belirlemek için, biyo-kompozitler mekanik özellikleri açısından çekme, eğilme ve darbe testleriyle, termal özellikleri açısından DSC, DMTA ve TGA analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca üretilen kompozitler, gözeneklilik, su absorpsiyonu ve boşluk içeriği açısından da analiz edilmiştir. Üretilen kompozitler sırasıyla reçine, kumaş ve üretim tekniği kısaltmaları ile simgelenmiştir; örneğin 3 kat denim ve 1 kat jüt kumaş takviyeli, AESO ve %30 stiren kombinasyonlu reçine ile RTM tekniğiyle üretilen kompozit AESO-30ST-3D1J-RTM şeklinde gösterilmiştir. Araştırmacılar test sonuçlarını literatürle karşılaştırmışlar ve farklı reçinelerden ve üretim yöntemlerinden üretilen EPOXY-3D1J-RTM, EPOXY-4D-HND, EPOXY-4D-VAC, AESO-4D-COM ve AESO-15ST-COM kompozitlerin otomotiv iç parçaları, mobilya, iç yapı, spor ve eğlence ekipmanları gibi yapısal uygulamalar için uygun olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, AESO-30ST-4D-COM, AESO-15ST-4D-VAC ve AESO-30ST-4D-VAC gibi yüksek darbe dayanımına sahip kompozitlerin, bu özelliğin öncelikli olduğu güvenlik kaskları gibi uygulamalar için uygun olabileceğini belirtmişlerdir.

Liu ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada AESO ve mikro kristalin selülozdan (MCC) çözelti döküm yöntemi ile yeşil kompozitler üretmişler ve ağırlıkça %20 ila 40 arasında değişen oranlara sahip MCC'nin AESO matrisi (sertleştirici olarak ağırlıkça %2 TBPB içeren) üzerindeki güçlendirici etkisini, fiziksel özellikler, eğilme özellikleri, su absorpsiyonu, termal stabilite, kristal yapı ve MCC/AESO arasındaki ara-yüzey yapışması açısından incelemişlerdir. Kompozitlerin FTIR spektrumları, MCC ve AESO için karakteristik pikler göstermiş ve bu MCC ile AESO'nun arasında

oluşan olası hidrojen bağlarını yani aralarındaki etkileşimi ortaya çıkarmıştır. Bu durum SEM analizlerinde teyit edilmiştir; ağırlıkça %20 MCC içeren kompozitlerin SEM görsellerinde MCC ve AESO arasında iyi bir arayüz gözlenmiştir. Bununla birlikte, MCC yüklemesi ağırlıkça %30 ve %40'a çıkarıldığında AESO matrisinin bütünlüğünü bozduğu görülmüştür. MCC'nin AESO reçinelerine dahil edilmesi MCC/AESO kompozitlerinin yoğunluğunu, sertliğini, eğilme mukavemeti ve eğme modülünü önemli ölçüde artırmıştır ve bunun MCC'nin AESO reçineleri üzerinde önemli bir güçlendirici etkisinin göstergesi olduğu belirtilmiştir. Kompozitler içinde optimum değerler %30 MCC konsantrasyonunda tespit edilmiş ve saf AESO reçinesine göre sırasıyla %16, %25, %57 ve %130 daha yüksek yoğunluk, sertlik, eğilme mukavemeti ve eğme modülü görülmüştür. Bununla birlikte, MCC eklemesinden sonra kompozitlerin termal stabilitesi ve su direnci, MCC'nin düşük termal ayrışma sıcaklığı ve yüksek hidrofilikliği nedeniyle, önemli ölçüde azalmıştır.

Literatür incelemesinde, AESO ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen, epoksi/AESO karışım reçine ile ilgili çalışmanın yok denecek kadar az olduğu görülmüştür. Epoksinin halen en yaygın kullanılan termoset reçine olması nedeniyle epoksinin yerine veya epoksinin kullanım miktarını azaltacak şekilde epoksi ile karışım halinde kullanılabilecek bir biyo reçineye yönelik çalışmanın önemli olduğu düşünülmüş ve bu tez kapsamında epoksi/AESO karışım reçineli kompozitlerinin özelliklerinin incelenmesinin literatürdeki bu boşluğa katkı sağlayacağı öngörülmüştür. Ayrıca yapılan literatür taramasında karışım reçineli kompozitlerde kürlenme sıcaklıklarının etkisinin incelendiği çalışmalar konusunda da büyük bir eksiklik görülmüş ve bu tez kapsamında epoksi/AESO karışım reçinelerin ısıtma işlemi karşısındaki performans özellikleri incelenerek literatüre katkı sunması planlanmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Malzeme

Tez kapsamında takviye malzemesi olarak 300 g/m² gramaja sahip bezayağı dokuma jüt kumaş (Çizelge 5.1), matris malzemesi olarak ise değişen oranlarda epoksi reçine (F-1564, Fibermak, d=1,15 gcm⁻³, μ =1200-1400 mPa.s) ile akrilatlı epoksitlenmiş soya fasülyesi yağı reçinesi (Sigma Aldrich, d=1,04 gcm⁻³, μ =18000-32000 mPa.s) ve sertleştirici (F-3486, Fibermak, d=1,00 gcm⁻³, μ =10-20 mPa.s) kullanılmıştır.

Çizelge 5.1 : Jüt kumaş özellikleri.

İplik numarası (çözümlü/atık)	252/252 Tex
Kumaş sıklığı (çözümlü tel/cm x atık tel/cm)	7x6
Kalınlık	0,72 mm
Çekme mukavemeti (çözümlü/atık)	17,60 ± 1,49 / 16,36 ± 1,42
Uzama (çözümlü/atık)	5,40 ± 0,04 / 5,27 ± 0,03

Şekil 5.1’de tez kapsamında kullanılan jüt kumaş ve reçine sistemine ait görseller yer almaktadır.

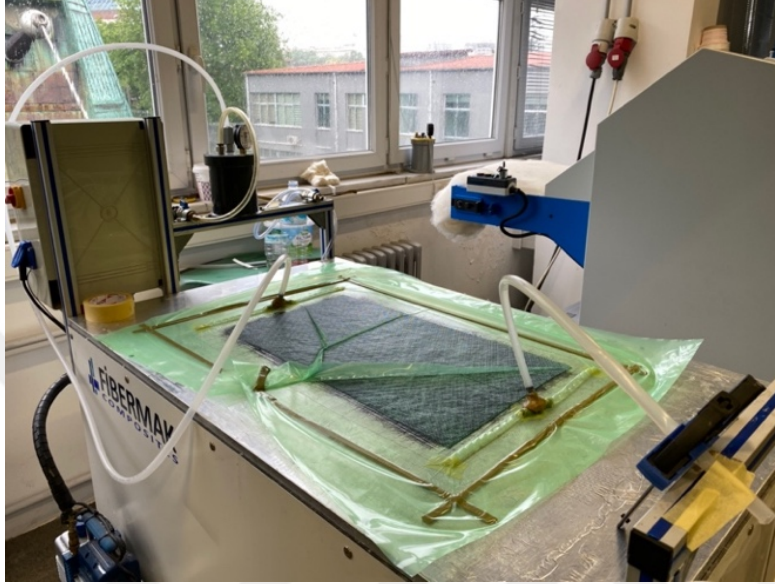


Şekil 5.1 : AESO, epoksi, sertleştirici ve jüt kumaş.

5.2 Metot

5.2.1 Kompozit malzeme tasarımı ve üretimi

Tez kapsamında biyo-kompozitler, Şekil 5.2'de gösterilen SCRIMP yöntemi ile üretilmiştir.



Şekil 5.2 : Seemann kompozit reçine infüzyon kalıplama yöntemi.

Üretim öncesi, alüminyum tabla selülozik tiner ile temizlenmiş ve kompozitin tablaya yapışmasını önlemek için tabla yüzeyine ayırıcı film (sıvı polivinil alkol, PVA) uygulanmıştır. Üretimin hazırlık aşamasında, 4 kat jüt kumaş, kumaşın çözgü yönü vakum yönüne paralel olacak şekilde üst üste yerleştirildikten sonra bunların üzerine sırasıyla ayırıcı kumaş ve akış filesi serilmiştir. Daha sonra, hortumlar, spiral hortumlar, vakum torbası ve sızdırmaz bant ile reçine akışının sabit basınç altında gerçekleşmesini sağlamak için gerekli kapalı sistem oluşturulmuştur. Son aşamada üretim 1 bar basınçta, farklı sıcaklık ve kürleme koşulları altında tamamlanmıştır. Her kompozit numunenin matris sistemini oluşturmak için kullanılan reçine karışımı ağırlıkça %25 sertleştirici ve %75 AESO/epoksi karışımından oluşturulmuştur.

Tez çalışmasının deneysel süreci temel olarak iki aşamada oluşmaktadır:

- i. **Değişen AESO reçine oranının biyo-kompozitin nihai özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi:** Bu bölümde AESO: epoksi oranı 10'ar artırımlı olarak %0'dan %100'e değiştirilmiştir. Üretim, oda sıcaklığında ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) gerçekleştirilmiş olup, 2 saat boyunca vakum açık halde tutularak reçinenin kumaş boyunca transferi sağlanmıştır. Ardından, vakum pompası kapatılmış,

kürleşmenin gerçekleşip üretimin tamamlanması için yine oda sıcaklığında 48 saat bekletilmiştir. Üretilen biyo-kompozit numunelerine ait numune kodları ve tasarım bileşenleri Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Artan AESO reçine oranına göre üretilen biyo-kompozit numunelerine ait numune kodları ve tasarım bileşenleri.

Numune kodu	Epoksi oranı (%)	AESO oranı (%)	Sertleştirici oranı (%)
0BIO	75	-	25
10BIO	67,5	7,5	25
20BIO	60	15	25
30BIO	52,5	22,5	25
40BIO	45	30	25
50BIO	37,5	37,5	25
60BIO	30	45	25
70BIO	22,5	52,5	25
80BIO	15	60	25
90BIO	7,5	67,5	25
100BIO	-	75	25

- ii. **Seçilen AESO yüzdeleri ile üretim ve kür sıcaklıklarının biyo-kompozitin nihai özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi:** Bu bölümde AESO oranları, öncül çalışmalar ışığında ağırlıkça %0, %30, %50, %70 ve %100 olarak belirlenmiş, üretim oda sıcaklığına ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) ek olarak üretim tablası ısıtılarak 90°C ’de de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 90°C ’de üretilen kompozitlerin birer eşlenikleri iklimlendirme fırını içerisinde (Şekil 5.3) 2 saat süre ile 120°C ’de ardıl-kürleme işlemine maruz bırakılmıştır. Üretilen biyo-kompozit numunelerine ait numune kodları ve tasarım bileşenleri Çizelge 5.3’de verilmiştir.

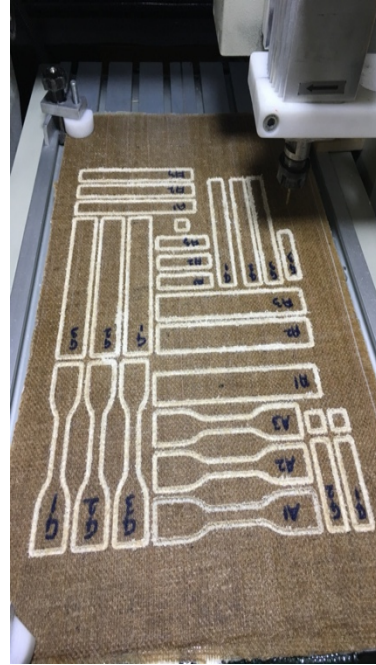
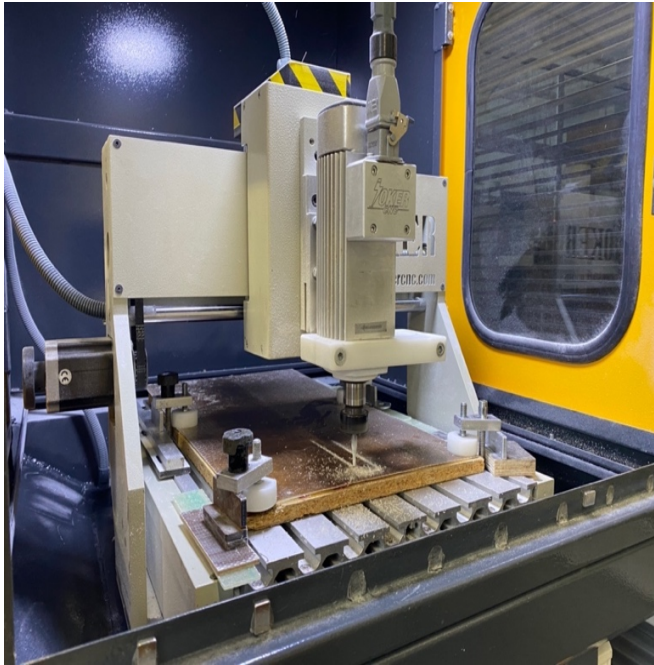


Şekil 5.3 : İklimlendirme fırını.

Üretimi tamamlanan kompozit plakalardan, ilgili standartlara uygun olarak bilgisayarlı sayısal kontrollü freze tezgahında (CNC) (Şekil 5.4) 0° (çözüğü) ve 90° (atkı) yönlerinden olmak üzere üçer numune kesimi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.3 : Üretim ve kür sıcaklıklarına göre üretilen biyo-kompozit numunelerine ait numune kodları ve tasarım bileşenleri.

Numune Kodu	Epoksi Oranı (%)	AESO Oranı (%)	Sertleştirici Oranı (%)	Kürleme / Ardıl-Kürleme Sıcaklığı (°C)
0BIO	75	0	25	20
0BIO-90	75	0	25	90
0BIO-120	75	0	25	120
30BIO	52,5	22,5	25	20
30BIO-90	52,5	22,5	25	90
30BIO-120	52,5	22,5	25	120
50BIO	37,5	37,5	25	20
50BIO-90	37,5	37,5	25	90
50BIO-120	37,5	37,5	25	120
70BIO	22,5	52,5	25	20
70BIO-90	22,5	52,5	25	90
70BIO-120	22,5	52,5	25	120
100BIO	0	75	25	20
100BIO-90	0	75	25	90
100BIO-120	0	75	25	120



Şekil 5.4 : Sayısal kontrollü freze tezgahı ve test numune görseli.

5.2.2 Performans analizleri

5.2.2.1 Fiziksel analizler

Yoğunluk ve elyaf ağırlık oranı

Kompozitlerin yoğunluğu Arşimet prensibine dayalı ölçüm cihazı (Şekil 5.5) ile ASTM D792-13 standartına göre ölçülmüştür. Elyaf ağırlık oranı ise kompozit numunelerin içerisindeki takviye malzemesinin ağırlığının toplam numune ağırlığına oranlanması ile hesaplanmıştır. Sonuçlar, ortalama değer ve standart sapma (SS) değerleri ile verilmiştir.



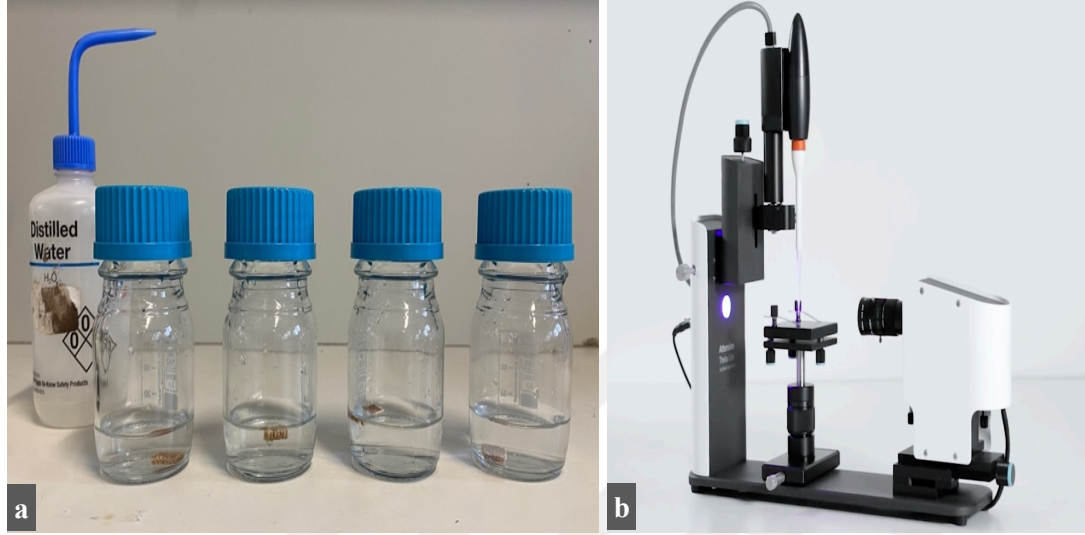
Şekil 5.5 : Yoğunluk ölçüm cihazı

Su emme testi

Kompozitlerin su emme testleri, ASTM D570-10 standardına göre oda sıcaklığında ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) damıtılmış suda yapılmıştır. Numuneler 24 saat boyunca 50°C 'lik bir fırında bekletilmiş ve daha sonra kapalı plastik torbalarda oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Numuneler terazide tartılıp, kuru ağırlıkları (w_d) not edilmiştir. Daha sonra numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığında damıtılmış suya daldırılmış, sürenin sonunda fazla su kağıt mendil yardımı ile uzaklaştırılarak ıslak ağırlıklar (w_w)

kaydedilmiştir. Numunelerin su emme oranları denklem 5.1’de görüleceği gibi hesaplanmıştır. Numune görsellerinden örnekler Şekil 5.6a’da gösterilmiştir. Her kompozit için en az beş numune kullanılarak sonuçlar, ortalama değer ve standart sapma (SS) değerleriyle verilmiştir.

$$\text{su emme oranı (\%)} = (w_w - w_d) / w_d \times 100 \quad (5.1)$$



Şekil 5.6 : a.Su emme testi, b.Su temas açısı testi

Su temas açısı testi

Kompozit numunelerin su temas açıları, ASTM D7334-08 standardına göre sabit damla ölçümünün çalışma prensibine sahip bir KSV Attension Theta Lite cihazı (Şekil 5.6b) ile ölçülmüştür. Temas açıları, ortalama değer ve SS değerleri ile sağ ve sol taraftan ölçüm değerleri olarak verilmiştir. Ek olarak, sayısal veriler, her numune grubu için damlacık görselleri ile desteklenmiştir.

5.2.2.2 Mekanik analizler

Kompozit numunelerin mekanik özellikleri, v-çentikli Charpy darbe, düşen ağırlık darbe, çekme ve üç nokta eğilme testleri ile değerlendirilmiştir. Her bir kompozit için en az üç numune 0° ve 90° yönlerinde test edilmiş ve ortalama sonuçlar SS değerleriyle verilmiştir.

Düşen ağırlık darbe testi

Kompozitler için düşen ağırlık darbe testi, ASTM D7136 standardına göre BESMAK darbe test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görseli Şekil 5.7a’da gösterilmiştir. Test sırasında numuneler, 100 mm’lik iç çapa sahip numune tutucuya

yerleştirilmiş ve 16 mm'lik vuruş çapına sahip standart bir yarım küre kafa ile 12 Joule darbe enerjisi altında test edilmiştir. Test sonuçları görsel (numunedeki hasar deseni) ve sayısal (darbe enerjisi, absorplanan enerji, absorplanma oranı, maksimum yük) olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.7 : a.Düşen ağırlık darbe testi, b.Charpy darbe testi

Charpy darbe testi

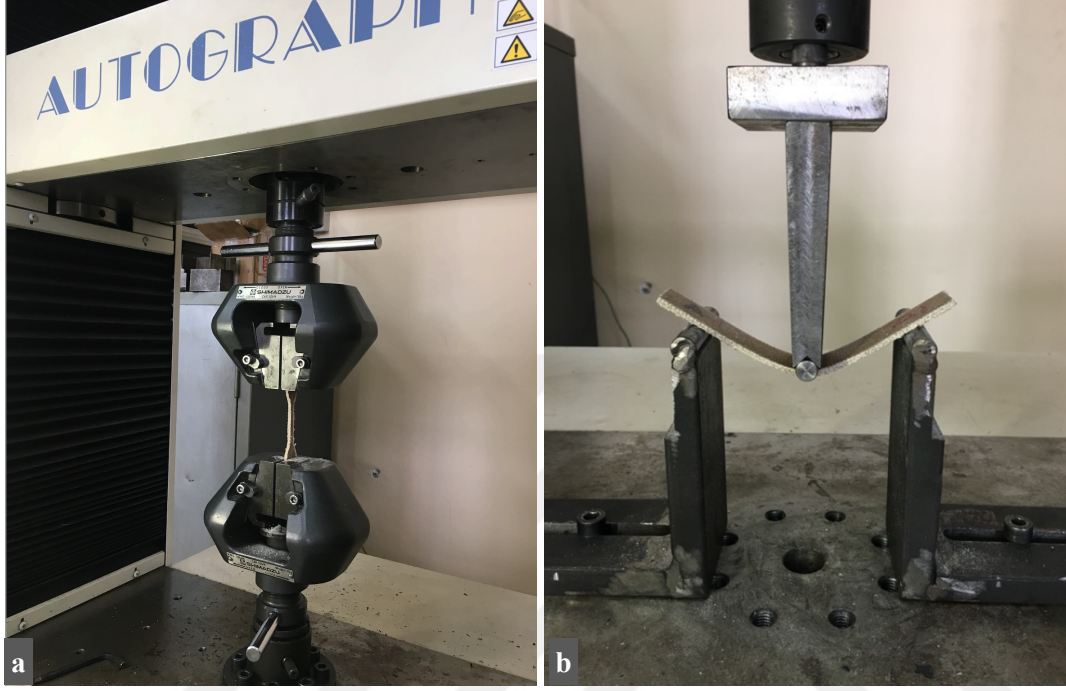
Charpy darbe dayanımını değerlendirmek için Zwick 5113 sarkaç tipi darbe test cihazı kullanılmış ve testler BS EN ISO 179:1997 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görseli Şekil 5.7b'de gösterilmiştir. Tüm numunelere test öncesinde 45°lik standart çentik açılmıştır. Numunelere uygulanan enerji 5 Joule'dür. Tüm test sonuçları ortalama değer ve SS değerleri ile birlikte verilmiştir.

Çekme mukavemeti testi

Çekme testleri, ASTM D638-10 standardına göre Shimadzu AG-IS test makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görseli Şekil 5.8a'da gösterilmiştir. Kafa hızı 3 mm min⁻¹ olarak ayarlanmıştır. Her numune grubu için en az üç numune, hem atkı hem çözgü yönü için test edilmiş ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri verilmiştir.

Üç nokta eğilme testi

Üç nokta eğilme testi, ASTM D790-10 standardına göre Shimadzu AG-IS test makinesi ile 6 mm.min^{-1} kafa hızında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görseli Şekil 5.8b’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : a.Çekme mukavemeti testi b.Üç nokta eğilme testi.

5.2.2.3 Enstrümantal analizler

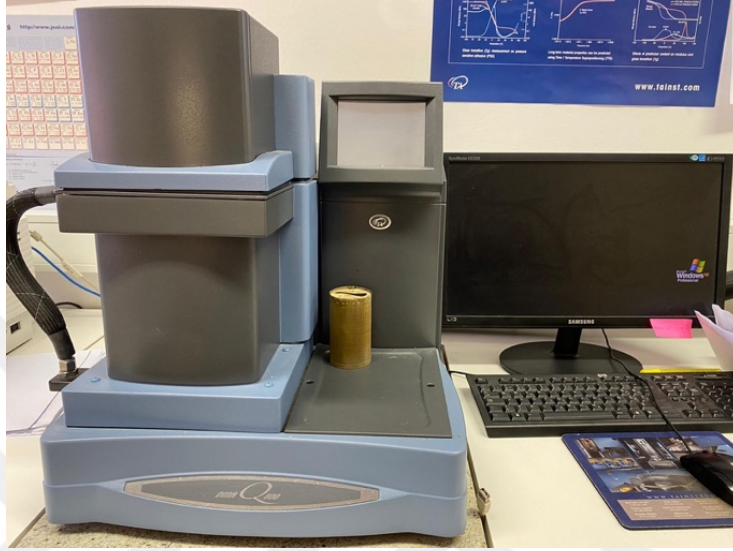
Numunelerin enstrümantal analizleri için diferansiyel taramalı kalorimetri, Fourier-transform kızılötesi spektroskopi, dinamik mekanik analizör ve taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

Dinamik mekanik analiz

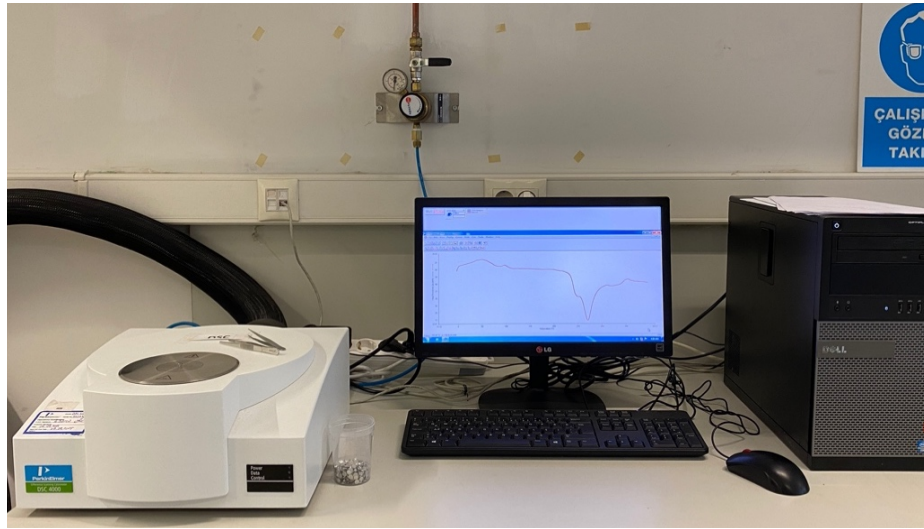
Numunelerin dinamik mekanik analizi için çift bükme konfigürasyonuna sahip DMA Q800 (TA Instruments, ABD) dinamik mekanik analizör kullanılmıştır. 0° ve 90° yönlerinde kesilen $10 \times 50 \text{ mm}$ ölçülerindeki numunelerin testleri, 10 Hz frekansta ve sıcaklık programı, kontrollü bir sinüzoidal gerilim altında, -50°C 'den 150°C 'ye 3°C/dk 'lık bir ısıtma hızında çıkacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görseli Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Numunelerin DMA testleri, Erasmus Öğrenci Hareketliliği Programı kapsamında, Slovenya, Ljubljana Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Tekstil ve Konfeksiyon Mühendisliği Bölümü laboratuvar altyapısı kullanılarak Prof. Dr. Andrej Demsar danışmanlığında gerçekleştirilmiştir.

Diferansiyel taramalı kalorimetri

Biyo-kompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetri analizi için DSC 4000 (Perkin – Elmer, ABD) diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanılmıştır. Numuneler 20°C/dk'lık bir ısıtma hızında -5°C'den 300°C'ye ısıtıldıktan sonra 20°C/dk'lık bir hızda -5°C'ye soğutulmuştur. Test cihazı görseli Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



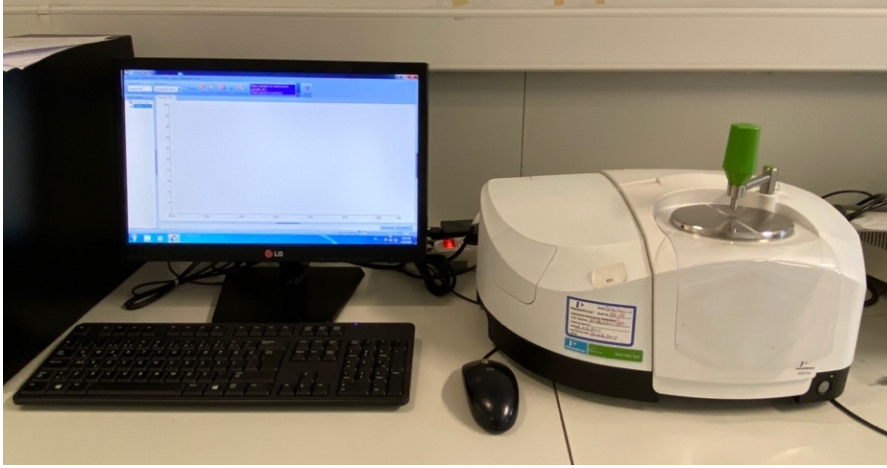
Şekil 5.9 : Dinamik mekanik analiz cihazı.



Şekil 5.10 : Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı.

Fourier-dönüşümlü kızılötesi spektroskopi

FTIR analizi, kompozit bileşenlerin karakteristik piklerini gözlemlemek için Perkin Elmer Spectrum II model FTIR makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test cihazı görseli Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

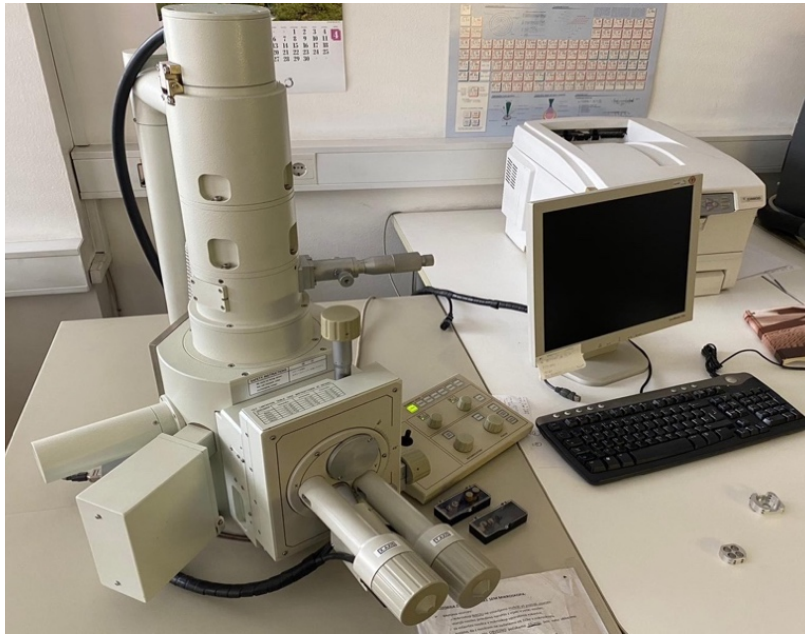


Şekil 5.11 : Fourier-dönüştümlü kızılötesi spektroskopi.

5.2.2.4 Morfolojik analizler

Taramalı elektron mikroskobu analizi

Kompozit numunelerin ara yüz ve yüzey morfolojileri, JSM 6060 LV (Jeol, Japonya) taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gözlemlenmiştir. Test cihazı görseli Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Numunelerin SEM analizleri, Erasmus Öğrenci Hareketliliği Programı kapsamında, Slovenya, Ljubljana Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Tekstil ve Konfeksiyon Mühendisliği Bölümü laboratuvar altyapısı kullanılarak, Prof. Dr. Andrej Demsar danışmanlığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.12 : Taramalı elektron mikroskobu.

5.2.2.5 İstatistiksel analiz

Kompozit numunelerin test sonuçlarının istatistiksel anlamlılığını belirlemek için Varyans Analizi (ANOVA, Minitab 16) gerçekleştirilirken, Student's t-testi (Minitab 16), seçilen iki üretim grubu arasındaki karşılaştırmalar için kullanılmıştır. Farkların p değeri 0,05 ve daha az (%95 güven aralığı) olduğunda sonuçlar anlamlı kabul edilmiştir.





6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1 Değişen AESO Reçine Oranının Biyo-kompozitin Nihai Özellikleri Üzerindeki Etkisine Dair Sonuçlar

Bu kısımda AESO oranının biyo-kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. AESO oranı 10'ar artırımlı olarak %0'dan %100'e değiştirilmiş olan AESO/epoksi karışım reçineli biyo-kompozitlerin fiziksel, mekanik, enstrümantal ve morfolojik analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

6.1.1 Fiziksel analizler

6.1.1.1 Yoğunluk ve elyaf ağırlık oranı

Numunelerin kalınlık, yoğunluk ve elyaf ağırlık oranları Çizelge 6.1'de listelenmiştir. Kompozit numunelerde kullanılan takviye malzemesinin doğal kaynaklı jüt kumaş olması, numunelerin yoğunluk ölçümleri esnasında suyla temaslarında su absorpsiyonuna neden olabileceği sonucunu doğurmaktadır. Bu durum Arşimet prensibine göre yapılan yoğunluk ölçümlerini etkileme potansiyeline sahiptir dolayısıyla, sonuçlar değerlendirilirken bu hususun göz önünde bulundurulması önem arz eder.

Çizelge 6.1 : Biyo-kompozit numunelerin elyaf ağırlık oranları.

Numune kodu	Yoğunluk (g/cm ³) ± SS	Kalınlık (mm) ± SS	Elyaf ağırlık oranı (%) ± SS
0BIO	1,043 ± 0,003	2,62 ± 0,01	45,0 ± 0,5
10BIO	1,020 ± 0,002	2,72 ± 0,02	43,6 ± 0,9
20BIO	1,047 ± 0,018	2,74 ± 0,07	43,0 ± 0,7
30BIO	1,118 ± 0,013	2,72 ± 0,04	43,7 ± 1,8
40BIO	1,088 ± 0,015	2,73 ± 0,02	43,2 ± 0,6
50BIO	1,138 ± 0,172	2,94 ± 0,14	38,0 ± 0,7
60BIO	1,121 ± 0,098	2,89 ± 0,15	40,6 ± 2,4
70BIO	1,087 ± 0,005	2,81 ± 0,03	40,0 ± 0,7
80BIO	1,058 ± 0,009	2,91 ± 0,11	38,4 ± 1,2
90BIO	1,001 ± 0,190	2,93 ± 0,11	37,4 ± 1,0
100BIO	1,002 ± 0,187	2,94 ± 0,10	37,0 ± 0,7

Sonuçlar değerlendirildiğinde, elyaf ağırlık oranlarında AESO ilavesi ile birlikte düşüş eğilimi olduğu görülmektedir; 0BIO'nun elyaf ağırlık oranı %45 iken AESO içeriği %100'e (100BIO) çıktığında bu oran %37'ye düşmüş yani yaklaşık %18'lik bir düşüş gerçekleşmiştir. Epoksinin vizkozitesi ($\mu=1200-1400$ mPa.s) AESO'nun viskozitesinden ($\mu=18000-32000$ mPa.s) çok daha düşüktür. Epoksi vakum etkisi altında kumaş üzerinde kolayca ilerlerken, yüksek viskoziteli AESO, kumaş içerisine kolaylıkla nüfuz edememekte ve bu durum özellikle yüksek AESO içeren (%50 ve üzeri) numune gruplarının daha fazla reçine içermelerine sebep olmaktadır. Bu durum numunelerin kalınlıklarının artmasına ve dolayısıyla düşük elyaf ağırlık oranına yol açmaktadır. t-testi analizine göre, 0BIO'dan 40BIO'ya kadar olan numunelerin elyaf ağırlık oranları arasında anlamlı bir fark ($p=0,896$) olmamasına rağmen, AESO içeriği ağırlıkça %40'ın üzerinde olan numunelerde elyaf ağırlık oranlarındaki azalma istatistiksel olarak da anlamlı bulunmuştur ($p=0,000$).

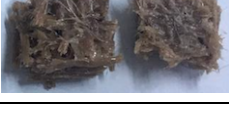
6.1.1.2 Su emme testi

Kompozitlerin su emme oranları ve seçilen numunelerin test sonrası görselleri Çizelge 6.2'de listelenmiştir.

Sonuçlara göre, AESO içeriğinin ağırlıkça %50'den %100'e çıkması su emme oranlarında artışa yol açmıştır. 100BIO numunesi, ağırlıkça %50 veya daha düşük AESO ($p=0,003$) içeren numunelerden neredeyse 10 kat daha yüksek su emme oranına (%95) sahiptir. Test sonrası numunelere ait görseller, artan AESO oranı ile numunelerde meydana gelen deformasyon derecesini göstermekte ve sayısal sonuçları desteklemektedir.

Öte yandan, ağırlıkça %20'ye kadar AESO kullanımı söz konusu olduğunda su emme oranlarının azalarak yaklaşık %12'den yaklaşık %6 civarına geldiği görülmüştür. Bu durum, lif-matris etkileşiminin iyileşmesi sayesinde kompozit yapıdaki hava boşluklarının azalmasıyla açıklanabilir. Kompozitlerde görülen en yaygın üretim hatalarından biri boşluk oluşumudur. Bu boşluklar, kompozitlerin mekanik dayanımlarını azaltırken daha fazla nem çekmelerine ve çevresel koşullara daha duyarlı hale gelmelerine yol açar (Temminck ve diğ, 2017).

Çizelge 6.2 : Biyo-kompozit numunelerin su emme oranları ve test sonrası numune görselleri.

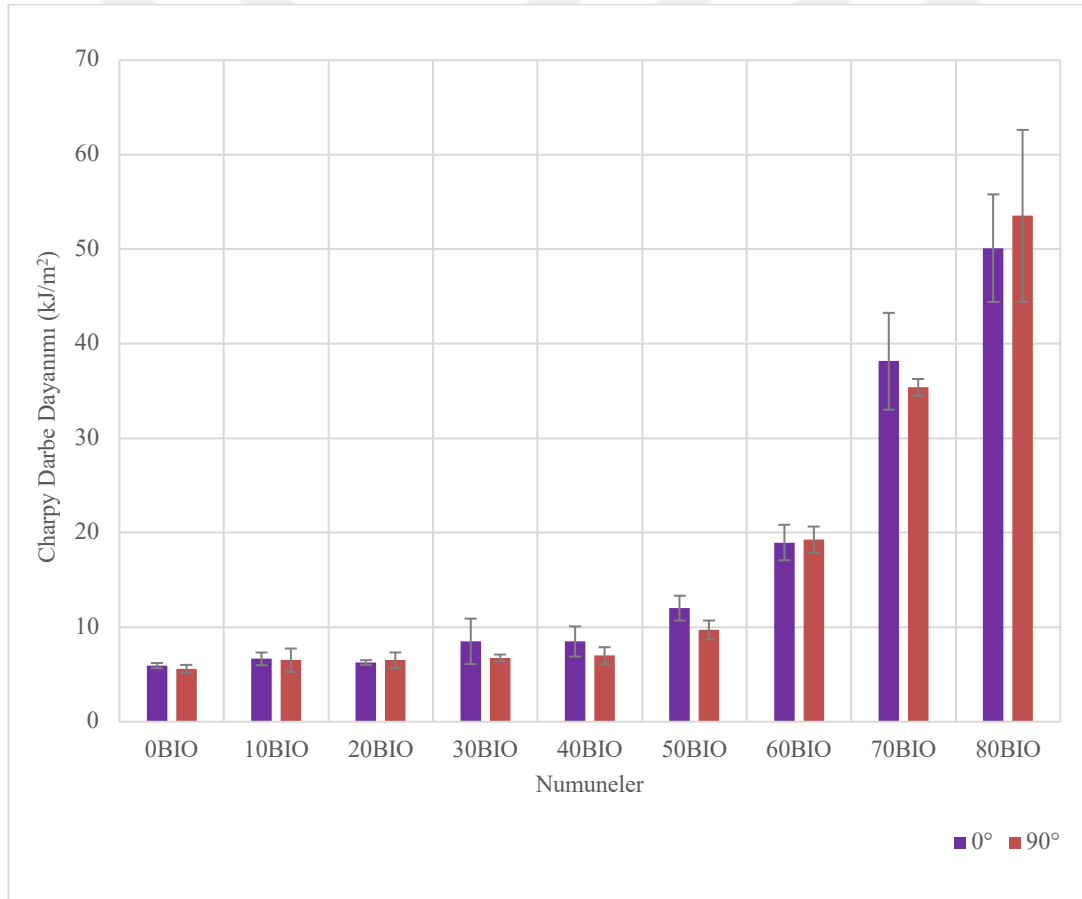
Numune kodu	Su emme oranları (%) ± SS	Su emme testinden sonrası numune görselleri
0BIO	12,01 ± 1,62	
10BIO	9,43 ± 0,17	
20BIO	6,19 ± 0,52	
30BIO	10,25 ± 0,76	
40BIO	16,97 ± 1,03	
50BIO	10,81 ± 0,15	
60BIO	27,39 ± 1,27	
70BIO	31,60 ± 0,69	
80BIO	38,28 ± 0,56	
90BIO	91,72 ± 1,73	
100BIO	94,93 ± 0,54	

6.1.2 Mekanik analizler

6.1.2.1 Charpy darbe testi

Numunelerin Charpy darbe dayanım değerleri Şekil 6.1'de verilmiştir.

AESO/epoksi matris sistemine sahip kompozitlerin darbe dayanımı, 0BIO numunesinden daha yüksektir ve biyo-reçine içeriğindeki artışla birlikte (%10'dan %80'e) kademeli olarak artış göstermektedir. 80BIO'nun darbe dayanımı (52 kJ m^{-2}), 0BIO'nun darbe dayanımından ($5,5 \text{ kJ m}^{-2}$) neredeyse on kat daha yüksektir ($p=0,005$). Ayrıca, epoksi ile bitkisel yağ bazlı biyo-reçinelerin bir arada kullanıldığı matris sistemlerinde görülen darbe dayanımındaki artış, literatürdeki çeşitli çalışmalarla desteklenmiştir (Sahoo ve diğ, 2018; Sahoo ve diğ, 2016; Ornaghi ve diğ, 2014).



Şekil 6.1 : Biyo-kompozit numunelerin Charpy darbe test sonuçları.

Biyo-reçine oranı ağırlıkça %80'den fazla olan numunelerin darbe testleri, sarkaç ve numune arasındaki öngörülemez sürtünme etkisinin ölçülen enerji miktarını ciddi şekilde etkilemesi sebebiyle gerçekleştirilememiştir.

6.1.2.2 Düşen ağırlık darbe testi

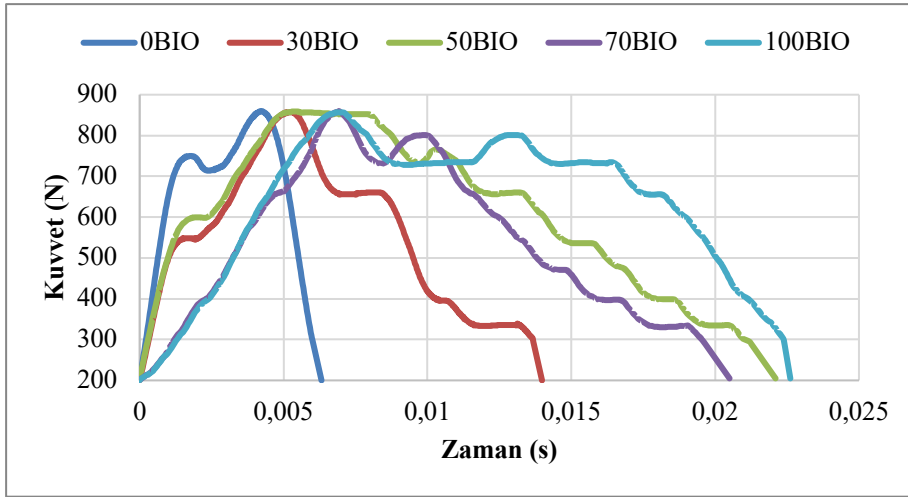
Biyo-kompozit malzemelerin düşen ağırlık darbe testi sonuçları Çizelge 6.3'te listelenmiştir.

Test sonuçları değerlendirildiğinde, 0BIO ile 40BIO aralığındaki numunelerde absorbe edilen enerji değerleri arasında anlamlı bir fark olmadığı ($p=0,987$) görülmüştür. Absorbe edilen enerjinin (E_a), darbe enerjisine (E_i) oranı olarak ifade edilen absorplanma oranı (E_a/E_i) değerleri (0,20–0,22) bu durumu destekler niteliktedir. Diğer yandan, kompozit yapı içerisindeki biyo-reçine oranı %40'tan %50'ye yükseldiğinde, absorbe edilen enerjide (40BIO: 2,56 J; 50BIO: 5,13 J; $p=0,002$) önemli derecede artış gözlenir ve absorplanma oranı neredeyse iki katına (40BIO: 0,21; 50BIO: 0,43) ulaşır. Ağırlıkça yüksek epoksi içeriğine sahip kompozitler daha düşük yer değiştirme sergilerken, yüksek AESO içeriği daha fazla enerji absorbsiyonuna neden olur dolayısıyla epoksi reçine içindeki AESO oranı artırılarak kompozit malzemenin darbe dayanımı artırılabilir. Sonuçlar, 100BIO'nun 0BIO'ya kıyasla neredeyse üç kat daha yüksek absorbe edilen enerji, absorplanma oranı ve maksimum yer değiştirme değerlerine sahip olduğunu göstermektedir (0BIO için sırasıyla 2,47 J; 0,21 ve 5,87 mm; 100BIO için sırasıyla 7 J; 0,58 ve 15,90 mm).

Çizelge 6.3 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi sonuçları.

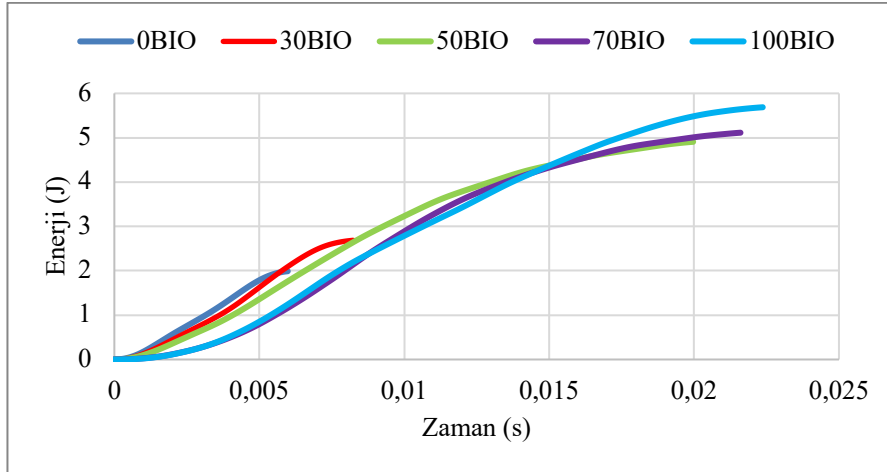
Numune kodu	Maks. kuvvet (kN) $\pm$ SS	Maks. yer değiştirme (mm) $\pm$ SS	Darbe enerjisi (J) (E_i)	Absorbe edilen enerji (J) (E_a) $\pm$ SS	Absorplanma oranı (E_a/E_i)
0BIO	0,82 $\pm$ 0,07	5,87 $\pm$ 1,28	12	2,47 $\pm$ 0,44	0,21
10BIO	0,86 $\pm$ 0,02	5,88 $\pm$ 0,76	12	2,46 $\pm$ 0,38	0,20
20BIO	0,86 $\pm$ 0,13	6,27 $\pm$ 0,98	12	2,51 $\pm$ 0,59	0,21
30BIO	0,83 $\pm$ 0,08	7,13 $\pm$ 1,25	12	2,65 $\pm$ 0,45	0,22
40BIO	0,74 $\pm$ 0,01	7,19 $\pm$ 0,52	12	2,56 $\pm$ 0,38	0,21
50BIO	0,86 $\pm$ 0,05	12,18 $\pm$ 0,20	12	5,13 $\pm$ 0,20	0,43
60BIO	0,87 $\pm$ 0,02	12,83 $\pm$ 0,65	12	4,95 $\pm$ 0,21	0,41
70BIO	0,88 $\pm$ 0,02	12,69 $\pm$ 0,50	12	4,63 $\pm$ 0,39	0,39
80BIO	0,95 $\pm$ 0,21	13,24 $\pm$ 0,40	12	5,24 $\pm$ 0,48	0,44
90BIO	1,06 $\pm$ 0,07	13,48 $\pm$ 0,51	12	6,40 $\pm$ 0,37	0,53
100BIO	0,89 $\pm$ 0,05	15,90 $\pm$ 3,63	12	7,00 $\pm$ 1,14	0,58

Şekil 6.2'de seçili kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonuçlarından elde edilen kuvvet-zaman eğrileri yer almaktadır. Bu eğrilerde görülen maksimum kuvvet değerleri birbirlerine yakın seyredip, Çizelge 6.3'te verilen maksimum kuvvet değerleriyle örtüşmektedir.



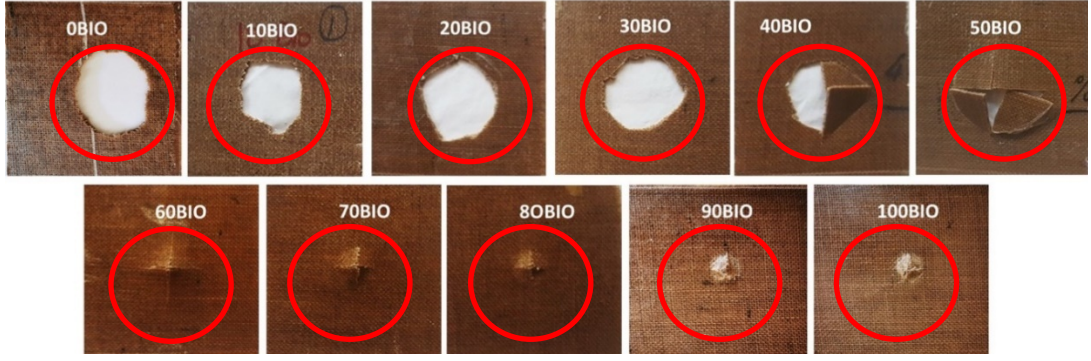
Şekil 6.2 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi kuvvet-zaman eğrileri.

Şekil 6.3'te seçili kompozitlerin (0BIO-30BIO-50BIO-70BIO-100BIO) düşen ağırlık test sonuçlarından elde edilen enerji-zaman eğrileri yer almaktadır. Bu eğrilerde, Çizelge 6.3'te elde edilen sonuçlara paralel şekilde, artan AESO oranıyla absorplanan enerjinin arttığı, %50 ve üzeri biyo-reçine oranına sahip numunelerde bu artışın daha belirgin olduğu görülmektedir. Ayrıca %50 ve üzeri biyo-reçine oranına sahip numunelerde enerji absorplama süresinin daha geniş bir zaman aralığına yayıldığı görülmüştür.



Şekil 6.3 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi enerji-zaman eğrileri.

Düşen ağırlık darbe testi sonucunda kompozit numunelerin görsel hasar analizi ise Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 : Düşen ağırlık darbe testi sonucunda biyo-kompozit numunelerinde oluşan hasar görselleri.

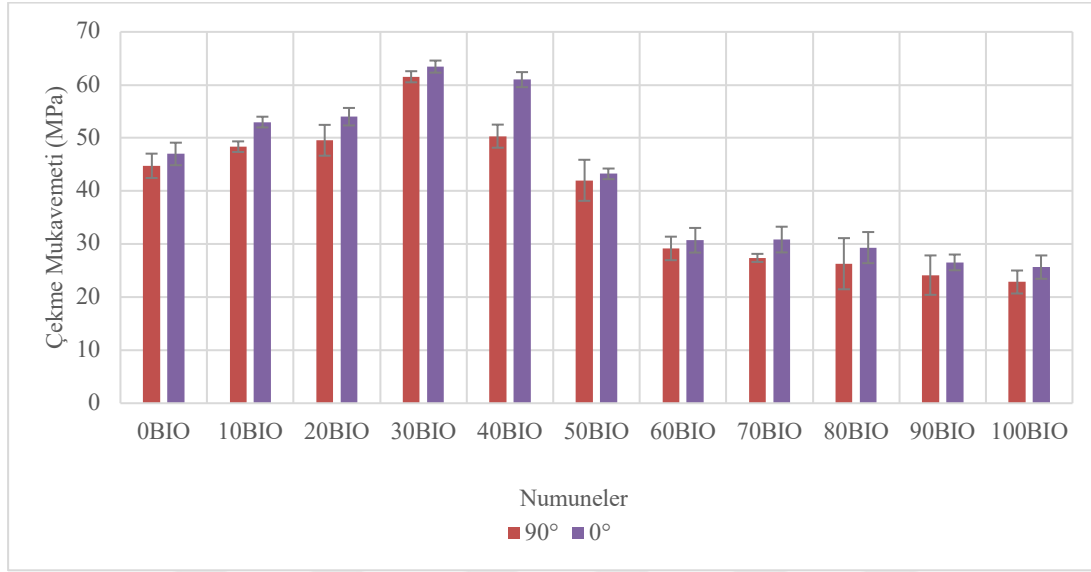
12 J altında gerçekleştirilen düşen ağırlık darbe testinin sonuçlarına göre; 0BIO, 10BIO, 20BIO ve 30BIO kodlu numunelerin görsellerinde penetrasyonun yarattığı tam açıklık, artan AESO içeriği (40BIO ve 50BIO) ile yerini kısmi açıklığa bırakmıştır. AESO oranının %60 veya daha fazla olduğu numunelerde ise, malzemenin sünek davranışının bir sonucu olarak tam penetrasyon gerçekleşmiş olmasına rağmen hasar deseninde açıklık olmaksızın, küçük ve çapraz şekilli çatlak oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca bu numunelerin test sonrasında, elastik yapıları sayesinde geri topladıkları da görülmüştür. Bu durum, yumuşak bir AESO segmentinin DGEBA epoksiye eklenmesiyle epoksinin hacimli benzen grubunu azaltması ve yapının esnekliğini artırmasıyla açıklanabilir. Bir başka deyişle AESO, epoksi için plastikleştirici görevi üstlenerek kompozitlerin darbe enerjisini absorbe etme özelliğini iyileştirir (Sahoo ve diğ, 2018). Ayrıca Şekil 6.4’de görüldüğü üzere, ortaya çıkan hasar alanının çapı da artan AESO oranı ile azalma eğilimi göstermiştir.

6.1.2.3 Çekme mukavemeti testi

Çekme testi sonuçları Şekil 6.5 ve 6.6’da verilmiştir.

Sonuçlar, saf epoksiye AESO eklenmesinin kompozitin çekme mukavemetini bir dereceye kadar (ağırlıkça %30 AESO) artırdığını göstermektedir (Şekil 6.5). AESO-epoksi hibrit matris sistemine sahip kompozitlerde, 3300 cm^{-1} absorbands bandı (Ornaghi ve diğ, 2014) civarında gözlemlenen lignoselülozik jüt liflerinin –OH grupları, çapraz bağlı biyo-reçinelerin –OH ve –COO grupları ile hidrojen bağı oluşturarak lif-matris ara yüzünü iyileştirdiği söylenebilir. Bu sayede, 0BIO kompozitlerine kıyasla 30BIO kompozitlerinin çekme mukavemetinde yaklaşık %40’lık bir artış görülmektedir ($p=0,008$). Bir başka deyişle 30BIO’da elde edilen

maksimum çekme mukavemetinin (63 MPa) nedeni güçlü arayüzey yapışması ile açıklanabilir (Sahoo ve diğ, 2018).

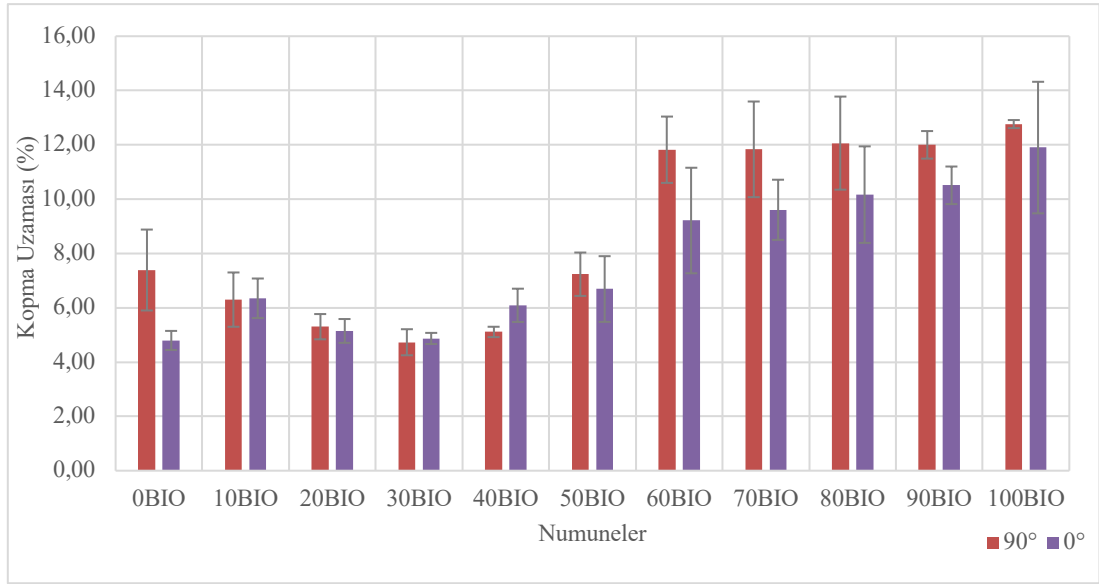


Şekil 6.5 : Biyo-kompozit numunelerin çekme testi sonuçları.

50BIO numunesinin çekme mukavemetinin her iki test yönünde de ani olarak düşmesi, elyaf ağırlık oranı sonuçlarında da belirtildiği gibi fazla reçine içeriğinden kaynaklanabilir (Çizelge 6.1). Alifatik epoksi matrisinde ağırlıkça %50'nin üzerinde AESO içeriğine sahip kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, AESO reçinesinin yüksek oranda esnek ve uzun alifatik zincir içeriğinin neden olduğu aşırı plastikleşme nedeniyle yarıya düşmüştür (Sahoo ve diğ, 2018; Niedermann ve diğ, 2017).

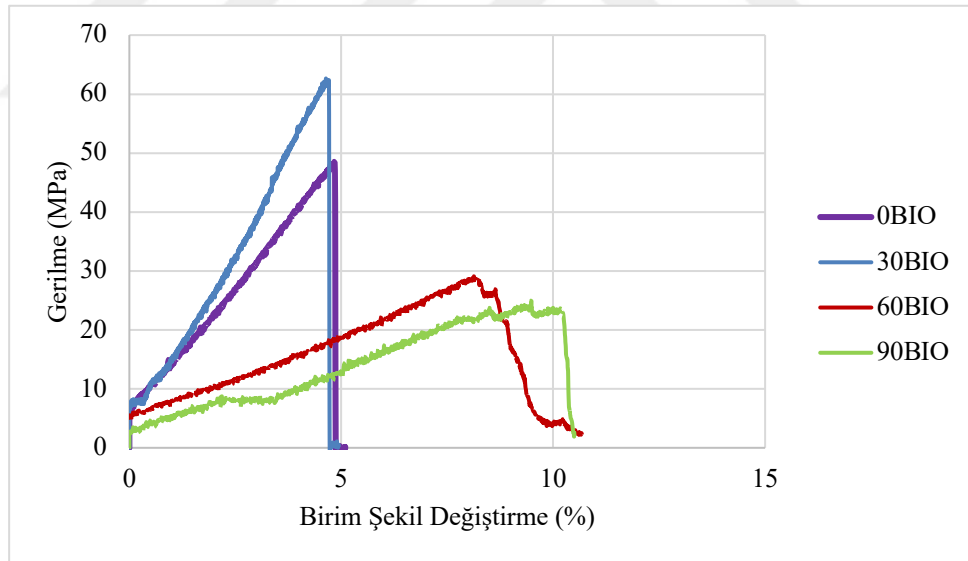
Tüm numunelerde çözgü yönündeki çekme mukavemeti değerleri, atkı yönündeki çekme mukavemeti değerlerinden daha yüksektir.

Öte yandan, kopma uzaması değerlerinin çekme mukavemeti test sonuçlarını desteklediği görülmüştür (Şekil 6.6). Kopma uzaması değerleri, biyo-reçine içeriği ağırlıkça %30 olana kadar azalmakta (gerilme mukavemeti değerleri artarken) ve sonra artmaya başlamakta ve ağırlıkça %100 AESO reçine içeriğine ulaşana kadar da bu artış devam etmektedir. Literatürde yapılmış çalışmalara bakıldığında Temmink ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, AESO içerikli kompozitlerin, epoksi içerikli kompozitlere göre daha yüksek uzama değerleri ile daha düşük çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüş ve bu durum AESO reçinesinin kompozit yapıya kazandırdığı esneklik özelliği ve AESO reçinesinin tam kürlenmemesi sonucu polimer zincirlerinin serbest hareket edebilmesi ile açıklanmıştır. Bu durum bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçları desteklemektedir.



Şekil 6.6 : Biyo-kompozit numunelerin kopma uzaması sonuçları.

Artan biyo-reçine oranının kompozit malzemenin yük altındaki davranışını nasıl değiştirdiği seçili numunelerin (0BIO, 30BIO, 60BIO ve 90BIO) gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinden görülebilmektedir (Şekil 6.7).

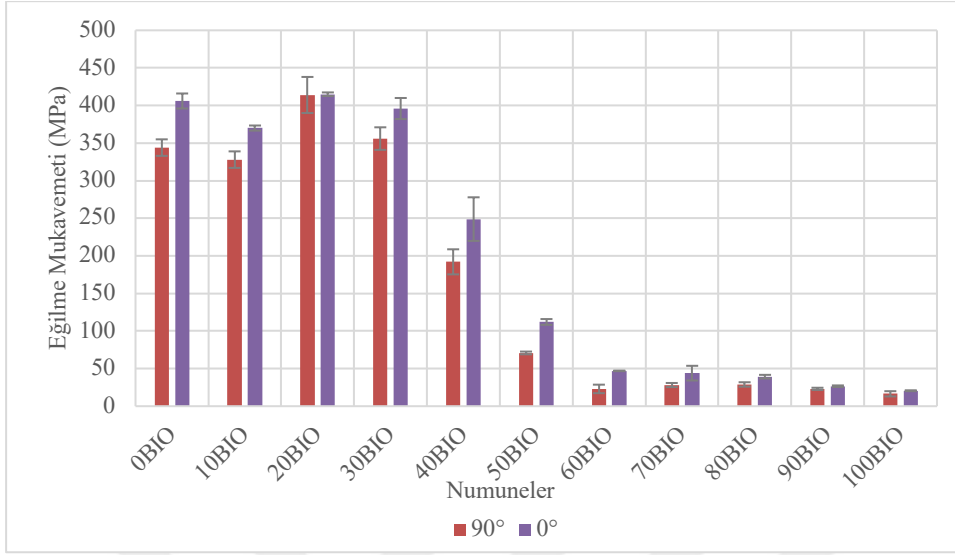


Şekil 6.7 : 0BIO, 30BIO, 60BIO ve 90BIO numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

Elde edilen grafik sonuçları değerlendirildiğinde, yüksek epoksi içeriğine sahip numunelerin (0BIO ve 30 BIO) kırılgan malzeme, yüksek AESO içeriğine sahip numunelerin ise (60BIO ve 90BIO) sünek malzeme özelliği sergiledikleri görülmüştür.

6.1.2.4 Üç nokta eğilme testi

Eğilme mukavemeti test sonuçları Şekil 6.8'de verilmiştir.



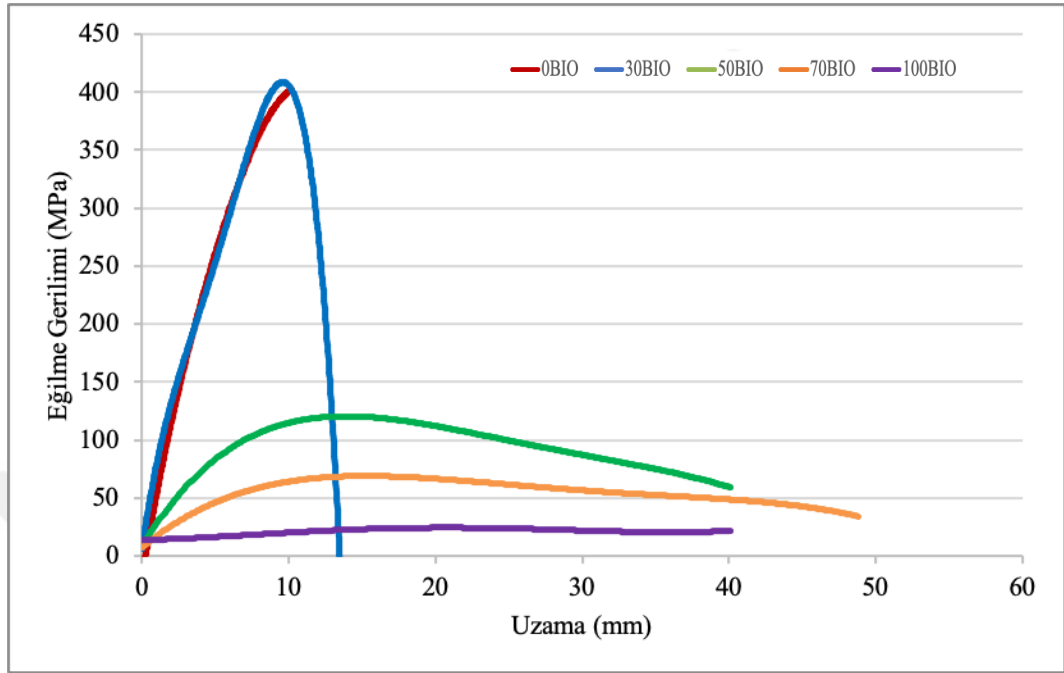
Şekil 6.8 : Biyo-kompozit numunelerin eğilme mukavemeti sonuçları.

Test sonuçları incelendiğinde, kompozit malzemelerin eğilme mukavemetlerinin artan biyo-reçine miktarı ile (özellikle ağırlıkça %30'un üzerinde AESO içeriği ile) azaldığı görülmektedir. Eğilme mukavemetinde 30BIO'dan 40BIO'ya ($p=0,015$) ve 40BIO'dan 50BIO'ya ($p=0,015$) düşüş, istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Liu ve diğ. (2019) yaptığı bir çalışmada en yüksek eğilme uzaması ve en düşük eğilme mukavemeti, düşük çapraz bağlama yoğunluğu ve uzun moleküler zincirlerin varlığı sebebiyle saf AESO reçinede görülmüştür. Wu ve Li (2018) tarafından yapılan çalışma kapsamında da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar, ağırlıkça %50'yi aşan AESO oranının, kompozitler için eğilme ve diğer mekanik özelliklerde önemli bir düşüşe yol açtığını göstermiştir. Yapılan bu çalışmada da, ağırlıkça %0-40 AESO içeren kompozitlerin eğilme mukavemetinin (200-440 MPa), literatürde belirtilen saf epoksinin eğilme mukavemetinden (118 MPa (Gupta ve Srivastava, 2017)) daha yüksek olduğu görülmüş ve takviye malzemesi olarak jüt kumaşın ve AESO reçinesinin bir limite kadar (ağırlıkça% 40) kullanılmasının olumlu etkisi olduğu anlaşılmıştır.

Test sonuçları test yönü açısından değerlendirildiğinde, 0° yönünden alınan numunelerin eğilme dayanımının 90° yönünden alınan numunelere göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Seçili numunelere ait (0BIO-30BIO-50BIO-70BIO-100BIO) üç nokta eğilme gerilimi-uzama grafiği Şekil 6.9'da verilmiştir. Artan AESO oranı %30'u geçtiğinde

eğilme gerilimi değerlerinin çok büyük oranda düştüğü ve %50'nin üstündeki AESO iççerikli numunelerin eğilmeye karşı dayanım göstermediğı görölmüşür.

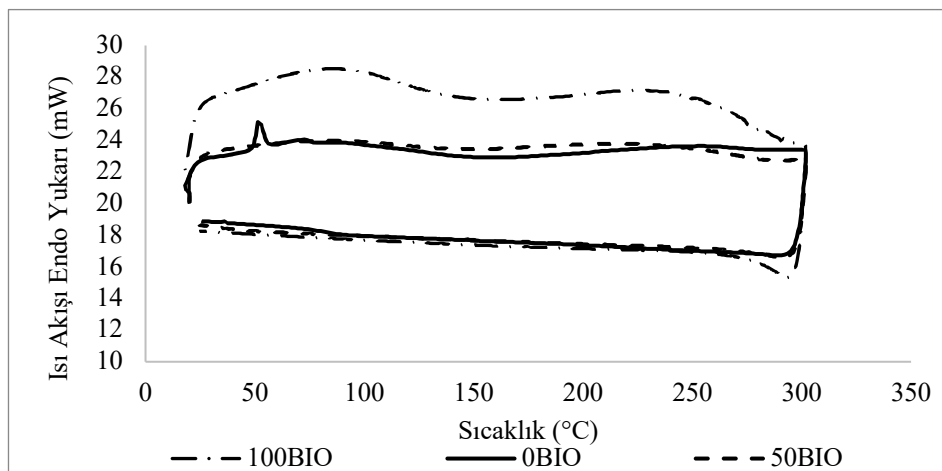


Şekil 6.9 : Biyo-kompozit numunelerin eğilme gerilimi-uzama eğrileri.

6.1.3 Enstrümantal analizler

6.1.3.1 DSC analizi

Diferansiyel taramalı kalorimetri analizi, 0BIO, 50BIO ve 100BIO numunelerinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin DSC grafikleri Şekil 6.10'da verilmiştir.

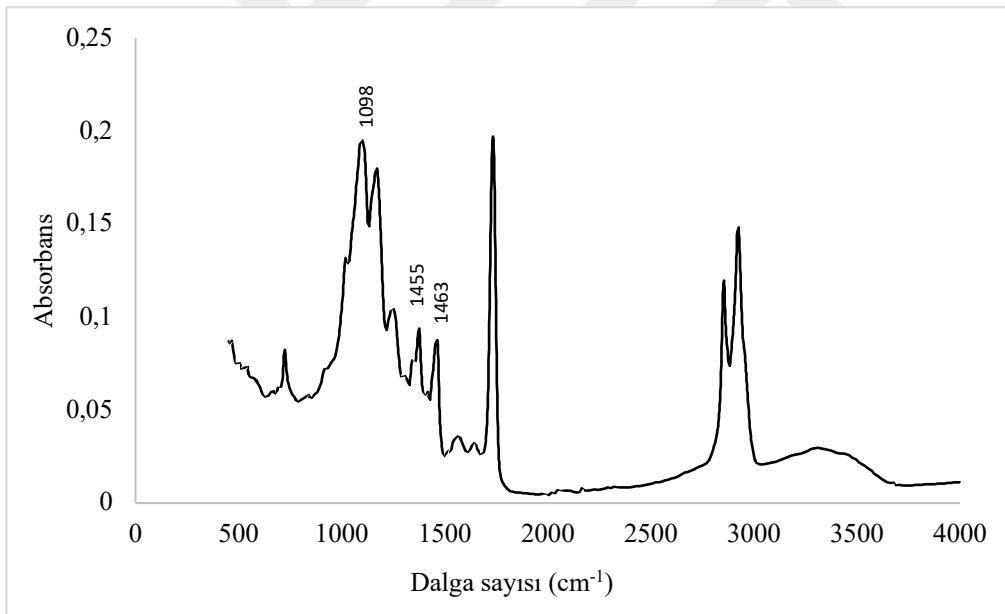


Şekil 6.10 : 0BIO, 50BIO ve 100BIO numunelerin DSC eğrileri.

Tüm numunelerin DSC eğrilerinde, yaklaşık 50°C'de jüt kumaşta bulunan safsızlıkların ve nemin uzaklaşmasına bağlı olduğu düşünülen, endotermik reaksiyonlar görülmüştür. Tez kapsamında kullanılan epoksi reçinenin T_g 'sinin 48-52°C arasında olduğu bilinmektedir (Fibermak). Bu sebeple, 0BIO numunesinin 51,5°C'deki pik noktası epoksi reçine sisteminin T_g 'sine ait olduğu düşünülmektedir. 50BIO numunesi %50 epoksi içeriğine sahip olmasına rağmen, DSC eğrisinde T_g piki vermemiştir. 0BIO ve 50BIO numunelerinin DSC eğrileri 300°C'ye kadar stabil giderken, 100BIO numunesinde yaklaşık 250°C'de, bir ekzotermik reaksiyonun yani bozunmanın başladığı söylenebilir. AESO'nun bozunma sıcaklığının 250 ile 300°C arasında olduğu literatürde belirtilmektedir (Liu ve diğ, 2017; Auclair ve diğ, 2015).

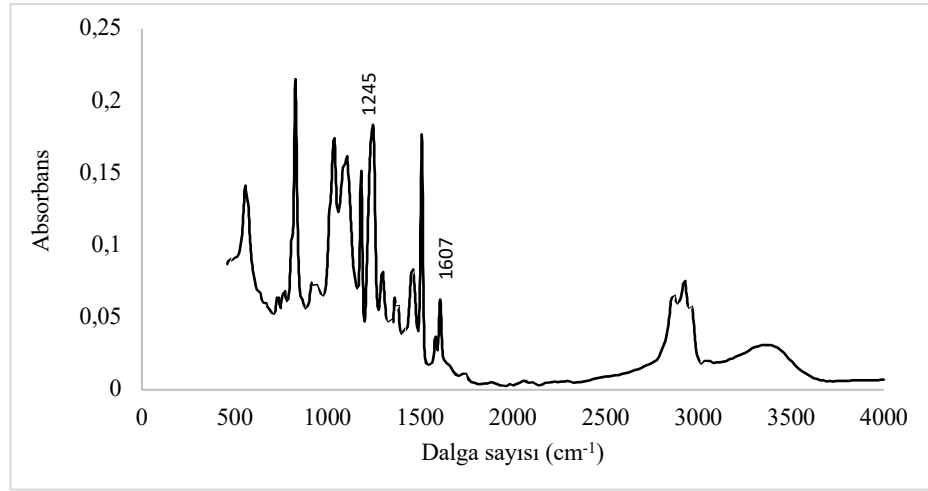
6.1.3.2 FTIR analizi

AESO, epoksi ve takviye malzemesine uygulanan FTIR analizi sonuçları Şekil 6.11-6.13'de verilmiştir.



Şekil 6.11 : AESO reçinesinin FTIR analizleri.

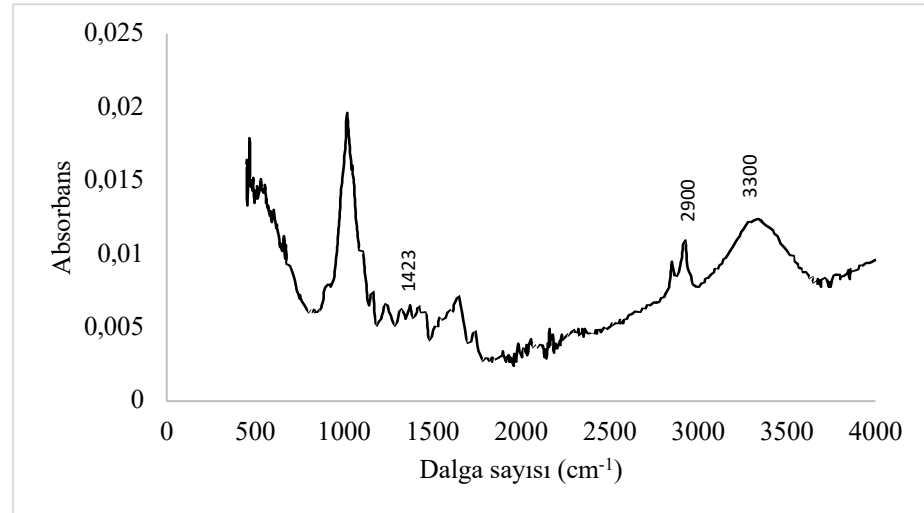
AESO reçinesinin -CH₃ ve -CH₂ gerilme titreşimlerine (Şekil 6.11) karşılık gelen karakteristik pikleri yaklaşık 2922, 2853, 1463 ve 1455 cm⁻¹'de tespit edilmiştir. Ayrıca, AESO reçinesindeki doymamış çift bağları gösteren C=C-, -COOC ve -C-O-C- grupları da yaklaşık 1651, 1743 ve 1098 cm⁻¹'deki piklerden gözlemlenebilir (Bao ve diğ, 2014).



Şekil 6.12 : Epoksi reçinesinin FTIR analizleri.

Şekil 6.12'de gösterilen FTIR analizi, saf epoksi reçinesinin karakteristik piklerini göstermektedir. –OH germe bandı 3445 cm^{-1} 'de gözlenirken, 2972 ve 1383 cm^{-1} pik noktaları $-\text{CH}_3$, 2870 ve 1457 cm^{-1} pik noktaları $-\text{CH}_2$ asimetrik ve simetrik germe bantlarını gösterir.

Epoksit gruplarının karakteristik absorpsiyon pikleri ve yapıdaki eter bağları sırasıyla 915 ve 1245 cm^{-1} bantlarında gösterilmektedir. Ayrıca, saf epoksi reçinedeki aromatik halkalar 1607 , 1511 ve 829 cm^{-1} olarak atanmıştır (Cakic ve diğ., 2012).



Şekil 6.13 : Jüt kumaşın FTIR analizleri.

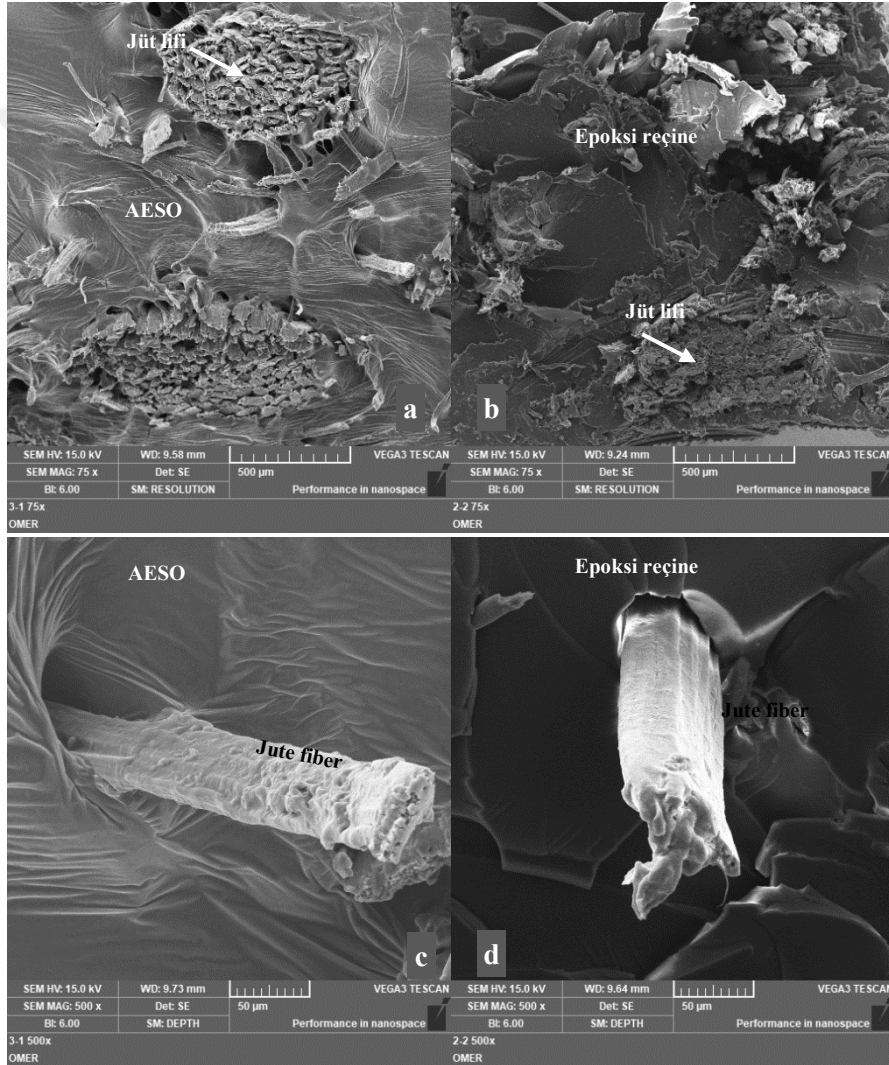
3300 cm^{-1} civarındaki geniş bir soğurma bandı, $-\text{OH}$ bağ gerilmesine aittir ve Şekil 6.13'te gösterilmektedir. Bu bağ, lif-matris arayüzünü geliştirerek, yukarıda bahsedildiği gibi gelişmiş mukavemet ile sonuçlanır. Jütün 2900 cm^{-1} 'deki karakteristik piki, selüloz ve hemiselülozda metil ve metilen gruplarında C–H

esnemesini gösterir. Selülozun glikozidik bağlantısında C–O gerilmesi 1042 cm^{-1} bandında gözlenir (Wang ve diğ, 2019). Ayrıca 662, 895, 1423 ve 2883 cm^{-1} 'deki selüloz absorbans bantlarının bir kısmı Şekil 6.12'de de tespit edilebilir (Ornaghi ve diğ, 2014).

6.1.4 Morfolojik analizler

SEM analizi

0BIO ve 100BIO numunelerinin SEM görselleri Şekil 6.14'te gösterilmektedir.



Şekil 6.14 : a.100BIO (75x), b.0BIO (75x), c.100BIO (500x) ve d.0BIO (500x) numunelerinin SEM görselleri.

AESO ve epoksi bazlı kompozitlerin mekanik ve fiziksel test sonuçlarındaki göze çarpan fark SEM görselleri ile de desteklenmektedir. Görseller incelendiğinde, kompozit malzemedeki AESO reçinesinin elyafın etrafında kavrayıcı bir yapı

oluşturduğu, epoksi reçinesinin ise elyaf ile daha keskin bir arayüze sahip olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.14c'de gözlemlenen AESO reçine malzemesinin akışkan yapısı, 100BIO numunesinin daha yüksek uzama ve daha düşük mukavemet değerleriyle örtüşürken, Şekil 6.14d'deki keskin/kırılgan epoksi matris yapısı, 0BIO'nun 100BIO numunesine kıyasla, daha düşük uzama ve daha yüksek çekme mukavemeti değerlerini desteklemektedir (Şekil 6.5–6.6). Ayrıca, düşen ağırlık darbe testinde 0BIO-30BIO numunelerinin darbe testi sonrası darbe hasarının görselinde oluşan tam açıklık; 40BIO ve 50BIO numunelerinin hasar görselinde oluşan kısmi açıklık ve ağırlıkça %60 ve üzeri AESO oranına sahip numunelerin hasar görselinde oluşan küçük ve çapraz şekilli çatlaklar da (Şekil 6.4) bu sonuçlarla desteklenebilir.

6.2 Seçilen AESO Reçine Oranları İle Üretim ve Kür Sıcaklıklarının Biyo-kompozitin Nihai Özellikleri Üzerindeki Etkisine Dair Sonuçlar

Bu kısımda artan AESO oranının yanısıra, kürleme sıcaklıklarının kompozitler üzerindeki etkisini incelemeye yönelik olarak beş farklı AESO oranında (%0, %30, %50, %70 ve %100) ve üç farklı sıcaklıkta (oda, 90°C ve 120°C) üretilmiş kompozitlerin fiziksel, mekanik, enstrümantal ve morfolojik analiz sonuçlarına yer almaktadır.

6.2.1 Fiziksel analizler

6.2.1.1 Yoğunluk ve elyaf ağırlık oranı

Kompozit numunelerin yoğunlukları ve elyaf ağırlık oranları Çizelge 6.4'te listelenmiştir.

Kürleme ve ardıl-kürleme sıcaklık değerleri, kompozitlerin çapraz bağ oranını, camsı geçiş sıcaklığını ve yoğunluğunu belirlemektedir. Isıl işlem, çapraz bağ oranını artırır ki bu durum, molekül zincirlerinin yeniden düzenlenmesine ve serbest uç sayısının azalmasına yol açar. Bunun sonucu olarak da kompozitin hacminde bir değişiklik (serbest hacim + kapsanan hacim) meydana gelir (Campana ve diğ, 2018). Sonuçlar değerlendirildiğinde ısıtılmanın numunelerin yoğunluğunda ve elyaf ağırlık oranında bir artışa neden olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu artış 0BIO numunelerinde belirgin artan biyo-reçine oranı ile ısıtılmanın etkisi azalmakta ya da ortadan kalkmaktadır. Bunun sebebinin, epoksinin T_g değerinin oda sıcaklığının üstünde

olması ve ısıtıl işlemin kürlenme oranını artırması olabileceği düşünülmektedir. Isıl işlemin kürlenme oranı üzerindeki etkisi, AESO'nun T_g değeri oda sıcaklığının altında olduğundan karışım reçineli biyo-kompozitlerde aynı şekilde görülmemektedir.

Çizelge 6.4 : Biyo-kompozit numunelerin kalınlık, yoğunluk ve elyaf ağırlık oranları.

	Yoğunluk (g/cm ³)	Kalınlık (mm)	Elyaf ağırlık oranı (%)
0BIO	1,033 ± 0,004	2,81 ± 0,02	36,50 ± 1,27
0BIO-90	1,063 ± 0,002	2,60 ± 0,01	45,96 ± 2,63
0BIO-120	1,046 ± 0,025	2,52 ± 0,02	53,63 ± 0,49
30BIO	1,108 ± 0,012	2,71 ± 0,04	41,03 ± 0,64
30BIO-90	1,175 ± 0,016	2,67 ± 0,02	43,04 ± 0,05
30BIO-120	1,110 ± 0,015	2,68 ± 0,03	43,06 ± 0,06
50BIO	1,128 ± 0,186	2,91 ± 0,11	39,72 ± 5,45
50BIO-90	1,167 ± 0,062	2,64 ± 0,07	44,42 ± 1,64
50BIO-120	1,017 ± 0,180	2,68 ± 0,09	45,42 ± 5,53
70BIO	1,085 ± 0,001	2,83 ± 0,06	42,29 ± 1,93
70BIO-90	1,095 ± 0,007	2,80 ± 0,04	42,60 ± 0,68
70BIO-120	1,038 ± 0,051	2,74 ± 0,05	44,54 ± 0,64
100BIO	1,003 ± 0,047	2,93 ± 0,13	41,12 ± 0,75
100BIO-90	1,012 ± 0,021	2,92 ± 0,11	41,50 ± 0,07
100BIO-120	1,025 ± 0,066	2,88 ± 0,14	42,62 ± 0,86

6.2.1.2 Su emme testi

Su emme testi sonuçları Çizelge 6.5'te verilmiştir. Sonuçlara göre, 0BIO ve 30BIO numunelerinin su emme yüzdeleri artan ısıtıl işlemlerle (90°C'de kürlenme ve 120°C'de ardıl kürlenme) azalmaktadır. Matris sistemindeki AESO içeriği %50'ye (50BIO) ulaştığında, ısıtıl işlemin kompozitlerin su emilimi üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür. 50BIO numunelerinin su emme değerleri arasındaki istatistiksel analize göre 20°C'de kürlenmiş numunelerin su emme değerleri ile 90°C'de kürlenmiş numunelerin su emme değerleri ($p=0,03<0,05$) arasında önemli bir farklılık gözlenirken, 90°C'de kürlenmiş ile 120°C'de ardıl kürlenmiş numunelerin su emme değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur ($p=0,397>0,05$). Daha yüksek biyo-reçine içeriğine sahip numuneler (%70 ve %100), 90°C'de kürlendiklerinde su emme yüzdelerinde bir düşüş ve 120°C'de ardıl-kürlendiklerinde ise su emme yüzdelerinde kısmi bir artış gözlenmiştir. Ardıl-kürlenme sonrası görülen bu artışa rağmen elde edilen su emme değerlerinin ısıtıl işlem görmemiş numunelere

kıyasla oldukça düşük olması, uygulanan ısı işlemin su emme değerlerini düşürdüğünü göstermektedir. Kürlleme ve ardıl-kürlleme işlemlerinin, 50BIO numunesi haricindeki numune gruplarının, su emme özellikleri üzerinde önemli bir fark yarattığı istatistiksel olarak kanıtlanmıştır ($p<0,05$). Bunun sebebi 90°C’de kürlleme ve 120°C’de ardıl-kürllemede AESO içeriğinin kürlenme oranının iyileşmesi olarak yorumlanmıştır keza literatürdeki çalışmalar AESO kürlenmesinin malzemedeki çapraz bağların sayısını artırdığını ve bunun da su moleküllerinin yapıya girişini azalttığını kanıtlamaktadır (Tan ve Chow, 2011). Bununla beraber biyo-reçinenin artan oranının kürlenme ısısından bağımsız olarak kompozit malzemenin su emme özelliğini arttırdığı görülmektedir.

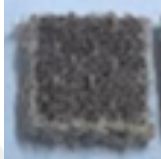
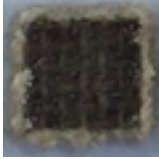
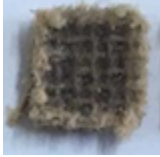
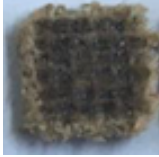
Çizelge 6.5 : Biyo-kompozit numunelerin su emme testi sonuçları.

Numune Kodları	Su emme değeri $\pm$ SS (%)
0BIO	12,01 $\pm$ 1,62
0BIO-90	7,23 $\pm$ 0,13
0BIO-120	3,69 $\pm$ 0,29
30BIO	10,25 $\pm$ 0,76
30BIO-90	9,75 $\pm$ 0,94
30BIO-120	6,32 $\pm$ 0,58
50BIO	15,81 $\pm$ 0,15
50BIO-90	16,83 $\pm$ 0,42
50BIO-120	13,37 $\pm$ 2,90
70BIO	31,60 $\pm$ 0,69
70BIO-90	18,71 $\pm$ 0,01
70BIO-120	23,27 $\pm$ 1,52
100BIO	94,93 $\pm$ 0,54
100BIO-90	63,32 $\pm$ 0,52
100BIO-120	72,13 $\pm$ 4,47

Su emme testi sonrası numune görselleri Şekil 6.15'te görülebilir. Numune görselleri, oda sıcaklığında kürlen numunelerin yüksek su emme değerleri nedeniyle yapısal bir bozulma gösterdiğini kanıtlamaktadır. Öte yandan bu yapısal bozulmanın 90°C’de kürlleme ve 120°C’de ardıl-kürllemede düzeldiği ve numune hatlarının belirginleştiği görülmektedir. Örneğin, 100BIO numunesi suda bekledikten sonra yapısı oldukça bozulmuş ve kompozit formundan uzaklaşmıştır. Ancak 90°C’de kürlen 100BIO-90 ve ardıl-kürlen 100BIO-120 numunelerinde bu olumsuz durumun düzeldiği görülmektedir. Ayrıca, 100BIO numunesinin bozulması çok net bir şekilde görülüyor

olmasına rağmen, yüksek sıcaklıkta kürlenene 100BIO-120 numunesi neredeyse 0BIO numunesi ile benzer yapısal deformasyona sahiptir.

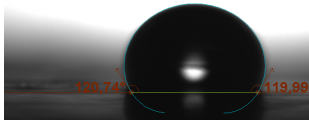
Çizelge 6.6 : Biyo-kompozit numunelerin su emme testi sonrası görselleri.

Numuneler	Kürleme ve ardıl-kürleme sıcaklıkları		
	20°C	90°C	120°C
0BIO			
30BIO			
50BIO			
70BIO			
100BIO			

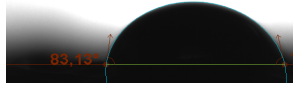
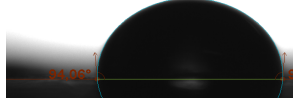
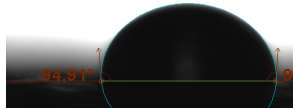
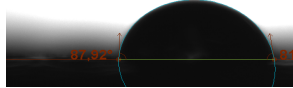
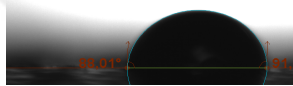
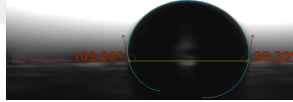
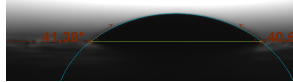
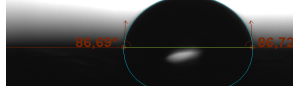
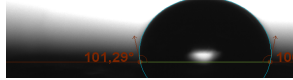
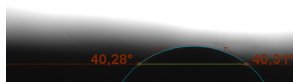
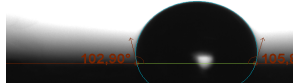
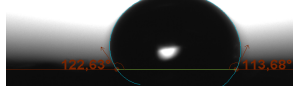
6.2.1.3 Su temas açısı testi

Su temas açısı test sonuçları Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.7 : Biyo-kompozit numunelerin su temas açısı testi sonuçları.

Numuneler	Sol TA (°)	Sağ TA (°)	Ortalama TA (°)	Damlacık görseli
0BIO	122,55 ± 1,55	121,73 ± 1,43	122,14 ± 1,48	
0BIO-90	84,56 ± 0,88	85,30 ± 1,25	84,93 ± 1,06	

Çizelge 6.7 (devam) : Biyo-kompozit numunelerin su temas açısı testi sonuçları.

Numuneler	Sol TA (°)	Sağ TA (°)	Ortalama TA (°)	Damlacık görseli
0BIO-120	83,21± 0,24	78,27 ± 0,22	80,74 ± 0,19	
30BIO	96,44 ± 1.30	96,22 ± 1,52	96,33 ± 1.41	
30BIO-90	94,95 ± 0,18	92,57± 0,14	93,76 ±0,97	
30BIO-120	88,03 ± 0,12	81,87 ± 0,11	84,70 ± 0,11	
50BIO	66,43 ± 0,28	62,74 ± 0,19	64,58 ± 0,23	
50BIO-90	88,51 ± 0,43	91,55 ±0,32	90,03 ±0,37	
50BIO-120	102,24 ± 0,18	98,59 ± 0,23	100,41 ± 0,20	
70BIO	41,51 ± 0,33	40,24 ± 0,83	40,87 ± 0,50	
70BIO-90	87,31 ± 0,32	87,30 ± 0,32	87,31 ± 0,32	
70BIO-120	101,63 ± 0,25	100,64 ± 0,19	101,14 ± 0,21	
100BIO	51,20 ± 12,41	52,81± 16,82	52,00± 13,84	
100BIO-90	106,38 ± 2,14	109,66 ± 2,26	108,02 ± 2,20	
100BIO-120	125,57 ± 1,92	118,11± 3,16	121,84± 2,52	

Çizelge 6.6'da verilen ölçüm sonuçlarına göre, epoksi reçine ve AESO reçine ısıtıl işlem gördüklerinde suya karşı farklı bir davranış sergilemektedir. 90°C'de kürlleme ve ardıl-kürlleme işlemleri ile üretilen 0BIO numunesindeki su temas açısı 122°'den 81°'ye düşmüş ve benzer özellik %30 AESO içeren 30BIO numunesinde de 96°'den 64°'ye düşüş şeklinde kendini göstermiştir (0BIO numunesinde, ekstra ısıtıl işlem uygulanmaksızın oda sıcaklığında (20°C'de) kürlenen (0BIO) ve 90°C'de kürlenen numunelerin (0BIO-90) temas açısı değerleri arasında anlamlı bir fark ($p=0,000<0,05$) gözlenirken, 90°C'de kürlenen numune (0BIO-90) ile 120°C'de ardıl-kürlenen numuneler (0BIO-120) arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p=0,101>0,05$). Her iki sıcaklığın da (90°C ve 120°C) epoksinin T_g değerinin üzerinde olması nedeniyle numunelerin temas açısı değerleri arasında önemli bir fark olmaması beklenen bir sonuçtur. Bununla birlikte, biyo-reçine oranı %50 veya daha fazla olan (50BIO, 70BIO ve 100BIO) numune gruplarının su temas açıları, 90°C'de kürlleme ve 120°C'de ardıl-kürlleme sonrası işlemlerle istatistiksel olarak anlamlı ($p=0,000<0,05$) bir artış göstermektedir. Bu numune gruplarında AESO'nun karakteristik özelliklerinin ön plana çıktığı ve AESO içeriğinin kompozit numunelerin su ile temas davranışları üzerinde büyük etkisi olduğu söylenebilir. AESO reçinesinin yapısındaki çapraz bağlar, 90°C'de kürlleme ve 120°C'de ardıl-kürlleme işlemlerine bağlı olarak artar ve bu da su damlacıklarının kompozit malzemeye nüfuz etmesini zorlaştırır (Tan ve Chow, 2011).

6.2.2 Mekanik analizler

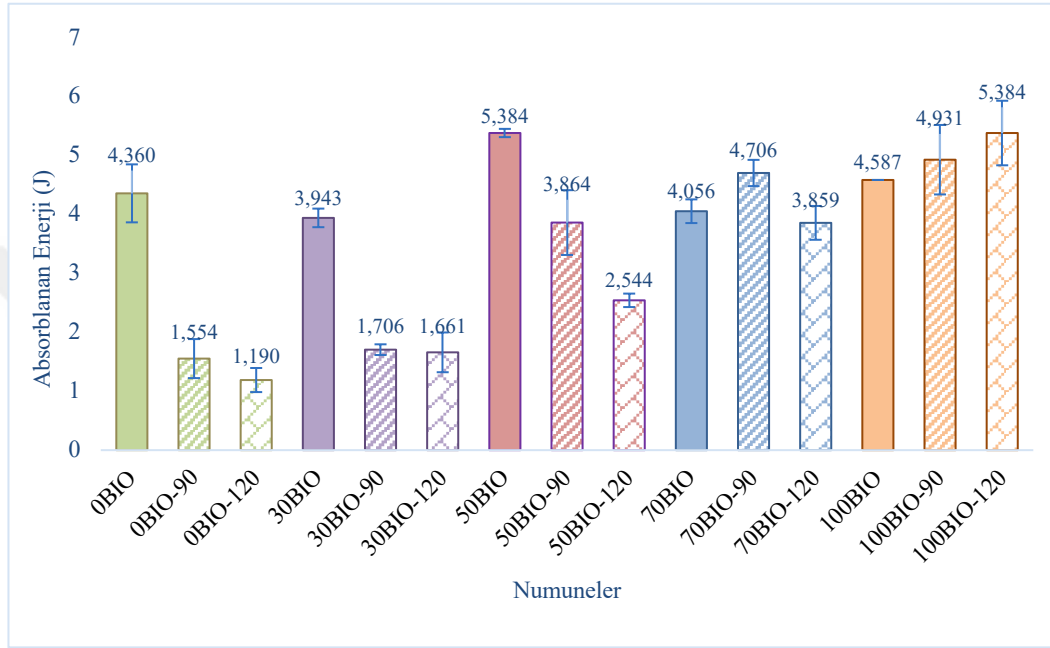
6.2.2.1 Düşen ağırlık darbe testi

Kompozitlerin absorblanan enerjileri Şekil 6.16'da verilmiştir.

Sonuçlara göre, %0-50 AESO reçinesi içeren numunelerde 90°C'de kürlleme ve 120°C'de ardıl-kürlleme işlemleri ile darbe dayanımının giderek azaldığı görülmektedir. Bu durum, numunelerin ısıtıl işlem altında daha kırılgan hale gelmesiyle açıklanabilir (Campana ve diğ, 2018).

Numunelerdeki AESO oranları %50'yi aştığında, 90°C'de kürlleme ve 120°C'de ardıl-kürlleme işlemlerinin, malzemeyi kırılgan hale getirmekteki etkisinin neredeyse kaybolduğu söylenebilir. 90°C'de kürlleme ve 120°C'de ardıl-kürlleme işlemlerinin, biyo-reçine katkısının %50'ye kadar olan numunelerin, darbe dayanımı özellikleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkileri olduğu ($p<0,05$) görülürken, bu ısıtıl

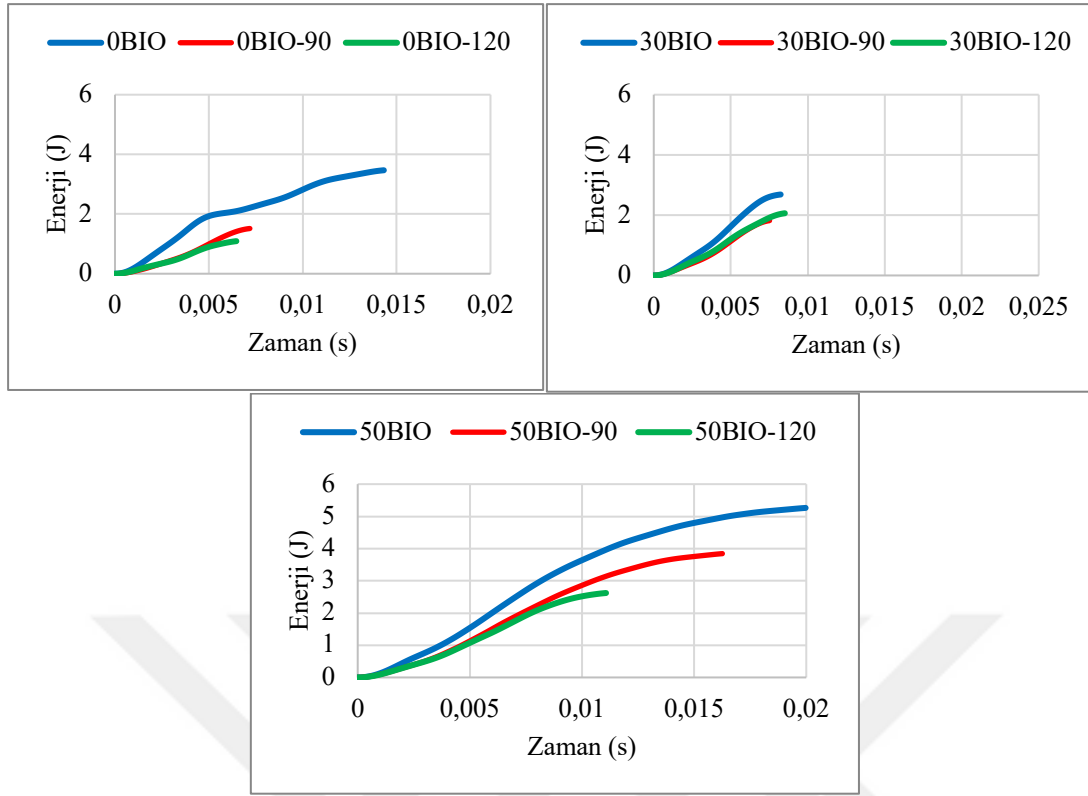
işlemlerin, daha yüksek biyo-reçine içeriğine sahip numunelerin (70BIO ve 100BIO), darbe dayanımına etkisi istatistiksel olarak anlamlı çıkmamıştır ($0,05 < p < 0,339$). 70BIO ve 100BIO numuneleri, yüksek AESO içerikleri nedeniyle diğer örneklerle kıyasla oldukça sünek malzeme davranışı gösterirler. Bu davranış nedeniyle test sırasında darbe vurucu ucun kayma yaşadığı dolayısıyla bu durumun sonuçlara etki ettiği ve istatistiksel olarak anlamlı bir farkın elde edilemediği düşünülmektedir.



Şekil 6.15 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe dayanımı test sonuçları.

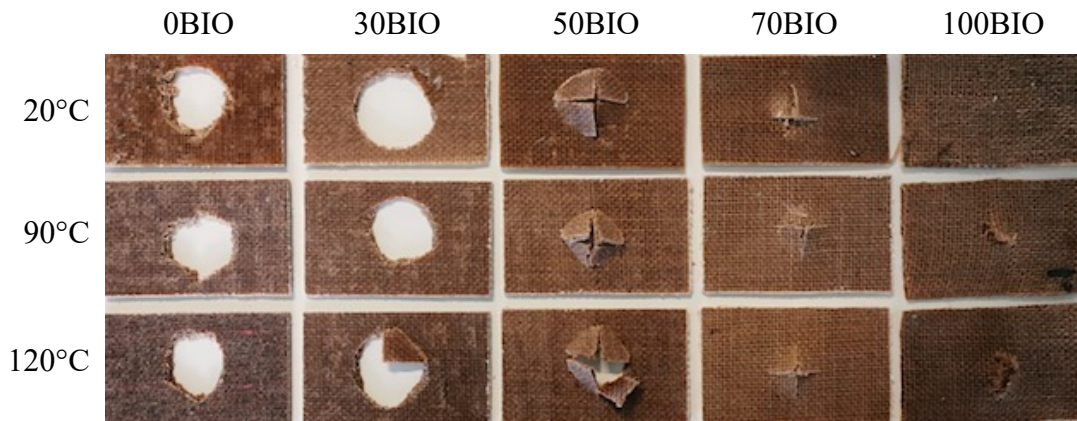
Biyo-reçine oranının kompozit malzemenin darbe dayanımına etkisi incelendiğinde, %50 biyo-reçine içeren numunenin en yüksek değere (5,384 J) ulaştığı görülmektedir. Bu sonuç, Altuna ve diğ. (2010) nin yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçla örtüşmektedir; araştırmacıların yaptıkları çalışmaya göre epoksi ve soya fasulyesi yağı içeren kompozit malzemedde, soya fasulyesi yağı oranı %60'a yükseldiğinde malzemenin darbe dayanımının azaldığı gözlenmiştir.

Şekil 6.17’de seçili kompozitlerin (0BIO-30BIO-50BIO) düşen ağırlık test sonuçlarından elde edilen enerji-zaman eğrileri yer almaktadır. Bu eğrilerde, Şekil 6.16’da elde edilen sonuçlara paralel şekilde, artan AESO oranıyla absorplanan enerjinin arttığı, ısıtma işlemi ise kompozitlerdeki absorplanan enerji değerlerinin düştüğü görülmektedir. En belirgin düşüş 0BIO’da gerçekleşirken AESO oranı arttıkça ısıtma işleminin etkisi azalmaktadır.



Şekil 6.16 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi enerji-zaman eğrileri.

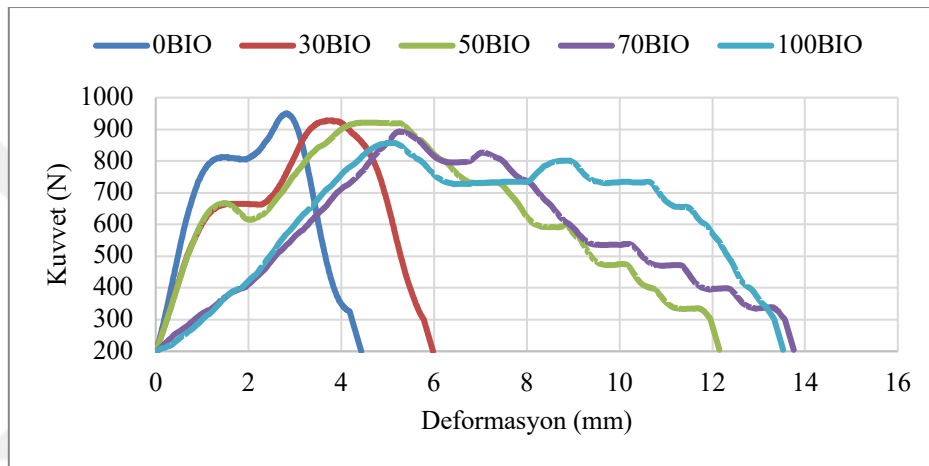
Kompozit numunelerin hasar görselleri Şekil 6.18'de görülmektedir ve düşen ağırlık darbe dayanımı testi sonrası alınan bu görüntüler, sayısal bulguları desteklemektedir (Şekil 6.16).



Şekil 6.17 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi sonrası oluşan hasar görselleri.

Şekil 6.19'da numunelere ait kuvvet-deformasyon grafiği verilmiştir. Grafikten elde edilen açık eğriler vurucu ucun numunelere tam olarak nüfuz ettiğini yani tam penetrasyonun gerçekleştiğini göstermektedir (Dalfi ve diğ, 2021). Bunu destekler nitelikte hasar desenlerinden elde edilen sonuçlara göre artan biyo-reçine oranı ile

oluşan hasar boyutunda azalma hatta kapanma görülmektedir. Biyo-reçine oranı %50'ye ulaştığında tam penetrasyonun neden olduğu açıklık, yerini çapraz şekilli çatlak formuna bırakmaya başlamıştır. Ayrıca bu numunelerin test sonrasında, elastik yapıları sayesinde geri topladıkları da görülmüştür. Bu sonuçlar, artan biyo-reçine oranı nedeniyle artan süneklik ile açıklanabilir. Malzeme yüksek sıcaklıklarda kürlendiğinde, diğer mekanik test sonuçlarında da görüldüğü gibi, kırılgan hale gelir. Bu, tüm numunelerin, özellikle de biyo-reçine içerenlerin hasar modellerinden görülebilir. En bariz örnek, %50 biyo-reçine içeriğine sahip numunedir. Bu örnekte ısıtma işlemiyle kırılgan hale gelen hasar deseni net bir şekilde seçilebilmektedir.



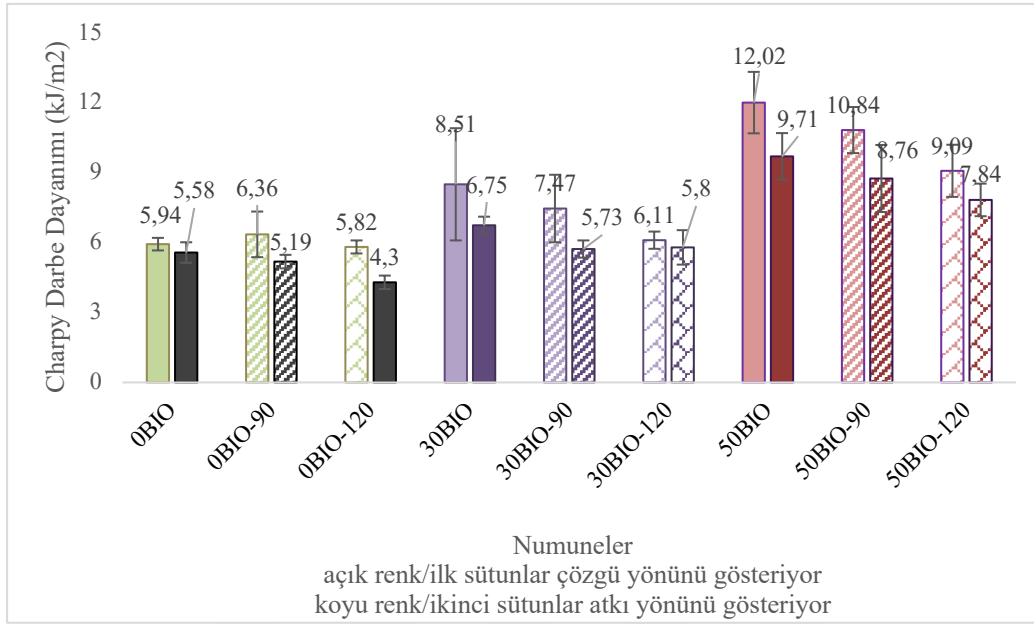
Şekil 6.18 : Biyo-kompozit numunelerin düşen ağırlık darbe testi kuvvet-deformasyon eğrileri.

6.2.2.2 Charpy darbe testi

Charpy darbe dayanımı test sonuçları Şekil 6.20'de verilmiştir.

Şekil 6.20'deki verilere göre, her iki yönde (çözgü ve atkı) test edilen tüm numunelerin Charpy darbe dayanımı sonuçları, ardışık ısıtma işlemleriyle kademeli olarak azalmaktadır. Bunun nedeni, düşen ağırlık darbe testi sonuçlarında açıklandığı gibi malzemenin yapısal olarak daha kırılgan hale gelmesidir. Ayrıca artan biyo-reçine oranı ile kompozit malzemenin darbe dayanımının arttığı rahatlıkla görülebilmektedir. 70BIO ve 100BIO numuneleri test sırasında kırılmadan test cihazının dışına fırlamıştır, bu durum sırasında numune ile test cihazı arasında yüksek sürtünme oluşmuş ve bu istenmeyen sürtünme nedeniyle de darbe dayanımı sonuçları beklenenden çok daha yüksek olarak ölçülmüştür, dolayısıyla 70BIO ve 100BIO numunelerinin sonuçları değerlendirilmemiştir. Benzer sıkıntıyla, her ne kadar testin gerçekleşmesine engel teşkil etmemiş olsa da düşen ağırlık darbe testi sonuçlarında da (Şekil 6.16)

karşılaşılmıştır. Bu numune gruplarının darbe testi sonuçları test esnasında oluşan kayma etkisi sonucu ortaya çıkan yüksek sürtünme sebebiyle gerçekçi bulunmamıştır.



Şekil 6.19 : Biyo-kompozit numunelerin Charpy darbe dayanımı test sonuçları.

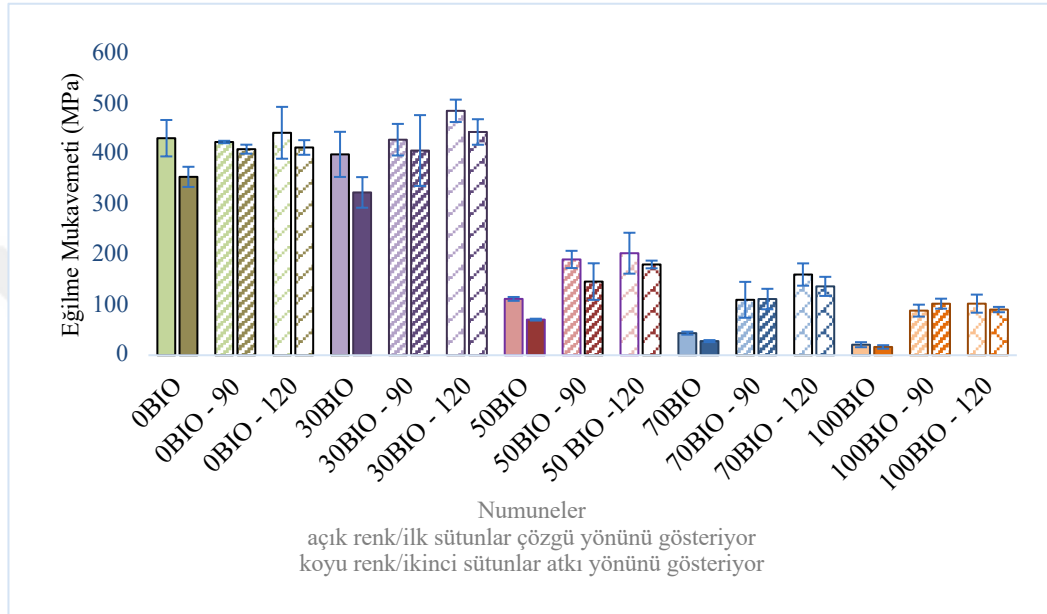
Ayrıca test yönü değerlendirildiğinde, numunelerin çözgü yönündeki darbe dayanımının test edilen tüm numune grupları için daha yüksek olduğu görülmektedir. Tüm bunların sonucunda çözgü yönündeki 50BIO numunelerinin, ısıtma işlem sıcaklığına bakılmaksızın 9,09-12,02 kJ/m² arasında değişen değerleriyle en yüksek darbe dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

6.2.2.3 Üç nokta eğilme testi

Üç nokta eğilme test sonuçları Şekil 6.21'de verilmiştir.

Şekil 6.21'de verilen test sonuçları incelendiğinde, tüm numunelerin eğilme mukavemetinin hem çözgü hem de atkı yönlerinde ısıtma işlemle arttığı görülmektedir. Sonuçlar, daha önce bahsedilen darbe testi sonuçlarıyla tutarlıdır. Isıtma işlemle artan kırılma dayanımı dolayısıyla süneklikteki azalma, numunenin baskı kuvveti altında daha fazla direnç göstermesine neden olur, bu da eğilme mukavemetini artırır. %50 ve üzeri AESO içeren numunelerde artan biyo-reçine oranının eğilme mukavemetini önemli ölçüde azalttığı net bir şekilde görülebilmektedir. Bunun nedeni, AESO reçinesinin plastikleştirici etkisidir (Ratna, 2001). 20°C'de kürlenmiş numuneler ile 90°C'de kürlenmiş numuneler ve 90°C'de kürlenmiş numuneler ile 120°C'de ardıl-kürlenmiş

numunelerin ikili karşılaştırmaları incelendiğinde, 90°C'de kürlenmiş numunelere karşı 120°C'de ardıl-kürlenmiş numunelerin karşılaştırılmasının p değerleri diğer gruptan oldukça yüksek çıkmıştır. Bu, 90°C'deki kürlenme işleminin malzemenin eğilme dayanımını artırdığını ancak ardıl-kürlenme işleminin önemli bir katkı yapmadığını göstermektedir. Öte yandan, çözgü yönündeki eğilme mukavemeti değerleri genel olarak atkı yönü eğilme mukavemeti değerlerinden biraz daha yüksek ölçülmüştür.

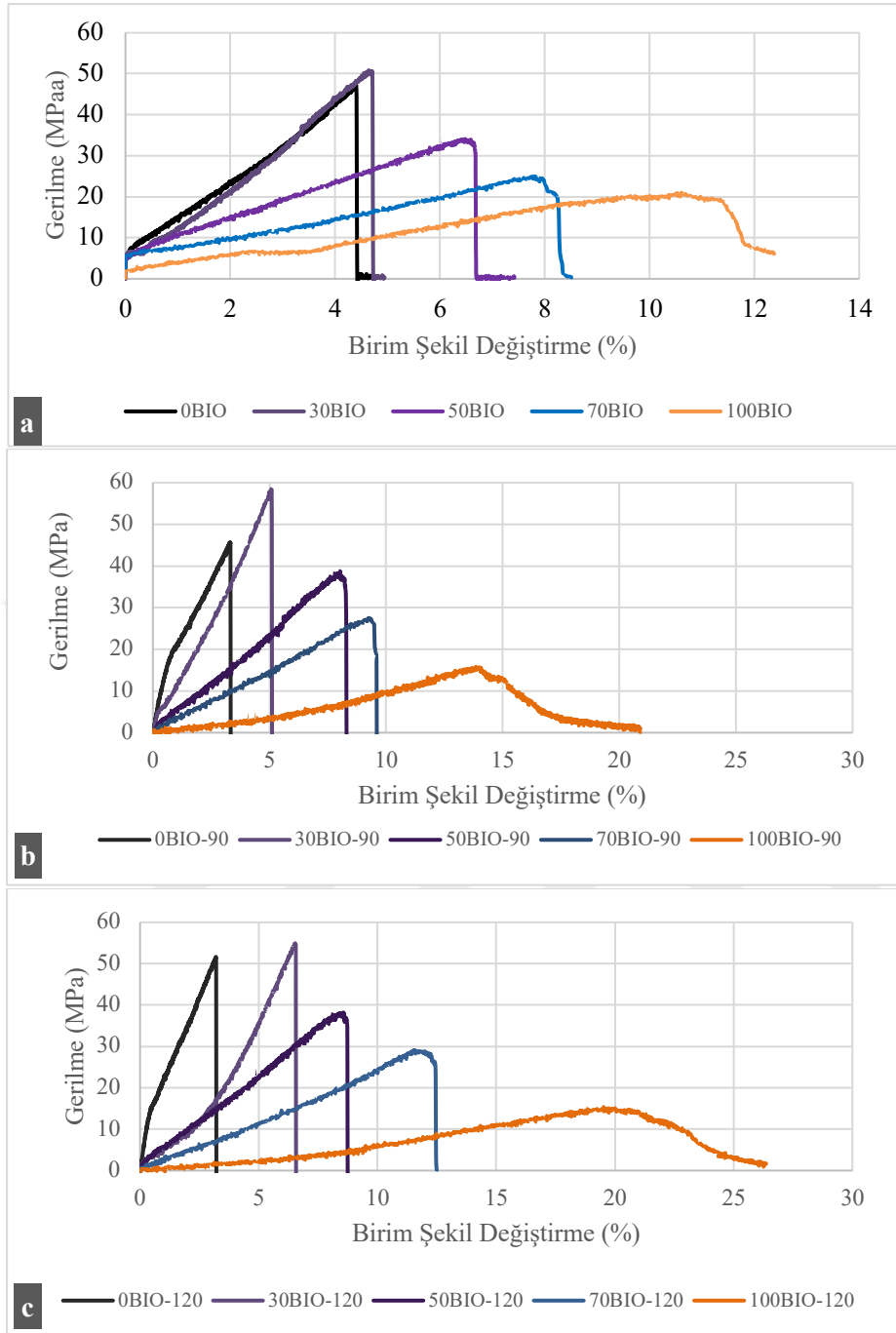


Şekil 6.20 : Biyo-kompozit numunelerin eğilme mukavemeti test sonuçları.

6.2.2.4 Çekme mukavemeti testi

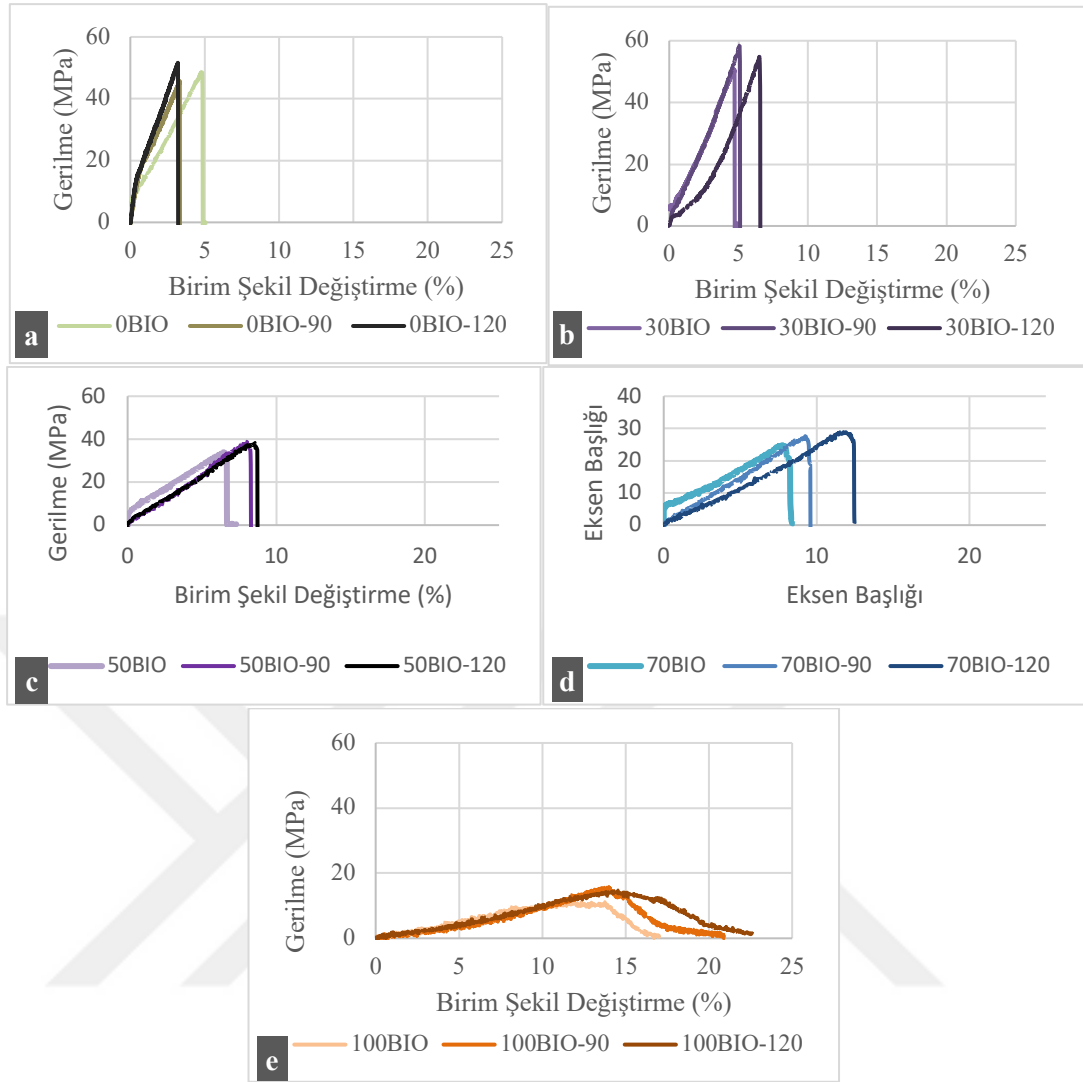
Her üç işlem sıcaklığına dair AESO içeriğine göre çizdirilmiş gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.22'de verilmiştir.

20°C ile 90°C'de kürlenmiş ve 120°C'de ardıl-kürlenmiş numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde 30BIO numunesinin en yüksek çekme dayanımı değer aralığına (50-60 MPa) sahip olduğu görülmektedir. Öte yandan artan biyo-reçine oranı (%50'den %100'e) ile uzama değerleri artarken gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Diğer bir deyişle, %30 AESO içeriği, katmanlarına ayrılma veya sıyrılma problemi olmadan, güçlü bir bağlanma sağlayarak saf epoksi reçinenin (0BIO) çekme mukavemetini geliştirmiştir (Özkür ve diğ, 2020; Sahoo ve diğ, 2018). %50 veya daha fazla biyo-içerikli numunelerde, daha yüksek uzama değerinde (%6,5-26) daha düşük çekme mukavemeti değerleri (15-40 MPa) elde edilmiştir ve bu durum malzemenin elastik modülünün azaldığını göstermektedir.



Şekil 6.21 : a.20°C’de kürleme b.90°C’de kürleme c.120°C’de ardıl-kürleme numunelerinin AESO içeriğine göre gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

Kompozit numune gruplarının ısı işlem etkisine dayalı gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 6.23’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre saf epoksi içeren numunelerde (0BIO), artan ısı işlem ile daha düşük uzama değerlerinde daha yüksek çekme mukavemeti değerleri elde edilmektedir. Bu, 0BIO numunelerinde elastik modülün 90°C’de kürleme ve 120°C’de ardıl-kürleme işlemleri ile arttığını göstermektedir.



Şekil 6.22 : Biyo-kompozit numunelerine ait ısıtıl işlem etkisini gösteren gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (a)0BIO, (b)30BIO, (c)50BIO, (d)70BIO, (e)100BIO.

6.2.3 Enstrümantal analizler

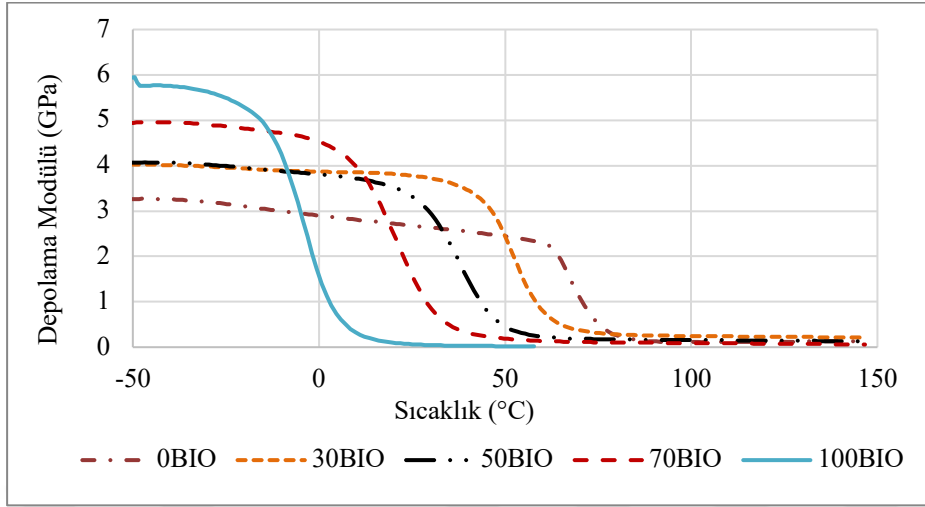
6.2.3.1 DMA analizi

Depolama modülü

Artan AESO içeriğinin, oda sıcaklığında üretilen numunelerin, depolama modülü değerleri üzerindeki etkisi Şekil 6.24'te verilmiştir.

Malzemenin bir döngüde depoladığı enerji ile orantılı olan depolama modülü, malzemenin elastik davranışını göstermektedir (Sezgin ve diğ., 2020). Camı bölgede kompozit numunelerin depolama modülü değerleri incelenmiş ve en yüksek değer, yüksek sünek yapıya sahip saf AESO reçinesi ile üretilen 100BIO numunesinde, en düşük değer ise rijit bir yapıya sahip saf epoksi reçine ile üretilen 0BIO numunesinde

görülmüştür. Buna paralel olarak karışım numunelerde AESO içeriğinin artmasıyla depolama modülü değerlerinin arttığı görülmektedir.

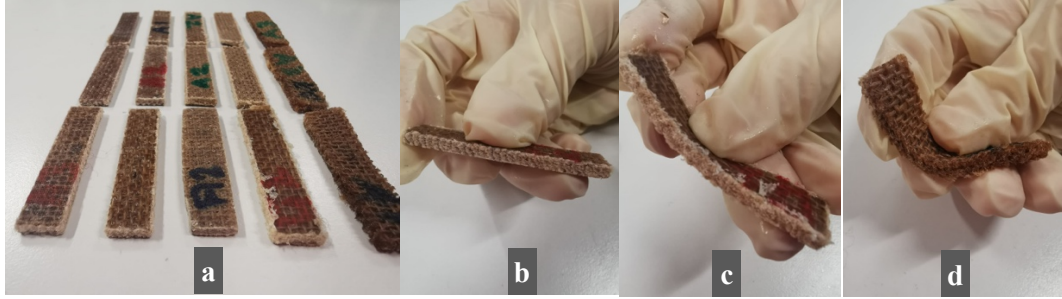


Şekil 6.23 : Oda sıcaklığında üretilmiş biyo-kompozit numunelerinde artan AESO içeriğinin depolama modülüne etkisi.

Malzemeler camsı bölgedeyken, moleküller hareketsiz olduğundan ve birbirleriyle sıkıca paketlenmiş olduğundan, moleküller arası bağ kuvveti oldukça güçlüdür. Bu, malzemenin yüksek bir depolama modülüne sahip olmasını sağlar. Sıcaklık arttıkça bu kuvvetler zayıflar ve moleküllerin hareketi artar ve dolayısıyla malzemenin depolama modülü azalır (Jabbar ve diğ., 2017). Üretilen malzemelerin oda sıcaklığında kullanılacağı düşünüldüğünde, bu malzemelerin camsı bölgeden kauçuksu bölgeye geçtiği sıcaklığın çok önemli bir parametre olduğu söylenebilir. 100BIO numunesi çok yüksek bir depolama modülüne ve dolayısıyla yüksek bir esnekliğe sahip olmasına rağmen, kauçuksu bölgeye geçişi yaklaşık -20°C'de başlar, bu da oda sıcaklığında kullanım için uygun olmadığını gösterir. Ayrıca 100BIO numuneler, oda sıcaklığında belli bir süre sonra yapışkan hale gelmektedir. Bu durum Şekil 6.25'teki numunelerin görselleri ile de tespit edilebilmektedir.

Karışım numunelerin sonuçları incelendiğinde, 70BIO numunesinin yaklaşık 0°C'de, 50BIO numunesinin yaklaşık 20°C'de ve 30BIO numunesinin yaklaşık 40°C'de kauçuksu bölgeye geçişe başladığı görülmektedir. Bu durum, 100BIO numunesinin oda sıcaklığında kullanılamayacağı gerçeğinden hareketle, karışım numuneler arasında oda sıcaklığında kullanım için en uygun numunenin 30BIO numunesi olduğunu gösterir çünkü camsı bölgeden kauçuksu bölgeye geçişi oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta başlar. %100 epoksi reçinesi ile üretilen 0BIO numunesi ile

%70 epoksi reçineden oluşan 30BIO numunesini karşılaştırdığımızda, 0BIO numunesinin kauçuksu bölgeye geçişinin daha yüksek bir sıcaklıkta (yaklaşık 60°C) başladığı görülmüş fakat epoksi reçinesine %30 AESO ilavesinin de depolama modülünde %25 artış sağladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.24 : Üretildikten sonra oda sıcaklığında 3 ay beklemiş numune görselleri a.tüm numuneler (soldan sağa 0BIO'dan 100BIO'ya; önden arkaya oda sıcaklığında kürlenenden 120°C'de ardıl-kürlenene), b.0BIO c.50BIO, ve d.100BIO numuneleri.

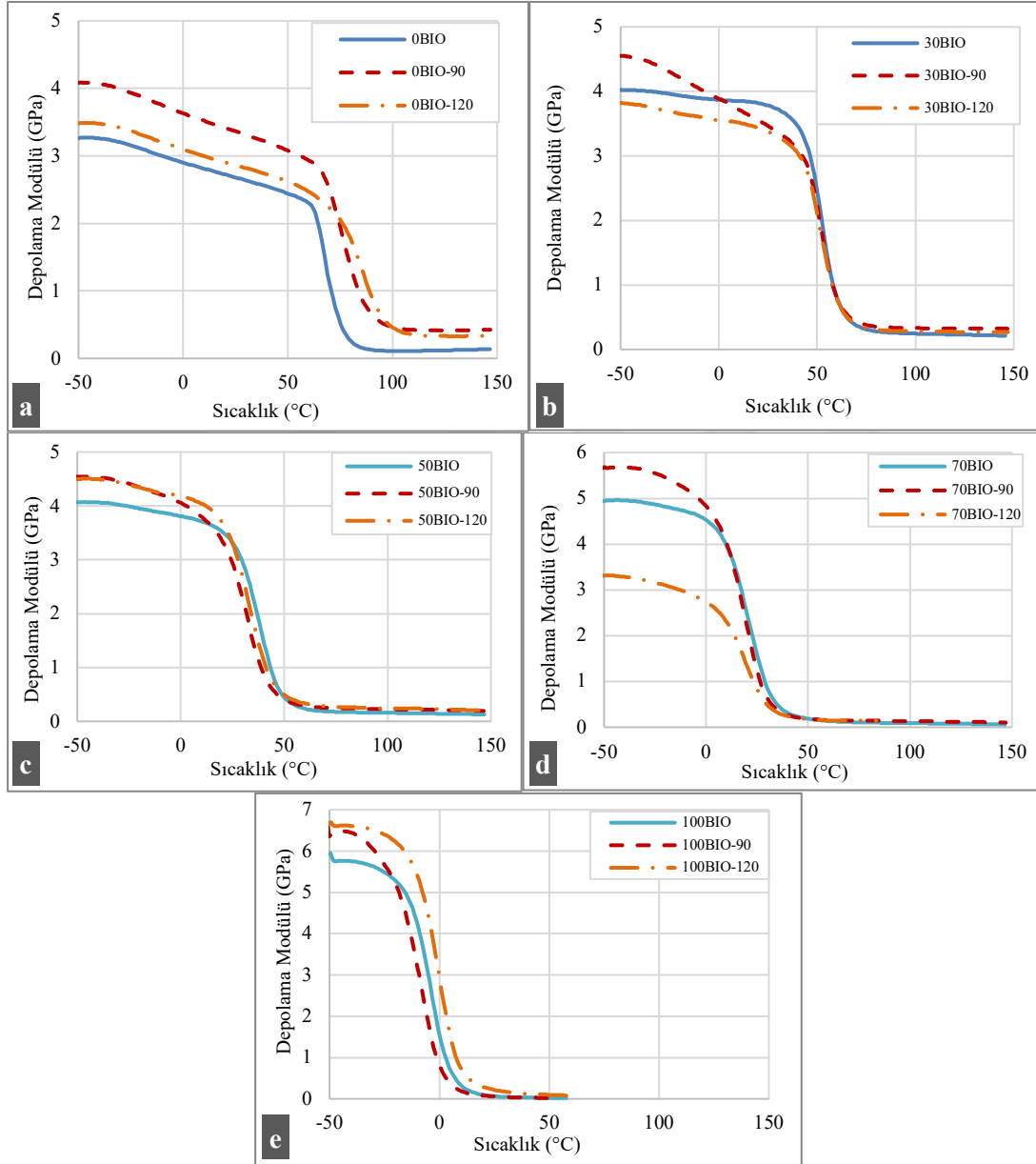
Farklı AESO oranlarına sahip beş farklı kompozit malzemeye uygulanan 90°C'de kürlleme ve 120°C'de ardıl-kürlenmenin etkilerini gösteren depolama modülü değerleri Şekil 6.26'da verilmiştir.

Camsı bölgede, tüm numune gruplarında, 90°C'de kürlenen numunelerin depolama modülünün, oda sıcaklığında kürlenen numunelerin depolama modülünden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, malzeme 90°C'de kürlendiğinde depoladığı enerji miktarındaki artışı ortaya koymaktadır.

90°C'de kürlenen kompozit numunelerin 120°C'lik ardıl-kürlleme işlemleri gerçekleştirildiği için, 90°C'de kürlenen ve 120°C'de ardıl-kürlenen numunelerin birbirleriyle karşılaştırılması daha uygundur. Bu iki numune grubunu incelediğimizde 120°C'de ardıl-kürlenen numunelerin depolama modülünün 90°C'de kürlenen numunelere göre daha düşük olduğu görülmüştür. Depolama modülünün malzemenin elastik özelliği ile ilişkili olduğu göz önüne alındığında, 120°C'de uygulanan ardıl-kürlleme işleminin malzemeyi kırılğan hale getirerek elastik özelliğini azalttığı söylenebilir.

Oda sıcaklığında (20°C) ve 90°C'de kürlenen numunelerin depolama modülü değerlerindeki değişim, en düşük depolama modülü artışının 100BIO numunesinde gözlemlendiğini göstermektedir. 100BIO numunelerinin depolama modülleri arasında çok fazla fark olmamasının sebebinin hem oda sıcaklığında hem de 90°C'de üretimin malzemenin T_g değerinin üzerinde olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

90°C'de kürlenen numuneler içinde depolama modülü farkının en yüksek olduğu numune 0BIO olmuştur çünkü epoksi reçinenin T_g değeri yaklaşık olarak 70°C'dir (Çizelge 6.7) ve dolayısıyla bu derecenin üzerindeki yani 90°C'deki ısıtma işlem malzemenin enerji depolama özelliğini daha fazla etkilemiştir.

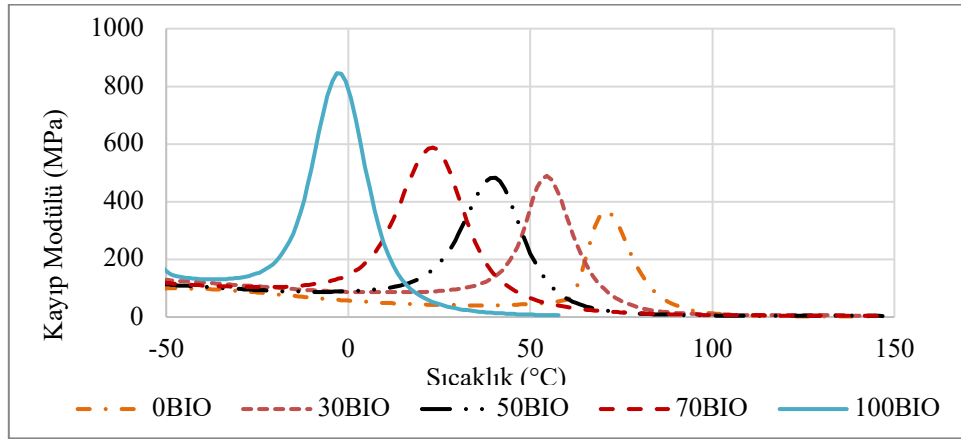


Şekil 6.25 : Kürlleme sıcaklığının depolama modülü üzerindeki etkisi a.0BIO, b.30BIO, c.50BIO, d.70BIO, e.100BIO numuneleri.

Kayıp modülü

Şekil 6.27, oda sıcaklığında üretilen numunelerin kayıp modülü değerlerini ve artan AESO içeriğinin kayıp modülü üzerindeki etkisini göstermektedir. Malzemenin deformasyona uğradığı süre boyunca harcadığı enerji ile orantılı olan kayıp modülü,

malzemenin viskoz özelliğini gösterir. Ayrıca, malzemenin T_g değeri, kayıp modülü eğrisinin tepe değerinden de elde edilebilir (Jabbar ve diğ, 2017).



Şekil 6.26 : Oda sıcaklığında üretilen biyo-kompozit numunelerinde artan AESO içeriğinin kayıp modülü değerleri üzerindeki etkisi.

Numuneler arasında en yüksek kayıp modülüne 100BIO numunesi sahipken, en düşük kayıp modülü değeri 0BIO numunesinde görülmüştür. Kayıp modülü ne kadar yüksekse, dağılan enerji o kadar yüksek olur, bu da matris ile takviye malzemesi arasındaki yapışmanın düşük olduğunu gösterir (Jabbar ve diğ, 2016). Karışım reçineli numuneler arasında en düşük kayıp modülü değerleri 30BIO (~580 MPa) ve 50BIO (~500 MPa) numuneleri ile elde edilmiştir.

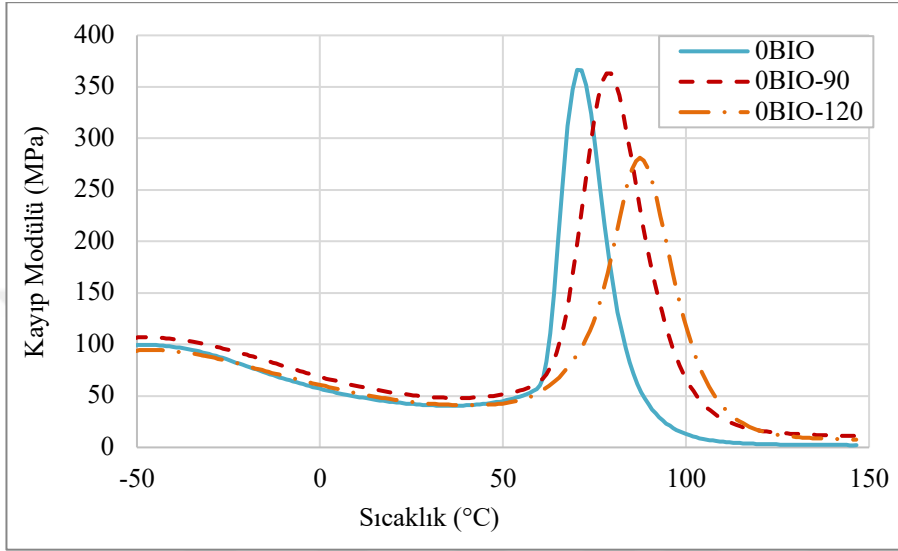
Kayıp modülü eğrilerinden elde edilen T_g değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.8 : Biyo-kompozit numunelerin kayıp modülü ve tan delta eğrilerinden elde edilen T_g değerleri.

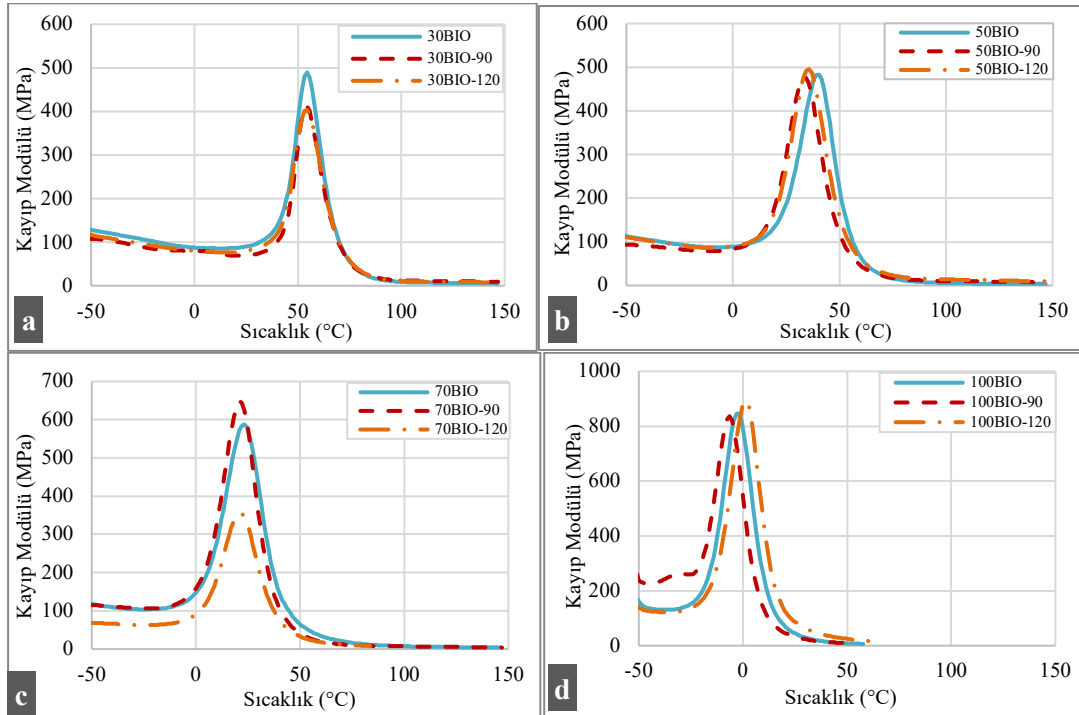
	T_g (°C) (kayıp modülü eğrisi)	T_g (°C) (tan delta eğrisi)
0BIO	71,42	80,21
0BIO-90	80,50	86,12
0BIO-120	88,50	95,20
30BIO	54,56	60,67
30BIO-90	54,45	60,23
30BIO-120	54,42	60,35
50BIO	40,39	48,88
50BIO-90	33,11	41,10
50BIO-120	35,80	42,75
70BIO	24,67	33,72
70BIO-90	22,12	31,12
70BIO-120	21,49	29,65
100BIO	-1,49	11,01
100BIO-90	-5,21	5,08
100BIO-120	1,08	10,04

100BIO numunesinin T_g değeri -2°C iken, 0BIO numunesinin T_g değeri 72°C 'dir. Karışım reçineli numunelerin T_g değerleri bu iki değerin arasında ve içeriklerindeki reçinelerin oranına göre farklılık göstermektedir.

90°C 'de kürleme ve 120°C 'de ardıl-kürlemenin kayıp modülü üzerindeki etkileri Şekil 6.28 ve 6.29'te incelenmiştir.



Şekil 6.27 : Kürleme sıcaklığının 0BIO numunelerinin kayıp modülü değerleri üzerindeki etkisi.

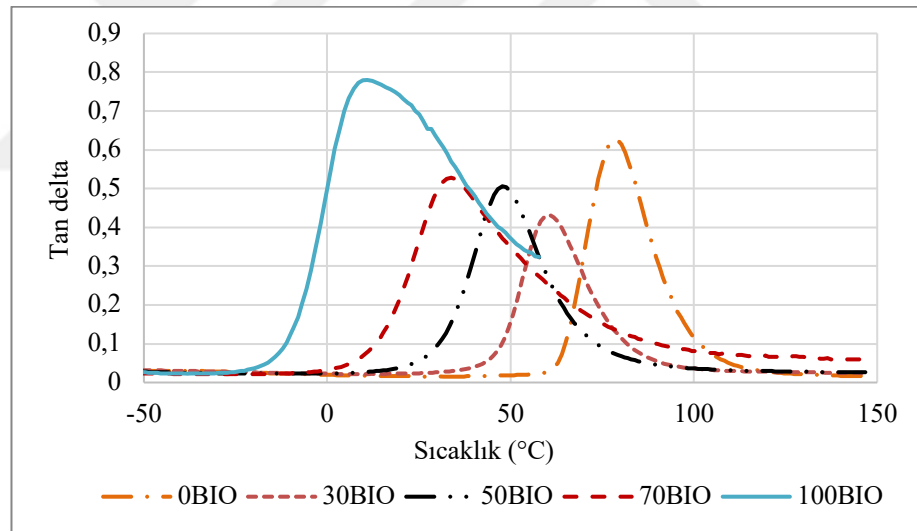


Şekil 6.28 : Kürleme sıcaklığının a.30BIO, b.50BIO, c.70BIO, d.100BIO numunelerinin kayıp modülü değerleri üzerindeki etkisi.

90°C'de gerçekleştirilen kürleme işlemi ve 120°C'de yapılan ardıl-kürleme işleminin, 0BIO numunesinin T_g değerini artırdığı görülmüştür, ancak, ister oda sıcaklığında üretilmiş ve kürlenmiş isterse 90°C'de kürleme işlemine tabii tutulmuş olsun, AESO içeriğine sahip diğer numunelerin T_g değerlerini neredeyse hiç değiştirmemiştir. 0BIO numunelerindeki epoksi reçinenin T_g değeri (70°C) kür sıcaklıklarından biri olan 90°C'nin altında, diğer üretim ve kür sıcaklığı olan oda sıcaklığının (20°C) üzerinde olması nedeniyle, üretim sırasında malzemenin yapısında bir miktar değişiklik meydana gelmiştir. AESO reçinesinin T_g değeri ise yaklaşık -2°C olduğundan her iki üretim/kür sıcaklığı da (20°C ve 90°C) malzemenin T_g değerinin üzerindedir ve bu nedenle kürleme sıcaklığının kompozit malzemenin T_g değerini değiştirmede neredeyse hiçbir etkisi gözlenmemiştir.

Sönümlleme faktörü (Tan delta)

Şekil 6.30, oda sıcaklığında üretilen numunelerin tan delta değerlerini ve artan AESO içeriğinin tan delta değerleri üzerindeki etkisini göstermektedir.



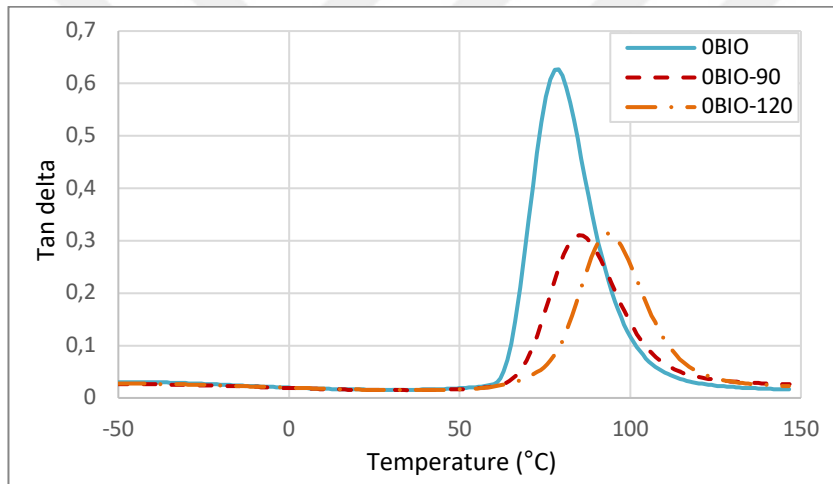
Şekil 6.29 : Oda sıcaklığında üretilen biyo-kompozit numunelerde artan AESO içeriğinin tan delta değerleri üzerindeki etkisi.

Tan delta değeri, malzemenin kayıp modülünün depolama modülüne oranıdır, dolayısıyla viskoz ve elastik bileşenlerin karşılıklı ilişkisini gösterir (Sezgin ve diğ., 2020). Matris ve takviye malzemesi arasında zayıf bir arayüze sahip kompozit malzemeler daha fazla enerji yayma eğilimindedir ve bu da daha fazla sönümlemeye yol açar (Jabbar ve diğ., 2016).

Numuneler arasında en yüksek tan delta değeri 100BIO numunesinde, en düşük değerler ise karışım reçineli numunelerde görülmektedir. Bu, iki farklı matris

malzemesinin kullanımının elyaf ve reçine arasındaki arayüzü olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Karışım reçineli numuneler arasında, en düşük tan delta değerinin 30BIO numunesinde olduğu görülmektedir. Tezin birinci deneysel bölümünde de yer verildiği üzere, bu numunelerin mekanik özellikleri (çekme mukavemeti ve üç nokta eğilme mukavemeti) incelendiğinde en iyi sonuçlar karışım reçineli numuneler arasında 30BIO numunesinde elde edilmiştir. Elde edilen sönümlleme faktörü sonuçları da bu sonuçları desteklemektedir. Tan delta eğrilerinden elde edilen T_g değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir. Bu T_g değerlerinin, beklendiği gibi kayıp modülü eğrilerinden elde edilen T_g değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.

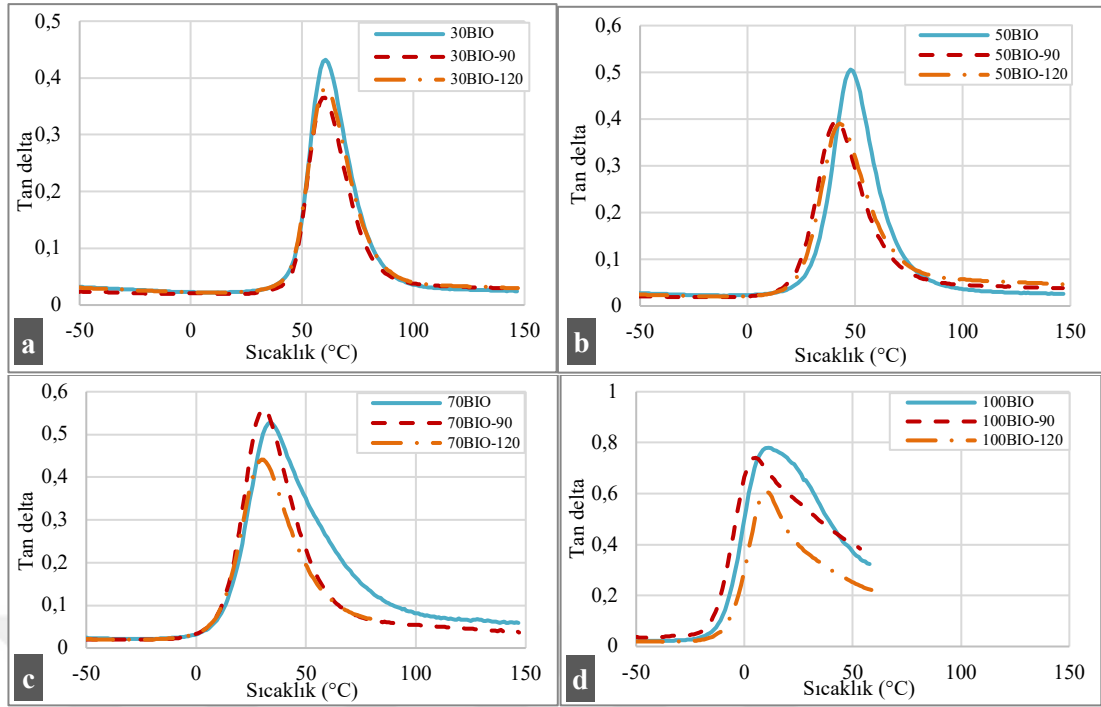
90°C'de kürleme ve 120°C'de ardıl-kürleme işlemlerinin numunelerin tan delta değerleri üzerindeki etkisi Şekil 6.31 ve 6.32'de gösterilmektedir.



Şekil 6.30 : Kürleme sıcaklığının 0BIO numunelerinin tan delta değerleri üzerindeki etkisi.

Kayıp modülü sonuçlarına benzer şekilde, 0BIO numunesinde yüksek sıcaklıkta kürlemenin tan delta eğrilerinden elde edilen T_g değerleri üzerinde etkisi gözlenirken, 100BIO ve AESO içerikli numunelerde yüksek sıcaklıkta kürlemenin T_g değerini fazla etkilemediği görülmektedir.

Yüksek sıcaklıkta kürlemenin tan delta değeri üzerindeki etkisi incelendiğinde en büyük etkinin 0BIO numunesi üzerinde olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında üretilen numunelerin tan delta değeri 0,62 civarında iken, bu değer 90°C'de kürleme ile 0,3'e düşmekte ve bu, 0BIO numunelerinde lif-matris arasındaki yapışmanın 90°C'de kürleme ile iyileştiğini kanıtlamaktadır.



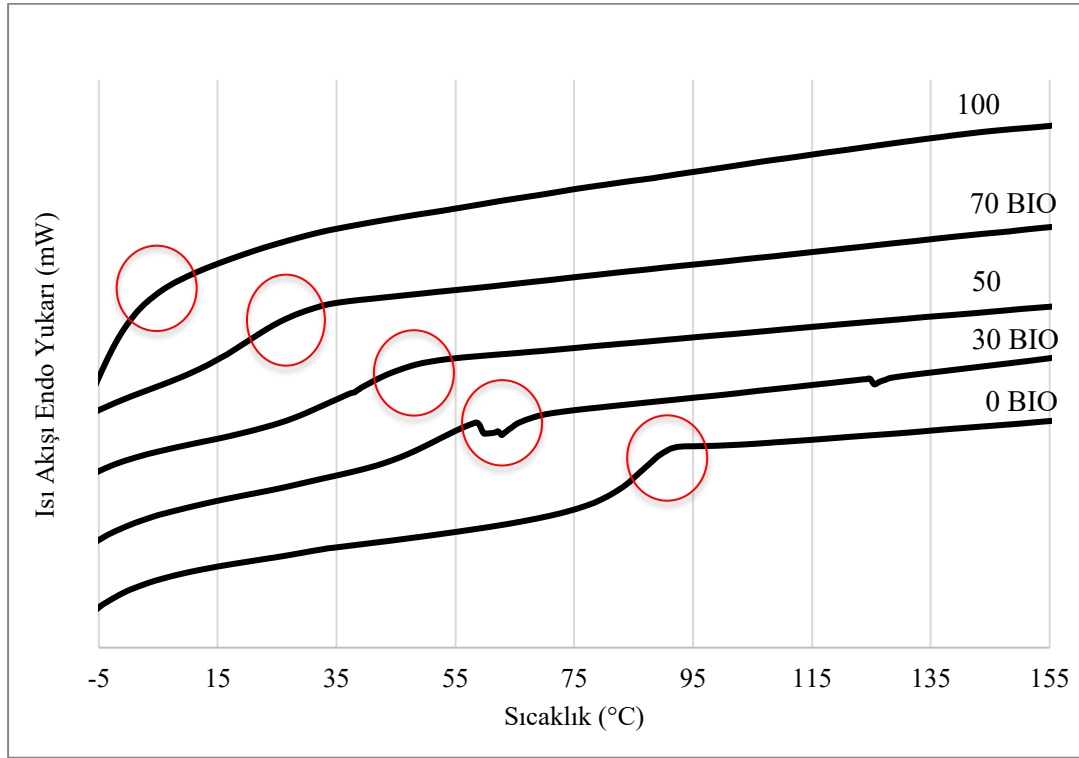
Şekil 6.31 : Kürlenme sıcaklığının a.30BIO, b.50BIO, c.70BIO, d.100BIO numunelerinin tan delta değerleri üzerindeki etkisi.

Tan delta eğrilerindeki tek tepe görünümü (çift tepe görünümü yok), iki farklı matris malzemesi arasında iyi bir uyumluluğa işaret eder (Grishchuk ve Karger-Kocsis, 2011). Şekil 6.31 ve 6.32'den görülebileceği gibi, tüm karışım reçineli numunelerde epoksi ve AESO reçinelerinin birbiriyle uyumlu olduğunu gösteren tek tepe noktaları elde edilmiştir. Ayrıca, tüm numunelerin tan delta değerleri 1'in altında olduğundan, bu, tüm numunelerin plastikten ziyade elastik şekilde davrandığını ifade eder.

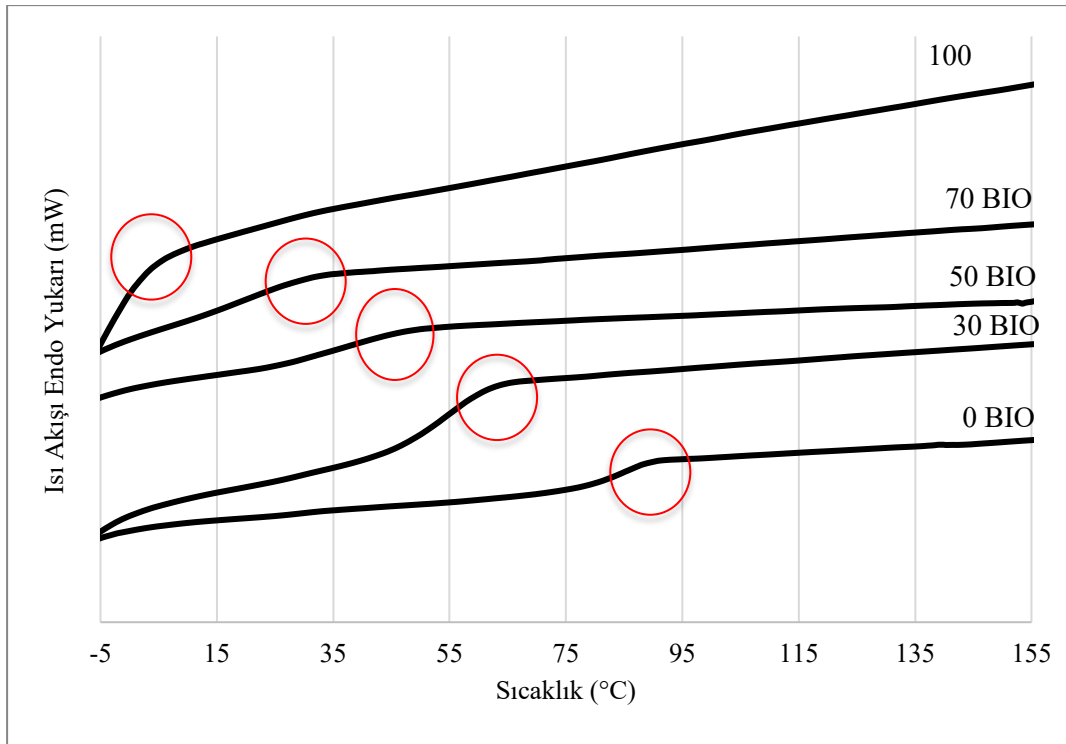
6.2.3.2 DSC analizi

DSC analizi, oda sıcaklığında 90°C kürlenen ve de 120°C'de ardıl-kürlenen kompozitlerin termal özelliklerini araştırmak için kullanılmıştır. Bu kompozitler epoksi, sertleştirici, AESO ve jüt kumaşlar gibi çeşitli bileşenlere sahip olduğundan, istenmeyen koşulları ortadan kaldırmak ve termal geçmişi temizlemek için tüm analizler iki çevrimde gerçekleştirilmiştir (Hidalgo-Salazar ve diğ, 2018). Bu nedenle, T_g değerlerinin belirlenmesinde ikinci çevrimler dikkate alınmış ve T_g özelliklerine ayrıntılı olarak odaklanmak için eğrilerin daha dar aralıklarına odaklanılmıştır. Öte yandan, numuneler ilk çevrim sırasında yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı için ikinci çevrimde ardıl-kürleme etkisinin oluşacağı düşünülmekte, dolayısıyla numunelerin ikinci çevrimdeki T_g değerlerinin birinci çevrimdeki T_g değerlerinden daha yüksek olacağı varsayılmaktadır (Jakobsen ve diğ, 2014).

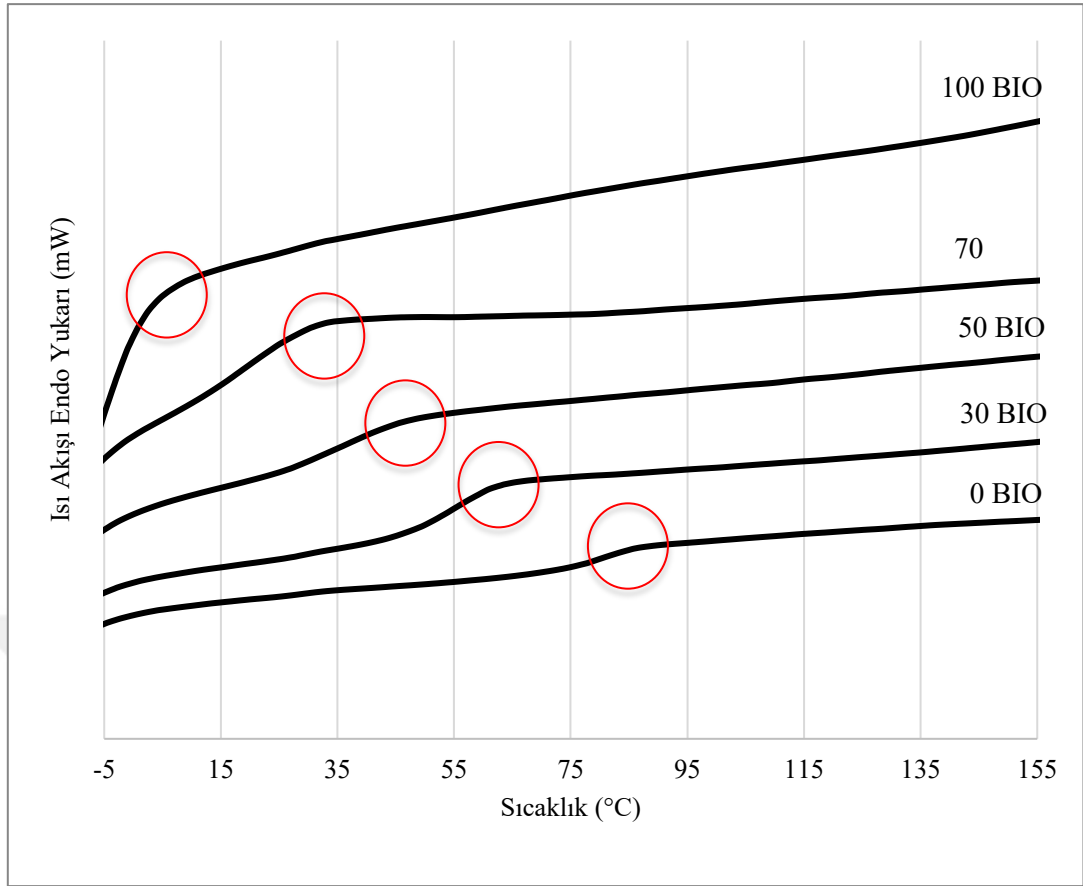
Şekil 6.33, 6.34 ve 6.35'te gösterilen DSC eğrileri, kürlenme sıcaklığından bağımsız olarak artan AESO içeriği ile kompozitlerin T_g 'sinde meydana gelen azalmayı göstermektedir.



Şekil 6.32 : Oda sıcaklığında kürlenmiş biyo-kompozit numunelerin DSC analizleri.



Şekil 6.33 : 90°C'de kürlenmiş biyo-kompozit numunelerin DSC analizleri.



Şekil 6.34 : 120°C’de kürlenen biyo-kompozit numunelerin DSC analizleri.

DSC grafikleri incelendiğinde, farklı kürleme sıcaklıklarına sahip numuneler arasında gözlemlenen net bir fark yoktur, çünkü ilk çevrim sırasında çıkılan yüksek sıcaklıklar malzemelerin termal geçmişini temizleyerek, kürleme sıcaklıklarının numuneler üzerindeki etkisini ortadan kaldırmaktadır. Ancak epoksi moleküllerinin hareketliliğini artıran AESO ilavesi, kompozitlerin T_g değerlerinde önemli bir azalmaya neden olmuştur. DMA testlerinden de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Çizelge 6.7). T_g değerlerindeki bu azalma, aynı zamanda, yüksek AESO içeriği nedeniyle lif-matris arayüzlerinde meydana gelen zayıf etkileşimden de kaynaklanabilir. Benzer sonuçlar Wen ve diğ. (2013) nin elyaf takviyeli epoksi kompozitler ile ilgili yaptıkları çalışmada da gözlenmiştir. Öte yandan, T_g aralığı - 5°C'nin altına düşebileceğinden, 100BIO numunesinin T_g 'si gözlenememiştir.

6.2.4 Morfolojik Analizler

SEM analizi

Numunelerin SEM görselleri Şekil 6.36-6.41'de verilmiştir. %100 epoksi reçineden oluşan tüm 0BIO numuneleri için Şekil 6.36'da kırılmalı bir matris fazı görülmektedir.



Şekil 6.35 : a.0BIO, b.0BIO-90, c.0BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 1000x).

Epoksi, termoset bir reçine olduğundan ve oda sıcaklığında kürlenebildiğinden, ısıtılmış veya ısıtılmamış tüm numunelerin lif-matris arayüzlerinde keskin çatlaklar gözlemlenmiştir. Ayrıca, matris fazı ile elyaf arasındaki mesafe, matrisin elyafı tam olarak çevrelemediğini gösterir, bu da lif-matris arayüzünde bağlanmanın çok güçlü olmadığını kanıtlar. Bu, doğal liflerin ve matris malzemelerinin farklı kimyasal yapıları ile açıklanabilir. Doğal lifler ile polar olmayan matrisler arasında iyi bir eşleşme için, matris difüzyonunu destekleyen çeşitli yüzey modifikasyon yöntemleri önerilebilir (George ve diğ, 2001).

30BIO numunelerinin mikro-yapıları gözlemlendiğinde, 0BIO numunelerinin SEM görsellerine benzer şekilde, kırılmalı matris yapıları fark edilir (Şekil 6.37).

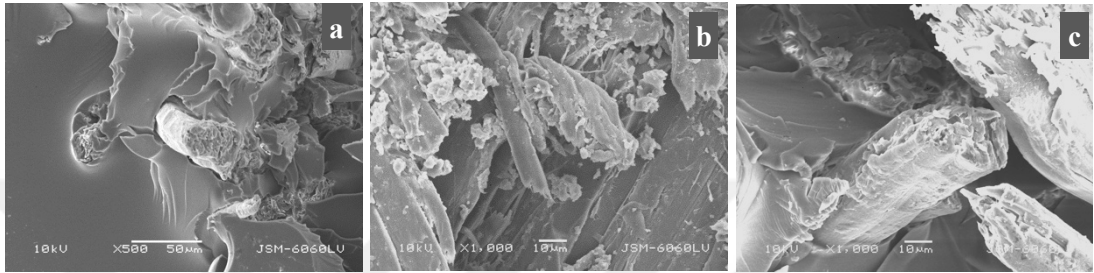


Şekil 6.36 : a.30BIO, b.30BIO-90, c.30BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).

Matris fazında keskin kırılmaların oluşmasına neden olan bu durum yine epoksi reçine içeriğinin yüksek olması (%70) ile açıklanabilir. Öte yandan, 30BIO numunelerinde lif-matris arayüzünün iyileştiği gözlenmekte olup, bu durum DMA test sonuçlarını destekler niteliktedir. Yukarıda bahsedildiği gibi, karışım reçineli numuneler arasında en düşük kayıp modülü değerlerine (~580 ve ~500 MPa) sahip 30BIO ve 50BIO numunelerinde, matris ve takviye fazları arasında gelişmiş bir yapışma olduğu sonucuna varılmıştır (Jabbar ve diğ, 2016). Ayrıca, en düşük tan delta değerleri 30BIO numunelerinde görülmüştür, ve bu, epoksi reçineye AESO eklemesinin, elyaf ve

matris fazları arasında daha iyi arayüz oluşmasını, buna bağlı olarak da daha iyi mekanik özellikler sağladığını kanıtlamaktadır (Özkür ve diğ., 2020).

50BIO numunelerinde matris fazında epoksi reçine ve bio-reçinenin eşit miktarda bulunması nedeniyle ne çok kırılğan ne de çok akışkan bir matris yapısı gözlenmektedir (Şekil 6.38). Bu numunelerde 0BIO ve 30BIO numunelerinden farklı olarak matris yapısındaki kırılğanlığın yumuşadığı görülmüştür. Ayrıca elyaf ve matris arayüzlerindeki çok keskin çatlakların yerini daha iyi saran arayüzler almıştır.



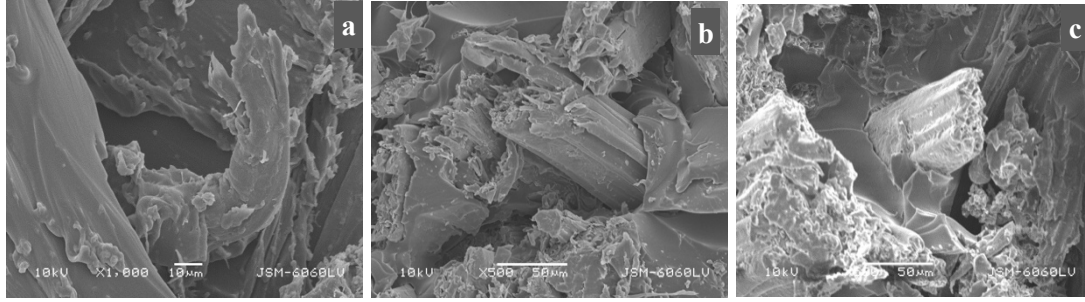
Şekil 6.37 : a.50BIO, b.50BIO-90, c.50BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).

Şekil 6.38c'de görüldüğü gibi, 50BIO-120 numunesinde matris fazı lifi tamamen sarar ve kopma meydana gelene kadar lifle birlikte uzar. Kopma bölgelerindeki çatlak ve keskin yapı, matris fazının ısıtılma ile daha kırılğan hale geldiğini gösterir. Bu sonuçlar DMA test sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, 50BIO numunesinde görülen güçlü lif-matris arayüzü düşük tan delta değerleri (Şekil 6.30 ve 6.32) ve düşük kayıp modülleri (Şekil 6.27 ve 6.29) ile açıklanabilir. Bu nedenle DMA sonuçlarının SEM görselleri ile desteklendiği görülmektedir.

70BIO numunelerinde, yüksek biyo-reçine içeriği nedeniyle matris fazda akışkan bir yapı gözlenmiştir. Isıl işlem uygulanmayan 70BIO numunelerinde elyaf ve matris fazları bulamaç halindedir ve birbirinden ayırt etmek zordur (Şekil 6.39a). Öte yandan ısıtılma sonrası matris fazında kırılğan yapının oluştuğu ve özellikle 120°C'de ardıl-kürlenen kompozitlerin matris yapısında önemli farklılıklar olduğu gözlenmektedir (Şekil 6.39c).

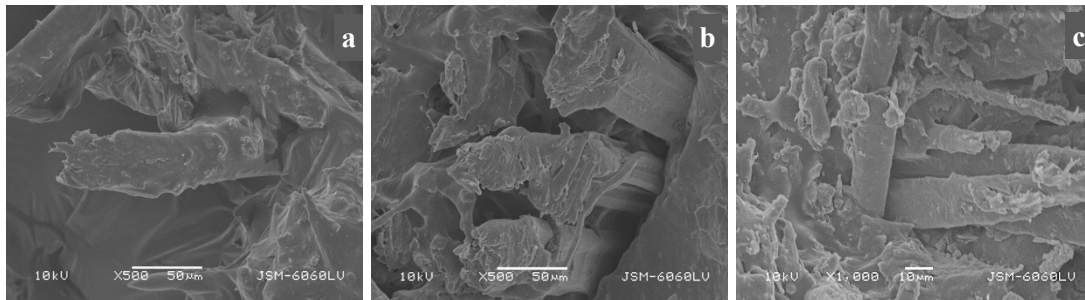
70BIO numunesinde gözlenen akışkan yapı, 70BIO-120 numunesinde yerini kırılğan bir yapıya bırakmıştır. Bu, biyo-reçinenin ısıtılma ile daha kırılğan hale geldiğini kanıtlamaktadır. Tan delta ve kayıp modülü değerleri, artan AESO içeriği ile, artma eğiliminde olsa da tan delta eğrilerinde gözlenen tek tepe görünümü hala AESO ve

epoksi reçineleri arasındaki iyi uyumluluğu desteklemektedir (Grishchuk ve Karger-Kocsis, 2011).



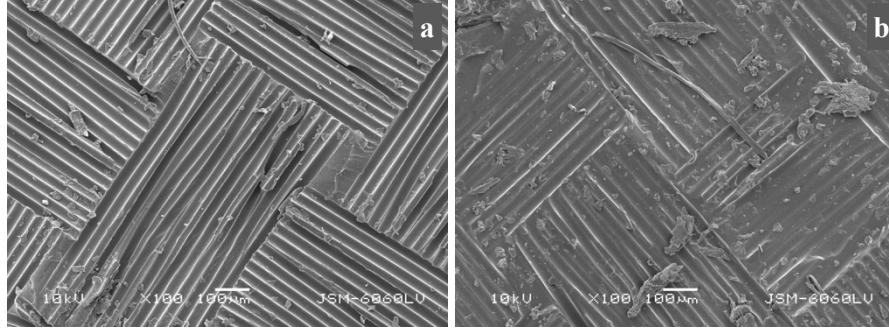
Şekil 6.38 : a.70BIO, b.70BIO-90, c.70BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).

100BIO numunelerinde oldukça akışkan bir matris yapısı gözlenmiştir (Şekil 6.40a). Bu numune grubunda liflerin matris içerisinde bulamaç halinde bulunduğu ve tamamen reçine ile kaplandığı görülmektedir. Bu numuneler için matris fazında keskin bir kırılmadan söz etmek mümkün değildir. 100BIO-90 numunesi incelendiğinde matris fazındaki akışkanlıkta hafif bir toparlanma gözlemlendiği söylenebilir (Şekil 6.40b). Ancak lif-matris ara yüzleri incelendiğinde matrisin akışkan yapısından dolayı lifleri iyi bir şekilde saramadığı ve bu nedenle liflerin matrise iyi yapışmadığı fark edilmektedir. Artan biyo-reçine içeriği ile arayüz boşluğunun arttığı ve artan arayüz boşluğunun ise daha zayıf bir arayüze ve bunu bir sonucu olarak daha zayıf matris özelliklerine neden olduğu literatürde de yer almaktadır (Haq ve diğ, 2007). Bu görsel veriler, matris ve takviye fazları arasında zayıf yapışma sonucu daha yüksek enerjinin dağıldığını gösteren kayıp modülü değerlerinin (Jabbar ve diğ, 2017), en yükseklerinin (~850 MPa) 100BIO numunelerinde görülmüş olması ile desteklenebilir (Şekil 6.27). Öte yandan beklendiği gibi 100BIO-120 numunesinde ısıtılmanın etkisiyle matris fazının akışkandan kırılkan bir yapıya dönüştüğü görülmektedir (Şekil 6.40c).



Şekil 6.39 : a.100BIO, b.100BIO-90, c.100BIO-120 numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 500-1000x).

Üretilen kompozit malzemelerin yüzeyleri SEM altında incelendiğinde, bio-reçine içeriğine bağlı olarak değişen, iç yapıda gözlenen kırılğan veya akışkan yapıların yüzeyde de gözlenebildiği görülmektedir (Şekil 6.41).



Şekil 6.40 : a.50BIO, b.100BIO numunelerinin SEM görselleri (büyütme oranı 100x).

50BIO numunesinde takviye malzemesi olarak kullanılan düz dokuma kumaşın kareli yapısı, 100BIO numunesine göre daha keskin kenarlarla daha net görülebilmektedir. Numune yüzeylerinin SEM görselleri de, lif-matris arayüzlerinin SEM görselleri gibi, DMA test sonuçları ile desteklenmektedir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir.

- Reçine sistemindeki artan AESO miktarı, yüksek viskozitesi sebebiyle numune kalınlığının artmasına ve düşük elyaf ağırlık oranına yol açmıştır.
- Ağırlıkça %30'un üzerinde AESO miktarı ile, kompozitlerin sünekliğinin artması ve aşırı plastikleşme nedeniyle kopma uzaması artarken, çekme ve eğilme mukavemeti değerleri azalmaktadır.
- Ağırlıkça %50'nin üzerinde AESO içeriğine sahip biyo-kompozitler üstün darbe özellikleri göstermişlerdir.
- Oda sıcaklığında kürlenene numunelerin kayıp modülü eğrilerinden hesaplanan T_g değerleri -2 ile 71°C arasında, tan delta eğrilerinden elde edilen T_g değerleri ise 11 ile 80°C arasında değişmektedir.
- DSC eğrileri, AESO içeriğindeki artışla birlikte kompozitlerin T_g değerlerinin daha düşük değerlere kaydığını göstermektedir.
- Numuneler arasında en yüksek depolama ve kayıp modülleri 100BIO numunesi için elde edilirken en düşük değerler 0BIO numunesi için elde edilmiştir.
- En yüksek tan delta değeri 100BIO numunesi için elde edilirken, en düşük değerler karışım reçineli numunelerde elde edilmiştir, bu da iki farklı matris malzemesinin kullanımının lif-matris arayüzünü iyileştirdiğini kanıtlamaktadır.
- FTIR analizinde, lif-matris arayüzünü güçlendiren, biyo-reçinelerin -OH ve -COO grupları ile hidrojen bağı oluşturan jüt liflerinin -OH gruplarının karakteristik pikleri gözlenmiştir.
- SEM görsellerinde, 0BIO ve 30BIO numuneleri için kırılma bir matris fazı gözlemlenirken, %50'den fazla biyo-reçine içeren numunelerde akışkan matris fazları fark edilir hale gelmiştir.

- 90°C'de kürleme ve 120°C'de ardıl-kürleme işlemlerinin kompozit malzemeyi kırılğan hale getirdiği ve buna bağlı olarak darbe dayanımını azalttığı ve eğilme dayanımını artırdığı görülmüştür.
- Isıl işlemin kompozit malzemenin çapraz bağ oranını arttırdığı ve buna bağlı olarak malzemenin su emme özelliğini azaltırken, su temas açısını artırdığı görülmüştür.
- Yüksek sıcaklıkta kür ve ardıl-kürleme işlemleri ile kompozit numunelerin çekme mukavemetinde ve elastik modülünde bir artış gerçekleşmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen tüm bulgular dikkate alındığında tez kapsamında tasarlanan ve üretilen biyo-kompozitlerin, petrol-bazlı hammaddelere dayalı ürünlerin hakim olduğu pazarda rekabet edebilecek güçte, sürdürülebilir ve eko-verimli bir ürün portföyü sunan umut verici malzemeler oldukları sonucuna varılmıştır. Özellikle belli oranda biyo-reçine (%30-40) içeren biyo-kompozitlerin başta otomotiv sektörü olmak üzere yapı malzemeleri ve mobilya sektörü gibi son kullanım alanlarında kullanılabileceği görülmüştür. Kompozit tasarım bileşenlerinin ve üretim parametrelerinin ise son kullanma alanında üründen beklenen performans özellikleri dahilinde seçilmesi önerilmektedir.

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında gelecek çalışmalara yön verecek önerilere değinmek gerekirse; takviye malzemesinin doğal kaynaklı olması ve epoksi reçinenin AESO gibi bir biyo-reçine ile karıştırılması her ne kadar kompozitlerin olumsuz çevresel etkilerini azaltsa da asıl hedef tamamen biyo-kaynaklardan kompozitler üretmek olmalıdır. Bunun için reçinelerin ve hatta sertleştiricilerin tamamının biyolojik kökenli olması önem teşkil eder. Ancak çalışmada da bahsedildiği üzere %100 biyo-reçine sistemi kullanmanın bazı kısıtları söz konusudur ve bu kısıtları aşmak için alternatif biyo-sertleştiriciler ve biyo-reçineler geliştirme üzerine çalışmalar yapmak oldukça önemlidir. Bu hedefe yönelik olarak biyo-reçineler tamamen farklı kaynaklardan üretilebileceği gibi mevcut kullanılan kaynakların modifikasyonu için alternatif komonomerler de geliştirilebilir. Bir diğer önemli husus ise, bu kompozitlerin ömürleri dolduğunda geri dönüştürülebilir olmalarıdır. Kompozitlerde kullanılabilecek malzeme geliştirirken bu noktaya da dikkat edilmesi önemlidir. Ayrıca, tez kapsamında üretilen biyo-kompozitlerin biyobozunurluk sürelerinin tayini de gelecek çalışmalar kapsamında değerlendirilebilir. Bu çalışmada

kullanılan jüt kumaş, her ne kadar kolay temin edilebilir, ucuz ve mekanik özellikleri karşılayan bir malzeme de olsa düzgünsüzlüğü çok fazla olan bir lif olması dolayısıyla sonuçlar üzerinde istenmeyen sapmalara yol açtığı düşünülmektedir. Bu durum biyo-reçine oranı ve üretim sıcaklığının kompozit malzemenin özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışma için istenmeyen bir durumdur. Bu anlamda, doğal içerikli alternatif takviye malzemelerinin kullanımı mevcut reçine sistemleri ile birlikte denenebilir. Ayrıca bu çalışma biyo-reçinenin etkisine odaklandığı için takviye malzemesine herhangi bir ön işlem uygulamaya ihtiyaç duyulmamıştır ancak doğal liflerin matris sistemi ile daha iyi bir arayüz oluşturma için çeşitli ön işlemlerin kullanılması düşünülebilir. Bu bağlamda, birçok alanda olduğu gibi tekstil takviyeli biyo-kompozit alanında da gelecekte yapılacak disiplinler arası çalışmaların konuya farklı bakış açıları getireceği aşikardır.



KAYNAKLAR

- Abu Bakar, M. B., Masri, M. N., Amini, M. M. H., Thirmizir, M. M. Z., & Salim, M. S.** (2018). Mechanical, thermal and morphological properties of epoxy resin toughened with epoxidized soybean oil. *AIP Conference Proceedings*, 2030, 020277.
- Acha, B. A., Marcovich, N. E., & Reboredo, M. M.** (2005). Physical and mechanical characterization of jute fabric composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 98(2), 639-650.
- Ahmad, F., Choi, H. S., & Park, M. K.** (2015). A Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties. *Macromolecular Materials and Engineering*, 300(1), 10-24.
- Altuna, F. I., Esposito, L. H., Ruseckaite, R. A., & Stefani, P. M.** (2010). Thermal and Mechanical Properties of Anhydride-Cured Epoxy Resins with Different Contents of Biobased Epoxidized Soybean Oil. *Journal of Applied Polymer Science*, 120, 789-798.
- Ashori, A.** (2008). Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. *Bioresource Technology*, 99, 4661-4667.
- Auclair, N., Kaboorani, A., Riedl, B., & Landry, V.** (2015). Acrylated betulin as a comonomer for bio-based coatings. Part I: Characterization, photopolymerization behavior and thermal stability. *Industrial Crops and Products*, 76, 530-537.
- Baillie, C.** (2004). Why green composites?. In C. Baillie (Eds.), *Green composites Polymer composites and the environment* (pp. 1-5). Cambridge: CRC Press.
- Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., & Triantafillou, T. C.** (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction-state of the art review. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 73-87.
- Bao, L., Bian, L., Zhao, M., Lei, J., & Wang, J.** (2014). Synthesis and self-assembly behavior of a biodegradable and sustainable soybean oil-based copolymer nanomicelle. *Nanoscale Research Letters*, 9, 391.
- Biagiotti, J., Puglia, D., & Kenny, J. M.** (2004). A Review on Natural Fibre-Based Composites-Part I. *Journal of Natural Fibers*, 1(2), 37-68.
- Bismarck, A., Mishra, S., & Lampke, T.** (2005). Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites. In A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal (Eds), *Natural Fibers Biopolymers And Biocomposites* (pp. 51-122). Boca Raton: Taylor & Francis.
- Bodaghi, M., Costa, R., Gomes, R., Silva, J., Correia, N., & Silva, F.** (2020). Experimental comparative study of the variants of high-temperature

vacuum-assisted resin transfer moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 129, 105708.

- Cakic, S. M., Ristic, I. S., Jaso, V. M., Radcevic, R. Z., Ilic, O. Z., & Simendic, J. K. B.** (2012). Investigation of the curing kinetics of alkyd-melamine epoxy resin system. *Progress in Organic Coatings*, 73(4), 415-424.
- Campana, C., Leger, R., Sonnier, R., Ferry, L., Ienny, P.** (2018). Effect of post curing temperature on mechanical properties of a flax fiber reinforced epoxy composite. *Composites Part A: Applied Science Manufacturing*, 107, 171-179.
- Campbell, F. C.** (2010). *Structural Composite Materials*. Ohio, USA: ASM International.
- Charlet, K.** (2012). Natural Fibres as Composite Reinforcement Materials: Description and New Sources. In M.J. John, T. Sabu (Eds.), *Natural Polymers Volume 1: Composites* (pp. 37-63). Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Chen, J., Liu, H., Zhang, W., Lv, L., & Liu, Z.** (2019). Thermosets resins prepared from soybean oil and lignin derivatives with high biocontent, superior thermal properties, and biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(26), 48827.
- Chen, J., Steven, O., & Thuo, M.** (2016). Introduction to plant oils. In S.A. Madbouly, C. Zhang, M.R. Kessler (Eds.), *Bio-Based Plant Oil Polymers And Composites* (pp. 1-14). Oxford: Elsevier.
- Da Rosa Zavareze, E., & Guerra Dias, A. R.** (2012). Relation between Structural Anisotropy in Natural Fibres and Mechanical Properties in Composites. In M.J. John, T. Sabu (Eds.), *Natural Polymers Volume 1: Composites* (pp. 63-82). Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Dalfi, H., Babu-Katnum, K., Potluri, P., & Selver, E.** (2021). The role of hybridisation and fibre architecture on the post-impact flexural behaviour of composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 55(11), 1499-1515.
- Delmonte, J., Hoggatt, J. T., & May, J. A.** (1998). Fiber-Reinforced Epoxy Composites. In C.A. May (Eds), *Epoxy Resins Chemistry and Technology* (2nd ed., pp. 885-929). New York: Marcel Dekker.
- Dhimole, V. K., Serrao, P., & Cho, C.** (2021). Review and Suggestion of Failure Theories in Voids Scenario for VARTM Processed Composite Materials. *Polymers*, 13, 969.
- Dotan, A.** (2014). Biobased Thermosets. In H. Dodiuk, S.H. Goodman (Eds), *Handbook Of Thermoset Plastics* (3rd ed., pp. 577-615). San Diego: Elsevier.
- Drzal, L. T.** (1986). The Interphase in Epoxy Composites. In K. Dusek (Eds), *Epoxy Resin and Composites II* (pp. 1-32). Berlin: Springer-Verlag.
- Dungani, R., Karina, M., Subyakto, Sulaeman, A., Hermawan, D., & Hadiyane, A.** (2016). Agricultural waste fibers towards sustainability and advanced utilization: a review. *Asian Journal of Plant Sciences*, 15(1-2), 42-55.

- Dweib, M. A., Hu, B., Shenton III, H. W., & Wool, R. P.** (2006). Biobased composite roof structure: Manufacturing and processing issues. *Composite Structures*, 74, 379–388.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M.** (2014). Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9-26.
- Fei, M., Liu, T., Fu, T., Zhang, J., Wu, Y., Qiu, R., & Liu, W.** (2019). Styrene-free soybean oil thermoset composites reinforced by hybrid fibers from recycled and natural resources. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(21), 17808-17816.
- Fowler, P. A., Hughes, J. M., & Elias, R. M.** (2006). Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 1781–1789.
- Frollini, E., Paiva, J. M. F., Trindade, W. G., Razera, I. A. T., & Tita, S. P.** (2004). Plastics And Composites From Lignophenols. In F.T. Wallenberger, N.E. Weston (Eds), *Natural Fibers, Plastics And Composites* (pp. 193-219). Norwell: KJuw Academic Publishers.
- George, J., Sreekala, M. S., & Thomas, S.** (2001). A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering and Science*, 41(9), 1471-1485.
- Grishchuk, S., & Karger-Kocsis, J.** (2011). Hybrid thermosets from vinyl ester resin and acrylated epoxidized soybean oil. *EXPRESS Polymer Letters*, 5(1), 2-11.
- Gordon, J. E.** (1999). *The New Science of Strong Materials: Or Why You Don't Fall Through the Floor*. London: Penguin Books.
- Gupta, M. K., Srivastava, R. K.** (2017). Studies on mechanical, thermal and dynamic mechanical analysis of Jute fiber reinforced epoxy composite. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 42, 64-71.
- Hasan, K. F., Islam, M., Morshed, M. N., Iqbal, M. I. I., & Wu, J. H. W.** (2016). Dynamic mechanical behavior & analysis of the jute-glass fiber reinforced polyester hybrid composites. *American Journal of Applied Physics*, 1(1), 1–12.
- Haq, M., Burgueño, R., Mohanty, A., & Misra, M.** (2007). Development And Thermo-Physical Properties Of Bio-Based Polymer/Clay Nanocomposites. *SPE Automotive ACCE Conference*, USA: Troy.
- Hidalgo-Salazar, M. A., Correa, J. P.** (2018). Mechanical and thermal properties of biocomposites from nonwoven industrial Fique fiber mats with Epoxy Resin and Linear Low Density Polyethylene. *Results in Physics*, 8, 461-467.
- Hong, C. K., & Wool, R. F.** (2005). Development of a bio-based composite material from soybean oil and keratin fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 95(6), 1524-1538.
- Hughes, M.** (2004). Applications. In C. Baillie (Eds), *Green composites Polymer composites and the environment* (pp. 233-249) Cambridge: CRC Press.

- Jabbar, A., Militky, J., Wiener, J., Kale, B. M., Ali, U., & Rwawiire, S.** (2017). Nanocellulose coated woven jute/green epoxy composites: Characterization of mechanical and dynamic mechanical behavior. *Composite Structures*, 161, 340-349.
- Jabbar, A., Militky, J., Wiener, J., Karahan, M.** (2016). Static and dynamic mechanical properties of novel treated jute/green epoxy composites. *Textile Research Journal*, 86(9), 960-974.
- Jakobsen, J., Andreasen, J. H., & Thomsen, O. T.** (2014). A comparison of gel point for a glass/epoxy composite and a neat epoxy material during isothermal curing. *Journal of Composite Materials*, 48(8), 917.
- Jariwala, H., & Jain, P.** (2019). A review on mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer composites and its applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(10), 441-453.
- Jiang, L.** (2015). *A New Manufacturing Process for Biocomposite Sandwich Parts Using A Myceliated Core, Natural Reinforcement and Infused Bioresin*. (Doctoral thesis). Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
- John, M. J., & Thomas, S.** (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71 (3), 343-364.
- John, M. J., & Thomas, S.** (2012). Natural Polymers: An Overview. In M.J. John, S. Thomas (Eds), *Natural Polymers Volume 1: Composites* (pp. 1-7) Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Johns, A., Gibbons, L., Smith, M., Edwards, K., & Quirino, R. L.** (2016). Plant oil-based polyhydroxyurethanes. In S.A. Madbouly, C. Zhang, M.R. Kessler (Eds.), *Bio-Based Plant Oil Polymers and Composites* (pp. 55-71). USA: William Andrew.
- Jose, J. P., Malhotra, S. K., Thomas, S., Joseph, K., Goda, K., & Sreekala, M. S.** (2012). Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites - State of the Art, New Challenges, and Opportunities. In S. Thomas, K. Joseph, S.K. Malhotra, K. Goda, M.S. Sreekala (Eds.), *Polymer Composites* (1st ed., Vol. 1, pp. 3-16). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Karagöz, S., Aydın, N., & Simic, V.** (2019). End-of-life vehicle management: a comprehensive review. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22, 416-442.
- Kerni, L., Singh, S., Patnaik, A., & Kumar, N.** (2020). A review on natural fiber reinforced composites. *Materialstoday: Proceedings*, 28(3), 1616-1621.
- Kirwan, K., & Wood, B. M.** (2012). Recycling of materials in automotive engineering. *Advanced materials in Automotive Engineering*, 299-314.
- Lee, D. G., & Suh, N. P.** (2006). *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine Tools, and Automobiles*. New York, USA: Oxford University Press.
- Liu, W., Chen, T., Fei, M., Qiu, R., Yu, D., Fu, T., & Qiu, J.** (2019). Properties of natural fiber-reinforced biobased thermoset biocomposites: Effects of

fiber type and resin composition. *Composites Part B: Engineering*, 171, 87-95.

- Liu, W., Fei, M., Ban, Y., Jia, A., & Qiu, R.** (2017). Preparation and Evaluation of Green Composites from Microcrystalline Cellulose and a Soybean-Oil Derivative. *Polymers*, 9(10), 541.
- Mallick, P. K.** (2007). *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. Boca Raton: CRC Press
- Mazumdar, S. K.** (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Milton, W. G.** (2004). *The Theory of Composites (Cambridge Monographs on Applied and Computational Mathematics)* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T., Selke, S. E., Harte, B. R., Hinrichsen, G.** (2005). Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction. In A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal (Eds), *Natural Fibers, Biopolymers, And Biocomposites* (pp. 15-50). Boca Raton: Taylor & Francis.
- Mokhothu, T. H., & John, M. J.** (2017). Bio-Based Fillers for Environmentally Friendly Composites. In V.K. Thakur, M.K. Thakur, M.R. Kessler (Eds.), *Handbook of Composites from Renewable Materials* (Vol. 1, pp. 243-264). Beverly: Wiley.
- Niedermann, P., Szebenyi, G., & Toldy, A.** (2017). Effect of epoxidized soybean oil on mechanical properties of woven jute fabric reinforced aromatic and aliphatic epoxy resin composites. *Polymer Composites*, 38(5), 884-892.
- Nishino, T.** (2000). Natural fibre sources. In C. Baillie (Eds), *Green composites Polymer composites and the environment* (pp. 49-76). Cambridge: CRC Press.
- O'Donnell, A., Dweib, M. A., & Wool, R. P.** (2004). Natural fiber composites with plant oil-based resin. *Composites Science and Technology* 64, 1135-1145.
- Omonov, T. S., & Curtis, J. M.** (2016). Plant Oil-Based Epoxy Intermediates for Polymers. In S.A. Madbouly, C. Zhang, M.R. Kessler (Eds), *Bio-Based Plant Oil Polymers And Composites* (pp. 100-125). Oxford: Elsevier.
- Ornaghi, H. L. Jr., Zattera, A. J., & Amico, S. C.** (2014). Thermal behavior and the compensation effect of vegetal fibers. *Cellulose*, 21, 189-201.
- Özkür, S., Sezgin, H., Akay, E., & Yalcin-Enis, İ.** (2020). Hybrid bio-based composites from blends of epoxy and soybean oil resins reinforced with jute woven fabrics. *Material Research Express*, 7 (1), 015335.
- Pascault, J. P., & Williams, R. J. J.** (2010). General Concepts about Epoxy Polymers. In J.P. Pascault, R.J.J. Williams (Eds), *Epoxy Polymers New Materials and Innovations* (pp. 1-12). Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Penn, L. S., & Wang, H.** (1998). Epoxy Resins. In S.T. Peters (Eds), *Handbook Of Composites* (2nd ed., pp. 48-75). London: Chapman & Hall.

- Pervaiz, M., & Sain, M. M.** (2003). Sheet-molded polyolefin natural fiber composites for automotive applications. *Macromolecular Materials and Engineering*, 288(7), 553–557.
- Peters, S. T.** (1998). Introduction, composite basics and road map. In S.T. Peters (Eds), *Handbook Of Composites* (2nd ed., pp. 1-21). London: Chapman & Hall.
- Potluri, R., & Krishna, N. C.** (2020). Potential and Applications of Green Composites in Industrial Space. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2041–2048.
- Raghavendra, G., Kumar, K. A., Kumar, M. H., RaghuKumar, B., & Ojha, S.** (2015). Moisture absorption behavior and its effect on the mechanical properties of jute-reinforced epoxy composite. *Polymer Composites*, 38(3), 516-522.
- Ramamoorthy, S. K., Kundu, C. K., Adekunle, K., Bashir, T., & Skrifvars, M.** (2014). Properties of green composites with regenerated cellulose fiber and soybean-based thermoset for technical applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(2), 193-201.
- Ratna, D.** (2001). Mechanical properties and morphology of epoxidized soyabean-oil-modified epoxy resin. *Polymer International*, 50, 179-184.
- Robinson, M. J., & Kosmatka, J. B.** (2006). Improved Damping in VARTM Composite Structures using Perforated Viscoelastic Layers. *Journal of Composite Materials*, 40, 2157.
- Romanzini, D., Lavoratti, A., Ornaghi, H. L. Jr., Amico, S. C., & Zattera, A. J.** (2013). Influence of fiber content on the mechanical and dynamic mechanical properties of glass/ramie polymer composites. *Materials & Design*, 47, 9-15.
- Roy, P., Defersha, F., Rodriguez-Urbe, A., Misra, M., & Mohanty, A. K.** (2020). Evaluation of the life cycle of an automotive component produced from biocomposite. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123051.
- Saba, N., Tahir, P. M., & Jawaid, M.** (2014). A review on potentiality of nano filler/natural fiber filled polymer hybrid composites. *Polymers*, 6(8), 2247-2273.
- Sahoo, S. K., Khandelwal, V., & Manik, G.** (2018). Influence of epoxidized linseed oil and sisal fibers on structure–property relationship of epoxy biocomposite. *Polymer Composites*, 39(S4), 2595-2605.
- Sahoo, S. K., Mohanty, S., & Nayak, S. K.** (2016). Mechanical, Thermal, and Interfacial Characterization of Randomly Oriented Short Sisal Fibers Reinforced Epoxy Composite Modified with Epoxidized Soybean Oil. *Journal of Natural Fibers*, 14(3), 357-367.
- Saithai, P., Lecomte, J., Dubreucq, E., & Tanrattanakul, V.** (2013). Effects of different epoxidation methods of soybean oil on the characteristics of acrylated epoxidized soybean oil-co-poly(methyl methacrylate) copolymer. *EXPRESS Polymer Letters*, 7(11), 910-924.

- Sarasini, F., & Fiore, V.** (2018). A systematic literature review on less common natural fibres and their biocomposites. *Journal of Cleaner Production*, 195, 240-267.
- Sarikaya, E., Çallioğlu, H., & Demirel, H.** (2019). Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties. *Composites Part B: Engineering*, 167, 461-466.
- Seabra, C. P., Sousa, A. C., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., Robalo, M. P., Loja, M. A. R., & Martins, P. A. F.** (2020). On the Performance and Recyclability of a Green Composite Based on AESO Resin. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(3), 65.
- Sezgin, H.** (2018). *Investigation And Enhancement Of The Mechanical Properties Of The Fabric Reinforced Hybrid Composites*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sezgin, H., Mishra, R., Militky, J., & Berkalp, O. B.** (2020). Thermal and thermo-mechanical characterization of MWCNTs integrated E-glass/carbon fabric reinforced composites. *Journal of Industrial Textiles*, 50 (5), 692.
- Shah, D. U.** (2013). Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review. *Journal of Materials Science*, 48(18), 6083–6107.
- Shah, M., & Chaudhary, V.** (2020). Flow modeling and simulation study of vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process: A review. *IOP Conference Series: Second International Conference on Materials Science and Manufacturing Technology*, (Vol. 872, 012087). Coimbatore, India: Hotel Aloft, April 9-10.
- Suddell, B. C., & Evans, W. J.** (2005). Natural fiber composites in automotive applications. In A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal (Eds.), *Natural fibers, biopolymers and biocomposites* (pp. 243-271). Boca Raton: Taylor & Francis.
- Tan, S. G., & Chow, W. S.** (2011). Thermal properties, curing characteristics and water absorption of soybean oil-based thermoset. *eXPRESS Polymer Letters*, 5(6), 480-492.
- Temmink, R., Baghaei, B., & Skrifvars, M.** (2017). Development of biocomposites from denim waste and thermoset bio-resins for structural applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 106, 59-69.
- Tripathy, S. S., DiLandro, L., Fontanelli, D., Marchetti, A., & Levita, G.** (2000). Mechanical properties of jute fibers and interface strength with an epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science* 75(13), 1585-1596.
- Trostyanskaya, E. B.** (1995). Polymeric matrices in fibre-reinforced composite materials. In R.E. Shalin (Eds.), *Polymer Matrix Composites* (pp. 1-86). London: Chapman&Hall.
- Wang, C., Ding, L., Cheng, R., He, M., Wei, J., Li, J., Lu, R., & Xie, H.** (2016). Facile one-step synthesis of bio-based AESO resins. *European Journal of Lipid Science Technology*, 118(10), 1463-1469.

- Wang H., Memon H., A. M. Hassan E., Miah, M. S., & Ali, M. A.** (2019). Effect of Jute Fiber Modification on Mechanical Properties of Jute Fiber Composite. *Materials*, 12(8), 1226.
- Williams, G. I., & Wool, R. P.** (2000). Composites from Natural Fibers and Soy Oil Resins. *Applied Composite Materials*, 7, 421-432.
- Wen, X. M., Xiao, Z. Z., Jiang, T., Li, J., Zhang, W., Zhang, L., & Shao, L.** (2013). Constructing Novel Fiber Reinforced Plastic (FRP) Composites through a Biomimetic Approach: Connecting Glass Fiber with Nanosized Boron Nitride by Polydopamine Coating. *Journal of Nanomaterials*, 470583.
- Wu, Y., & Li, K.** (2018). Acrylated epoxidized soybean oil as a styrene replacement in a dicyclopentadiene-modified unsaturated polyester resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(19), 46212.
- Yilmaz, N. D., Khan, G. M. A., & Yilmaz, K.** (2017). Biofiber-Reinforced Acrylated Epoxidized Soybean Oil (AESO) Biocomposites. In V.K. Thakur, M.K. Thakur, M.R. Kessler (Eds.), *Handbook of Composites from Renewable Materials* (Vol. 3, pp. 211-251). Beverly: Wiley.
- Url-1** <<http://www.kompozitsan.com>>, erişim tarihi 21.10.2019.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Semih ÖZKÜR

--

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2006, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekstil Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR VE SUNUMLAR

- **Ozkur S, Sezgin H, Akay E, ve Yalcin-Enis I.** 2020. Hybrid Bio-Based Composites from Blends of Epoxy and Soybean Oil Resins Reinforced with Jute Woven Fabrics, *Materials Research Express*, 7 (1), 015335.
- **Ozkur S, Leskovšek M, Golja B, Demsar A, Sezgin H, ve Yalcin-Enis I.** 2021. Characterization of Thermo-Mechanical and Morphological Properties of Jute Fabric Reinforced Epoxy/AESO Bio-Composites, *Fibers and Polymers* (Basıma kabul edildi.)
- **Ozkur S, Sezgin H, ve Yalcin-Enis I.** 2021. The Effect Of Curing and Post-Curing Processes on Physical and Mechanical Behaviors of Jute Fabric Reinforced AESO/Epoxy Based Bio-Composites, *Fibers and Polymers* (Değerlendirme süreci devam ediyor.)
- **Ozkur S, Sezgin H ve Yalcin Enis I.** 2019. Artan Biyo-Reçine Oranının Jüt takviyeli Epoksi Kompozitlerin Darbe Davranışına Etkisi, *Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi (UÇTEK 2019)*, Adana, Türkiye, 26-27 Eylül 2019.
- **Ozkur S, Sezgin H, ve Yalcin-Enis I.** 2019. The Effect of Bio-Resin Content on the Tensile Properties of Jute Fabric Reinforced Biocomposites. *4th International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC'19)*, Ankara, Türkiye, 18-20 Ekim 2019.
- **Ozkur S, Sezgin H, ve Yalcin-Enis, I.** 2019. The Curing and Post-Curing Effect on Drop-weight Impact Behavior of Bio-Composites. *5. International Conference on Advances in Mechanical Engineering (Icame 2019)*, İstanbul, Türkiye, 17-19 Aralık 2019.

