

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PET ESASLI KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

Melis Eldem EKSEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Kimya Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Sennur DENİZ

Haziran, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PET ESASLI KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Melis Eldem EKSEN tarafından hazırlanan tez çalışması 30.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimya Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Sennur DENİZ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Sennur DENİZ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Halit Eren FİGEN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tülin Banu İYİM, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sennur DENİZ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan PET Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Melis Eldem EKSEN

İmza



Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü'nün FYL-2019-3565 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme
ve
biricik eşime

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince neler yapmam gerektiği konusunda yol gösterici olan, sahip olduğu bilgi birikimi ile çalışmalarına katkı sağlayan ve gelişmem konusunda destek veren Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Sennur Deniz'e,

Tez sürecim boyunca tezim ile ilgili yapmam gerekenler için malzeme temini, kaynak kullanımı ve temini konularında hiçbir zaman desteğini üzerimden eksik etmeyen, her konuda beni destekleyen KORTEKS MENSUCAT SANAYİ ve TİCARET A.Ş AR-GE Merkezi Müdürü Serdar Murat Cam'a,

Bu zamana kadar her an yanımda olan ve her konuda beni destekleyen ve bana sonuna kadar güvenen sevgili aileme,

Tez çalışmam için beni sürekli motive eden, beni destekleyen, her zaman yanımda olan eşim Kaan Eksen'e teşekkür ederim.

Melis Eldem EKSEN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	18
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	6
2 POLİMER MATRİS KOMPOZİTLER	8
2.1 Polimer Matris Kompozitler ve Özellikleri	8
2.2 Polimer Matris Kompozitlerin Yapısı	8
2.2.1 Matris Bileşenleri	9
2.2.2 Takviye Bileşenleri	14
2.3 Polimer Matris Kompozitlerin Hazırlanması	17
2.3.1 El Yatırması Yöntemi	17
2.3.2 Püskürtme Yöntemi	17
2.3.3 Elyaf/Filament Sarma Yöntemi	18
2.3.4 Profil Çekme (Pultrüzyon Yöntemi)	19
2.3.5 Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi	20
2.3.6 Sıkıştırılmalı Kalıplama/Presli Kalıplama Yöntemi	21
2.3.7 Ekstrüzyon Yöntemi	22
2.3.8 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi	22
2.3.9 Vakum Torbalı Kalıplama Yöntemi	23
2.3.10 Vakum İnfüzyon İşleme Yöntemi	24
2.4 Polimer Matris Kompozitlerin Kullanım Alanları	25
3 CAM ELYAF KATKILI PET KOMPOZİTLER	26
3.1 Cam Elyaf Üretimi	26
3.2 Önemli Cam Elyaf Türleri	28
3.2.1 Cam Elyaf Fitol	28

3.2.2	Cam Elyaf Keçe.....	30
3.2.3	Kırpılmış Cam Elyaf	30
3.2.4	Cam Tekstil İplikleri	31
3.3	PET İplik Üretimi	32
3.3.1	Direkt Üretim Yöntemi.....	33
3.3.2	PET Cipsten Lif Üretimi	35
3.4	Hibrit İplikler	38
3.4.1	Hibrit İplik Üretim Yöntemleri	38
3.5	Tekstil Yapısı Oluşturma	45
3.5.1	Dokuma Kumaşlar	45
3.5.2	Örme Kumaşlar	47
3.5.3	Örgülü (Braided) Kumaşlar	48
4	DENEYSEL ÇALIŞMA	49
4.1	Tez İçeriği	49
4.2	Cam Elyaf/PET Kompozitlerinin Hazırlanması	49
4.2.1	Sürekli Cam Elyaf/PET Hibrit İpliklerinin Üretimi.....	49
4.2.2	CE/PET Dokuma Kumaşların Hazırlanması.....	53
4.2.3	CE/PET Termoplastik Kompozit Plakaların Hazırlanması.....	54
4.2.4	Su Jeti İle Test Numunesi Kesimi	54
4.3	Cam Elyaf/PET Kompozitlerinin Karakterizasyonu	58
4.3.1	Termal Testler	58
4.3.2	Mekanik Testler	59
4.3.3	SEM Analizi.....	63
4.3.4	Optik Mikroskop Analizi	63
5	DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA	65
5.1	Kompozit Üretimi Optimum Parametre Analiz Sonuçları	65
5.1.1	CE35/PET Kompozit Numunesi Optimum Parametre Analizi	65
5.1.2	CE45/PET Kompozit Numunesi Optimum Parametre Analizi	66
5.1.3	CE55/PET Kompozit Numunesi Optimum Parametre Analizi	67
5.1.4	CE65/PET Kompozit Numunesi Optimum Parametre Analizi	69
5.2	Mekanik Test Sonuçları	70
5.2.1	CE/PET Hibrit İpliklerin Kopma/Çekme Testi Sonuçları.....	70
5.2.2	CE/PET Kumaşların Kopma/Çekme Testi Sonuçları	71
5.2.3	CE/PET Kompozit Plakaların Kopma/Çekme Testi Sonuçları	72

5.2.4	CE/PET Kompozit Plakaların 3 Nokta Eğme Testi Sonuçları.....	75
5.2.5	CE/PET Kompozit Plakaların Darbe Testi Sonuçları	77
5.3	Termal Analiz Sonuçları.....	78
5.3.1	CE/PET Hibrit İpliklerinin DSC Analiz Sonuçları.....	78
5.3.2	CE/PET Kompozit Plakaların DSC Sonuçları	79
5.3.3	CE/PET Kompozitlerinin Kül Miktarı Testi Sonuçları	80
5.4	SEM Analiz Sonuçları.....	80
5.4.1	CE/PET Hibrit İpliklerin SEM Analizi.....	81
5.4.2	CE/PET Kompozit Plakaların SEM Sonuçları.....	83
5.5	CE/PET Kompozit Plakaların Optik Mikroskop Analizi	87
6	SONUÇ ve ÖNERİLER	89
	KAYNAKÇA	93
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	99

SİMGE LİSTESİ

$\text{Sb}(\text{Ac})_3$	Antimontriasetat
T_g	Camsı Geçiş Sıcaklığı
dk	Dakika
T_m	Erime Sıcaklığı
$^{\circ}\text{F}$	Fahrenheit Derece
GPa	Gigapascal
g	Gram
J	Joule
kJ	Kilojoule
kN	Kilonewton
kV	Kilovat
m	Metre
m^2	Metre Kare
MPa	Megapascal
mm	Milimetre
ppm	Milyonda Parça
N	Newton
sn	Saniye
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
cm	Santimetre
cm^3	Santimetre Küp
H_2O	Su
TiO_2	Titanyum Dioksit
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

AE	Aramid Elyaf
CE	Cam Elyaf
CAI	Darbe Sonrası Sıkıştırma
DEG	Dietielen Glikol
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DGT	Diglikol Tereftalat
E-Cam	Elektrik Camı
EG	Etilen Glikol
S-Cam	Mukavemet Camı
AR-Cam	Alkali Dayanıklı Cam
C-Cam	Korozyon Camı
HS	Yüksek Mukavemetli
CE35/PET	Hacimce %35 Oranında Cam Elyaf İçeren Sürekli Cam Elyaf/Polietilen Tereftalat
CE45/PET	Hacimce %45 Oranında Cam Elyaf İçeren Sürekli Cam Elyaf/Polietilen Tereftalat
CE55/PET	Hacimce %55 Oranında Cam Elyaf İçeren Sürekli Cam Elyaf/Polietilen Tereftalat
CE65/PET	Hacimce %65 Oranında Cam Elyaf İçeren Sürekli Cam Elyaf/Polietilen Tereftalat
HTM	Isı Transfer Ortamı
2D	İki Eksenli
Dtex	İpliğin 10.000 Metresinin Gram Cinsinden Ağırlığı
KE	Karbon Elyaf
NSF	Kesintisiz Filtre
SMC	Levha Kalıplama Bileşiği
MEG	Monoetilen Glikol
TFP	Özel Elyaf Yerleşimi
PAN	Poliakrilonitril
PA	Poliamid
PA-12	Poliamid-12
PEEK	Polieter Eter Keton

PES	Polieter Sülfon
PET	Polietilen Tereftalat
PPS	Polifenilen Sülfid
PMK	Polimer Matris Kompozitler
PP	Polipropilen
PVA	Polivinil Alkol
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
PTA	Saf Tereftalik Asit
FDY	Tam Çekimli İplik
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
UV	Ultra Violet
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu
POY	Yarı Çekimli İplik
HDPE	Yüksek Yoğunluklu Polietilen

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Karıştırma prosesi	3
Şekil 2.1	Polietilen kimyasal yapısı	10
Şekil 2.2	Polipropilen kimyasal yapısı	10
Şekil 2.3	PET kimyasal yapısı	11
Şekil 2.4	Poliamid kimyasal yapısı	11
Şekil 2.5	El yatırması yöntemi	17
Şekil 2.6	Püskürtme yöntemi	18
Şekil 2.7	Filament sarma yöntemi	19
Şekil 2.8	Pultrüzyon yöntemi	20
Şekil 2.9	RTM yöntemi	21
Şekil 2.10	Sıkıştırılmalı kalıplama yöntemi	22
Şekil 2.11	Ekstrüzyon yöntemi	22
Şekil 2.12	Enjeksiyon kalıplama yöntemi	23
Şekil 2.13	Vakum torbalı kalıplama yöntemi	24
Şekil 2.14	Vakum infüzyon işleme yöntemi	24
Şekil 3.1	Cam elyaf üretimi için fırın	27
Şekil 3.2	Cam elyaf üretim prosesi	27
Şekil 3.3	Çok uçlu fitil üretim süreci	29
Şekil 3.4	Cam elyaf fitil	29
Şekil 3.5	Cam elyaf keçe	30
Şekil 3.6	Kırılmış cam elyaf	31
Şekil 3.7	Cam tekstil ipliği	32
Şekil 3.8	Esterleşme	33
Şekil 3.9	Soğutma havası	35
Şekil 3.10	Cips kesme ve depolama	35
Şekil 3.11	Polimer kabloları	36
Şekil 3.12	Ekstrüder	38
Şekil 3.13	Katlamalı büküm tekniği	39
Şekil 3.14	Büküm: (a) tek büküm, (b) çift büküm	39
Şekil 3.15	Klasik ring eğirme	40

Şekil 3.16 Döner eğirme	41
Şekil 3.17 Modifiye açık uçlu döner eğirme	41
Şekil 3.18 Sarmal eğirme tekniği	42
Şekil 3.19 Karıştırma (Commingling) yöntemi	43
Şekil 3.20 Paralel sarım ile hibrit iplik yapısı	44
Şekil 3.21 Kemafil tekniği ile üretilen hibrit iplik yapısı	44
Şekil 3.22 Temel 2D dokuma yapıları	46
Şekil 3.23 Temel örgü yapıları	47
Şekil 3.24 Örgülü kumaş örneği	48
Şekil 4.1 Hava jetli karıştırma makinesi	51
Şekil 4.2 Sürekli cam elyaf/PET hibrit ipliklerin görünümü: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET, (d) CE65/PET	52
Şekil 4.3 Dornier makinesi	53
Şekil 4.4 Dimi 2/2 kumaş yapısı	53
Şekil 4.5 Manuel basınç kontrollü pres	55
Şekil 4.6 Üretilen kompozit plaka görüntüleri: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE65/PET	55
Şekil 4.7 Otomatik basınç kontrollü pres	56
Şekil 4.8 Kompozit test plakaları: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET, (d) CE65/PET	56
Şekil 4.9 Su jeti kesim sistemi	58
Şekil 4.10 (a) DSC cihazı (hibrit iplikler), (b) TA Instrument Q2000 DSC Cihazı (kompozit plakalar)	59
Şekil 4.11 Kül fırını	59
Şekil 4.12 (a) Shimadzu AGS-X 10 kN, (b) Besmak BMT 100 E 100 kN	61
Şekil 4.13 Yük altındaki kompozit test numunesi	62
Şekil 4.14 Instron CEAST 9340	63
Şekil 4.15 TESCAN VEGA 3 SEM analiz cihazı	64
Şekil 4.16 Leica DM 4000M optik mikroskop	64
Şekil 5.1 Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE35/PET 1. Test, (b) CE35/PET 2. Test	66
Şekil 5.2 Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE45/PET 1. Test, (b) CE45/PET 2. Test	67

Şekil 5.3	Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE55/PET 1. Test, (b) CE55/PET 2. Test	68
Şekil 5.4	Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE65/PET 1. Test, (b) CE65/PET 2. Test	70
Şekil 5.5	Cam elyaf SEM görüntüsü.....	81
Şekil 5.6	PET iplik SEM görüntüsü	81
Şekil 5.7	CE/PET hibrit ipliklerinin SEM görüntüleri: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET, (d) CE65/PET	82
Şekil 5.8	CE35/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x	83
Şekil 5.9	CE45/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x	84
Şekil 5.10	CE55/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x	85
Şekil 5.11	CE65/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x	86
Şekil 5.12	CE/PET kompozit plakalarının yüzey optik mikroskop görüntüleri: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET, (d) CE65/PET.....	87

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Termoplastik ve termoset matrislerin karşılaştırılması.....	14
Tablo 4.1	Kullanılan PET iplik ve cam elyaf özellikleri.....	50
Tablo 4.2	Hazırlanan CE/PET hibrit ipliklerinin bileşimleri	52
Tablo 4.3	CE/PET hibrit iplik üretim parametreleri	52
Tablo 4.4	Dokunan kumaş numunelerinin özellikleri.....	54
Tablo 4.5	Otomatik basınç kontrollü yöntemde proses parametreleri.....	57
Tablo 5.1	CE35/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları	65
Tablo 5.2	CE45/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları	67
Tablo 5.3	CE55/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları	68
Tablo 5.4	CE65/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları	69
Tablo 5.5	CE/PET hibrit ipliklerinin kopma/çekme dayanımı test sonuçları.....	71
Tablo 5.6	CE/PET kumaşların kopma dayanımı test sonuçları	71
Tablo 5.7	Manuel basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların kopma dayanımı test sonuçları.....	73
Tablo 5.8	Otomatik basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların kopma dayanımı test sonuçları.....	74
Tablo 5.9	Manuel basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların eğilme dayanımı sonuçları	75
Tablo 5.10	Otomatik basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların eğilme dayanımı sonuçları	76
Tablo 5.11	CE/PET kompozit plakaların darbe testi sonuçları.....	77
Tablo 5.12	CE/PET hibrit ipliklerin DSC analiz sonuçları.....	79
Tablo 5.13	CE/PET kompozitlerinin DSC analiz sonuçları	79
Tablo 5.14	Kompozit kül miktarı sonuçları	80

PET Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Melis Eldem EKSEN

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sennur DENİZ

Termoset kompozitlere kıyasla yüksek hasar toleransı, geri dönüşüm ve enerji absorpsiyon yetenekleri nedeniyle termoplastik kompozitlerin kullanımına olan ilgi ve talep her geçen gün artmaktadır. Termoplastik kompozitlerin birçok avantajı olmasına rağmen, yüksek erime viskoziteleri, kompozitlerin üretimi sırasında sıkı dokuma veya tek yönlü tekstil preformlarında gözenekleri doldurmak için büyük bir endişe kaynağıdır. Bu problem takviye malzemesi ve termoplastik liflerin birlikte karıştırıldığı hibrit ipliklerin kullanımı ile çözülebilir. Bu tez kapsamında termoplastik matris malzemesi olarak poli(etilen tereftalat) (PET) iplik, takviye malzemesi olarak ise sürekli cam elyaf (CE) kullanılarak hava ile karıştırma metoduyla hacimce farklı oranlarda cam elyaf içeren (%35, 45, 55 ve 65) CE/PET hibrit iplikler üretilmiştir. Üretilen hibrit iplikler dokunmuş ve sıcak pres kullanılarak termoplastik kompozit plakalara dönüştürülmüştür. Elde edilen termoplastik kompozit plakaların mekaniksel özelliklerinin tespiti için kopma-çekme, üç nokta eğme ve darbe testleri uygulanmıştır. Termal özelliklerinin tespiti için DSC kullanılmıştır. Mikroyapısal özelliklerinin tespiti için de optik mikroskop ve SEM analizleri yapılmıştır. Yapılan tüm bu çalışmaların sonucunda optimum hibrit iplik üretim parametleri ve hibrit iplik içerisindeki optimum hacimce cam elyaf oranı tespit edilmiştir. Hacimce cam elyaf oranının

artmasıyla kompozit malzemenin mekaniksel özelliklerinin de arttığı tespit edilmiştir. CE/PET hibrit ipliklerinin ve kompozit plakalarının SEM ve optik mikroskop analizleri de bu sonucu desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Sürekli cam elyaf, PET, hibrit iplik, termoplastik kompozit



Production and Characterization of PET Based Composites

Melis Eldem HEPER

Department of Chemical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Sennur DENİZ

The interest and demand for the use of thermoplastic composites is increasing day by day due to their high damage tolerance, recycling and energy absorption capabilities compared to thermoset composites. Despite the many advantages of thermoplastic composites, their high melt viscosities are a major concern during the manufacture of composites to fill pores in tightly woven or unidirectional textile preforms. This problem can be solved by the use of hybrid yarns in which reinforcement material and thermoplastic fibers are mixed together. Within the scope of this thesis, hybrid yarns containing glass fiber in different volume ratios (35%, 45%, 55% and 65%) were produced by using PET yarn as thermoplastic matrix material and continuous glass fiber as reinforcement material, by air mixing method. The hybrid yarns produced were woven and converted into thermoplastic composite plates using a hot press. In order to determine the mechanical properties of the obtained thermoplastic composite plates, tensile, 3-point bending and impact tests were applied. DSC was used to determine its thermal properties. Optical microscope and SEM analyzes were performed to determine the microstructural properties. As a result of all these studies, optimum hybrid yarn production parameters and optimum glass fiber ratio in hybrid yarn were determined. It has been determined that the mechanical properties of the

composite material increase with the increase of the glass fiber ratio by volume up to a certain rate. The results of SEM and optic microscope also support this result.

Keywords: Continuous glass fiber, PET, hybrid yarn, thermoplastic composite



1.1 Literatür Özeti

Polimer matris kompozitler, otomotiv, havacılık, denizcilik ve spor malzemeleri gibi uygulamalarda metallerin ikame malzemeleri olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Üstün mekanik özellikleri ve hafif olmaları polimer matris kompozitleri bu uygulamalar için uygun kılar. Elyafli kompozit malzemeler, takviye edici elyaf lar ve matris malzemesini içeren iki veya daha fazla farklı faza sahiptir. Elyaf lar sürekli formda ya da kırılmış yani süreksiz formda olabilir. Polimer matrisler termosetler ve termoplastikler olarak iki kategoriye ayrılır [1].

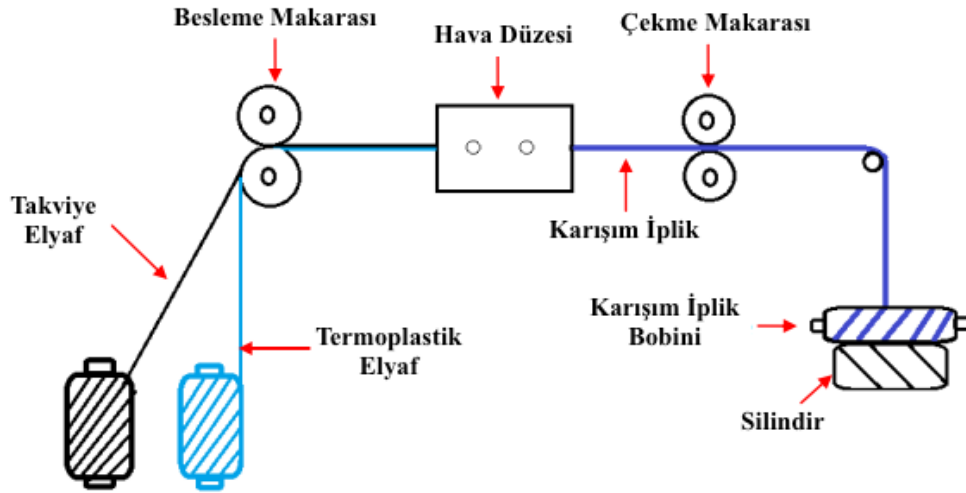
Termoplastik polimerler, ısı uygulanması ile yeniden şekillendirilebilme yeteneğine sahiptirler. Termoset polimerler ise k urenme sırasında polimer molek ullerini çapraz bağlayan kimyasal reaksiyonlara girerler. Termoset reçineler bir kez çapraz bağlandıklarında, kalıcı olarak sertleşir ve aşırı ısı uygulaması altında kolayca kimyasal bozunmaya uğrarlar. Termoplastik polimerler, termoset polimerlere göre daha iyi darbe özellikleri ve bük ülme özellikleri sergilerken termoset polimerler termoplastik polimerlere göre daha fazla boyutsal stabiliteye ve daha fazla aşınma direncine sahiptir. Ayrıca termoplastik kompozitler genellikle termoset kompozitlerden daha yüksek kırılma gerilmesi özelliği sergilerler ve bu nedenle de daha iyi yorulma dayanıklılığına ve kırılma tokluğuna sahiptirler. Termoplastik kompozitlerin işlenmesi matris malzemesinin ısıtılması ve soğutulması ile ilgili olduğu için termoplastik kompozitler termoset kompozitlere göre daha basit ve daha kısa sürelerde işlenir [1]. Ayrıca, birçok polimer matris kompozitlerinde olduğu gibi, bu malzemeler de çoğunlukla yeterli fiber-matris yapışma eksikliği konusunda sıkıntılıdırlar. Ek olarak, termoplastiklerin kullanımı, elyaf için yetersiz reçine penetrasyonu problemini ortaya çıkarır. Termoplastik eriyikler, termoset reçinelerin aksine, önemli ölçüde daha yüksek viskoziteye sahiptir. Reçineyi sıkı dokunmuş bir tekstil yapısına

enjekte etmek yüksek viskozite nedeniyle çok zordur. Bu problem, kompozit malzemede yüksek seviyede enjeksiyon basıncı ve daha ağır kalıplar kullanılarak üstesinden gelinmesi gereken boşluk içeriğini arttırır. Konsolidasyon sırasında kompozit ürün içerisindeki boşlukların oluşması ve takviye edici liflerin hizasının bozulması yüksek matris viskozitesinin neden olduğu diğer problemlerdir. Hibrit ipliklerin kullanılmasıyla kütle aktarım mesafesinin azaltılması bu problemin çözümlerinden biridir [2]. Matris ve takviye liflerinin homojen dağılımı, lifler arasında daha az mesafe [1] ve bazı termoset matrislere [3, 4, 5] kıyasla daha kısa çevrim süreleri sağlar. Matris filamentleri, polipropilen, naylon veya polyester gibi termoplastik liflerden oluşabilir. Isıtma ve konsolidasyon sırasında bu termoplastik lifler erir ve kompozitin matrisini oluşturur [6]. Emprenye aşaması, boşluklardan veya reçine açısından zengin alanlardan kaçınmak için termoplastik kompozit üretimi sırasında en kritik adımdır.

Karıştırma işleminde, takviye (yüksek performans) ve matris (termoplastik) multifilament veya iplikler, bir düzeden geçen hava akışının etkisiyle karıştırılır [7, 8]. Şekil 1.1, iki farklı iplik türünü karıştırmak için kullanılan temel bir birleştirme üretim hattını göstermektedir. Bu süreç, karbon elyaf (KE) ve cam elyaf (CE) gibi hemen hemen her türlü takviye ve polimer matris kombinasyonuyla çalışma fırsatı verir. Örneğin; KE/PEEK [9], CE/PA [10], CE/PP [11], AR-CE/PVA [12], KE/CE/PES, CE/AE/PES, KE/AE/PES, KE/CE/PEEK, CE/AE/PEEK, KE/AE/PEEK, KE/CE/PP, CE/AE/PP ve KE/AE/PP [13], CE/PET, CE/Naylon ve CE/PP [2] karışık iplikler farklı araştırmacılar tarafından başarılı bir şekilde üretilmiştir.

Gaceva ve arkadaşları [14], hibrit iplik numarası, PET elyaf özellikleri ve preform tekstil yapısının atkılı örme cam/PET kompozit mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Daha ince hibrit iplikten elde edilen kompozitlerin daha yüksek mekanik özellikler ve daha az sonuç çeşitliliği sağladığı gösterilmiştir. Daha düşük kristalliteye sahip, boyutlandırılmamış, gerdirilmemiş PET elyaflardan elde edilen kompozit, çekilmiş/boyutlu PET elyaflara kıyasla %30 daha yüksek mekanik özellikler sergilemiştir. Atkı örgülü preform yapısının, kompozitin mekanik özelliklerini etkileyebileceği görülmüştür.

Karıştırılmış/hibrit iplikler esas olarak farklı hammadde türleri kullanılarak örgülü, örme veya dokuma preformları üretmek için kullanılır. McDonnell ve arkadaşları [15], sıkıştırma kalıplama kullanarak karbon/PA-12 hibrit ipliklerden yapılmış termoplastik kompozitler üretmiştir. Hibrit iplikler kullanılarak dimi dokuma, saten dokuma ve çift eksenli kollu örgü kumaşlar üretilmiştir. Ayrıca hibrit termoplastik kompozitlerin mekanik performansını bazı ticari termoset ve termoplastik kompozitlerle karşılaştırmışlardır. Daha yüksek sıcaklık ve işlem sürelerinin daha iyi mekanik özellikler ürettiğini gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, ticari kompozitlere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti değerlerinin elde edildiğini göstermiştir. Basınç dayanımı değerleri, diğer sistemlere göre daha düşük çıkmıştır. Bununla birlikte, hibrit kompozit plaka, sert bir termoplastik matris kullanılması nedeniyle yüksek hasar tolerans performansı göstermiştir.



Şekil 1.1 Karıştırma prosesi

Ogale ve Alagirusamy [16], sıkıştırma kalıplama kullanarak cam/PP karıştırılmış ipliklerden yapılmış termoplastik kompozitler üretmiştir. Cam ve PP ipliklerin yan yana yöntemle film istiflenmesi ve sarılmasıyla yapılan termoplastik kompozitlerle karıştırılmış kompozitlerin mekanik performansını karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, cam ve PP lifleri arasındaki kütle transfer mesafesinin azalması nedeniyle karıştırılmış plakaların diğer plakalardan daha düşük boşluk içeriğine sahip olduğunu göstermiştir. Çekme testi sonuçları, karıştırılmış plakanın, yan

yana ve film istiflenmiş laminatlardan daha yüksek gerilme mukavemetine ve kopma uzamasına sahip olduğunu göstermiştir.

Mader ve arkadaşları [4], cam/PP karıştırılmış ve hava tekstürize iplikler kullanarak tek yönlü termoplastik kompozit plakalar üretmiştir. İplik çekme testi sonuçları, karıştırma işlemi sırasında daha az cam elyaf hasarı nedeniyle karıştırılmış ipliklerin hava tekstürize ipliklerden daha yüksek çekme mukavemeti değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, karıştırılmış plakaların çekme mukavemeti, hava tekstürize plakalardan daha yüksek görülmüştür.

Lauke ve arkadaşları [17], sıkıştırma kalıplama kullanarak termoplastik kompozit yapılar üretmek için çeşitli hibrit cam-poliamid iplikler üretmiştir. Elde ettikleri sonuçlar, schappe ve karıştırma (commingling) kompozit numunelerinde en iyi fiber karıştırma derecesinin elde edildiğini göstermiştir. Daha homojen lif dağılımı, emprenye kalitesi ve matris/lif yapışması nedeniyle enine mukavemet ve modül değerleri de diğer numunelere göre daha yüksektir.

Shonaike ve arkadaşları [18], emprenye tekniklerinin cam elyaf takviyeli polietilen tereftalat (PET) eğilme özellikleri üzerindeki etkisini kontrol etmek için bir araştırma yapmışlardır. Emprenye tekniklerinde karışım iplik (commingled) ve paralel iplik yöntemleri kullanılmıştır. İmalat sırasında bekletme süresi 1 ile 20 dakika arasında değişmiştir. Sonuçlar, karıştırılmış ipliğin düşük basınçta iyi emdirme özellikleriyle üretilebileceğini, paralel ipliğin ise matris reçinesinin elyafa iyi bir şekilde emdirilmesinden önce yüksek bir basınç gerektirdiğini göstermiştir. Karışım iplik kompozitlerinin eğilme özelliklerinin, paralel iplik kompozitlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Shonaike ve arkadaşları [19], sıkıştırmayla kalıplanmış tek yönlü CE/PET kompozitlerinin hızlı soğutulması ile karşılaştırıldığında, kademeli soğutmanın fiber yönünde daha yüksek bir eğilme modülü verdiğini ancak enine yönde daha düşük bir modül verdiğini gözlemlemişlerdir. PET matrisi ve cam elyafları arasındaki zayıf yapışma nedeniyle enine mukavemetler için çok düşük değerler görülmüştür. Öte yandan, hızlı soğutulan numunelerde daha yüksek kırılma tokluğu görülmüştür.

Oyuk yapısal termoplastik kirişler (birleştirilmiş CE/PET) ve termoset sandviç kirişler (CE/epoksi, CE/polyester, CE/vinilester), Svensson ve arkadaşları [20], tarafından sırasıyla sıkıştırma kalıplama ve reçine transfer kalıplama kullanılarak üretilmiştir. Kirişlerin sıkıştırma tarafında başlayan problemlerinin, termoplastik kirişler için daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

Kompozit plakaların darbe ve hasar toleransı, hibrit iplikler veya preformlar kullanılarak geliştirilebilir. Çalışmalar, kırılabilir (cam veya karbon) liflerin aramid, yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ve geleneksel termoplastik lifler ile birleştirilmesiyle kompozit laminatların enerji absorpsiyon kapasitesinin başarılı bir şekilde artırılabilirliğini göstermiştir [21-24].

Arun ve arkadaşları [25], E-cam ve farklı miktarda ipek lifi içeren hibrit kompozitler üretmiştir. Çentikli çekme, kısa kiriş eğme ve darbe testleri yapılmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, artan cam kumaş hacmi ile darbe tokluğunun arttığını göstermiştir.

Gonzalez ve arkadaşları [26] dokuma karbon kumaştan, dokuma cam kumaştan ve tek yönlü karbon bantlardan yapılan hibrit kompozit plakaların ağırlık düşürme darbe tepkisini araştırmıştır. Sonuçlardan, kumaş dizisinin değiştirilmesiyle CAI ve darbe sonuçlarının önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Dokuma kumaşlar orta düzlemde kullanıldığında darbe enerjisi yayılımının azaldığını ve bunun kalıntı özelliklerinde bir artışa yol açtığını gözlemlemişlerdir.

Termoplastik plakalar, termosetlere kıyasla çok daha sert matris sistemleri oldukları için darbe kaynaklı hasar alanlarını azaltabilir [27]. Önceki çalışmalar, termoplastik kompozitlerin termoset kompozitlere göre daha iyi darbe ve hasar toleransı sergilediğini göstermiştir [28].

Vieille ve arkadaşları [27], termoplastik matrislerin (PPS veya PEEK) kullanılmasıyla, epoksi bazlı termoset kompozitlere kıyasla darbe yükü altında delaminasyon alanlarının azaldığını gözlemlemiştir.

Uraril ve Newaz [29] karbon/PEEK ve karbon/epoksi kompozit plakaların darbe ve CAI yanıtını karşılaştırmıştır. Termoplastik plakaların termoset kompozitlere

kıyasla %12 ile %60 daha küçük darbe kaynaklı hasar alanlarına sahip olduğunu, termoplastik kompozitlerde daha yüksek CAI mukavemet değerlerine ulaşıldığını gözlemlemişlerdir.

Erkendirci ve Haque [30], S-cam/HDPE, E-cam/HDPE ve S-cam/epoksi kompozit numunelerin darbe davranışlarını analiz etmişlerdir. Sonuçlar, termoplastik kompozitlerin, HDPE reçinesinin visko-elastik davranışı nedeniyle termoset örneklerine kıyasla daha düşük sertlik, daha düşük enerji dağılımı ve daha düşük hasar alanına sahip olduğunu göstermiştir.

Lagattu ve Lafarie-Frenot [31], çekme davranışlarını araştırmak için karbon/PEEK termoplastik ve karbon/epoksi termoset kompozitler üretmiştir. Elde ettiği sonuçlar, plakalar için termoplastik kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinin epoksi bazlı numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, hacimce farklı oranlarda (%35, 45, 55 ve 65) cam elyaf (CE) içeren CE/PET hibrit ipliklerin kompozit malzemeye dönüştürülmesi, üretilen kompozit malzemelerin karakterizasyonu ile birlikte optimum hacimce cam elyaf-PET iplik karışımının elde edilmesi ve bunları gerçekleştirirken en uygun proses parametrelerine ulaşılmasıdır. Hazırlanan CE/PET hibrit ipliklerinden dokunan kumaşlardan sıcak pres kalıplama ile CE/PET termoplastik kompozit plakalar üretilerek mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesidir.

1.3 Hipotez

Termoplastik kompozitlerin kullanım alanları otomotiv, havacılık, savunma, spor malzemeleri gibi bir çok alanda giderek artmaktadır. Bu kompozitlerin çeşitli üretim teknikleri olmasına rağmen yüksek erime viskoziteleri nedeniyle zor emprenye edilmelerinden dolayı termoplastik malzemelerle çalışmak kolay değildir. Bu nedenle bu çalışmada termoplastik malzemelerin yüksek erime viskozitesi problemine çözüm olabilecek hibrit iplikler kullanılmıştır. Hibrit

iplikler matris ve takviye liflerinden oluşan karışım ipliklerdir. Bu çalışmada ucuz olması, kolay bulunabilmesi ve iyi mukavemet özelliğine sahip olması nedeniyle cam elyaf ve PP gibi ucuz ve kolay bulunan polimere göre daha iyi termal direnç ve daha yüksek mukavemet gösterdiği için PET kullanılması tercih edilmiştir. Ayrıca kısa/kırpılmış cam elyaflara göre sürekli cam elyafların daha iyi mukavemet sağlaması nedeniyle sürekli cam elyaf kullanımı tercih edilmiştir. Bu çalışma, farklı oranlarda sürekli cam elyaf içeren CE/PET hibrit iplikleri kullanılarak oluşturulan sürekli cam elyaf/PET termoplastik kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerinin detaylı olarak karşılaştırmasını içereceğinden literature katkı sağlayacaktır.



2.1 Polimer Matris Kompozitler ve Özellikleri

Ticari olarak üretilen kompozitlerin çoğunda reçine solüsyonu adı verilen bir polimer matris malzemesi kullanılır. Başlangıçtaki ham bileşenlere bağlı olarak birçok farklı polimer mevcuttur. Takviye malzemeleri olarak genellikle lifler kullanılır ancak bunlar ortak zemin mineralleri de olabilir. Polimer matris kompozitler (PMK) basit üretim yöntemleri ve düşük maliyetleri nedeniyle çok popülerdir. Takviye edilmemiş polimerlerin yapı malzemeleri olarak kullanımı, mukavemet, darbe direnci ve modül gibi mekanik özelliklerinin düşük seviyesiyle sınırlıdır [32]. Polimerlerin güçlü lifli ağ ile güçlendirilmesi, aşağıdakilerle karakterize edilen PMK'lerin imalatına izin verir:

- Yüksek özgül güç
- Yüksek kırılma tokluğu
- Yüksek özgül sertlik
- İyi darbe direnci
- İyi aşınma direnci
- İyi korozyon direnci
- Uygun maliyet
- İyi yorulma direnci

2.2 Polimer Matris Kompozitlerin Yapısı

Polimer matris kompozitler yapıyı bir arada tutan matris bileşeninden ve yapıya rijitlik ve dayanıklılık kazandıran takviye bileşeninden oluşur.

2.2.1 Matris Bileşenleri

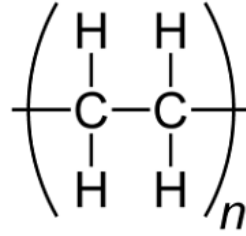
Polimer matris kompozitlerde matris bileşeni olarak polimerler kullanılır. Polimerler sahip oldukları özelliklere göre termoplastik ve termoset olarak 2 gruba ayrılırlar.

2.2.1.1 Termoplastik Polimerler

Termoplastikler, polimer matris kompozitlerin şu an için nispeten daha küçük bir bölümünü oluşturmaktadır. Genellikle reaktif olmayan yani işlenme aşamasında kimyasal reaksiyon oluşturmeyen katılar olarak tedarik edilirler ve ürün haline gelebilmek için ısı ve basınç gerektirirler. Termoplastikler, termosetlerden farklı olarak yeniden ısıtılabilir ve istenirse başka bir şekle dönüştürülebilir. Termoplastik polimerler, genellikle mühendislik termoplastikleri ve yüksek sıcaklık termoplastikleri olarak iki sınıfa ayrılırlar. Sınıflandırma, polimerlerin camsı geçiş sıcaklığını (T_g) baz alan maksimum servis sıcaklığına dayanır. Termoset polimerler T_g 'lerinin üzerinde mekanik yükleri taşımayabilir, ancak yarı kristalin termoplastik polimerler, yalnızca polimerin amorf fazı lastiksi hale geldiğinden T_g 'lerinin üzerinde yük taşıyabilir. Polimerin kristal kısmı, erime sıcaklığı olan T_m 'ye kadar katı kalır [33].

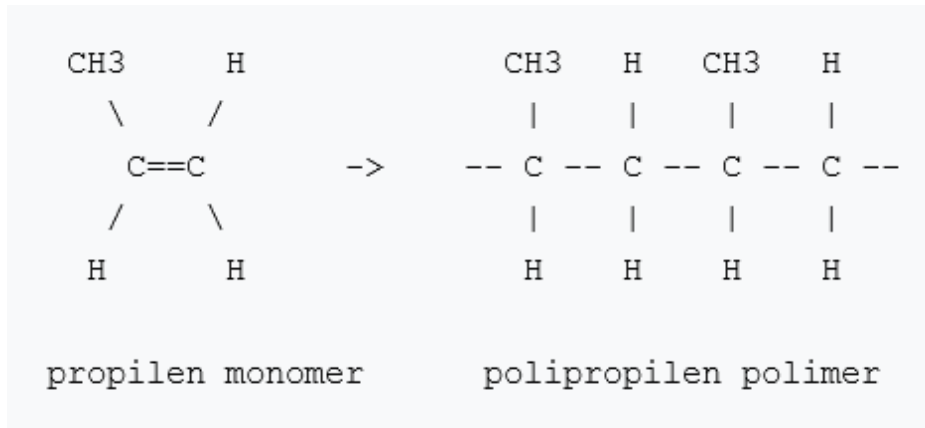
Günlük yaşamımızda yaygın olan geleneksel veya endüstriyel plastikler (polietilen, polipropilen, polietilen tereftalat, poliamid vb.) dayanımlarını artırmak için takviye edilebilir. Hangi geleneksel polimer matrislerin kullanılacağına seçimi, genellikle maliyet, işlenebilirlik gibi matris malzemesi ile ilişkili özellikler tarafından belirlenir [34].

Polietilen (PE), poliolefin reçinesi ailesinin bir üyesi ve dünyada en çok kullanılan plastiktir. Etilenin katalitik polimerizasyonu ile hazırlanan ve uzun zincirlerden oluşan termoplastik bir polimerdir. Polimerizasyon moduna bağlı olarak en çok kullanılan polietilen tipleri lineer düşük yoğunluklu polietilen, dallanmış düşük yoğunluklu polietilen ve doğrusal yüksek yoğunluklu polietilendir. Polietilenler, tokluğa, mükemmel kimyasal dirence ve mükemmel elektriksel yalıtım özelliklerine ve işleme kolaylığına sahip kristalin termoplastiklerdir [36]. Polietilen'in kimyasal yapısı şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Polietilen kimyasal yapısı [40]

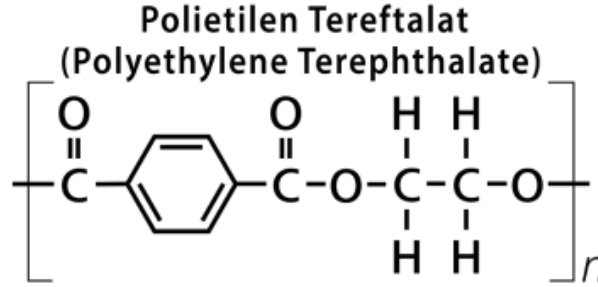
Polipropilen (PP), Polipropilen, Ziegler-Natta katalizörleri kullanılarak propilen monomerlerinin kombinasyonundan yapılan termoplastik bir ilave polimerdir. Monomer propilen, petrol rafinerilerinden bir ürün olarak elde edilir. Polipropilen, sindiyotaktik, izotaktik veya ataktik formlarda hazırlanabilir. Yumuşama sıcaklığı 100°C derecenin üzerindedir. Asit, alkali, yağ vb. birçok kimyasala dayanıklıdır ancak polietilene göre oksidasyona daha az dirençlidir. Isı ve ışığa karşı kararlılığı polietilenden daha düşükken, PP mükemmel mekanik ve dielektrik özelliklere sahiptir. PP otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, kimyasal tanklar, akü dolapları, depolama tankları, iç ve dış mekan halıları gibi ürünlerin üretilmesinde de kullanılabilir [37]. Polipropilenin kimyasal yapısı şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Polipropilen kimyasal yapısı [41]

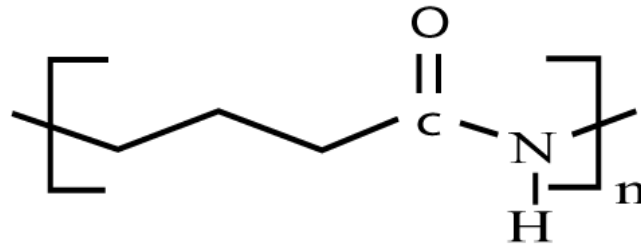
Polietilen tereftalat (PET), genellikle polyeşter olarak adlandırılır. PET, etilen glikol ve tereftalik asitten sentezlenen yarı aromatik bir polimerdir. 67–81°C arasında camsı geçiş sıcaklığına sahip olup erimesi 260°C’de gerçekleşir. Uygun oksijen bariyeri özelliği ve mükemmel nem performansı nedeniyle endüstriyel

uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. PET, 150–175°C'ye kadar önemli mekanik dayanıma, tokluğa ve termal dirence sahiptir. PET'in ana uygulamaları, meşrubat kabı, giyim, perde, döşeme, iplikler, lastik kord iplikleri, endüstriyel elyaflar ve endüstriyel filtreleme için kumaştır [38]. PET'in kimyasal yapısı şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 PET kimyasal yapısı [42]

Poliamid (PA), bir diasidin bir diamin ile reaksiyonu veya laktamların halka açılma polimerizasyonu ile üretilen önemli bir yüksek performanslı mühendislik termoplastik sınıfıdır. Alifatik, tam aromatik veya yarı aromatik termoplastik olabilirler. Aramidler olarak adlandırılan aromatik poliamidler, tüm alifatik amidlerden (Naylon) daha iyi çözücüye, yüksek mukavemete, ısı direncine, alev direncine ve daha büyük boyutsal kararlılığa sahiptir fakat daha pahalı ve üretilmesi daha zordur. En çok bilinen türleri Naylon 6 ve Naylon 6.6'dır [39]. Poliamid'in kimyasal yapısı şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Poliamid kimyasal yapısı [43]

2.2.1.2 Termoset Polimerler

Isıyla sertleşen malzemeler veya "termosetler", polimer ve sertleştirici veya reçine ve katalizörün karıştırıldığı ve daha sonra sert, erimeyen bir ürün oluşturmak için tersine çevrilemeyen bir kimyasal reaksiyona girdiği yerinde bir kimyasal reaksiyondan oluşur. Termoset reçine kullanılarak bitmiş bir ürün elde etmek için kürlleme maddesi ve takviye malzemesi gereklidir. Termoset reçine ile üretilen ürün sertleştikten sonra değiştirilemez ve düzeltilemez. En çok kullanılan termoset reçine türleri epoksi, polyester ve vinil esterdir [33].

Polyester reçineler, özellikle denizcilik endüstrisinde en yaygın kullanılan reçine türleridir. Polyester reçineler genellikle "doymamış" tiptedir. Doymamış polyester reçine, doğru koşullara tabi tutulduğunda sıvı veya katı halde kürlenebilen bir termoset malzemedir. Çoğu polyester reçinesi, genellikle stiren olan monomer içindeki bir polyester çözeltisinden oluşan viskoz, soluk renkli sıvılardır. %50'ye varan miktarlarda stiren ilavesi, viskoziteyi düşürerek reçinenin işlenmesini kolaylaştırmaya yardımcı olur. Stiren ayrıca, herhangi bir yan ürün gelişmeden, polyesterin moleküler zincirlerinin çapraz bağlanmasını ve reçinenin sıvıdan halden katı hale geçmesini sağlar. Bu nedenle bu reçinelerin kalıplanabilmesi için basınca gerek yoktur. Polyester reçineler, hiçbir etkiye gerek olmaksızın jelleşecekleri veya sertleşecekleri için sınırlı bir saklama ömrüne sahiptirler. Bu sertleşme etkisini yavaşlatmak için reçine üretimi sırasında genellikle küçük miktarlarda inhibitör eklenir. Kalıplamada kullanım için, bir polyester reçine içerisine birkaç yardımcı ürünün eklenmesi gerekir. Bu ürünler genellikle katalizör, hızlandırıcı ve katkı maddeleridir [33].

Vinil ester reçineleri, vinil gruplarının reaksiyona girmesiyle çapraz bağlanabilen ve ısıyla sertleşen reçinelerdir. Hazırlanmaları, epoksi reçinelerin metakrilik asit gibi doymamış vinil asitlerle esterleştirilmesi esasına dayanır. Reçineler elde edildikten sonra reaktif monomerlerde çözülür. Vinil ester reçineler kolay işlenir ve kürlenmemiş durumdaki fiziksel özellikleri polyester reçineler ile benzerlik gösterir. Ayrıca vinil esterler çapraz bağlandıklarında geleneksel polyester reçinelere göre daha mukavemetli ve daha sert özellik gösterirler. Vinil ester

reçineleri esas olarak cam, karbon veya aramid elyaf takviyeli plastiklerde kolayca ıslatıp yapıştırıldıkları matris reçineleri olarak kullanılır. Bu reçineler daha çok laminasyon, filament sarma ve pultrüzyon uygulamaları için tercih edilirler. En fazla kullanım alanı buldukları sektör ise kimyadır. Genellikle borular, tanklar gibi korozyona dayanıklı bileşenler ve kaplamalar için kullanılırlar ve geleneksel polyester reçineler ve epoksiler arasındaki boşluğu doldururlar [35].

Epoksi reçineler, çok uzun zamandır endüstride kullanılmaktadır. Bisfenol-A ve epiklorohidrin'in reaksiyon ürünü endüstride en fazla kullanılan bazik epoksi bileşikleridir. Epoksilerin polyester reçinelerden farkı, bir sertleştirici ile kürlenmeleridir. Bu sertleştirici çoğunlukla amindir ve epoksiyi kimyasal reaksiyonda her iki malzemenin de yer aldığı bir ekleme reaksiyonu ile sertleştirmek için kullanılır. Her amin bölgesine bağlanan iki epoksi bölgesinin olması bu reaksiyonun kimyası olarak adlandırılır. Bu şekilde karmaşık bir üç boyutlu moleküler yapı oluşturur. Genellikle karakteristik kehribar rengi veya kahverengi rengiyle tanımlanabilen epoksi reçinelerin bir çok yararlı özelliği vardır. Hem sıvı reçine hem de sertleştirme ajanları, düşük viskoziteli, kolay işlenen sistemler oluşturur. Epoksi reçineler, 5°C ile 150°C arasındaki herhangi bir sıcaklıkta kürleme ajanı seçimine bağlı olarak hızlı ve kolay bir şekilde kürlenir. Epoksi reçineler yüksek mekanik özellikler ve yüksek yapışma mukavemeti sergilerken aynı zamanda iyi kimyasal direnç ve yüksek elektrik yalıtımı özelliğine de sahiptirler. Gelişmiş bir kompozit sistemin temel bileşenlerinden olan kürleme ajanları ya da sertleştiriciler yapı için çok önemlidir çünkü bitmiş ürünün performans özelliklerini belirler ve reaksiyon hızını kontrol ederler. Bu bileşikler reaksiyon için katalizör görevi gördüklerinden, molekülleri üzerinde aktif alanlar içermelidirler [44].

2.2.1.3 Termoplastik ve Termoset Matrislerin Karşılaştırılması

Termoplastik ve termoset matrislerin birbirlerine karşı bazı üstün özellikleri vardır. Termoplastikler termosetlere kıyasla reaktif kür döngüleri gerektirmezler bu nedenle kısa işlem sürelerine sahiptirler. Fakat termoplastiklerin yüksek erime viskozitesi kompozit üretimini zorlaştırır. Kürlenmiş termosetler çok daha yüksek

moleküler ağırlıklara sahiptir bu da gelişmiş mukavemet ve modül sağlar fakat uzama ve dayanıklılığın azalmasına neden olur. Termosetler sınırlı bir raf ömrü sunarken termoplastikler sonsuz bir raf ömrüne sahiptir. Termoplastikler geri dönüştürülebilirken termosetler sadece öğütülebilir ve dolgu olarak kullanılabilir, bu da kompozitin değerini büyük ölçüde düşüren bir işlemdir. Termoplastik kompozitlerin bir diğer avantajı, üstün darbe direnci ve hasar toleransıdır. Kompozitlerde kullanılan polimerlerin % 90'ından fazlası termosetlerdir ve termoplastik kompozitler, esas olarak işlemedeki zorluklar nedeniyle hala niş bir pazar durumundadır [34]. Bu karşılaştırmanın özeti Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Termoplastik ve termoset matrislerin karşılaştırılması [34]

Özellikler	Termoplastik	Termoset
Erime viskozitesi	Yüksek	Düşük
Elyaf emprenye	Zor	Kolay
Raf ömrü	Sınırsız	Sınırlı
Kürleme	Yok	Var
İşlem süresi	Kısa	Uzun
Geri dönüşüm	Var	Yok
Mekanik özellikler	İyi	İyi
Darbe Direnci	İyi	Orta

2.2.2 Takviye Bileşenleri

Ürüne mukavemet kazandırmak için reçine sistemine elyaf takviye malzemeleri eklenir. Bitmiş üründe olması istenen özelliklere göre takviye malzemesi seçimi yapılır. Takviye bileşenleri reçine ile kimyasal bir reaksiyon vermez ve kompozit yapılarda olması gereken en önemli bileşenlerden biri konumundadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan üç temel elyaf türü vardır. Bunlar cam elyaf, aramid elyaf ve karbon elyaftır.

2.2.2.1 Cam Elyaf

Cam elyaf, amorf yapılı inorganik bir elyaftır ve küçük çaplı birçok elyaf halinde ekstrüde edilebilir. Cam elyaf oluşumu teknik olarak camı ısıtma ve camı ince

liflere dönüştürme işlemlerinden oluşur. Bu işlemlerde filamentler birlikte bir tel veya fitil halinde çekilir ve filaman kohezyonu sağlamak ve camı aşınmadan korumak için bir bağlama ajanı, yani haşılama ile kaplanır. Farklı bileşimlere ve farklı teknik özelliklere sahip bir çok cam elyaf türü mevcuttur. Bunlardan bazıları, neredeyse evrensel olarak kabul edilebilen bir formülasyona sahip olan, yüksek elektrik direncine sahip, en fazla tercih edilen ve en fazla üretilen cam elyaf türü olan E-cam, alkaliye dayanıklı cam elyaf türü olan AR-cam, kimyasal olarak dirençli cam bileşimine sahip olan C-cam, yüksek mukavemetli cam elyaf türü olan HS cam elyafıdır [33].

Cam elyaf bir çok önemli özelliğe sahiptir [45]. Bunlar;

- Üstün Çekme Dayanımı; cam elyaflar çok yüksek çekme mukavemetine sahiptir.
- Mükemmel Esneklik; tipik cam elyaflar, kopmada maksimum% 5 uzamaya sahiptir.
- Çekici Termal Özellikler; yüksek ısı iletkenliğe ve düşük ısı genleşme katsayısına sahiptirler.
- Mükemmel Nem Direnci; cam elyaflar nemi emmez.
- Olağanüstü Boyutsal Kararlılık; cam elyaflar çekmez veya gerilmez.
- Mükemmel Korozyon Direnci; tüm organik çözücülere, çoğu asit ve alkaliye direnirler.
- Mükemmel Elektriksel Özellikler; cam elyaflar yüksek dielektrik dayanımlarına ve düşük dielektrik sabitlerine sahiptir.
- Düşük Maliyet; diğer takviyelerle karşılaştırıldığında cam elyafın maliyeti düşüktür.

2.2.2.2 Karbon Elyaf

Yüksek modül değerleri, yüksek sıkıştırma ve gerilme özellikleri gibi performans değerlerine sahip olması nedeniyle en çok tercih edilen takviye malzemeleri karbon elyaflardır. Şu anda, bu lifler öncül lifler olarak bilinen üç tür malzemedan üretilmektedir:

- Poliakrilonitril (PAN)

- Rayon
- Petrol zifti

Karbon elyaflar, elyafta sadece karbon bırakarak, oksijen, nitrojen ve öncü elyafın diğer karbon olmayan kısımlarının kontrollü yakılmasıyla üretilir. Bu yakma işleminden sonra lifler grafit veya karbon lifleri üretmek için bir fırından geçirilir. PAN bazlı elyaf, günümüzde gelişmiş kompozit endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılan öncüdür. Karbon elyaf takviyeli kompozitler için matris polimeri olarak en çok epoksi tercih edilmektedir, fakat bazen polyester ya da vinil ester gibi diğer polimerler de kullanılır. Karbon elyaf diğer elyaf türlerine göre biraz daha pahalı olup, otomotiv ve havacılık alanlarında, yüksek mukavemet ve ağırlık oranının önemli olduğu deniz araçlarında, motosikletlerde ve bisikletlerde kullanım alanı bulabilmektedir [33].

2.2.2.3 Aramid Elyaf

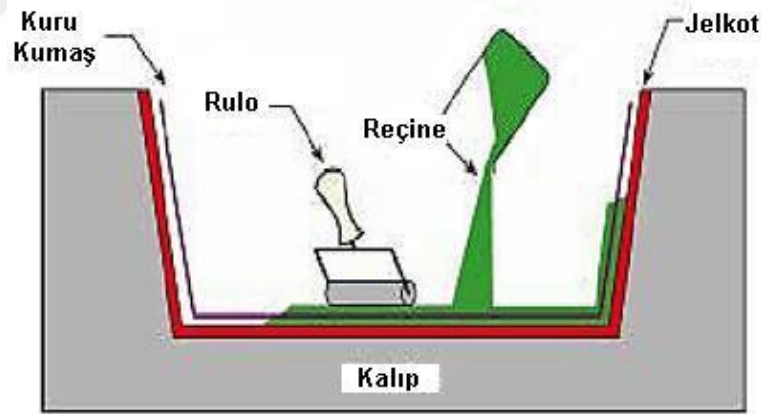
Başka bir sentetik elyaf olan aramid elyaf, temel polimerin üretilmesi ve sonrasında bu polimerin lif haline ya da kağıt benzeri konfigürasyona dönüştürülmesiyle üretilir. Aramid lifleri, diğer güçlendirici liflerle karşılaştırıldığında daha düşük yoğunluğa ve yüksek özgül gerilim mukavemetine sahip olan liflerdir. Aramid lifler çoğunlukla kesilmeye karşı direnç ve hasar toleransı gerektiren uygulamalarda, kurşun geçirmez yeleklerde ve güvenlik eldivenlerinde kullanılırlar. Aramid elyafların başlıca avantajları şunlardır [46]:

- Hafif
- Yüksek darbe hasarı toleransı
- Yüksek çekme dayanımı
- Orta derecede yüksek gerilme modülü
- Mükemmel titreşim sönümleme

2.3 Polimer Matris Kompozitlerin Hazırlanması

2.3.1 El Yatırması Yöntemi

El yatırması çok az ekipman gerektirdiği için en yaygın ve en ucuz açık kalıplama yöntemidir. Elyaf takviyeleri bir kalıba elle yerleştirilir ve reçine fırça veya rulo ile uygulanır. Bu işlem depolama tankları, tekneler ve duşlar dahil olmak üzere hem küçük hem de büyük eşyaların yapımında kullanılır. Bu yöntemde, şekil 2.5 'de gösterildiği gibi, jelkot, yüksek kaliteli bir yüzey için önce bir püskürtme tabancası kullanılarak kalıba uygulanır. Jelkot yeterince sertleştğinde, takviye malzeme manuel olarak kalıba yerleştirilir. Üzerine reçine dökülerek, fırçalanarak, püskürtülerek veya bir boya silindiri kullanılarak uygulanır. Laminatı sağlamlaştırmak, takviyeyi iyice ıslatmak ve hapsolmuş havayı gidermek için FRP silindirleri, boya silindirleri veya silecekler kullanılır. Laminat kalınlığını oluşturmak için müteakip takviye katmanları eklenir. Laminatı sertleştirmek için, köpük ve bal peteği gibi düşük yoğunluklu çekirdek malzemeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu, sandviç yapı olarak bilinir [47].

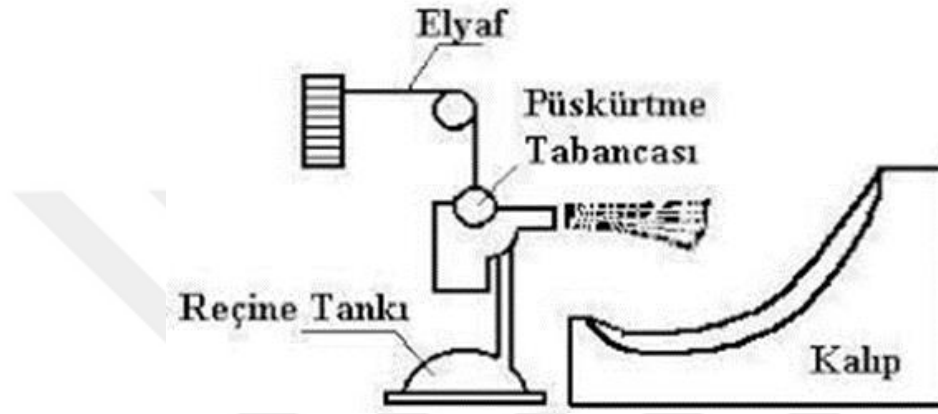


Şekil 2.5. El yatırması yöntemi [48].

2.3.2 Püskürtme Yöntemi

Püskürtme, çok çeşitli şekil ve boyutlarda tekneler, tanklar, nakliye bileşenleri ve küvet/duş üniteleri yapmaya uygunluğu açısından elle yatırmaya benzer bir açık kalıplama yöntemidir. Püskürtme işleminde operatör kıvamı ve kalınlığı kontrol ettiği için işlemin operatöre bağlı olması el yatırmasına göre daha fazladır. Kalıp

başına üretim hacmi düşüktür fakat birden fazla kalıp kullanılmasıyla önemli üretim miktarları geliştirilebilir. Bu işlem, basit ve düşük maliyetli araçlar kullanır. Taşınabilir ekipman, neredeyse hiçbir parça boyutu sınırlaması olmaksızın yerinde imalata izin verir. İşlem otomatikleştirilebilir. Bu yöntemde, kalıp üzerine kırılmış elyaf ve reçineyi püskürtten bir tabanca kullanılır ve bu elyafları matris malzemesine yapıştırmak için de bir silindir kullanılır [49]. İşlem, şekil 2.6'da gösterilmektedir.

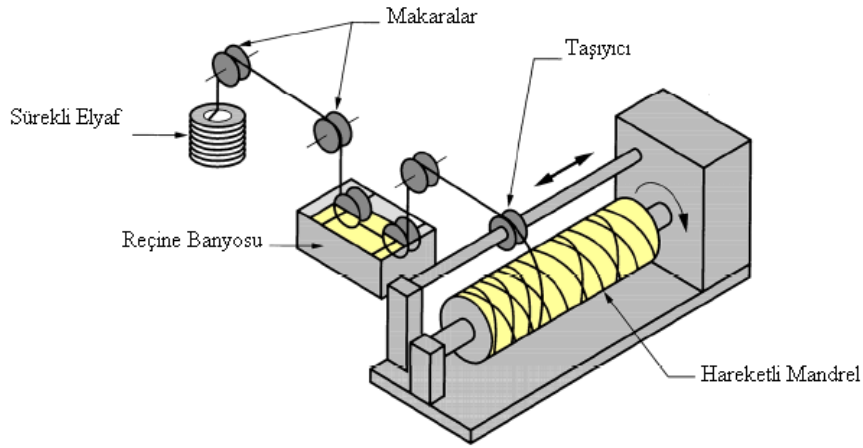


Şekil 2.6 Püskürtme yöntemi [50]

2.3.3 Elyaf/Filament Sarma Yöntemi

Filament sarım, gelişmiş güçlendirilmiş kompozit yapısal bileşenlerin üretimi için otomatikleştirilmiş bir işlemdir. Bu yöntemde reçine emdirilmiş lifler bir mandrel etrafına sarılır, kürlenir ve lif mandrel şeklini alır. Detaylı olarak açıklanacak olursa, ilk olarak lifler, yatay bir taşıyıcı ile dönen mandrel üzerine yerleştirilir. Yatay taşıyıcının hızı takip edilerek elyaf oryantasyonu kontrol edilir. Ardından uygun bir süre ve sıcaklıkta kürlenme yapılır. Sertleştikten sonra, kompozit malzeme mandrelden çıkarılır ya da mandrel tasarımın bir parçası olarak kalır. Borular, tanklar, gaz tüpleri vb. üretmek için kullanılır. Sarma işleminin en önemli avantajları, yüksek derecede otomatik olması ve doğru tekrarlayan elyaf yönlendirmesi üretebilmesidir. Bununla birlikte, liflerin mandrelin eksenine paralel yerleştirilmesindeki zorluk, yüksek mandrel maliyeti ve düzgünlüğü

sağlamak için gereken dış mandrel yüzeyinde özel muameleyi içeren bazı sınırlamaları vardır. İşlem Şekil 2.7’de gösterilmektedir [51].



Şekil 2.7 Filament sarma yöntemi [52].

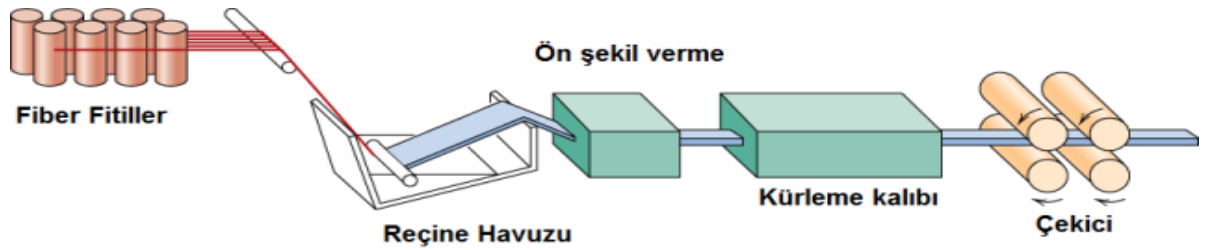
2.3.4 Profil Çekme (Pultrüzyon) Yöntemi

Havacılık, otomotiv ve inşaat endüstrileri gibi birçok sektörde kullanılmak üzere polimer kompozitlerin imal edildiği teknolojilerden biridir. Bu teknikle üretilen yüksek performanslı çekilmiş ürünler, en az % 70’lik yüksek lif içeriği sunar. Yüksek kaliteli çekilmiş profiller üretmek için, elyaf emprenye, reçine viskozitesi, çekme hızı ve kürleme sıcaklığı gibi dikkate alınması gereken değişkenler vardır. Pultrüzyon, sürekli takviye liflerinin ısıyla sertleşen matris ile emprenye edildiği ve kompozit profiller oluşturmak için ısıtılmış bir kalıptan çekildiği sürekli bir kompozit üretim işlemidir. Seri üretim hacimli sabit kesit profili ile sürekli çalışma kabiliyetine sahiptir.

Termoset pultrüzyon işlemi ısı transfer bölgesi, basınç bölgesi ve çekme bölgesi olarak üç bölgeye ayrılabilir. İlk olarak, lifler cağılıktan uygun reçine viskozitesine sahip bir reçine banyosu boyunca çekilir. Daha sonra polimer çözeltisi, polimer reçine, dolgu maddesi, katalizör, ayırıcı madde, pigment, Ultra Violet (UV) stabilizatörü ve diğer güçlendirici katkı maddelerini içeren reçine banyosuna yerleştirilir. Bu işlemden sonra lifler, liflerin ve reçinenin emprenye edildiği bir kılavuz plaka tarafından yönlendirilir. Lifler, kompozitlerin sertleştirildiği ısıtılmış

bir kalıba girmeden önce fazla reçineyi ortadan kaldırmak için ön kalıp kılavuzlarından çekilir.

Pultrüzyon işleminin çoğunda ısıtılmış kalıp jelleşme için düşük bir sıcaklık ve reçineyi sertleştirmek için yüksek bir sıcaklık olarak iki bölgeye ayrılır. Pultrüzyon kalıbı bir ısıtıcı ile ısıtılır, sıcaklığın yeterli olmasını sağlamak ve pultrüzyon profilinde hataya neden olabilecek aşırı ısınmayı önlemek için ısıtıcıyla etkileşime giren ısı çift sensörü kullanılarak sıcaklık kontrol edilir. Yöntem Şekil 2.8’de gösterilmektedir [51].



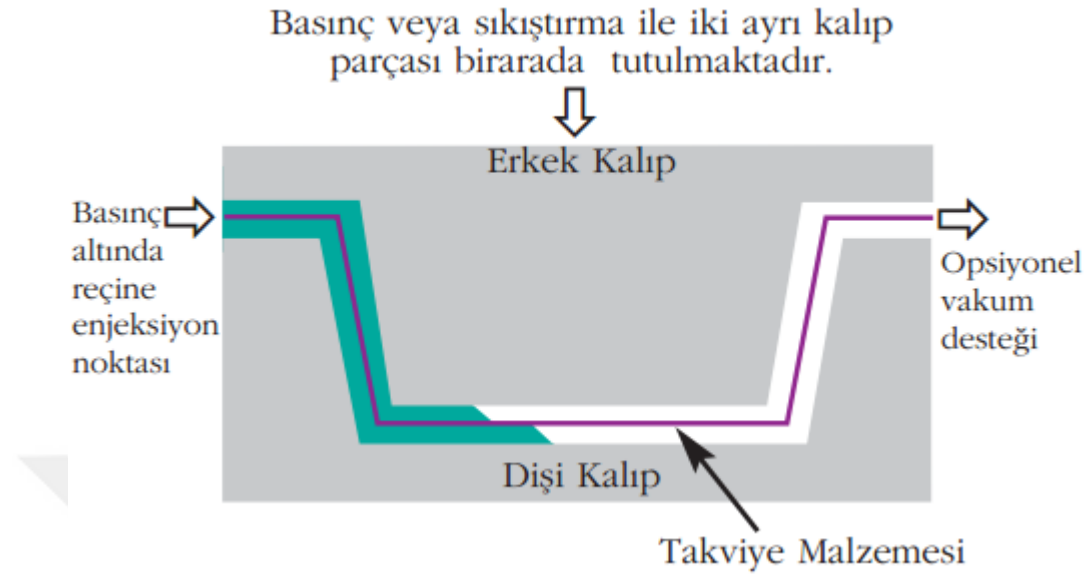
Şekil 2.8 Pultrüzyon yöntemi [53]

2.3.5 Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi

Bugün mevcut olan en umut verici teknolojilerden biridir. RTM, yüksek mekanik performans, dar boyut toleransı ve yüksek yüzey kalitesi ile büyük ve karmaşık üç boyutlu bir parça yapabilir. RTM tarafından yapılan iyi bir tasarım, düşük maliyetli aletler kullanarak orta hacimli miktarlarda uygun maliyetli yapısal parçaların üretilmesini sağlayan, üç boyutlu karmaşık parçaların üretilmesine yol açar. Bu avantajlara ek olarak, metal yapıların tipik özelliği olan ek yerlerinde oluşan sorunlar, eklerin entegrasyonu ile ortadan kaldırılabilir. Bir kompozitin nihai performansları, yalnızca matris ve elyafın seçimine değil, aynı zamanda yapıldıkları üretim sürecine de bağlıdır [51].

Kalıp, gerekirse jelkot ile kaplanabilir. Takviye malzemesi kalıba yerleştirilir, kalıp kapatılır ve sonrasında kelepçelenir. Reçine, karışım/metre enjeksiyon ekipmanı kullanılarak basınç altında enjekte edilir ve parça kalıpta kürlenir. RTM oda sıcaklığında yapılabilir; ancak, hızlı döngü süreleri ve ürün tutarlılığı elde etmek

için ısıtılmış kalıplar gereklidir. Kelepçeleme, çevre kelepçesi veya pres kelepçesi ile gerçekleştirilebilir [54]. İşlem şekil 2.9'da gösterilmektedir.

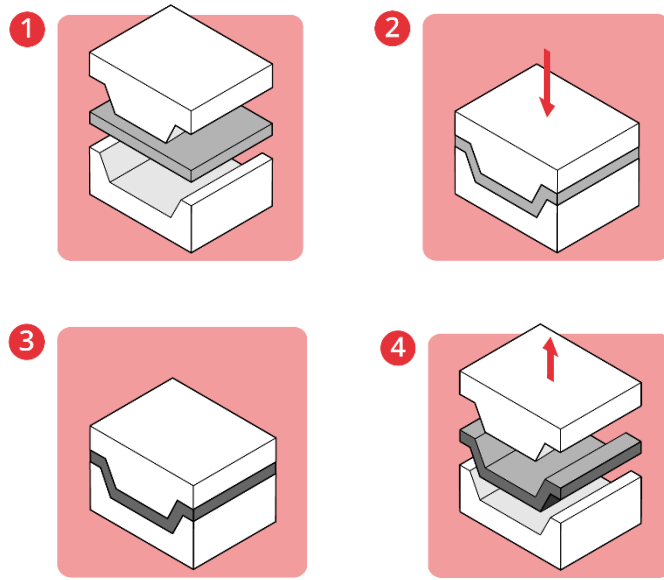


Şekil 2.9 RTM yöntemi [55]

2.3.6 Sıkıştırılmalı Kalıplama/Presli Kalıplama Yöntemi

Sıkıştırılmalı kalıplama, çok çeşitli hacimlerde yüksek kaliteli kompozit parçalar üretmek için hassas ve potansiyel olarak hızlı bir işlemdir. Yaygın olarak sıkıştırılmalı kalıplama ile işlenen kompozitlerin örnekleri arasında, ısıyla sertleşen prepregler, fiber takviyeli termoplastik "organosheets", levha kalıplama bileşiği (SMC) gibi kalıplama bileşikleri ve kesilmiş termoplastik bantlar yer alır. Aynı zamanda, petek veya polimer köpük gibi bir çekirdek malzemesi içeren sandviç yapıları üretmek için de yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak çekirdeği ezebilecek aşırı basınç kullanmamaya özen gösterilmelidir.

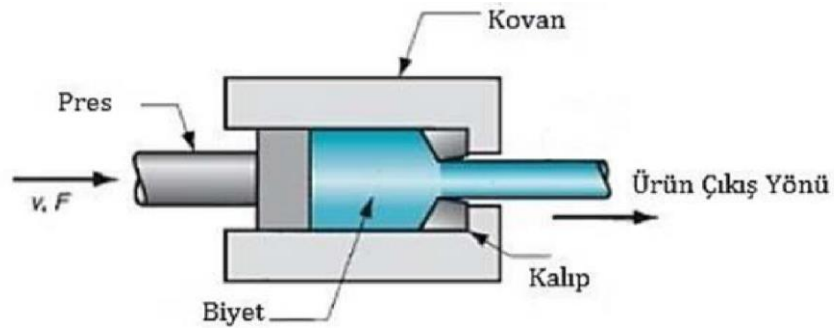
Bu yöntemde, (1) kalıplanacak malzeme açık alete yerleştirilir. Termoplastik kompozitler işlenirken, malzeme genellikle gerekli sıcaklığa kadar önceden ısıtılacaktır. Termoset malzemeleri normalde soğuk olarak yüklenir, ancak aletin kendisi önceden ısıtılabilir. (2) Malzeme alete yerleştirildikten sonra, pres kapatılır ve (3) malzemenin sertleşmesine (termoset ise) veya sağlamlaşmasına (termoplastik ise) izin verilir. (4) Alet daha sonra açılır ve parça çıkarılır [56].



Şekil 2.10 Sıkıştırılmalı kalıplama yöntemi [56]

2.3.7 Ekstrüzyon Yöntemi

Malzemenin kovanlara konularak metal bloğu itirmek için kullanılan bir alet yardımıyla matris bileşeni içerisinde basınç altında geçirilerek şekillendirilmesi yöntemidir. Sürekli bir proses olup, kalıp türü açıktır ve maliyeti yüksektir. Genellikle termoplastiklerin işlenmesinde kullanılan bir yöntemdir [57].



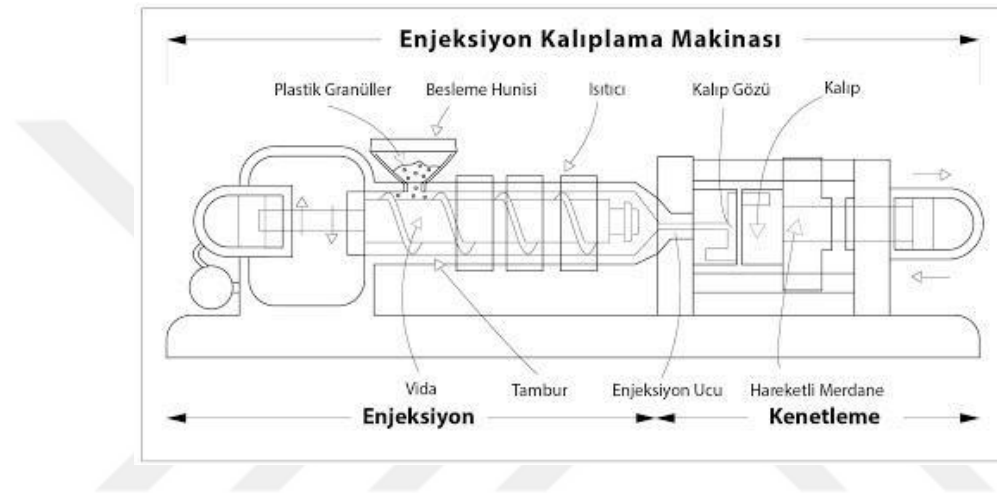
Şekil 2.11 Ekstrüzyon yöntemi [58]

2.3.8 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, kompozit parçaların çok düşük çevrim sürelerinde ve yüksek hassasiyetle üretimine olanak sağlar. Tipik bir enjeksiyon kalıplama işleminde, pelet şeklindeki elyaf kompozitler, Şekil 2.12'de gösterildiği gibi, bir huni aracılığıyla beslenir ve daha sonra bir vida yardımıyla taşınır. Bir kovanda

gerekli miktarda malzeme eritildikten sonra, vida, malzemeyi bir meme vasıtasıyla soğutulduğu kalıba enjekte eder ve istenen şekli alır [59].

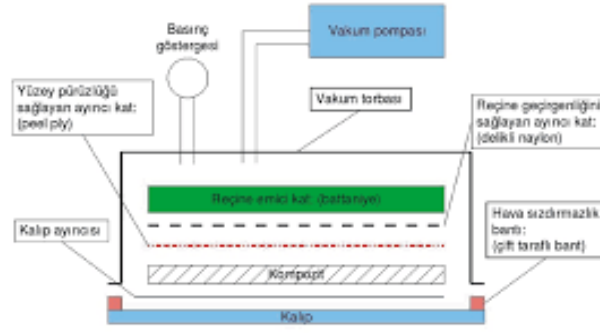
Enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılarak, tel makaralar, şişe kapakları, otomotiv gösterge panoları gibi birçok plastik ürün üretilebilir. Yüksek hacimde üretime olanak sağlar. Enjeksiyon kalıplama, tekrarlanabilir yüksek toleranslar, yüksek üretim oranları, düşük işçilik maliyetleri ve çok çeşitli malzemelerin kullanılabilmesi gibi birçok avantaja sahipken pahalı ekipman yatırımı ve yüksek işletme maliyetleri gibi dezavantajları da bulundurur [32].



Şekil 2.12 Enjeksiyon kalıplama yöntemi [60]

2.3.9. Vakum Torbalı Kalıplama Yöntemi

Vakum torbalı kalıplama, prepreg kompozitler ve ıslak serilmiş laminatlar için uygulanabilir. Islak yatırmalı torbalama, takviye elle yatırma kullanılarak doyurulur, ardından vakum torbası kalıba monte edilir ve laminatı sıkıştırmak ve hava boşluklarını çıkarmak için kullanılır. Önceden emprenye edilmiş gelişmiş kompozit kalıplama durumunda, prepreg malzemesi kalıp üzerine serilir, vakum torbası monte edilir ve kalıp ısıtılır veya kalıp atmosferik basınç kuvveti eklenmiş hem ısı hem de harici basınç uygulayan bir otoklava yerleştirilir. Prepreg-vakum torba-otoklav yöntemi, genellikle gelişmiş kompozit askeri ürün ve uçak üretiminde kullanılır [61]. Vakum torbalı kalıplama prosesi Şekil 2.13'de gösterilmiştir.

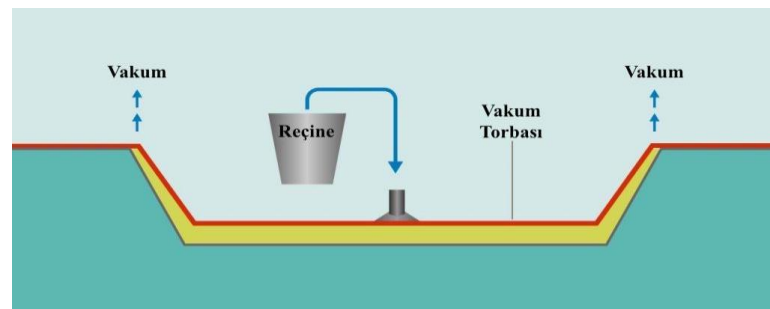


Şekil 2.13 Vakum torbalı kalıplama yöntemi [62]

2.3.10. Vakum İnfüzyon İşleme Yöntemi

Vakum infüzyonu, yüksek mukavemetli, hafif yapılar üreterek tekdüze bir konsolidasyon derecesine sahip laminatlar üretebilir. Bu işlem, açık kalıplama ile aynı düşük maliyetli araçları kullanır ve minimum ekipman gerektirir. Vakumlu infüzyon, açık kalıplama veya ıslak yatırmalı vakumlu torbalama ile karşılaştırıldığında emisyonlarda önemli azalma sağlar.

Yöntem, kalıp boşluğunda atmosfer basıncından daha düşük basınca sahip olarak tanımlanır. Takviye ve çekirdek malzemeleri elle kalıp içinde kuru olarak serilir ve bu da takviyenin hassas bir şekilde konumlandırılmasına olanak sağlar. Reçine kalıbın içine çekildiğinde, laminat zaten sıkıştırılmıştır; bu nedenle fazla reçine için yer yoktur. Vakumlu infüzyon, çok yüksek reçine-cam oranlarına olanak sağlar ve laminatın mekanik özellikleri üstündür. Vakumlu infüzyon, çok büyük yapıları kalıplamak için uygundur ve düşük hacimli bir kalıplama işlemi olarak kabul edilir [63]. Vakum infüzyon işleme prosesi Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Vakum infüzyon işleme yöntemi [64]

2.4 Polimer Matris Kompozitlerin Kullanım Alanları

Polimer matris kompozitlerin kullanım alanları [32];

- Havacılık ve uzay yapıları: Askeri uçak endüstrisi, esas olarak polimer kompozitlerin kullanımına öncülük etmiştir. Ticari havayollarında kompozit kullanımı giderek artmaktadır. Uydu sistemleri ve uzay mekiği birçok yapısal parça için grafit/epoksi kullanır.
- Otomotiv: Tahrik mili, gövde panelleri, tamponlar, yaprak yaylar vb.
- Deniz: Tekne, kayıklar, kanolar vb.
- Kurşun geçirmez yelekler ve diğer zırh parçaları.
- Spor malzemeleri: Kayak, tenis raketi, golf sopası vb.
- Kimyasal depolama tankları, basınçlı kaplar vb.
- Biyomedikal uygulamalar: Ortopedik cihazlar, tıbbi implantlar vb.
- Elektrik: Paneller, muhafaza, anahtarlama donanımı vb.

3.1 Cam Elyaf Üretimi

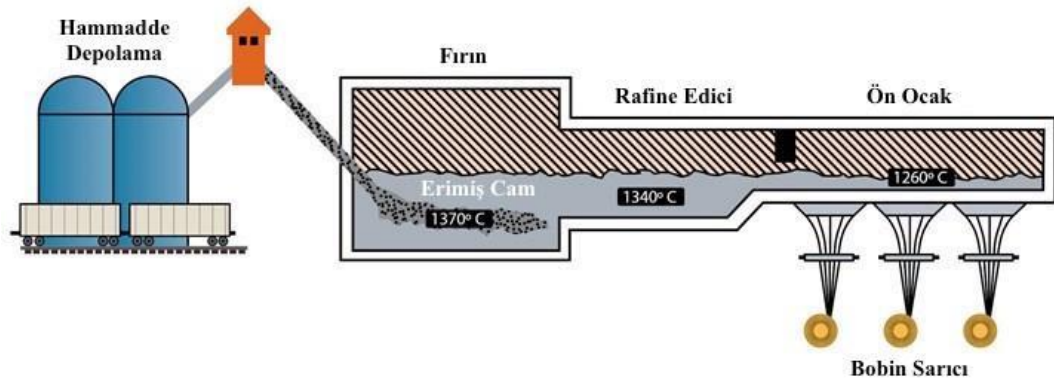
Bir cam, kristalizasyonun (devitrifikasyon) meydana gelemeyeceği kadar hızlı bir şekilde soğutulmasıyla elde edilen amorf bir katıdır. Eriyik yavaşça soğutulduğunda kristalleşme, kristallerin ve eriyiklerin dengede olduğu tam sıvılaşma sıcaklığında veya altında olabilir. Cam elyafları bu nedenle yüksek soğutma hızlarında elde edilir. Cam, kimyasal olarak bir silis ağından meydana gelir. Diğer oksitler, optimum sıcaklıklarda eritmeyi, homojenleştirmeyi, gaz halindeki kalıntıların uzaklaştırılmasını ve lif oluşumunu kolaylaştırır. Bu bölüm, genel amaçlı E-cam elyaflar ve daha özel olarak % 5 ila 6 bor oksit içeren E-cam elyaflar için gerekli olan viskoziteye karşı sıcaklık profili dahil olmak üzere jenerik cam eritme ve elyaf oluşturma sürecini ele almaktadır [65].

Adım 1: Karıştırma ve Eritme

Cam eritme süreci, seçilen hammaddelerin tartılıp karıştırılmasıyla başlar. Genellikle cam elyaf üretim tesislerinde bu işlem, bilgisayarlı tartım üniteleri ve kapalı malzeme taşıma sistemleri ile otomatik olarak yapılır. İlk olarak bileşenler tartılır ve bileşenler fırına taşınmadan önce iyice karıştırılmaları için bir karıştırma istasyonuna gönderilir [65].

Cam elyaf üretiminde kullanılan fırınlar genellikle üç bölümden oluşur (Şekil 3.1). İlk olarak yığın, eritme, gazlı kalıntıların giderilmesi ve homojenizasyon için fırın bölümüne gönderilir. Daha sonra erimiş cam, camın sıcaklığının 1370°C'den (2500°F) yaklaşık 1260°C'ye (2300°F) düşürüldüğü rafine edici bölüme akar. Erimiş cam daha sonra ön ocak bölümüne gider ve burada işlem boyunca elde edilmek istenen camın viskozite özelliklerine göre sıcaklıklar belirlenir. Ayrıca

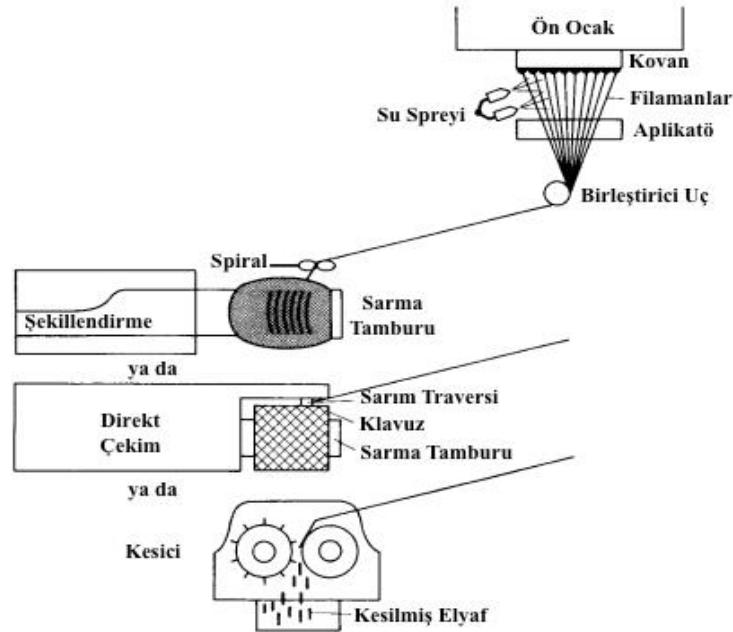
tesisin alan kısıtlamalarına göre fırının fiziksel yerleşimiyle ilgili değişiklikler yapılabilir [65].



Şekil 3.1 Cam elyaf üretimi için fırın [66]

Adım 2: Elyaflaştırma ve Haşılama

Ön ocaktaki erimiş camın kesintisiz cam elyafına dönüşümü temelde bir zayıflatma işlemidir (Şekil 3.2). Eriyik haline getirilmiş olan cam, çok sayıda deliği veya ucu olan bir platin-rodyum alaşımı boyunca elektrikle ısıtılan ve ısının çok hassas bir şekilde kontrol edildiği bir kovandan akar. Elyaflar kovandan çıkarken hızla çekilir ve soğutulur [65].



Şekil 3.2 Cam elyaf üretim prosesi [65]

Daha sonra, cam liflerinin içinden geçtiği ince bir filmi muhafaza etmek için, haşılama banyosu boyunca sürekli olarak dönen bir aplikatör üzerinden geçirilerek, elyafların yüzeyine bir haşılama uygulanır. Esas olarak bir cam elyaf ürününü diğerinden ayıran en önemli adım orijinal cam bileşiminden ziyade bu adımdır. Haşılamanın bileşenleri nihai ürüne iplik bütünlüğü, kayganlık, reçine uyumluluğu ve yapışma özellikleri kazandırır, böylece fiber özelliklerini spesifik son kullanım gereksinimlerine uyarlar. Boyutlandırma uygulandıktan sonra, filamanlar, toplama cihazına yaklaşımadan önce bir şerit halinde toplanır. Küçük filaman demetleri (bölünmüş teller) gerekliyse, birden fazla toplama cihazı (genellikle ayakkabı olarak adlandırılır) kullanılır [65].

3.2 Önemli Cam Elyaf Türleri

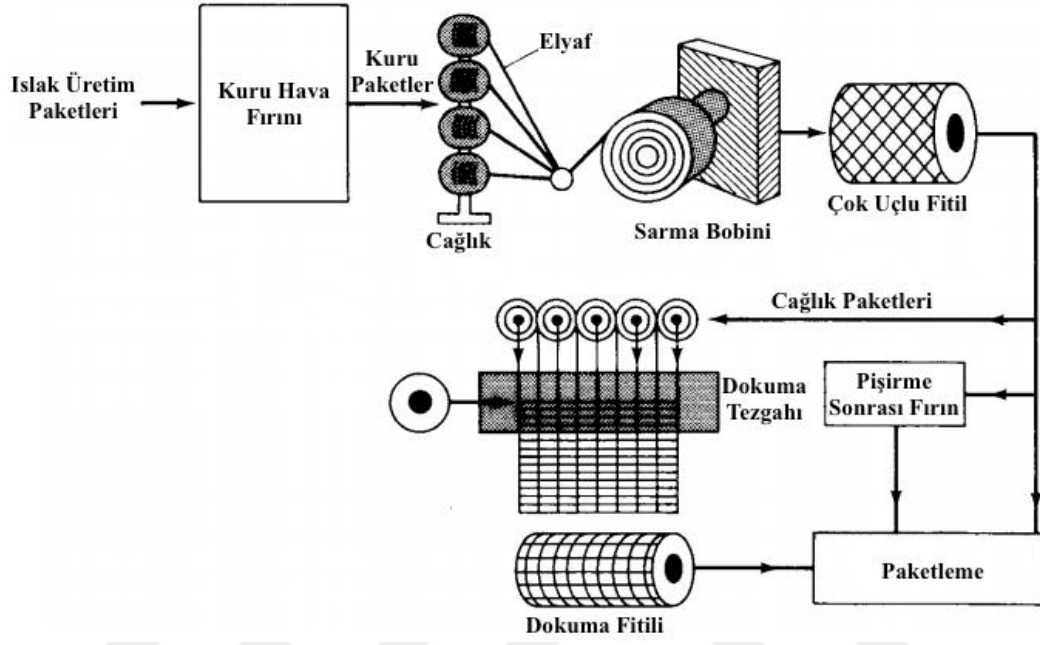
Sürekli cam elyafları üretildikten sonra, amaçlanan kompozit uygulamaları için uygun bir ürün formuna dönüştürülmeleri gerekir. E-cam elyaflar için başlıca bitmiş formlar, sürekli fitil, keçe, kırılmış elyaf ve tekstil uygulamaları için ipliklerdir [65].

3.2.1 Cam Elyaf Fitil

Cam elyaf fitil, bir demet elyafın tek bir büyük şerit halinde toplanmasıyla üretilir ve bu da sabit, silindirik bir paket halinde sarılır. Buna çok uçlu fitil işlemi denir. İşlem, bir çok fırınlanmış şekillendirme paketinin bir cağığa yerleştirilmesiyle başlar. Uçlar daha sonra gerilim altında bir araya getirilir ve sabit bir dönüş-sarım oranına sahip olan ve yol rüzgarı adı verilen hassas bir fitil sarıcıda toplanır. Bu dönüş-sarım oranı, sonraki işlemlerde iplik özellikleri ve bobin stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Son kullanıma bağlı olarak ambalaj ağırlığı ve boyutları üzerinde değişiklik uygulanabilir. Şekil 3.3'te tüm çok uçlu fitil üretim süreci gösterilmiştir [65].

Pultrüzyonda enine mukavemet için arzu edilen dolanma sağlanırken, fitildeki daha gevşek uçlar yakın tolerans deliklerinde ilmeklere ve kırılmalara neden olabilir ve bu da güçlendirilmiş plastik işlemeyi zorlaştırır. Sonuç olarak, doğrudan şekillendirilmiş tek uçlu fitiller, çok büyük kılavuzlar ve zorlu şekillendirme ortamında çalışmak üzere özel olarak tasarlanmış hassas bir sarıcı kullanılarak

geliştirilmiştir. Kurutma dışında sonraki adım gerekmez. Tek uçlu fitiller, daha çok filament sarma ve pultrüzyon uygulamalarında kullanılmaktadırlar [65]. Fitil örneği Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Çok uçlu fitil üretim süreci [65]



Şekil 3.4 Cam elyaf fitil [67]

3.2.2 Cam Elyaf Keçe

Cam elyaf keçeler, sürekli veya kırpılmış elyaf keçeler olarak üretilebilir. Kırpılmış elyafların bir kayış veya zincir üzerine rastgele yerleştirilmesi ve uygulamaya bağlı olarak düşük ile yüksek arasında değişen bir stiren çözünürlüğü olan genellikle termoplastik bir reçine olan kimyasal bir bağlayıcıyla bağlanması yoluyla kırpılmış elyaf keçeleri oluşturulur.

Sürekli elyaf keçe, benzer bir şekilde, ancak doğrama olmaksızın oluşturulur ve genellikle, bir miktar iç bütünlük sağlayan artan mekanik dolanma nedeniyle daha az bağlayıcı gerektirir. Sürekli elyaf keçe, kapalı kalıp işlemlerinde ve bir miktar enine mukavemetin gerekli olduğu pultrüzyon gibi tek yönlü işlemlerde tamamlayıcı bir ürün olarak kullanılabilir [65]. Cam elyaf keçe örneği Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Cam elyaf keçe [68]

3.2.3 Kırpılmış Cam Elyaf

Kırpılmış elyaf ürünleri iki ana işlemle üretilir. İlk işlemde cam kaynağı olarak kurutulmuş şekillendirme paketleri kullanılmaktadır. Bir dizi elyaf ucu, onları tipik olarak 3.2 ila 12.7 mm (1/8 ila 1/2 inç) olan uzunlukta kesen bir doğrayıcıya beslenir. Ürün daha sonra tüyleri ve kontaminasyonu gidermek için taranır ve nakliye için kutuya alınır. Son yıllarda birçok kırpılmış elyaf üretiminde kullanılan ikinci işlem, direkt doğrama işlemidir. Bu işlemde, şekillendirmede büyük

kılavuzlar kullanılır ve elyaflar, haşıl uygulandıktan hemen sonra ıslak halde kesilir. Kesilen elyaflar daha sonra kurutulacakları ve paketlenecekleri bir alana taşınır. Doğrudan parçalama işlemi, endüstriye reçinelerle birleştirme için çok çeşitli kırılmış elyaf takviyeleri sağlamıştır [65]. Kırılmış cam elyaf örneği Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Kırılmış cam elyaf [69]

3.2.4 Cam Tekstil İplikleri

Tekstil iplikleri, bir bükme işlemine girmek için yeterli bütünlük sağlamak üzere şekillendirme tüpleri üzerinde hava ile kurutulan şekillendirme işleminden elde edilen ince lifli ipliklerdir. Genellikle dokuma prosesinde daha ağır ipliklere ihtiyaç duyulur. Bu, normalde iki veya daha fazla tek lifin birlikte bükülmesi ve ardından bir katlama işlemi ile gerçekleştirilir. Katlama, esas olarak, bükülmüş ipliklerin orijinal bükülmenin tersi yönde yeniden bükülmesini içerir. Bükmenin iki türü vardır, bunlar Z büküm ve S büküm olarak adlandırılır. Dengeli bir iplik elde etmek için S büküm ile birlikte bükülen iki veya daha fazla lif, bir Z büküm ile katlanır. Böylelikle, mukavemet, verim ve iplik çapı gibi özellikler, bükme ve katlama işlemleri ile değiştirilebilir [65]. Bu tür işleme tabi tutulmuş iplik örneği Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Cam tekstil ipliği [70]

3.3 PET İplik Üretimi

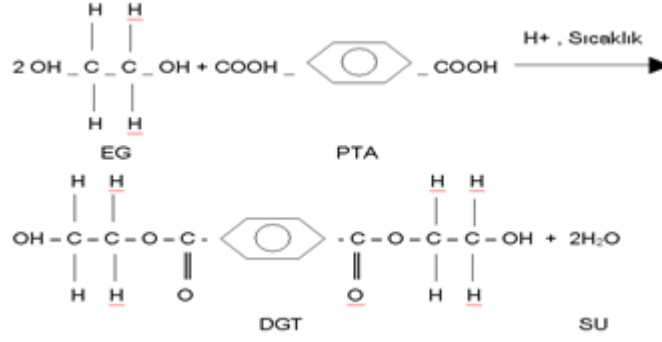
Polimer üretiminde süreç; hammadde olarak, saf tereftalik asit (PTA) ve mono etilen glikolün (MEG), yardımcı madde olarak TiO_2 , $Sb(Ac)_3$ ve dietilen glikol (DEG)'ün uygun şartlar altında reaktörlerde oluşturulan uzun zincirli reaksiyonları sonucu PET eriğinin ve cipsinin elde edilmesi olarak tanımlanır. Bu süreci meydana getirmek üzere genellikle 5 adet reaktör ve PTA, MEG ve katalizör gibi maddelerin fiziksel olarak karışımını sağlamak üzere bir pasta hazırlama tankı kullanılmaktadır. Reaktörlerin ilk iki tanesi esterleşme, kalan üçü polimerleşme reaksiyonlarını gerçekleştirmek üzere kullanılmaktadır. Kullanılan reaktörler kendi aralarında seri olarak bağlanmış olup, ürün reaktörler arasında seviye, basınç farkı ve transfer pompaları aracılığı ile taşınır. İşletme şartları (basınç, sıcaklık, karıştırıcı hızı) kapasiteye göre optimize edilirken, reaktör seviyeleri prensip olarak sabit tutulur.

Reaktörlerde gerçekleştirilen reaksiyonlar iki ana kısımda ele alınabilir.

- 1) Esterleşme Reaksiyonu
- 2) Polikondenzasyon Reaksiyonu

1. Esterleşme

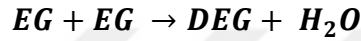
Esterleşmede 2 mol EG ile 1 mol PTA reaksiyona girer, 1mol DGT (diglikol tereftalat) oluşurken 2 mol H_2O açığa çıkar (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Esterleşme

Esterleşme reaksiyonunun başlayabilmesi için gerekli minimum sıcaklık 240°C dir.

Esterleşmenin temel yan reaksiyonu DEG oluşumudur :



2. Polikondenzasyon



Hammadde olarak tereftalik asit ve monoetilenglikol alınır ve antimon triasetat içeren bir katalizör çözeltisi eklenir. PTA, MEG ve katalizör kontrollü olarak pasta tankına beslenir. Hazırlanan karışım, esterleştirme reaksiyonunun başladığı 1. reaktöre aktarılır. İsteğe bağlı olarak ikinci reaktörde, matlaştırma etkisi için Titanyum dioksit eklenebilir. Aksi takdirde, süper parlak iplik olacaktır. Ön polikondenzasyon reaksiyonları, reaktör 3 ve 4'te gerçekleştirilir. Reaktör 4'ten gelen polimer, pompanın içinden süzülerek reaktör 5'e aktarılır. Son kondenzasyon reaktör 5'te tamamlanır. Son reaktörden sonra polimer doğrudan hatlara beslenir veya polimer kesme ünitelerine gönderilir. Cipsler ise katkılı ve eriyikten boyalı ipliklerin hammaddesini oluşturmaktadır.

3.3.1 Direkt Üretim Yöntemi

Sıvı polimer polikondenzasyon tesisinden gelir ve POY ve FDY makinelerine beslenir. Reaktör 5 çıkışında nihai kaliteye ulaşan polimer ana filtre olan NSF filtresinden geçer ve dağıtım vana gruplarına girer. NSF filtresi yani diğer adıyla kesintisiz filtre hiç durmadan çalışan ve POLY ünitesi çıkışında yer alan bir

filtredir. Görevi eriyik polimerin (melt) yapısını bozabilecek safsızlıkları tutmaktır. Filtreden çıkan melt dağıtım bölgesine gelir. Burada makina gruplarını besleyen BOOSTER POMPA'lara dağıtım yapılır. Dağıtım, boru içerisinde herhangi bir ölü nokta yaratmaksızın polimer meltinden uniform bir sıcaklık profilini garanti eder ve tüm melt dağıtımları çift cidarlı (ceketli) borular vasıtasıyla gerçekleştirilir. Polimer çevresinden HTM (Heat Transfer Medium) adı verilen kızgın yağ dolaştırılır.

Polimer melti borular vasıtasıyla çalışacağı makina gruplarına dağıtılır, buradan üretim kasalarına girer. Üretim kasalarında melt buhar fazındaki HTM kullanılarak ısıtılır. Üretim kasalarına kadar sıvı, üretim kasaları ve sonrasında buhar fazındaki HTM'nin kullanılmasının 2 nedeni vardır. Bunun ilk nedeni buhar fazındaki özgül ağırlığı, sıvı fazındaki özgül ağırlığından düşük olan HTM kullanılması ile kasalara binen yük miktarının azalması diğeri ise buhar fazında ısı kontrolünün daha iyi yapılmasıdır. Isıtmanın yapılabilmesi için buhar tankları yani evaporatör kullanılır.

Üretim kasalarının içerisinde bulunan ve take-up bilgisayarlar ile kontrol edilen eriyik pompaları polimeri filtrelemek ve düzenin içindeki küçük deliklerin içinden fişkırtarak filamentler haline getirmek üzere uniform bir akış şeklinde düze paketlerine besler. Burada uygulanan basınç ile birlikte filamentler filtrasyon işleminden geçer ve düze deliklerinden akar. Filaman sayısı düzelerdeki delik sayısına göre belirlenir.

Düzelerden akan filamentler Quench Kabini olarak adlandırılan soğutma kabineye gelir ve burada soğumaları için soğuk hava akımına maruz bırakılırlar. Quench kabini istenilen hızda havayı filamanların üzerine üflemeğe yardımcı olur (Şekil 3.9). Bu soğutma sayesinde filaman çekimi ve oryantasyonu daha kolay olur. Soğuk havaya maruz kalan filamanlar daha sonra Quench kabinindeki spin-finish uygulamasına girerler.

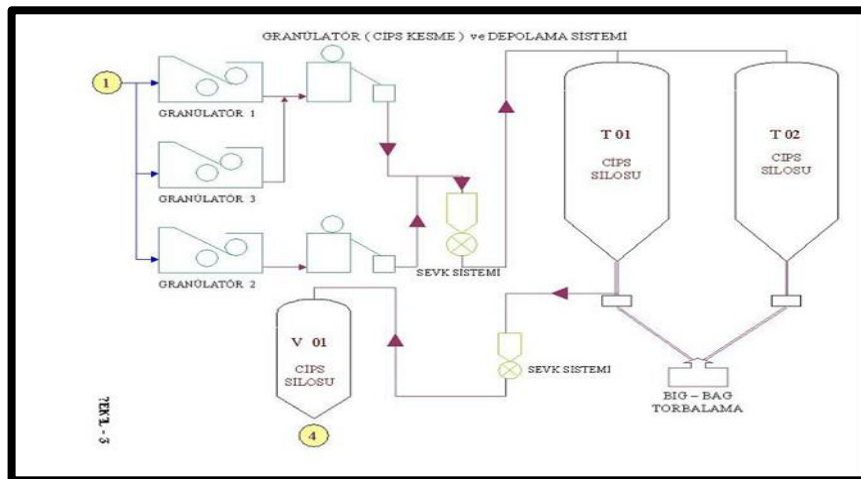


Şekil 3.9 Soğutma havası

Spin finish yağı sayesinde flamanlar birbirine yapışır, daha hızlı soğur, statik elektriklenme önlenir, sürtünme ve gerilmeye karşı daha dirençli olurlar. Spin-finish dişli pompalarla hareket verilerek ve kılcal plastik hortumların içerisinde ilerleyerek seramik kılavuzlardan damlacıklar halinde ipliğe verilir. Spin-finish, ipliğe sulu çözelti halinde uygulanır. Tedarikçi firmalardan alınan saf yağlar özel karıştırma tanklarında hazırlanarak makinalara beslenir. Spin-finish uygulamasından sonra flamanlar sarım işlemi için Take-Up kısmına gönderilir.

3.3.2 PET Cipsten Lif Üretimi

Polikondenzasyon tesisinde granül olarak kesilen polyester cipsler, çuval veya cips stok silosundan pnömatik olarak yağ cips silosuna beslenir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Cips kesme ve depolama

Cipsin üretimi esnasında, cipsi meydana getiren kablolardaki soğutma işleminde demineralize su kullanıldığı için yapısında az da olsa bir miktar su kalır (Şekil 3.11). Bu durum istenmeyen viskozitede bir ürün oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle kablolardan kesilerek üretilen PET cipsler eriyik haline dönüştürülmeden önce mutlaka kurutulmalıdır. Eğer kurutulmadan eriyik haline getirilmeye çalışılırsa, içerisindeki yüksek nem oranından dolayı viskozitesi düşük olacak ve üretimde filamentlerin kopması gibi problemlere neden olacaktır. Tekstil uygulamalarında 50 ppm üzerinde bir nem istenmeyen bir durumdur.



Şekil 3.11 Polimer kabloları

Yaş cips kurutma ve kristalizasyon adı verilen 2 yöntemle kurutulur. Kristalizasyonda, PET cipsin yapışması önlenir ve cipse kolay nem atma özelliği kazandırılır. Kurutmada ise PET cipsin içindeki nem atılır ve kolay çalışabilme özelliği kazandırılır. 2 işlemin de amacı benzerdir fakat buradaki fark kurutmadaki sıcaklığın kristalizasyondakinden daha fazla olmasıdır. Hem kristalizasyon hem de kurutmada nemi almak önemli olduğu için hava kurutma üniteleri kullanılır. Hava kurutma üniteleri havanın neminin alınmasına yardımcı olan özel silika jelleri bulundurur. Hava atmosferden bir kompresör aracılığıyla emilir ve silika jeller içerisinde geçerek nemi alınır.

Kurutulan PET cipsler ekstrüdere (Şekil 3.12) gönderilir. Ekstrüderde, basınç yardımıyla kurutulmuş PET cipsler eriyik haline getirilir. Ekstrüder basit tabirle kıyma makinesi prensibine göre çalışan bir motor, sonsuz dişli mil ve aradaki hareketi sağlayan volan ve şanzıman sisteminden ibarettir. Sonsuz vida sonunda

bulunan dinamik mikser ile eriyik homojen şekilde karıştırılır. Eriyik ekstrüder çıkışında safsızlıkların tutulması için NSF filtresinden geçer ve düzelere basılır. Düzelerden çıkan eriyik direkt hatta olduğu gibi quench havası ve spin finish aplikasyonundan geçer ve iplik olarak godetlere sarılır. Bu bölümden sonra iplik üretimi tamamlanmış olur. Sarım bölümünde POY ve FDY ayrımı ortaya çıkar ve denyeleri belirlenir.

POY: Pre Oriented Yarn – Yarı çekimli iplik; yüzde uzaması yaklaşık olarak %130 olan ve mutlak surette çekim kazandırılarak (Zinser – Tekstüre) kullanımı mümkün iplik çeşididir.

FDY: Fully Drawn Yarn – Tam çekimli İplik; çekim işlemi %98 oranında tamamlanmış ve uygulanacağı proses için tekrar çekim işlemi gerektirmeyen iplik çeşididir.

Denye: İpliğin 9000 mt.'sinin gram cinsinden ağırlığıdır.

Dtex: İpliğin 10.000 mt.'sinin gram cinsinden ağırlığıdır.

Dpf: Denyenin flaman olan matematiksel oranıdır.

Normal Count İplik: Denye – Flaman oranı 1,5'tan fazla olan iplik çeşididir. Örnek: 68/24, 75/36, 150/48

High Count İplik: Denye – Flaman oranı 0,9 ile 1,4 arası olan iplik çeşididir. Örnek: 75/72, 150/144, 100/96

Micro Count İplik: Denye – Flaman oranı 0,9'dan küçük olan iplik çeşididir. Örnek: 150/288, 100/144, 100/333, 50/96



Şekil 3.12 Ekstrüder

3.4 Hibrit İplikler

Hibrit iplikler, nihai ürünün performans gereksinimlerine dayalı olarak farklı yapılar oluşturmak için çeşitli malzemelerin tek bir iplikte birleştirildiği tasarlanmış ipliklerdir. Bir başka deyişle takviye ve matris liflerini içeren ipliklerdir.

Termoplastik kompozitlerin birçok avantajı olmasına rağmen, yüksek reçine viskoziteleri, kompozitlerin üretimi sırasında sıkı dokuma veya tek yönlü tekstil preformlarında gözenekleri doldurmak için büyük bir endişe kaynağıdır. Hibrit ipliklerin kullanılması, homojen ve reçinenin takviye lifini iyi sardığı termoplastik kompozitler üretmek için en iyi yöntemlerden biridir. Matris ve takviye liflerinin homojen dağılımı, kütle transfer mesafelerini azaltır ve bazı termoset matrislerin uzun işlem döngülerine kıyasla kısa döngü süresi sağlar [71].

3.4.1 Hibrit İplik Üretim Yöntemleri

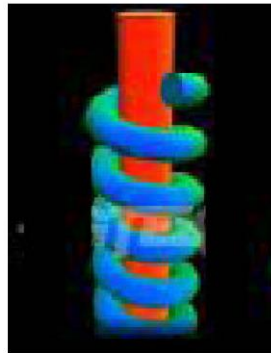
Hibrit iplik üretimi, yolcu araçları ve ticari araçlar, raylı araçlar, tarım makineleri ve havacılık araçları için hafif bileşenlere yönelik sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin hızlı ve uygun maliyetli işlenmesi için son zamanlarda geliştirilmiştir. Hibrit iplik üretim teknikleri aşağıda verilmiştir.

3.4.1.1 Katlamalı Büküm

Hibrit iplik üretimi, "Katlamalı Büküm" adı verilen yeni teknikle gerçekleştirilir. Bu teknik ile iki tip hibrit iplik üretilmektedir: tek (S) büküm ve çift (SZ) büküm. Bu teknikle birlikte elyaf ve büküm sayısının kontrol edilmesiyle matris ve takviye elyaf bileşimini ayarlamak mümkün olabilmektedir [72]. Doğrudan büküm örtme tekniğinin ve hibrit iplik tiplerinin şematik gösterimi sırasıyla Şekil 3.13 ve 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.13 Katlamalı büküm tekniği [72]



(a)



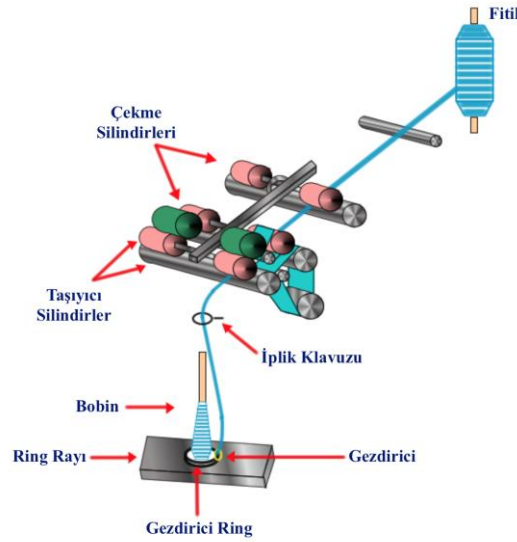
(b)

Şekil 3.14 Büküm: (a) tek büküm, (b) çift büküm [72]

3.4.1.2 Ring Eğirme

Genel olarak performans filamentleri, ipliğin mukavemetine katkıda bulunan çekirdeğe yerleştirilir ve çekirdeğe yerleştirilen performans filamentlerinin etrafı kesik elyaflarla çevrelenir. Birçok eğirme sistemi tarafından başarıyla gerçekleştirilen çekirdekli iplik üretim sistemi kendine has bir çok özellik taşır.

Geleneksel ring eğirme basit ve ekonomiktir, ancak çekirdeğin ipliğin merkezinde konumlandırılması zordur ve işlemin sonraki aşamalarında büyük geri sıyrılma sorunları ortaya çıkabilir ve bu da çekirdek filamanların bükülmesine yol açabilir [73]. Ring eğirme metodunun Şekil 3.15'de gösterilmektedir.

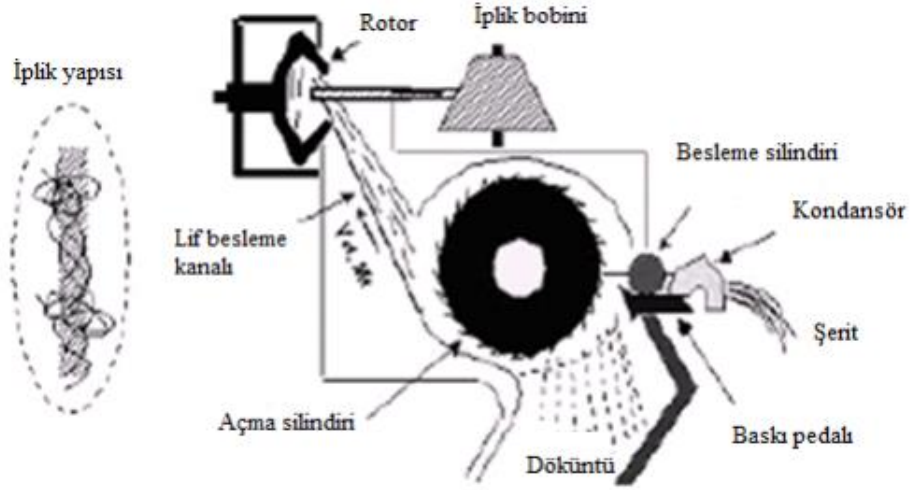


Şekil 3.15 Klasik ring eğirme [84]

3.4.1.3 Döner Eğirme

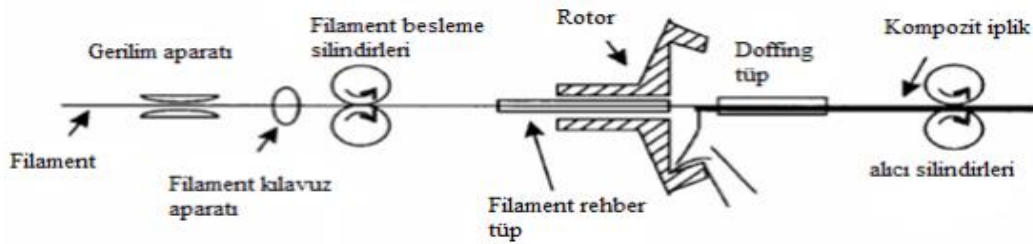
Nield ve Ali, Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, rotor iplik eğirme makinesinde özlü iplik üretmek için bir teknik geliştirmişlerdir. Filamentin sahip olduğu ön gerilim ve büküm verimliliği özlü eğirmeyi etkileyen faktörlerdir. İplik kolu ile takım değiştirme borusu arasındaki temas alanını arttırmak için yani başka bir deyişle büküm verimliliğini arttırmak için, takım değiştirme borusunun iç ucuna bakır bir flanş lehimlenmiştir. Takım değiştirme borusu bir bilyalı yatağa monte edilmiş ve ayrı bir tahrik ile rotorun dönüşünün tersi yönde 1:9 hız oranıyla döndürülmüştür. Dönen takım değiştirme borusu sahte bir bükme yerleştirir ve bükümü sıyrılma

noktasına geri iter. Rotorun dönüşü, iplik kolunu kesintisiz filaman çekirdeği etrafına sarar. Çekirdeğin bükme işlemine tabi tutulmaması bu işlemin temel avantajıdır. Döner eğirme ile özlü iplikler üretmek, ring eğirme sistemine göre daha ekonomiktir.



Şekil 3.16 Döner eğirme [74]

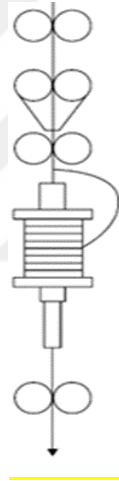
Yeni modifiye açık uçlu rotor iplikçiliğine yönelik araştırmalar, Şekil 3.17'de gösterildiği gibi hibrit iplikler üretilbildiğini göstermiştir. Hibrit ipliklerin özellikleri ve yeni ipliklerin üretim araçları, iplik oluşturma tekniğine, filament aşırı beslemesine ve rotor iplikçiliğinin büküm mekanizmasına bağlıdır. İpliğin yapısı ve gerilme özelliklerinden kaynaklanmayan herhangi bir düzensizlik, filamentin aşırı beslenmesinden kaynaklanabilir. Filament aşırı beslemesindeki bir değişikliğin, hibrit iplikteki filament ipliğin geometrik düzenini etkilediği ve bunun sonucunda da ipliğin gerilme özelliklerinde düzensizlikler ve değişiklikler görüldüğü bilinmektedir [73].



Şekil 3.17 Modifiye açık uçlu döner eğirme [74].

3.4.1.4 Sarmal Eğirme

Sarmal eğirme, iplik çekirdeğine yerleştirilen kesik elyaf üzerine bir filamentin sarılmasından oluşan bir tekniktir. Üç, dört veya beş silindirik bir çekim düzeneğinde bir fitil veya şerit besleme stoğu çekilir ve teslim edilen elyaf şeridi, gerçek bir bükülme almadan içi boş bir milin içinden geçer. İpliğe dağılmadan önce mukavemet kazandırmak için, sürekli filamanlar, çekim düzeneğinden ipliğin etrafına sarılır. Bu iplik, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi içi boş mil üzerine monte edilmiş küçük ve hızlı dönen bir bobinden gelir. Geri çekme silindirleri, elde edilen sarma ipliğini bir sarma cihazına yönlendirir. Sargı ipliği iplik merkezindeki bükümsüz bir kesik elyaf ve onun üzerine sarılmış bir filamentten oluşur. Genellikle bu iplikler ev tekstili, halı ipliği, otomotiv tekstili gibi alanlarda kullanılır [73].

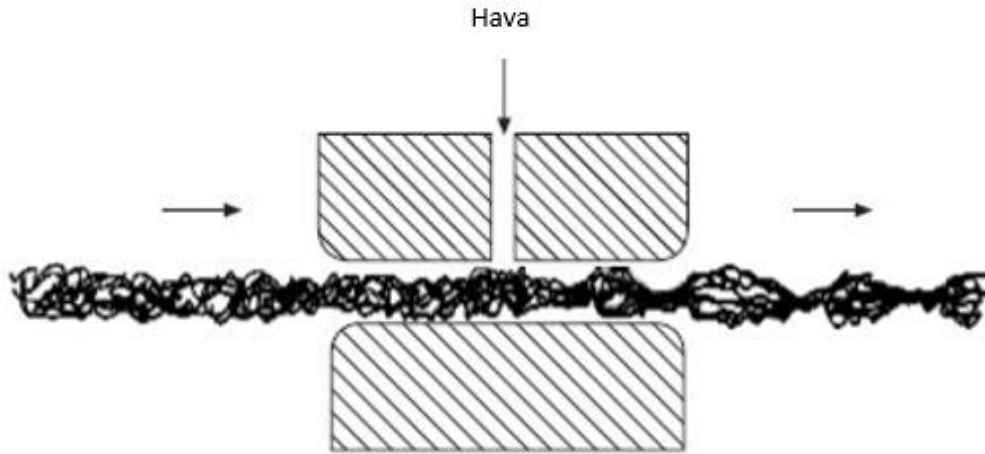


Şekil 3.18 Sarmal eğirme tekniği [75]

3.4.1.5 Karıştırma/Hava Jetli Karıştırma (Commingling)

Karıştırma (commingling), iki veya daha fazla sürekli çok filamanlı ipliği içeren bir işlemdir, bunların filamanları büküm eklenmeden karıştırılır. Kullanılan iplikler cam elyaf, karbon elyaf bir takviye ipliği ve PP gibi termoplastik bir matris ipliğidir. Takviye edici ve termoplastik malzemeyi hava geçirme işlemi kullanılarak filament formunda karıştırma girişimleri de gerçekleştirilmiştir. Bu hava iç içe geçme veya karıştırma kavramı, dokumayı iyileştirmek amacıyla bükme ve boyutlandırmanın yerini almak üzere geliştirilmiştir. Daha sonra aynı prensip,

farklı renk efektleri elde etmek için iki farklı renkli filamenti karıştırmak ve sürekli filamentler veya ştapel fiber ipliklerle kaplanmış bir elastomerik bileşen ile hibrit iplikler üretmek için de kullanılmıştır. Tek bir iplik teli oluşturmak için iki veya daha fazla farklı ipliğe uygulandığında birleştirme işleminin temel prensibi karıştırma (commingling) olarak tanımlanabilir. Karıştırma işleminde, bir hava düzesinde hızla hareket eden hava, Şekil 3.19'da gösterildiği gibi, filamanların içinde ve arasında dolaşmalara neden olur. Elyaf ve filamentler arasındaki kohezif kuvvetler, elyaf ve filamentleri bir arada tutarak tekstil ipliği gibi esnek bir yapı oluşturulmasını sağlar. Lifler türbülanslı soğuk hava ile karşılaştığında, hava akışı etkisiyle filamentler açılır ve birbirine karışır. Bu karışımla filamentlerin konumunun değiştiği ama filamentlerinin yapısının kimyasal ya da fiziksel olarak değişmediği bir yapı elde edilir [73].

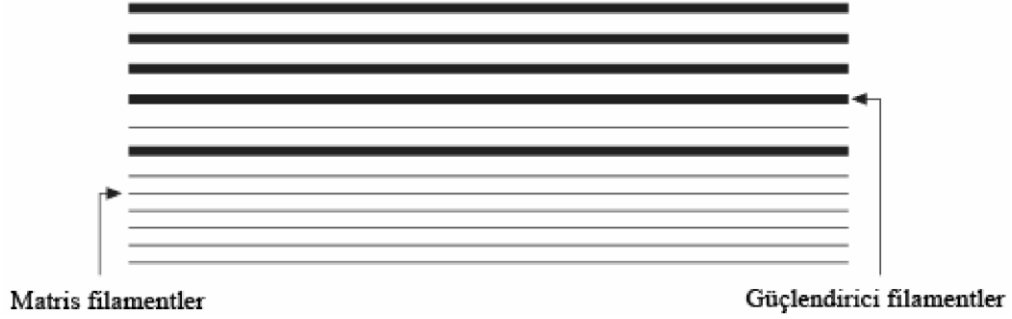


Şekil 3.19 Karıştırma (Commingling) yöntemi [75]

3.4.1.6 Paralel Sarım

Tekstil işlemlerinde kullanıldığı şekliyle "paralel sarım" terimi, hibrit yapılar oluşturmak için filamanların yan yana konumlandırılması anlamına gelmez. Bant sarımı veya yan yana teknik olarak da adlandırılan paralel sarım ile üretilen hibrit iplikler, özellikle termoplastik kompozitlerde kullanılır. Paralel sarım tekniğinde, termoplastik filamentler ve takviye filamentleri bir bant şeklinde birleştirilir. Bu tabaka, sıcaklığı termoplastik filamentlerin yumuşama sıcaklığına ayarlanmış ısıtma odasından geçer. Levha bant şeklinde çıkar, serme başlığından geçer ve bir

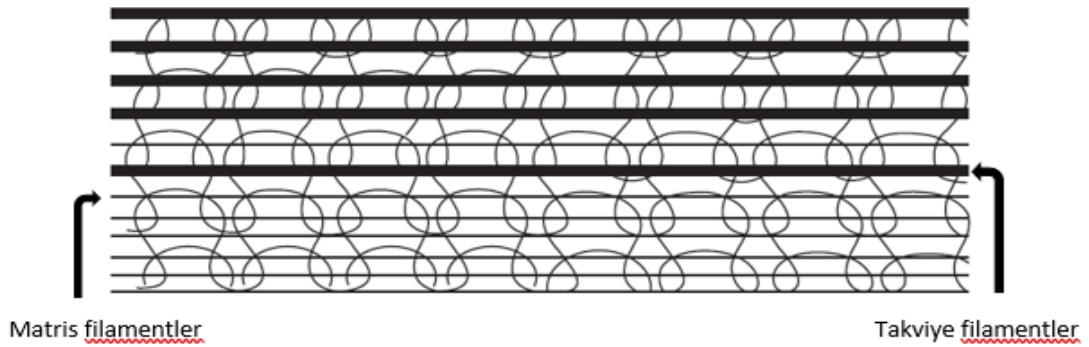
mandrel üzerine sarılır. Isıtma bölgesine girdikten sonra, baskı silindiri mandrelin dış yüzeyine basınç uygular. Erime sıcaklığına ayarlanmış olan sıcak hava nozulu termoplastik malzemeyi eritir ve konsolidasyon gerçekleşir [73]. Şekil 3.20’de paralel sarım yöntemindeki hibrit iplik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.20 Paralel sarım ile hibrit iplik yapısı [76]

3.4.1.7 Kemafil Teknolojisi

Almanya, Chemnitz'deki Sakson Tekstil Araştırma Enstitüsü, jeo-tekstiller için KEMAFIL teknolojisini geliştirmiştir. İplikleri mekanik olarak örme bir yapıya bindirerek, doğrusal tekstiller üretilir. KEMAFIL makineleri, bir kılavuz çubuğun etrafına yerleştirilmiş ve her tür özlü ipliği kaplayabilen boru şeklinde bir örgü yapı üreten, çift makaslar ile çalışan yuvarlak örgü makineleridir. Bu tür hibrit iplikte, takviye filamentleri paralel dizilmiştir ve paralel dizilmiş matris liflerle çevrelenirler. Matris filament ve takviye edici filament deri görevi gören bir matris elyaf kılıfı ile çekirdekte bulunur. Bu yöntem ile üretilen hibrit ipliklerin yapıları Şekil 3.21’de gösterilmektedir [73].



Şekil 3.21 Kemafil tekniği ile üretilen hibrit iplik yapısı [1]

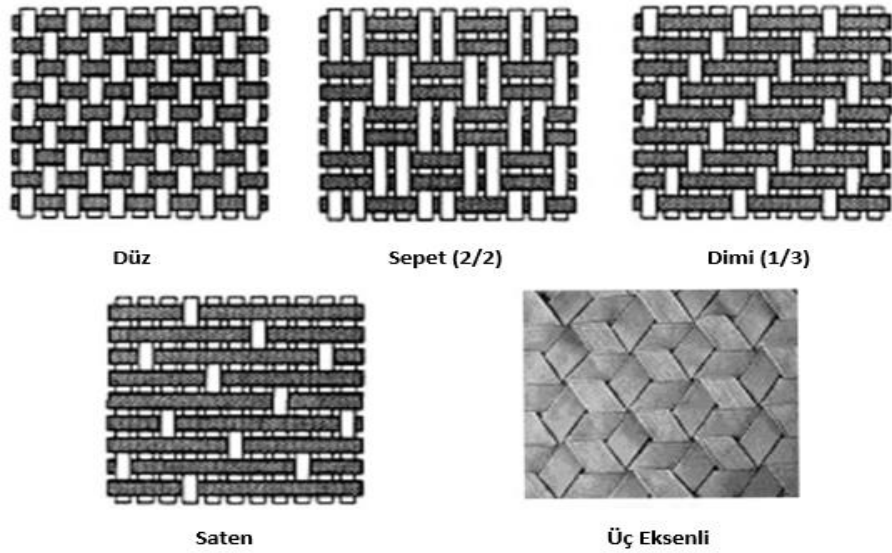
3.5 Tekstil Yapısı Oluşturma

Yüksek performanslı elyaflardan yapılan tekstil yapılarının kullanımı kompozit uygulamalarında giderek artan bir önem kazanmaktadır. Tekstil teknolojileri ekonomik avantajlarının yanı sıra matris ve takviye elyafının homojen dağılımını da sağlar. Bu nedenle, tekstil preformları kompozit yapılar için çok değerlidir.

Tekstil teknolojisi, üretim maliyetini düşürmenin yanı sıra, kompozitlerin hasar toleransı gibi belirli özelliklerinin iyileştirilmesi anlamında özel bir öneme sahiptir. Tekstil ön şekillendirme yöntemine bağılı olarak, ön kalıbın elyaf oryantasyonu ve elyaf hacmi fraksiyonu aralığı değışecek ve daha sonra matris infiltrasyonunu ve konsolidasyonunu etkileyecektir. Tekstil takviye üretiminin seçimi malzeme işleme, üretim hızı ve malzeme tasarım esnekliğı gibi kompozit malzemelerin seri üretimini etkileyen birçok faktöre dayanır. İplik ve kumaş şekillendirme süreci, kompozit üretimindeki artan talebi karşılamak için önemli ölçüde değıştirilmiş ve geliştirilmiştir. Ön şekillendirme alanındaki gelişmeler, tek tek veya kombinasyon halinde dokuma, örme ve örülerek farklı yönlerle yönlendirilmiş liflere sahip preformların üretimine yol açmıştır [1].

3.5.1 Dokuma Kumaşlar

İpliklerin birbiri içine geçmesiyle dokuma kumaşlar üretilir. Düzlem içi elyaf oryantasyonuna göre iki eksenli ve üç eksenli dokuma yapılara ayrılabilen yüzlerce olası dokuma kumaş kombinasyonu vardır. Dokuma kumaş takviyeli kompozitler, yüksek özgül mukavemetleri, sertlikleri ve üstün şekillendirilebilirlik özellikleri nedeniyle hem endüstriden hem de akademiden önemli miktarda ilgi görmüştür. Ayrıca, dokuma kumaşlar kullanım kolaylığına ve yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Dokuma kumaş kompozitlerin enine gerilme mukavemetleri ve dengeli düzlem içi özellikleri tek yönlü kompozitlere göre çok daha iyidir. Şekil 3.22'de temel 2D dokuma yapılar gösterilmektedir [72].



Şekil 3.22 Temel 2D dokuma yapıları [1]

Düz dokuma kumaş, iyi bir stabilite ve makul gözeneklilik gösterir. Bununla birlikte, yüksek seviyeli lif kıvrımı, diğer dokuma tarzlarına kıyasla nispeten zayıf mekanik özellikler kazandırır. Kalın iplikler kullanıldığında düz dokuma ile aşırı kıvrım kazandırılacağı için bu dokuma tarzı çok ağır kumaşlar için kullanılmaz. Dimi kumaşlarda, çözgü iplikleri dönüşümlü olarak iki veya daha fazla atkı ipliğinin üzerinde ve altında düzenli olarak tekrarlanan bir şekilde dokunur. Düz örgü üzerindeki dimi dokumada, stabilitede sadece küçük bir azalma ile üstün örtü görülür. Dimi kumaş daha az kıvrıma sahip olduğu için daha iyi mekanik özellikler sergiler ve daha pürüzsüz bir yüzey oluşturur. Saten dokumalar, daha düşük kıvrım ve daha iyi mekanik özellikler göstermesi için dimi dokumanın modifiye edilmiş halidir. Bu dokuma türünde daha az atkı ve çözgü kesişmesi görülür. Saten dokumalar, liflerin en yakın mesafede dokunmasına izin verir ve sıkı ve kompakt preformlar üretebilir. Sepet örgüsü temelde düz örgü ile aynıdır, ancak iki veya daha fazla çözgü iki veya daha fazla atkı ile dönüşümlü olarak birbirine geçer. Daha az kıvrım nedeniyle sepet örgüsü daha düzdür. Sepet örgüsü, düz örgüye göre daha güçlü olmasına rağmen, zayıf stabilite gösterir. Kalın ipliklerden ağır kumaşlar elde etmek amacıyla az kıvrıma sahip olması nedeniyle sepet örgüsü kullanılabilir. Üç eksenli örgüler, düşük lif hacimli fraksiyonlarda bile boyutsal kararlılık sergileyen ve yüksek düzeyde izotropi gösteren yapıdır [1].

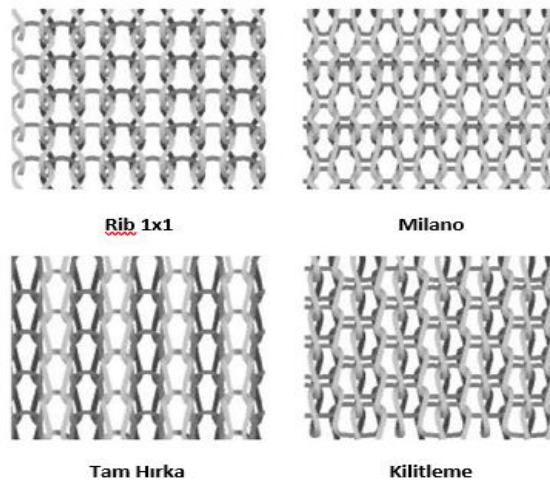
3.5.2 Örme Kumaşlar

Örme kumaşlar, örme ilmeklerinin çapraz makine yönünde (atkı örme) veya makine boyunca (çözü örme) örgü ipliğinin eklenmesiyle üretildiği iç içe geçmiş yapılardır. Örme ile çok sayıda dikiş geometrisi üretilebilir. Şekil 3.23’de temel örgü yapılar gösterilmektedir [72].

Örme işleminin karmaşık şekilli bileşenler üretme yeteneğini göstermek amacıyla şekilli ve düz örgü yapıları kullanılmıştır. Bu yapılar kullanılarak jet motoru kanatları, araba tekerlek yuvaları, kasklar ve tıbbi protez gibi fonksiyonel ürünler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Preformdaki ipliğin mimarisi oldukça kavislidir ve ipliğin iç içe geçmesi çok elastik ve esnek bir yapıya izin verir. Bu durum, kıvrımsız karmaşık şekle sahip bileşenlerin gerekli olduğu, örtülebilirliğin ve şekillendirilebilirliğin çok önemli olduğu uygulamalar için avantaj yaratır.

Örgünün iplik yapısı kompozitlerin darbe performansını iyileştirme eğiliminde olmasına rağmen örme kumaşlarla yapılmış kompozit malzemelerin yapısal performansı düşüktür.

Düz örme kumaş preformlarının özellikleri diğer tekstil preformlarından farklıdır. Dokuma ve çok eksenli kumaşlar örme kumaşlardan daha sert olduğu için yüksek mukavemetin gerekli ve önemli olduğu uygulamalarda bu kumaşların kullanılması daha uygundur [1].



Şekil 3.23 Temel örgü yapıları [72]

3.5.3 Örgülü (Braided) Kumaşlar

Örgü, elyafların emprenye edilmesinden önce veya sırasında istenen takviye edici örgü mimarisini oluşturmak için bir örgü makinesinin sürekli, iç içe geçmiş elyafları biriktirdiği bir kompozit malzeme preform üretim tekniğidir. Örgülü kumaşların boru şeklinde veya düz şekilde üretimi mevcuttur. En fazla kullanılan örgü mimarileri herkül örgü, elmas örgü ve normal örgüdür. Mandrel eksenli boyunca aksel liflerin eklenmesi, üç eksenli örgü olarak adlandırılır ve bükülme ve gerilme mukavemetini ve ayrıca örgülü kompozit malzemelerin sertliğini artırır. Örgülü lamine kompozitin özelliği, takviye edici elyaf ipliklerinin sürekli bir örgü açısı ile örülmesidir. Bu sürekli iplik hizalaması, geleneksel tek yönlü fiber lamine kompozitlere kıyasla çoklu yükleme koşulları altında kırılma toleransı elde etme yeteneğine sahiptir [72]. Örgülü kumaş örneği şekil 3.24’de gösterilmiştir.



Şekil 3.24 Örgülü kumaş örneği [77]

4.1 Tez İçeriği

Bu proje kapsamında, hafif ve yüksek performanslı sürekli cam elyaf/PET (CE/PET) termoplastik kompozit malzeme üretimi, proses parametrelerinin belirlenmesi ve üretilen termoplastik kompozit malzemelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla, hacimce farklı oranlarda (%35, 45, 55, 65) olacak şekilde sürekli cam elyaf ve PET iplikleri hava jetli karıştırma (commingling) yöntemiyle karıştırılarak sürekli cam elyaf/PET hibrit iplikleri hazırlanmıştır. Hacimce farklı oranlarda karıştırılan sürekli cam elyaf/PET hibrit ipliklerinin dokuması ile elde edilen kumaşlardan presleme yöntemiyle termoplastik kompozit test numuneleri oluşturulmuştur. Üretilen sürekli cam elyaf/PET termoplastik kompozit test numunelerinin mekanik ve ısı davranışları incelenmiştir.

4.2 Cam elyaf/PET Kompozitlerinin Hazırlanması

Bu bölümde, cam elyaf/PET kompozitlerinin hazırlanması için ilk olarak hacimce farklı oranlarda sürekli cam elyaf/PET hibrit iplikleri üretilmiş, üretilen hibrit iplikler dokunmuş ve sıcak pres yöntemiyle termoplastik kompozit malzeme haline getirilmiştir.

4.2.1 Sürekli Cam Elyaf/PET Hibrit İpliklerin Üretimi

4.2.1.1 Hammaddeler

Bu çalışma kapsamında hibrit iplik üretimi için KORTEKS Mensucat Sanayi ve Ticaret A.Ş tarafından üretilen kırmızı renkte PET filament iplik ve Nippon Electric Glass firmasından tedarik edilen PET ile uyumlu silan yüzey modifikasyonlu sürekli formda E-cam elyaf kullanılmıştır. Kullanılan PET filament iplik ve sürekli cam elyafın bilgileri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kullanılan PET iplik ve cam elyaf özellikleri

İplik	İplik Tipi	Tex (g/1000m)	Yoğunluk (g/cm ³)
PET İplik	FDY	30	1.38
Cam Elyaf	E-Cam elyaf	300	2.66

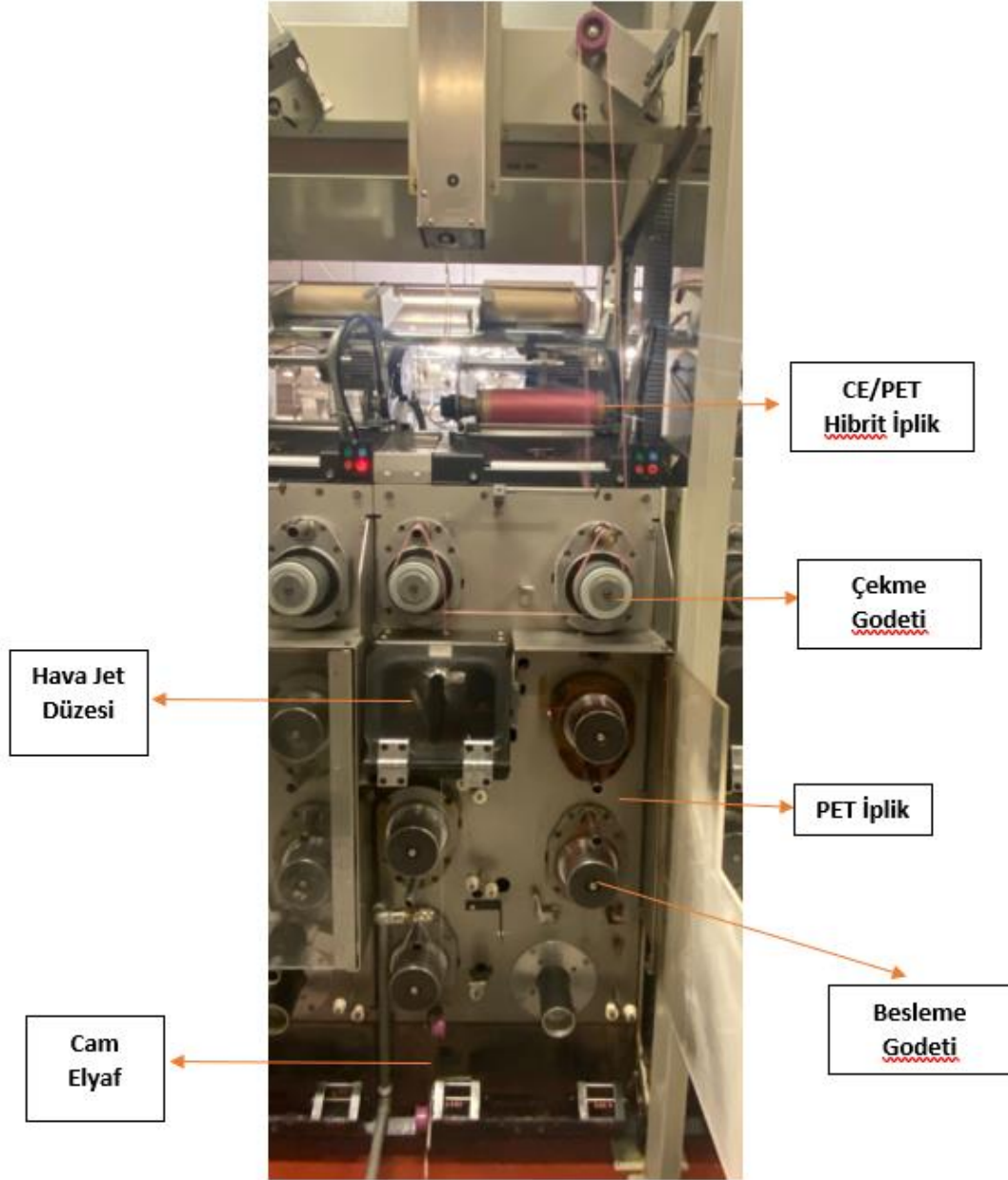
4.2.1.2 Hibrit İplik Üretim Yöntemi

Hava jetli karıştırma (commingling) yöntemiyle hibrit iplik üretimi için KORTEKS Mensucat Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de bulunan hava jet tekstüre makinesi üzerinde modifikasyonlar yapılmıştır, iplik geçiş yolları değiştirilmiş ve uygun hava jet düzesi alınmıştır. Ayrıca, karıştırma ünitesinde bulunan su istasyonu, suyun ek sürtünmeye neden olması ve karıştırma işlemi üzerinde olumlu bir etkisi olmadığından cam elyafların suyla temasını önlemek için makineden kaldırılmıştır. Hibrit iplik üretiminde kullanılan hava jet tekstüre makinesinin görünümü Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Bu makine kullanılarak takviye elemanı olarak görev alan sürekli cam elyaf ve matris elemanı olarak görev alan PET iplik bileşenleri besleme godetlerinden geçirilerek karıştırma ünitesine getirilmiştir. Burada bileşenler basınçlı soğuk hava yardımıyla açılmış ve hava akımı içinde birbiri içerisinde karıştırıldıktan sonra, hacimce %35 oranında cam elyaf içeren sürekli cam elyaf/PET (CE35/PET), hacimce %45 oranında cam elyaf içeren sürekli cam elyaf/PET (CE45/PET), hacimce %55 oranında cam elyaf içeren sürekli cam elyaf/PET (CE55/PET) ve hacimce %65 oranında cam elyaf içeren sürekli cam elyaf/PET (CE65/PET) hibrit iplikler elde edilmiştir. Üretilen hibrit ipliklerin karışım yüzdeleri Tablo 4.2'de, hibrit ipliklerin görünümü ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Hibrit iplik üretiminde en önemli konulardan biri proses parametrelerinin optimizasyonudur. Cam elyaf ve PET ipliğin besleme oranları, basınç, ve çekme hızı hibrit iplik üretimdeki en önemli parametrelerdir ve optimum proses parametrelerinin belirlenmesi için 72 parametre çalışılmıştır. En iyi karışım ve en

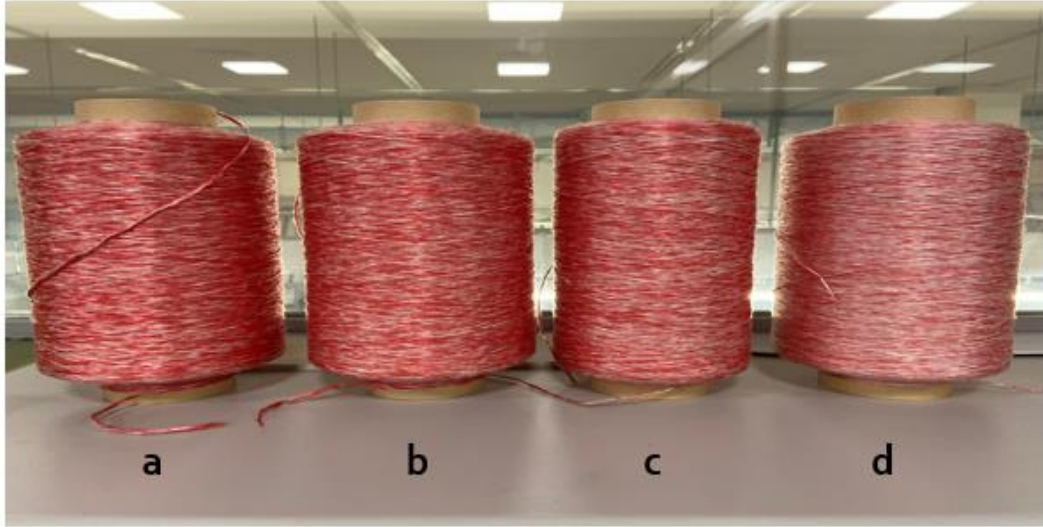
az elyaf kırılması gösteren üç farklı hibrit iplik seçilerek kesit görüntüleri incelenmiştir. En iyi karışımı sağlayan hibrit iplik tespit edilerek optimum parametreler saptanmıştır ve bu parametreler aralık halinde Tablo 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Hava jetli karıştırma makinesi

Tablo 4.2 Hazırlanan CE/PET hibrit ipliklerinin bileşimleri

Numune	Sürekli Cam Elyaf Hacim Oranı (%)	Sürekli Cam Elyaf Kütle Oranı (%)
CE35/PET	35	55,5
CE45/PET	45	62,5
CE55/PET	55	71,4
CE65/PET	65	77,0



Şekil 4.2 Sürekli cam elyaf/PET hibrit ipliklerin görünümü: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET, (d) CE65/PET

Tablo 4.3 CE/PET hibrit iplik üretim parametreleri

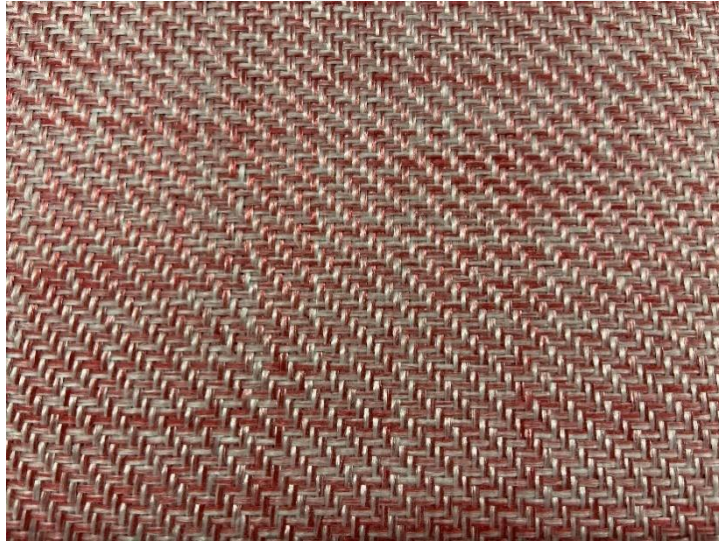
PET İplik Besleme (%)	Cam Elyaf Besleme (%)	Hava Jet Basıncı (Bar)	Godet Hızı (m/dk)
10-15	6-10	5-10	175-255

4.2.2 CE/PET Dokuma Kumaşların Hazırlanması

Hacimce farklı oranlarda üretilmiş olan CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit iplikleri Zorluteks firmasında bulunan Dornier makinesi kullanarak Dimi 2/2 (Twill 2/2) kumaş yapısında dokunmuştur. Üretim yapılan dokuma makine ve kumaş yapısı görüntüsü Şekil 4.3 ve 4.4’de gösterilmiştir. Hacimce farklı oranlardaki CE/PET hibrit ipliklerinden dokunan kumaş numuneleri 160 m genişliğe ve 10 metre uzunluğa sahiptir. Atkı ve çözgü sıklıkları 6 tel/cm’dir ve dokunan kumaş numunelerinin özellikleri Tablo 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Dornier makinesi



Şekil 4.4 Dimi 2/2 kumaş yapısı

Tablo 4.4 Dokunan kumaş numunelerinin özellikleri

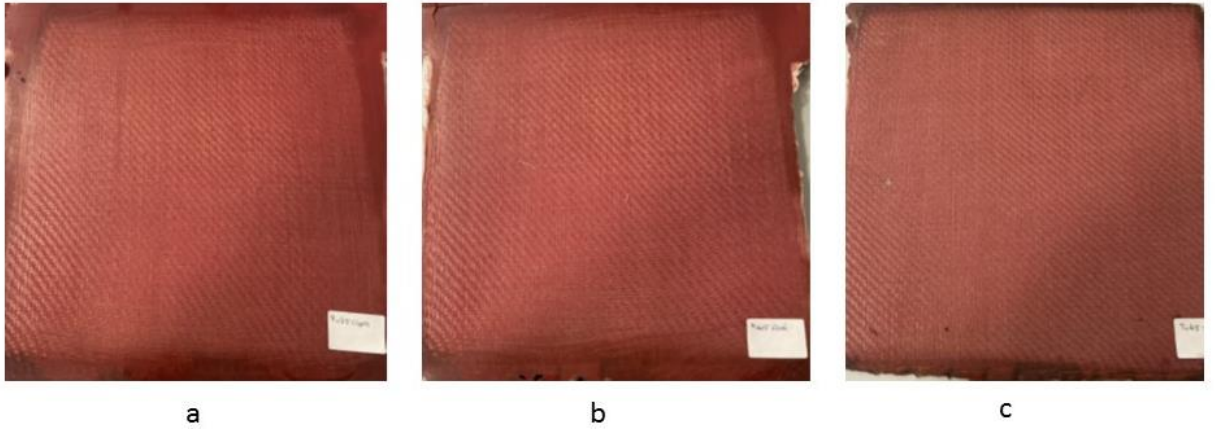
Hibrit İplik	Dokuma Yapısı	Kumaş Eni (m)	Kumaş Boyu (m)	Atkı Sıklığı (tel/cm)	Çözü Sıklığı (tel/cm)	Kumaş Ağırlığı (g/m ²)
CE35/PET	Dimi 2/2	1.6	10	6	6	685
CE45/PET	Dimi 2/2	1.6	10	6	6	583
CE55/PET	Dimi 2/2	1.6	10	6	6	592
CE65/PET	Dimi 2/2	1.6	10	6	6	486

4.2.3 CE/PET Termoplastik Kompozit Plakaların Hazırlanması

CE35/PET, CE45/PET ve CE65/PET hibrit iplikleri kullanılarak dokunmuş olan kumaşlar ilk olarak manuel basınç kontrollü sıcak kalıplama presi yardımıyla (Şekil 4.5) 290°C'de 40-47 ton aralığında basınç uygulanarak 6 kat 2 mm kalınlığında olacak şekilde 300x300 mm boyutunda basılıp kompozit plaka elde edilmiştir. Fakat presin manuel basınç kontrollü olması üretim boyunca kompozit plaka üretiminde sürekli basınç değişimleri, homojen basma kuvveti dağılımının sağlanamaması gibi istenmeyen sorunların yaşanmasına sebep olmuştur. Bu nedenle, CE55/PET hibrit ipliklerden dokunmuş kumaşlardan manuel basınç kontrollü yöntemle kompozit plakalarının hazırlanmasından vazgeçilmiştir ve otomatik basınç kontrollü presleme için bekletilmiştir. Manuel basınç kontrollü yöntemle üretilen CE35/PET, CE45/PET ve CE65/PET kompozit plakaların görüntüleri Şekil 4.6 da gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Manuel basınç kontrollü pres



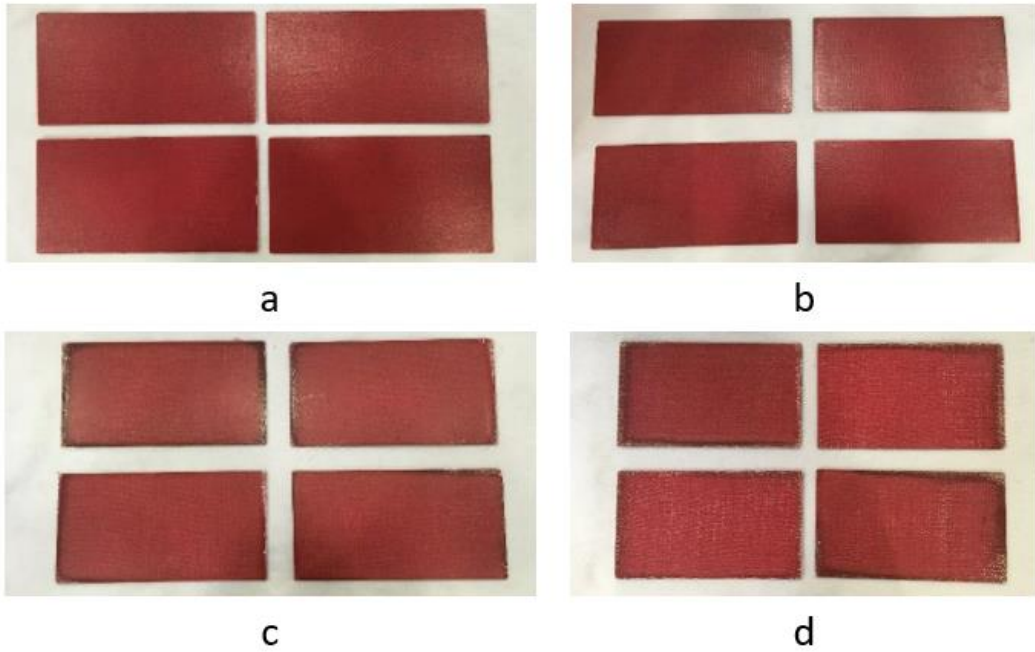
Şekil 4.6 Üretilen kompozit plaka görüntüleri: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE65/PET

Manuel basınç kontrollü pres kullanılarak yapılan geliştirme başarısız olduğu için ITA Aachen Üniversitesi'nde bulunan otomatik basınç kontrollü pres (Şekil 4.7) kullanılarak CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit ipliklerinden dokunmuş kumaşlar ilk olarak 28 bar ve 40 bar basınçta farklı sıcaklık parametreleri, süreler ve kumaş katları kullanılarak 150×300 mm boyutunda 2 mm kalınlıkta olacak şekilde basılmış, basılan kompozit test plakalarının optik mikroskop görüntüleri sonucunda optimum proses parametreleri belirlenmiş ve her birinden 4 adet olacak şekilde CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET

kompozit test plakaları basılmıştır (Şekil 4.8). Tüm proses parametreleri Tablo 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Otomatik basınç kontrollü pres



Şekil 4.8 Kompozit test plakaları: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET, (d) CE65/PET

Tablo 4.5 Otomatik basınç kontrollü yöntemde proses parametreleri

Numune	Basınç (bar)	Kumaş Kat Sayısı	Isıtma Sıcaklığı (°C)	Preste Isı Altında Bekleme Süresi (dk)	Pres Sıcaklıkları (°C)	Her Sıcaklıkta Pres Süreleri (dk)
CE35/PET 1. Test	28	6	285	15	60-285-60	35-15-45
CE35/PET 2. Test	40	7	290	10	60-290-60	35-10-45
CE45/PET 1. Test	28	6	285	15	60-285-60	35-15-45
CE45/PET 2. Test	40	7	290	10	60-290-60	35-10-45
CE55/PET 1. Test	28	6	290	15	60-290-60	35-15-45
CE55/PET 2. Test	40	6	290	10	60-290-60	35-10-45
CE65/PET 1. Test	28	6	290	15	60-290-60	35-15-45
CE65/PET 2. Test	40	6	290	20	60-290-60	35-20-45

4.2.4 Su Jeti İle Test Numunesi Kesimi

Su jeti ile kesme, yüksek hızlı, yüksek yoğunluklu, ultra yüksek basınçlı sudan gelen enerjiyi kullanarak nesneleri kesmek için varolan bir mühendislik yöntemidir. Su maksimum 392 MPa'ya (yaklaşık 4.000 atm) kadar basınçlandırılır ve küçük delikli bir nozülünden ($\Phi 0.1$ mm) yansıtılır [78].

Burada plakalardan su jeti kullanılarak çekme, eğme ve darbe testlerinde kullanılacak test parçaları kesilmiştir. Kullanılan su jeti kesim sistemi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Su jeti kesim sistemi [79]

4.3 Cam Elyaf/PET Kompozitlerinin Karakterizasyonu

4.3.1 Termal Testler

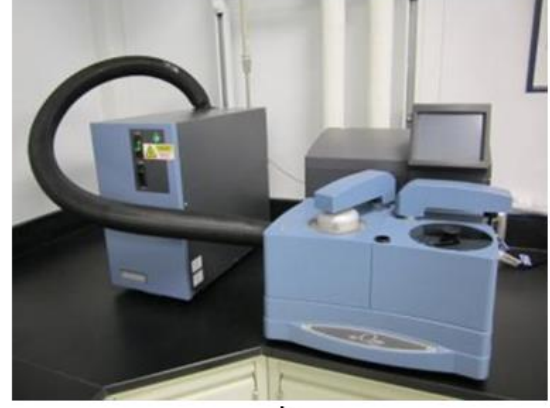
Üretilen hibrit ipliklerin ve kompozit test numunelerinin termal özelliklerinin karakterizasyonu için DSC analizi, kompozit test numunelerinin kül miktarının tayini için de kül testi yapılmış ve aşağıda detayları verilmiştir.

4.3.1.1 DSC

CE35/PET hibrit iplik, CE45/PET hibrit iplik, CE55/PET hibrit iplik ve CE65/PET hibrit ipliklerin erime sıcaklıklarını incelemek için 10°C/dk test hızında Korteks bünyesinde bulunan Mettler Toledo- 823e model DSC analiz cihazı kullanılmıştır. CE35/PET kompozit test numunesi, CE45/PET Kompozit test numunesi, CE55/PET Kompozit test numunesi ve CE65/PET Kompozit test numuneleri için yine 10°C/dk test hızında Butekom bünyesinde bulunan TA Instrument DSC Q2000 modeli kullanılarak DSC testi yapılmıştır. Kullanılan ekipman görselleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



a



b

Şekil 4.10 (a) DSC cihazı (hibrit iplikler), (b) TA Instrument Q2000 DSC cihazı (kompozit plakalar)

4.3.1.2 Kül Fırını

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit test numunelerinin cam elyaf miktarları 1200°C fırın sıcaklığında 90 dakika bekleme süresinde Butekom bünyesinde bulunan Nabertherm LHT 08/18 model yakma fırını kullanılarak tespit edilmiştir. Kullanılan ekipman görseli Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Kül fırını [80]

4.3.2 Mekanik Testler

Üretilen hibrit ipliklerin, kumaşların ve Kompozit test numunelerinin mekaniksel özelliklerinin incelenmesi için aşağıdaki testler yapılmıştır.

4.3.2.1 İplik Kopma Dayanımı

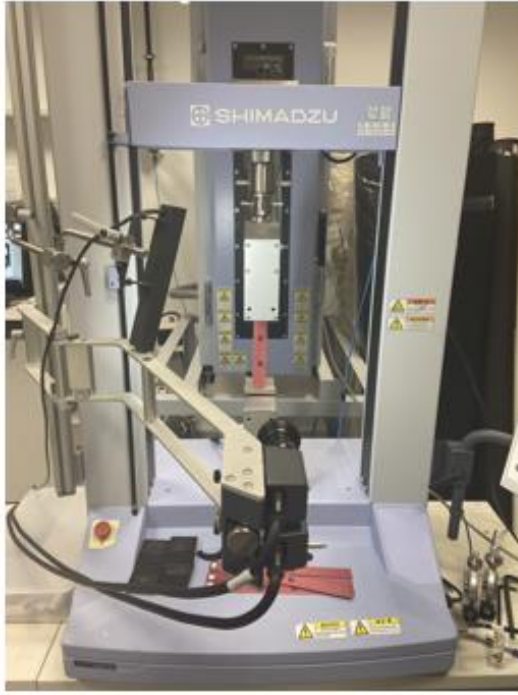
CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit ipliklerin ve hibrit İplik yapımında kullanılan cam elyaf ve PET ipliğın kopma dayanımlarını incelemek için ISO 3341:2000 test standardına göre hibrit iplik numuneleri hazırlanmış olup, Butekom bünyesinde bulunan Shimadzu AGS-X cihazı kullanılarak çeneler arasındaki mesafenin 300 mm olduğu, 200 mm/dk test hızında iplik kopma dayanımı testi gerçekleştirilmiştir.

4.3.2.2 Kumaş Kopma Dayanımı

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit iplikleri kullanılarak oluşturulmuş kumaşların kopma dayanımlarını incelemek için ISO 4606 test standardına göre kumaş numuneleri hazırlanmış ve Butekom bünyesinde bulunan Shimadzu AGS-X cihazı kullanılarak kumaş kopma dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Kumaş kopma dayanımı testi yapılırken çeneler arası mesafe 200 mm, test hızı 100mm/dk, ön gerilim ise 10N'dur.

4.3.2.3 Kompozit Kopma/Çekme Testi

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit test numunelerinin kopma/çekme mukavemetleri ve modüllerini görmek için ISO 527-4 test standardı kullanılmıştır. ISO 527-4 test standardındaki Tip 2'ye göre her biri 2 mm kalınlığında 250 mm uzunluğunda ve 25 mm genişliğinde olacak şekilde 5 adet CE35/PET, 5 adet CE45/PET, 5 adet CE55/PET ve 5 adet CE65/PET kompozit test numuneleri hazırlanmıştır. Butekom bünyesinde bulunan Shimadzu AGS-X 10 kN ve Besmak BMT 100E 100 kN'luk cihazlar kompozit numunelerinin kopma/çekme testlerinin yapılması için kullanılmıştır. Kullanılan cihazlar Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



a

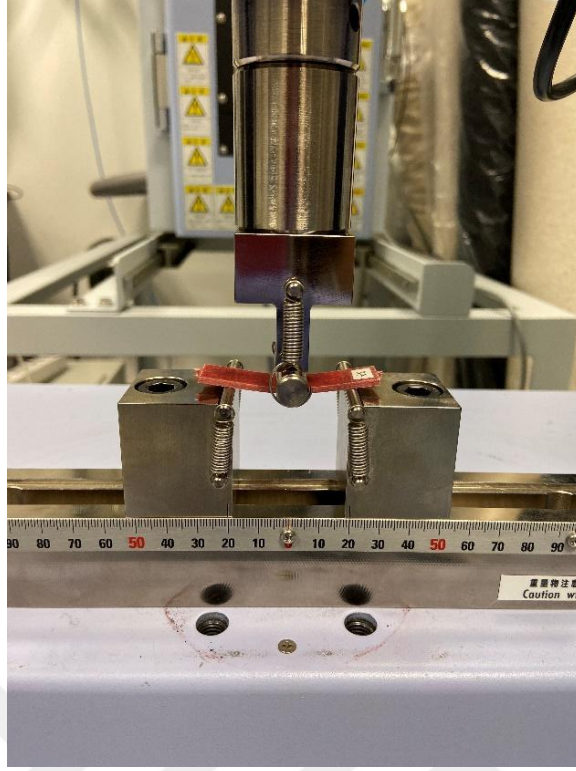


b

Şekil 4.12 (a) Shimadzu AGS-X 10 kN, (b) Besmak BMT 100E 100 kN

4.3.2.4 Kompozit 3 Nokta Eğme Testi

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit test numunelerinin eğilme dayanımlarını ve modüllerini görmek için ISO 14125 3 nokta eğme test standardı kullanılmıştır. ISO 14125 test standardındaki Sınıf 3'e göre her biri 2 mm kalınlığında 60 mm uzunluğunda ve 15 mm genişliğinde olacak şekilde 5 adet CE35/PET, 5 adet CE45/PET, 5 adet CE55/PET ve 5 adet CE65/PET kompozit test numuneleri hazırlanmıştır. Butekom bünyesinde bulunan Shimadzu AGS-X 10 KN cihazı kompozit numunelerinin 3 nokta eğme testlerinin yapılması için kullanılmıştır. Yük altındaki test numunesinin görüntüsü Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Yük altındaki kompozit test numunesi

4.3.2.5 Kompozit Darbe Testi

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit test numunelerinin darbe dayanımlarını görmek için ISO 6603-2 ağırlık düşürme (drop weight) test standardı kullanılmıştır. ISO 6603-2 test standardına göre her biri 2 mm kalınlığında 60 mm uzunluğunda ve 60 mm genişliğinde olacak şekilde 5 adet CE35/PET, 5 adet CE45/PET, 5 adet CE55/PET ve 5 adet CE65/PET kompozit test numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 4.14'te gösterilen Butekom bünyesinde bulunan Instron CEAST 9340 cihazı Kompozit numunelerinin darbe testlerinin yapılması için kullanılmıştır.



Şekil 4.14 Instron CEAST 9340

4.3.3 SEM Analizi

CE35/PET hibrit iplik, CE45/PET hibrit iplik, CE55/PET hibrit iplik ve CE65/PET hibrit ipliklerin içerisindeki cam elyaf ve PET ipliğin dağılımını görmek için 15 kV'da TUBİTAK-BUTAL bünyesinde bulunan TESCAN VEGA 3 model SEM analiz cihazı ayrıca CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET Kompozit test numunelerindeki matris malzeme ve takviye edici malzeme dağılımını görmek için de 15 kV'da TUBİTAK-BUTAL bünyesinde bulunan TESCAN VEGA 3 model SEM analiz cihazı kullanılmıştır. Kullanılan SEM analiz cihazı Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

4.3.4 Optik Mikroskop Analizi

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET Kompozit test numunelerindeki boşluk ve matris bileşen dağılımlarını görmek için ITA Aachen Üniversitesi'nde bulunan Şekil 4.16'daki Leica DM4000M model mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 4.15 TESCAN VEGA 3 SEM analiz cihazı [81]



Şekil 4.16 Leica DM4000M optik mikroskop [82]

5.1 Kompozit Üretimi Optimum Parametre Analiz Sonuçları

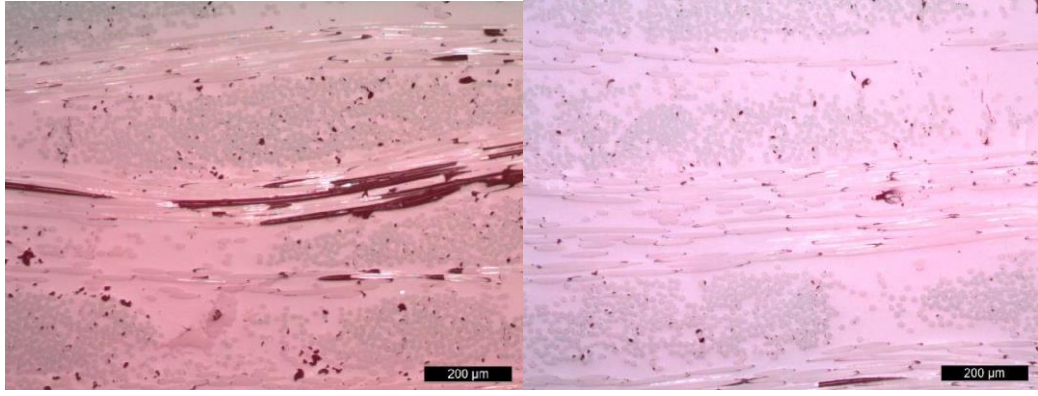
Tez kapsamında Bölüm 4'te açıklandığı gibi hazırlanan; CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozitlerinin üretiminde optimum proses parametreleri incelenmiştir ve Tablo 4.5'te listelenmiştir. Bu bölümde, CE/PET kompozitlerinin hazırlanmasında belirlenen optimum parametreler ve bu parametreler sonucu elde edilen kompozit numunelerinin optik mikroskop analizleri detaylı açıklanmıştır.

5.1.1 CE35/PET Kompozit Numunesi Optimum Parametre Analizi

CE35/PET kompozitinin test plakası numunesi üretimi için 28 bar ve 40 bar basınçta iki farklı çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalarda kullanılan diğer parametreler Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Bu iki çalışmada uygulanan parametrelerin hazırlanan kompozit test plakası numunelerine etkisi optik mikroskop analizi yapılarak incelenmiştir. Optik mikroskop analizi ile elde edilen CE35/PET kompozitinin kesit yüzey görüntüleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 CE35/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları

Numune	Basınç (bar)	Kumaş Kat Sayısı	Isıtma Sıc. (°C)	Isıtmada Bekleme Süresi (dk)	Pres Sıcaklıkları (°C)	Pres Sıcaklığında Bekleme Süresi (dk)
CE35/PET 1. Test	28	6	285	15	60-285-60	35-15-45
CE35/PET 2. Test	40	7	290	10	60-290-60	35-10-45



(a)

(b)

Şekil 5.1 Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE35/PET 1. Test, (b) CE35/PET 2. Test

Şekil 5.1’de gösterilen CE35/PET kompozitinin 1. Test optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, kompozit yapısında kırılmış cam elyaf ve küçük boşluklar olduğu anlaşılmıştır. CE35/PET kompozitinin 2. Test optik mikroskop görüntüsünde de 1. Test numunesindeki kadar çok olmasa da cam elyafların kırılmış olduğu saptanmıştır. 2. Test koşullarında hazırlanan kompozitte cam elyafların PET matrisine daha iyi yerleştiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle CE35/PET kompozit test numunesi üretim parametreleri için 2. Test parametreleri optimum olarak kabul edilmiş ve diğer tüm testlerde bu parametrelerle üretilen CE35/PET Kompozit test numuneleri kullanılmıştır.

5.1.2 CE45/PET Kompozit Numunesi Optimum Parametre Analizi

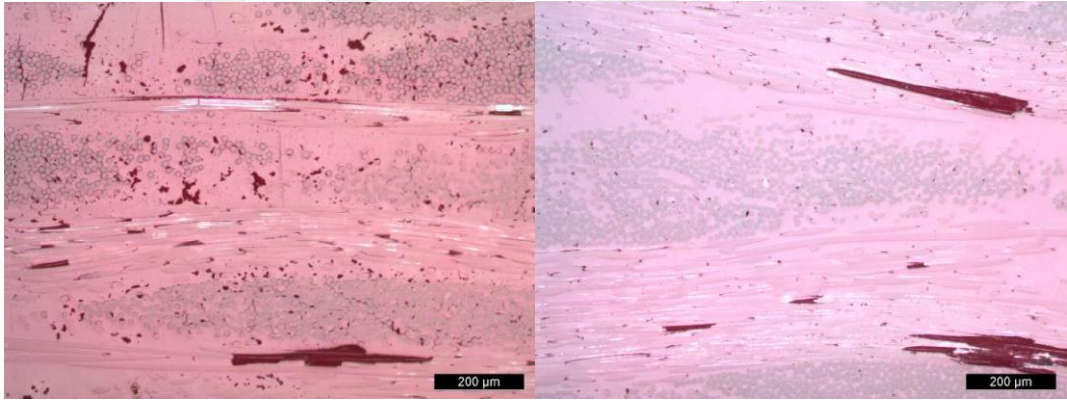
CE45/PET kompozit test plakası numuneleri 28 bar ve 40 bar olacak şekilde iki farklı basınçta hazırlanmıştır ve çalışma parametreleri Tablo 5.2’de gösterilmiştir. CE45/PET kompozit test plakalarına çalışma parametrelerinin etkisi optik mikroskop analizleri ile incelenmiştir ve kesit yüzey görüntüleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

28 bar basınçta uygulanan 1. Test ile hazırlanan CE45/PET kompozit test plakasının kesit yüzey görüntülerinde, kırılmış cam elyaflar ve küçük boşluklar olduğu görülmüştür. 40 bar basınçta uygulanan 2. Test ile elde edilen mikroskop görüntülerinde ise daha az miktarda kırık cam elyaflar olduğu ve cam elyaflar PET

matrisine boşluk oluşmadan daha iyi yerleştiği anlaşılmıştır. Bu nedenle, CE45/PET kompozit plaka üretimi için optimum parametreler olarak 2. Test koşulları kabul edilmiştir ve CE45/PET Kompozitine uygulanacak diğer testlerde de 2. Test plakaları kullanılmıştır.

Tablo 5.2 CE45/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları

Numune	Basınç (bar)	Kumaş Kat Sayısı	Isıtma Sıc. (°C)	Isıtmada Bekleme Süresi (dk)	Pres Sıcaklıkları (°C)	Pres Sıcaklığında Bekleme Süresi (dk)
CE45/PET 1. Test	28	6	285	15	60-285-60	35-15-45
CE45/PET 2. Test	40	7	290	10	60-290-60	35-10-45



(a)

(b)

Şekil 5.2 Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE45/PET 1. Test, (b) CE45/PET 2. Test

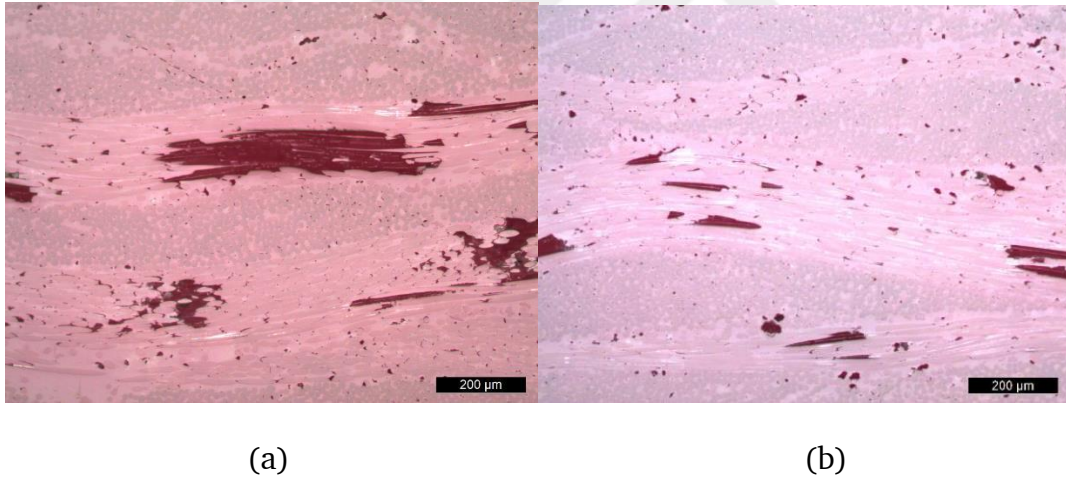
5.1.3 CE55/PET Kompozit Numunesi Optimum Parametre Analizi

CE55/PET kompozitinin test plakası numunesi üretimi için 28 bar ve 40 bar basınçta iki farklı çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalarda kullanılan diğer parametreler Tablo 5.3’de gösterilmiştir. Bu iki çalışmada uygulanan parametrelerin hazırlanan kompozit test plakası numuneleri üzerindeki etkisi

optik mikroskop analizi yapılarak incelenmiştir. Optik mikroskop analizi ile elde edilen CE55/PET kompozitinin kesit yüzey görüntüleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3 CE55/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları

Numune	Basınç (bar)	Kumaş Kat Sayısı	Isıtma Sıc. (°C)	Isıtmada Bekleme Süresi (dk)	Pres Sıcaklıkları (°C)	Pres Sıcaklığında Bekleme Süresi (dk)
CE55/PET 1. Test	28	6	290	15	60-290-60	35-15-45
CE55/PET 2. Test	40	6	290	10	60-290-60	35-10-45



Şekil 5.3 Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE55/PET 1. Test, (b) CE55/PET 2. Test

Şekil 5.3'de gösterilen CE55/PET kompozitinin 1. Test optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, kompozit yapısında kırılmış cam elyaf ve küçük boşluklar olduğu anlaşılmıştır. CE55/PET kompozitinin 2. Test optik mikroskop görüntüsünde de 1. Test numunesindeki kadar çok olmasa da cam elyafların kırılmış olduğu saptanmıştır. 2. Test koşullarında hazırlanan kompozitte cam elyafların PET matrisine daha iyi yerleştiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle CE55/PET kompozit test

numunesi üretim parametreleri için 2. Test parametreleri optimum olarak kabul edilmiş ve diğer tüm testlerde bu parametrelerle üretilen CE55/PET Kompozit test numuneleri kullanılmıştır.

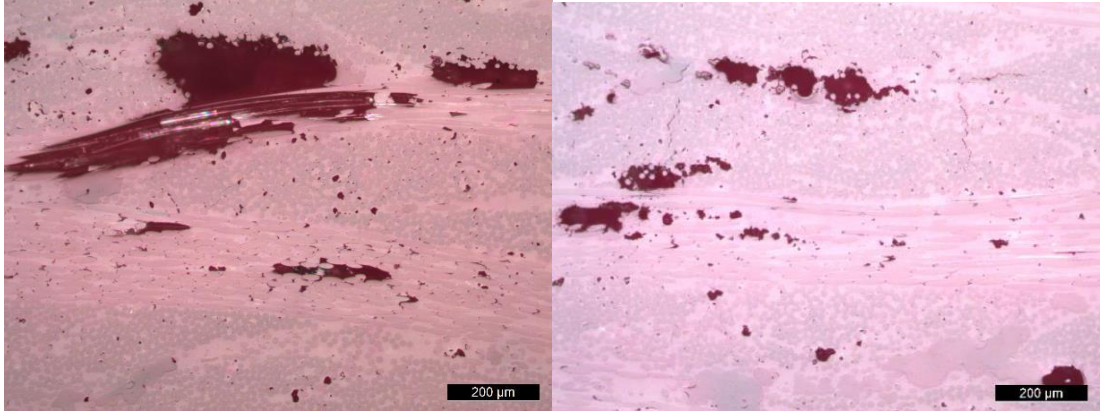
5.1.4 CE65/PET Kompozit Optimum Parametre Analizi

CE65/PET kompozit test plakası numuneleri 28 bar ve 40 bar olacak şekilde iki farklı basınçta hazırlanmıştır ve çalışma parametreleri Tablo 5.4'te gösterilmiştir. CE65/PET kompozit test plakalarına çalışma parametrelerinin etkisi optik mikroskop analizleri ile incelenmiştir ve kesit yüzey görüntüleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4 CE65/PET kompozit numunelerini hazırlama koşulları

Numune	Basınç (bar)	Kumaş Kat Sayısı	Isıtma Sıc. (°C)	Isıtmada Bekleme Süresi (dk)	Pres Sıcaklıkları (°C)	Pres Sıcaklığında Bekleme Süresi (dk)
CE65/PET 1. Test	28	6	290	15	60-290-60	35-15-45
CE65/PET 2. Test	40	6	290	20	60-290-60	35-20-45

Şekil 5.4'te gösterilen CE65/PET kompozitinin 1. Test optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, kompozit yapısında boşluklar ve kuru bölgeler olduğu görülmüştür. CE65/PET kompozitinin 2. Test optik mikroskop görüntüsünde de 1. Test numunesindeki kadar çok belirgin olmasa da kuru bölgeler yani PET ipliğin yetersiz kaldığı bölgeler olduğu saptanmıştır. Bu nedenle 2. Test koşullarının daha iyi sonuç verdiğini görerek CE65/PET kompozit test numunesi üretim parametreleri için 2. Test parametreleri optimum olarak kabul edilmiş ve diğer testlerde bu parametrelerle üretilen CE65/PET kompozit test numuneleri kullanılmıştır.



(a)

(b)

Şekil 5.4 Optik mikroskop analiz görüntüleri: (a) CE65/PET 1. Test, (b) CE65/PET 2. Test

5.2 Mekanik Test Sonuçları

Hacimce farklı oranlarda karıştırılmış cam elyaf/PET hibrit iplikleri için kopma/çekme dayanımı yapılmış ve bu hibrit iplikler kullanılarak elde edilmiş kompozit test plakası numunelerine uygulanan kopma/çekme, üç nokta eğme ve darbe testlerinin sonuçları detaylı olarak bu bölümde açıklanmıştır.

5.2.1 CE/PET Hibrit İpliklerin Kopma/Çekme Testi Sonuçları

Hacimce farklı oranlarda cam elyaf kullanılarak hazırlanan CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET, CE65/PET hibrit ipliklerinin ve hibrit iplik yapımında kullanılan cam elyaf ve PET ipliğin kopma dayanımları ISO 3341:2000 test standardına göre kopma/çekme testi ile belirlenmiştir ve test sonuçları Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Kopma testi sonuçlarına göre cam elyaf'ın ve PET ipliğin hibrit ipliklerden daha iyi kopma dayanımı gösterdiği görülmektedir. Hibrit ipliklerde cam elyaf oranının artması kopma dayanımını doğrusal olarak etkilememiştir.

Tablo 5.5 CE/PET hibrit ipliklerinin kopma/çekme dayanımı test sonuçları

Numune	Maksimum Kuvvet (cN)	% CV*	Kopma Dayanımı (cN/tex)	%CV*
PET İplik	122	1,2	37	1,2
Cam Elyaf	120	17,1	39,9	17,1
CE35/PET	76,9	5,5	13,0	5,5
CE45/PET	61,5	4,5	11,7	4,5
CE55/PET	72,1	5,6	16,0	5,6
CE65/PET	43,6	4,9	11,9	4,9

*%CV: Ölçüm sonuçlarının kendi arasındaki yüzde değişimi

5.2.2 CE/PET Kumaşların Kopma/Çekme Testi Sonuçları

Hacimce % 35, 45, 55 ve 65 oranında cam elyaf kullanılarak hazırlanan CE/PET, hibrit ipliklerin dokunmasıyla elde edilmiş kumaşların kopma dayanımlarını belirlemek için ISO 4606 test standardında kopma testi yapılmıştır. Yapılan test sonuçları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6 CE/PET kumaşların kopma dayanımı test sonuçları

Numune	En Büyük Kuvvet (N)				En Büyük Kuvvetteki Uzama (%)			
	Atkı Yönü	%CV*	Çözümlü Yönü	%CV*	Atkı Yönü	%CV*	Çözümlü Yönü	%CV*
CE00/PET	290	8,2	210	4,5	25,0	24,8	25,0	1,4
CE35/PET	539	18,7	1353	14,4	15,5	37,0	27,0	13,5
CE45/PET	1218	21,2	1376	26,6	11,5	51,4	19,5	50,0
CE55/PET	1169	23,6	883	27,9	6,0	66,0	13,0	62,1
CE65/PET	786	22,7	1033	9,4	9,0	39,0	9,5	80,1

*%CV: Ölçüm sonuçlarının kendi arasındaki yüzde değişimi

Tablo 5.6’da listelenen test sonuçlarına göre, CE/PET kumaşların cam elyaf oranı artarken kopma dayanımları azalmaktadır ve en iyi kopma dayanımını CE35/PET hibrit ipliklerinden dokunan kumaş göstermiştir.

5.2.3 CE/PET Kompozit Plakaların Kopma/Çekme Testi Sonuçları

Kompozit test numunesi hazırlanması aşamasında manuel basınç kontrollü pres ile çalışmalara başlanmış fakat istenilen sonuç alınamadığı için otomatik basınç kontrollü pres ile devam edilmiştir. Bu nedenle bu bölümde hem manuel basınç kontrollü pres ile yapılan çalışmaların hem de otomatik basınç kontrollü pres ile yapılan çalışmaların kopma/çekme test sonuçları açıklanacaktır.

5.2.3.1 Manuel Basınç Kontrollü Pres İle Hazırlanan CE/PET Kompozit Plakaların Kopma/Çekme Testi Sonuçları

CE/PET kompozit plakalarının hazırlanmasında presleme aşamasında Bölüm 4.23’te açıklandığı üzere manuel basınç kontrollü pres ile basınç değişimlerinin kontrol edilememesi, PET matris malzemesinin cam elyaflar arasında homojen yerleşememesi (emprenye olmaması) nedeniyle deneme amaçlı sadece CE35/PET, CE45/PET ve CE65/PET kompozit test plakaları hazırlanmıştır. Manuel basınç kontrollü pres ile hazırlanan plakalar için sadece kopma/çekme ve 3 nokta eğme testleri yapılmıştır. Manuel basınç kontrollü pres ile yapılan kompozit plaka hazırlama çalışmaları, otomatik basınç kontrollü pres ile yapılan çalışmalardan elde edilen kompozitler ile karşılaştırılmıştır. CE35/PET, CE45/PET ve CE65/PET kompozit test plakalarının kopma dayanımlarını belirlemek için ISO 527-4 test standardında 1N ön gerilme uygulanarak, 1 mm/dk ön gerilme hızlı, 5 mm/dk test hızlı, 5 kN yük hücreli, 150 mm kavrama mesafeli kopma/çekme testi gerçekleştirilmiştir ve test sonuçları Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7 Manuel basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların kopma dayanımı test sonuçları

Numune	En Büyük Kuvvet (N)	En Büyük Kuvvette Gerilim (MPa)	En Büyük Kuvvette Uzama (%)
CE35/PET	4998	140,43	2,5
CE45/PET	5041	140,79	2,6
CE65/PET	3258	83,94	2,0

5.2.3.2 Otomatik Basınç Kontrollü Pres İle Hazırlanan CE/PET Kompozit Plakaların Kopma/Çekme Testi Sonuçları

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozitlerinin test plakaları otomatik basınç kontrollü pres yardımıyla ITA Aachen üniversitesi'nde hazırlanmıştır. Otomatik basınç kontrollü pres ile hazırlanan plakaların kopma dayanımlarını manuel basınç kontrollü hazırlanan plakalar ile karşılaştırmak için ISO 527-4 test standardına göre testler yapılmıştır. Standart metoda uygun şekilde; 1N ön gerilme uygulanarak, 1 mm/dk ön gerilme hızlı, 5 mm/dk test hızlı, 150 mm kavrama mesafeli, 10 kN yük hücreli (CE65/PET test plakası için kullanılmıştır) ve 100 kN yük hücreli (CE35/PET, CE45/PET ve CE55/PET test plakaları için kullanılmıştır) kopma/çekme testi gerçekleştirilmiştir ve test sonuçları Tablo 5.8'de verilmiştir.

Test sonuçlarına bakıldığında en iyi kopma dayanımını 268,7 MPa olarak CE45/PET kompozit test numunesinin gösterdiği görülmektedir. En düşük kopma dayanımını ise 131,8 MPa olarak CE65/PET kompozit numunesi göstermiştir. Hacimce cam elyaf oranı arttıkça kopma dayanımı önce artmış, hacimce max (%45) cam oranına ulaşıldıktan sonra kopma dayanımı, artan cam elyaf oranı ile azalmıştır.

Tablo 5.8 Otomatik basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların kopma dayanımı test sonuçları

Numune	En Büyük Kuvvet (N)	En Büyük Kuvvette Gerilim (MPa)	En Büyük Kuvvette Uzama (%)
CE35/PET	10947	242,5	1,5
CE45/PET	11687	268,7	1,5
CE55/PET	9741	223,75	3,29
CE65/PET	5374	131,8	2,0

Literatür araştırmaları incelendiğinde, polimerik kompozit matris malzemesi PET iplik olacak şekilde sürekli cam elyaf ile bu tez çalışmasındaki gibi farklı cam elyaf oranlarında detaylı olarak yapılan bir çalışma olmadığı anlaşılmaktadır. Lystrup [83] tarafından yapılan bir çalışmada, hacimce %44 cam elyaf içeriğine sahip cam elyaf/PET hibrit ipliklerden twill 3/3 kumaş konstrüksiyonunda dokunmuş kumaşlardan elde edilen termoplastik kompozitlerin gerilme özellikleri incelenmiş ve 260 MPa gerilme mukavemeti elde edilmiştir. Bu değer, tez çalışmamızda hazırlanan CE45/PET kompoziti için ölçülen gerilme mukavemeti değeri 268,7 MPa ile karşılaştırıldığında yakın değerler oldukları görülmüştür. Bir diğer çalışmada; Santulli [85], ağırlıkça %60 cam elyaf içeriğinde olacak şekilde karıştırılmış E-cam/PP laminatların gerilme özelliklerini incelemiş ve 240 MPa gerilme mukavemeti elde etmiştir. Bu sonuçla kıyaslandığında PET elyaf ile hazırlanan kompozitin PP'e göre biraz daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalarda, ortalama termoplastik PET kopma dayanımı 61,8 MPa'dır [86]. Literatür ve bu tez çalışmasında elde edilen bulgulardan, cam elyaf takviye malzemesinin PET kompozitlerin kopma dayanımı artırdığı saptanmıştır.

5.2.4 CE/PET Kompozit Plakaların 3 Nokta Eğme Testi Sonuçları

Bu bölümde manuel ve otomatik basınç kontrollü pres kullanılarak hazırlanan CE/PET kompozit test plakalarının 3 nokta eğme testi sonuçları açıklanacaktır.

5.2.4.1 Manuel Basınç Kontrollü Pres İle Hazırlanan CE/PET Kompozit Plakaların 3 Nokta Eğilme Testi Sonuçları

CE35/PET, CE45/PET, CE65/PET Kompozit test plakaları manuel basınç kontrollü pres kullanılarak hazırlanmış ve eğilme dayanımlarını görebilmek için 2 mm/dk test hızında, 40 mm destek aralığında 3 nokta eğme testi yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9 Manuel basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların eğilme dayanımı sonuçları

Numune	En Büyük Kuvvet (N)	Eğilme Gerilimi (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
CE35/PET	136,35	254,38	18709
CE45/PET	97,44	187,84	18035
CE65/PET	73,38	123,94	15483

Eğilme dayanımı testi sonuçlarına göre; manuel basınç kontrollü pres kullanılarak hazırlanmış CE/PET kompozit plakalarının hacimce cam elyaf oranının artması ile eğilme dayanımı azalmaktadır. Manuel basınç kontrollü pres ile hazırlanan kompozit plakalarda cam elyafın PET matrisinde iyi empenye olmadığı ve delaminasyonlara sahip olması göz önünde bulundurulduğunda elde edilen bu sonuçların güvenilir ve kabul edilebilir olmadığı düşünülmektedir.

5.2.4.2 Otomatik Basınç Kontrollü Pres İle Hazırlanan CE/PET Kompozit Plakaların 3 Nokta Eğilme Testi Sonuçları

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit test plakaları otomatik basınç kontrollü pres yardımıyla ITA Aachen Üniversitesi’nde hazırlanmış ve 1 mm/dk test hızında, 40 mm destek aralığında, 1 kN yük hücresi kullanılarak 3 Nokta Eğilme testi yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 5.10’da gösterilmiştir.

Tablo 5.10 Otomatik basınç kontrollü hazırlanan CE/PET kompozit plakaların eğilme dayanımı sonuçları

Numune	En Büyük Kuvvet (N)	Eğilme Gerilimi (MPa)	Eğilme Modülü (MPa)
CE35/PET	307	278	14275
CE45/PET	240	279	16031
CE55/PET	248	309	19900
CE65/PET	119	188	18413

Bu sonuçlara göre; CE/PET kompozitinde hacimce cam elyaf oranı %55 olduğunda en yüksek eğilme dayanımı değeri elde edilmiştir ve kompozitte cam elyaf oranı arttıkça eğilme dayanımı artmıştır, % 65 cam elyaf oranında 188 MPa ölçülerek azaldığı anlaşılmıştır. Eğilme dayanımı için optimum değer 309 MPa olarak CE55/PET kompozit plakası için ölçülmüştür. CE55/PET kompozit numunesi aynı zamanda 19900 MPa eğilme modülü değeriyle en iyi eğilme davranışını göstermiştir.

Andersen and Lystrup [87], hacimce %45 oranında cam elyaf içeren cam elyaf /PET hibrit ipliklerden twill olarak dokunmuş kumaşlar kullanılarak, vakum ve 0.7 MPa basınç altında otoklavda hazırlanan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda vakum altında 395 MPa eğilme mukavemeti ve 20 GPa eğilme modülü, 0.7 MPa basınçta ise 387 MPa eğilme mukavemeti ve 19 GPa eğilme modülü elde etmişlerdir. Bu tez çalışmasında otomatik kontrollü presleme ile hazırlanan CE/PET kompoziti için elde edilen eğilme testi sonuçları ile kıyaslandığında, otoklavda hazırlanan CE45/PET kompozitlerinin eğilme dayanımı ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Santulli [85], ağırlıkça %60 cam elyaf içeriğine sahip karıştırılmış E-cam/PP laminatların eğilme özelliklerini incelemiş, 230 MPa eğilme mukavemeti ve 11.5 GPa eğilme modülü elde etmiştir. Bu sonuçla kıyaslandığında PET elyafın PP'e göre eğilme mukavemeti olarak daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Literature göre [86] ortalama termoplastik PET eğilme dayanımı 82,1 MPa'dır. Sonuçlardan cam elyaf

takviye malzemesinin kompozit malzemenin eğilme dayanımı arttırdığı saptanmıştır.

5.2.5 CE/PET Kompozit Plakaların Darbe Testi Sonuçları

Otomatik basınç kontrollü pres ile hazırlanan kompozit plakaların kopma/çekme ve eğme testi sonuçları manuel basınç kontrollü pres ile elde edilen kompozit plakalara göre daha iyi olduğundan darbe testleri, termal testler, SEM analizleri ve optik mikroskop görüntüleri manuel basınç kontrollü pres ile elde edilen kompozit test plakaları için yapılmamıştır. Bu bölümden itibaren otomatik basınç kontrollü pres ile hazırlanan kompozit plakaları için karakterizasyon analizlerinin sonuçları verilecektir.

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit plakaları otomatik basınç kontrollü pres kullanılarak hazırlanmış ve ISO 6603-2 darbe test standardına göre 40 mm destek halkalı, 20 mm darbe cismi çaplı, 4,4 m/s test hızında darbeli delinme mukavemeti tayini için darbe testleri yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 5.11’de gösterilmiştir.

Tablo 5.11 CE/PET kompozit plakaların darbe testi sonuçları

Numune	En Büyük Kuvvet (N)	Delme Enerjisi (J)	Toplam Enerji (J)
CE35/PET	5020	13,3	-
CE45/PET	4863	18,1	-
CE55/PET	5127	19,5	-
CE65/PET	6051	-	42,2

CE65/PET kompozit test numunesinde test sonrası delinme meydana gelmediği için toplam enerji sonucu girilmiştir. Tablo 5.11’de verilen darbe testi sonuçlarına göre optimum darbe dayanımını 19,5 J delme enerjisi değeri ile CE55/PET kompoziti göstermiştir. Literature göre, termoplastik PET için delme enerjisi 12-41 J arasında değişmekte olup ortalama 25,7 J’dür [86]. Bu çalışmada hazırlanan CE/PET kompozitleri için elde edilen darbe testi sonuçları literatüre göre daha düşük elde edilmiştir ve kompozitlerde cam elyaf oranının artmasıyla delme

enerjisi artmıştır. Santulli [85], ağırlıkça %60 cam elyaf içeriğine sahip karıştırılmış E-cam/PP laminatların ISO 179 standardında Charpy darbe özelliklerini farklı sıcaklıklarda incelemiş ve kompozitlerin delme enerjisi değerinin sıcaklığa bağlı olarak 180 ile 197 kJ/m² arasında değiştiğini bildirmiştir. Yapılan Charpy darbe testi bu çalışmadan farklı olduğu için karşılaştırması yapılamamıştır. Literatür çalışmalarında, bu çalışmada uygulanan ISO 6603-2 standardına göre darbe testi sonuçlarının karşılaştırmasını yapabileceğimiz cam elyaf/PET hibrit iplikleri kullanılarak dokunmuş kumaşlardan üretilmiş CE/PET termoplastik kompozitlerini içeren herhangi bir çalışma bulunamadığı için karşılaştırılması yapılamamıştır. Bu nedenle, tez kapsamında elde edilen hem hacimce farklı oranlarda cam elyaf içeren sürekli cam elyaf/PET hibrit ipliklerinden dokunan kumaşlar kullanılarak hazırlanan CE/PET termoplastik kompozitlerin darbe dayanımı üzerine etkilerinin incelenmesi hem de daha önce yapılmamış bir çalışma olması nedeniyle bu tez çalışmasından elde edilen bulgular literatüre katkı sağlamıştır.

5.3 Termal Analiz Sonuçları

Bu bölümde, hacimce farklı oranlarda karıştırılarak elde edilmiş cam elyaf/PET hibrit ipliklerin ve bu hibrit ipliklerden dokunan kumaşlar kullanılarak elde edilen CE/PET kompozitlerinin DSC analiz sonuçları detaylı olarak açıklanmıştır.

5.3.1 CE/PET Hibrit İpliklerinin DSC Analiz Sonuçları

CE/PET hibrit ipliklerinin hazırlanmasında kullanılan PET iplik ile hazırlanan CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit ipliklerin, erime pik sıcaklıkları ve erime enerjilerini içeren DSC analiz sonuçları Tablo 5.12’de gösterilmiştir.

DSC analizi sonuçlarına göre, PET ipliğin hibrit ipliklerden daha yüksek erime enerjisine (59,5 J/g) sahip olduğu anlaşılmıştır. Hibrit iplikler arasında en yüksek erime pik sıcaklığına ve erime enerjisine sahip olan CE35/PET hibrit iplik numunesi olmuştur. CE35/PET hibrit ipliğin erime pik sıcaklığı 259,56°C ve erime enerjisi 24,75 J/g olarak bulunmuştur. Cam elyafın daha yüksek erime sıcaklığına

(1725°C) sahip olması nedeniyle CE/PET hibrit iplik içerisindeki cam elyaf oranı arttıkça hem erime pik sıcaklıklarında hem de erime enerjilerinde düşüş gözlenmiştir.

Tablo 5.12 CE/PET hibrit ipliklerin DSC analiz sonuçları

Numune	Erime Pik Sıcaklığı (°C)	Erime Enerjisi (J/g)
PET İplik	259,18	59,5
CE35/PET	259,56	24,75
CE45/PET	257,61	17,34
CE55/PET	255,51	17,4
CE65/PET	251,54	8,72

5.3.2 CE/PET Kompozit Plakaların DSC Sonuçları

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit test plakalarına 10°C sıcaklık artış hızında DSC analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 5.13'te gösterilmiştir.

Tablo 5.13 CE/PET kompozitlerinin DSC analiz sonuçları

Numune	Erime Pik Sıcaklığı (°C)	Erime Enerjisi (J/g)
CE35/PET	253	22
CE45/PET	253	16
CE55/PET	251	12
CE65/PET	249	11

CE/PET kompozitlerinin DSC analizi sonuçlarına göre, en yüksek erime enerjisine sahip kompozit test numunesi en az cam elyaf oranına sahip olan CE35/PET numunesidir ve erime pik sıcaklığı 253°C, erime enerjisi ise 22 J/g olarak bulunmuştur. CE/PET kompozit test numunesi içerisindeki cam elyaf oranı arttıkça erime pik sıcaklığı ve erime enerjisinde azalma gözlenmiştir. Hibrit ipliklerin DSC sonuçlarıyla kıyaslandığında, kompozitlerinin erime pik sıcaklıkları ve erime enerjileri biraz daha düşük değerlerde elde edilmiştir.

5.3.3 CE/PET Kompozitlerinin Kül Miktarı Testi Sonuçları

Hazırlanan CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozitlerinin içerisindeki cam elyaf oranlarını doğrulamak amacıyla kompozit plakalara kül testi (In house metot) yapılmıştır ve elde edilen kalıntı kül miktarları Tablo 5.14'te gösterilmiştir.

Tablo 5.14 Kompozit kül miktarı sonuçları

Numune	Kül Miktarı (%)
CE35/PET	55,5
CE45/PET	65,4
CE55/PET	70,2
CE65/PET	74,4

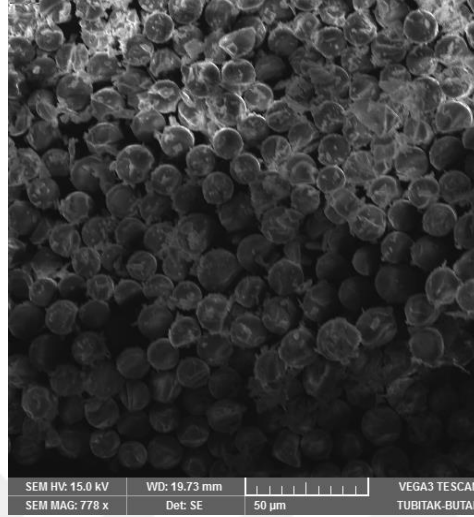
Kül testi sonuçları, PET elyafın yakılarak sistemden uzaklaştırılmasından sonra kalan cam elyaf miktarını göstermektedir. Tablo 5.14'te listlenen kül testi sonuçları, Tablo 4.2'de yer alan teorik olarak hesaplanmış sürekli cam elyaf kütlece karışım yüzdeleriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre CE35/PET kompoziti içerisindeki cam elyaf miktarı hem deneysel hem de teorik olarak eşit bulunmuştur. CE45/PET kompoziti içerisindeki cam elyaf miktarının deneysel hesaplamada çok az daha fazla olduğu görülmüştür. CE55/PET ve CE65/PET kompozitleri içerisindeki cam elyaf miktarlarında ise çok az miktarda bir kayıp olduğu görülmüştür. Tüm bu sonuçlar hibrit iplik için hesaplanan sürekli cam elyaf kütlece karışım oranlarıyla deneysel olarak gelen sonuçların benzer olduğunu göstermektedir.

5.4 SEM Analiz Sonuçları

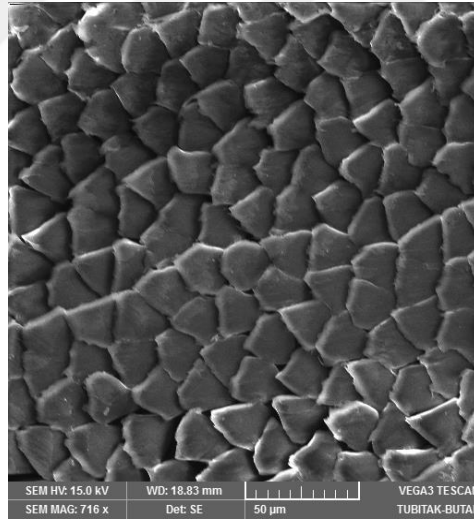
Bu bölümde, hacimce farklı oranlarda cam elyaf ile karıştırılarak elde edilmiş CE/PET hibrit ipliklerin ve bu hibrit iplikler kullanılarak elde edilen kompozit test numunelerinin SEM analizi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

5.4.1 CE/PET Hibrit İpliklerin SEM Analizi

Hibrit iplik dağılım morfolojilerini daha iyi anlamak için ilk olarak kullanılan sürekli cam elyaf ve PET ipliklerin SEM analizi yapılmış ve kesit görüntüleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



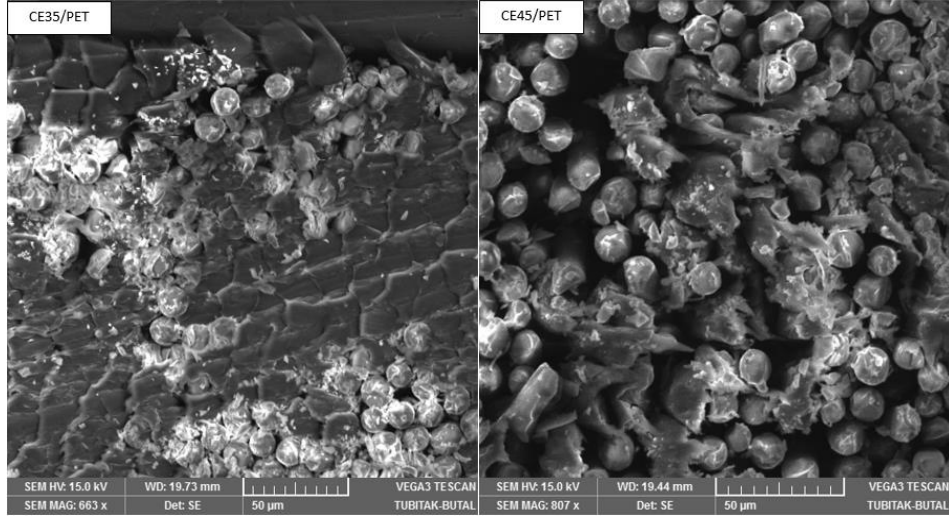
Şekil 5.5 Cam elyaf SEM görüntüsü



Şekil 5.6 PET iplik SEM görüntüsü

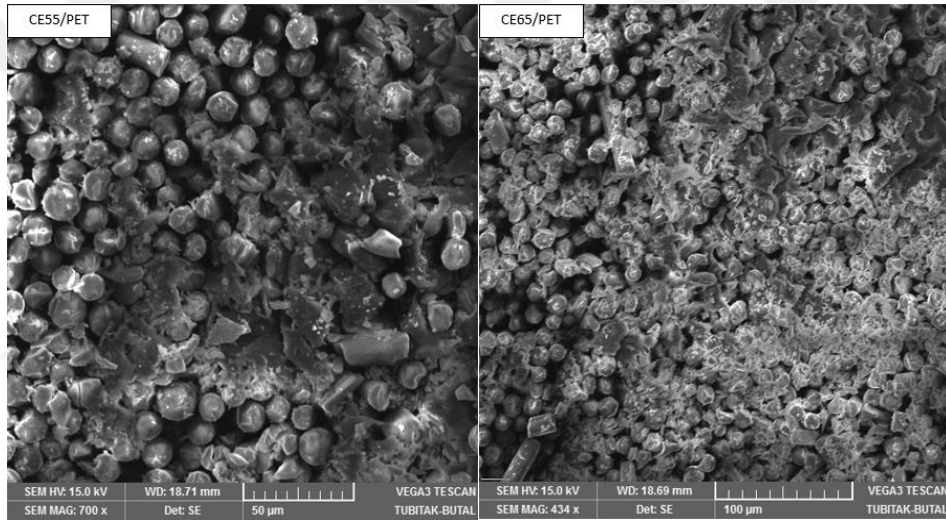
Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilen SEM görüntüleri incelendiğinde, cam elyafın dairesel kesite, PET ipliğin ise üçgen kesite sahip olduğu gözlenmektedir.

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit ipliklerin SEM analizi yapılmış ve iplik dağılım görüntüleri sırasıyla Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



(a)

(b)



(c)

(d)

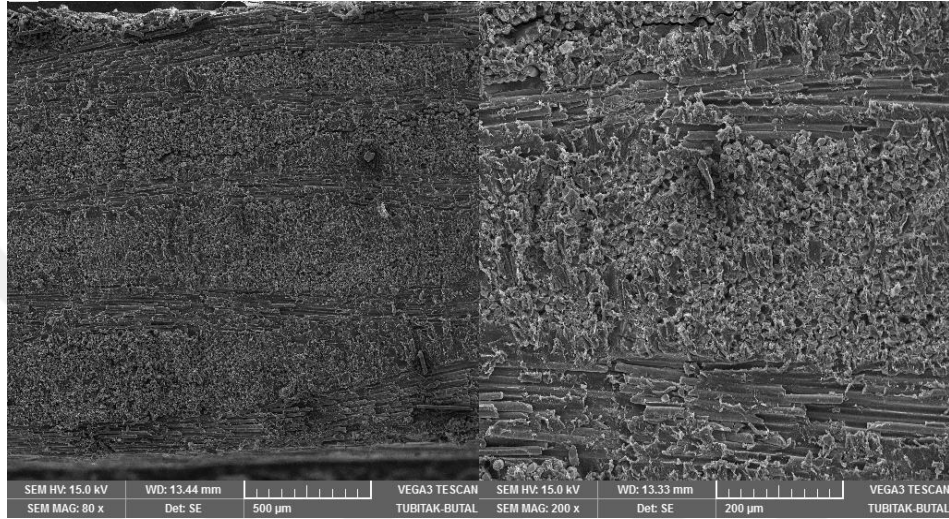
Şekil 5.7 CE/PET hibrit ipliklerinin SEM görüntüleri: (a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET, (d) CE65/PET

Şekil 5.7’de yer alan CE35/PET hibrit ipliğin SEM görüntüsüne bakıldığında, PET iplik oranının daha fazla olduğu görülmektedir. PET iplik oranı daha yüksek olduğu için iyi bir homojen karışım gözlenmemiştir. CE45/PET hibrit ipliğin SEM görüntüsüne bakıldığında, cam elyaf ve PET ipliğin daha homojen bir dağılım içerisinde olduğu görülmektedir. CE55/PET hibrit ipliğin SEM görüntüsüne bakıldığında cam elyaf ve PET ipliğin CE45/PET hibrit iplik numunesinde olduğu gibi daha homojen bir dağılımda olduğu gözlemlenmiştir. CE65/PET hibrit ipliğin

SEM görüntüsüne bakıldığında cam elyaf oranı PET ipliğe göre daha fazla olduğu için homojen bir dağılım gözlenememiştir.

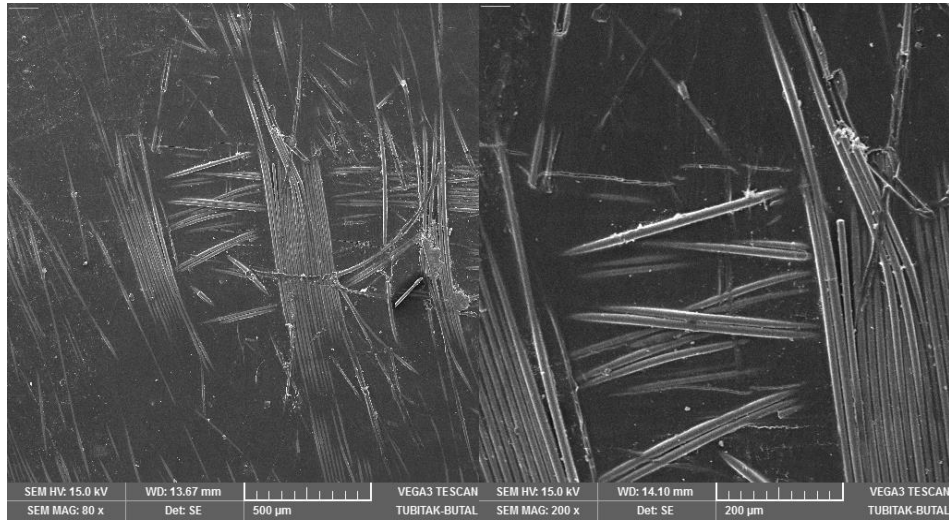
5.4.2 CE/PET Kompozit Plakaların SEM Sonuçları

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit plakalarında cam elyaf ve PET dağılımlarını görmek amacıyla numunelerin hem kesitinden hem de yüzeylerinden SEM analizi yapılmıştır.



(a)

(b)



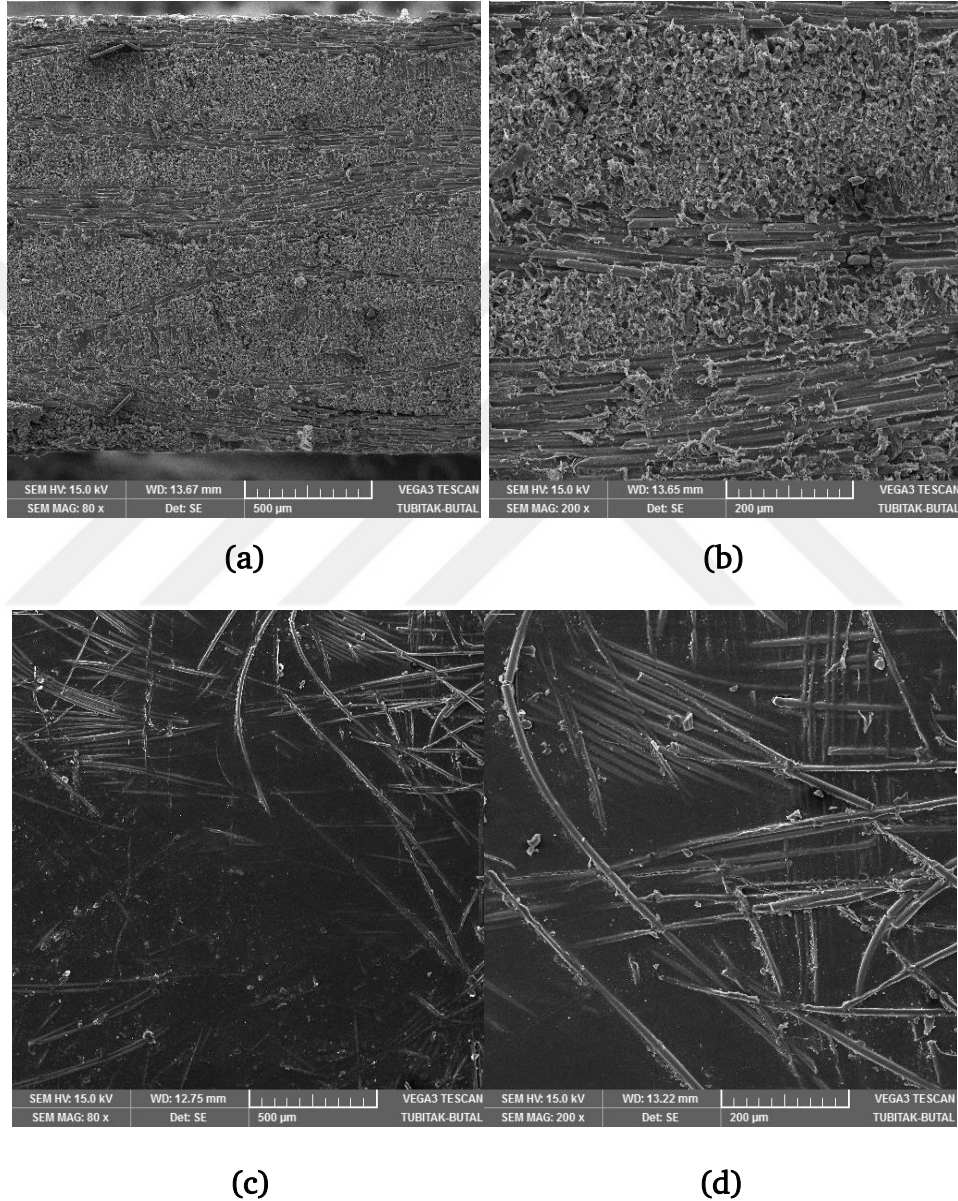
(c)

(d)

Şekil 5.8 CE35/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x

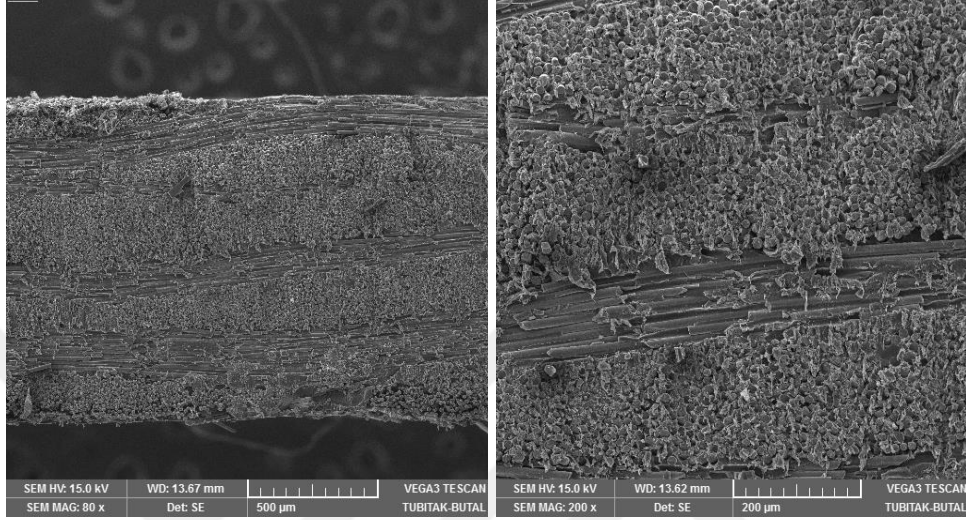
Analizleri daha iyi yorumlayabilmek için hem uzak hem de yakın görüntüler alınmış ve alınan görüntüler Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de gösterilmiştir.

CE35/PET kompozit plakalarında kesit ve yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, hem kesit hem de yüzey görüntülerinde PET ipliğın eriyerek cam elyafı başarılı bir şekilde sarıp kapladığı ve çok az miktarda cam elyaf kırığı olduğu gözlenmiştir.



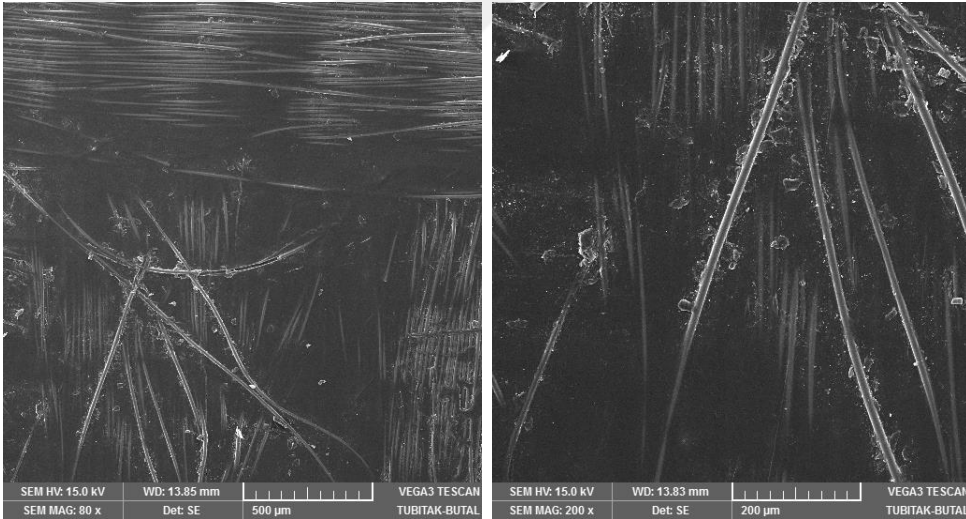
Şekil 5.9 CE45/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x

CE35/PET kompozit plakalarında gözlemlendiği gibi CE45/PET kompozit plakaları SEM görüntülerine bakıldığında da hem kesit hem de yüzey görüntülerinde PET ipliğın eriyerek cam elyafı kapladığı ve başarılı bir emdirme işlemi gerçekleştiği görülmüştür. Bu numunede de çok az miktarda cam elyaf kırığı gözlenmiştir.



(a)

(b)



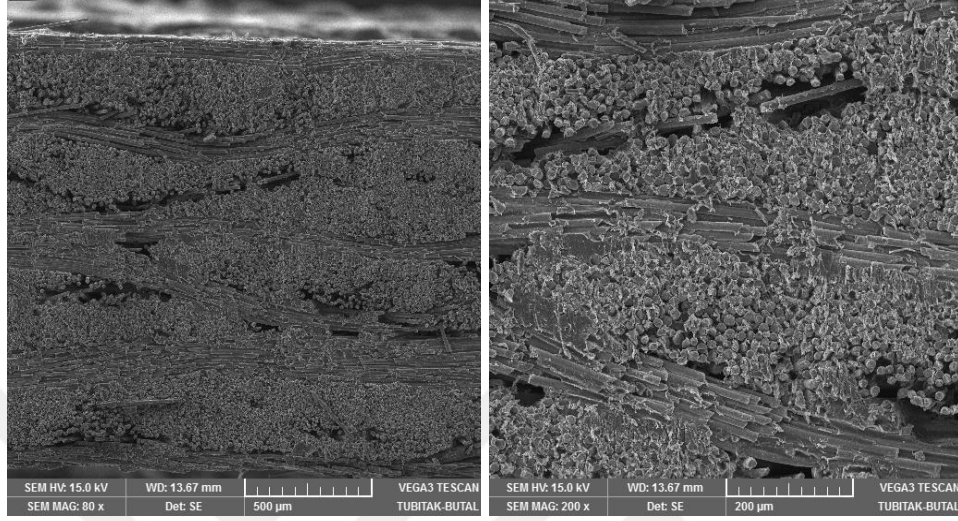
(c)

(d)

Şekil 5.10 CE55/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x

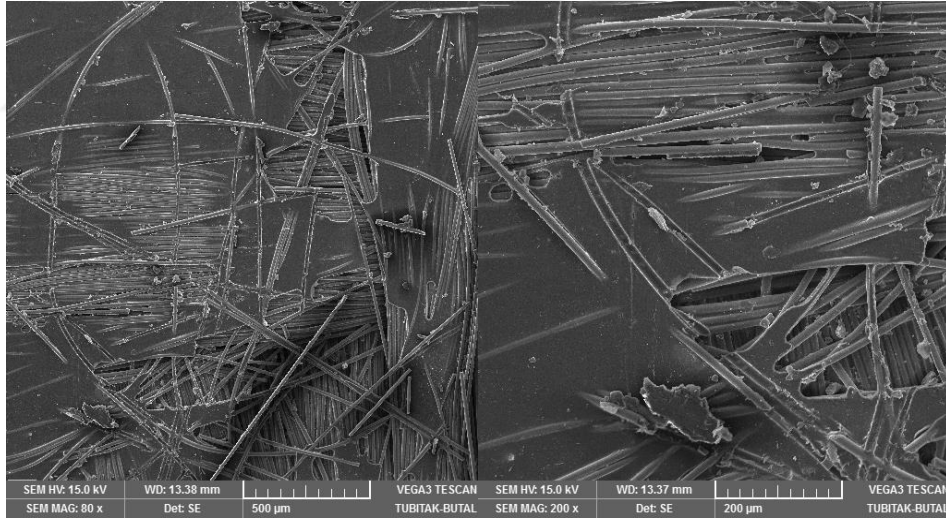
CE55/PET kompozit plakalarında kesit ve yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde, hem kesit hem de yüzey görüntülerinde PET ipliğın eriyerek cam elyafı başarılı bir

şekilde sarıp kapladığı yani başarılı bir emdirme işlemi olduğu gözlenmiş fakat CE55/PET kompozit plaka SEM görüntülerinde de cam elyaf kırığı olduğu ve ayrıca plakanın alt tabakalarına doğru gidildiğinde hafif boşluklar olduğu gözlenmiştir.



(a)

(b)



(c)

(d)

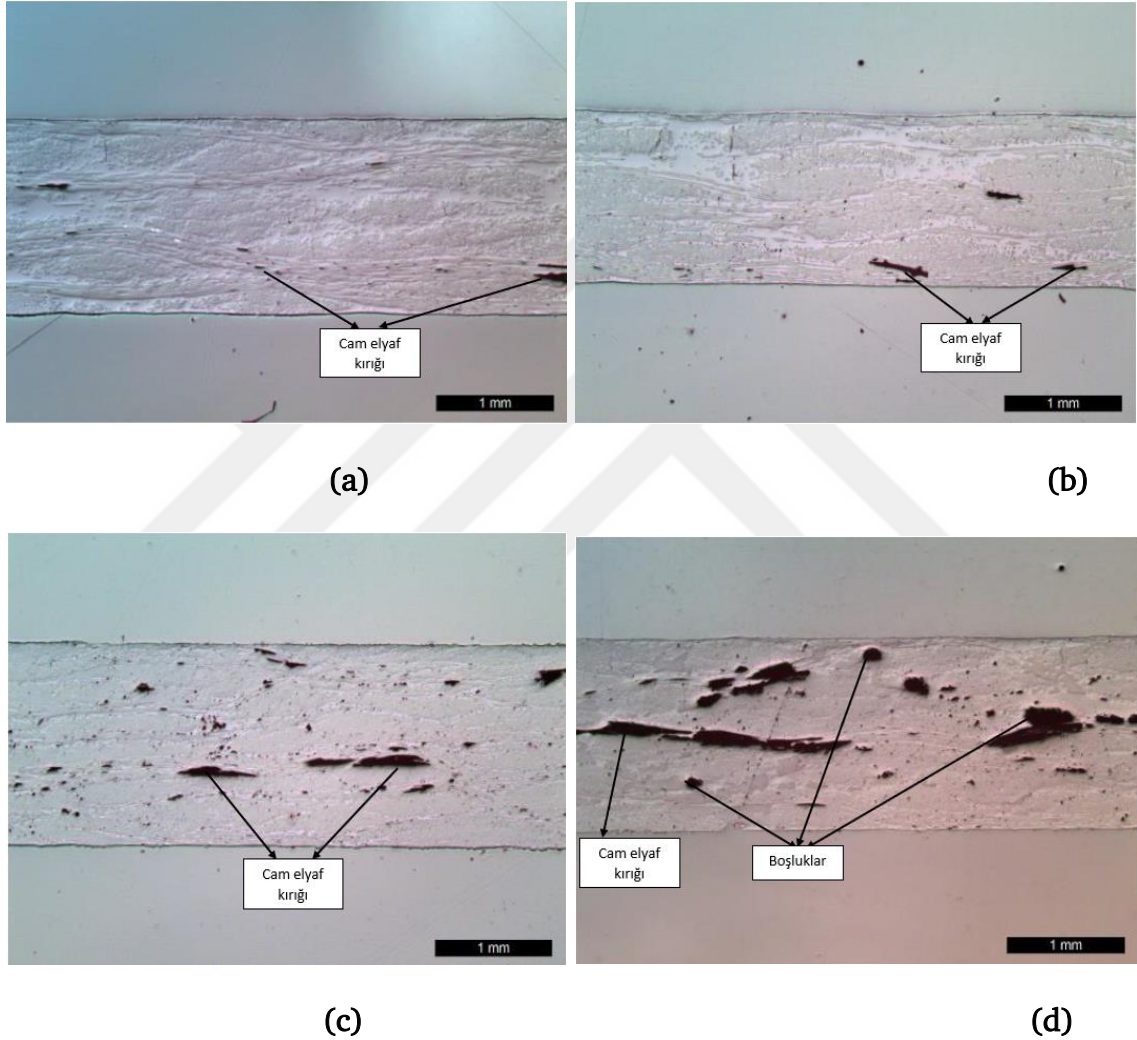
Şekil 5.11 CE65/PET kompozit plakası kesit ve yüzey SEM görüntüsü: kesit; (a) 80x, (b) 200x ve yüzey; (c) 80x, (d) 200x

CE65/PET kompozit plakalarında kesit ve yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde hem kesit hem de yüzey görüntülerinde başarılı bir emdirme işlemi gözlenememiş

ve yapı içerisinde çok fazla boşluk görülmüştür. Bu durumun kompozit malzeme içerisindeki artan cam elyaf miktarından kaynaklandığı görülmektedir.

5.5 CE/PET Kompozit Plakaların Optik Mikroskop Analizi

CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit plakaları içerisindeki cam elyaf ve PET polimer matrisin davranışlarının tespiti için optik mikroskop analizi yapılmış ve elde edilen görüntüler Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 CE/PET kompozit plakalarının yüzey optik mikroskop görüntüleri:

(a) CE35/PET, (b) CE45/PET, (c) CE55/PET ve (d) CE65/PET

CE35/PET kompozit plakasının optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde PET elyafın tamamen eriyerek cam elyafı boşluk kalmayacak şekilde kapladığı yani

CE35/PET kompozit plakanın başarılı bir emdirme işlemi gerçekleştirdiği gözlenirken az miktarda cam elyaf kırığı olduğu tespit edilmiştir.

CE45/PET kompozit plakasının optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde CE35/PET kompozit plaka davranışına benzer şekilde PET ile cam elyaf arasında başarılı bir emdirme gözlenmiş ve az miktarda cam elyaf kırığı tespit edilmiştir.

CE55/PET kompozit plakasının optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde kompozit plaka ortalarında PET ipliğin eriyerek cam elyafı tamamen sarıp iyi emdirme işlemi gerçekleştiği gözlenirken kompozit plaka içerisindeki PET iplik miktarının cam elyaf miktarına göre az kalmasından dolayı kenarlara doğru emdirme seviyesi azalmıştır.

CE65/PET kompozit plakasının optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, kompozit plaka içerisindeki PET iplik miktarı cam elyaf miktarından az olduğu için PET iplik eriyerek cam elyafları tam olarak saramamış ve başarısız bir emdirme işlemi gerçekleşmiştir. Bu nedenle kompozit plaka içerisinde boşluklar olduğu görülmüştür. Ayrıca kompozit plaka içerisinde çok fazla cam elyaf kırığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, hacimce farklı oranlarda (%35, 45, 55, 65) sürekli cam elyaf içeren cam elyaf/PET (CE/PET) hibrit iplikleri başarılı bir şekilde üretilmiştir. Hibrit iplik hazırlamada birçok proses parametresi denenmiş ve optimum proses parametreleri belirlenmiştir. Hacimce farklı oranlarda cam elyaf içerecek şekilde üretilen cam elyaf/PET hibrit iplikleri Dimi 2/2 (Twill 2/2) kumaş yapısında dokunmuş ve kumaşlar istenilen kalınlıkta olacak şekilde kat kat üst üste koyularak sıcak preste CE/PET termoplastik kompozit plakaları elde edilmiştir. Hazırlanan hibrit iplik ve termoplastik kompozit plakaların; morfolojileri, termal ve mekanik özellikleri incelenmiş ve cam elyaf oranının kompozitin termal ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

Hibrit iplik üretimi için takviye malzemesi olarak kolay bulunabilmesi, ucuz olması, iyi mukavemet sağlaması ve hibrit iplik üretimi için uygun olması nedeniyle sürekli cam elyaf kullanılmıştır. Ayrıca takviye malzemesinin matris malzemesiyle uyumu kompozit malzemenin mekaniksel özelliklerini doğrudan etkilediği için hibrit iplik üretiminde kullanılacak olan sürekli cam elyaf, matris malzemesi olarak kullanılacak olan PET ile uyumlu, silan yüzey modifikasyonlu, olarak tercih edilmiştir. PET, hem PP gibi ucuz ve kolay bulunan bir polimere göre daha iyi termal direnç ve daha yüksek mukavemet gösterdiği için hem de KORTEKS tarafından üretilen PET ipliğın kompozit uygulamalarda kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla matris malzemesi olarak tercih edilmiştir.

Hacimce farklı oranlarda cam elyaf içeren CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit iplikleri üretimi için hava jetli karıştırma (commingling) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle homojen karışmış hibrit iplikler üretmek için hava jet tekstüre makinesi üzerinde modifikasyonlar yapılmış, iplik geçiş yolları değiştirilmiş ve uygun hava jet düzesi alınmıştır.

Ayrıca, karıştırma ünitesinde bulunan su istasyonu, suyun ek sürtünmeye neden olması ve karıştırma işlemi üzerinde olumlu bir etkisi olmadığından cam elyafların suyla temasını önlemek için makineden kaldırılmıştır. Üretilen CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit ipliklerinin mekaniksel, morfolojik ve termal analizleri için kopma/çekme testi, SEM analizi ve DSC analizleri yapılmıştır. Yapılan kopma/çekme testi sonuçlarına göre cam elyafın ve PET ipliğin hibrit ipliklerden daha iyi kopma dayanımı gösterdiği görülmüş ve hibrit ipliklerdeki cam elyaf oranının artmasının kopma dayanımını etkilemediği gözlemlenmiştir. Üretilen hibrit ipliklerin kopma dayanımları kıyaslandığında en dayanıklı hibrit iplik 16,0 cN/tex değeriyle CE55/PET hibrit iplik numunesi olmuştur. Yapılan SEM analizi sonuçlarına göre, hibrit iplik içerisindeki hacimce cam elyaf oranları hacimce PET iplik oranlarına daha yakın olduğu için CE45/PET ve CE55/PET hibrit iplik numuneleri daha homojen bir karışım göstermişlerdir. Hibrit iplik içerisindeki hacimce cam elyaf oranı hacimce PET iplik oranına göre çok azaldığında ya da çok arttığında hibrit iplik içerisindeki homojenliğin azaldığı görülmüştür. Yapılan DSC analizi sonuçlarında hibrit iplik içerisindeki hacimce cam elyaf oranı arttıkça erime pik sıcaklıklarında ve erime enerjilerinde azalma gözlenmiştir. Bu nedenle hibrit iplikler arasında en yüksek erime pik sıcaklığına (253°C) ve erime enerjisine (22 J/g) sahip numune CE35/PET hibrit iplik numunesi olmuştur.

Hacimce farklı oranlarda cam elyaf içeren CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET hibrit iplikleri Dimi 2/2 (Twill 2/2) kumaş yapısında atkı ve çözgü sıklıkları 6 tel/cm olacak şekilde dokunmuştur. Üretilen kumaşların mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla kopma/çekme testi yapılmıştır. Yapılan kopma/çekme testine göre en iyi dayanım gösteren kumaş numunesi CE35/PET kumaş numunesi olmuş ve kumaş içerisindeki hacimce cam elyaf oranı arttıkça kumaşların kopma dayanımları azalmıştır.

Termoplastik kompozit plakaların üretilmesi için basınç kontrollü sıcak pres kullanılmıştır. İlk olarak manuel basınç kontrollü pres denenmiş fakat basınçta yaşanan dalgalanmalardan dolayı basınç değişimlerinin efektif olarak kontrol edilememesi ve PET malzemesinin iyi bir erime göstermeyip cam elyafı

tam olarak saramamasından dolayı otomatik basınç kontrollü pres ile üretime geçilmiştir. Otomatik basınç kontrollü pres yardımıyla CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit plakalar üretmek için farklı parametrelerde denemeler yapılmış ve optik mikroskop analizi yardımıyla pres için optimum proses parametreleri belirlenmiştir. Otomatik basınç kontrollü pres yardımıyla üretilen termoplastik kompozit plakaların mekaniksel, termal ve morfolojik özelliklerini incelemek amacıyla kopma/çekme, 3 nokta eğme, darbe, DSC, kül, SEM ve optik mikroskop analizleri yapılmıştır. Manuel basınç kontrollü pres yardımıyla üretilen termoplastik kompozit test numunelerinin de mekanik sonuçları incelenmiş fakat sonuçların otomatik basınç kontrollü pres yardımıyla üretilen termoplastik kompozit test numunelerinin mekaniksel sonuçlarına göre çok düşük çıktığı görülmüştür. Otomatik basınç kontrollü pres yardımıyla üretilmiş olan CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET ve CE65/PET kompozit numunelerine uygulanan kopma/çekme testine göre 268,7 MPa değeriyle CE45/PET termoplastik kompozit test numunesi en iyi kopma dayanımı sonucu vermiştir. Hacimce cam elyaf oranı arttıkça kopma dayanımı önce artmış, hacimce optimum (%45) cam oranına ulaşıldıktan sonra kopma dayanımı, artan cam elyaf oranı ile azalmıştır. Yapılan 3 nokta eğme testine göre en iyi eğilme dayanımını 309 MPa eğilme gerilimi ve 19900 MPa eğilme modülü değerleriyle CE55/PET termoplastik kompozit test numunesi göstermiştir. Hacimce cam elyaf oranı optimuma ulaşana kadar eğilme dayanımı cam elyaf oranı arttıkça artmış, daha sonra azalmıştır. Darbe testi sonucuna göre optimum darbe dayanımını 19,5 J delinme enerjisi değeri ile CE55/PET kompoziti göstermiş ve kompozitlerde cam elyaf oranının artmasıyla delme enerjisinin arttığı görülmüştür. Yapılan DSC testinin sonucuna göre hibrit ipliklerde gözleendiği gibi kompozit plakalarda da cam elyaf oranı arttıkça erime pik sıcaklıklarında ve erime enerjilerinde düşüş gözlenmiştir. Bu nedenle en yüksek erime pik sıcaklığı ve erime enerjisi sonucunu CE35/PET termoplastik kompozit plaka vermiştir. Termoplastik kompozit plakaların içerisindeki cam elyaf oranlarını doğrulamak amacıyla kompozit plakalara kül testi yapılmış ve teorik olarak hesaplanan kütlece cam elyaf oranları ile test sonucunda çıkan kütlece cam elyaf oranları benzer olarak bulunmuştur.

Termoplastik kompozit plakalarındaki cam elyaf ve PET dağılım morfolojilerini görmek amacıyla SEM ve optik mikroskop analizleri yapılmıştır. SEM analizi sonuçlarına göre CE35/PET, CE45/PET, CE55/PET termoplastik kompozit plakalarında PET ipliğin eriyerek cam elyafı tamamen kapladığı ve başarılı bir emdirme işlemi gerçekleştiği gözlemlenmiştir, fakat CE65/PET termoplastik kompozit test numunesi hacimce çok fazla oranda cam elyaf ve hacimce az oranda PET iplik içerdiğinden dolayı PET iplik eriyerek cam elyafı kaplasa bile miktarı az kaldığından yapı içerisinde boşluklar oluşmuş bu nedenle plakada başarılı bir emdirme işlemi gözlemlenememiştir. Optik mikroskop sonuçlarının da SEM sonuçları ile benzer şekilde olduğu görülmüştür. CE35/PET, CE45/PET ve CE55/PET termoplastik kompozit test numuneleri başarılı bir emdirme gösterirken, CE65/PET termoplastik kompozit test numunesi başarısız bir emdirme göstermiştir. Bu sonuçlara göre hibrit iplikte kullanılabilecek maksimum hacimce cam elyaf oranı %55 olarak tespit edilmiştir. Bu miktarın üzerinde kullanılacak olan cam miktarı yapı içerisinde istenmeyen sonuçlar gösterecektir.

Tez kapsamında elde edilen hem hacimce farklı oranlarda cam elyaf içeren sürekli cam elyaf/PET hibrit ipliklerinden dokunan kumaşlar kullanılarak hazırlanan CE/PET termoplastik kompozitlerin mekaniksel, termal ve morfolojik etkilerinin detaylı olarak incelenmesi hem de daha önce yapılmamış kapsamlı bir çalışma olması nedeniyle bu tez çalışmasından elde edilen bulgular literatüre katkı sağlamıştır. Ayrıca üretilen kompozit plakaların termoplastik olması bu plakaların geri dönüşümüne olanak sağladığı için çalışma sonuçları sürdürülebilir üretime katkı yapmaktadır.

Bu çalışmada Dimi 2/2 kumaş yapısında kumaşlar dokunmuş ve bu kumaşlar kullanılarak kompozit plakalar elde edilmiştir. Sonraki çalışmalarda kumaş yapılarının kompozit plaka üzerindeki etkisini görmek için Dimi 3/3, bezayağı, saten gibi kumaş yapıları kullanılacaktır. Ayrıca sonraki çalışmalarda dokuma teknolojisi yerine hibrit ipliklerin sürekli yerleştirilmesi için dikiş prensibine dayanan bir tekstil üretim tekniği olan TFP kullanılabilir.

- [1] R. Alagirusamy, R. Fangueiro, V. Ogale ve N. Padaki, "Hybrid yarns and textile preforming for thermoplastic composites," *Textile Progress*, cilt 38, sayı 4, ss. 1-71, 2010.
- [2] R. Alagirusamy, "Development and characterization of GF/PET, GF/Nylon, and GF/PP commingled yarns for thermoplastic composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, cilt 18, sayı 3, ss. 269-285, 2005.
- [3] U.I. Thomanny ve P. Ermanni, "The influence of yarn structure and processing conditions on the laminate quality of stampformed carbon and thermoplastic polymer fiber commingled yarns," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, cilt 17, sayı 3, ss. 259-283, 2004.
- [4] E. Mäder, J. Rausch ve N. Schmidt, "Commingled yarns – Processing aspects and tailored surfaces of polypropylene/glass composites," *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, cilt 39, sayı 4, ss. 612-623, 2008.
- [5] E. Mäder, C. Rothe ve S.L. Gao, "Commingled yarns of surface nanostructured glass and polypropylene filaments for effective composite properties," *Journal of Materials Science*, cilt 42, sayı 19, ss. 8062-8070, 2007.
- [6] H. Mankodi ve P. Patel, "Study the effect of commingling parameters on glass/polypropylene hybrid yarns properties," *AUTEX Research Journal*, cilt 9 sayı 3, ss. 70-73, 2009.
- [7] R. Alagirusamy ve V. Ogale, "Commingled and air jet-textured hybrid yarns for thermoplastic composites," *Journal of Industrial Textiles*, cilt 33, sayı 4, ss. 223-243, 2004.
- [8] M. Miao, H. Yan Lai ve C. Kwok Po Stephen, "Commingling self-twist yarn with filaments1," *Textile Research Journal*, cilt 64, sayı 10, ss. 563-569, 1994.
- [9] L. Ye, K. ve J. Kästel, "Consolidation of GF/PP commingled yarn composites," *Applied Composite Materials*, cilt 1, sayı 6, ss. 415-429, 1994.
- [10] R. Alagirusamy, V. Ogale ve M. Bhowmick, "Air flow behaviour in commingling nozzles and their influence on properties of commingled yarns," *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, cilt 32, ss. 410-420, 2007.
- [11] M. Golzar, H. Brunig ve E. Mader, "Commingled hybrid yarn diameter ratio in continuous fiber-reinforced thermoplastic composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, cilt 20, sayı 1, ss. 17-26, 2007.
- [12] K. Plamen, J. Steffen, G. Thomas, K. Bong-Gu, B. Wolfgang, Z. Maike ve H. Josef, "Commingling yarns for reinforcement of concrete," *Saechsische Landesbibliothek- Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden*, 2009.

- [13] B. C. Kang, C. N. Herath, J. K. Park ve Y. H. Roh, "An air texturing process for hybridization of different reinforcement filament yarns by commingling process," *Materials Science Forum*, ss. 333-336, 2006.
- [14] G. Bogoeva-Gaceva, G. Demboski, I. Lacik, "Mechanical properties of glass fibre-PET composites based on weft knitted preforms," *ICCM-12*, 1999, ss.982.
- [15] P. McDonnell, K. P. McGarvey, L. Rochford ve C. M. Ó Brádaigh, "Processing and mechanical properties evaluation of a commingled Carbon-Fibre/PA-12 composite," *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, cilt 32, sayı 7, ss. 925-932, 2001.
- [16] V. Ogale ve R. Alagirusamy, "Properties of GF/PP commingled yarn composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, cilt 21, sayı 6, ss. 511-523, 2008.
- [17] B. Lauke, U. Bunzel ve K. Schneider, "Effect of hybrid yarn structure on the delamination behaviour of thermoplastic composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, cilt 29, sayı 11, ss. 1397-1409, 1998.
- [18] G. O. Shonaike, M. Matsuda, H. Hamada, Z. Maekawa ve T. Matsuo, "The effect of impregnation technique on bending properties of glass fiber reinforced polyethylene terephthalate composites," *Composite Interfaces*, cilt 2, sayı 2, ss. 157-170, 1994.
- [19] G. O. Shonaike, H. Hamada, Z. Maekawa, M. Matsuda, T. Yuba ve T. Matsuo, "The influence of cooling conditions on the mechanical properties of commingled yarn composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, cilt 9, ss. 76-89, 1996.
- [20] N. Svensson ve R. Shishoo, "Fabrication and mechanical response of commingled gf/pet composites," *Polymer Composites*, cilt 19, sayı 4, ss. 360-369, 1998.
- [21] J. Jang ve S. I. Moon, "Impact behavior of carbon fiber/ultra-high modulus polyethylene fiber hybrid composites," *Polymer Composites*, cilt 16, sayı 4, ss. 325-329, 1995.
- [22] D. W. Woods, P. J. Hine ve I. M. Ward, "The impact properties of hybrid composites reinforced with high-modulus polyethylene fibres and glass fibres," *Composites Science and Technology*, cilt 52, sayı 3, ss. 397-405, 1994.
- [23] Y. S. Lee, K. H. Kang, ve O. Park, "Response of hybrid laminated composite plates under low-velocity impact," *Computers and Structures*, cilt 65 sayı 6, ss. 965-974, 1997.
- [24] R. Park ve J. Jang, "The effects of hybridization on the mechanical performance of aramid/polyethylene intraply fabric composites," *Composites Science and Technology*, cilt 58, sayı 10, ss. 1621-1628, 1998.

- [25] K. V. Arun, S. Basavarajappa ve B.S. Sherigara, "Damage characterisation of glass/textile fabric polymer hybrid composites in sea water environment," *Materials and Design*, cilt 31 sayı 2, ss. 930-939, 2010.
- [26] E. V. Gonzalez, P. Maimi, J. R. Sainz de Aja, P. Cruz, ve P. P. Camanho, "Effects of interply hybridization on the damage resistance and tolerance of composite laminates," *Composite Structures*, cilt 108, ss. 319-331, 2014.
- [27] B. Vieille, V. M. Casado ve C. Bouvet, "About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic and thermosetting composites: A comparative study," *Composite Structures*, cilt 101, ss. 9-21, 2013.
- [28] K. Brown, R. Brooks ve N. Warrior, "Characterizing the strain rate sensitivity of the tensile mechanical properties of a thermoplastic composite, *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2009, ss. 43-46.
- [29] F.S. Uralil, G.M. Newaz ve A. Lustiger, "Processing effects and damage tolerance in poly(etheretherketone) composites," *Polymer Composites*, cilt 13, sayı 1, ss. 7-14, 1992.
- [30] Ö. F. Erkendirici ve B. Z. Haque, "Quasi-static penetration resistance behavior of glass fiber reinforced thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, cilt 43, sayı 8, ss. 3391-3405, 2012.
- [31] F. Touchard-Lagattu ve M. C. Lafarie-Frenot, "Damage and inelastic deformation mechanisms in notched thermoset and thermoplastic laminates," *Composites Science and Technology*, cilt 56, sayı 5, ss. 557-568, 1996.
- [32] S. Thomas, K. Joseph, S. K. Malhotra, K. Goda ve M. S. Sreekala, *Polymer Composites*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2012.
- [33] G. Başer, "Production of fiber reinforced thermoplastic composites", PhD Thesis, Istanbul Technical University, 2012.
- [34] A. B. Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, 1989.
- [35] Polyvinylester resins, <http://polymerdatabase.com/Polymer%20Brands/PVE.html>, 18.11.2020
- [36] O. Agboola, R. Sadiku, T. Mokrani, I. Amer ve O. Imoru, *Polyolefin Fibres*, Woodhead Publishing, 2017.
- [37] Polypropylene, <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polypropylene>, 18.11.2020
- [38] Polyethylene-terephthalate, <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polyethylene-terephthalate>, 18.11.2020
- [39] Polyamide, <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyamide%20type.html>, 18.11.2020

- [40] Polietilen, <https://www.ceyrekmuhendis.com/polietilen/>, 18.11.2020
- [41] Polipropilen nedir?, <https://www.enerjiportali.com/polipropilen-nedir-nelerlerde-kullanilir/>, 18.11.2020
- [42] Molecular Structure of Linear PET, <https://www.turkchem.net/fast-quality-control-in-pet-production.html/m2-2>, 18.11.2020
- [43] Polyamide, <https://www.omicsonline.org/articles-images/2167-065X-3-121-g010.html>, 18.11.2020
- [44] G. Akovalı, Handbook of composite fabrication, Rapra Technology Limited, 2001.
- [45] G. Lubin, Handbook of Fiberglass and Advanced Plastic Composites, Van Nostrand Reinhold, New York, 1969.
- [46] Polymer Matrix Materials, <https://www.osha.gov/otm/section-3-health-hazards/chapter-1>, 18.11.2020
- [47] Hand Lay-up, <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/hand-lay-up/>, 18.11.2020
- [48] İ. Durgun, “El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi”, 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu, 2014, ss. 283-287.
- [49] Spray-up, <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/open-molding/spray-up/>, 18.11.2020
- [50] Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri, <https://silo.tips/download/3-kompozit-malzeme-retm-yntemler>, 18.11.2020
- [51] M. S. Hirmaz, “Composites classification and manufacturing operations: A review,” International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations In Technology, cilt 3, sayı 3, ss. 1708-1713, 2017.
- [52] Kompozit Malzemelerin İmalat Teknolojileri, <https://docplayer.biz.tr/108931465-3-kompozit-malzemelerin-imalat-teknolojileri-kompozit-malzeme-mekanigi-ders-notlari-prof-dr-mehmet-zor-1.html>, 18.11.2020
- [53] Karbon Fiber Elyaf Pultrüzyon Borular Nasıl Üretilir?, <https://www.kompozitshop.com/karbon-fiber-elyaf-pultrüzyon-borular-nasil-uretilir>, 18.11.2020
- [54] Resin Transfer Molding, <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/resin-transfer-molding/>, 18.11.2020
- [55] RTM Kalıbı ile İmalat Yöntemi, http://www.akincimakina.com.tr/?attachment_id=485, 18.11.2020
- [56] Compression-Moulding, <https://coventivecomposites.com/explainers/compression-moulding/>, 18.11.2020

- [57] Ö. Eti, "Alkali, asidik ve enzimatik yüzey işlemlerinin sisal lifi takviyeli termoplastik esaslı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, 2017.
- [58] S. Gülmez, "Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler," Tezsiz Yüksek Lisans Projesi, Pamukkale Üniversitesi, 2018.
- [59] D. K. Rajak, D. D. Pagar, P.L. Menezes ve E. Linul, "Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications," Polymers, cilt 11, sayı 10, ss. 1667, 2019.
- [60] Enjeksiyon Kalıplama, <http://www.idmaterial.com/2015/08/18/injection-molding-enjeksiyon-kaliplama/>, 18.11.2020
- [61] Vacuum Bag Molding, <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/vacuum-bag-molding/>, 18.11.2020
- [62] Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemedan Yapı Üretimi, https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/c6a7e655d7e5840_ek_0.pdf, 27.05.2022
- [63] Vacuum Infusion Processing, <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/vacuum-infusion-processing/>, 18.10.2020
- [64] İ. Durgun, "Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parça üretimi," 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 2014.
- [65] F. T. Wallenberger, J. C. Watson and H. Li, "Glass fibers," ASM International, cilt 21, ss. 27-34, 2001.
- [66] The Making of Glass Fiber, <https://www.compositesworld.com/articles/the-making-of-glass-fiber>, 18.11.2020
- [67] Fiberglass Direct Roving Single End Roving, <https://turkish.alibaba.com/product-detail/Fiberglass-Direct-Roving-Single-End-Roving-482548397.html>, 18.11.2020
- [68] Cam Elyaf Keçe, <https://www.kalipsilikonu.com/urun/450-gr-m2-cam-elyaf-kece-36-kg>, 18.11.2020
- [69] Kırılmış Cam Elyaf, <https://meykimya.com/plastik-sektorunde-kirpilmis-cam-elyafi-neden-kullanilir/>, 18.11.2020
- [70] Cam Elyaf İpliği, <https://balimakina.com.tr/urunlerdetay.asp?LanguageID=1&cid=3&id=217&id2=218>, 27.05.2022
- [71] E. Selver ve P. Potluri, "Glass/Polypropylene commingled yarns for damage tolerant thermoplastic composites," European Mechanical Science, cilt 1, sayı 3, ss. 93-103, 2017.

- [72] N. E. Merter, "Effects of processing parameters on the mechanical behavior of continuous glass fiber/polypropylene composites," Master of Science, İzmir Institute of Technology, 2009.
- [73] H. R. Mankodi, Specialist Yarn and Fabric Structures, Woodhead Publishing, 2011.
- [74] H. G. Örtlek, "Metal içerikli katlı iplik üretim imkanlarının araştırılması," Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Sonuç Raporu, 2011.
- [75] H. Mankodi, "Effect of processing parameter on commingling behavior of glass/polypropylene hybrid yarns", PhD Thesis, M.S. University of Baroda, 2007.
- [76] M. Kaplan, "Termoplastik kompozitler için hibrit iplik üretimi," Tekstil ve Mühendis, cilt 23, sayı 101, ss. 61-79, 2016.
- [77] Triaxial-braid, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/triaxial-braid>, 30.05.2022.
- [78] Water Jet Cutting, <https://www.sugino.com/site/qa-e/wj-cut-technical-strongpoint.html>, 30.05.2022
- [79] Water Jet Cutting Machine, <https://tr.laser-cutter-machine.com/waterjet-cutting-machine.html>, 30.05.2022
- [80] Kül Fırını, <https://silo.tips/download/laboratuvar>, 19.04.2022
- [81] Optical Microscope VEGA 3, <https://www.medicalexpo.com/prod/tescan-gmbh/product-112843-870121.html>, 19.04.2022
- [82] Leica DM 4000M Optical Microscope, http://english.nanoctr.cas.cn/home2019/resources_24161/researchfacilities/Imaging/, 19.04.2022
- [83] A. Lystrup, "Hybrid yarn for thermoplastic fibre composites," Final Report for MUP2 Framework Program, Riso National Laboratory, 1998.
- [84] Textile Yarns, https://www.cottonworks.com/wp-content/uploads/2017/11/Textile_Yarns.pdf, 05.06.2022
- [85] C. Santulli, R. Brooks, A. C. Long, C. D. Rudd, M. J. Wilson ve N. A. Warrior, "Impact properties of compression moulded commingled E-glass-polypropylene composites," *Plastics, Rubber & Composites*, cilt 31, sayı 6 ss. 270-277, 2002
- [86] PET Property Data, <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20&ckck=1>, 27.05.2022
- [87] T. L. Andersen ve A. Lystrup, "Vacuum consolidation of GF/PET composites with high material quality from a hybrid yarn," *Proceedings of 4th International Conference on Automated Composites*, cilt 1 ss. 195-198, 1995.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Thermal and Mechanical Properties of Continuous Glass Fiber/PET Composites-6th ICNTC Book of Abstracts, 17-18 October 2020, pp.64
2. Cam Elyaf/PET Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu-İTÜ Ulusal Tekstil Kongresi ve 2. ARGE Günü, Akademi Sanayi Buluşması Tam Metin Kitabı, 11-12 Kasım 2020, .18-21

Makaleler

1. Mechanical Properties of Continuous Glass Fiber/PET Composites- Journal of The Indian Chemical Society, Vol.97, No.10c, October 2020, pp. 2088-2091

Projeler

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nün FYL-2019-3565 numaralı projesi ile desteklenmiştir.