

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JÜT FİBER TAKVİYELİ GRAFEN DESTEKLİ
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SEFA SÖNMEZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2023

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JÜT FİBER TAKVİYELİ GRAFEN
DESTEKLİ KOMPOZİT MALZEME
ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

SEFA SÖNMEZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM

GEBZE
2023

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**PRODUCTION OF JUTE FIBER
REINFORCED GRAPHEN SUPPORTED
COMPOSITE MATERIAL AND
INVESTIGATION OF THE MECHANICAL
PROPERTIES**

SEFA SÖNMEZ

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. AHMET SİNAN ÖKTEM**

GEBZE

2023

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 09/02/2023 tarih ve 2023/13 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08/03/2023 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Sefa SÖNMEZ'in tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof.Dr.Ahmet Sinan ÖKTEM

ÜYE

: Dr.Öğr.Üyesi Recep ÖNLER

ÜYE

: Dr.Öğr.Üyesi Alperen ACAR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Doğal fiber takviyeli polimer kompozitler (NFRC) yenilenebilir, ucuz, kısmen ve tamamen geri dönüştürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir olduğundan, endüstriyel uygulamaları ve temel araştırmaları hızla artmaktadır. Bugün imalat sektörü, özellikle otomotiv endüstrisi, rekabetçi maliyetler, yüksek yakıt verimliliği, artan performans ve çevresel gereklilikler tarafından yönlendirilmektedir. Ülkemizde dış kaynak olarak aldığımız petrol esaslı kompozitler yerine doğal kompozitlerin kullanılması ve araştırılması ülke ekonomisini olumlu etkileyecektir. Ancak bu doğal fiberlerin tüm bu avantajları yanında mekanik, ısı ve yüzey ayrışması gibi geliştirilmesi gereken özelliklerinden dolayı literatürde çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar arasında doğal fiberlerin (NF) özelliklerini iyileştirmeye yönelik en önemli çalışmalardan biri, fiberleri nanokatki maddeleri ile bağlayan bir reçine geliştirilmesidir. Mükemmel mekanik, ısı ve elektriksel özelliklere sahip olan ve literatür incelemelerinde de bahsedilen grafen (G) ve türevlerini içeren araştırmalar, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesinde ön planda görünmektedir. Bu çalışmada literatürdeki yeri ve kullanımı giderek artan mekanik özellikleri artırılmış azot katkılı indirgenmiş grafen oksit (NrGO) destekli reçine ve jüt fiber takviyeli kompozit malzeme geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Laboratuvarıda üretilen grafen oksit (GO), değiştirilmiş bir Hummers yöntemiyle elde edilmiştir. %0,8 oranda azot katkılı grafen oksit (NrGO), epoksi reçine içerisinde fonksiyonelleştirilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak 372 g/m² jüt fiber kumaş ile %0,8 oranında NrGO katkılı epoksi reçine kullanılarak tabakalı kompozit levhalar üretilmiştir. Üretilen kompozit levhaların mekanik özelliklerinin ve hasar mekanizmalarının anlaşılması için ASTM D3039'a göre çekme testi, ASTM D7264'e göre üç nokta eğilme testi yapılmış ve çekme testi sonucunda kırılan yüzeylerinin mikro yapıları ve hata türleri hakkında bilgi sahibi olmak için SEM görüntüleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer Kompozit, Doğal Fiberler, Jüt Fiber, Grafen Oksit, Mekanik Özellikler.

SUMMARY

Since natural fiber reinforced polymer composites (NFRC) are renewable, inexpensive, partially and fully recyclable and biodegradable, their industrial applications and basic research are growing rapidly. Today, the manufacturing sector, especially the automotive industry, is driven by competitive costs, high fuel efficiency, increased performance and environmental requirements. In our country, the use and research of natural composites instead of the petroleum-based composites we outsource will positively affect the country's economy. However, in addition to all these advantages of natural fibers (NF), studies continue in the literature due to the properties of natural fibers that need to be improved such as mechanical, thermal and surface decomposition. Among these studies, one of the most important studies to improve the properties of natural fibers is the development of a resin that binds fibers with nanocontaining materials. Research involving graphene (G) and its derivatives, which have excellent mechanical, thermal and electrical properties and are also mentioned in the literature reviews, seem to be at the forefront in improving material properties. In this study, it is aimed to develop a resin and jute fiber reinforced composite material with nitrogen doped reduced graphene (NrGO) supported resin and jute fiber reinforced composite material with increased mechanical properties and to investigate its mechanical properties. Graphene oxide (GO) produced in the laboratory using modified Hummers method was obtained. 0.8% nitrogen doped graphene oxide (NrGO) was functionalized in epoxy resin. Using vacuum infusion method, layered composite sheets were produced using 372 g/m² jute fiber fabric from the market and 0.8% NrGO doped epoxy resin. Tensile tests according to ASTM D3039, three-point bending tests according to ASTM D7264 and SEM images were analyzed to understand the mechanical properties and damage mechanism of the composite sheets.

Key Words: Polymer Composite, Natural Fiber, Jute Fiber, Glass Fiber, Graphene Oxide, Mechanical Properties.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Prof. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM'e,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Selçuk GEDİK ve grafen malzeme tedariki sağladığımız HAZERFEN KMETSTAŞ firmasına ve Erdal TOPAÇ'a,

Tez çalışmalarım kapsamında, İstanbul Teknik Üniversitesi Kompozit ve Yapı Laboratuvarında çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde bilgisi ve desteğini esirgemeyen Sn. Müslüm ÇAKIR'a,

Son olarak lisansüstü çalışmalarım sırasında zaman zaman ihmal ettiğim fakat hiçbir zaman fedakârlık ve desteğini esirgemeyen, yılgınlıklarında beni kendime getiren sevgili eşim Leyla SÖNMEZ'e ve göstermiş oldukları desteklerinden dolayı ebeveynlerime en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1. Kompozitler	4
2.2. Fiber Takviyeli Kompozitler	5
2.3. Doğal Fiber Takviyeli Kompozitler	6
2.3.1. Doğal Fiber Çeşitleri ve Kaynakları	6
2.3.2. Doğal Fiberlerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	8
2.3.2.1. Selüloz	8
2.3.2.2. Hemiselüloz	9
2.3.2.3. Lignin	10
2.3.3. Doğal Fiber Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri	11
2.3.4. Doğal Fiberlerin Avantaj ve Dezavantajları	12
2.3.5. Jüt Fiber Takviyeli Tabakalı Kompozit Malzemeler	13
2.3.5.1. Jüt Bitkisi	13
2.3.5.2. Jüt Fiberleri	13
2.3.5.3. Jüt Fiberinin Fiziksel ve Kimyasal Yapısı	14
2.4. Polimer Matris Malzemesi	16
2.4.1. Termoset Reçine	17
2.4.1.1. Epoksi Reçine	18
2.4.1.1.1. Epoksi Çapraz Bağlanma Süreci	18
2.4.1.1.2. Epoksi Kürleşme Süreci	19

2.5. Üretim Metotları	19
2.5.1. Termoset Bazlı Kompozitler İçin Üretim Yöntemleri	20
2.5.1.1. El Yatırması	20
2.5.1.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM)	20
2.5.1.3. Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM)	21
2.6. Fiberlerde Ara Yüzey İşlemleri	22
2.6.1. Alkali İşlem	22
2.7. Nanopartikül Takviyeli Doğal Kompozitler	26
2.7.1. Grafen Bazlı Malzemeler	26
2.7.2. Grafen Destekli Doğal Fiber Kompozitler	29
2.7.3. Grafen Destekli Jüt Fiber Kompozitler	30
3. MALZEME ve YÖNTEM	35
3.1. Malzemeler	35
3.1.1. Jüt Fiber Kumaş	36
3.1.2. Reçine ve Sertleştirici	36
3.1.3. İndirgenmiş Grafen Oksit	37
3.2. Üretim Yöntemi	39
3.2.1. Kompozit Malzeme Tasarımı	39
3.2.2. Epoksi Reçinenin İndirgenmiş Grafen Oksit ile Fonksiyonelleştirilmesi	41
3.2.3. Jüt Kumaşın Yüzey İşlemi	43
3.2.4. Kompozit Malzemelerin Üretimi	44
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	47
4.1. Çekme Testi	47
4.2. Üç Nokta Eğme Testi	50
4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	52
5. TEST SONUÇLARI ve BULGULAR	53
5.1. Çekme Testi Sonuçları	53
5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	57
5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları	60
6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	65
KAYNAKLAR	68

ÖZGEÇMİŞ

80

EKLER

81



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u> Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
°C	: Santigrat derece
µm	: Mikrometre
2D	: İki boyut
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
d	: Devir
dk	: Dakika
DEGRA	: Bifenol A'nın diglisidil eteri
FG	: Fonksiyonelleştirilmiş grafen
G	: Grafen, grafen pulları
GFC	: Cam fiber takviyeli kompozit
GO	: Grafen oksit
GPa	: Gigapaskal
GPNPs	: Grafen oksit nanoplateletler
ILSS	: Yüzeyler arası kesme dayanımı
JFRC	: Jüt fiber takviyeli kompozit
LPE	: Sıvı faz pul pul dökme
mmHg	: Milimetre civa
MPa	: Megapaskal
N ₂ H ₄	: Hidrazin
NaBH ₄	: Sodyum bor hidrür
NaOH	: Sodyum hidroksit (Kostik)
NBC	: Nanobiyokompozit
NF	: Doğal fiber
NFRC	: Doğal fiber epoksi kompozit
NFRPC	: Doğal fiber takviyeli polimer kompozit
NrGO	: Azot katkılı indirgenmiş grafen oksit
PP	: Polipropilen
rGO	: İndirgenmiş grafen oksit

RTM	:	Reçine transfer kalıplama
SEM	:	Elektron Taramalı Mikroskop
SiC	:	Silisyum karbür
SiO ₂	:	Silisyum dioksit
TiO ₂	:	Titanyum dioksit
UD	:	Tek yön
UV	:	Ultraviyole
VARTM	:	Vakum destekli reçine transfer kalıplama
ViY	:	Vakum infüzyon yöntemi



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Kompozit malzemelerin çeşitleri.	4
2.2: Doğal fiber çeşitleri.	7
2.3: Doğal bitki hücre duvarlarının diyagramı.	8
2.4: Selülozun kimyasal yapısı.	9
2.5: Hemiselülozun kimyasal yapısı.	9
2.6: Ligninin kimyasal yapısı.	10
2.7: Jüt bitkisi (a), Jüt fiberlerin bitkiden çıkarılması (b), Jüt fiber demeti (c) ve jüt fiberinin yapısı (d).	14
2.8: Kompozit malzemelerde termoset matris malzemesi ile üretim yöntemleri.	17
2.9: DEGBA üretmek için bisfenol A ve epiklorohidrin reaksiyonu.	18
2.10: Termoset bir malzemenin kurlenme süreci.	19
2.11: Kompozit üretimi için RTM yönteminin süreç diyagramı.	20
2.12: VARTM'ın şematik diyagramı.	21
2.13: İşlem görmemiş (a), %6 NaOH İşlem görmüş (b), %10 NaOH işlem görmüş jüt fiber yüzeyleri SEM görüntüsü (c).	25
2.14: Grafen (a), Grafit (b), Karbon nanotüp (c), Çok katlı karbon nanotüp (d), Fulleren (e), Grafen oksit (f), İndirgenmiş grafen oksit (g).	27
3.1: Tez kapsamında bileşenlerin planlanması.	35
3.2: Bezayağı dokuma jüt kumaş.	36
3.3: Grafen oksit indirgeme süreci akış şeması.	38
3.4: Reaktörde azot katkılı indirgenmiş grafen oksit (NrGO) işleminin görüntüsü.	39
3.5: Hazırlanan jüt fiber takviyeli kompozit levhanın boyutları.	40
3.6: Epoksi reçinenin NrGO ile fonksiyonelleştirme sürecinin akış şeması.	42
3.7: Ultrasonik tipte dağıtma işlemi (a), NrGO + epoksi reçine karıştırma işlemi (b), Etüvde aseton uzaklaştırma işlemi (c).	42
3.8: Kullanılan NaOH (a), %10 NaOH çözeltisi (b), %10 NaOH çözeltisi karışımı (c), 4 saat jüt kumaş çözeltide bekledi (d).	43
3.9: Kompozit levhaların vakum infüzyon ile üretimi aşamaları.	46

4.1:	ASTM D3039'a göre çekme testi ana boyutları.	47
4.2:	GOBLET marka FCAB-5-11 tipinde gerinim ölçer ve özellikleri.	48
4.3:	MTS 322 Universal çekme test cihazı (a), Yüksek hızda veri toplama sistemi (b), JF/EP + NaOH 10% numunesi çekme testi anında görüntüsü (c).	49
4.4:	Çekme numuneleri (a), Strain gauge numuneye bağlanması sonrası gerilim kontrolü (b), Strain gauge bağlı numune (c).	49
4.5:	Üç nokta eğme numune ölçüleri.	50
4.6:	JF/EP (a), JF/EP + NrGO 0.8% (b), JF/EP + NaOH 10% (c), JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8% (d).	51
4.7:	Üç nokta eğme test düzeneği.	51
4.8:	FEI (PHILIPS) XL30 SFEG taramalı elektron mikroskobu.	52
5.1:	Numune gruplarının gerilme gerinim eğrileri.	54
5.2:	Numune grupları çekme dayanımı değerleri (a), Numune grupları elastisite modülü değerleri (b).	55
5.3:	Numune grupları eğilme dayanımı değerleri (a), Numune grupları eğilme modülü değerleri (b).	58
5.4:	JF/EP çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.	60
5.5:	JF/EP + NrGO 0.8% çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.	61
5.6:	JF/EP + NaOH 10% çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.	62
5.7:	JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8% çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.	63

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Ticari olarak büyük doğal fiber kaynakları.	7
2.2: Bazı doğal fiberlerin kimyasal bileşimi.	11
2.3: E-cam ile doğal fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.	12
2.4: Literatürde belirtildiği gibi jüt fiberlerin kimyasal bileşimi.	15
2.5: Literatürde jüt fiberinin mekanik özellikleri.	16
2.6: Termoplastik ve termoset matrislerin mekanik özellikleri.	16
2.7: İşlem görmemiş ve alkali işlem görmüş jüt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri.	24
2.8: İşlem görmemiş, sıcak su, alkali, grafen pulları, grafen oksitler ve indirgenmiş grafen oksit ile işlem görmüş jüt fiber/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri.	33
3.1: Seçilen kompozit malzeme bileşenleri.	35
3.2: Bezayağı dokuma jüt kumaş özellikleri.	36
3.3: Laminasyon reçinesi MGS L160 özellikleri.	37
3.4: MGS H160 sertleştirici özellikleri.	37
3.5: Üretilecek kompozit malzemeler.	40
5.1: Maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri.	53
5.2: Maksimum çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı yüzdelik değişimleri.	54
5.3: Maksimum gerinim değerleri ve gerinim yüzdelik değişimi.	55
5.4: Eğilme dayanımı, eğilme modülü değerleri.	57
5.5: Eğilme gerilmesi, eğilme modülü yüzdelik değişimleri.	58

1. GİRİŞ

Günümüzde doğal fiberlerin kompozit malzeme üretiminde kullanımı, geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik gibi özellikleri sebebiyle hızla artış göstermektedir. Takviye elemanı olarak kullanılan doğal fiberlerin biyolojik olarak parçalanabilmesi ve geri dönüştürülebilme özelliklerine sahip olması, yüksek özgül mukavemet ve düşük yoğunluk gibi özelliklerinin de yanı sıra bitkisel kökenli olan doğal kaynakların yenilenebilir olması sebebi ile doğal malzemeler gelişim göstermektedir [1].

Ancak doğal fiberlerden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin sentetik fiberlere göre düşük olması, uygulamalarda kullanımlarını sınırlandırmıştır. Literatürde matrisin, fiber veya her iki bileşenin birlikte kimyasal veya fiziksel olarak yeniden düzenlenmesi gibi işlemlerle, doğal fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır [2], [3]. Hidrofobik polimer matrisin hidrofilik fiberlerle uyumluluğu problem yaratmaya devam etmektedir. Alkilasyon, asetilasyon, maleat eşleşmesi vb. polimer matrisin ve doğal fiberlerin uyumluluğunu artırmak için çeşitli yüzey işleme yöntemleri kullanılmıştır [4].

Bunların yanında polimer kompozitlerin özelliklerini iyileştirmek için nanopartiküller veya nano dolgular, dolgu malzemesi olarak kullanılmak için muazzam bir potansiyele sahiptir. Son zamanlarda, grafen pulları (G), grafen oksit (GO) ve indirgenmiş grafen oksit (rGO) dâhil olmak üzere grafen ve türevleri, inanılmaz mekanik özelliklerinden dolayı yüksek performanslı kompozit uygulamalar için büyük ilgi görmüştür. Grafen türevleri (GO ve rGO vb.), kararlı dağılımlarında büyük miktarda üretilir. Ek olarak bu tür malzemeler, iç yapısındaki fonksiyonel grupları nedeniyle iyi kimyasal reaktivite ve kullanım özellikleri sağlar [5]. Ayrıca, grafen bazlı ve elektriksel olarak iletken pullar, mikro akışkanlaştırma tekniği ile ölçeklenebilir bir miktarda üretilir ve akıllı kompozit uygulamaları için kullanılabilir [6], [7].

Önceki çalışmalar, grafen (G) ile yüzey işlemi görmüş jüt fiberlerin ve kompozitlerinin mekanik özelliklerinde ve performanslarında, fiberler ve grafen bazlı pullar (G, GO) arasında bağlanma veya mekanik kenetlenme oluşturarak önemli bir iyileşme olduğunu göstermektedir [6], [8], [9]. Bu gelişmeler, çevresel sorunlara yol açmadan yeni nesil yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için akıllı ve sürdürülebilir doğal fiber kompozitlerin üretilmesini sağlayabilir.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Günümüzde havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan kompozit malzemelere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Ülkemizde dış kaynak olarak alınan petrol esaslı kompozitlerin yerine doğal malzemelerden üretilmiş kompozitlerin kullanılması ve araştırılması ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır.

Yapılarında bulunan selüloz nedeni ile bitkisel fiberler, polar karaktere sahiptirler. Fiberlerin yapısındaki lignin, petkin ve vaks gibi safsızlıklar ve yüksek miktardaki hidroksil grupları, bu fiberlerin matris polimerine bağlanmasına engel olmakta ve ara yüzeyi zayıflatmaktadır. Bu durum da üretilen kompozitin mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki etmektedir. Doğal fiberlere uygulanan yüzey işlemler ile selülozların yüzey kısmında bulunan bu maddelerin bir kısmı giderilmektedir ve fiber yüzeyinde polimer ile etkileşime girebilecek çok sayıda açık selüloz uçlarının oluşması sağlanmaktadır [9].

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde termoset plastikler termoplastiklere göre daha fazla tercih edilmektedir. Üç boyutlu ağ yapısı ve içerdiği çapraz bağlar nedeni ile tekrar eritilerek kullanılmaları mümkün değildir. Termoset polimerler rijit yapıdadır ve ısıtıldıklarında sertleşirler. Termoset polimerler formunu sonsuza dek koruyabilirler [10], [11].

Grafenin büyük ölçüdeki türevlerinden grafen oksitin azot ile indirgenmiş hali (NrGO) daha yüksek en boy oranı (aspect ratio), mükemmel mekanik özellikler ve kolay yüzey işlevselliği göz önüne alındığında, mekanik mukavemet, elastik modül ve tokluk gibi mekanik özellikleri geliştirmek için bu çalışmada epoksi reçine ile fonksiyonelleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında ikinci bölümde kompozitlerden başlayarak, doğal fiber takviyeli kompozitler ile jüt fiber takviyeli kompozitler (JFRC) ve bu kompozitler hakkında yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Kompozit üretiminin diğer birleşenleri olan polimer matris, nanopartikül takviyeli doğal kompozitler ve bu konu altında grafen destekli jüt fiber kompozitler hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir. Kompozit malzemenin üretim yöntemleri ve fiberlerde ara yüzey işlemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde üretimi yapılacak kompozitlerin bileşenlerini oluşturan malzemeler ile ilgili olarak piyasadan bulunan jüt dokuma kumaş, epoksi ve azot

katkılı indirgenmiş grafen oksit (NrGO) hakkında bilgi verilmiştir. Reçineye katkı olarak kullanılacak laboratuvar ortamında değiştirilmiş bir Hummers metoduyla üretilen NrGO üretimi, jüt fiber yüzey işlemi, jüt fiber takviyeli kompozit üretmek için yapılan işlemler hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde yapılacak test çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde jüt fiber takviyeli katkılı ve katkısız epoksi kompozit ile bunların yüzey işlem uygulanmış halleri deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Altıncı ve son bölüm olarak sonuçlar değerlendirmiş ve gelecek önerileri konu başlıkları altında anlatılmıştır.



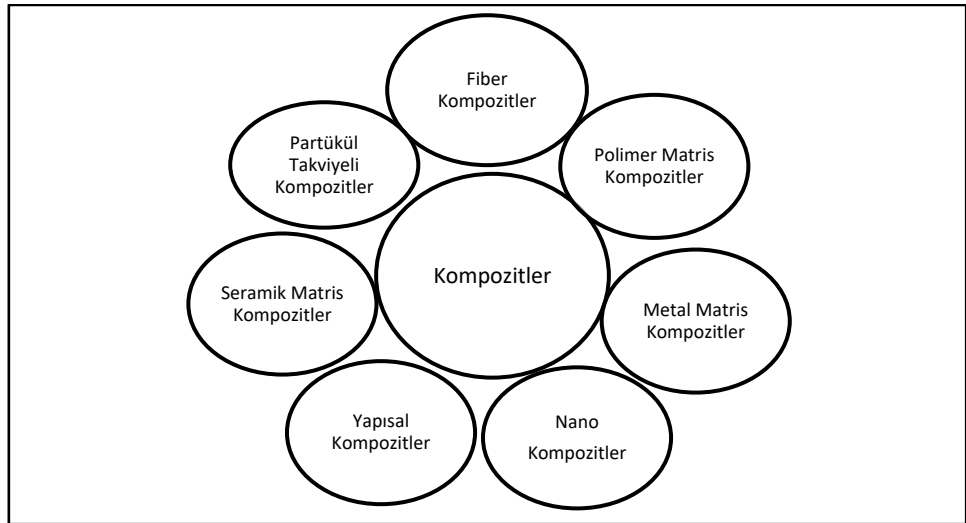
2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, doğal fiberler ve doğal fiber takviyeli epoksi kompozitlere genel bir bakış sunulmuştur. Sonrasında bu başlıklar altında jüt fiber takviyeli kompozitler tartışılmıştır. Doğal fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretim metotları ile doğal fiberlere uygulanan yüzey işlemleri açıklanmıştır. Son kısımda kompozit malzemeleri güçlendirmek için kullanılan nanopartiküller hakkında bilgi verilmiş ve grafen destekli doğal fiber ile jüt fiber takviyeli kompozitler tartışılmıştır.

2.1. Kompozitler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin özel yapısal özellikler elde etmek üzere bir araya getirilmesiyle elde edilir [12]. Kompozitlerde, başlangıç elemanları kendi özelliklerini belirli bir ölçüde korurlar [13]. Ayrıca nihai kompozitin ortaya çıkan özelliklerinin, tek tek bileşenlerin özelliklerinden daha üstün olduğu da unutulmamalıdır. Kompozitlerin arkasındaki kavram yeni bir şey değildir ve insanlık tarihinin en eski zamanlarından itibaren ticareti süregelenmiştir [14].

Genellikle, matris ve dolgu maddesi veya takviyeler bir kompozitin iki ana yapı taşıdır. Matris, takviye malzemelerini birbirine bağlamaya yardımcı olan ve kullanılan yükü, dolgu elemanlarına ve takviyelere aktaran bir yapıştırıcı gibidir. Ayrıca, takviyeyi yerine sabitler ve takviyeyi dış etkilerden korur.



Şekil.2.1: Kompozit malzemelerin çeşitleri.

Öte yandan bir kompozitteki takviyeler, yapısal yükleri taşımak için güç ve sertlik sağlayan, yük taşıyan bileşenlerdir. Bu takviyeler genellikle doğal fiberler gibi iplikli formlarda bulunur veya kırpık cam, karbon gibi özel formlar alır [12], [15]. Nanomalzemeler, ikincil takviye veya dolgu elemanları olarak kullanılır. Bu nedenle bu elemanlar hedef kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini değiştirerek, kompozitleri daha gelişmiş hale getiren fiber güçlendirme adımını oluşturur.

Matrislerin ve dolgu takviyelerin yapısına bağlı olarak kompozitler farklı kategorilerde sınıflandırılabilir. Takviye malzemesine göre partikül takviyeli kompozitler, yapısal kompozitler, fiber takviyeli kompozitler ve nanokompozitler olmak üzere dört gruba ayrılabilir [16]. Matris açısından kompozitler metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli kompozitler olmak üzere üç tiptir [15], [17].

Bu çalışma esas olarak %0,8 oranında azot katkılı grafen oksit (NrGO) ile güçlendirilmiş doğal fiber takviyeli epoksi kompozitlere (NFRC) odaklandığından doğal fiber takviyeli kompozitler, jüt fiber takviyeli kompozitler ve nanopartikül takviyeli doğal kompozitler sonraki bölümlerde açıklanacaktır.

2.2. Fiber Takviyeli Kompozitler

Son zamanlarda polimer bilimi, polimer esaslı malzemelerin çeşitli avantajlar sunması nedeniyle çeşitli alanlarda ilgi odağı haline gelmiştir. Benzer şekilde polimer bazlı kompozit malzemeler, bakalit reçinesinin keşfinden bu yana çeşitli uygulamalarda önemli bir rol oynamıştır [18]. Otomotiv, havacılık, inşaat ve denizcilik gibi birçok uygulamada metal veya seramik esaslı malzemelerin yerini alma potansiyelleri nedeniyle hızla gelişmektedirler. Tüm polimer bazlı kompozitler arasında, doğal fiber takviyeli kompozitler (NFRC), yadsınamaz çevresel faydaları ve işlenme kolaylıkları nedeniyle giderek daha popüler hale gelmektedir. Sınırlı petrokimya kaynakları, kaçınılmaz olarak endüstrinin biyo bazlı malzemelere geçmesine yol açmıştır. Hem ham hem de işlenmiş selüloz fiberler gibi biyo bazlı polimerler, tıptan savunmaya kadar uzanan uygulamalar için araştırılmıştır [19].

Aslında sentetik malzemelerin değiştirilmesi konusundaki küresel endişe, biyo bazlı polimerlerin kullanımını önemseyen bir noktaya gelmiş gibi görünmektedir. Doğal fiberler gibi doğal polimerler, doğada bol miktarda bulunan malzemelerin özel bir sınıflandırmasına aittir. Kompozit uygulamalarında takviye malzemesi olarak

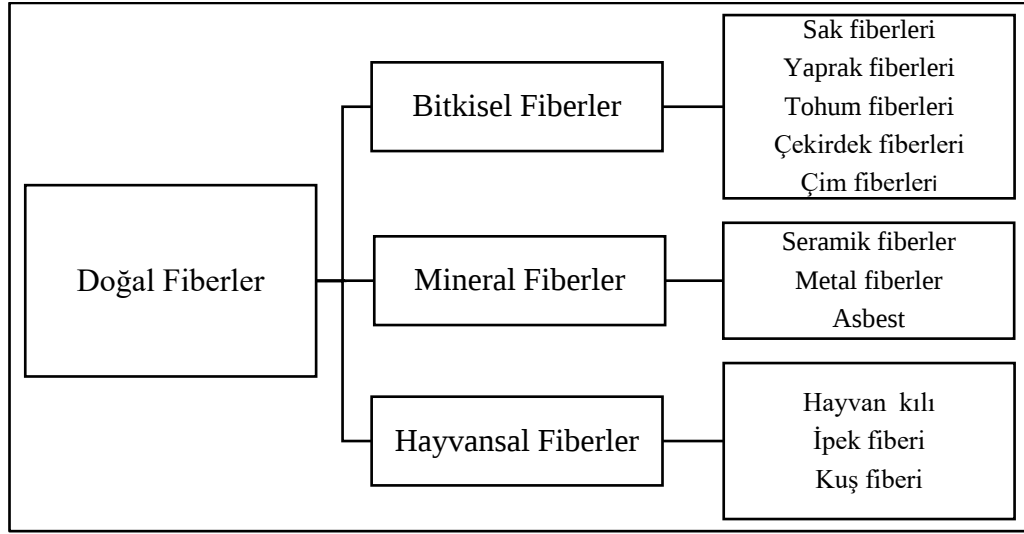
yaygın olarak kullanılan doğal fiberler, aslında en yaygın doğal polimerler olarak kabul edilen ve esas olarak tarım, biyokütle üretiminde bulunan polisakkaritler adı verilen bir malzeme grubuna aittir. Doğal fiberlerin en önemli parçası olan selüloz, Dünya’da bol miktarda bulunmaktadır. NFRC; spesifik tokluk, esneklik, işleme kolaylığı, çevre dostu olma gibi belirli özelliklerde sentetik muadillerinden ve metal bazlı kompozitlerden daha iyi performans göstermektedir [20]. Hafiflikleri ile birleşen yüksek mekanik özellikleri doğal fiberleri özellikle otomotiv uygulamaları için ilginç bir malzeme haline getirmiştir [21]. NFRC’de doğal fiberler, daha iyi özellikler için nihai kompozitin yük kapasitesini değiştirmek üzere yüksek hacim oranına sahip takviye malzemesi olarak kullanılabilir [22].

2.3. Doğal Fiber Takviyeli Kompozitler

2.3.1. Doğal Fiber Çeşitleri ve Kaynakları

Doğal fiberler bitkilerden veya hayvanlardan elde edilmek ile birlikte sentetik veya insan yapımı değildir. Palmiye yağı, sisal, keten ve jüt gibi hem yenilenebilir hem de yenilenemeyen kaynaklardan elde edilen doğal fiberler çok ilgi görmüş ve sıklıkla kompozit malzemelerde kullanılmaktadır. [23]. Esas olarak kökenleri dikkate alınarak hayvansal, bitkisel veya mineral fiberlerden gelmelerine göre sınıflandırılırlar ve tipleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir [24]. Bu araştırmada bitkisel esaslı fiberler anlatılmıştır.

Altı temel doğal bitkisel fiber tipi vardır. Bunlar sak fiberleri (jüt, keten, kenevir, rami ve kenaf), yaprak fiberleri (abaka, sisal ve ananas), tohum fiberleri (hindistan cevizi, pamuk ve kapok), çekirdek fiberleri (kenaf, kenevir ve jüt), çim ve kamış fiberleri (buğday, mısır ve pirinç) ve diğer tüm tipler (ahşap ve kökler) olarak sınıflandırılabilirler.



Şekil 2.2: Doğal fiber çeşitleri.

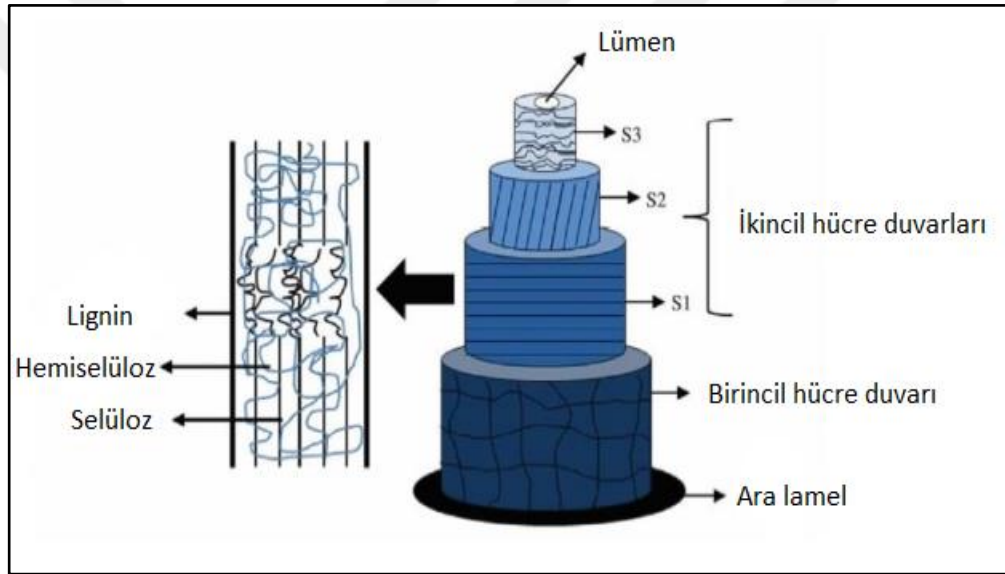
Bitkilerden üretilen doğal fiberler, kullanım amaçlarına göre birincil ve ikincil olarak sınıflandırılır. Birincil bitkiler, fiber içerikleri için yetiştirilen bitkilerdir; ikincil bitkiler ise yan ürün olarak fiber üreten bitkilerdir. Jüt, kenevir, kenaf ve sisal birincil bitkilere örnektir. Ananas, palmye yağı ve hindistan cevizi ikincil bitkilere örnektir. Tablo 2.1 şu anda dünya çapında üretilen kompozitlerde ticari olarak kullanılan lifleri göstermektedir [25].

Tablo 2.1: Ticari olarak büyük doğal fiber kaynakları.

Fiber Kaynağı	Dünyadaki Üretimi (ton/yıl)
Bambu	30000
Jüt	2300
Kenaf	970
Keten	830
Sisal	378
Kenevir	214
Hindistan Cevizi Lifi	100
Şeker Kamışı Küspesi	75000
Ot	700

2.3.2. Doğal Fiberlerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

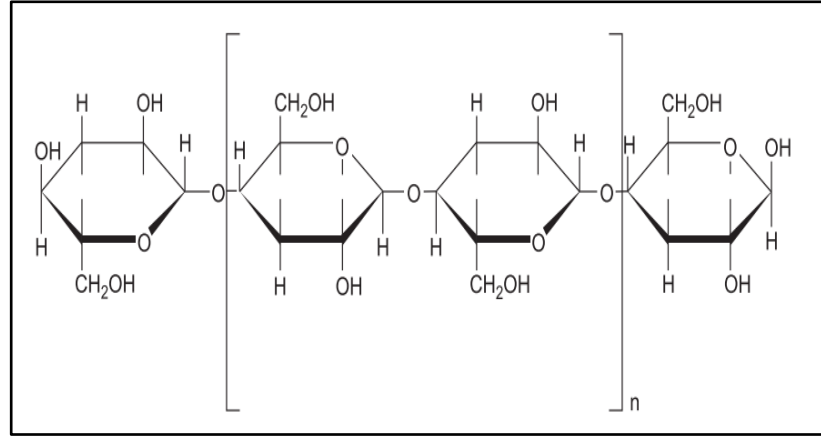
Doğal fiberler lignin matrisine gömülü takviye olarak selüloz mikro fibrillerinden oluşan doğal kompozitler olarak düşünülebilir. Doğal fiberlerin ana kısımları sonraki bölümlerde tartışılacak olan selüloz, hemiselülozlar ve lignindir. Diğer bileşenler arasında pektin ve mumlar bulunmaktadır. Şekil 2.3, doğal bitki hücre duvarının şematik gösterimini göstermektedir [26]. Şekil 2.3’de görüldüğü üzere mikrofibril yapısı içi boş bir tüp şeklindedir ve etrafını oluşturan hücre duvarları dört farklı katmandan oluşur. Bu katmanlarda birincil hücre duvarı, üç ikincil hücresel bölme ve mikrofibrilin merkezindeki açık bir kanal olan lümen vardır.



Şekil 2.3: Doğal bitki hücre duvarlarının diyagramı.

2.3.2.1. Selüloz

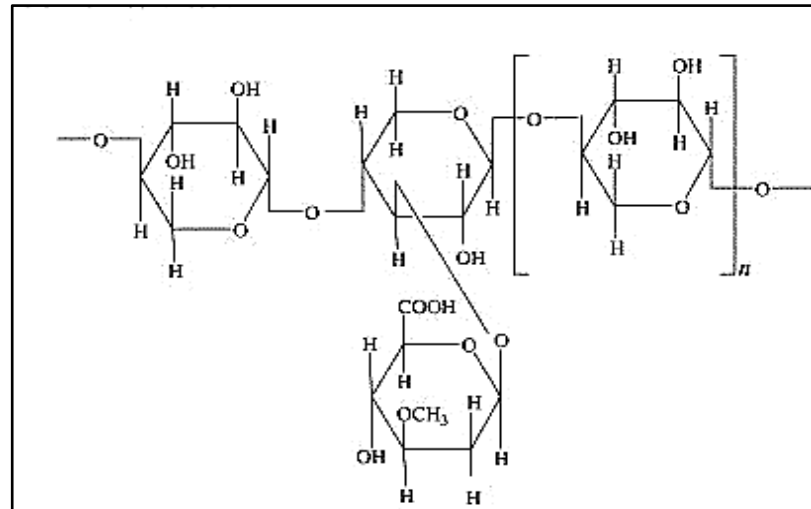
Selüloz doğal fiberlerin ana bileşeni ve yeryüzünde en bol bulunan biyo bazlı malzeme olarak kabul edilmektedir. Selüloz temel olarak kristal ve amorf olmak üzere iki farklı bölgeden oluşur. Ağırlık olarak selülozun %60-90’ı kristal yapıdadır. Kristal bölgelerdeki zincirler arası bağlar sıkıca paketlenmiş olduğundan yalnızca birkaç hidroksil grubu (OH) vardır bu da onu daha az hidrofilik yapar. Öte yandan selülozun amorf bölgelerinde daha az zincirler arası hidrojen bağı oluşur. Bu, onun H₂O moleküllerine bağlı OH gruplarının sayısı artırır ve sonuç olarak hidrofilikliğini artırır. Şekil 2.4 selülozun kimyasal yapısını göstermektedir [27].



Şekil 2.4: Selülozun kimyasal yapısı.

2.3.2.2. Hemiselüloz

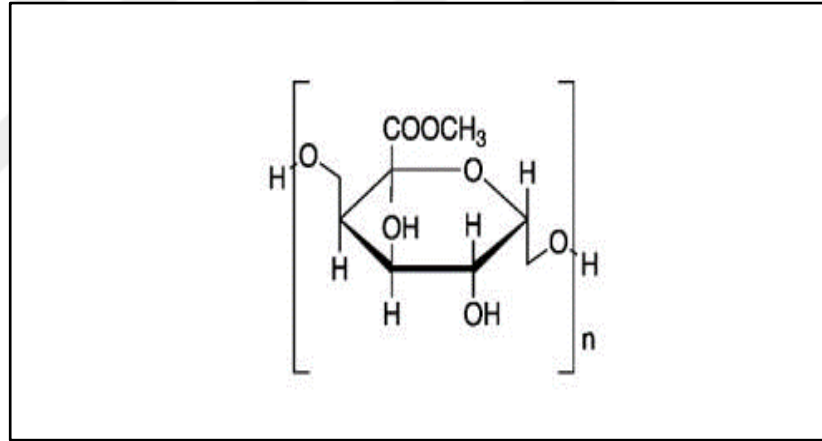
Selülozla birlikte hemiselüloz doğal fiberlerin bir başka önemli bileşenidir ve en yaygın biyo bazlı polimerler kategorisinde ikinci sırada yer alır. Selülozdan daha düşük moleküler ağırlığa sahiptir ve bir sargı bileşeni olarak hareket ettiği için selüloz mikrofibrilleri arasındaki boşlukları doldurur. Hemiselüloz dallanmış bir yapıya sahip polisakkarit gruplarından oluşur. Hidrojen bağı yoluyla hemiselüloz, selüloz-hemiselüloz ağları oluşturmak için selüloza bağlanır ve daha sonra fiber hücresi yapısal bileşenlerini oluşturur [28]. Selüloz ile karşılaştırıldığında OH gruplarının H₂O moleküllerine daha iyi ulaşmasını sağlayan amorf bir yapıya sahiptir [29]. Hemiselülozların tipik kimyasal yapısı Şekil 2.5’de gösterilmektedir [27].



Şekil 2.5: Hemiselülozun kimyasal yapısı.

2.3.2.3. Lignin

Lignin doğal fiberler için matris görevi gören çok dallı bir polimerdir. Böylece hemiselüloz ile birlikte selülozun kendisi fiber hücresi üzerine eklenebilir. Karmaşık üç boyutlu bir yapıya sahip olan lignin, fenil propan birimlerinden oluşur. Ligninde (Şekil 2.6), farklı birimler, suda çözünmez hale getiren ve monomerik birimlere ayrılan farklı karbon-karbon veya eter bağlarıyla birbirine bağlanır. Yüksek nem gibi ağır çevre koşullarında lignin, selüloz ve hemiselülozların korunmasında kritik bir rol oynar. Lignin sadece fiber için yapısal destek sağlamakla kalmaz aynı zamanda doğal fiberi UV ve ısı koşullarına karşı da korur [30]. Bununla birlikte lignin hücre duvarlarından uzaklaştırıldığı takdirde fiber sertliği ve fiber ile matris arasındaki etkin yük transferi artar. Lignin ısı koşullarda ve UV'ye karşı kararlıyken hemiselüloz ısı bozulmanın ve fiberin nem emiliminin ana nedenidir [31].



Şekil 2.6: Ligninin kimyasal yapısı.

Doğal fiberlerin özellikleri esas olarak bitkinin doğasına, yetiştirildiği bölgeye, bitkinin yaşına ve kullanılan çıkarma yöntemine bağlıdır. Tablo 2.2 [1], [32], fiberlerin yapısı, selüloz içeriği, liflerin açısı, enine kesit, polimerizasyon derecesi gibi kimyasal ve fiziksel bileşimin bilinmesine yardımcı olan çeşitli doğal fiberlerin kimyasal bileşimini göstermektedir.

Tablo 2.2: Bazı doğal fiberlerin kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşeni (%)			
Doğal Fiber Çeşidi	Selüloz	Hemiselüloz	Lignin
Jüt	61-63	13	5-13
Keten	70-72	14	4-5
Kenevir	70,2-74,4	17,9-22,4	3,7-5,7
Kenaf	31-39	21,5	15-19
Rami	80-85	3-4	0,5
Hindistan Cevizi Lifi	43	<1	45
Muz	60-65	6-8	5-10
Mesta	60	15	10
Ananas	80	-	12
Sisal	60-67	10-15	8-12
Odon	45-50	23	27
Ayçiçeği	70-78	18-19	4-5
Pamuk	82,7	5,7	-

2.3.3. Doğal Fiber Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Doğal fiberlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, azami özelliklere ulaşmak için kullanılmadan önce dikkate alınması gereken önemli bilgileri ortaya koymaktadır. Yapısal ve yapısal olmayan uygulamalarda sentetik fiberlerin doğal alternatifleri ile değiştirilmesi için birçok girişimde bulunulmuştur [33]. Günümüzde otomotiv endüstrisinde daha önce cam fiber takviyeli kompozitlerden yapılan çok sayıda parça doğal fiber takviyeli kompozitlerden yapılmaktadır.

Doğal fiberlerin görünen mekanik özellikleri cam fiberleri gibi sentetik muadilleri kadar yüksek olmasa da kopma anındaki daha yüksek uzaması nihai kompozitin performansını artırır [34]. Tablo 2.3'de [35] bazı yaygın doğal fiberlerin mekanik özellikleri cam fiber ile karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Tablo 2.3: E-cam ile doğal fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Fiber	Yoğunluk (g/cm ³)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Young Modülü (GPa)	Şekil Değiştirme (%)
E-glass	2,55	15-25	2000-3500	70-73	2,5-3,7
Jüt	1,3-1,49	25-250	393-900	13-26,5	1,16-1,5
Keten	1,5	40-600	345-1500	27-39	2,7-3,2
Kenevir	1,47	25-250	550-900	38-70	1,6-4
Kenaf	1,5-1,6	2,6-4	250-930	40-53	1,6
Rami	1,5-1,6	0,049	400-938	61,4-128	1,2-3,8
Sisal	1,45	50-200	468-700	9,4-22	3-7
Ananas	1,4	7-10	500-1100	11,8-30	3,7-4,3
Abaka	1,5	10-30	430-813	31,1-33,6	2,9

2.3.4. Doğal Fiberlerin Avantaj ve Dezavantajları

Yukarıdaki tartışmaya dayanarak doğal fiber takviyeli polimer kompozit (NFRPC) malzemelerin aşağıdaki avantajlarına ve sınırlamalarına sahip olabiliriz.

Doğal fiberlerin avantajları arasında:

- Düşük maliyetli ve yüksek performanslı olması,
- Geri dönüşümü veya atılması, sentetik fiber takviyeli kompozitlere kıyasla basit olması,
- Fiberin aşındırıcı yapısı çok daha düşük olmasından dolayı kompozit malzemelerin teknik işlemlerinin daha avantajlı olması,
- Cam fiberler yerine çoğunlukla yapısal olmayan uygulamalarda kullanılabilmesi
- Cam fiber takviyeli kompozitlerden yapılan kapılar, kaportalar gibi otomotiv bileşenlerinin yerini alması,

sayılabilir.

Doğal fiberlerin dezavantajları:

- Yüksek nem emme özelliği,
- Yüksek nem emme özelliğine bağlı olarak polimer matrisi ve fiberler arasındaki ara yüzey bağlantısını azalması ile mekanik özellikler üzerinde zararlı etkilere neden olması,
- Zayıf ıslatma kabiliyeti, bazı polimerik matrislerle uyumsuz olması,
- Bitki fiberleri doğrudan doğal haliyle kullanılamaması, fiberler ve polimer matrisi arasındaki ara yüzey yapışmasını geliştirmek amacı ile mumsu tabakayı çıkarmak için kimyasal işlemler gerektirmesi,

olarak sıralanabilir.

2.3.5. Jüt Fiber Takviyeli Tabakalı Kompozit Malzemeler

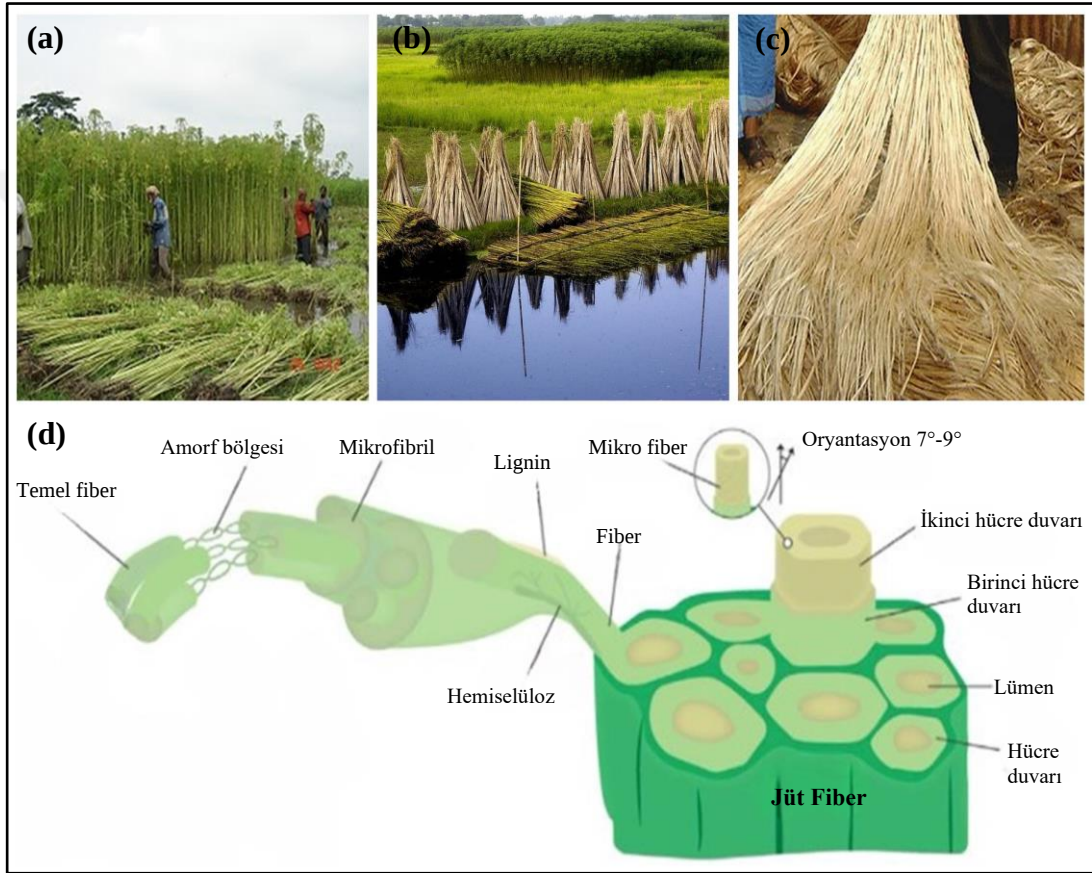
2.3.5.1. Jüt Bitkisi

Jüt, ıhlamurgiller (tiliaceae) familyasından bir sak fiber türü olup, bilimsel adı *Corchorus capsularis*'dir çünkü *Corchorus* bitkilerinden elde edilmektedir. En ucuz doğal fiberlerden biridir ve şu anda en fazla üretim hacmine sahip sak fiberlerdir. Jüt, Akdeniz'e özgüdür ancak günümüzde jüt yetiştiriciliği için en iyi türleri Bangladeş, Hindistan, Çin, Nepal, Tayland, Endonezya ve Brezilya sağlamaktadır [36], [37]. Tüm doğal fiberler arasında jüt fiberler, iyi mekanik ve ısı özelliklerine sahip kumaş ve fiber formlarında kolayca bulunabilir [38]. Jüt fiberleri nem, asit ve UV ışığına karşı daha az dirençlidir. Buna karşılık, ince dokusu, ısı ve ateşe karşı direnci; tekstil, inşaat ve otomotiv gibi endüstrilerde geniş bir uygulama alanı sağlamaktadır [39]. Jüt gövde fiberi olduğu için ahşap benzeri özelliklere sahiptir. Jüt fiberi yüksek en/boy oranına, yüksek mukavemet/ağırlık oranına ve iyi yalıtım özelliklerine sahiptir [40].

2.3.5.2. Jüt Fiberleri

Jüt fiberleri bitkinin kabuğundan çıkarılır. Jüt fiberi çıkarma işlemi; havuzlama, sıyırma, yıkama, kurutma ve paketlemeyi içerir. Havuzlama işlemi ya biyolojik bir

yöntemle ya da amonyum oksalat, sodyum sülfat vb. kimyasalları kullanılarak kimyasal bir yöntemle yapılır, ancak kimyasal havuzlama işlemi pahalıdır, bu nedenle daha çok suda havuzlama kullanılır. Biyolojik ayrıştırma işleminde, jüt sapları bir demet halinde bağlanır ve ardından 20 gün boyunca yavaş akan suya daldırılır. Bu işlemden sonra fiber olmayan kısım jüt sapından sıyırma işlemi ile kazınır (Şekil 2.7.b). Ayırma işleminden sonra, fiber daha sonraki işlemler ve çeşitli uygulamalar için hazırdır (Şekil 2.7.c).



Şekil 2.7: Jüt bitkisi (a), Jüt fiberlerin bitkiden çıkarılması (b), Jüt fiber demeti (c) ve jüt fiberinin yapısı (d).

2.3.5.3. Jüt Fiberinin Fiziksel ve Kimyasal Yapısı

Canlı bir jüt bitkisi, daha önce de tartışıldığı gibi doğal fiberlerin ana bileşeni olan ve Tablo 2.4’de gösterilen selüloz, hemiselüloz, lignin, pektin ve diğer mumsu maddelerden oluşur [41].

Şekil 2.7’de ligninin yapısı ve jüt fiberin enine kesitleri gösterilmektedir [42]. Doğal fiberler doğada lignoselülozik olduğundan, diğer sentetik fiberlere kıyasla yeni

ısıll özelliklerin yanı sıra daha iyi akustik yalıtım özelliklerine sahiptirler. Genellikle, sentetik fiberler mekanik özellikleri doğal fiberlere kıyasla daha iyidir, ancak bu doğal fiberlerin alkali işlemi, silan işlemi vb. gibi farklı yüzey işlemleriyle mekanik özellikleri daha da geliştirilebilir.

Tablo 2.4: Literatürde belirtildiği gibi jüt fiberlerin kimyasal bileşimi.

Jüt fiberin kimyasal bileşeni (%)						
Selüloz	Hemiselüloz	Lingin	Pektin	Waks	Nem	Referans
61,2	13,2	13,7	-	0,5	-	[43]
61-71	13,6-20,4	12-13	0,2	0,5	12,6	[44]
61-71,5	12-13	13,6-20,4	0,2	0,5	12,6	[45]
71	14	13	-	-	-	[46]
58-63	21-24	12-14	-	-	-	[47]

Doğal fiberlerin yüksek spesifik modül, yüksek spesifik mukavemet, düşük yoğunluk vb. özelliklere sahiptir. Bu özellikler, kompozitlerin iyileştirilmesi için endüstrilerde yüksek talep görmesinin nedenleridir. Jüt fiberlerin gerekli mekanik karakterizasyonu Tablo 2.5’de belirtilmiştir.

Cam fiberlerin çekme mukavemeti, doğal fiberlerden daha yüksektir, ancak doğal fiberlerin spesifik modülü cam fiberden daha yüksektir. Bu nedenlerden dolayı doğal fiberler, yeşil kompozitlerde farklı uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır [48]. Fiber özellikleri, doğal fiber takviyeli polimer kompozitlerin performansını arttırmak için önemli parametrelerdir. Bir çalışmada, nem içeriğinin doğal fiber takviyeli polimer kompozitlerin (NFRPC) biyolojik performansı üzerinde geniş bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir [37]. Fiberlerin kimyasını etkileyen faktörler incelenirken kristal selüloz içeriği, hücre sayısı, en-boy oranı ve mikrofibrillerin açıları dikkate alınması gereken özellikleri oluşur. Daha az mikrofibril açısı ve daha fazla selüloz içeriği, yüksek fiber mukavemeti için hayati önem taşımaktadır. Doğal fiberler genellikle en-boy oranlarıyla karakterize edilir [49], [50]. Jüt liflerinin gerilme mukavemeti, elastisite modülü ve yoğunluğu, araştırmacılara göre fiziksel ve mekanik özelliklerin ana parametreleridir.

Tablo 2.5: Literatürde jüt fiberinin mekanik özellikleri.

Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma uzaması (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Referans
393-773	26,5	1,5-1,8	1,3	[37]
400-800	10-30	1,5-1,8	1,46	[51]
393-773	13-26,5	1,16-1,5	1,3-1,45	[25]
393	19-26,5	1,16-1,8	1,5	[52]

2.4. Polimer Matris Malzemesi

Kompozit malzemelerde matrisin tanımı ve işlevine daha önceki bölümlerde değinilmiştir. Doğal fiberler, geliştirilmiş ve özelleştirilmiş özelliklere sahip kompozitler oluşturmak için polimerik malzemelere dahil edilmektedir. Bu polimerik malzemeler termoplastikler, termosetler ve biyo bazlı plastikler olmak üzere gruplandırılabilir.

Tablo 2.6: Termoplastik ve termoset matrislerin mekanik özellikleri.

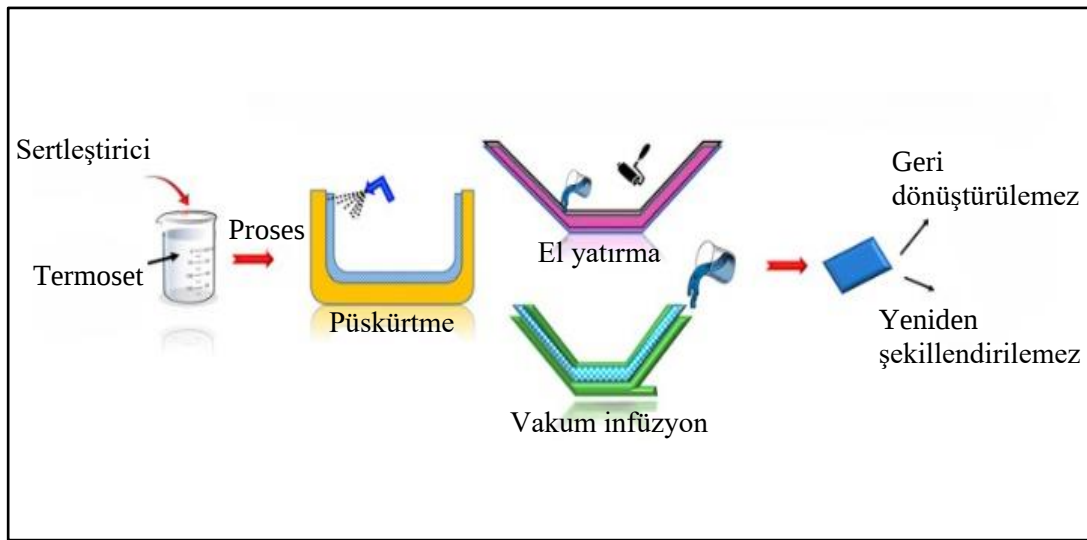
Matris Tipi	Matris Malzemesi	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
Termoplastik	PP	0,89–0,92	32	0,9	35	1,0
	LDPE	0,89–0,92	29	0,20	0,09	0,1
	HDPE	0,94–0,97	25	0,6–1,5	32,50	
	Nylon	1,14	50–90	1,3–4,2	20–150	1,3–3,7
Termoset	Epoxy	1,10–1,40	73	5	60	-
	Polyester	0,90–1,27	20,40	3,3–3,9	45	3,3
Biyo bozunur	PLA	0,90–1,27	25–66	2,3	48–110	0,3–3,6
	Nişasta		4,48–8,14	0,16–0,29		

Yaygın olarak kullanılan bazı matris malzemelerinin özellikleri Tablo 2.6’da gösterilmektedir [53], [54]. Kompozit malzemelerin mekanik performansı

termoplastikler, termosetler veya biyo bazlı plastikler gibi polimer matris malzemelerine bağlıdır.

2.4.1. Termoset Reçine

Epoksi, fenolikler, polyester, bakalit, melamin formaldehit ve poliüretan gibi termoset matris malzemeleri oda sıcaklığında sıvı halde bulunur ve esas olarak yenilenemeyen kaynaklardan elde edilir. Matris malzemesi tamamen kürlendikten sonra yeniden ısıtılamaz, geri dönüştürülemez veya yeniden kullanılamaz ya da biyolojik olarak parçalanamaz. Bununla birlikte, bitkisel yağlardan, doğal fenolik komplekslerden ve termoplastiklere kıyasla daha iyi termal stabiliteye sahip olabilecek diğer kaynaklardan biyo bazlı termosetler geliştirmek için çaba sarf edilmektedir [55]. Geleneksel reçinelere benzer özelliklere sahip, biyolojik olarak parçalanabilen reçinelerin (örn. Glycix, Titan ve hidra) geliştirilmesinde de bazı ilerlemeler kaydedilmiştir [56]. Karbon ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunabilecek, sürdürülebilir bir termoset elde etmek için biyolojik olarak parçalanabilir termosetlerin plastik kalıplanması gibi seri ölçekli üretim teknikleri de araştırılmaktadır.

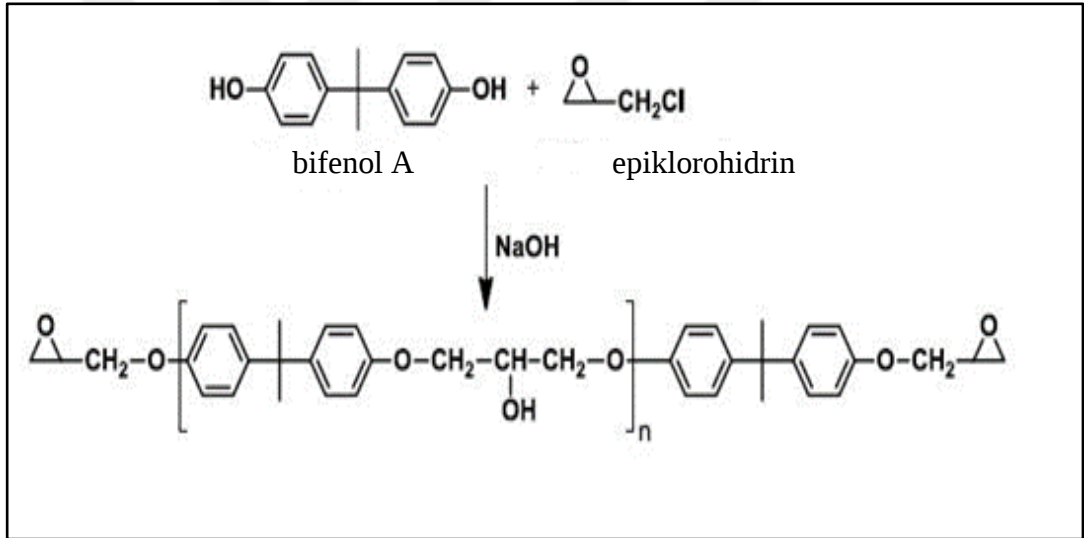


Şekil 2.8: Kompozit malzemelerde termoset matris malzemesi ile üretim yöntemleri.

Şekil 2.8’de gösterildiği gibi elle yatırma, püskürtme, vakum infüzyon, yöntemleri yanında vakum torbalama, reçine transfer kalıplama (RTM), filament sarma, pultrüzyon, ekstrüzyon, reçine emdirme ve soğuk pres ile de işlenebilirler [57].

2.4.1.1. Epoksi Reçine

Epoksi reçineler öncelikle termoset polimerlerdir [58]. Epoksi reçinelerde normalde molekül başına bir epoksi grubu vardır. Epoksi molekülerin yapısındaki epoksi halkaları oldukça gergindir ve diğer kimyasal gruplara, özellikle de kürleme maddelerine karşı reaktiftir. Bifenol A'nın diglisidil eteri (DEGBA) olarak adlandırılan, ilk ve bugüne kadar en önde gelen ticari epoksi reçine türü, bisfenol A ve epiklorohidrinin NaOH (sodyum hidroksit) varlığında reaksiyona girmesiyle üretilir. Şekil 2.9 tipik olarak DEGBA üretim reaksiyonunu göstermektedir [59]. Esas olarak, molekülün epoksi olmayan kısmında farklılık gösteren diğer reçine türleri farklı yapılara ve beklendiği gibi farklı özelliklere sahiptirler. Epoksi olmayan kısım aromatik, sikloalifatik veya alifatik olabilir.



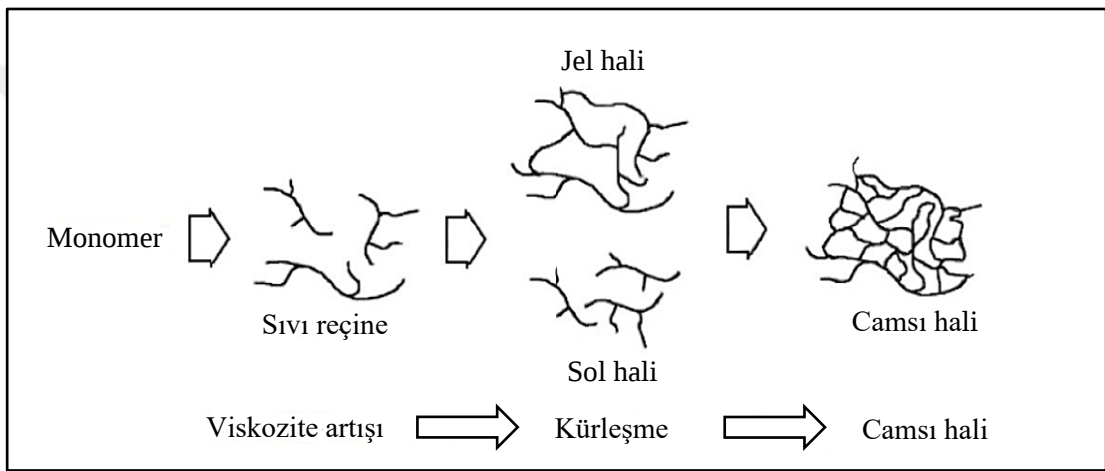
Şekil 2.9: DEGBA üretmek için bisfenol A ve epiklorohidrin reaksiyonu.

2.4.1.1.1. Epoksi Çapraz Bağlanma Süreci

Epoksi reçineler genellikle viskoz bir haldedir. Çapraz astarlı bir yapı elde etmek için epoksi bir termoset ürünü oluşturmak üzere bir sertleştirici ile karıştırılmalıdır. Genel olarak epoksi için katalitik ve stokiometrik olmak üzere iki tür sertleştirici kullanılır [60]. İlki homopolimerizasyon işleminin başlatıcısı olarak işlev görürken, ikincisi bu işlemde bir komonomer görevi görür.

2.4.1.1.2. Epoksi Kürleşme Süreci

Epoksi gibi bir termosetin sentez süreci, monomerler arasındaki reaksiyondan veya monomerler ile kürlenme maddesi molekülleri arasındaki reaksiyondan başlar, artan viskozite ile birlikte dallanmış yapılar oluşturur, ardından fonksiyonel grupların belirli bir dönüşümü ile dev bir makromolekül oluşumunun gösteren jelleşme aşaması meydana gelir. Bu dev makromolekül nihai termoset üründür. Camsı bir yapıya dönüşüm sırasında, kovalent bağların oluşumu nedeniyle sistemin hareketliliği azalırken, sistem jelden cama dönüşür. Bu süreç Şekil 2.10'da gözlemlenebilir [59].



Şekil 2.10: Termoset bir malzemenin kürlenme süreci.

Orta maliyetler, düşük büzülme ve toksisite, yüksek mukavemet, çeşitli proses ve uygulamalarla uyumluluk gibi mükemmel özelliklerinden dolayı epoksi reçine, kompozit malzemelerin üretiminde ana matris olarak ilgi odağı olmuştur [61]. Bu, termoset matris 175 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilir ve genellikle birçok takviye ile uyumludur [61].

2.5. Üretim Metotları

NFRC imalatı için kullanılan üretim yöntemleri, çoğunlukla kullanılan polimer matrisi tarafından belirlenir. Nem, fiber türü, fiber hacim oranı ve kompozit sıcaklığı, NFRC üretimini etkileyen en önemli faktörlerdir. Doğal fiber nemden arındırılmalıdır ve fiber nem içeriyorsa fibere gerekli yüzey işlemi uygulanmalıdır [62]. Sıkıştırma kalıplama, ekstrüzyon kalıplama, enjeksiyon kalıplama gibi üretim yöntemleri,

termoplastik matrisler için uygundur. El yatırması, reçine transfer kalıplama, vakum destekli reçine transfer kalıplama gibi üretim yöntemleri termoset matrisler için uygundur.

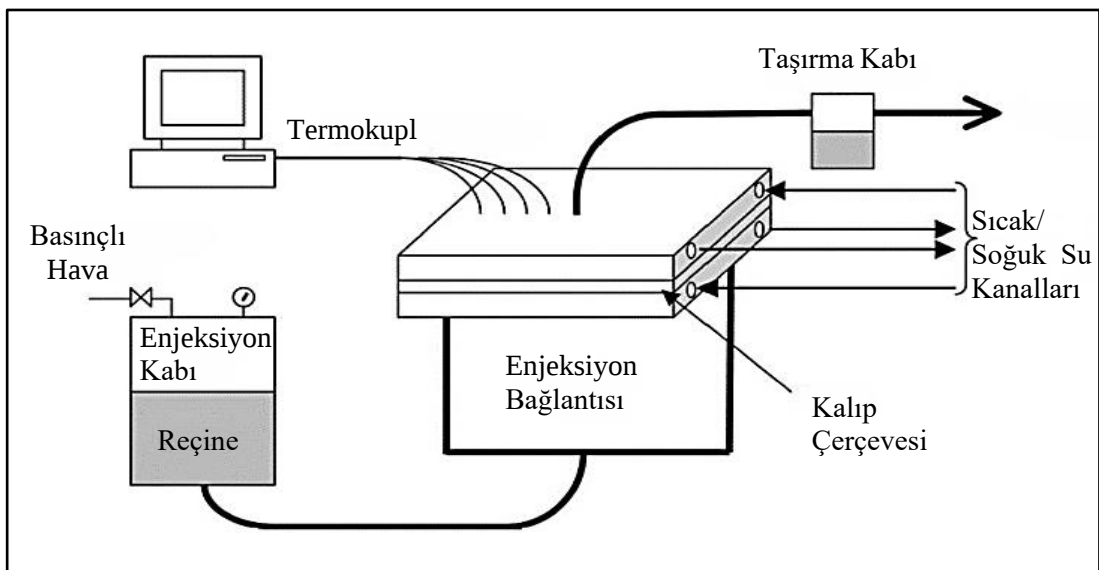
2.5.1. Termoset Bazlı Kompozitler İçin Üretim Yöntemleri

2.5.1.1. El Yatırması

El yatırması, kompozit üretimi için en yaygın, en kolay ve en ucuz yöntemdir [63]. Bu yöntemde, önce açık bir kalıba yapışmayı önleyici bir madde olarak bir kalıp ayırıcı madde uygulanır, ardından fiberler kalıba yerleştirilir. Reçine dökülür ve bir rulo veya fırça ile fiberlerin üzerine fırçalanır. İstenilen kalınlık elde edilene kadar katman üzerine katman oluşturulur. Laminaların içine hapsolmuş sıkışan havayı çıkarmak için çekçekler veya silindirler kullanılır. Laminalar daha sonra atmosferik koşullar altında kürlenmeye bırakılır [64].

2.5.1.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM)

Bu yöntem, orta hacimli ve yüksek miktarlı üretimde büyük bileşenlerin imalatı için uygundur. RTM yönteminin süreç diyagramı Şekil 2.11’de gösterilmektedir [65].

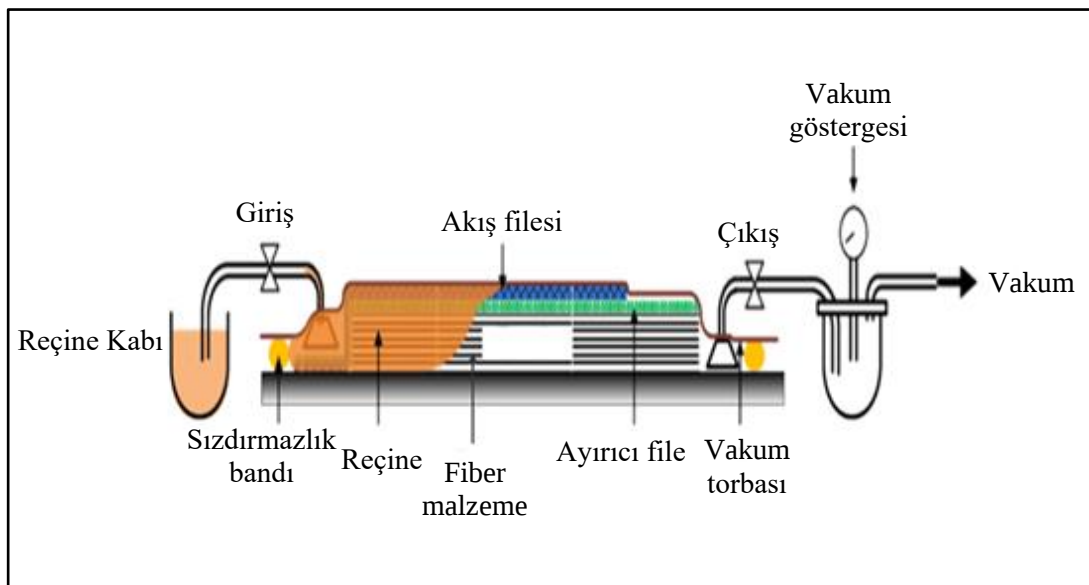


Şekil 2.11: Kompozit üretimi için RTM yönteminin süreç diyagramı.

Reçine transfer kalıplama (RTM) yönteminde, polimeri açık bir kalıba dökmek yerine, reçine bir hazneye yüklenir ve kalıp önceden ısıtılır [66]. Tekstil kumaş katmanları katı kalıba yerleştirildikten sonra preformu emdirmek için reçine enjekte edilir. Hava kabarcıklarını önlemek ve reçinenin boşluğa çekilmesine yardımcı olmak için sıklıkla vakum kullanılır [67].

2.5.1.3. Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM)

VARTM yöntemi, üst kalıbın bir vakum torbası ile değiştirildiği RTM yönteminin değiştirilmiş bir versiyonudur [68]. Bu işlemde, numunenin kurlenmesi için atmosferik basıncı korumak amacıyla reçine akışına vakum ile destek verilir. VARTM yönteminde kullanılan temel aksesuarlar arasında ayırıcı file, akış filesi, spiral boru, vakum torbası ve sızdırmazlık bandı bulunmaktadır. Bu işlemde, preform malzeme önce gerekli şekil ve boyuttaki alt kalıba yerleştirilir, daha sonra esnek takım yüzü kompozit nesnenin üzerine doğru bastırılır. Ayırıcı file üzerine yerleştirilen akış filesi, reçine akışını kontrol eder ve sınırlar. Spiral boru, fiber preform boyunca reçine akışını yönlendirmek için kullanılır. Sıvı reçine orta basınçta kalıba pompalanır ve fiberler ıslanır. Hava boşluklarını azaltmak ve kompozit kalitesini artırmak için kalıba vakum uygulanabilir [69]. Şekil 2.12’de VARTM yöntemi için kullanılan tipik bir kurulum gösterilmektedir [70].



Şekil 2.12: VARTM'in şematik diyagramı.

2.6. Fiberlerde Ara Yüzey İşlemleri

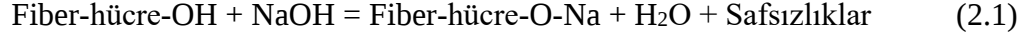
Kompozite gerilim uygulandığında, bu gerilim matrinden fibere ara yüzey yoluyla aktarılır. Bu nedenle, fiber ve matris arasında güçlü bir ara yüzey bağı oluşturmak, kompozitin özelliklerini geliştirmek ve maksimum performans elde etmek için gerekli görünmektedir. Doğal fiberler söz konusu olduğunda, hidrofilik fiber ve hidrofobik polimer matris arasında zayıf bir etkileşim vardır, bu da mekanik özelliklerde ve nem direncinde azalmaya neden olarak uzun süreli kullanımı etkiler. İslanabilirlik, matris ve fiber arasında uygun bir bağ oluşturmak için iyileştirilmesi gereken en önemli faktördür. Zayıf ıslanabilirlik, gerilim konsantrasyon bölgeleri olarak hareket edebilen fiber kusurlarını artırır [71]. Tokluk, çekme ve eğilme mukavemeti gibi kompozit özelliklerinin fiber ıslanabilirliğinden etkilendiği bildirilmektedir [72].

Tüm bu nedenlerden dolayı, jüt fiberlerin yüzey işlemi gereklidir. Fiber matrisi arayüz bağı ve nem direnci, balmumu, hemiselüloz, lignin gibi safsızlıkların giderilmesi ve ayrıca fiber yüzeyine başka kimyasalların eklenmesiyle geliştirilebilir [73]. Fiziksel yöntemler [74], kimyasal işlemler [75] ve nanomalzeme modifikasyonları [5], [76] gibi hali hazırda kullanılan çeşitli jüt fiber yüzey işlem teknikleri vardır. Fiziksel yöntemler arasında germe, kalenderleme, tarama, soğuk plazma işlemi ve elektrik deşarjı yer alır [77], [73], [78]. Fiziksel yöntemler fiberlerin kimyasal bileşimini değiştirmez, ancak fiber yüzey ve yapısal özelliklerini değiştirir. Alkalizasyon [79], [75], [80], [81], ağartma [82], [83], silan işlemi [84], [85], [86], asetilasyon [87] ve sıcak su işlemi [6] gibi çeşitli kimyasal işlemler kullanılmıştır. Jüt fiberinin kimyasal olarak işlenmesi, fiberin yüzey özelliklerini ve kimyasal bileşimini değiştirir.

2.6.1. Alkali İşlem

Alkali işlem, jüt fiberleri için en yaygın kullanılan kimyasal yüzey işleme tekniğidir. Sodyum hidroksit (NaOH), jüt fiberinin alkali işlemi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Jüt fiberinin alkali işlemi, jüt fiberinin dış yüzeyini çevreleyen hemiselüloz, lignin, balmumu ve yağlar gibi selülozik olmayan malzemeleri uzaklaştırır. Jüt fiberinin alkali işlemi, neme bağlı hidroksil gruplarını ortadan kaldırır,

böylece fiberlerin hidrofilikliği azalır. NaOH jüt fiberi ile reaksiyona girdiğinde su molekülleri üretir ve Denklem 2.1'e göre fiber hücreleri, hücre-O-Na grupları oluşturmak için fiberin hücre duvarı ile birleşir.



Alkali işlemi, jüt fiberin özelliklerini doğrudan etkileyerek, selülozik olmayan malzemeleri ortadan kaldırır ve fiberin, fiber yönü boyunca kendini yeniden düzenleyebilmesini ve fiber matris yapışmasını geliştirmesini sağlar. Bu, kompozitlerde daha yüksek gerilme mukavemeti sağlamak ile birlikte daha iyi bir kesme dayanımına izin verir [88].

Jüt fiberinin NaOH yüzey işlemi, fiberlerin belirli bir süre ve sıcaklıkta NaOH çözeltisine daldırılmasıyla gerçekleştirilir. Jüt fiberlerinin NaOH işleminin verimliliği NaOH konsantrasyonuna, işlem süresine, sıcaklığa ve malzeme nem oranına bağlıdır. Saha vd. [81] %0,5 ve %18 NaOH, sıcaklık ve süre ile muamele edilen jüt liflerinin fizyo kimyasal özellikleri incelenmiştir. Çalışma, fiberlerin %0,5 NaOH çözeltisine 30 dakika daldırılmasının ardından NaOH yüzey işleminin fiberin çekme dayanımını %65'e kadar artırdığını göstermiştir. Roy vd. [80] daha düşük konsantrasyonda ağırlıkça %0,5 uzun süreli alkali işleminin jüt fiberlerin çekme mukavemetini ve kopma uzamasını sırasıyla %82 ve %45 oranında artırdığını ve hidrofilikliği %50,5 oranında azalttığını göstermiştir.

Alkali ile işlenmiş jüt fiber takviyeli termoplastik ve termoset kompozitlerin mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir, Wang vd. [88] , %2, %4, %6, %8 ve %10 konsantrasyonlarında sıcak alkali işlemlerinin jüt/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırmıştır. %6 NaOH ile muamele edilmiş jüt kumaşlı kompozitler en iyi iyileşmeyi göstermiştir. %6 NaOH ile muamele edilmiş kumaş takviyeli kompozitlerin çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, çekme modülü ve eğilme modülü, muamele edilmemiş kumaş takviyeli kompozitlere kıyasla sırasıyla %37,5, %72,3, %23,2 ve %72,2 oranında artmıştır.

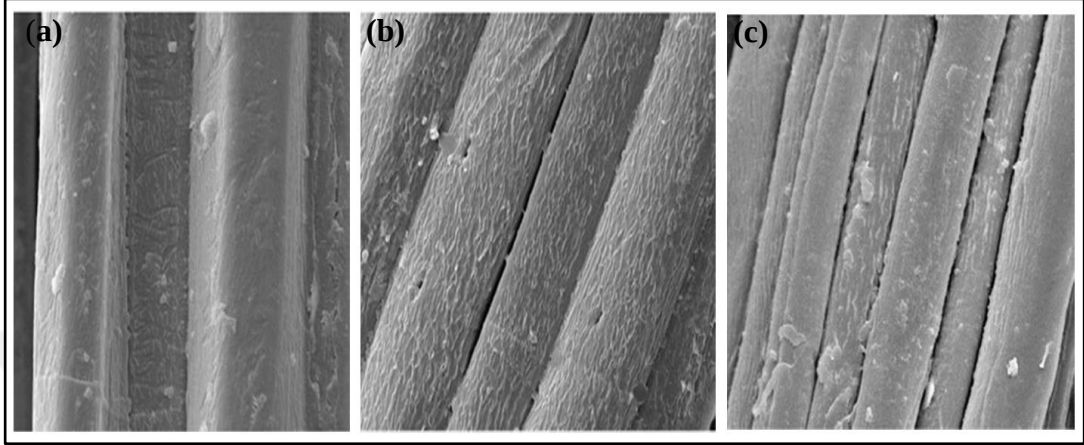
Tablo 2.7: İşlem görmemiş ve alkali işlem görmüş jüt fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri.

Kompozit	Yüzey İşlemi ve Süresi	Çekme Dayanımı (MPa)	Değişim (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Değişim (%)	Darbe Dayanımı (J)	Değişim (%)	Ref.
Jüt/Epoksi	İşlem yok	46,7		62,4				[89]
	%20 NaOH 2 s	97,5	108,7	80,1	28,4			
Jüt/Epoksi	İşlem yok	25		41		2,2		[90]
	%5 NaOH 24 s	34	36	47	14,6	3,4	54,5	
	%10 NaOH 24 s	17	-32	22	-46,3	2,55	15,9	
	%15 NaOH 24 s	15	-40	18	-56,1	2,4	9,1	
Jüt/Epoksi	%5 NaOH 24 s	12,46	–	39,08	–	2,63	–	[91]
	%10 NaOH 24 s	10,5	–	32,5	–	2,0	–	
Jüt/ Polyester	%5 NaOH 24 s	9,24	–	44,71	–	3,25	–	[91]
	%10 NaOH 24 s	7,92	–	40,5	–	2,75	–	
Jüt/Epoksi	İşlem yok	95		98		6,35		[92]
	%5 NaOH 6 s	136	43,2	140	42,9	9,1	43,3	
	%10 NaOH 6 s	147	54,7	155	58,2	11,67	83,8	
	%15 NaOH 6 s	156	64,2	162	65,3	15,42	142,8	
	%20 NaOH 6 s	145	52,6	159	62,2	13,02	105,0	

Tablo 2.7’de Boopalan vd. [89], Mahesh vd. [90], Gopinath vd. [91], Kapatel vd. [92], yaptığı çalışmalarda, kompozitlerin çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımında iyileşmeler olmuştur [42].

Jayaramudu vd. [93], farklı boyutlardaki SEM görüntülerini kullanarak jüt liflerinin arayüzey yapışmasının yapısal bir analizini gerçekleştirmiştir. İşlem görmemiş jüt fiberleri ile reçine temasını azaltan pektin, balmumu ve safsızlıklarla düzgün bir şekilde kaplıdır. Alkali işlemi pektin, balmumu ve safsızlıkları giderir ve

birçok kırışıklık, boşluk ve mikro boşluk oluşturur. Jüt fiberi alkali işleminden sonra temiz ve pürüzlü hale gelir. Selülozun kristal yapıları iyileştirilir, bitişik selüloz zincirlerinin aralığı kısaltılır, bitişik selüloz zincirlerini bağlamak için hidrojen bağları oluşturulur ve alkali işleminin bir sonucu olarak fiberin mukavemeti artırılır.



Şekil 2.13: İşlem görmemiş (a), %6 NaOH işlem görmüş (b), %10 NaOH işlem görmüş jüt fiber yüzeyleri SEM görüntüsü (c).

Diğer bir çalışmada Sinha ve Rout [94] farklı işlem sürelerinde (2 saat, 4 saat ve 6 saat) için %5 alkali işlem görmüş jüt lifi/doymamış polyester reçine kompozitlerinin eğilme özellikleri araştırılmıştır. Alkali ile 2 saat ve 4 saat işlem görmüş fiberler ile hazırlanan kompozitlerin eğilme mukavemetinin, işlem görmemiş jüt fiber kompozitlerine kıyasla sırasıyla %3, %16 ve %9,5 oranında arttığı bulunmuştur. Başka bir çalışmada Boopalan vd. [89], %20 alkali işlem görmüş jüt/epoksi kompozitlerin çekme mukavemeti ve eğilme mukavemetinin, işlem görmemiş jüt/epoksi kompozitlere kıyasla sırasıyla %108 ve %28 oranında iyileştiği bulunmuştur. [89].

Mahesh ve arkadaşları, NaOH konsantrasyonlarının jüt kumaşın işlenmesi üzerindeki etkisi ve bunun jüt/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir [90]. Jüt kumaşına, oda sıcaklığında 24 saat boyunca üç farklı NaOH konsantrasyonu (%5, %10 ve %15) ile yüzey işlemi yapılmış ve kompozitler sıkıştırılmalı kalıplama tekniği kullanılarak üretilmiştir. Çalışma, %5 NaOH ile işlem görmüş jüt/epoksi kompozitlerin çekme mukavemetinin, işlem görmemiş jüt/epoksi kompozitlere kıyasla %36 oranında arttığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, %10 ve %15 NaOH ile işlem görmüş jüt/epoksi kompozitlerin çekme mukavemeti, işlem görmemiş jüt/epoksi kompozitlere kıyasla sırasıyla %32 ve %40 oranında azalmıştır.

2.7. Nanopartikül Takviyeli Doğal Kompozitler

Nanobilim ve teknolojinin çeşitli alanlardaki hızlı gelişimi ile nanomalzemeler potansiyel önemlerini göstermektedirler. Polimerik bir kompozitte en az bir takviye malzemesinin boyutu 1 ile 100 nm aralığında ise, malzemeye nanobiyokompozit (NBC) adı verilir. Son zamanlarda, NBC'ler de yenilenebilirlikleri ve biyolojik olarak parçalanabilirlikleri nedeniyle dikkatleri üzerine çekmektedir. Nanomalzemeler çok iyi mekanik, optik ve termal özelliklere sahiptir ve çeşitli NBC'leri işlevselleştirmek için nano dolgu olarak kolayca uygulanabilirler [95].

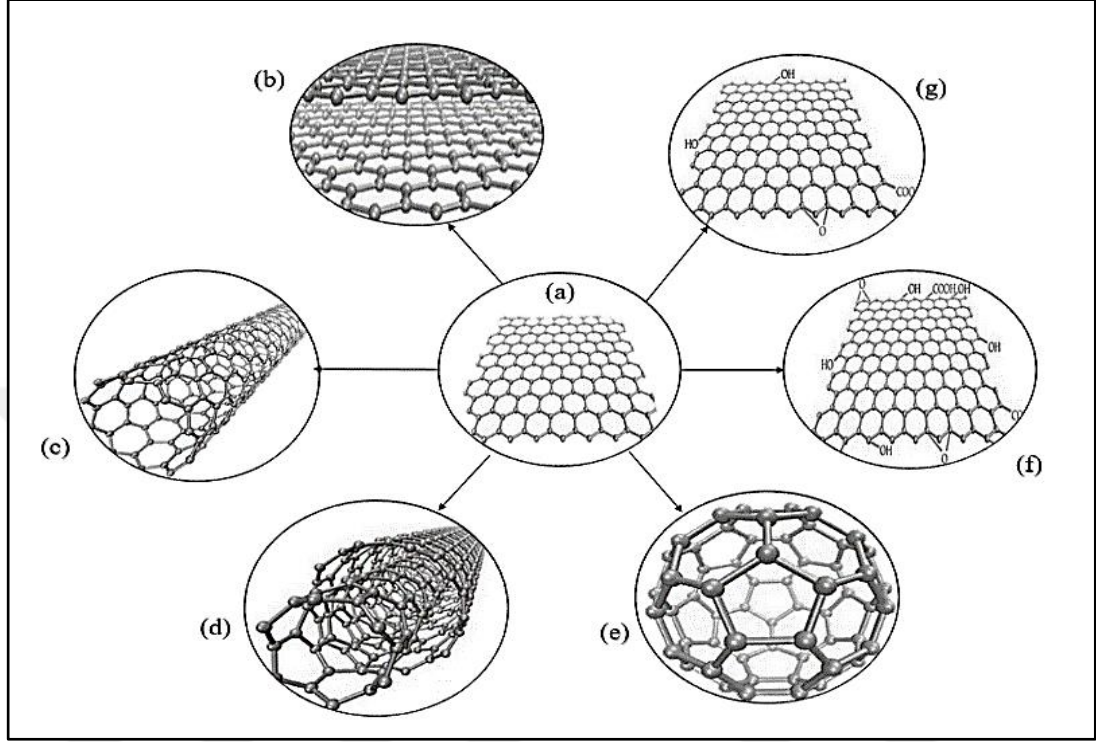
Nanomalzemeler, çeşitli yöntemlerle uygun reaksiyonların yan ürünleri olarak, doğal oluşturulabilir veya farklı fizikokimyasal özelliklere yol açabilecek belirli işlevler için modifiye edilebilirler [96], [97]. Pek çok potansiyel uygulamada kullanılan grafen oksit, gümüş, TiO_2 , ZnO , SiO_2 gibi çeşitli nanomalzeme türleri vardır [95], [98].

Doğal fiberler doğası gereği hidrofiliktir, ancak epoksi reçineleri hidrofobiktir. Bu da NBC matrisi ile daha zayıf bir bağa ve zayıf mekanik özelliklere neden olur. Bu zorluğun üstesinden gelmek için araştırmacılar plazma, alkali işlemi vb. yöntemler bildirmişlerdir, ancak NBC üzerindeki nano dolgu takviyesi hala diğerlerine kıyasla daha iyi bir potansiyel sağlamaktadır [99], [100]. Doğal fiber kompozitlerin yapımında doğal fiberlerde her zaman beklenen mekanik performanslara, termal stabiliteye uymaz, ancak NBC'ye nano dolgu dahil edilmesi bu tür dezavantajları ortadan kaldırabilir [101]. Sentezlenen nanopartiküllerin hem dezavantajları hem de diğer birçok avantajı vardır, bu nedenle bilim adamları giderek artan bir şekilde yeni olası çözümler araştırmaktadır.

2.7.1. Grafen Bazlı Malzemeler

Şekil 2.14'de gösterildiği gibi iki boyutlu (2D) grafen tüm karbon allotropların yapı taşıdır. Keşfi ve olağanüstü elektriksel ve mekanik potansiyeli nedeniyle grafen, geniş çapta çalışılmış, araştırma ve geliştirme için bir çekim merkezi haline gelmiştir [102]. Bu özellikleri uygulamalarda kullanmanın olası bir yolu, grafeni kompozit malzemelere dâhil etmektir [103], [104]. Bu tür uygulamalar için temel gereksinimler; yüksek ölçeklenebilirlik, güvenilirlik ve uygun maliyetli bir üretim sürecidir. Grafen

bazlı bir malzemenin nihai özellikleri, grafen katmanlarının sayısına, ortalama yanal boyuta, atomik karbon/oksijen oranına, yüzey kimyasına, yüzey alanına ve malzeme saflığına bağlıdır [105], [8].



Şekil 2.14: Grafen (a), Grafit (b), Karbon nanotüp (c), Çok katlı karbon nanotüp (d), Fulleren (e), Grafen oksit (f), İndirgenmiş grafen oksit (g).

Grafenin zayıf çözünürlüğü, büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarını sınırlar [106]. Grafenin iki oksidatif türevi arasında, grafen oksit (GO) daha düşük elektriksel iletkenliğe ve suda yüksek çözünürlüğe [107], indirgenmiş grafen oksit (rGO) ise suda ve diğer çözücülerde az miktarda çözünürlüğe [108] ve mükemmel elektriksel iletkenliğe sahiptir [109].

Grafen ve türevlerini hazırlamak için birkaç sentetik yaklaşım vardır. Bunlar yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Hepsi farklı morfolojilere, pul çapına ve kalınlığına, dalgalılığa ve yüzey kimyasına sahip grafen üretir [110], [111].

Küçük ölçekli üretimde yaygın olarak kullanılan alt teknolojiler, grafitin mikromekanik pul pul dökülmesi, kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma ile güçlendirilmiş CVD ve bir SiC substrat üzerinde grafenin epitaksiyel büyümesi gibi yöntemleri içerir. Bu tekniklerde, grafen pulları karbon kaynaklarından uygun bir alt

tabaka üzerine biriktirilir ve uygun alt tabaka seçimi yoluyla grafenin başlamasını ve büyümesini kontrol ederek kirlilik içermeyen grafen üretimini mümkün kılar [112].

Ancak aşağıdan yukarıya yöntemler; düşük verimleri, karmaşık işlemleri ve buna bağlı yüksek maliyetleri nedeniyle uygulamaya dayalı araştırma çalışmaları ve büyük ölçekli üretim için çok popüler değildir [113]. Öte yandan, grafenin daha büyük ölçekli üretimi için, grafenin esas olarak kütleden pul pul döküldüğü, çeşitli yukarıdan aşağıya teknikler izlenmektedir [114]. Bu tür süreçlerin avantajları arasında çözelti bazlı işlenebilirlik, uygulama kolaylığı ve aşağıdan yukarıya süreçlere kıyasla daha yüksek verim yer almaktadır [113].

Sıvı faz pul pul dökülmesi (LPE), iyonik interkalasyonu kullanılarak elektrokimyasal pul pul dökme, GO yapmak için grafitin kimyasal oksidasyonu ve bazen ardından rGO yapmak için indirgeme, popüler yukarıdan aşağıya teknikler olarak kullanılmıştır [115]. Çeşitli pul pul dökülme yöntemleri arasında sıvı faz pul pul dökülmesi (LPE), tek katmanlı grafen üretmek için çok yönlü, ölçeklenebilir, sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir yöntemdir ve bu nedenle yaygın olarak kullanılır [116], [117]. Temel olarak, sıvı fazda pul pul dökülme (LPE) işlemlerinde, susuz bir çözelti kullanılır [118], [119], [120] veya yüzey aktif madde içeren sulu bir çözelti [118] içinde stabilize edici bir sıvı [118] varlığında karbonun tabakalar arası kuvvetlerini kırmak için ultrasonik veya kesme enerjisi uygulanır. Muhtemelen pul pul dökülmemiş pulları ayırmak için pul pul dökülme ve saflaştırma işlemi sırasında bu düzlem içi kırılma nedeniyle, LPE ile üretilen grafenin pul boyutu çoğunlukla 1 mm^2 'nin altındadır [118], [120], [121]. Diğer LPE süreçleri arasında, mikro akışkanlaştırma ağırlıkça %100 verim ve kuvvet sıvının tüm hacmi üzerinde etkili olduğundan diğer LPE süreçlerine kıyasla daha yüksek konsantrasyonda grafen üretirken, banyo sonikasyonu, uç sonikasyonu ve kesme soyma işlemi genellikle daha düşük konsantrasyonda grafen ve ağırlıkça daha düşük verim (%2'ye kadar) üretir. Elektrokimyasal genleşme süreci ağırlıkça %70'ten büyük verim sağlar.

Grafenin ayırt edici özelliklerinden yararlanmak için, grafenin tek katmanda üretilmesi ve depolanması önemlidir. Bununla birlikte, grafen tabakaları birbirine yapışma ve hatta grafit oluşturmak için Van der Waals etkileşimleri yoluyla yeniden istiflenme eğilimindedir [122]. Bu nedenle, grafen oksidin ilave işlevsellekle indirgenmesi [123], [124] çözelti ile işlenebilir grafenin büyük ölçekli üretimi için başka bir yoldur. Farklı uygulamalara bağlı olarak rGO'nun farklı özelliklerini elde etmek için farklı türde kimyasal indirgeme (askorbik asit, sodyum hidrosülfid, hidrazin

hidrat, asetik asitli hidriodik asit vb. yoluyla), ısı indirgeme ve elektrokimyasal indirgeme kullanılabilir [125], [107], [126]. Bununla birlikte, bu rotanın dezavantajı, bu indirgeme işlemlerinin hiçbirinin oksidasyon işleminin getirdiği birçok yapısal kusuru tamamen azaltamaması ve ortadan kaldıramamasıdır [127], [128], [129]. Sentez protokollerinin uygun şekilde ince ayarlanması, birçok uygulamada kaliteli grafen bazlı malzemeler elde etmek için hala bir zorluk olmaya devam etmektedir [130], [109], [116].

2.7.2. Grafen Destekli Doğal Fiber Kompozitler

Grafen takviyeli doğal fiber takviyeli polimer kompozitler (NFRPC'ler) bu başlık altında incelenecektir. Kompozitler ile grafen içeren malzemelerin kullanımı ve ilgili özellikleri araştırılmaktadır. Ek olarak, bu bileşiklerin üretiminde kullanılan ana tekniklerin kısa bir açıklaması sunulmaktadır.

Grafen bazlı polimer kompozitlerin nihai özellikleri; kullanılan grafenin türü, polimer matrisindeki dağılım durumu, ara yüzey etkileşimleri ve kompozitlerin üretim yöntemi gibi birçok faktörden etkilenebilir [131].

Grafen bazlı kompozitleri üretmek için çeşitli üretim teknikleri kullanılmıştır. Bunlar arasında en yaygın olanları;

- Kaplama,
- Eriyik karıştırma,
- Yerinde polimerasyon,
- Çözelti ile karıştırma

teknikleridir [132], [123] .

Fiberlerin özelliklerini iyileştirmek için genellikle kaplama yöntemi uygulanır. Grafen bazlı bir çözelti içine daldırılarak veya grafen dispersiyonunun doğrudan fiber üzerine püskürtülmesiyle yapılabilir. En yaygın olan ilk yöntem; “daldır ve kurula” olarak da bilinir ve bunu bir indirgeme veya yıkama işlemi takip edebilir [132]. Kaplama yöntemi, esnekliğe ve elastisiteye zarar vermeden elektriksel iletkenliği desteklediği için elektronik tekstillere yaygın olarak uygulanmaktadır [133].

Eriyik karıştırma termoplastik polimerler için pratikliği ve çok yönlülüğü nedeniyle ticari olarak daha caziptir. Ayrıca, bu teknik toksik çözücüler içermediği için çevre dostu olarak da kabul edilebilir [132]. Bununla birlikte, kompozitte daha yüksek doldurucu konsantrasyonlarında artan viskozite nedeniyle grafenin polimer matrisindeki dağılımını bozabilecek bir kesme kuvveti içerir [123].

Yerinde polimerizasyonda, grafen içeren malzeme sıvı bir monomer ve başlatıcı ile karıştırılır. Reaksiyon, sıcaklık ve süre ile kontrol edilir ve ayrıca radyasyon tarafından da tetiklenebilir [123]. Bu yöntemde, bir polimer matris içinde iyi dağılmış grafen üretilir. Ancak reaksiyon sırasında viskozitedeki artış grafen içeriğini sınırlar. Bu nedenle, bazı durumlarda bu dezavantajı ortadan kaldırmak için bir çözücü eklenir. Öte yandan bu çözücünün ortamdan uzaklaştırılması önemlidir.

Çözelti ile karıştırma en pratik yöntemdir. GO'nun su gibi polar bir organik çözücü içinde kolayca dağılmasına izin verir. Bu, çözeltinin matris malzemesinin birleştirilmesi ve ardından çözücünün buharlaştırılmasından oluşur. Eriyik karıştırma ve yerinde polimerizasyona göre daha homojen kompozitler ortaya çıkar. Burada da yerinde polimerizasyonda olduğu gibi sonrasında çözeltinin uzaklaştırılması önemlidir [132].

Bu çalışma kapsamında da indirgenmiş grafenin epoksi ile işlevselleştirilmesinde hem uygulanış bakımından kolaylığı hem de daha homojen dağılma elde etmek için çözücü ile karıştırma yöntemi kullanılmıştır.

2.7.3. Grafen Destekli Jüt Fiber Kompozitler

Jüt fiberlerin grafen bazlı malzemelerle işlenmesi yoluyla tek tek fiberlerin mekanik özellikleri önemli ölçüde artırılmış olsa da asıl zorluk bu mükemmel özelliklerin endüstriyel uygulamaları için jüt fiber takviyeli kompozitlere nasıl dönüştürülebileceğidir.

Jüt fiberinin daha düşük kristallik, hidrofiliklik ve doğal elektrik yalıtım özellikleri, jüt fiber takviyeli kompozitlerin çok işlevli kompozitler olarak uygulanmasını sınırlayan daha düşük mekanik, zayıf ara yüzey ve elektriksel özelliklerle sonuçlanır [75], [76]. Daha önce jüt fiber kompozitlerinin özelliklerini geliştirmek için birkaç karbon bazlı malzeme rapor edilmiştir [134], [135], [136],

[137]. Ancak yakın tarihli bir çalışmada, yüksek performanslı doğal fiber kompozitleri tasarlamak için grafen ve türevlerinin dahil edilmesi ilk kez rapor edilmiştir [6].

Karim ve arkadaşları [76], kaplama yöntemi ile üretilen rGO bazlı tek yönlü jüt fiberden üretilen kompozitlerinin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. rGO bazlı jüt fiber takviyeli kompozitlerin elastisite modülü, çekme dayanımı ve çekme uzaması, rGO konsantrasyonlarındaki artışla artmış ve maksimum iyileşme %0,5 rGO kaplı jüt epoksi kompozitler ile elde edilmiştir. Tüm fiziksel ve kimyasal işlemlerin rGO kaplama ile kombinasyonu, kompozitlerin elastisite modülünde ve çekme mukavemetinde yaklaşık %450 ve yaklaşık %183 iyileşme ile sonuçlanmıştır. Bu, herhangi bir doğal fiber türünün çekme özelliklerinde literatürde rapor edilen en yüksek iyileşmedir.

Sarker vd. [5], bu zorluğu yeni nesil jüt fiber takviyeli kompozit üretmek için grafen kaplamadan önce jüt fiberleri alkali ile yüzey işlemine tabi tutmuştur. Sonrasında hazırlanan jüt kumaşlar ile vakum infüzyon yönteminde tek yön (UD) jüt/epoksi kompozitler üretilmiştir. Jüt/epoksi kompozitin boyuna çekme mukavemeti, elastisite modülü ve çekme dayanımı GO konsantrasyonunun 0,75 mg/ml'ye kadar çıkması ile birlikte artmıştır. Ancak bu GO konsantrasyonundan sonra GO pullarının toplanması nedeniyle kompozitlerin çekme özellikleri bozulmuştur.

Başka bir çalışmada Y.Chen ve diğerleri [138], grafen oksit nanoplateletleri (GONPs) ile modifiye edilmiş jüt/polipropilen kompozitlerinin mekanik ve ısı özelliklerini araştırmış ve saf jüt/PP kompozitleri ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak, jüt fiber yüzeyi bir silan bağlama maddesi ile muamele edilmiş ve ardından jüt fiberi GONPs ile kaplanmıştır. KH550, KH560, KH 570 olmak üzere üç farklı tipte silan bağlama maddesi kullanılmıştır. Bunlar arasında KH 570 en iyi performansı sağlamıştır. GONPs fiber matris ara yüzey yapışmasını etkili bir şekilde geliştirmiştir. Çalışma, silan ve GONPs ile modifiye edilmiş jüt/PP kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetinin, işlem görmemiş kompozitlere kıyasla sırasıyla %16,2 ve %12,4 oranında arttığını ortaya koymuştur.

Diğer bir çalışmada, Sadangi ve arkadaşları [139], grafen oksit (GO) ve fonksiyonelleştirilmiş grafen (FG) gibi iki farklı nano dolgu maddesinin jüt/epoksi kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi farklı nano dolgu maddesi içeriklerinde (ağırlıkça %0,5, %0,75 ve %1) araştırmıştır. Nano dolgulu jüt/epoksi kompozitlerin, herhangi bir nano dolgu içermeyen kompozitlere kıyasla çekme ve eğilme mukavemeti gibi daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu ve ağırlıkça %0,75

nano dolgulu kompozitlerin en iyi sonuçları sergilediği bulunmuştur. FG içeren jüt/epoksi kompozitler, GO içeren jüt/epoksi kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler sergilemiştir.

PA ve arkadaşı [140], rGO katkılı jüt/epoksi kompozitlerin mekanik davranışı, sıcaklığın ve rGO dolgu maddesinin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini ölçmek için farklı sıcaklıklarda incelemiştir. Çekme dayanımı, basma dayanımı, eğilme dayanımı, enerji emilimi ve ILSS, %2 rGO bazlı jüt/epoksi kompozitler ile çeşitli sıcaklık koşullarında analiz edilmiş ve katkısız jüt epoksi kompozitler ile karşılaştırılmıştır. rGO dolgulu jüt/epoksi kompozit, dolgusuz jüt/epoksi kompozitlere kıyasla tüm sıcaklıklarda daha iyi mekanik özellikler sergilemiştir. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda (-20 C°, -40 C°) mukavemet açısından test edilen hibrit kompozitler, oda sıcaklığı koşullarına kıyasla gelişmiş mekanik özellikler göstermiştir.

Amirabadi-Zadeh vd. [141], matrise göre ağırlıkça %0, %0,1, %0,3 ve %0,5 GONPs ve silika destekli grafen oksidin (SiO₂-GONPs) jüt fiber/epoksi kompozitlerin eğilme ve yüksek hızlı darbe özellikleri üzerindeki etkisini de araştırmıştır. Jüt/epoksi, GONPs/jüt/epoksi ve SiO₂-GONPs/jüt/epoksi kompozitler preste el yatırma yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. En umut verici sonuçlar ağırlıkça %0,3 SiO₂-GONPs modifiye jüt/epoksi kompozitleri ile elde edilmiştir. Çalışma, ağırlıkça %0,3 SiO₂-GONPs ile destekli jüt/epoksi kompozitin eğilme mukavemetinin, enerji emme kabiliyetinin ve darbe sınır hızının saf jüt/epoksi kompozitlere göre sırasıyla %40, %61 ve %28 oranında iyileştiğini ortaya koymuştur.

Başka bir çalışmada, Kishore vd. [142], grafenle modifiye edilmiş jüt/bazalt hibrit kompozitlerin frezeleme ve delme performansını araştırmış ve saf jüt ve saf bazalt fiber kompozitlerle karşılaştırmıştır. Hibrit kompozitlere grafen (ağırlıkça %0,2, ağırlıkça %0,4 ve ağırlıkça %0,6) eklenmesi yağlamayı iyileştirmiş ve yüzey pürüzlülüğünün azalmasını sağlamıştır.

Bölüm 2.7.3 kapsamında grafen destekli jüt fiber ile yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar Tablo 2.8'de özetlenmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında grafen türevlerin jüt fiberlere kaplama yolu veya epoksi içerisinde farklı oranlarda dağıtılması yöntemleri izlenmiş ve yüzey iyileştirme işlemi yapılmış jüt fiberlerinin mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülmüştür.

Tablo 2.8: İşlem görmemiş, sıcak su, alkali, grafen pulları, grafen oksitler ve indirgenmiş grafen oksit ile işlem görmüş jüt fiber/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri.

Kompozit	Yüzey İşlem/Modifikasyon	V _f	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Arayüzey Kesme Dayanımı (MPa)	Ref.
Jüt/Epoksi	İşlemsiz	0,24	180 ± 13	10,5 ± 2,8	0,80 ± 0,05	-	-	[6]
	H	0,50	230 ± 19,7	26,5 ± 3,45	0,85 ± 0,09	-	-	
	HA (%0,5)	0,54	282 ± 15,4	30,6 ± 3,4	0,86 ± 0,09	-	-	
	HA + GO (%0,25)	0,54	295 ± 33,9	36,9 ± 4,4	0,84 ± 0,07	-	-	
	HA + GO (%0,50)	0,54	337 ± 53,3	42,8 ± 1,7	0,94 ± 0,10	-	-	
	HA + GO (%0,75)	0,56	379 ± 33	44,6 ± 3,6	0,93 ± 0,05	-	-	
	HA + GO (%1)	0,56	292,7 ± 8,4	37,8 ± 1,6	0,78 ± 0,01	-	-	
	HA + GnP(%1)	0,55	290 ± 25	35,8 ± 2,2	0,84 ± 0,08	-	-	
	HA + GnP(%10)	0,55	294 ± 21	38,1 ± 4,0	0,80 ± 0,07	-	-	
Jüt/Epoksi	HA + rGO (%0,025)	0,54	290 ± 33,9	31 ± 4,4	0,84 ± 0,07	-	-	[76]
	HA + rGO (%0,050)	0,54	336 ± 53,3	32,5 ± 1,7	0,86 ± 0,10	-	-	
	HA + rGO (%0,075)	0,56	349 ± 33	37,2 ± 3,6	0,93 ± 0,05	-	-	
	HA + rGO (%0,1)	0,56	361 ± 8,4	40 ± 1,6	0,99 ± 0,01	-	-	
	HA + rGO (%0,5)	0,60	513 ± 15	55 ± 2,2	1,13 ± 0,08	-	-	

H: Sıcak su işlemi, A: Alkali işlemi, GO: Grafen oksit, G: Grafen pul kaplı ve rGO: İndirgenmiş grafen oksit kaplı

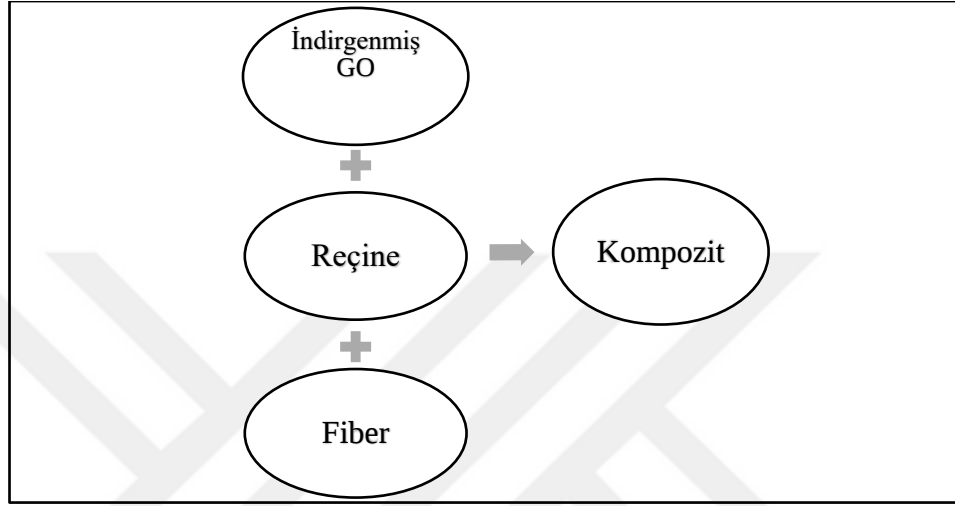
Tablo 2.8: Devam.

Kompozit	Yüzey İşlem/Modifikasyon	V _f	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Arayüzey Kesme Dayanımı (MPa)	Ref.
Jüt/Epoksi	UF 27 C°	0,39	22,26	-	-	45,45	2,22	[140]
	UF -20 C°		24,12	-	-	49,65	4,11	
	UF -40 C°		26,46	-	-	51,21	5,4	
	Ac + rGO (%2) 27 C°		28,26	-	-	55,41	2,43	
	Ac + rGO (%2) -20 C°		30,01	-	-	58,31	4,34	
	Ac + rGO (%2) -40 C°		32,44	-	-	62,64	5,7	
Jüt/Epoksi	Saf Jüt	0,60	45 ± 1,06	-	-	15 ± 0,75	-	[139]
	GO (%0,5)		50 ± 0,75	-	-	16,5 ± 0,4	-	
	GO (%0,75)		58 ± 0,50	-	-	18 ± 0,50	-	
	GO (%1)		54 ± 0,50	-	-	17 ± 0,50	-	
	FG (%0,5)		52 ± 0,75	-	-	17 ± 0,50	-	
	FG (%0,75)		59 ± 0,50	-	-	18,8 ± 0,50	-	
	FG (%1)		55 ± 0,50	-	-	17,7 ± 0,40	-	

UF: Katkısız, Ac: Asetonla işlenmiş, FG: Fonksiyonelleştirilmiş grafen

3. MALZEME ve YÖNTEM

Bu bölümde doğal fiber takviyeli grafen destekli kompozit üretimi için tasarlanan kompozit malzemenin bileşenlerinin özellikleri, bu malzemelerin üretilmesi, üretim parametreleri ve sonrasında kompozitin üretimi ele alınmıştır.



Şekil 3.1: Tez kapsamında bileşenlerin planlanması.

3.1. Malzemeler

Kompozit malzemenin tasarımında ve imalatında birçok değişken parametre olduğu için çalışmamızın kapsamını belirleyen üç temel bileşendeki (NrGO, reçine ve fiber) önemli değişkenler dikkate alınarak seçilmiştir. Bu bölümde seçilen fiber, reçine ve azot katkılanmış indirgenmiş grafen oksit (NrGO) için oluşturan değişkenler ayrı ayrı ele alınıp sonrasında açıklanacaktır. Tablo 3.1’de seçilen kompozit malzeme bileşenleri görülmektedir.

Tablo 3.1: Seçilen kompozit malzeme bileşenleri.

Fiber	%100 Jüt Kumaş (372 gr/m ²)
Reçine	Epoksi, HEXION MGS L160 Sistemi/H160
Grafen Katkı	%0,8 NrGO
Üretim Yöntemi	Vakum İnfüzyon

3.1.1. Jüt Fiber Kumaş

Bu çalışmada kullanılacak jüt takviyeli grafen destekli epoksi kompozit üretimi için takviye malzemesi olarak kullanılan dokuma tip jüt kumaşları Canallar Tekstil firmasından alınmış olup, %100 jüt liflerinden oluşmaktadır. Kullanılan kumaş, 372 gr/m² ağırlığında bezayağı dokuma kumaştır. Şekil 3.2’de bezayağı dokuma kumaş yapısı ve Tablo 3.2’de bezayağı dokuma kumaş özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Bezayağı dokuma jüt kumaş.

Tablo 3.2: Bezayağı dokuma jüt kumaş özellikleri.

Çözü (tel/cm)	Atkı (tel/cm)	Tel Ağırlığı (g)	Gramaj (g/m ²)	Eni (cm)	İplik Kalınlığı (mm)	Kumaş Kalınlığı (mm)	Konstrüksiyonu
5,5	5	40	372	145	0,5	0,9	Bezayağı 

3.1.2. Reçine ve Sertleştirici

Bu araştırmada Dost Kimya firmasından tedarik edilen HEXION MGS L160 sistemi kullanılmıştır. MGS L160 laminasyon sistemi havacılık, otomotiv, denizcilik,

uzay, rüzgâr türbinleri ve savunma sektörlerinde kullanılan ürünlerdir. MGS L160 sistemi çok büyük olmayan infüzyon uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir. Oda sıcaklığında kürlenir ve daha sonra yapılacak yeniden kürleme işlemiyle sivil havacılık standartlarını sağlayan parçalar elde edilebilir. MGS L160 laminasyon reçinesinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.3'te, H160 sertleştiricinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3.3: Laminasyon reçinesi MGS L160 özellikleri.

Yoğunluk (g/cm ³)	1,13-1,17
Vizkosite (mPas)	700-900
Epoksi eşdeğeri (gr/eşdeğer)	166-182
Epoksi değeri (eşdeğer/100gr)	0,55-0,60
Refraktör indeksi	1,5480-1,5530

Ölçüm Şartları: 25°C

Tablo 3.4: MGS H160 sertleştirici özellikleri.

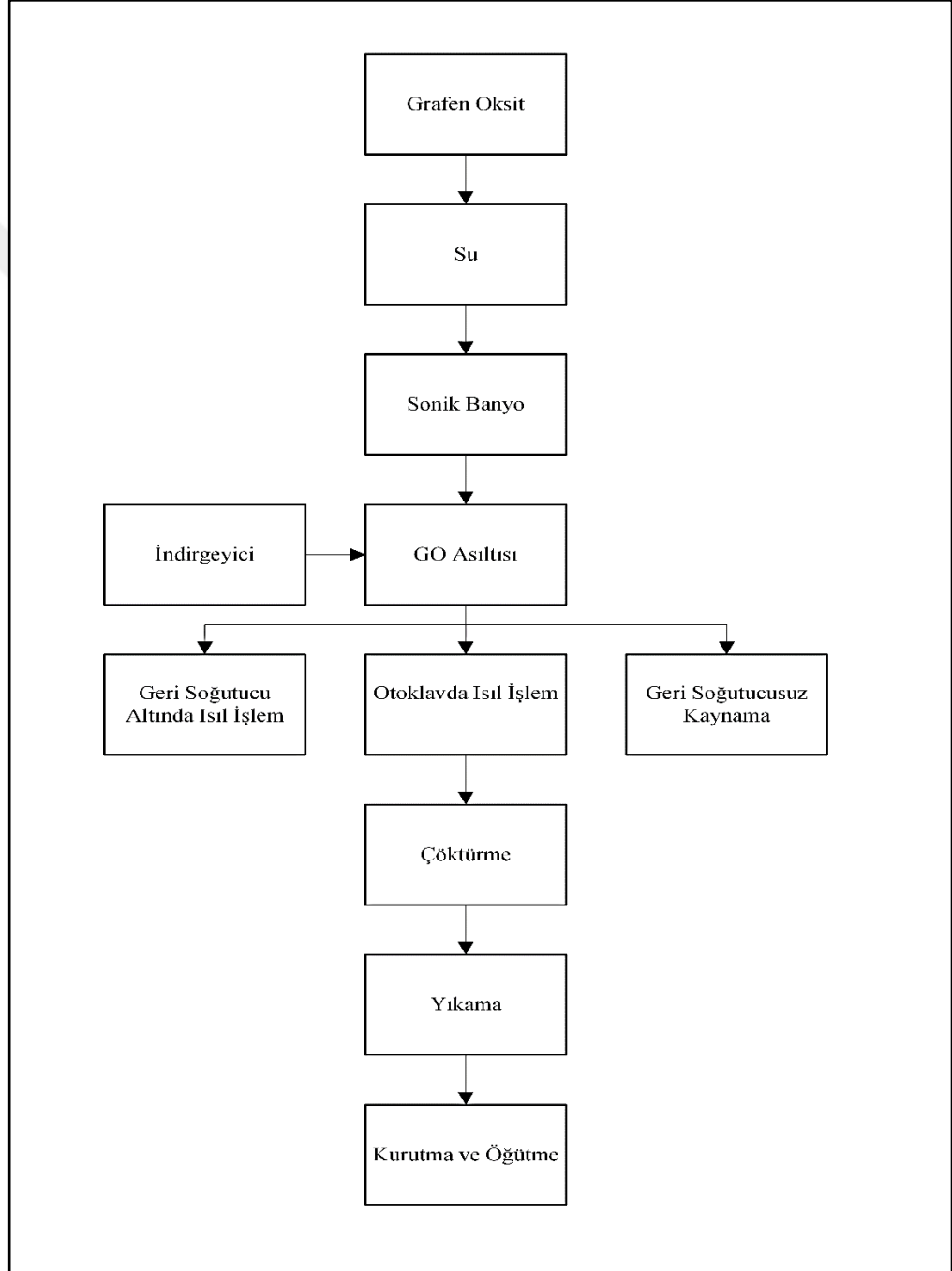
Yoğunluk (gr/cm ³)	0,96-1,00
Vizkosite (mPas)	10-50
Amin değeri (mgr KOH/gr)	550-650
Refraktör indeks	1,5200-1,5210

Ölçüm Şartları: 25°C

3.1.3. İndirgenmiş Grafen Oksit

Bu araştırmada, Gebze Teknik Üniversitesinde bulunan Hazerfen Kimya Malzeme ve Enerji Teknolojileri Sanayi Ticaret A.Ş. firmasında azot katkılı indirgenmiş oksit grafen (NrGO) üretilmiş ve bu üretim sürecinde beraber çalışılmıştır. Daha öncesinde iyileştirilmiş Hummers metodu ile hazırlanmış grafen oksit (GO), hidrazin ve sodyum bor hidrür ile indirgenmiştir. Tipik bir indirgemede GO (0,6 gr) 200 ml saf su içerisinde mekanik olarak karıştırılmıştır. Ultrasonik banyo içerisinde 3 saat muamele edilerek iyice dağıtılmıştır. Arkasından GO asıltısı karıştırılıyorken 2 gr sodyum bor hidrür (NaBH₄) ya da 0,25 ml hidrazin (N₂H₄) asıltıya eklenmiştir. Asıltı otoklav ya da ısıtıcı yardımı ile yağ banyosu içerisinde 80-100 °C ye kadar geri

soğutucu altında ya da geri soğutucu olmaksızın 12-24 saat ısıtılmıştır. İndirgeme esnasında su seviyesi korunmuş ve çökelen indirgenmiş grafen oksitler (rGO) santrifüj ve filtrasyon ile ayrılmıştır. Ardından aseton, saf su ve etanol ile yıkanmış ve yıkanıp çökeltilen indirgenmiş grafen oksitler (rGO) vakum altında ya da vakum olmaksızın 12-24 saat etüvde kurutulmuştur. Bu işlemler sonrasında ağırlıkça %0,8 azot katkılanmış indirgenmiş grafen oksit (NrGO) elde edilmiştir.



Şekil 3.3: Grafen oksit indirgeme süreci akış şeması.



Şekil 3.4: Reaktörde azot katkılı indirgenmiş grafen oksit (NrGO) işleminin görüntüsü.

3.2. Üretim Yöntemi

3.2.1. Kompozit Malzeme Tasarımı

Bu çalışma kapsamında üretilecek kompozitler piyasadan temin edilen %100 bezayağı örgülü jüt kumaş, epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon yolu ile üretilecektir. Epoksi içine azot katkılanmış indirgenmiş grafen oksit (NrGO) katılarak fonksiyonelleştirilmiş, bu fonksiyonelleştirilmiş epoksi ile vakum infüzyonda üretimleri gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada ise matris ile epoksi reçine arasındaki yüzey tutunmasını iyileştirmek için jüt fiber dokuma kumaşlar alkali işleme yani sodyum hidroksit (NaOH) ile yüzey işleme tabi tutulmuştur. Sonrasında NaOH (kostik) ile işlenmiş kumaşlardan saf epoksi ve NrGO katkılı epoksi jüt fiber takviyeli kompozit levhalar üretilmiştir. Bu üretilen levhalar düzgün bir şekilde kesilerek mekanik testleri

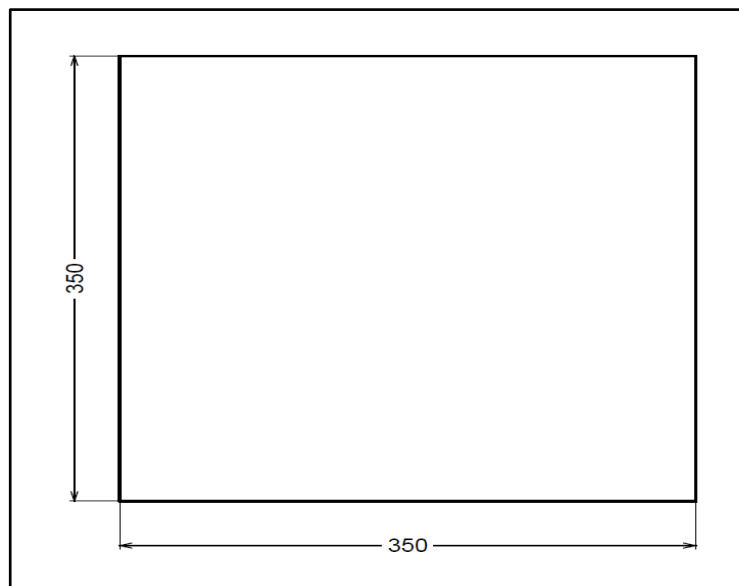
gerçekleştirilmiştir. Aşağıda Tablo 3.5’de üretilecek kompozit ürünler ve bunlara verilen kodlamalar görülmektedir.

Tablo 3.5: Üretilecek kompozit malzemeler.

Kompozitler	Kompozit Kodu
Jüt Fiber Takviyeli Epoksi [0/90] ₃	JF/EP
Jüt Fiber Takviyeli %0,8 NrGO Destekli Epoksi [0/90] ₃	JF/EP + NrGO 0,8%
Jüt Fiber Takviyeli İşlenmiş Epoksi [0/90] ₃	JF/EP + NaOH 10%
Jüt Fiber Takviyeli İşlenmiş %0,8 NrGO Destekli Epoksi [0/90] ₃	JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0,8%

Parçalar üretilmeden önce üretilecek levha boyutları yapılacak testlere ve bu testlerde kullanılacak numune sayılarına göre belirlenmelidir. Bu levha boyutlarına göre lamina sayısı, reçine miktarı, grafen miktarı hesaplanmalıdır. Bu hesaplamada daha önceki çalışmalardan ve vakum infüzyon yöntemi ile yaptığımız üretim tecrübelerinden yararlanılmıştır.

Yapılacak testler göz önüne alındığında olması gereken numune sayıları standartlardan bulunmuştur. Üretilecek levha boyutları Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5: Hazırlanan jüt fiber takviyeli kompozit levhanın boyutları.

350 mm x 350 mm boyutlarında üretilecek bir levha için reçine hesabı yapılmıştır.

Reçine hesabı;

- Levha toplam alanı : boy x en
- Levha toplam alanı : 350 mm x 350 mm: 12500 mm² : 0,125 m²
- Jüt Fiber kumaş ağırlığı : 372 g/m²
- 1 kat Jüt Fiber kumaş ağırlığı : 372 g/m² x 0,125 m² : 46,5 g
- 3 kat Jüt Fiber ağırlığı : 139,5 g

olarak hesaplanmıştır.

Literatürde jüt fiber takviyeli kompozitler ile yapılan vakum infüzyon üretimlerinde, V_f oranı 0,3 V_m oranı 0,7 değerlerindedir. Bu dikkate alındığında ve vakum infüzyonda yapılan ön denemelerde jüt kumaş için kumaş ağırlığının 3/1 oranında reçine kullanılması ön görülmüştür.

4 grup jüt takviyeli kompozit (JF/EP, JF/EP + NrGO 0,8%, JF/EP + NaOH 10%, JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0,8%) için;

- Toplam epoksi sistem miktarı :139,5 x 4 x 3 : 1674 gr

olarak hesaplanmıştır. Buna göre sertleştirici ve epoksi karışımı oranlanıp karıştırılmıştır. MGS L160 epoksi sistem için 100:25 oranındadır. Kullanılan toplam reçine miktarı yaklaşık 1440 gr sertleştirici miktarı ise 360 gr olarak bulunmuştur. Üretilecek azot katkılı indirgenmiş grafen (NrGO) miktarı, matrisin yani reçinenin %0,8'i kadar olacaktır. Jüt fiber takviyeli kompozit (JFTC) için;

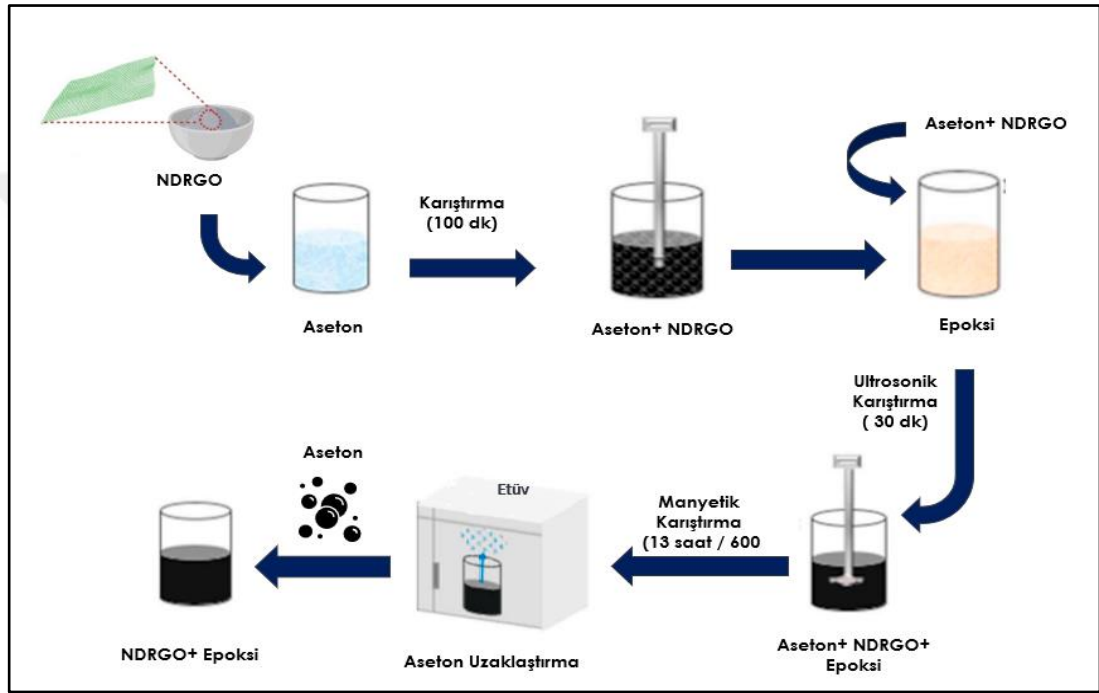
- Kullanılacak grafen miktarı :1440 x 0,008 : 11,52 gr

olarak hesaplanmıştır.

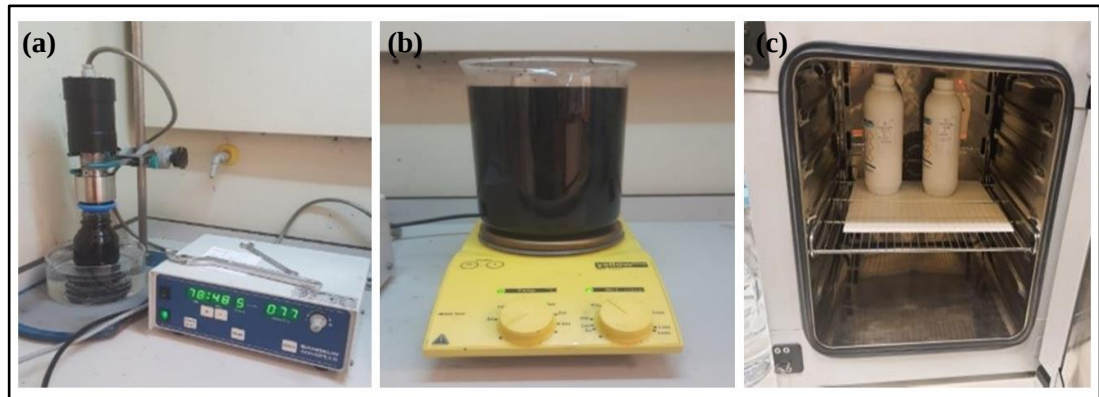
3.2.2. Epoksi Reçinenin İndirgenmiş Grafen Oksit ile Fonksiyonelleştirilmesi

Ağırlıkça %0,8 NrGO, Bandelin marka ultrasonik tip cihazında 100 dakika süresinde 250 ml aseton içerisinde dağıtılmıştır. Bu işlem gerçekleşirken, HEXION

MGS L160 epoksi reçine aseton çözücüsü içerisinde 30 dk boyunca karıştırılarak çözülmüştür. Daha sonra, çözücüde dağıtılan NrGO, aseton içerisinde çözülen HEXION MGS L160 epoksi reçine içerisine, pastör pipeti ile yavaş yavaş eklenmiştir ve manyetik karıştırıcıda 12 saat boyunca 600 d/dk ile karıştırılmıştır. Bu işlem rGO'nun epoksi içinde homojen dağılması ve fonksiyonelleştirilmesi için yapılmıştır. Karışım etüv fırınında 70°C sıcaklıkta bırakılarak çözelti içindeki asetonun buharlaşarak uzaklaşması sağlanmıştır.



Şekil 3.6: Epoksi reçinenin NrGO ile fonksiyonelleştirme sürecinin akış şeması.



Şekil 3.7: Ultrasonik tipte dağıtma işlemi (a), NrGO + epoksi reçine karıştırma işlemi (b), Etüvde aseton uzaklaştırma işlemi (c).

3.2.3. Jüt Kumaşın Yüzey İşlemi

Çok iyi mekanik özelliklere sahip bir kompozit malzeme elde edebilmek için ara yüzeyler boyunca iyi bir yapışma sağlanmalıdır. Bu amaçla doğal fiber yüzeyleri ve matris arasındaki uyumluluğu geliştirmek için fiber yüzeyine çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır [71].

Alkali işlem, termoset ve termoplastik matris malzemelerin doğal fiber ile takviye edildiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılan kimyasal bir yüzey işlemidir [37].

Bu çalışmada, hibrit kompozit plaka üretimi için 350 mm x350 mm boyutlarında kesilen jüt kumaşlar, NaOH (kostik) ile yüzey işlemine tabi tutulmuştur. Oda sıcaklığında, 10 litre çeşme suyuna 1 kg NaOH atılıp karıştırılarak alkali derişim hazırlanmıştır. Jüt kumaşlara uygulanan alkali işlem aşamaları Şekil 3.8’de görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü üzere kumaşlar karışıma dikkatli bir şekilde nüfuz etmesi sağlanarak, yavaş bir şekilde yatırılmış ve beklemeye bırakılmıştır. Kostige yatırılan kumaşlar 4 saat %10’luk NaOH içerisinde bekletilmişlerdir. Daha sonra derişimden arındırılan kumaşlar 12 saat güneş ışığı almayacak şekilde açık havada kurumaya bırakılmıştır.



Şekil 3.8: Kullanılan NaOH (a), %10 NaOH çözeltisi (b), %10 NaOH çözeltisi karışımı (c), 4 saat jüt kumaş çözeltide bekledi (d).

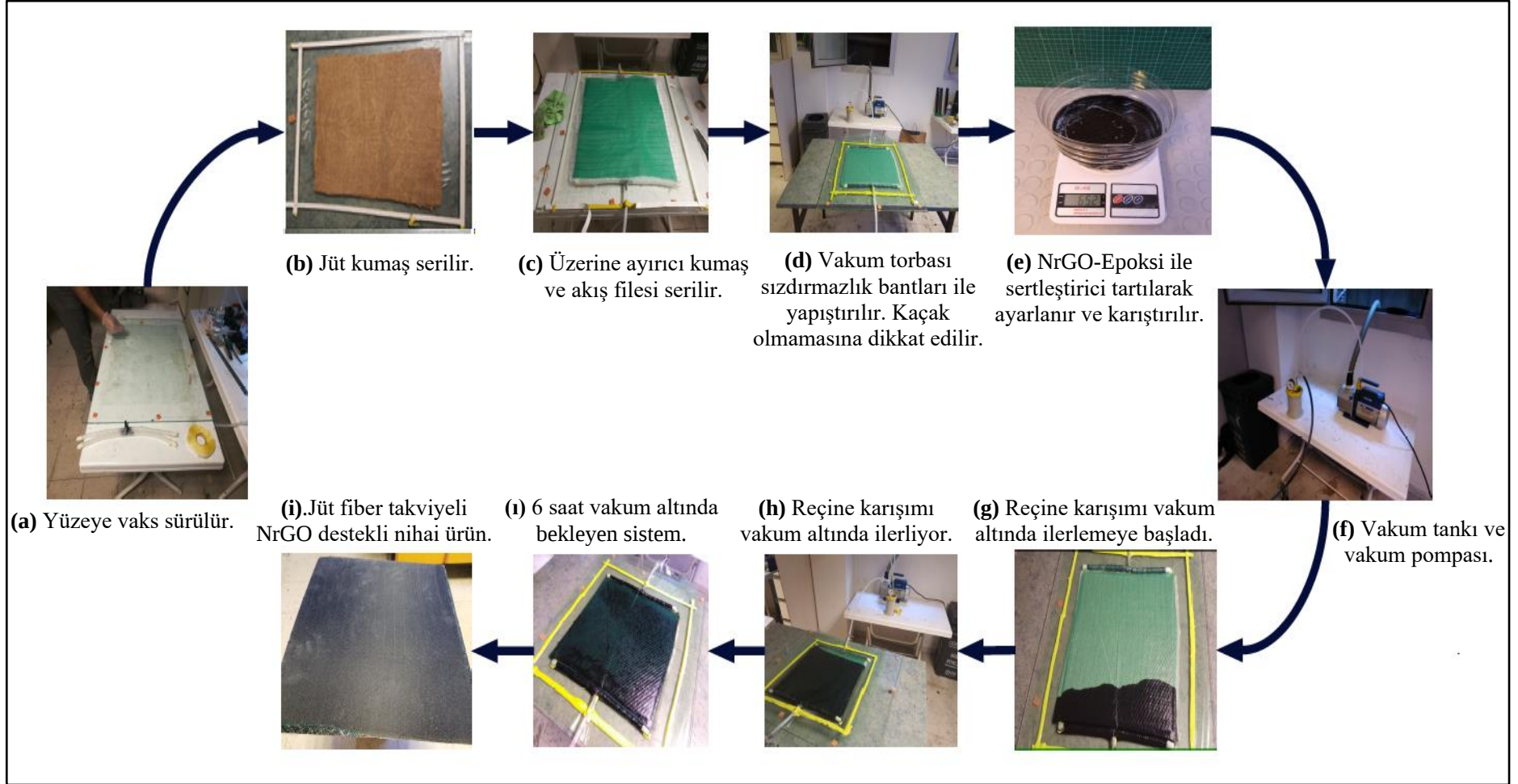
3.2.4. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Bu bölümde, tasarımı yapılmış ve Tablo 3.5’de gösterilen 4 farklı kompozit malzemenin vakum infüzyon yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Vakum infüzyon üretiminde; hazırlık, kontrol ve parça üretim sürecinde uygulanan ve kontrol edilen adımlar şunlardır:

- i) İlk olarak üretimin gerçekleştirileceği cam, ıslak bir bezle iyice temizlenmiş, sonrasında kuru bez ile silinerek kurutulmuştur.
- ii) Kumaşlar üretilecek levha boyutlarından 10’ar mm fazla olacak şekilde, 360 mm x 360 mm ölçülerinde kesilmiştir.
- iii) Üretilmek istenen kompozit alanını kapsayacak şekilde kesilen kumaşların boyutlarından en az 50’şer mm geniş bir alanın etrafına kâğıt bantlar yapıştırılmıştır. Bu bantlar, kalıp ayırıcının belirli bir alanda sürülmesini sağlamıştır.
- iv) Bu bant alan içine iki kat kalıp ayırıcı uygulanmış ve her bir uygulama sonrası 5 dakika beklenerek, kuruması sağlanmıştır.
- v) Uygulanacak kompozit tasarımına göre kumaşlar üst üste serilmiştir.
- vi) Kâğıt bantlar çıkarılmış, bu bantlar sayesinde elde edilen temiz yüzeylere sızdırmazlık bandı yapıştırılmıştır.
- vii) Serilen kumaşın üstüne kumaşı kaplayacak şekilde soyma filesi serilmiştir. Soyma filesinin amacı kompozit üzerinde bir desen oluşturmak ve vakum torbası ile akış filesini üretilen parçadan rahatça ayırmaktır.
- viii) Soyma filesi serildikten sonra, reçine tankından reçinenin akışını sağlayacak reçine hattı kurulmuştur. Reçine hattı için spiral hortum ve normal şeffaf hortum kullanılmıştır. Şeffaf hortum bir ucundan spiral hortuma bir T bağlantısı ile bağlanmıştır. Spiral hortum, akış filesi ile sarılmış ve çözülmesin diye kâğıt bir bant ile yapıştırılmıştır.
- ix) Akış filesi, kumaş boyutlarından fazla olacak şekilde kesilmiş ve soyma filesinin üzerine serilmiştir. Akış filesi ile sarılı olan spiral hortum en üstteki akış filesine temas edecek şekilde kâğıt bantlarla sabitlenmiştir.

- x) Aynı şekilde vakum hattı da karşı tarafa kurulmuştur. Her iki hatta da şeffaf hortumlar klipsler ile tutturulmuştur ve reçinenin girdiği şeffaf hortum kısmı hava girmesini önlemek için kırılarak, katlanmıştır.
- xi) Son halindeki sistem vakum torbası ile çok dikkatli bir biçimde kapatılmıştır.
- xii) Sertleştirici eklenen epoksi reçine 10 dakika boyunca yavaşça karıştırılarak homojen hale getirilmiştir.
- xiii) Vakum pompası çalıştırılarak kumaş üzerindeki boş hava vakumlanmış ve hava kaçağı olup olmadığı kontrol edilmiştir. Vakum pompasındaki basınç göstergesi, motor sesindeki değişimi ve vakum torbasının yapışmaması kontrol edilmiş ve ona göre önlemler alınarak basınç değerlerinin -760 mm Hg değerinde olması sağlanmıştır.
- xiv) Reçine, şeffaf hortum ile sisteme verilmiştir. Burada reçine vakum sayesinde sisteme akar iken bu akış sırasında, reçine ile birlikte havanın da emilmesini önlemek için şeffaf hortumun ucunun reçineden çıkarılmamasına dikkat edilmiştir. Reçine bittikten sonra şeffaf hortum ikiye katlanıp klips ile sıkıştırılmıştır.
- xv) Reçine ilerleyişi gözlenip, vakum pompası 3 saat çalıştırılmıştır.
- xvi) Vakum pompası bu süre sonunda kapatılmış ve öncesinde vakum hattındaki şeffaf boruda ikiye katlanıp klips ile sıkıştırılmıştır.
- xvii) Sistem bu halde kürlenmesi için 12 saat bırakılmıştır.

Tüm süreçler yukarıdaki maddeler ile açıklanmıştır. Şekil 3.9'da üretim sürecindeki görseller ile anlaşılması amaçlanmıştır.



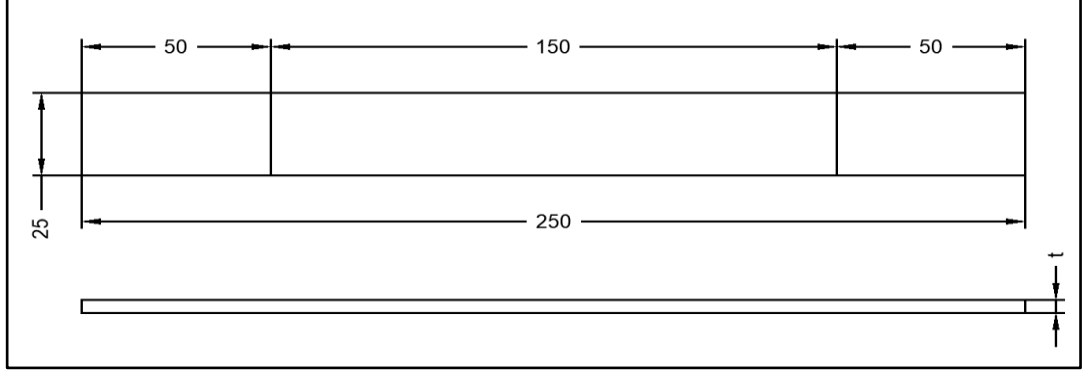
Şekil 3.9: Kompozit levhaların vakum infüzyon ile üretimi aşamaları.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Mekanik özellikleri için ASTM D3039 çekme testi, ASTM D7264 üç nokta eğme testi ve yapısal özelliklerini incelemek için SEM analizi yapılmıştır.

4.1. Çekme Testi

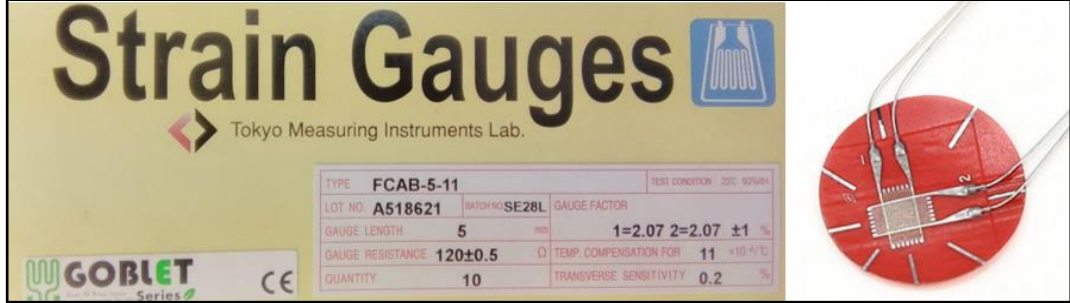
Jüt takviyeli grafen destekli epoksi kompozitlerin çekme özellikleri ASTM D3039 standartlarına göre, İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü Kompozit ve Yapı Laboratuvarında MTS 322 Universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme numunesi, standartta iki yönlü fiber kumaşlar için tavsiye edilen ölçülere ve master genişliklerine uygun olarak, üretilen levhadan hızlı devirli testere ile kesilerek hazırlanmıştır. Numunelerin boyutları 250 mm x 25 mm x 3,5 mm'dir. Şekil 4.1'de ASTM D3039 standardında iki yönlü fiberlerde çekme testi için tavsiye edilen numune ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1: ASTM D3039'a göre çekme testi ana boyutları.

Numunelerin uçlarına kompozitin zarar görmemesi ve çekme esnasında kaymaması için 50 mm uzunluğunda, 1 mm kalınlığında alüminyum master yapıştırılmıştır. Elastisite modülü ve Poisson oranını bulmak için Tokyo Measuring Instrument Lab. Firmasından, Şekil 4.2'de gösterilen GOBLET marka FCAB-5-11 tipinde gerinim ölçerler alınmış ve numunenin yüzeyine yapıştırılmıştır. Sonrasında kontrol amaçlı bağlantının gerilimi multimetre yardımı ile ölçülüp, değerlerin belirtilen toleransların içinde olduğu görülmüştür. Gerinim ölçerler VTI EX1629 marka yüksek hızda veri toplama sistemine bağlanıp test sırasında veriler

kaydedilmiştir. Çekme testi 2 mm/dk çapraz kafa hızında gerçekleşmiştir. Her bir kompozit grubundan en az 6 numune test edilmiş ve standart sapmalardan yararlanılarak ortalama sonuçları rapor edilmiştir



Şekil 4.2: GOBLET marka FCAB-5-11 tipinde gerinim ölçer ve özellikleri.

Çekme testlerinde, E_1 , σ_1 ve ϑ_{12} değerlerini belirlemek için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A} \quad (4.1)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (4.2)$$

$$\vartheta_{12} = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (4.3)$$

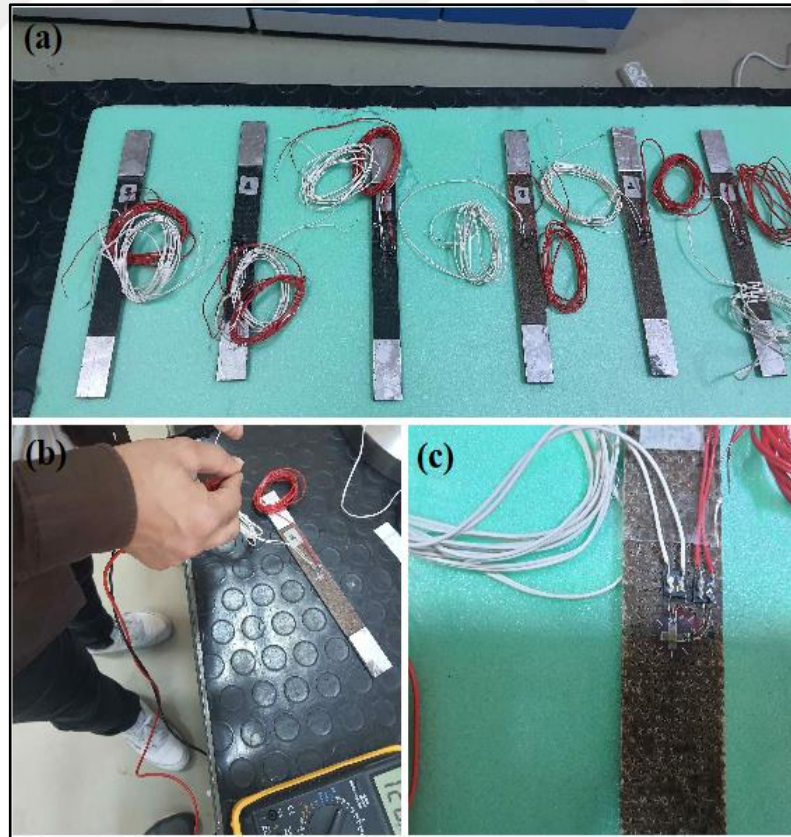
Formüllerde;

- σ_1 = 0° yönünde çekme mukavemeti (MPa),
- F_1 = 0° yönünde maksimum yük (N),
- A = Numunenin kesit alanı (mm²),
- E_1 = 0° yönünde elastisite modülü (Mpa),
- ε_1 = 0° yönünde kopma uzama oranı (%),
- ε_2 = 90° yönünde kopma uzama oranı (%),
- ν_{12} = 1-2 düzlemindeki Poisson oranını

ifade etmektedir.



Şekil 4.3: MTS 322 Universal çekme test cihazı (a), Yüksek hızda veri toplama sistemi (b), JF/EP + NaOH 10% numunesi çekme testi anında görüntüsü (c).

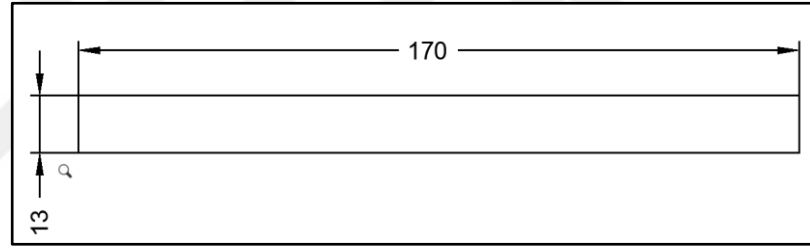


Şekil 4.4: Çekme numuneleri (a), Strain gauge numuneye bağlanması sonrası gerilim kontrolü (b), Strain gauge bağlı numune (c).

4.2. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi, ASTM D7264 standartlarına göre, Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümünde Mekanik Test Laboratuvarında INSTRON 5569 test cihazında, üç noktalı eğme düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu test için numuneler Şekil 4.5’de gösterilen (170 mm x 13 mm) ölçülerdedir. Testlerde, ASTM D7264 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler, Şekil 4.7’de gösterildiği gibi destek açıklığı uzunluğu (1:40 kalınlık/destek açıklığı oranına göre 140 mm) ilgili standartta belirtildiği şekilde numunenin kalınlığına göre ayarlanıp, yerleştirilmiştir. Cihazın çapraz kafa hızı 5mm/dk olacak şekilde üstten eğrilige sahip çene ile basma kuvveti uygulanmıştır.

Her bir kompozit grubundan testin güvenilir olması için en az 10 adet numune test edilmiş ve aritmetik ortalaması alınarak, sonuçlar rapor edilmiştir



Şekil 4.5: Üç nokta eğme numune ölçüleri.

Eğilme testlerinde, E_e , σ_e değerlerini belirlemek için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$\sigma_e = \frac{3*F*L}{2*b*h^2} \quad (4.4)$$

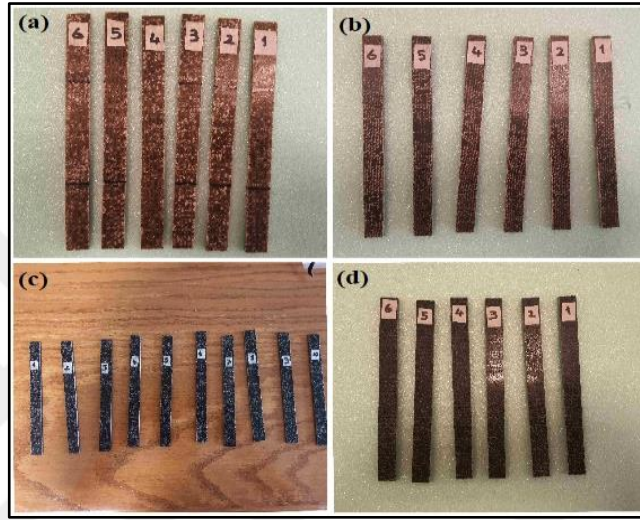
$$E_e = \frac{F * L^3}{48*f*I} \quad (4.5)$$

Formüllerde;

- σ_e = Orta noktada kiriş yüzeyindeki gerilme (N/mm²),
- F = Yük sehim eğrisinin herhangi bir noktasındaki kuvvet (N),
- L = İki destek arası mesafe (mm),

- b = Kiriş genişliği (mm),
- h = Kirişin yüksekliği (mm),
- E_e = Eğilme elastisite modülü (GPa),
- f = Kirişin maksimum sehim (mm),
- I = Kesit atalet momenti

olarak ifade edilmektedir.



Şekil 4.6: JF/EP (a), JF/EP + NrGO 0.8% (b), JF/EP + NaOH 10% (c), JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8% (d).



Şekil 4.7: Üç nokta eğme test düzeneği.

4.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Kompozitlerin çekme testi sonucunda kırılan yüzeylerinin mikro yapıları ve hata modları Gebze Teknik Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde yer alan Taramalı Elektron Mikroskobu FEI (PHILIPS) XL30 SFEG ile gözlemlenmiştir. Gözlemden önce yüzeyler altın ile kaplanmıştır. Görüntüleme maksimum 5 kV çalışma aralığında gerçekleştirilmiş ve yüzey mikrografları artan büyütmelerde ve 500 μm ile 5 μm arasındaki ölçeklerde çekilmiştir.



Şekil 4.8: FEI (PHILIPS) XL30 SFEG taramalı elektron mikroskobu.

5. TEST SONUÇLARI ve BULGULAR

5.1. Çekme Testi Sonuçları

Laboratuvar ortamında elde edilen azot katkılı rGO destekli ve NaOH yüzey işlemlili jüt fiber / epoksi kompozitlerin eksenel yük altındaki davranışları ASTM D3039'a göre yapılan çekme testi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan maksimum çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1: Maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri.

Numune Tipi	Mak. Çekme Dayanımı (σ) MPa	Standart Sapma ($\pm$)	Elastisite Modülü (E) GPa	Standart Sapma ($\pm$)	Poisson Oranı (ν) ₁₂	Standart Sapma ($\pm$)
JF/EP	41,6	2,8	4,2	0,5	0,21	0,03
JF/EP + NrGO 0.8%	45	3,3	4,7	0,7	0,27	0,03
JF/EP + NaOH 10%	28,5	0,8	3,8	0,2	0,31	0,06
JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8%	39,6	1,2	4,3	0,2	0,26	0,04

Tablo 5.1'de gösterilen sonuçlara göre katkılanan NrGO miktarı ve % NaOH derişimi ile yapılan yüzey işlemlerin etkilerinin oluşturduğu değişimler yüzde fark olarak Denklem 5.1'e göre hesaplanmıştır.

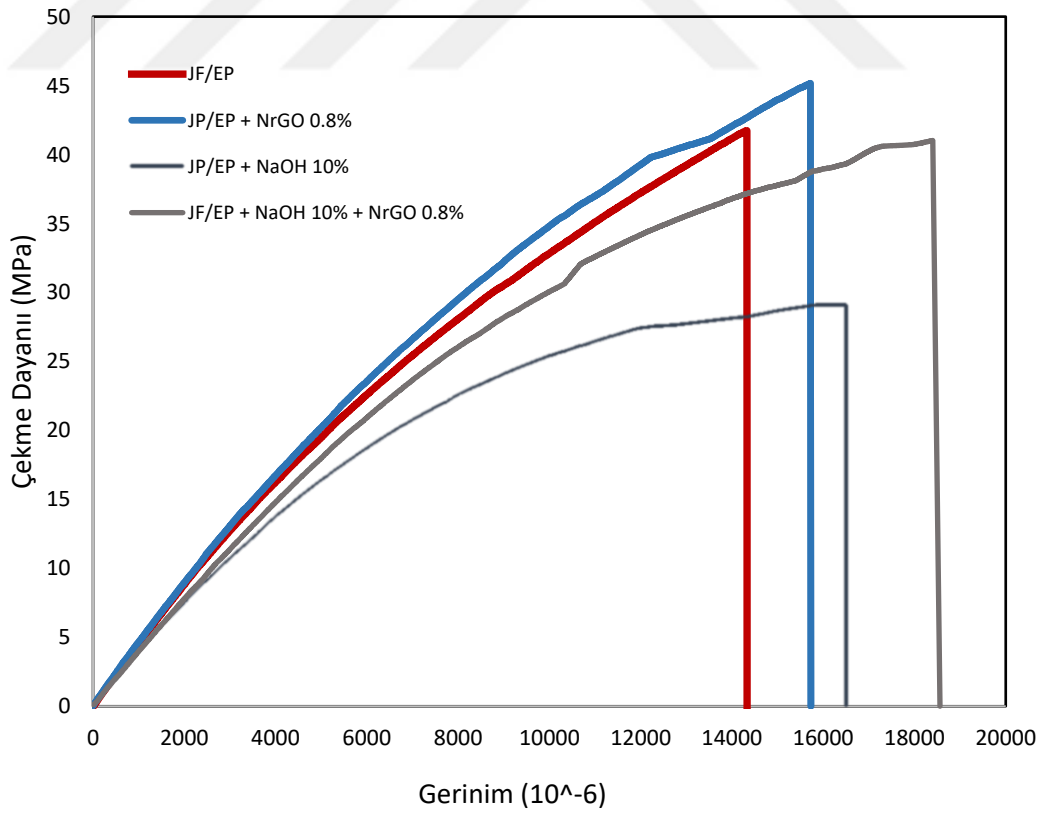
$$\% \text{ Değişim} = \frac{(JF/EP - NaOH 10\% - NrGO \%0,8) - (JF/EP)}{JF/EP} \times 100 \quad (5.1)$$

Bu formülde JP/EP-NaOH 10%-NrGO %0,8 katkılanan veya yüzey işlem yapılan numunelerin değerlerini ifade ederken, JF/EP, jüt fiber takviyeli epoksi kompozitin değeridir. Tablo 5.2'de maksimum çekme dayanımı % değişimi değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5.2: Maksimum çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı yüzdelik değişimleri.

Numune Tipi	Mak. Çekme Dayanımı % Değişim	Elastisite Modülü % Değişimi	Poisson Oranı % Değişim
JF/EP	-	-	-
JF/EP + NrGO 0.8%	8	10	29
JF/EP + NaOH 10%	-31	-10	47
JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8%	-5	2	21

Çekme testi ile malzemenin çekme dayanımı, gerinim, elastisite modülü, Poisson oranı gibi değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerdeki değişiklikler aşağıdaki grafikler yardımıyla daha anlaşılır hale getirilmeye çalışılmıştır. Numune gruplarına ait gerilme gerinim eğrileri, Şekil 5.1’de görülmektedir.

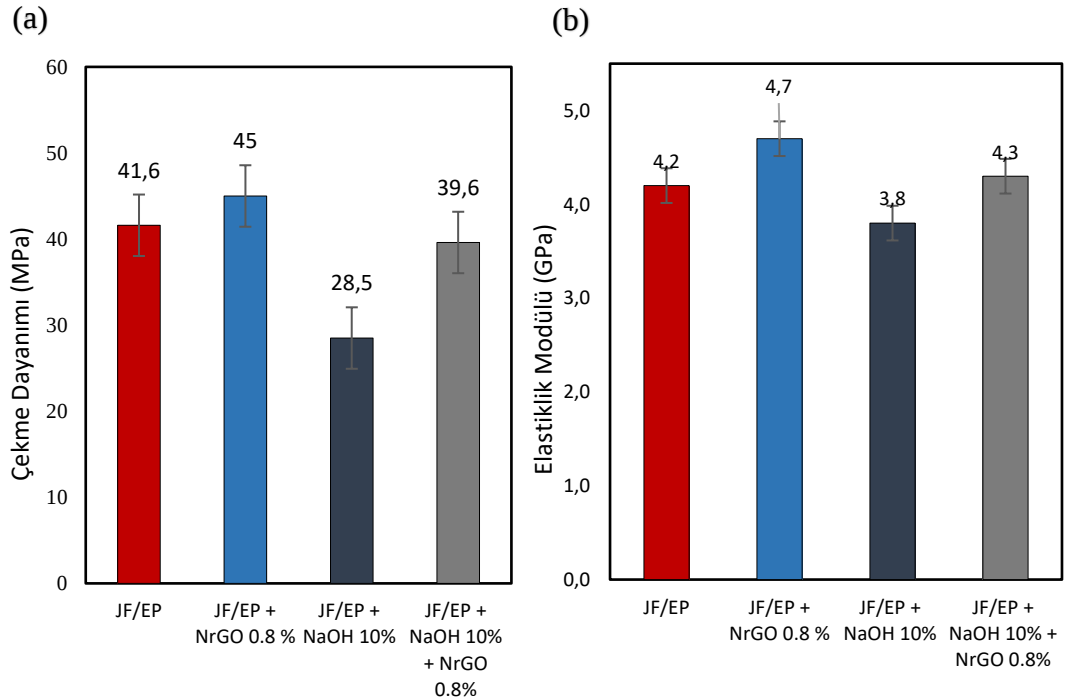


Şekil 5.1: Numune gruplarının gerilme gerinim eğrileri.

Tablo 5.3'de numune tiplerine göre, maksimum gerinme değerleri ve gerinim değerlerindeki değişimler görülmektedir. Maksimum gerinim değerlerindeki değişimler Denklem 5.1'e göre hesaplanmıştır. Jüt fiber takviyeli saf epoksi ve %0,8 NrGO katkısı ile elde edilen kompozitlerin maksimum gerinim değeri sırası ile 14320 ve 15730 bulunmuştur. %0,8 NrGO epoksi katkılı jüt fiber kompozitin maksimum geriniminde %10 değerinde bir artış vardır. %10 NaOH yüzey işlemi yapılmış, %0,8 NrGO grafen katkısız ve katkılı kompozitlerin gerinimi sırası ile 16507 ve 18559 değerindedir ve jüt fiber saf epoksi kompozite göre gerinim değerleri sırası ile %15 ve %30 arttığı görülmektedir.

Tablo 5.3: Maksimum gerinim değerleri ve gerinim yüzdelik değişimi.

Numune Tipi	Mak. Gerinim Değerleri (10^{-6})	Mak. Gerinim % Değişim
JF/EP	14320	-
JF/EP + NrGO 0.8%	15730	10
JF/EP + NaOH 10%	16507	15
JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8%	18559	30



Şekil 5.2: Numune grupları çekme dayanımı değerleri (a), Numune grupları elastisite modülü değerleri (b).

Şekil 5.2.a'da elde edilen sonuçlara göre jüt fiber takviyeli saf epoksi ve %0,8 NrGO katkısı ile elde edilen kompozitlerin ortalama çekme dayanımları sırası ile 41,6 MPa ve 45 MPa değerlerinde bulunmuştur. %0,8 NrGO epoksi katkılı jüt fiber kompozitin ortalama maksimum çekme değerinde %8'lik bir artış vardır. Sonrasında %10 NaOH yüzey işlemi yapılmış, %0,8 NrGO grafen katkısız ve katkılı kompozitlerin ortalama çekme dayanımları, 28,5 MPa ile 39,6 MPa değerlerinde bulunmuştur. Bu kompozitlerin jüt fiber saf epoksi kompozite göre ortalama çekme dayanımları sırası ile %31 ve %5 daha düşüktür. Saf epoksi kompozite göre NaOH yüzey işlemi uygulanan NrGO katkısız ve katkılı kompozitlerin ortalama çekme dayanımları düşüş göstermektedir. Ancak NaOH yüzey işlem olmuş bu numuneler kendi aralarında kıyaslandığında %0.8 NrGO azot katkılı indirgenmiş grafen oksitli numune grubunda ortalama çekme dayanımı değerlerinin %39 arttığı görülmektedir.

Şekil 5.2.b'de görüldüğü üzere jüt fiber takviyeli saf epoksi ve %0,8 NrGO katkısı ile elde edilen kompozitlerin ortalama elastisite modülü sırası ile 4,2 GPa ve 4,7 GPa değerlerinde bulunmuştur. %0,8 NrGO epoksi katkılı jüt fiber kompozitin ortalama elastisite modülü değerinde %10 değerinde bir artış vardır. Sonrasında %10 NaOH yüzey işlemi yapılmış, %0,8 NrGO grafen katkısız ve katkılı kompozitlerin ortalama elastisite modülü değerleri sırası ile 3,8 GPa ve 4,3 GPa değerindedir. %10 NaOH yüzey işlemi yapılmış grafen katkısız kompozitin ortalama elastisite modülü değeri, jüt fiber saf epoksi kompozite göre %10 azalmıştır. Ancak %10 NaOH yüzey işlem yapılmış %0,8 NrGO katkılı kompozitte ortalama elastisite modülü değeri, jüt fiber saf epoksi kompozite göre %2 artış göstermektedir. Saf epoksi kompozite göre NaOH yüzey işlem olmuş, %0,8 NrGO katkısız ve katkılı kompozitlerin ortalama elastisite modülü değerindeki değişimleri kendi aralarında kıyaslandığında, %0.8 NrGO azot katkılı indirgenmiş grafen oksitli numune grubunda değerlerin %13 arttığı görülmektedir.

Ek olarak jüt fiber takviyeli saf epoksi kompozit malzemenin Poisson oranı 0,21 ve %0,8 NrGO katkısı ile elde edilen kompozitlerin Poisson oranı 0,27 değerindedir. %0,8 NrGO katkılı numunenin Poisson oranı, saf epoksi ile elde edilen numune ile karşılaştırıldığında %29 artmıştır. Poisson oranı jüt fiber takviyeli NaOH ile yüzey modifiye edilmiş katkısız kompozitlerde 0,31, %0,8 NrGO katkılı epoksi ile üretilmiş kompozitlerde 0,26 değerinde bulunmuştur. Ayrıca saf epoksi kompozite göre sırası ile %47 ve %21'lik bir artış mevcuttur.

5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

ASTM D7264 göre yapılan üç nokta eğme testinde, katkısız ve %0,8 NrGO katkılı, %10 NaOH sulu çözeltisi ile yüzey modifiye edilen katkısız ve %0,8 NrGO katkılı jüt fiber takviyeli kompozitlerden elde edilen numunelerin eğme kuvveti altındaki davranışları incelenmiştir. Elde edilen eğilme gerilmesi, eğilme modülü ve standart sapma değerleri Tablo 5.4'de sunulmuştur.

Sonuçlar değerlendirildiğinde jüt fiber takviyeli epoksi kompozite NrGO eklendikten sonra, eğilme dayanımı ve eğilme elastiklik modüllerinde %20,1 ve %3,4'lük bir artış görülmektedir. Eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerlerini önemli ölçüde olumlu yönde değiştirmektedir. Alkali işlem yapılmamış NrGO katılmış kumaşlarda, NrGO katkısı eğilme dayanımını ve buna bağlı esnekliği artırdığı söylenebilir. Bu katkı değeri, matriste belli bir yüzdeyi geçer ise, tam tersi malzeme esnekliğini olumsuz yönde etkilemekte ve malzeme gevrekleşmektedir. %8 NrGO katkısı bu anlamda literatürle de uyumludur.

Tablo 5.4: Eğilme dayanımı, eğilme modülü değerleri.

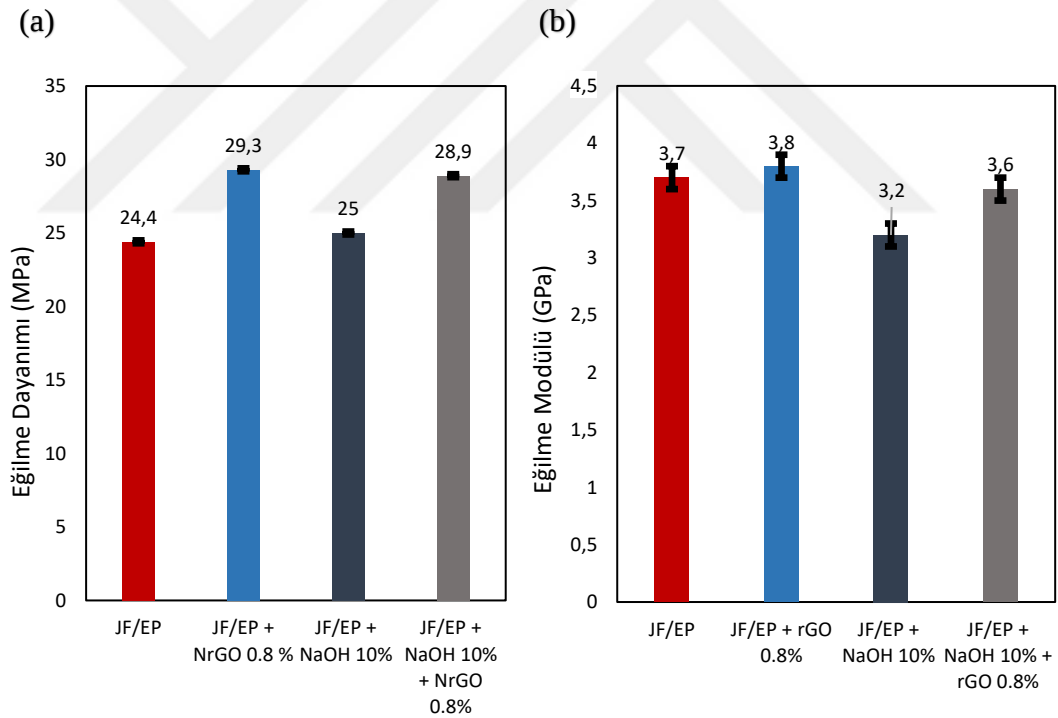
Numune Tipi	Eğilme Dayanımı (MPa)	Standart Sapma ($\pm$)	Eğilme Modülü (GPa)	Standart Sapma ($\pm$)
JF/EP	24,4	2,3	3,7	0,2
JF/EP + NrGO 0.8%	29,3	3,2	3,8	0,2
JF/EP + NaOH 10%	25	1,3	3,2	0,3
JF/EP + NaOH 10% +NrGO 0.8%	28,9	0,5	3,6	0,2

Sonuçlara göre, katkılanan NrGO ve yapılan %10 NaOH sulu çözelti alkali yüzey işleminin, eğme dayanımında ve eğme modülünde yaptığı gözlemlenen değişiklikler yüzde fark olarak Denklem 5.1'e göre hesaplanmış, Tablo 5.5'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5: Eğilme gerilmesi, eğilme modülü yüzdelik değişimleri.

Numune Tipi	Eğilme Dayanımı % Değişim	Eğilme Modülü % Değişimi
JF/EP	-	-
JF/EP + NrGO 0.8%	20,1	3,4
JF/EP + NaOH 10%	2,4	-12,9
JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8%	18,4	-3,4

Üç nokta eğme testi yardımıyla malzemenin eğme dayanımı, eğme modülü, Poisson oranı gibi değerler elde edilmiştir. Bu değerlerdeki değişiklikler aşağıdaki grafikler yardımıyla da açıklanmaya çalışılmıştır.



Şekil 5.3: Numune grupları eğilme dayanımı değerleri (a), Numune grupları eğilme modülü değerleri (b).

Şekil 5.3.a'da görüldüğü üzere jüt fiber takviyeli saf epoksi ve %0,8 NrGO katkısı ile elde edilen kompozitlerin eğilme dayanımları sırası ile 24,4 MPa ve 29,3 MPa değerlerinde bulunmuştur. %0,8 NrGO epoksi katkılı jüt fiber kompozitin ortalama eğilme dayanımı değeri, jüt fiber epoksi kompozite göre %20,1 değerinde

artmıştır. %10 NaOH yüzey işlemi yapılmış, %0,8 NrGO grafen katkısız ve katkılı kompozitlerin ortalama eğilme dayanımı değerleri sırası ile 25 MPa ve 28,9 MPa değerindedir. Bu kompozitlerin jüt fiber saf epoksi kompozite göre eğilme dayanımlarındaki değişimleri sırası ile %2,4 ve %18,4 oranında artmıştır. Saf epoksi kompozite göre NaOH yüzey işlemi, eğilme dayanımında etkili olmuştur. Alkali işlem yapılmış grup kendi içinde kıyaslandığında da NrGO katkısı artı yönde etki etmiş ve NrGO katkılı yüzey işlem görmüş kompozitin, yüzey işlem görmemişlere göre eğilme dayanımında %15,6 oranında artış olduğu görülmektedir.

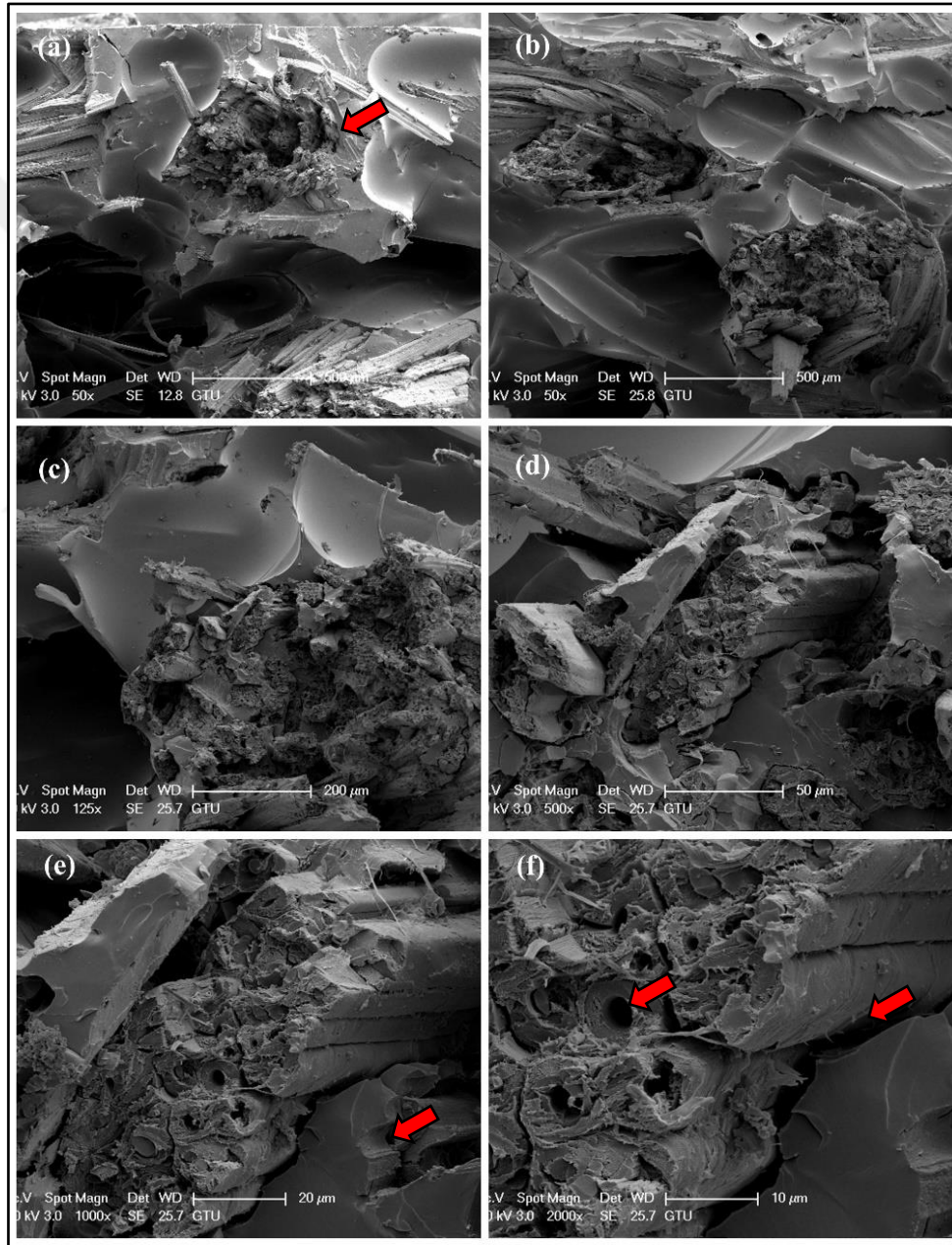
Şekil 5.3.b'ye bakıldığında, jüt fiber takviyeli saf epoksi ve %0,8 NrGO katkısı ile elde edilen kompozitlerin eğilme modül değerleri sırası ile 3,7 GPa ve 3,8 GPa değerlerinde bulunmuştur. %0,8 NrGO epoksi katkılı jüt fiber kompozitin ortalama eğilme modülü değerinde %3,4'lük artış vardır. %10 NaOH yüzey işlemi yapılmış, %0,8 NrGO grafen katkısız ve katkılı kompozitlerin ortalama eğilme modülleri numune sırası ile 3,2 GPa ve 3,6 GPa değerindedir. Bu kompozitlerin, jüt fiber saf epoksi kompozite göre eğilme modülleri değişimleri sırası ile %12,9 ve %3,4 oranında azalmış olmak ile birlikte, alkali işlem görmüş gruplara bakıldığında NrGO katkılı olanda, katkısız olana göre %12,5'lik bir artış görülmektedir.

Elde edilen eğilme değerleri sonucunda da NrGO katkısının ağırlıkça %0.8 olduğu değerlerde, saf epoksi ile elde edilen değerlere göre artış olduğu görülmektedir. Ancak %10 NaOH sulu çözelti ile işlem yapılmış saf epoksi jüt fiber kompozitte azalma görülmektedir. Bu azalmanın en büyük sebebi çekme testinde de bahsedildiği gibi fazla miktardaki kostik derişiminin, selüloz yapısını da bozabilmesidir. Ancak bu işlem aynı zamanda jüt fiberlerin yapısındaki lignin, pektin gibi maddelerin uzaklaştırarak jüt liflerini hidrofilik yapıya yaklaştırmaktır. Bu sayede jüt lifleri ile yine hidrofilik özellikteki NrGO'nun birleşmesi sonucunda eğilme değerleri artmaktadır. Burada, NrGO mekanik özelliklere olumlu etki ederek zayıf fiber yapısını güçlendirme potansiyeli göstermektedir.

5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi Sonuçları

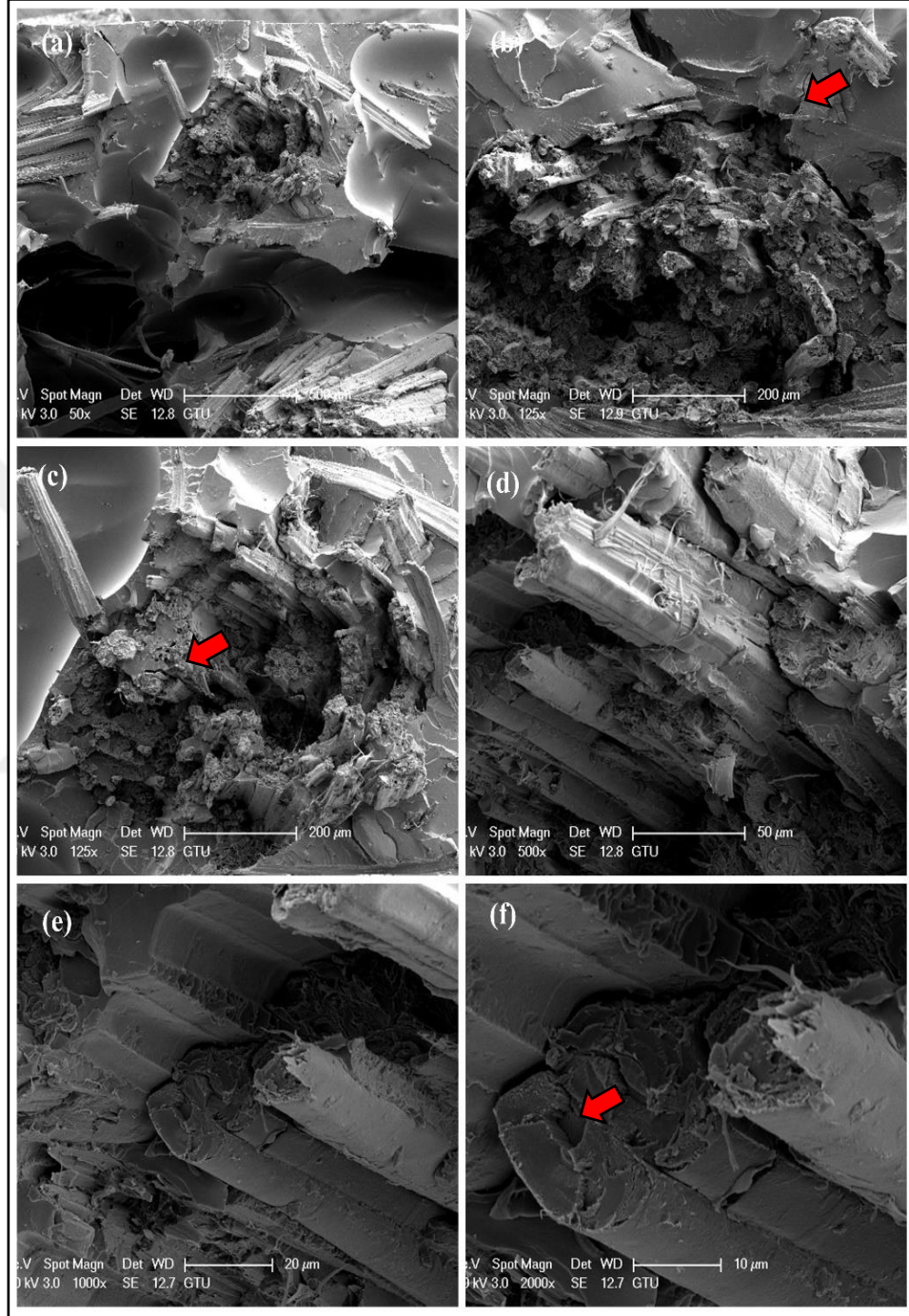
Üretilen kompozit gruplarının çekme testi sonucunda kırılan yüzeylerinin mikro yapıları ve hata modları hakkında bilgi sahibi olmak için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile aşağıdaki fotoğraflar elde edilmiştir.

Şekil 5.4'de jüt fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin alınan SEM analiz görüntüleri görülmektedir.



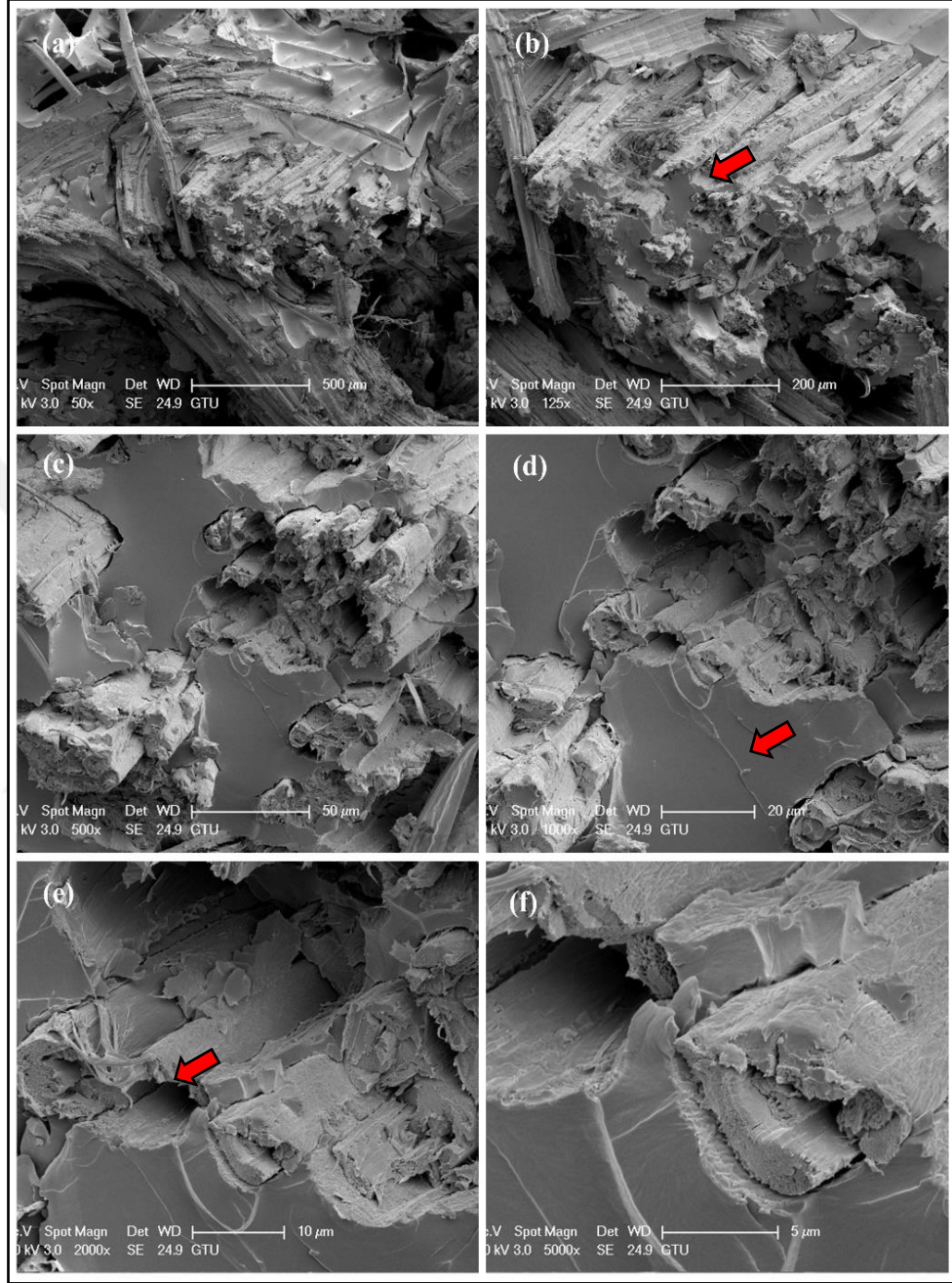
Şekil 5.4: JF/EP çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.

Şekil 5.5'de jüt fiber takviyeli %0,8 NrGO destekli epoksi kompozit malzemenin alınan SEM analiz görüntüleri görülmektedir.



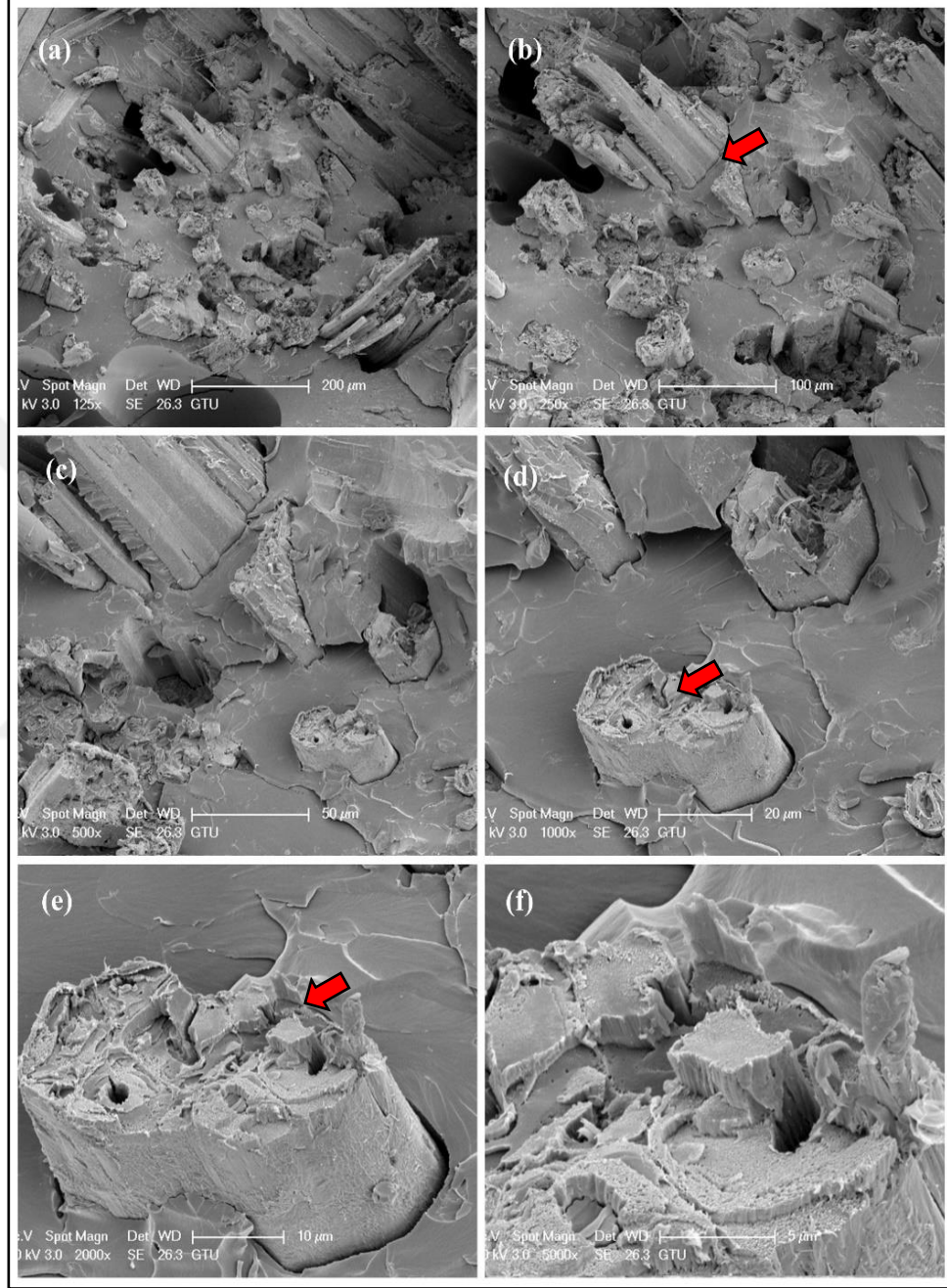
Şekil 5.5: JF/EP + NrGO 0.8% çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.

Şekil 5.6'da %10 NaOH sulu çözelti ile yüzey işlem yapılmış jüt fiber takviyeli epoksi kompozit malzemenin alınan SEM analiz görüntüleri görülmektedir.



Şekil 5.6: JF/EP + NaOH 10% çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.

Şekil 5.7’de %10 NaOH sulu çözelti ile yüzey işlem yapılmış jüt fiber takviyeli %0,8 NrGO destekli epoksi kompozit malzemenin alınan SEM analiz görüntüleri görülmektedir.



Şekil 5.7: JF/EP + NaOH 10% + NrGO 0.8% çekme testi numunelerindeki kırık yüzeylerden alınan SEM görüntüleri.

SEM görüntülerinde görülen kırılma yüzeyleri incelendiğinde, dokuma kumaşın [0/90]_s oryantasyonunun her bölgesinde jüt fiber epoksi matris etkileşimi görülmektedir. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 incelendiğinde, fiberlerin matrisin içinde kalarak

koptuğu görülmektedir. Ancak matris ile fiber arasında ayrılmalar mevcuttur. Bu ayrılma yüzeyleri, fiber ile matris arasındaki zayıf bağa işarettir ve bu noktalardan fiberler sıyrılarak ayrılmaktadır. Jüt fiberlerin yapısına baktığımızda daha önce bahsettiğimiz, ortası lümen adı verdiğimiz boşluklu, tipik bir doğal fiber yapısı görülmektedir. Bu yapı, özgül özellikleri artırmasının yanında, mekanik özellikler bakımından diğer fiberlere karşı dezavantaj içerir. Cam fiber veya diğer fiberler gibi içi dolu sürekli bir yapı görülmemektedir. %10 NaOH sulu çözelti ile yüzeyi işlenmiş numunelerin SEM görüntüleri olan Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'ye bakıldığında jüt fiber matris ayrışmalarına, yüzey işlemsiz numunelerden daha az rastlanmıştır. JP /EP + NaOH 10% numunesinin mekanik değerlerinin düşüşü, Şekil.5.6.e ve Şekil.5.6.f 'de görülen delikli fiber yapısında görülen fiber duvarlarının önemli seviyede incilmesi ve fiber dayanımının azalması olabileceği ön görülmektedir. M. İslam ve diğerleri [143], yükün uygulanması ile doğal fiberlerde hasarın fiber yırtılması ve matristen sıyrılması ile olduğunu belirtmiştir. Fiberlerin sıyrılması jüt fiber ile epoksi matris arasında ara yüzey yapışmasının eksik olmasından kaynaklanmaktadır. Polimeri azaltan matris içinde fiberlerin toplu olarak istiflenmesi veya bir araya toplanmasına aglomerasyon, denmektedir. Bu yapılar, özellikle %10 NaOH ile yüzey işlenmiş numunelerin SEM görüntüsünde görülmektedir. Ayrıca bu yapıların etrafında NrGO'da topaklanarak düzenli olmayan gerilim transferi ile dayanım düşmektedir. Fiber-matris yapışması, fiberlerin dağılımı ve oryantasyonu, fiber aglomerasyonu, nano dolgu malzemesinin dağılımı ve hava boşluklarının varlığı, fiber takviyeli kompozitin mukavemetinin yeniden azaltılmasında etkili faktörler olarak görünmektedir.

6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan testlerde elde edilen veriler neticesinde, %0,8 NrGO katkılı kompozitte NrGO'nun reçinede ve ara yüzeylerde yaptığı etkiye bağlı olarak, katkısız kompozitlere göre çekme dayanımında %8, elastisite modülünde %10, Poisson oranında %29 ve gerinme değerlerinde %10'luk bir artış görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde ara yüzeylerde bulunan NrGO, jüt fiberler gibi hidrofilik yapıda olup, epoksinin hidrofobikliğinden dolayı jüt kullanımını kısıtlayan ve mekanik değerlerde ciddi bir azalmaya yol açan bu sorunu önleyebileceği görülmüştür. Ayrıca %0,8 NrGO katkılı kompozitin ortalama eğilme dayanımı %20,1 ve eğilme modülü %3,4 değerinde artmıştır. Eğilme dayanımına ve de çekme gerinimi değerlerine baktığımızda NrGO katkılı jüt fiber takviyeli epoksi kompozitin kırılma tokluğunda önemli artış meydana geldiği görülmektedir.

Alkali işlemi, doğal fiberlerin matris ile zayıf bağ kurması ve mekanik değerlerinde azalmasına neden olan hemiselüloz, ligninin uzaklaştırılması için yapılmıştır. Burada literatürde çalışılan %10 NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Testler sonucu görüldüğü üzere çekme dayanımı azalmaktadır. Bunun sebebinin, alkali derişiminin bu kumaş için gereken optimum derişiklikten fazla olması, bunun sonucunda fiberlerin yapısında dayanımı sağlayan selülozun yapısına zarar vermesi düşünülmektedir. Bu konuda daha önce yapılan çalışmalarda, %10 NaOH çözeltisinin jüt fiberlerde dayanımı düşürdüğü ve %5 NaOH derişimin daha etkin olduğu görülmüştür. Ancak burada çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinde düşüş olmasına rağmen, gerinim değerinde %15 oranında bir artış görülmüştür. Aynı şekilde eğilme dayanımında %2,4 oranında artış görülmüştür. Çekme testi sonucu görülen gerinim ve eğilme dayanımındaki artış, malzemenin tokluğu ve sünekliğinin arttığını göstermiştir.

Alkali işlem (NaOH) uygulanan jüt kumaşlar ile üretilen %0,8 NrGO katkılı kompozitin, maksimum çekme dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı ve gerinim değerlerinde ciddi artışlar mevcuttur. Sadece alkali işlem görmüş jüt fiber takviyeli epoksi kompozitlerde, ortalama maksimum çekme dayanımı %31 oranında azalsa bile, %0,8 NrGO takviyesi ile bu azalma %5 oranına çıkmıştır. %0,8 NrGO katkısı ile %39 değerinde bir iyileşme sağlanmıştır. Bu artışlar yüzey işleminin, NrGO katkılı epoksinin yüzeye tutunmasını sağladığı ve NrGO yapısının yüzeye nüfuz ederek

çekme dayanımında, özellikle gerinimde %30 oranında önemli iyileştirme olduğunu göstermiştir. Alkali yüzey işlem görmüş jüt kumaşlar ile saf epoksi kullanılarak yapılan üretim prosesi esnasında akış düzgün ilerleyememiş, ortada kuru bölgeler kalmıştır. Diğer üretimlerde bu duruma rastlanmamıştır. Burada, alkali işlem sonrasında, kumaşta fiber yüzeylerinden sökülen ligninin, nemden koruma özelliği göz ardı edilmemelidir. Kumaşlar daha hidrofilik hale geldiği için, epoksi reçine gibi hidrofobik malzeme ile yapılan üretimde, reçine kolay akabileceği noktalara yani kenarlara hareket etmiş ve homojen dağılma gerçekleşmemiştir. Buna rağmen yapılan testlerde, özellikle yüzey işlemi ve NrGO'nun beraber uygulaması olumlu sonuçlar vermektedir.

Literatür incelendiğinde reçineye ilave edilen grafenin reçineye iyi dağılmaması ve işlem sırasında kumaşta iyi ilerlememesi, fiber yüzeylerine işleyememe sorunları görülmektedir. Bu probleme karşı reçineyi GO yapıları ile takviye etmek yerine jüt fiber veya kumaş yapıları, GO ile doğrudan kaplamak ve yüzey işlem uygulamaları yapılması literatürde de giderek artan araştırma konusudur. Bu yöntem sonucu karışımın topaklanması, ilerlememesi gibi zorluklar en aza indirgenerek, çekme dayanımı ve elastisite modülü daha yüksek jüt fiber takviyeli kompozitler elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan NrGO katkısının da bu yöntem ile daha iyi sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma sonucunda NrGO katkısının ve yüzey işleminin jüt fiber takviyeli kompozitlerin gerinim değerlerinde önemli iyileştirmeler yaptığı görülmüştür. Numunelerde sünekliği ve tokluğu artırmıştır. Bu nedenle darbe dayanımının ve enerji emilimi ihtiyacının olduğu yerlerde NrGO katkılı ve yüzey işlem görmüş jüt fiber kompozitlerin iyi bir alternatif oluşturma potansiyeline sahip oldukları görülmektedir.

Günümüzde doğal fiber takviyeli kompozitlerin kullanımı özellikle otomotiv sektöründe artmaktadır. Otomotiv sektörü rekabetçi maliyetler, yüksek yakıt verimliliği, artan performans ve çevresel taleplerin baskısı altındadır. Geleneksel kompozitlerin yerine aynı performansı sunabilen, daha hafif ve çevreci ve tüm bu taleplere cevap verme potansiyeli nedeni ile, doğal fiber takviyeli kompozit malzemelerin yakın gelecekte otomotiv endüstrinde uygulamalarının artacağı öngörülmektedir. Bu parçalardan biri de sönümleme, esneklik ve hafiflik ihtiyacı olan otomotiv tamponlarıdır. Geleneksel izotropik metal ve plastik malzemelerden yapılmış tamponlar yerine bu çalışmada kullanılan jüt fiber takviyeli NrGO destekli kompozit malzemelerin iyi bir alternatif olabileceği gösterilmiştir.

Sonuç olarak yapılan testlerde özellikle yüzey işlem ve NrGO beraber uygulaması olumlu sonuçlar vermektedir. Bu uygulamalarda yapılacak optimizasyon çalışmaları ile elde edilen artışlar gelecekte jt fiberlerin kullanılmasını önemli ölçüde artıracaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Bharath K. N., Basavarajappa S., (2016), “Applications of biocomposite materials based on natural fibers from renewable resources: A review”, *Science and Engineering of Composite Materials*, 23 (2), 123–133.
- [2] Chandramohan D., Bharanichandar J., (2014), “Natural fiber reinforced polymer composites for automobile accessories”, *American Journal of Environmental Sciences*, 9 (6), 494–504.
- [3] Yan L., Chouw N., Jayaraman K., (2014), “Flax fibre and its composites - A review”, *Composites Part B: Engineering*, 56, 296–317.
- [4] Devnani G. L., Sinha S., (2019), “ScienceDirect Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites”, 18, 647–654.
- [5] Sarker F., Potluri P., Afroj S., Koncherry V., Novoselov K. S., Karim N., (2019), “Ultrahigh Performance of Nanoengineered Graphene-Based Natural Jute Fiber Composites”, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11 (23), 21166–21176.
- [6] Sarker F., Karim N., Afroj S., Koncherry V., Novoselov K. S., Potluri P., (2018), “High-Performance Graphene-Based Natural Fiber Composites”, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 10 (40), 34502–34512.
- [7] Afroj S., Tan S., Abdelkader A. M., Novoselov K. S., Karim N., (2020), “Highly Conductive, Scalable, and Machine Washable Graphene-Based E-Textiles for Multifunctional Wearable Electronic Applications”, *Advanced Functional Materials*, 30 (23).
- [8] da Luz F. S., da Costa Garcia Filho F., del-Río M. T. G., Cassiano Nascimento L. F., Pinheiro W. A., Monteiro S. N., (2020), “Graphene-incorporated natural fiber polymer composites: A first overview”, *Polymers*, 12 (7), 1–36.
- [9] Doan T. T. L., (2006), “Investigation on jute fibres and their composites based on polypropylene and epoxy matrices”, PhD Thesis, Der Technischen Universität Dreden.
- [10] Doan T. T. L., Gao S. L., Mäder E., (2006), “Jute/polypropylene composites I. Effect of matrix modification”, *Composites Science and Technology*, 66 (7–8), 952–963.
- [11] Dutta S., Kim N. K., Das R., Bhattacharyya D., (2019), “Effects of sample orientation on the fire reaction properties of natural fibre composites”, *Composites Part B: Engineering*, 157, 195–206.
- [12] Tsai S. W., Hahn H. T., (1980), “Introduction to Composite Materials”, 1st Edition, Routledge.

- [13] Epstein W. M., (2016), "Book Review: Quixote's Ghost: The Right, the Liberator, and the Future of Social Policy", *Res. Soc. Work Pract*, 16 (2), 238–240.
- [14] McFarland A. W., Poggi M. A., Bottomley L. A., Colton J. S., (2004), "Production and characterization of polymer microcantilevers", *Review of Scientific Instruments*, 75 (8), 2756.
- [15] Abramovich H., (2017), "Introduction to composite materials", *Stability and Vibrations of Thin-Walled Composite Structures*, 1–47.
- [16] Dawoud M. M., Saleh H. M., Dawoud M. M., Saleh H. M., (2018), "Introductory Chapter: Background on Composite Materials", *Characterizations of Some Composite Materials*.
- [17] Bello S., Hassan S., Kana M., Raheem I., (2015), "Epoxy Resin Based Composites, Mechanical and Tribological Properties: A Review", *Tribology in Industry*, 37 (4), 1–30.
- [18] Azwa Z. N., Yousif B. F., Manalo A. C., Karunasena W., (2013), "A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres", *Materials and Design*, 47, 424–442.
- [19] Banerjee C., Ghosh S., Sen G., Mishra S., Shukla P., Bandopadhyay R., (2013), "Study of algal biomass harvesting using cationic guar gum from the natural plant source as flocculant", *Carbohydrate polymers*, 92 (1), 675–681.
- [20] Khoathane M. C., Vorster O. C., Sadiku E. R., (2008), "Hemp Fiber-Reinforced 1-Pentene/Polypropylene Copolymer: The Effect of Fiber Loading on the Mechanical and Thermal Characteristics of the Composites", *Reinforced Plastics and Composites*, 27 (14), 1533–1544.
- [21] Bajpai P. K., Singh I., (2013), "Drilling behavior of sisal fiber-reinforced polypropylene composite laminates", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32 (20), 1569–1576.
- [22] Khoathane M. C., Sadiku E. R., Wambua P. M., (2012), "Effect of water glass treatment on the mechanical and thermooxidative properties of kenaf and sisal fibres", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31 (19), 1261–1269.
- [23] Perumal C. I., (2018), "A Review on Characteristic of Polymer Composites with Natural Fiber Used as a Reinforcement Material", *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6 (1), 1213–1217.
- [24] Pickering K. L., (2008), "Properties and performance of natural-fibre composites", *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, 67–125.
- [25] Perumal C. I., Sarala R., Muthuraja R., Senthilraja R., Scholar R., Chettiar A.,

- (2018), “A Review on Characteristic of Polymer Composites with Natural Fiber Used as a Reinforcement Material”, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 887, 1213–1217.
- [26] Alipour A., (2022), “Natural Fibre Epoxy Composites Reinforced With Graphene: Investigation Into The Effects of Resin Viscosity, Graphene Percentage and Fibre Treatment”, PhD Thesis, The University of Auckland.
- [27] Tezara C., Siregar J. P., Lim H. Y., Fauzi F. A., Yazdi M. H., Moey L. K., Lim J. W., (2016), “Factors that affect the mechanical properties of kenaf fiber reinforced polymer: A review”, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 10 (2), 2159–2175.
- [28] Stamboulis A., Baillie C. A., Peijs T., (2001), “Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32 (8), 1105–1115.
- [29] Thomsen A. B. ;, Rasmussen S. K. ;, Bohn V. ;, Nielsen K. V. ;, Thygesen A., (2005), “General rights Hemp raw materials: The effect of cultivar, growth conditions and pretreatment on the chemical composition of the fibres”, *Risø National Laboratory*, 30.
- [30] Xiao L.-P., Lin Z., Peng W.-X., Yuan T.-Q., Xu F., Li N.-C., Tao Q.-S., Xiang H., Sun R.-C., (2014), “Unraveling the structural characteristics of lignin in hydrothermal pretreated fibers and manufactured binderless boards from *Eucalyptus grandis*”, *Sustainable Chemical Processes* 2014 2:1, 2 (1), 1–12.
- [31] Nabi D., Jog J. P., (1999), “Natural Fiber Polymer Composites: A Review”, *Advances in Polymer Technology*, 18 (4), 351–363.
- [32] Komuraiah A., Kumar N. S., Prasad B. D., (2014), “Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties”, *Mechanics of Composite Materials*, 50 (3), 359–376.
- [33] Mahir F. I., Keya K. N., Sarker B., Nahian K. M., Khan R. A., (2019), “A brief review on natural fiber used as a replacement of synthetic fiber in polymer composites”, *Materials Engineering Research*, 1 (2), 86–97.
- [34] Dahlke B., Larbig H., Scherzer H. D., Poltrock R., (2016), “Natural Fiber Reinforced Foams Based on Renewable Resources for Automotive Interior Applications”, *Journal of Cellular Plastics*, 34 (4), 361–378.
- [35] Jawaid M., Abdul Khalil H. P. S., (2011), “Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review”, *Carbohydrate Polymers*, 86 (1), 1–18.
- [36] Thiruchitrambalam M., Athijayamani A., Sathiyamurthy S., Syed Abu Thaheer A., (2010), “A Review on the Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites for the Development of Roselle Fiber-Reinforced Polyester Composite”, *Journal of Natural Fibers*, 7 (4), 307–323.

- [37] Faruk O., Bledzki A. K., Fink H. P., Sain M., (2012), “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010”, *Progress in Polymer Science*, 37, 1552–1596.
- [38] Sindhuphak A., (2007), “Bioproducts of automotive accessories: rethinking design materials through cornstarch, sugarcane and hemp”, *KMITL Tcience and technology Journal*, 7 (2), 160–170.
- [39] Fuqua M. A., Huo S., Ulven C. A., (2012), “Natural Fiber Reinforced Composites”, *Polymer Reviews*, 52 (3–4), 259–320.
- [40] Yıldızhan Ş., Çalık A., Özcanlı M., Serin H., (2018), “Bio-composite materials: a short review of recent trends, mechanical and chemical properties, and applications”, *European Mechanical Science*, 2 (3), 83–91.
- [41] Bajpai P. K., Singh I., Madaan J., (2014), “Development and characterization of PLA-based green composites: A review”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27 (1), 52–81.
- [42] Islam M. H., Islam M. R., Dulal M., Afroj S., Karim N., (2022), “The effect of surface treatments and graphene-based modifications on mechanical properties of natural jute fiber composites: A review”, *iScience*, 25 (1), 1–16.
- [43] Mukherjee A., Ganguly P. K., Surf D., (1993), “Structural Mechanics of Jute: The Effects of Hemicellulose or Lignin Removal”, *The Journal of The Textile Institute*, 84 (3), 348–353.
- [44] Hiden A., Ogbonna J. C., Aoyagi H., Tanaka H., (2000), “Characterization and factors effecting fiber properties”, *Natural polymers and agrofibers based composites*, 103 (4), 311–317.
- [45] Koichi G., Cao Y., (2007), “Research and Development of Fully Green Composites Reinforced with Natural Fibers”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 1 (9), 1073–1084.
- [46] Abdul Khalil H. P. S., Bhat A. H., Ireana Yusra A. F., (2012), “Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review”, *Carbohydrate Polymers*, 87 (2), 963–979.
- [47] Masoodi R., Pillai K. M., (2012), “A study on moisture absorption and swelling in bio-based jute-epoxy composites”, *Reinforced Plastics and Composites*, 31 (5), 285–294.
- [48] Thakur V. K., Singha A. S., Thakur M. K., (2012), “Green Composites from Natural Fibers: Mechanical and Chemical Aging Properties”, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 17 (6), 401–407.
- [49] Mallick P. K., (2007), “Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition”, CRC Press, Boca Raton.
- [50] Sen R., Shahawy M., Sukumar S., Rosas J., (1998), “Potential of Natural Fiber

Reinforced Polymer Composites for Civil Engineering Applications in India”, Second International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI’98, Tucson, Arizona, USA, 2, 355–368.

- [51] Saravana Bavan D., Mohan Kumar G. C., (2010), “Potential use of natural fiber composite materials in India”, Reinforced Plastics and Composites, 29 (24), 3600–3613.
- [52] Ganesan K., Kailasanathan C., Rajini N., Ismail S. O., Ayrilmis N., Mohammad F., Al-Lohedan H. A., Tawfeek A. M., Issa Z. A., Aldhayan D. M., (2021), “Assessment on hybrid jute/coir fibers reinforced polyester composite with hybrid fillers under different environmental conditions”, Construction and Building Materials, 301, 2–8.
- [53] Shahinur S., Hasan M., (2019), “Natural Fiber and Synthetic Fiber Composites: Comparison of Properties, Performance, Cost and Environmental Benefits”, Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, 794–802.
- [54] Xie Y., Kurita H., Ishigami R., Narita F., (2020), “Assessing the flexural properties of epoxy composites with extremely low addition of cellulose nanofiber content”, Applied Sciences (Switzerland), 10 (3), 1–2.
- [55] Quirino R. L., Monroe K., Fleischer C. H., Biswas E., Kessler M. R., (2021), “Thermosetting polymers from renewable sources”, Polymer International, 70 (2), 167–180.
- [56] Paipa-Alvarez H. O., Palacios Alvarado W., Medina Delgado B., (2020), “Biodegradable thermosets polymers as an alternative solution to pollution generated by plastics”, Journal of Physics: Conference Series, 1672 (1), 2–5.
- [57] Shahinur S., Sayeed M. M. A., Hasan M., Sadat A., Sayem M., Haider J., Ura S., (2022), “Current Development and Future Perspective on Natural Jute Fibers and Their Biocomposites”, Polymers, 14, 2–27.
- [58] Bai S. L., Wang G. T., Hiver J. M., G’Sell C., (2004), “Microstructures and mechanical properties of polypropylene/polyamide 6/polyethylene-octene elastomer blends”, Polymer, 45 (9), 3063–3071.
- [59] Tomuta A., (2013), “New and improved thermosets based on epoxy resins and dendritic polyesters”, PhD Thesis, Universitat Rovira I Virgili.
- [60] Fu J. F., Shi L. Y., Yuan S., Zhong Q. D., Zhang D. S., Chen Y., Wu J., (2008), “Morphology, toughness mechanism, and thermal properties of hyperbranched epoxy modified diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA) interpenetrating polymer networks”, Polymers for Advanced Technologies, 19 (11), 1597–1607.
- [61] S.R. Sandler W. K., (1993), “Chemistry and Technology of Epoxy Resins”, 1st Edition, Springer-Science Business Media, B.V.
- [62] Campilho R., (2015), “Natural Fiber Composites”, 1st Edition, CRC Press.

- [63] Dittenber D. B., Gangarao H. V. S., (2012), “Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43 (8), 1419–1429.
- [64] Elkington M., Bloom D., Ward C., Chatzimichali A., Potter K., (2015), “Hand layup: understanding the manual process”, *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, 1 (3), 138–151.
- [65] Dai D., Fan M., (2013), “Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: Structure, properties, processing and applications”, *Natural Fibre Composites: Materials, Processes and Applications*, 3–65.
- [66] Sèbe G., Cetin N. S., Hill C. A. S., Hughes M., (2000), “RTM hemp fibre-reinforced polyester composites”, *Applied Composite Materials*, 7 (5–6), 341–349.
- [67] Richardson M. O. W., Zhang Z. Y., (2000), “Experimental investigation and flow visualisation of the resin transfer mould filling process for non-woven hemp reinforced phenolic composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31 (12), 1303–1310.
- [68] Summerscales J., Searle T. J., (2005), “Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 219 (1), 45–58.
- [69] Goren A., Atas C., (2008), “Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding”, *Archives of Materials Science and Engineering*, 34 (2), 117–120.
- [70] Olhan S., Khatkar V., Behera B. K., (2021), “Review: Textile-based natural fibre-reinforced polymeric composites in automotive lightweighting”, *Journal of Materials Science*, 56 (34), 18867–18910.
- [71] Chen P., Lu C., Yu Q., Gao Y., Li J., Li X., (2006), “Influence of fiber wettability on the interfacial adhesion of continuous fiber-reinforced PPESK composite”, *Journal of Applied Polymer Science*, 102 (3), 2544–2551.
- [72] Wu X. F., Dzenis Y. A., (2006), “Droplet on a fiber: Geometrical shape and contact angle”, *Acta Mechanica*, 185 (3–4), 215–225.
- [73] Chandrasekar M., Ishak M. R., Sapuan S. M., Leman Z., Jawaid M., (2017), “A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption”, *Plastics, Rubber and Composites*, 46 (3), 119–136.
- [74] Militký J., Jabbar A., (2015), “Comparative evaluation of fiber treatments on the creep behavior of jute/green epoxy composites”, *Composites Part B: Engineering*, 80, 361–368.

- [75] Bledzki A. K., Gassan J., (1999), "Composites reinforced with cellulose_Bledzki_1999.pdf", *Progress in Polymer Science*, 24, 221–274.
- [76] Karim N., Sarker F., Afroj S., Zhang M., Potluri P., Novoselov K. S., Karim N., Afroj S., Novoselov K. S., Sarker F., Potluri P., Zhang M., (2021), "Sustainable and Multifunctional Composites of Graphene-Based Natural Jute Fibers", *Advanced Sustainable Systems*, 5 (3), 12.
- [77] Sinha E., Panigrahi S., (2009), "Effect of Plasma Treatment on Structure, Wettability of Jute Fiber and Flexural Strength of its Composite", *Composite Materials*, 43 (17), 1791–1802.
- [78] Sever K., Erden S., Gülec H. A., Seki Y., Sarikanat M., (2011), "Oxygen plasma treatments of jute fibers in improving the mechanical properties of jute/HDPE composites", *Materials Chemistry and Physics*, 129 (1–2), 275–280.
- [79] Doan T. T. L., Brodowsky H., Mäder E., (2012), "Jute fibre/epoxy composites: Surface properties and interfacial adhesion", *Composites Science and Technology*, 72 (10), 1160–1166.
- [80] Roy A., Chakraborty S., Kundu S. P., Basak R. K., Basu Majumder S., Adhikari B., (2012), "Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alkali treatment as demonstrated by utilisation of the Weibull distribution model", *Bioresource Technology*, 107, 222–228.
- [81] Saha P., Manna S., Chowdhury S. R., Sen R., Roy D., Adhikari B., (2010), "Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment", *Bioresource Technology*, 101 (9), 3182–3187.
- [82] Khondker O. A., Ishiaku U. S., Nakai A., Hamada H., (2005), "Tensile, flexural and impact properties of jute fibre-based thermosetting composites", *Plastics, Rubber and Composites*, 34 (10), 450–462.
- [83] Alves C., Dias A. P. S., Diogo A. C., Ferrão P. M. C., Luz S. M., Silva A. J., Reis L., Freitas M., (2010), "Eco-composite: the effects of the jute fiber treatments on the mechanical and environmental performance of the composite materials", *Composite Materials*, 45 (5), 573–589.
- [84] Wang X., Cui Y., Xu Q., Xie B., Li W., (2010), "Effects of alkali and silane treatment on the mechanical properties of jute-fiber-reinforced recycled polypropylene composites", *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 16 (3), 183–188.
- [85] Hong C. K., Hwang I., Kim N., Park D. H., Hwang B. S., Nah C., (2008), "Mechanical properties of silanized jute–polypropylene composites", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14 (1), 71–76.
- [86] Dilfi K.F. A., Balan A., Bin H., Xian G., Thomas S., (2018), "Effect of surface modification of jute fiber on the mechanical properties and durability of jute

fiber-reinforced epoxy composites”, *Polymer Composites*, 39 (4), 2–4.

- [87] Rana A. K., Basak R. K., Mitra B. C., Lawther M., Banerjee A. N., (1997), “Studies of acetylation, of jute using simplified procedure and its characterization”, *Journal of Applied Polymer Science*, 64 (8), 1517–1523.
- [88] Wang H., Memon H., Hassan E. A. M., Miah M. S., Ali M. A., (2019), “Effect of jute fiber modification on mechanical properties of jute fiber composite”, *Materials*, 12 (8), 7–11.
- [89] Boopalan M., Umapathy M. J., Jenyfer P., (2012), “A Comparative Study on the Mechanical Properties of Jute and Sisal Fiber Reinforced Polymer Composites”, *Silicon*, 4 (3), 145–149.
- [90] Mahesh V., Mahesh V., Harursampath D., (2022), “Influence of alkali treatment on physio-mechanical properties of jute–epoxy composite”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8 (2), 380–391.
- [91] Gopinath A., Senthil Kumar M., Elayaperumal A., (2014), “Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices”, *Procedia Engineering*, 97, 2052–2063.
- [92] Kapatel P. M., (2021), “Investigation of Green Composite: Preparation and Characterization of Alkali-Treated Jute Fabric-reinforced Polymer Matrix Composites”, *Journal of Natural Fibers*, 18 (4), 510–519.
- [93] Jayaramudu J., Guduri B. R., Varada Rajulu A., (2010), “Characterization of new natural cellulosic fabric *Grewia tilifolia*”, *Carbohydrate Polymers*, 79 (4), 847–851.
- [94] Sinha E., Rout S. K., (2009), “Influence of fibre-surface treatment on structural, thermal and mechanical properties of jute fibre and its composite”, *Bulletin of Materials Science*, 32 (1), 65–76.
- [95] Nguyen T. A., Han B., Sharma S., Longbiao L., Bhat K. S., (2020), “Fiber-reinforced nanocomposites: an introduction”, *Fiber-Reinforced Nanocomposites: Fundamentals and Applications*, 3–6.
- [96] Sharma R. K., Sharma S., Dutta S., Zboril R., Gawande M. B., (2015), “Silica-nanosphere-based organic–inorganic hybrid nanomaterials: synthesis, functionalization and applications in catalysis”, *Green Chemistry*, 17 (6), 3207–3230.
- [97] Yang Y., Zhang C., Lai C., Zeng G., Huang D., Cheng M., Wang J., Chen F., Zhou C., Xiong W., (2018), “BiOX (X = Cl, Br, I) photocatalytic nanomaterials: Applications for fuels and environmental management”, *Advances in Colloid and Interface Science*, 254, 76–93.
- [98] Idumah C. I., Hassan A., (2016), “Effect of exfoliated graphite nanoplatelets on thermal and heat deflection properties of kenaf polypropylene hybrid

nanocomposites”, 1–13.

- [99] Srivastava V. K., Gries T., Veit D., Quadflieg T., Mohr B., Kolloch M., (2017), “Effect of nanomaterial on mode I and mode II interlaminar fracture toughness of woven carbon fabric reinforced polymer composites”, *Engineering Fracture Mechanics*, 180, 73–86.
- [100] Prasad V., Sekar K., Varghese S., Joseph M. A., (2019), “Enhancing Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of flax fibre reinforced epoxy composites with nano TiO₂”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 124, 1–10.
- [101] Jujjavarapu S. E., Poluri K. M., (2020), “Green polymeric nanocomposites”, 1st Edition, CRC Press.
- [102] Faruque M. A. Al, Syduzzaman M., Sarkar J., Bilisik K., Naebe M., (2021), “A review on the production methods and applications of graphene-based materials”, *Nanomaterials*, 11 (9), 2–24.
- [103] Pereira A. C., Lima A. M., Demosthenes L. C. da C., Oliveira M. S., Costa U. O., Bezerra W. B. A., Monteiro S. N., Rodriguez R. J. S., de Deus J. F., Pinheiro W. A., (2020), “Ballistic Performance of Ramie Fabric Reinforcing Graphene Oxide-Incorporated Epoxy Matrix Composite”, *Polymers*, 12 (11), 2–3.
- [104] Ahmed A., Adak B., Faruk M. O., Mukhopadhyay S., (2021), “Nanocellulose Coupled 2D Graphene Nanostructures: Emerging Paradigm for Sustainable Functional Applications”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 60 (30), 10882–10916.
- [105] Wick P., Louw-Gaume A. E., Kucki M., Krug H. F., Kostarelos K., Fadeel B., Dawson K. A., Salvati A., Vázquez E., Ballerini L., Tretiach M., Benfenati F., Flahaut E., Gauthier L., Prato M., Bianco A., (2014), “Classification Framework for Graphene-Based Materials”, *Angewandte Chemie International Edition*, 53 (30), 7714–7718.
- [106] Johnson D. W., Dobson B. P., Coleman K. S., (2015), “A manufacturing perspective on graphene dispersions”, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 20 (5–6), 367–382.
- [107] Karim N., Afroj S., Leech D., Abdelkader A. M., (2021), “Flexible and Wearable Graphene-Based E-Textiles”, *Oxide Electronics*, 21–49.
- [108] Mohan V. B., Brown R., Jayaraman K., Bhattacharyya D., (2015), “Characterisation of reduced graphene oxide: Effects of reduction variables on electrical conductivity”, *Materials Science and Engineering: B*, 193 (C), 49–60.
- [109] Yusuf M., Kumar M., Khan M. A., Sillanpääillanpa M., Arafat H., (2019), “A review on exfoliation, characterization, environmental and energy applications of graphene and graphene-based composites”, *Advances in Colloid and Interface Science*, 273, 6–46.

- [110] Lee X. J., Hiew B. Y. Z., Lai K. C., Lee L. Y., Gan S., Thangalazhy-Gopakumar S., Rigby S., (2019), “Review on graphene and its derivatives: Synthesis methods and potential industrial implementation”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 98, 163–180.
- [111] Madurani K. A., Suprpto S., Machrita N. I., Bahar S. L., Illiya W., Kurniawan F., (2020), “Progress in Graphene Synthesis and its Application: History, Challenge and the Future Outlook for Research and Industry”, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 9 (9), 1–2.
- [112] Liu Z., Chen Z., Wang C., Wang H. I., Wuttke M., Wang X. Y., Bonn M., Chi L., Narita A., Müllen K., (2020), “Bottom-Up, On-Surface-Synthesized Armchair Graphene Nanoribbons for Ultra-High-Power Micro-Supercapacitors”, *Journal of the American Chemical Society*, 142 (42), 17881–17886.
- [113] Yang W., Wang C., (2016), “Graphene and the related conductive inks for flexible electronics”, *Journal of Materials Chemistry C*, 4 (30), 7193–7207.
- [114] Luo B., Liu S., Zhi L., (2012), “Chemical Approaches toward Graphene-Based Nanomaterials and their Applications in Energy-Related Areas”, *Small*, 8 (5), 630–646.
- [115] Narayan R., Kim S. O., (2015), “Surfactant mediated liquid phase exfoliation of graphene”, *Nano Convergence*, 2 (1), 1–20.
- [116] Ren S., Rong P., Yu Q., (2018), “Preparations, properties and applications of graphene in functional devices: A concise review”, *Ceramics International*, 44 (11), 11940–11955.
- [117] Bonaccorso F., Bartolotta A., Coleman J. N., Backes C., (2016), “2D-Crystal-Based Functional Inks”, *Advanced Materials*, 28 (29), 6136–6166.
- [118] Hernandez Y., Nicolosi V., Lotya M., Blighe F. M., Sun Z., De S., McGovern I. T., Holland B., Byrne M., Gun’ko Y. K., Boland J. J., Niraj P., Duesberg G., Krishnamurthy S., Goodhue R., Hutchison J., Scardaci V., Ferrari A. C., Coleman J. N., (2008), “High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite”, *Nature Nanotechnology* 2008 3:9, 3 (9), 563–568.
- [119] Hassoun J., Bonaccorso F., Agostini M., Angelucci M., Betti M. G., Cingolani R., Gemmi M., Mariani C., Panero S., Pellegrini V., Scrosati B., (2014), “An advanced lithium-ion battery based on a graphene anode and a lithium iron phosphate cathode”, *Nano Letters*, 14 (8), 4901–4906.
- [120] Khan U., O’Neill A., Lotya M., De S., Coleman J. N., (2010), “High-Concentration Solvent Exfoliation of Graphene”, *Small*, 6 (7), 864–871.
- [121] Maragó O. M., Bonaccorso F., Saija R., Privitera G., Gucciardi P. G., Iati M. A., Calogero G., Jones P. H., Borghese F., Denti P., Nicolosi V., Ferrari A. C.,

- (2010), “Brownian motion of graphene”, *ACS Nano*, 4 (12), 7515–7523.
- [122] Li D., Müller M. B., Gilje S., Kaner R. B., Wallace G. G., (2008), “Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets”, *Nature Nanotechnology* 2008 3:2, 3 (2), 101–105.
- [123] Galpaya D., Wang M., Liu M., Motta N., Waclawik E., Yan C., Galpaya D., Wang M., Liu M., Motta N., Waclawik E., Yan C., (2012), “Recent Advances in Fabrication and Characterization of Graphene-Polymer Nanocomposites”, *Graphene*, 1 (2), 30–49.
- [124] Lonkar S. P., Deshmukh Y. S., Abdala A. A., (2015), “Recent advances in chemical modifications of graphene”, *Nano Research*, 8 (4), 1039–1074.
- [125] Karim N., Afroj S., Malandraki A., Butterworth S., Beach C., Rigout M., Novoselov K. S., Casson A. J., Yeates S. G., (2017), “All inkjet-printed graphene-based conductive patterns for wearable e-textile applications”, *Journal of Materials Chemistry C*, 5 (44), 11640–11648.
- [126] Afroj S., Islam M. H., Karim N., (2021), “Multifunctional Graphene-Based Wearable E-Textiles”, 11.
- [127] Zhang J., Yang H., Shen G., Cheng P., Zhang J., Guo S., (2010), “Reduction of graphene oxide vial-ascorbic acid”, *Chemical Communications*, 46 (7), 1112–1114.
- [128] Kang H., Kulkarni A., Stankovich S., Ruoff R. S., Baik S., (2009), “Restoring electrical conductivity of dielectrophoretically assembled graphite oxide sheets by thermal and chemical reduction techniques”, *Carbon*, 47 (6), 1520–1525.
- [129] Yang D., Velamakanni A., Bozoklu G., Park S., Stoller M., Piner R. D., Stankovich S., Jung I., Field D. A., Ventrice C. A., Ruoff R. S., (2009), “Chemical analysis of graphene oxide films after heat and chemical treatments by X-ray photoelectron and Micro-Raman spectroscopy”, *Carbon*, 47 (1), 145–152.
- [130] Li D., Zou W., Song S., Ye Y., Jiang W., Qin Q. H., Xiao Y., Ye Z., Chen L., Zuo D., (2020), “Selective coupling reaction inhibits graphene defects: regulating the orderly precipitation of carbon atoms”, *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 10 (2), 587–595.
- [131] Elmarakbi A., Azoti W., (2018), “State of the Art on Graphene Lightweighting Nanocomposites for Automotive Applications”, *Experimental Characterization, Predictive Mechanical and Thermal Modeling of Nanostructures and Their Polymer Composites*, 1–23.
- [132] Ji X., Xu Y., Zhang W., Cui L., Liu J., (2016), “Review of functionalization, structure and properties of graphene/polymer composite fibers”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87, 29–45.

- [133] Afroj S., Tan S., Abdelkader A. M., Novoselov K. S., Karim N., Afroj S., Novoselov K. S., Karim N., Tan S., Abdelkader A. M., (2020), “Highly Conductive, Scalable, and Machine Washable Graphene-Based E-Textiles for Multifunctional Wearable Electronic Applications”, *Advanced Functional Materials*, 30 (23), 10.
- [134] Zhuang R. C., Doan T. T. L., Liu J. W., Zhang J., Gao S. L., Mäder E., (2011), “Multi-functional multi-walled carbon nanotube-jute fibres and composites”, *Carbon*, 49 (8), 2683–2692.
- [135] Islam M. J., Rahman M. J., Mieno T., (2020), “Safely functionalized carbon nanotube-coated jute fibers for advanced technology”, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 3 (3), 285–293.
- [136] Saiteja J., Jayakumar V., Bharathiraja G., (2020), “Evaluation of mechanical properties of jute fiber/carbon nano tube filler reinforced hybrid polymer composite”, *Materials Today: Proceedings*, 22, 756–758.
- [137] Tzounis L., Debnath S., Rooj S., Fischer D., Mäder E., Das A., Stamm M., Heinrich G., (2014), “High performance natural rubber composites with a hierarchical reinforcement structure of carbon nanotube modified natural fibers”, *Materials & Design*, 58, 1–11.
- [138] Chen Y., Chen W., Liang W., Wang Q., Zhang Y., Wang J., Chen C., (2020), “Graphene Oxide Nanoplatelets Grafted Jute Fibers Reinforced PP Composites”, *Fibers and Polymers*, 21 (12), 2896–2906.
- [139] Sadangi A., Kumar Panda K., Kumari K., Srivatsava M., Dalai N., (2022), “Comparison study of various properties of jute reinforced composites with different nanofillers”, *Materials Today: Proceedings*, 48, 1009–1014.
- [140] PA P., M S., (2019), “Viscoelastic and mechanical behaviour of reduced graphene oxide and zirconium dioxide filled jute/epoxy composites at different temperature conditions”, *Materials Today Communications*, 19, 252–261.
- [141] Amirabadi-Zadeh M., Khosravi H., Tohidlou E., (2021), “Preparation of silica-decorated graphene oxide nanohybrid system as a highly efficient reinforcement for woven jute fabric reinforced epoxy composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, 138 (2), 1–11.
- [142] Kishore M., Amrita M., Kamesh B., (2021), “Experimental investigation of milling on basalt-jute hybrid composites with graphene as nanofiller”, *Materials Today: Proceedings*, 43, 726–730.
- [143] Islam M., Rahman H., (2016), “Mechanical property evaluation of glass – jute fiber reinforced polymer composites”, *Polymers Advanced Technologies*, 1–9.

ÖZGEÇMİŞ

Sefa SÖNMEZ lise öğrenimini Gölcük İhsaniye Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra, 2007 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2012 yılında mezun oldu. 2019 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlayan Sefa SÖNMEZ, iş hayatına 2012-2015 yılları arasında SUPTEK Yağ Keçeleri San. ve Tic. A.Ş.'de Ürün Geliştirme Mühendisi olarak aldığı görevle başlamıştır. 2020'den itibaren MEKİSAN Asansör ve Çelik Konstrüksiyon San. Ltd. Şti.'de Kalite Yöneticisi olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Öktem A. S., Sönmez S., (2022), “Natural fiber reinforced graphene based composite material production and nvestigation of the mechanical properties”, Sivas International Conference On Scientific and Innovation Research, 88, Sivas, Türkiye, 13-15 October.

