

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOĞAL FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ**

DOKTORA TEZİ

ENGİN SARIKAYA

DENİZLİ, HAZİRAN - 2019

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**DOĞAL FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ**

DOKTORA TEZİ

ENGİN SARIKAYA

DENİZLİ, HAZİRAN - 2019

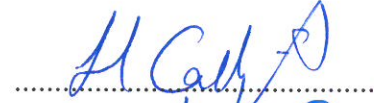
KABUL VE ONAY SAYFASI

Engin Sarıkaya tarafından hazırlanan “Doğal fiber takviyeli kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin tespiti” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 19.06.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

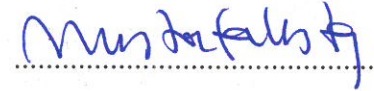
Danışman
Prof.Dr. Hasan Çallıoğlu



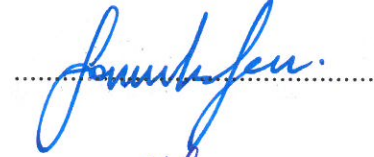
Üye
Prof. Dr. Numan Behlül Bektaş
Pamukkale Üniversitesi



Üye
Prof. Dr. Mustafa Usta
Karadeniz Teknik Üniversitesi



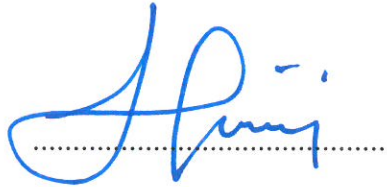
Üye
Prof. Dr. Faruk Şen
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi



Üye
Doç. Dr. Metin Sayer
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 2.6/06/2019 tarih ve ...26/06... sayılı kararıyla onaylanmıştır..



Prof.Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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



Engin Sarıkaya

ÖZET

DOĞAL FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ

DOKTORA TEZİ

ENGİN SARIKAYA

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HASAN ÇALLIOĞLU)

DENİZLİ, HAZİRAN - 2019

Günümüzde bir çok endüstri dalı, sürdürülebilir olmayan hammaddeleri, sürdürülebilir olanlarla ikame etme çabası içerisinde. Karbon ayak izi (carbon foot print) ve yaşam döngüsü analizi (LCA-Life Cycle Analysis) gibi araştırmalar, bir çok sanayi dalını sürdürülebilir olmayan malzemelere alternatif üretmeleri için zorlamaktadır. Bu trendler, kompozit malzeme endüstrisini matrisler ve elyaflar için ikame malzeme arayışına itmektedir. Cam elyaf ve polimer bazlı fiberler, ürettikleri yüksek karbon ayak izi ve sürdürülebilir olamamaları konusunda sorgulanmaktadır ve özellikle otomotiv endüstrisi, doğal fiber takviyeli kompozitlerin kullanımını yaygınlaştırmak için arayış içindedir. Doğal fiberlerin, ambalaj endüstrisinden otomotiv endüstrisine geniş bir kullanım alanı vardır. Kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yöntemi, doğal fiberlerden ambalaj malzemeleri üretmek için kullanılan, yaygın bir üretim teknolojisidir. Bu çalışmada; palmye, okalıptüs ve kayın ağacı liflerinden, geleneksel kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yöntemi kullanılarak plakalar oluşturulmuştur. Epoxy (Araldite LY 1564) ve sertleştiriciler (Aradur 3487), bu doğal fiber plakalara vakum destekli RTM sistemi kullanıp emdirilerek plakalar halinde kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen numunelerin çekme mukavemetleri, basma mukavemetleri, eğme mukavemetleri tespit edilmiş ve darbe davranışları incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde kayın/epoksi kompozitinin mekanik özelliklerinin bağıl olarak düşük olduğu gözlenmiştir. Okalıptüs/epoksi ve palmye/epoksi kompozitleri birbirlerine yakın özellik sergilemiştir. Okalıptüs/epoksi kompoziti az da olsa daha yüksek çekme ve basma dayanımı göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: doğal kompozitler, reçine transfer kalıplama, epoksi kompozitler, kalıplanmış selülozik ambalaj

ABSTRACT

NATURAL FIBER BASED COMPOSITES; PRODUCTION AND MECHANICAL PROPERTIES

PH.D THESIS

ENGİN SARIKAYA

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. HASAN ÇALLIOĞLU)

DENİZLİ, JUNE 2019

There is a challenge in every industry to convert non-sustainable products with the sustainable ones. Researches such as Life Cycle Assessments and Carbon Footprint Analysis are forcing industries to find alternative materials to the non-sustainable ones. These trends are pushing composites industry to try new materials for matrixes and fibers. Glass fibers are questioned and compared with the natural fibers to find a sustainable replacement. Natural fibers have a wide range of use from packaging industry to automotive industry. Molded fiber production method is a dominating process technology used to produce packaging materials from natural fibers. In this work; palm, eucalyptus and birch fibers are formed as a plate with using conventional molded fiber production method. Epoxy (Araldite LY 1564) and hardeners (Aradur 3487) impregnated to these natural fiber plates by using vacuum assisted RTM system. Tensile strengths, compression behaviors, bending behaviors and impact behaviors of these natural fiber composites are investigated. When results were evaluated, it is seen that, birch/epoxy composites showed relatively lower mechanical properties. Eucalyptus/epoxy and palm/epoxy composites showed closer results. Eucalyptus/epoxy composite performed slightly better mechanical properties.

KEYWORDS: natural fiber composites, resin transfer molding, epoxy composites, molded fiber

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOLE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
2. GENEL BİLGİLER	6
2.1 Kompozit Malzemeler	6
2.1.1 Kompozit Malzemelerin Genel Kullanım Alanları	7
2.1.2 Doğal Fiber Takviyeli Kompozitler	8
2.1.3 Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	10
2.1.3.1 Partikül Takviyeli Kompozitler	11
2.1.3.2 Fiber Takviyeli Kompozitler	11
2.1.3.3 Levhasal Kompozitler	12
2.1.3.4 Tabakalı Kompozitler	13
2.1.3.5 Karma (Hibrit) Kompozitler	13
2.1.4 Matris Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	14
2.1.4.1 Polimer Matrisli Kompozitler	15
2.1.4.2 Metal Matrisli Kompozitler	16
2.1.4.3 Seramik Matrisli Kompozitler	17
2.1.4.4 Karbon-Karbon Kompozitler	18
2.1.4.5 Nano Kompozitler	19
2.1.5 Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	20
2.1.5.1 Prepreg Elle Yatırma Yöntemi	21
2.1.5.2 Islak Elle Yatırma Yöntemi	22
2.1.5.3 Püskürtme Yöntemi	23
2.1.5.4 Elyaf Sarma Yöntemi	23
2.1.5.5 Pultrüzyon	24
2.1.5.6 Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama	25
2.1.5.7 Pres Kalıplama	26
2.1.5.8 Elyaf Sarma Yöntemi	27
2.1.5.9 Enjeksiyon Kalıplama	28
2.1.5.10 Reçine Transfer Kalıplama	28
2.2 Doğal Fiberler	30
2.2.1 Kabuk Fiberleri	33
2.2.1.1 Palmiye Fiberleri	34
2.2.2 Yaprak Fiberleri	36
2.2.3 Tohum Fiberleri	36
2.2.4 Ana Gövde Fiberleri	37
2.2.4.1 Kayın Fiberleri	38
2.2.4.2 Okalıptus Fiberleri	39
2.2.5 Kamış Fiberleri	40
2.2.6 Diğer Tüm Fiberler	41

2.3	Kalıplanmış Selülozik Ürün Üretim Yöntemi.....	41
3.	YÖNTEM	45
3.1	Doğal Fiber Numune Üretim İstasyonunda Fiber Numunelerin Üretilmesi	45
3.2	RTM Sistem Tasarımı, İmalatı ve Fiber Plakalardan Kompozit Malzeme Üretimi.....	49
3.2.1	RTM Sistemi Tasarımı	49
3.2.1.1	Enjeksiyon Sistemi	50
3.2.1.2	Kalıp.....	50
3.2.1.3	Gövde.....	51
3.2.1.4	Vakum Sistemi ve Taşma Kabı	52
3.2.1.5	Sıcaklık Kontrol Ünitesi.....	52
3.2.2	RTM Sistemi İmalatı.....	53
3.2.3	RTM Sisteminde Kompozit Malzeme Üretimi.....	56
3.3	Mekanik Testler	58
3.3.1	Çekme Testi	59
3.3.2	Izod Testi	60
3.3.3	Eğme Testi	62
3.3.4	Basma Testi.....	63
4.	BULGULAR.....	66
4.1	Çekme Deneyi Sonuçları	66
4.2	Izod Deneyi Sonuçları.....	69
4.3	Eğme Deneyi Sonuçları	71
4.4	Basma Deneyi Sonuçları.....	72
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	75
6.	KAYNAKLAR	77
7.	EKLER	86
	EK A – Reçine ve Sertleştiricisi	86
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	87

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Boeing 787 malzeme dağılımı (Web Anonim 1 2011)	7
Şekil 2.2: Kapı panelinde kullanılan doğal fiber kompozit.....	9
Şekil 2.3: Doğal kompozit kullanılarak inşa edilmiş ev (Web Anonim 2)	10
Şekil 2.4: Takviye türüne göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	10
Şekil 2.5: Partikül takviyeli kompozitler (Chandu 2017)	11
Şekil 2.6: Fiber takviyeli kompozitler [5].....	12
Şekil 2.7: Levhasal kompozitler (Bektaş 2011)	12
Şekil 2.8: Tabakalı kompozitler (Perox 2009)	13
Şekil 2.9: Karma (hibrit) kompozitler (Banerjee ve Sankar 2014).....	14
Şekil 2.10: Matris türüne göre kompozit malzemeler.....	15
Şekil 2.11: Polimer matrisli kompozitler (Salpietra 2010)	16
Şekil 2.12: Metal matrisli kompozitler (Moore 2017)	16
Şekil 2.13: Seramik matrisli kompozitler (Wood 2013).....	18
Şekil 2.14 :Karbon-karbon kompozitler (Tsukrov 2012).....	19
Şekil 2.15: Nano kompozitler (Xu ve diğ. 2014)	20
Şekil 2.16: Fiber takviyeli kompozit üretim yöntemleri.....	21
Şekil 2.17: Prepreg elle yatırma yöntemi (Aeroworks 2010).....	22
Şekil 2.18: Islak elle yatırma yöntemi (Masterbond 2017).....	22
Şekil 2.19: Püskürtme yöntemi (Lamplax 2018)	23
Şekil 2.20: Elyaf sarma yöntemi (Nuplex 2013).....	24
Şekil 2.21: Pultrüzyon üretim yöntemi (Fiberfence 2018).....	25
Şekil 2.22: Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama (Mazumdar 2002)	26
Şekil 2.23: Pres kalıplama (Substech 2014).....	27
Şekil 2.24: Elyaf sarma üretim adımları (Kim ve diğ. 2011).....	27
Şekil 2.25: Plastik enjeksiyon yöntemi (Discover Composites 2015).....	28
Şekil 2.26: Reçine Transfer Kalıplama Prosesi Şeması (Keulen 2007).....	29
Şekil 2.27: İki boyuta fiberlerin oryantasyonu (Sgriccia ve diğ. 2008).....	30
Şekil 2.28: Doğal fiber bitkileri (Sanjay ve diğ. 2016).....	32
Şekil 2.29: Jüt fiberlerinin elektrok mikroskobunda x7600 görüntüsü (Lewin 2006)	34
Şekil 2.30: Palmiye bitkisi atığı.....	36
Şekil 2.31: Kabuk fiberleri ve ana gövde fiberleri (Mohanty ve diğ. 2002).....	38
Şekil 2.32: Kayın ağacı ve fiber hammaddesi.....	39
Şekil 2.33: Okalıptus ağacı ve fiber hammaddesi	40
Şekil 2.34: İlk kalıplanmış selülozik ürün üretim makinesi (Keyes 2012).....	41
Şekil 2.35: Kalıplanmış selülozik ürün üretim prosesi (Didone ve diğ. 2017) .	42
Şekil 2.36: Pulperde çözünen (liflerine ayrılan) fiberler.....	43
Şekil 2.377: Kalıplanmış doğal fiberler (Bravo 2016).....	43
Şekil 2.38: Kalıpta form verilmiş doğal fiber malzemeden kask (Suciu 2013)	44
Şekil 3.1: Kayın, palmiye, okalıptus fiber numuneleri	46
Şekil 3.2: Doğal fiber üretim sistemi	46
Şekil 3.3: Palmiye selülozundan kompozit takviyesi	47
Şekil 3.4: Kayın ağacı selülozundan kompozit takviyesi.....	48
Şekil 3.5: Okalıptus selülozundan kompozit takviyesi.....	48
Şekil 3.6: RTM Sistem Tasarımı	49
Şekil 3.7: Reçine Enjeksiyonu İçin Kullanılan Basınçlı Kap (Pulsar 2016).....	50

Şekil 3.8: RTM Sistemi Kalıbı	51
Şekil 3.9: RTM Sistemi Şase Önden Görünüş	51
Şekil 3.10: Vakum pompası	52
Şekil 3.11: Fişek Rezistans (Mattsson 2015)	53
Şekil 3.12: RTM Sisteminin imalat aşaması-1	53
Şekil 3.13: RTM Sistemi Kalıp Alt Kısmı	54
Şekil 3.14: RTM Sistemi Ayak Montajı	54
Şekil 3.15 :RTM Sistemi Üst Kalıbı	55
Şekil 3.16: RTM Sistemi Şase-Kalıp ve Isıtma Grubu	55
Şekil 3.17: Reçine transfer kalıplama sistemi	56
Şekil 3.18 :Kompozit üretiminden bir görüntü.....	57
Şekil 3.19: Palmiye selülozu takviyeli kompozit	57
Şekil 3.20: Okaliptus selülozu takviyeli kompozit	58
Şekil 3.21: Kayın Ağacı Selülozu Takviyeli Kompozit.....	58
Şekil 3.22: ASTM D3039 çekme numunesi özellikleri	59
Şekil 3.23: Çekme testi numuneleri.....	59
Şekil 3.24: Reçinesiz çekme numuneleri	60
Şekil 3.25: Çekme testi cihazı	60
Şekil 3.26: Deneylerde kullanılan Izod darbe cihazı	61
Şekil 3.27: Izod numune ölçüleri.....	61
Şekil 3.28: Izod testi numuneleri.....	62
Şekil 3.29: Eğme testi numuneleri.....	62
Şekil 3.30: Eğme testi numuneleri.....	63
Şekil 3.31: Eğme testi cihazı	63
Şekil 3.32: Basma testi numuneleri teknik resmi	64
Şekil 3.33: Basma testi numuneleri	64
Şekil 3.34: Besmak eğme çekme basma test cihazı.....	65
Şekil 4.1: Çekme testi sonuçları	67
Şekil 4.2: Izod deney sonuçları	70
Şekil 4.3: Eğme testi sonuçları	72
Şekil 4.4: Basma testi sonuçları.....	73
Şekil 5.1: Mekanik özelliklerin bağıl olarak karşılaştırılması.....	75

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Dünyadaki fiber kaynakları miktarı (Rowell 2008).....	31
Tablo 2.2: Fiberlerin karşılaştırması (Bavan ve Kumar 2010).....	33
Tablo 2.3: Beyaz likör çözelti ve konsantrasyon tablosu.....	35
Tablo 4.1: Kompozit numuneler çekme deneyi sonuçları.....	67
Tablo 4.2: Reçinesiz numuneler çekme testi sonuçları.....	68
Tablo 4.3: Izod deneyi sonuçları.....	70
Tablo 4.4: Eğme deneyi sonuçları.....	72
Tablo 4.5: Basma deneyi sonuçları.....	74

SEMBOL LİSTESİ

g	:	Gram
l	:	Litre
RTM	:	Reçine Transfer Kalıplama (Resin Transfer Molding)
CTMP	:	Kimyasal Termo Mekanik Hamur
mm	:	Milimetre
%	:	Yüzde
Al₂O₃	:	Alüminyum Oksit
SiC	:	Silisyum Karbür
Si₃N₄	:	Silisyum Nitrür
B₄C	:	Boron Karbid
TiC	:	Titanyum Karbür
TiB	:	Titanyum Borid
TiN	:	Titanyum Nitrür
AlN	:	Alüminyum Nitrür
°C	:	Santigrat Derece
cm	:	Santimetre
kg	:	Kilogram
MPa	:	Megapaskal
SMC	:	Levha Pres Kalıplama
BMC	:	Hamur Pres Kalıplama
SRIM	:	Yapısal Reaksiyonlu Enjeksiyon Kalıplama
VARI	:	Vakum Destekli Reçine Enjeksiyon
NaOH	:	Sodyum Hidroksit
Na₂S	:	Sodyum Sülfid
Na₂CO₃	:	Sodyum Karbonat
ClO₂	:	Klor Dioksit
Cl₂	:	Klor
µm	:	Mikrometre
kN	:	KiloNewton
CAD	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
J	:	Joule

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın başlangıcından bitimine kadar her aşamasında çalışmayı yönlendiren, özverili yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Hasan Çallıoğlu'na, önerileriyle bu tezin zenginleşmesine yardımcı olan sayın Prof. Dr. Numan Behlül Bektaş ve sayın Doç. Dr. Metin Sayer'e, tez kapsamında kullanılan selüloz türlerinin analizlerinde yardımlarını esirgemeyen Hakan Demirel'e teşekkürlerimi borç bilir, şükranlarımı sunarım. Geceleri bu tezi yazabildiğim huzurlu aile ortamını sağlayan sevgili eşim Mehtap Sarıkaya'ya ve doktora öğrenimimi bitirerek kendisine gelecekte örnek olabilme dürtüsünü bende uyandıran canım oğlum Mert Sarıkaya'ya sevgilerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Çevre ve sürdürülebilirlik konularındaki duyarlılık, günümüzde doğal malzemeler alanındaki gelişmelerin tetikleyicisi olmuştur. Kimi zaman şirketlerin kendi duyarlılıkları, kimi zaman ise yasal regülasyonlar, kullanılagelen bir çok malzemenin değiştirilmesine ve ikame malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Genişletilmiş polistren köpük (EPS) yerine doğal selüloz bazlı ambalaj kullanımının yaygınlaşması, amyant kumaş yerine seramik kumaş kullanılmaya başlanması, teflon bazlı yüzey kaplama uygulamaların yerini seramik esaslı yüzey kaplama uygulamalarına bırakması bu değişimlere örnektir. Doğal kaynaklardan yüksek performanslı malzeme geliştirme çalışmaları günümüzün önemli ilgi alanlarından biridir. Kompozit malzemelerde ise takviye ve matris olarak petrol türevli ve sentetik malzemelerin kullanılması, sürdürülebilirlik endişelerini beraberinde getirmektedir.

Doğal kompozitlerin (doğal fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler) önemi son yıllarda giderek artmaktadır. Keten, jüt, kenaf gibi bitkiler, polimer bazlı matrislerde takviye olarak kullanılmaktadır. Çevre ile ilgili yasal regülasyonlar, ekolojik, sosyal ve ekonomik farkındalık, doğal fiber takviyeli kompozitler üzerindeki ilgiyi arttırmaktadır (Faruk ve diğ. 2012). Doğal fiberlerin, darbe dayanımı, tokluk, esneklik gibi özelliklerinin geleneksel malzemelere göre avantajlı olduğu durumlar vardır. Diğer yandan, düşük maliyet, düşük yoğunluk, yüksek vibrasyon dayanımı gibi istenilen özellikleri de vardır (Sgriecia ve diğ. 2008). Bunlara ilaveten, doğal fiberlerin bulunabilirliği, sağlık yönünden risklerinin az olması ve aşınma dayanımlarının iyi olması da tercih edilen özellikleridir (Lei ve diğ. 2007).

Tüm endüstri kolları, petrole bağımlı olan yani petrolden dolayı olarak üretilen malzemelerin oranını düşürmeye çalışmaktadır. Doğayla dost, sürdürülebilir malzemelere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Kompozit malzemeler alanında ise cam ve karbon fiber takviyeli kompozitlere alternatif olarak doğal fiber araştırmalarına ihtiyaç giderek artmaktadır. Doğal fiber takviyeli kompozitlerin üretilebilirliği ve özellikleri son yıllarda çok dikkat çekmektedir. Otomotiv ve uçak-

uzay endüstrisinde geçmiş yıllarda yaşanan çelikten alüminyuma geçiş trendi, günümüzde alüminyumdan kompozit malzemelere kaymıştır. Doğal fiber takviyeli kompozitler alanındaki gelişmeler ile birlikte otomobillerin ağırlıklarında %15 düşüş beklenmektedir (Mohanty ve diğ. 2002). Doğal fiberler, sentetik fiberlere göre daha düşük yoğunluğa sahiptir ve bu özellik onların geleneksel kompozit malzemelere göre daha hafif olmasını sağlar. Elektrikli otomotiv endüstrisi, batarya ile gelen yük artışını azaltabilmek için ağırlık düşürme yolları aramaktadır (Koronis ve diğ. 2013). Bu durum doğal fiberleri, yaygınlaşma potansiyeli yüksek bir malzeme grubu haline getirmektedir.

Doğal fiberler, sadece düşük maliyet ve yüksek üretim adetleri gerektiren alanlarda değil, diğer fiber türlerinde olmayan özelliklerine bağlı olarak başka alanlarda da kullanım potansiyeline sahiptir (Alves ve diğ. 2010). Cam elyaf ile mukayese edildiğinde doğal fiberler genel olarak %60 daha az enerji ile üretilmektedirler (Brosius 2006). Yüksek enerji kazanımı ve düşük karbon salınımı, doğal fiberleri çevreye dost bir malzeme yapan ilave özelliklerdir (Faruk ve diğ. 2014).

Doğal fiber takviyeli kompozitler için gelecek parlak görünürken, yine de bu alanda gelişmelerin önünü kesebilecek önemli engeller de bulunmaktadır. Kompozit endüstrisi cam ve karbon fiber takviyeleri ile üretim yapma konusunda derin tecrübe ve bilgi biriktirmiştir. Fakat biriken bilgi ve tecrübeye rağmen cam ve karbon fiberlerde kırılma ve kayma, kompozit üretiminde süregelen bir sorun olarak devam etmektedir (Hsiao ve Kikuchi 1999). Doğal fiber takviyeli kompozitler üzerine farklı üretim yöntemlerini içeren çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmaların neredeyse hepsi fiber ve matris arasındaki bağın zayıflığından bahsetmiştir (George ve diğ. 2001). Doğal fiber takviyeli kompozit üretiminde kullanılan ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemi, üretim esnasında doğal fiberlere zarar vermektedir (Du ve diğ. 2014). Kraft takviyeli polipropilen matrisli kompozit üretimi esnasında kraft fiberleri 2,3 mm'den 0,4 mm'ye düşmüştür (Thunwall ve diğ. 2008).

Doğal fiberler altı gruba ayrılmaktadır, bunlar; kabuk fiberleri (jüt, keten, kenevir, ramie ve kenaf), yaprak fiberleri (abaka, sisal ve ananas), tohum fiberleri (hindistan cevizi, pamuk ve kapok), ana gövde fiberleri (kenaf, kendir ve hint

kenevir), kamyş fiberleri (buğday, mısır ve pirinç) ve diğler tüm fiberlerdir (odun ve kök) (Faruk ve diğ. 2012).

Palmiye fiberleri, palmiye yağı üretimi esnasında, değirmende, yan ürün olarak ortaya çıkar (Sreekala ve diğ. 1996). Bu fiberler, yağları sıkıldıktan sonra doğaya atılırsa, çok büyük çevresel sorunlara yol açarlar. Atık olarak ortaya çıkan fiberlerin değerlendirilmeleri, bu hammaddeye katma değer kazandırmaktadır (Sreekala ve diğ. 1997). Palmiye fiberleri, doğal fiberler arasında yüksek tokluğa sahip bir fiber türüdür (Jacob ve diğ. 2004). Yüksek toklukları sebebiyle, polimer matrisli kompozit malzemelerde takviye olarak kullanımları tercih edilmektedir (Haque ve diğ. 2009). Ayrıca, mısır, keten ve sisal fiberleriyle kıyaslandığında, düşük yoğunluğa sahiptirler ve bu palmiye fiberlerini önemli bir ağırlık düşürücü malzeme olarak ön plana çıkarır (Al-Oqla ve Sapuan 2014).

Kayın ağacı fiberleri esas olarak ağaç/gövde fiberleri olarak sınıflandırılırlar. Polimer kompozitlerinde kullanılan kayın fiberleri çok çeşitli şekle sahiptir ve tek başına veya kombinasyon halinde kullanılabilir (Ashori 2008).

Okalıptüs genellikle tropik bölgelerde yetişen, hızla büyüyen bir bitkidir. İyi fiber kalitesine ve nispeten ucuz piyasa fiyatlarına sahiptir (Campinhos 1999). Okalıptüs fiberleri, sert gövde fiberleridir ve genellikle kısa liflerden oluşur. Geleneksel olarak çimento esaslı malzemelerin güçlendirilmesinde kullanılırlar (Tonoli ve diğ. 2010). Tüm dünyada, özellikle kağıt endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chung 2005).

Bu doktora tezi kapsamında palmiye fiberleri, kayın fiberleri ve okalıptüs fiberleri kullanılarak doğal fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme numuneleri üretilmiştir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez ile ülkemizde yaygın olarak yetişen ve yetiştirme potansiyeli olan bitkilerden elde edilmiş doğal fiberlerin kompozit takviyesi olarak kullanılması

planlanmıştır. Bu kapsamda, palmye fiberleri, kayın ağacı fiberleri ve okalıptus fiberleri seçilerek kullanılmıştır.

Tez kapsamındaki hedeflerden biri Reçine Transfer Kalıplama (RTM) sistemi imal etmektir. Tez projesi kapsamında kullanılacak RTM sistemi, bilgisayar destekli tasarım programı (Siemens NX) kullanarak tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan RTM sisteminin imal edilebilmesi için öncelikle gerekli imalat resimleri hazırlanmıştır. Ardından makine parçaları imalat resimlerine uygun olarak imal edilmiş ve montajı yapılmıştır.

Tezin doğal fiber takviyeli kompozit numuneler üretme aşamasında, palmye, kayın ve okalıptus fiberleri kullanılarak, kalıplanmış selülozik numune üretim makinasında 3,5 mm ve 4 mm kalınlığında fiber plakalar üretilmiştir. Bu fiber plakalar, RTM istasyonunda, kalıpla şekillendirilmiş ve vakum yardımıyla içlerine epoksi bazlı reçine (Hunstman Araldite® LY 1564 / Aradur® 3487) enjekte edilmiştir. Rezistanslarla sıcaklığı kontrol edilebilen RTM sistemi, uygun kürlenme sıcaklığına çıkartılmış (160 °C) ve kompozit malzemenin kürlenmesi sağlanmıştır. Bu yolla, palmye, kayın ve okalıptus takviyeli epoksi bazlı kompozit malzeme numuneleri üretilmiştir.

Üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin tespiti için; çekme testi, izod testi, eğme testi ve basma testi uygulanmıştır. Çekme numuneleri ASTM D3039 standardına, izod numuneleri ASTM D256 standardına, eğme numuneleri ISO 178 standardına, basma numuneleri ise TS EN ISO 604 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Testlerin sonuçları değerlendirilmiş, birbirleriyle karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Yapılan bu çalışmanın iki ana amacı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, doğal fiberleri, RTM yöntemi kullanarak, yüzey kalitesi ve katma değeri yüksek kompozit malzeme üretiminde kullanabilmeyi hedeflemektedir. Böylelikle, sürdürülebilir, doğa dostu, üretimi esnasında daha az enerji tüketilen doğal fiber kompozit takviyelerinin, 4 mm gibi kaydadeğer bir kalınlıkta üretilebilirlikleri denenmiş olacaktır. İkinci ana amaç ise, kalıplanmış selülozik ambalaj üretim tekniği ile kompozit üretiminin birleştirilmesi denemelerinin yapılması olmuştur. Kalıplanmış selüloz, üretimi sonrasında kararlı 3 boyutlu forma sahip olduğu için, istenilen kompozit ürünün nihai

formunda üretilebilir. Böylelikle, kompozit endüstrisinin önemli problemlerinden olan cam ve karbon fiberlerde kırılma ve kayma sorununa bir alternatif çözüm sunulabilecektir.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde kompozit malzemeler ve kompozit malzemelerin üretim yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ardından doğal fiberler hakkında bilgilendirme yapıp, tez projesi kapsamında kullanılan okalıptus, palmiye ve kayın fiberleri hakkında literatür bilgileri verilmiştir. Sonrasında kalıplanmış selülozik ürün üretimi yöntemi ile ilgili genel bilgiler paylaşılmıştır.

2.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, makroskopik düzeyde bir araya getirilmiş ve birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşmuş yapı malzemeleridir. Bileşenlerden birisi takviye fazı, diğeri ise matris olarak adlandırılır. Takviye fazının malzemesi fiber, parçacık veya pul formunda olabilir. Matris fazın malzemeleri genellikle sürekli dir. Kompozit sistemlere örnek olarak çelikle takviye edilmiş beton ve grafit vb. fiberlerle takviye edilmiş epoksi verilebilir. Lignin matrisin selüloz fiberlerle takviye edildiği tahta ve kalsiyum ile fosfat iyonlarından oluşan kemik-tuz plakalarının yumuşak kolajeni desteklediği kemikler de kompozit malzeme örnekleridir (Kaw 2005).

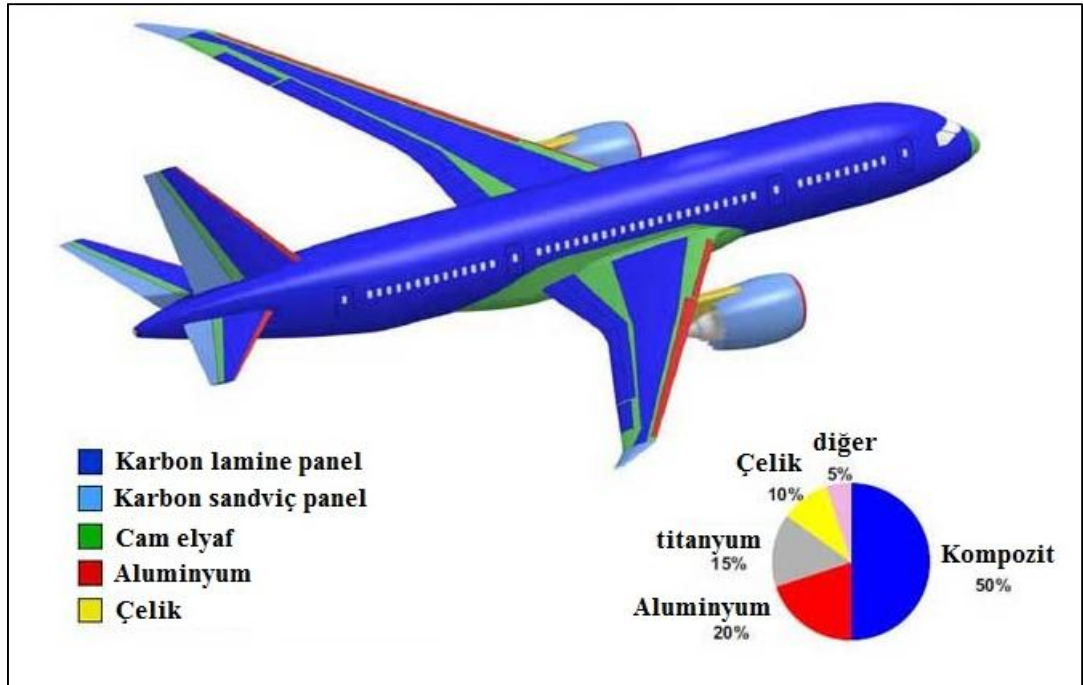
Kompozit malzemelerin bilinen ilk kullanım alanı inşaat sektörüdür. Çamur ve samanın karıştırılması ile hazırlanan kompozit malzemeler, ilk kullanılan yapı malzemeleridir. 1500'lerde Mısırlıların evlerinde bambu ile takviye edilmiş çamur duvarlar, 1800'lerde dövme kılıçlarda tabakalı metaller kullanılmıştır. 1950'li yıllarda ise kompozit malzemeler araç gövdeleri için otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllara kadar kompozit malzemelerden teknolojik problemleri çözmek amacıyla faydalanılmıştı fakat bu yıllardan sonra polimer esaslı kompozit malzemelerle birlikte kompozitler mühendislik malzemeleri olarak yaygınlaşmaya başlamışlardır. Kompozit malzemeler yapısal uygulamalarda çelik ve alüminyumun yerine kullanıldıklarında genellikle daha iyi performans gösterdiklerinden hızlı bir büyüme göstermişlerdir. Günümüzde birçok mühendislik

alanında kompozit malzemelerin kullanımı, enerji açısından büyük oranda tasarruf sağlamaktadır (Ersoy 2005).

2.1.1 Kompozit Malzemelerin Genel Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin uygulama alanları günümüzde listelenemeyecek kadar genişlemiştir. Genel kullanım alanları arasında; uçaklar, uzay araçları, otomobiller, spor ekipmanları, deniz araçları, elektronik eşyalar, güç endüstrisi, mobilya, medikal araç-gereçler, rüzgar türbinleri ve bir çok endüstriyel ürün sayılabilir (Mallick 2008).

Uçak-uzay alanında kompozit malzemelerin kullanımının ana sebebi ağırlık azaltmaktır. Kompozit malzemeleri kullanarak % 25-30 civarında ağırlık azaltımı mümkün olmuştur. Günümüzde uçakta kullanılan kompozitlerin kullanım oranları % 50'leri geçmektedir (Mallick 2008). Şekil 2.1'de, Boeing 787'de kullanılan malzeme oranları görülmektedir.



Şekil 2.1: Boeing 787 malzeme dağılımı (Web Anonim 1 2011)

Otomotivde, gövde panelleri, şase ve diğer yapısal parçalarda geleneksel olarak düşük-orta karbonlu çelikler kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, ağırlık

azaltıcı etkilerinden dolayı bu parçaların yerini yavaş yavaş almaya başlamıştır. Ağırlık azaltmaya ilaveten ses düşürme, vibrasyonu azaltma, korozyona uğramama, kalıp ve üretim maliyetini düşürme gibi ilave faydalar da sağlamışlardır (Mallick 1997).

Spor malzemeleri üretimi, kompozit malzemenin yoğun kullanıldığı alanlardan biri haline gelmiştir. Yüksek performans spor ekipmanlarında kompozit malzemelerin kullanımı yüksek hızla artmıştır. Spor mağazalarında tenis raketinden kayak ekipmanlarına kadar bir çok segmentte kompozit malzemeler görülebilir (Mazumdar 2002).

Kompozit malzemeler; korozyon dayanımı ve hafiflik özelliklerinden dolayı yolcu gemisi, hız botları, can yeleği gibi deniz araçları ve ekipmanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır (Mazumdar 2002).

2.1.2 Doğal Fiber Takviyeli Kompozitler

Doğal fiberlerin diğer malzemelerle birleştirilip kompozit haline getirilmesi yeni değildir. Yaklaşık 3000 yıl önce, eski Yunan'da, saman ve kilin karıştırılıp evlerin duvarlarında kullanıldığına dair bulgular vardır. Zamanla metaller gibi daha dayanıklı malzemeler geliştirilip kullanılmaya başlanınca doğal malzemelere olan ilgi biraz azalmıştır (Suddell ve Evans 2005).

Doğal fiber takviyeli kompozitler düşük enerji gerektiren fiber üretimleri ve bitkinin büyürken karbon tüketmesi nedeniyle, yüksek sıcaklıkta eritilerek şekillendirilen cam elyafa göre kayda değer şekilde daha az çevresel etkiye sahiptir. Doğal fiber takviyeli kompozitler hafif olmaları nedeniyle nakliye esnasında da daha az enerji gerektirirler. Fiberlerinin yüksek hacim oranına sahip olması nedeniyle kompozit hale gelirken daha az reçine kullanılır (Thakur 2014).

Diğer taraftan doğal fiber takviyeli kompozitlerin dezavantajları da vardır. Bunlar, düşük rijitlik, düşük mukavemet ve hızlı bozunma olarak sıralanabilir. Bunlara ilaveten, malzeme özelliklerinde sürekliliğin olmaması ve yüksek maliyetleri de olumsuz özellikleri olarak listelenebilir (Pollitt 2011).

1950 ve 1990 yılları arasında Doğu Almanya’da üretilmiş olan Trabant markalı arabada, pamuk fiberleri takviyeli polyster matrisli ilk doğal takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır. Daimler-Benz, 1991 yılından beri, otomotivde kullanılan cam elyaf takviyeli kompozitleri doğal fiber takviyeli kompozitlerle değiştirme yollarını aramaktadır. Mercedes, 1996 yılında, keten takviyeli kompozit malzemeyi, E serisi araçlarının kapı panellerinde kullanmaya başlamıştır. Ardından 2000 yılının Eylül ayında, Daimler Chrysler doğal fiber takviyeli kompozitleri İngiltere ve Güney Afrika’da üretilen araçlarında kullanmaya başlamıştır (Şekil 2.2). Otomotiv parçalarında doğal fiber takviyeli kompozitlerin kullanılmasına yönelik 1950’lerden günümüze sayısız çaba ve deneme olmuştur fakat çevresel değişim baskısı tarihsel süreçte günümüzde olduğu kadar yoğun olmamıştır (Suddell ve Evans 2005).



Şekil 2.2: Kapı panelinde kullanılan doğal fiber kompozit

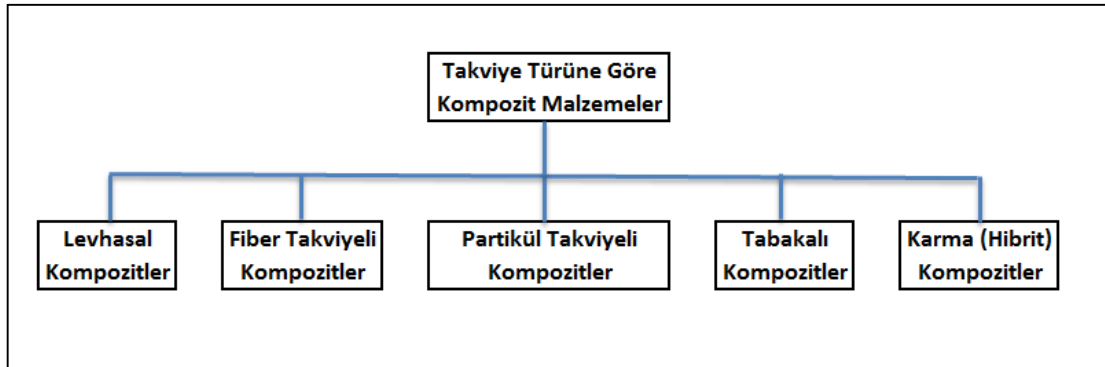
İnşaat ve yapı sektöründe doğal kompozitler bir çok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Okul binaları, gıda siloları, düşük maliyetli evler, çatılar, borular; doğal kompozitlerle üretilen yapılar, eşyalar olmuştur. Doğal fiberlerin yapı ve inşaat malzemesi olarak ahşap göre önemli avantajları vardır. Doğal fiberler presle istenilen formu alabilmektedir ve matris ile birleştiklerinde hidrofobik, sudan etkilenmeyen özellik kazanmaktadırlar (Singh ve Gupta 2005). Şekil 2.3’te doğal fiber takviyeli kompozit paneller kullanılarak yapılmış ev görülebilir.



Şekil 2.3: Doğal kompozit kullanılarak inşa edilmiş ev (Web Anonim 2)

2.1.3 Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

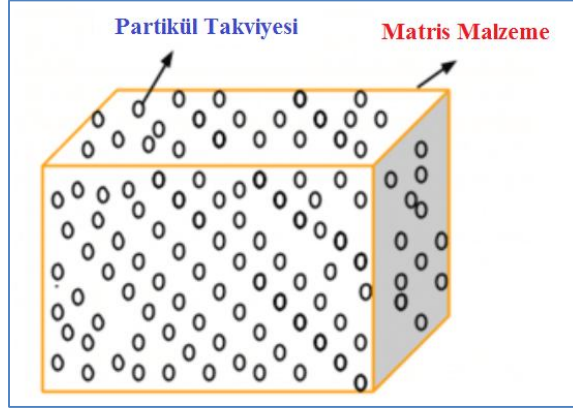
Kompozit malzemeler kullanılan takviye elemanının şekline göre beş sınıfa ayrılır. Bunlar partikül takviyeli, elyaf (fiber) takviyeli, levhasal, tabakalı ve karma (hibrit) kompozit malzemelerdir (Mallick 1997), (Mallick 2008). Şekil 2.4'te takviye türüne göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması görülebilir.



Şekil 2.4: Takviye türüne göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.1.3.1 Partikül Takviyeli Kompozitler

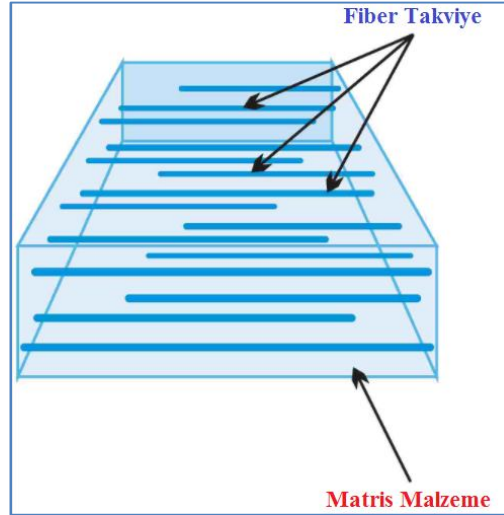
Partikül takviyeli kompozitler içine partikül yerleştirilmiş matris malzemelerden oluşur. Şekil 2.5'te partikül takviyeli kompozitlerin basitleştirilmiş şekli görülebilir. Partiküllerin mesafesi yaklaşık 1 μm 'den birkaç mm'ye kadar değişebilir. Hacim oranları %80'e kadar çıkabilmektedir, bu oran matris ve partikül malzeme karışımının kullanılacağı yerdeki fonksiyonuna göre değişebilir (Czichos ve Hennecke 2010).



Şekil 2.5: Partikül takviyeli kompozitler (Chandu 2017)

2.1.3.2 Fiber Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler, matris yapının içinde elyafların yer alması sonucunda oluşan kompozit malzemelerdir. Şekil 2.6'da matrisin içinde fiber takviyelerin oryantasyonu görülebilir. Kompozit malzemenin mukavemetinde elyafların matris içindeki yerleşimi önem arz etmektedir. Elyaflar çekme yönüne dik ise düşük mukavemet, çekme yönü ile aynı doğrultuda ise yüksek mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle mukavemet her iki yönde de eşit olurken matris yapıda homojen dağılmış kısa fiberlerde izotrop yapı görülebilmektedir (Bektaş 2011).

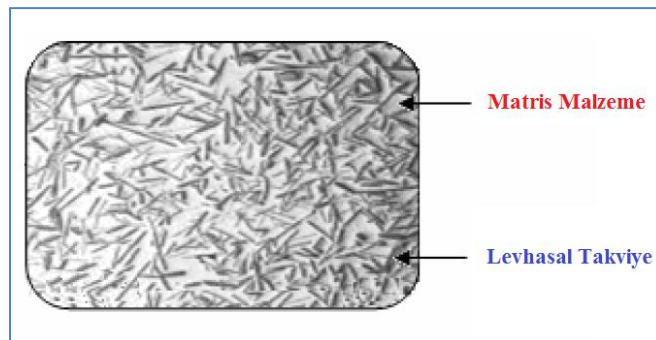


Şekil 2.6: Fiber takviyeli kompozitler [5]

Fiber takviyeli kompozitlerde hem matris hem de fiber, fiziksel ve kimyasal özelliğini devam ettirmekle birlikte ortaya çıkan malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri kendini oluşturan bileşenlerden farklı olmaktadır (Mallick 2008).

2.1.3.3 Levhasal Kompozitler

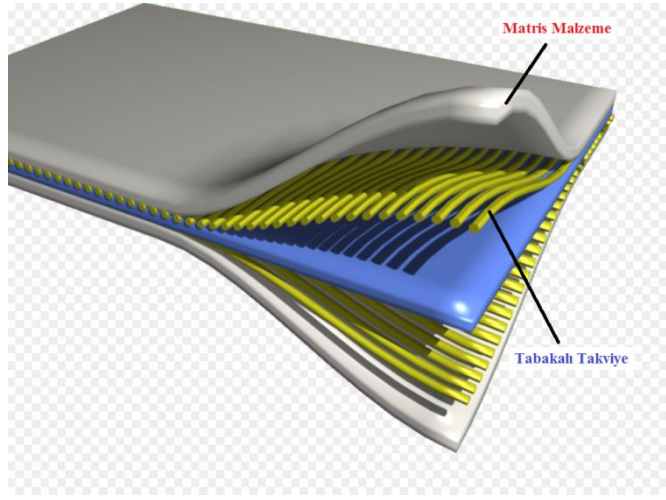
Levhasal kompozitler, levha şekilli takviye elemanlarının matris fazı içinde yer almaları sonucu oluşan kompozitlerdir. Şekil 2.7’de bir levhasal takviye ve matris kombinasyonu görülebilir. Aluminium diboride levhalar, Al-grafit sistemi levhalar bu türün örnekleridir (Bektaş 2011).



Şekil 2.7: Levhasal kompozitler (Bektaş 2011)

2.1.3.4 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, üretim şekillerine bağlı olarak katmanlı halde üretilen ve böylelikle form verilen levha şeklindeki kompozitlerdir. Şekil 2.8’de tabakalı kompozit örneği görülebilir. Tabakalı kompozit malzeme; tabakalanmış taşıyıcı malzeme grubu (örneğin; kağıt, mukavva, selüloz, tekstil ürünü) ve bir bağlayıcı malzemeden (örneğin; fenol reçinesi, melamin reçinesi, üre reçinesi) oluşur. Taşıyıcı ve bağlayıcı malzeme sıcaklık altında preslenerek kompozit malzeme elde edilir (Czichos ve Hennecke 2010).



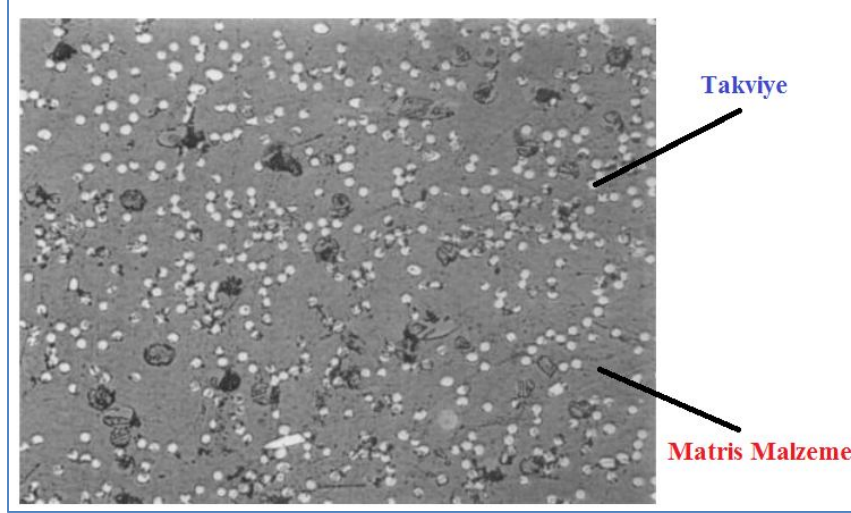
Şekil 2.8: Tabakalı kompozitler (Perox 2009)

Tarihsel süreçte en yaygın ve en eski kullanım alanına sahip olan kompozit malzemeler tabakalı kompozitlerdir. Farklı fiber oryantasyonlarına sahip katmanlar birleştirilerek çok yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir. Tabakalı kompozitler, tabakalarının aksine çoğunlukla ısıya ve neme dayanıklı özellik kazanmaktadır. Metallerle göre hafif olmaları fakat bunun yanında mukavemetli olmaları, tercih edilirliklerini arttırmaktadır. Tabakalı kompozitler uçakların kanat ve kuyruk yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Bektaş 2011).

2.1.3.5 Karma (Hibrit) Kompozitler

Karma kompozitler, bir matris malzeme içerisinde birden fazla takviye malzeme çeşiti içeren yapılardır. Şekil 2.9’da karma kompozit örneği görülebilir.

Prensipite, çok sayıda farklı fiber, hibrit kompozit içerisinde yer alabilir fakat uygulamada çoğunlukla bir matris içerisinde iki farklı takviye kullanılır (Chamis ve Lark 1977).



Şekil 2.9: Karma (hibrit) kompozitler (Banerjee ve Sankar 2014)

Karma kompozitler, geleneksel tek fiber türü içeren kompozitlere, ilave özellikler kazandırmak için geliştirilmişlerdir. Bu yolla, grafit ve boron gibi pahalı fiberler, cam elyaf ve kevlar gibi nispeten ucuz fiberlerle seyreltilirler (Chou ve Kelly 1980).

2.1.4 Matris Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, kullanılan matris malzemesinin cinsine göre; polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, karbon/karbon matrisli kompozitler ve nano kompozitler olarak beş ana gruba ayrılmaktadırlar (Matthews ve Rawlings 1999). Şekil 2.10'da matris türüne göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması görülebilir.

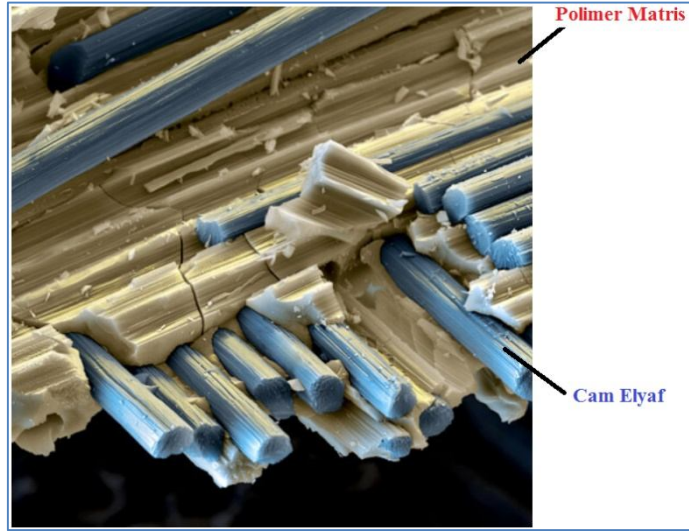


Şekil 2.10: Matris türüne göre kompozit malzemeler

2.1.4.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Kompozitler için en yaygın olarak kullanılan matris malzemesi polimerlerdir. Bunun iki nedeni vardır. Polimerler üstün mekanik özelliklere sahip malzemeler değildirler. Bir çok yapısal uygulama için mekanik özellikleri yetersiz kalmaktadır. Mukavemet ve rijitlikleri metaller ve seramiklere göre düşüktür. Polimerleri takviye ederek özelliklerini iyileştirmek uygulama alanında önemli katkı sağlamaktadır. Polimerlerin matris malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmalarının ikinci nedeni, kompozit üretimi esnasında çok yüksek sıcaklık ve çok yüksek basınç gerektirmemeleridir. Bu iki sebepten ötürü polimerlerin kompozit malzemelerde kullanımı çok yaygınlaşmıştır (Matthews ve Rawlings 1999).

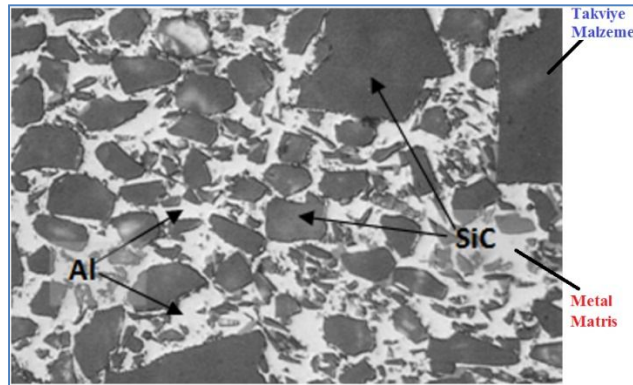
Polimer matrisli kompozit malzemeler; termoset, termoplastik ve kauçuk olarak üç gruba ayrılırlar. Polyester ve epoksi reçineler, diğer polimer matrislere kıyasla daha çok kullanılmaktadırlar. Kullanılan takviye malzemelerinin başlıcaları ise, cam fiber, kevlar fiber, bor fiber ve karbon fiberlerdir. Polimer matrisli kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan üretim yöntemleri; elle sıvama, tel sarma, pultrüzyon, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon yöntemleridir. Polimer matrisli kompozit malzemeler korozyon dirençleri nedeniyle denizcilik alanında, hafif olmaları nedeniyle otomotiv, taşımacılık ve spor sektörlerinde kullanıma sahiptirler (Bektaş 2011). Şekil 2.11’de polimer matrisli bir kompozit malzeme görülebilir.



Şekil 2.11: Polimer matrisli kompozitler (Salpietra 2010)

2.1.4.2 Metal Matrisli Kompozitler

Boron ve silikon karbür fiberlerinin 1970'lerin başında üretilmeye başlanmaları, hafif metallerin takviye olarak kullanımları konusunun detaylı incelenmeye başlanmasını sağlamıştır. Önceleri yüksek sıcaklıkta metal matris ve fiberlerin degradasyonu proses için engel teşkil etse de, bulunan fiber yüzey kaplama işlemleri metal matrisli kompozitlerin üretilmelerine olanak vermiştir. Böylelikle ana yapıyı matris metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak da genellikle seramik bir takviye fazının kullanıldığı metal matrisli kompozitler üretilebilmiştir (Matthews ve Rawlings 1999). Şekil 2.12'de metal matrisli kompozit malzeme görülebilir.



Şekil 2.12: Metal matrisli kompozitler (Moore 2017)

Metal matrisli kompozitler, polimer matrisli kompozitlerle kıyaslandığında üstün mekanik özelliklere, üstün rijitliğe, yüksek kayma ve basma dayanımına ve yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir. Nem alma özellikleri neredeyse yoktur, alev almazlar, yüksek elektrik ve ısı iletim katsayısına sahiptirler ve radyasyona karşı dayanımları vardır. Tüm bu avantajlarına rağmen, maliyetleri çok yüksektir ve şu an gelişme aşamasındadırlar (Matthews ve Rawlings 1999).

Metal matrisli kompozit malzemeler geleneksel malzemelere çok iyi alternatif sunmaktadır. Yüksek elastiklik modülüne sahip seramikler, plastik şekil değiştirme özelliğine sahip metallerle kombine edilerek kırılma tokluğuna sahip, aşınma dayanımı yüksek, basma dayanımı yüksek malzemeler geliştirilmektedir. Otomotiv, havacılık ve savunma sanayinde, çok özel parça ve komponentlerde kullanılmaya başlanmışlardır (Bektaş 2011).

2.1.4.3 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramikler görece yüksek mukavemet ve rijitliğe sahiptirler fakat gevreklerdir. Buna bağlı olarak, seramik matrisli kompozitlerin geliştirilme ve üretilme amaçlarının başında tokluklarını arttırmak gelir. Böylelikle seramiklerin yüksek mukavemet ve rijitliğinden yararlanıp gevrekliği minimize etmek amaçlanır (Matthews ve Rawlings 1999). Seramik matrisli kompozitler çoğunlukla gaz türbini bıçakları, otomotiv motoru parçaları gibi yüksek sıcaklığın olduğu sistemlerde kullanılırlar (Mallick 1997). Şekil 2.13'te seramik matrisli kompozit örneği görülmektedir.

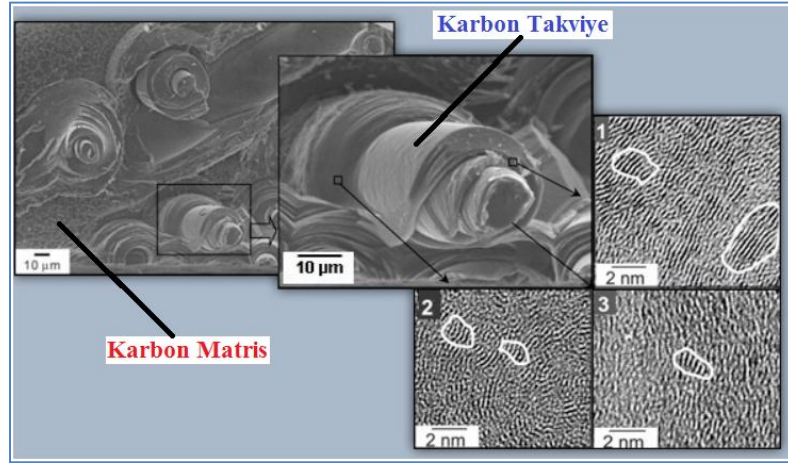


Şekil 2.13: Seramik matrisli kompozitler (Wood 2013)

Seramik matrisli kompozitlerde kullanılan bileşikler; Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B_4C , CBN, TiC, TiB, TiN ve AlN'dir. Birbirlerinden farklı yapılarda olan bu bileşiklerin bir ya da birkaçının kullanımı ile seramik matrisli kompozitler elde edilir. Seramik matrisli kompozitlerin diğer kullanım alanları askeri ekipmanlar, uzay araçları ve zırhlardır. Seramik matrise eklenen takviyeler; karbon, cam ve seramiktir. Seramik matrisin seramik fiber ile takviye edildiği malzemelerde gevreklik azalmakta, mukavemeti yüksek ve tok bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Alumina ve zirkonya kullanılarak üretilen seramik matrisli kompozitler son yıllarda bio malzeme olarak da kullanılmaya başlanmıştır (Bektaş 2011).

2.1.4.4 Karbon-Karbon Kompozitler

Karbon-karbon kompozitler, kısaca; karbon fiber ve karbon matristen oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler toksik olmayan ortamda yaklaşık $3000\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar stabildirler. Fakat bir yüzey kaplama işlemine tabi değillerse ya da kimyasal olarak modifiye edilmedilerse, oksijenin bulunduğu ortamda $400-500\text{ }^{\circ}C$ 'de bozunmaktadırlar. Yüksek ısı iletim katsayıları ve düşük termal genleşmeleri, karbon-karbon kompozitleri ısı şoklarının olduğu uygulamalarda malzeme seçimi için mükemmel bir alternatif haline getirmektedir (Mallick 1997). Şekil 2.14'de karbon-karbon kompozit örneği görülebilir.



Şekil 2.14 :Karbon-karbon kompozitler (Tsukrov 2012)

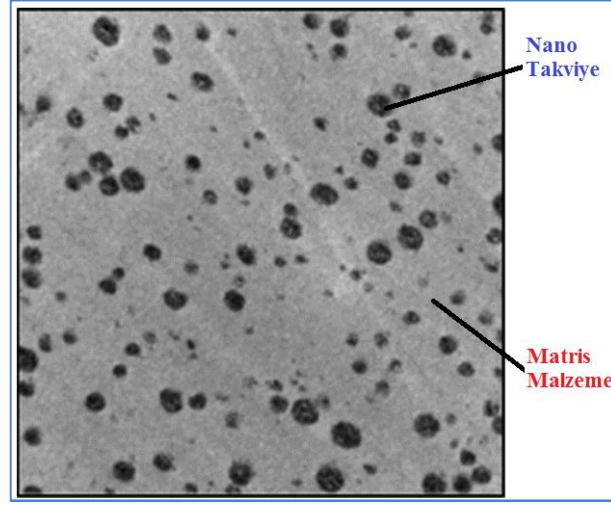
Karbon-karbon kompozitler roket başlıklarında, ekstrüzyon nozullarında, fren disklerinde, uzay araçlarının kanatlarında kullanılmaktadır. İçten yanmalı motorların pistonlarında da kullanılmaya başlanmıştır. Pistonlarda kullanımıyla birlikte, sürekli hareket eden kütle azalmıştır. Ayrıca piston daha yüksek sıcaklıkta çalışabildiği için motorun verimi de artmıştır. Bunun yanında termal genleşmeleri çok düşük olduğu için, çok daha düşük piston-silindir toleranslarında çalışılabilmektedir (Mallick 1997).

Gaz veya sıvı haldeki karbonun, karbon fiberlerin arasındaki boşluğa emdirilmesi ile üretilir. Karbon fiberlerinin gaz fazı ile doldurulması yöntemi ile yapılan üretimlerde ince cidarlı ürünler üretilmektedir. Bu yöntemle birkaç cm kalınlığa çıkılabilmektedir. Kalın parçaların gerekli olduğu durumlarda sıvı karbon ile doldurma yapılmaktadır. Karbon-karbon kompozitler az sayıda kullanılsalar da uygulama alanlarına önemli avantajlar sağlamaktadırlar ve çok pahalı malzemelerdirler (Bektaş 2011).

2.1.4.5 Nano Kompozitler

Nano kompozitlerde boyutları 0,1 mikronun altında olan parçacıklar kullanılır. Bir matris içerisinde kullanılan parçacıkların boyutları nanometre mertebelerinde ise bu tür kompozitlere nano kompozitler denir. Malzemeye eklenen bu nano parçacıklar malzemenin elastiklik modülünü, aşınma dayanımını, ısı direncini arttırmakta, gaz penetrasyonunu ve yanıcılığını azaltmaktadır (Bektaş

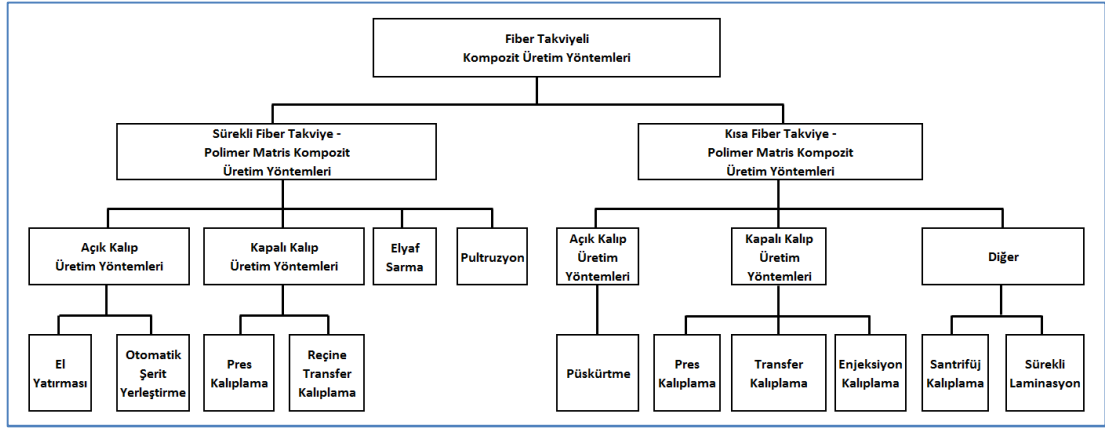
2011). Şekil 2.15'te nano takviyenin kullanıldığı bir nano kompozit resmi görülmektedir.



Şekil 2.15: Nano kompozitler (Xu ve diğ. 2014)

2.1.5 Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Fiber takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri; el yatırması, püskürtme, pres kalıplama, takviyeli termoplastik levha kalıplama, reçine transfer kalıplama, pultrüzyon, elyaf sarma, otomatik şerit yerleştirme, santrifüj kalıplama, devamlı levha, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, rotasyonel kalıplama, vakum kalıplama, basınçlı torba kalıplama, otoklav gibi çok çeşitlilik arz etmektedir. Şekil 2.16'da, fiber takviyeli üretim yöntemlerinin sınıflandırılması görülmektedir (Mallick 2008), (Bektaş 2011), (Mallick 1997), (Matthews ve Rawlings 1999).



Şekil 2.16: Fiber takviyeli kompozit üretim yöntemleri

Yaygın olarak kullanılan üretim yöntemleri aşağıda anlatılmıştır.

2.1.5.1 Prepreg Elle Yatırma Yöntemi

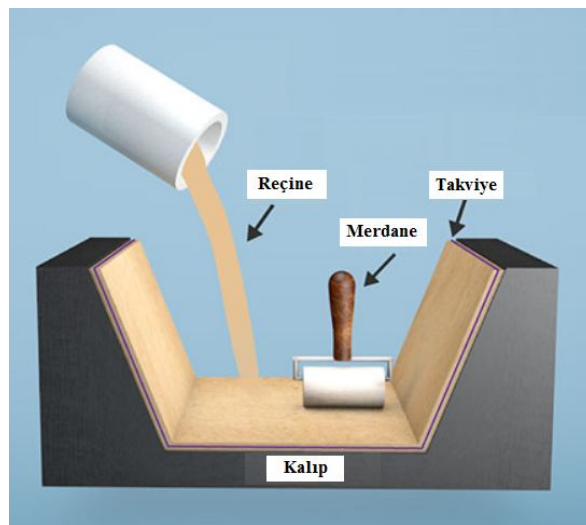
Elle yatırma yöntemi iki ana gruba ayrılmaktadır, bunlar; ıslak elle yatırma ve prepreg elle yatırmadır. Prepreg elle yatırma yöntemi uçak-uzay sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Otoklav yöntemi ya da vakum poşeti yöntemi olarak da anılmaktadır. Yüksek fiber hacim oranına sahip kompleks şekiller bu yöntemle üretilebilmektedir. Prepreg elle yatırma; açık kalıplı bir üretim yöntemidir ve üretim adeti (kapasitesi) düşüktür. Bu yöntemde prepregler kesilir, kalıbın üzerine istenilen oryantasyonda dizilir ve vakum poşeti ile kapatılır. Poşete vakum uygulandıktan sonra kalıp fırına ya da otoklava yerleştirilir ve kompozitin kurlenmesi için ısı ve basınç uygulanır. Prepreg elle yatırma üretim yöntemi işçiliğin çok yüksek olduğu bir yöntemdir. İşçilik maliyetleri elyaf sarma, pultruzyon gibi verimliliği yüksek üretim yöntemlerine göre 50-100 kat daha yüksektir. İlk yatırım maliyeti düşük olduğu için düşük adetli üretimlerde veya prototip üretimlerinde diğer yöntemlere göre uygundur (Mazumdar 2002). Şekil 2.17’de prepreg elle yatırma yöntemi görülebilir.



Şekil 2.17: Prepreg elle yatırma yöntemi (Aeroworks 2010)

2.1.5.2 Islak Elle Yatırma Yöntemi

Kompozit malzemelerin yeni kullanılmaya başlandığı yıllarda ıslak elle yatırma yöntemi kompozit üretiminde en öne çıkan yöntem olmuştur. Hala denizcilik endüstrisinde ve prototip parça üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. İşçilik yoğun bir üretim yöntemidir ve açık kalıp yapısı nedeniyle stiren emisyonu riskleri içermektedir. Bu yöntemde sıvı reçine kalıba sürülür ve takviye üzerine yerleştirilir. Hareketli merdane, takviye üzerine sürülerek reçinenin fibere nüfuz etmesi sağlanır. İstenilen kalınlığa ulaşılan kadar her katmana bu şekilde uygulama devam ettirilir. Uygulaması nispeten kolay bir üretim yöntemidir (Mazumdar 2002). Şekil 2.18'de ıslak elle yatırma üretim yöntemi görülebilir.



Şekil 2.18: Islak elle yatırma yöntemi (Masterbond 2017)

2.1.5.3 Püskürtme Yöntemi

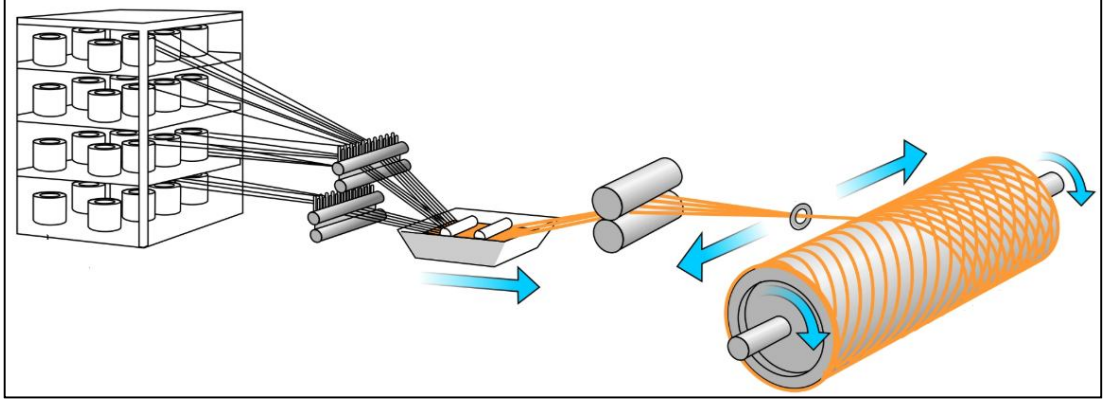
Püskürtme yöntemi ıslak elle yatırma yöntemine benzer bir yöntemdir fakat takviye ve reçinenin yüzeye uygulanma şekli farklıdır. Islak elle yatırma yöntemi, manuel olarak kat kat uygulandığı için işçilik yoğun bir yöntemdir. Püskürtme yönteminde reçine ve takviye yüzeye sprej tabancası yardımıyla 450-800 kg/saat kapasite aralığında püskürtülür. Bu yöntemde sprej tabancası, doğranmış fiber takviyeleri ve reçineyi yüzeye tabaka halinde yapıştırmaya yarar. Tabanca, simültane olarak akış halindeki fiberleri önceden belirlenmiş bir boyda (10-40 mm arası) keserek bir reçine karışımının içinden geçirerek yüzeye uygular. Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminden çok daha hızlıdır ve ucuzdur (Mazumdar 2002). Şekil 2.19'da püskürtme yöntemi görülebilir.



Şekil 2.19: Püskürtme yöntemi (Lamplas 2018)

2.1.5.4 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma, reçine emprenye edilmiş fiberlerin dönen bir mandrel üzerine, istenilen açıda serilerek sarılması yöntemidir. Yöntem, tüp ve basınçlı kap benzeri silindirik şeklindeki formların üretimi için uygundur. Elyaf sarma üretim yöntemi otomasyona uygundur ve adetli parçalar bu yöntemle makul maliyetlere üretilebilmektedir. Silindirik olmayan parçaların üretiminde bu yöntem kısıtlı kalmaktadır (Mazumdar 2002). Şekil 2.20'de elyaf sarma yöntemi görülebilir.

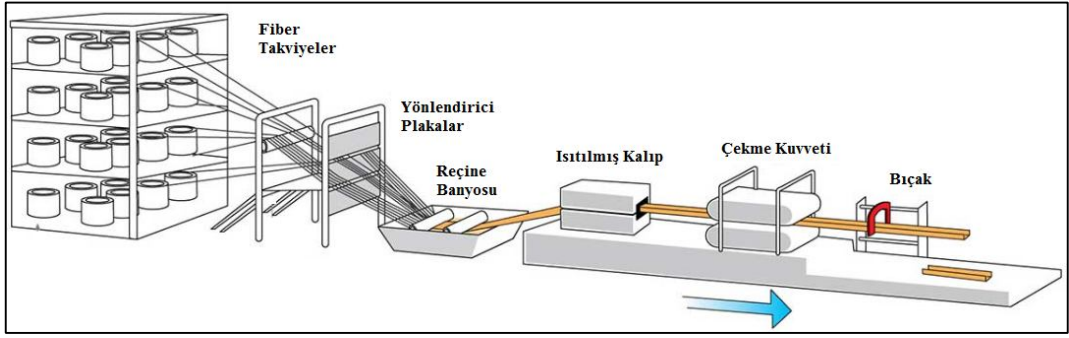


Şekil 2.20: Elyaf sarma yöntemi (Nuplex 2013)

2.1.5.5 Pultrüzyon

Pultrüzyon, kompozit malzeme üretim teknikleri arasında önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemle profil geometrisinde ve malzeme çeşitliliğinde geniş bir yelpazede kompozit üretimi yapılabilmektedir. Pultrüzyon prosesi, takviye fiberlerinin organize bir şekilde bir araya getirilerek reçine emprenyeme bölümüne sokulması ve akışkan reçine ile doymuş hale gelmesi ile başlamaktadır. Bu yöntem progresif, yani devamlı bir üretim akışı halindedir. Fiber takviyelerin emprenyelenip doymuş hale getirilmesinin ardından fazla reçine sıyırılır ve kompozit malzeme ön form verilmiş boyutlara getirilir. Bu ön şekil verme adımından sonra malzeme pultrüzyon kalıbından geçirilerek nihai boyuta getirilir. Kalıp yüksek sıcaklıktadır ve malzeme geçişi esnasında reçinenin kurlenmesini sağlar (Mallick 1997).

Pultrüzyon düşük maliyetli ve yüksek verimli bir üretim çeşitidir. Metal ekstrüzyon üretim yönteminin kompozit üretimine adapte edilmiş hali denilebilir (Mazumdar 2002). Şekil 2.21’de pultrüzyon üretim yönteminin şematize edilmiş hali görülebilir.

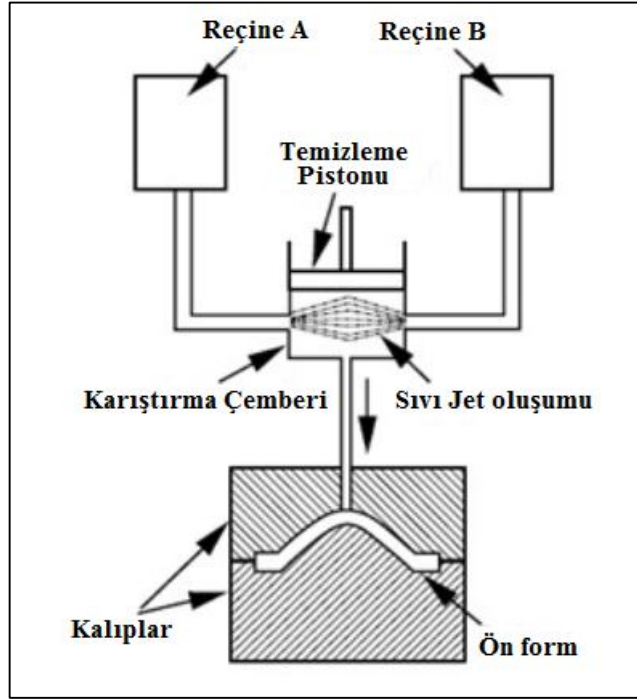


Şekil 2.21: Pultrüzyon üretim yöntemi (Fiberfence 2018)

2.1.5.6 Yapısal Reaksiyon Enjeksiyon Kalıplama

Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama, kapalı kalıplı kompozit üretim yöntemlerinden birisidir. Bu üretim yönteminde iki reçine karıştırma çemberinde, çok yüksek hızda, enjeksiyondan hemen önce karıştırılırlar. Reçineler, 100 ila 200 m/s hızda akarak karıştırma çemberine girer. Karışma esnasında basınç 10 ila 40 MPa'a çıkar. Reçine kalıba yaklaşık 1 MPa'a düşürülerek enjekte edilir. Bunun amacı, fiber takviyelerin deformasyonunu engellemektir. Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama yönteminde kullanılan reçinenin viskozitesinin çok düşük olması gerekir (Mazumdar 2002).

Bu yöntemle düşük maliyetli, otomasyona uygun yüksek verimli, kompleks geometriye sahip parçalar üretilebilir. Bu yöntem, otomotiv endüstrisinde kullanılan parçaların üretiminde yaygın olarak tercih edilir. 1-5 dakika aralığındaki çevrim sürelerinde parça üretilebilir (Mallick 1997). Şekil 2.22'de yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama yöntemi görülebilir.

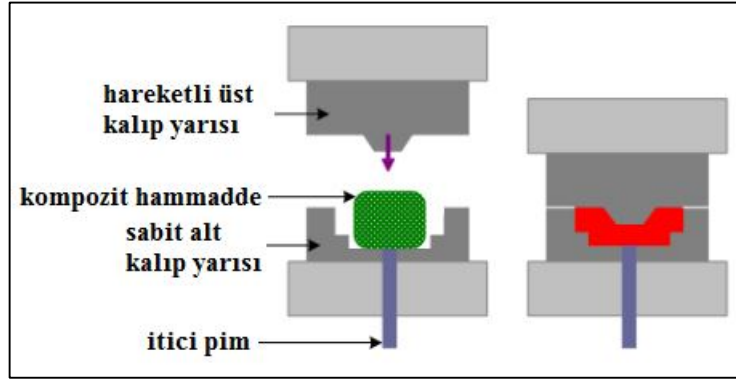


Şekil 2.22: Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama (Mazumdar 2002)

2.1.5.7 Pres Kalıplama

Termoset ve termoplastik reçineler sıcak pres kalıbında preslendiklerinde yumuşayıp akarlar. Termosetler sıcaklıkla kürlenip sertleşerek, kalıp sıcakken de kalıptan çıkarılabilmektedirler. Termoplastiklerde kalıp soğutulmalı, reçinenin soğuması beklenmeli ve kalıptan parça soğuduktan sonra çıkarılmalıdır (Mallick 1997).

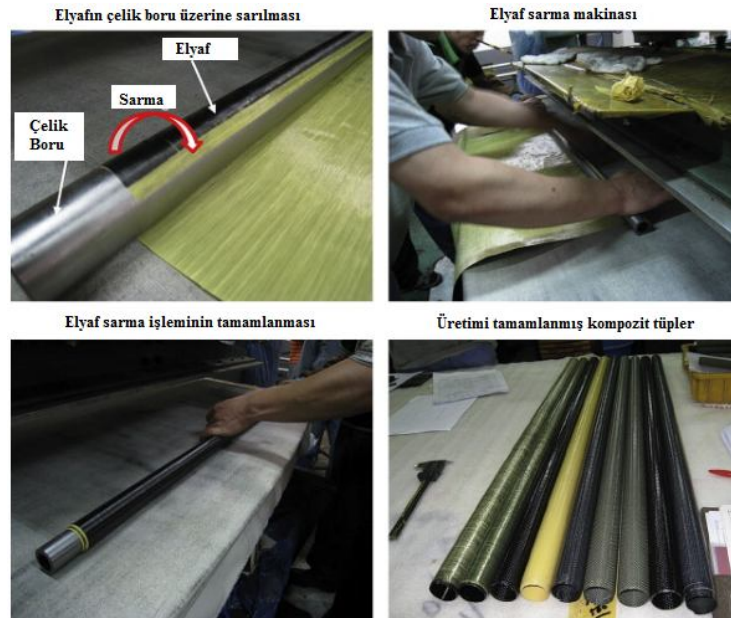
Pres kalıplama üretim yöntemi, yüksek üretim verimliliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde çok yaygın kullanılmaktadır. Bu yöntem geniş otomotiv panellerinin kalıplanmasında kullanılmaktadır. Levha pres kalıplama bileşimleri (SMC) ve hamur pres kalıplama bileşimleri (BMC) en yaygın pres kalıplama hammaddeleridir (Mazumdar 2002). Şekil 2.23’de pres kalıplama üretim yöntemi görülebilir.



Şekil 2.23: Pres kalıplama (Substech 2014)

2.1.5.8 Elyaf Sarma Yöntemi

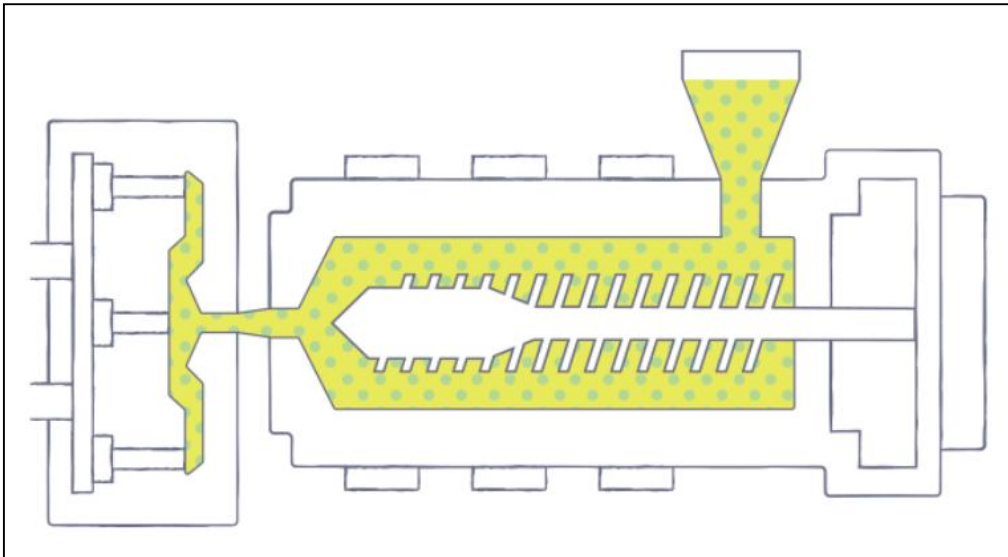
Elyaf sarma yöntemi, prepreg elle yatırma yönteminin benzeridir fakat buradaki fark kalıp her zaman silindirik veya koniktir. Bu yöntem düşük ilk yatırım maliyeti gerektirir ve tüp şeklindeki malzemelerin yüksek adetli üretimlerine uygundur. Kompozit malzemedan olan golf sopaları, bisiklet karkasları, oltalar bu yöntemle üretilir (Mazumdar 2002). Şekil 2.24’te elyaf sarma yöntemi görülebilir.



Şekil 2.24: Elyaf sarma üretim adımları (Kim ve diğ. 2011)

2.1.5.9 Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplama; termoplastik ve termoset malzemelerin üretiminde yoğun olarak kullanılan bir imalat yöntemi olsa da, kompozit malzeme endüstrisinde de tercih edilen bir yöntem olarak kendini göstermektedir. Bu yöntemde, matris ve takviye malzeme karışımı; ısıtılmış kalıp yarımının oluşturduğu kalıp boşluğuna enjekte edilmektedir. Malzemenin kurlenmesinin ardından kalıp açılır ve şekillendirilmiş parça kalıptan uzaklaştırılır. Bu yöntemde çevrim süresi 30-60sn arasında sürmektedir. Diğer üretim yöntemleri ile mukayese edildiğinde en hızlı kompozit üretim şeklidir ve verim yüksektir (Mazumdar 2002). Şekil 2.25'te enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kompozit üretimi şematik resmi görülebilir.



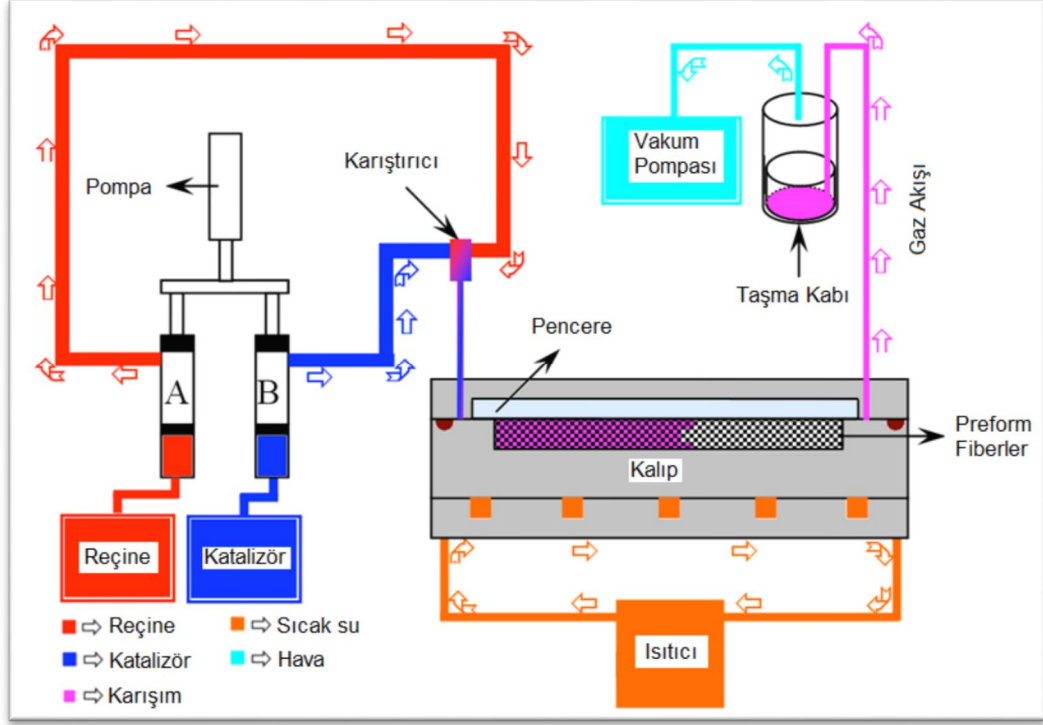
Şekil 2.25: Plastik enjeksiyon yöntemi (Discover Composites 2015)

2.1.5.10 Reçine Transfer Kalıplama

Proses temel olarak kompozit takviyesi olan, ön şekil verilmiş fiberin kalıp yuvasına yerleştirilmesi, kalıbın kapanması, reçinenin kalıba enjekte edilmesi ve reçinenin kurlenmeye bırakılması adımlarını içerir.

Reçine transfer kalıplama yönteminde parçanın son şekli kapalı kalıplarla verilmektedir. Kalıp, ön şekil verilmiş takviye fiberler ile doldurulur ve kalıp kapanır. Genel olarak reçine diye tanımlanan matris malzeme kalıba enjekte edilir ve

fibere emdirilir. Parça, tamamen k rlenip kalıptan çıkarılmaya hazır hale gelene kadar, kalıpta sabit sıcaklık/çevrim değerlerinde tutulur. Şekil 2.26'da RTM yönteminin Şematik süreci ve sonrasında yapılan denemede kullanılan ekipmanlar görülmektedir (Keulen 2007).



Şekil 2.26: Reçine Transfer Kalıplama Prosesi Şeması (Keulen 2007).

Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM) ve benzer prosese sahip yöntemler akışkan kompozit kalıplama (liquid composite molding) olarak adlandırılan gruba girmektedir. Bu yöntemler, sıvı reçinenin  nŐekil verilmiş hareketsiz fiberlere enjekte edilmesi açısından akışkan kompozit kalıplama yöntemi ile benzer üretim prensibine sahiptir. Enjeksiyon işlemi basınç farkı yaratılarak yapılmaktadır. Basınç farkının yaratılması, kalıplama Şekli, enjekte edilen reçine tipi prosesin uygulama Őeklini tanımlamaktadır (Keulen 2007).

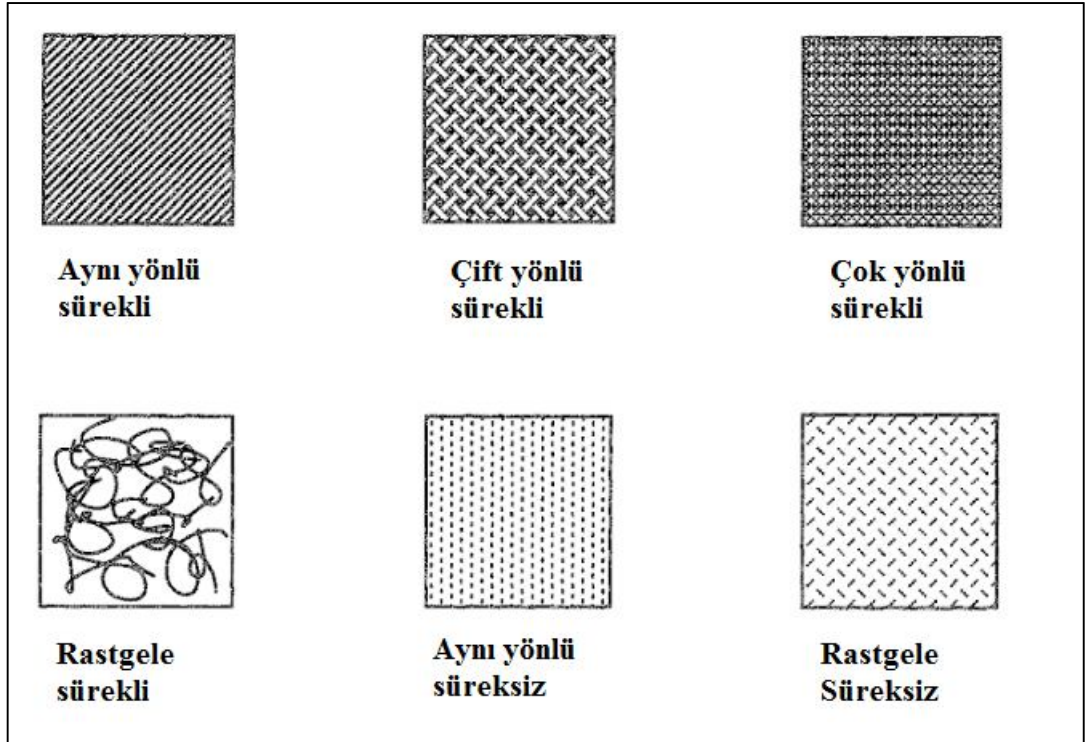
Üretim yönteminde uygulanan farklılıklar prosesi çeşitlendirmektedir. Temel yöntem yani reçine transfer kalıplama; uygulanan yöntemdeki farklılıklara bağlı olarak 4 gruba ayrılmaktadır. Bunlar; Yapısal reaksiyonlu enjeksiyon kalıplama (SRIM), vakum destekli reçine enjeksiyon (VARI), vakum karıştırma ve enjeksiyon sıkıştırma kalıplama yöntemleridir (Keulen 2007).

2.2 Doğal Fiberler

Fiberler oluşturdukları kompozit malzemede temel yük taşıma elemanı olarak görev alırlar. Fiberin matris içindeki etkinliği; türüne, uzunluğuna, hacim oranına ve oryantasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Fiber seçimi, kompozit malzeme karakterinde çok önemli bir yer tutmaktadır ve fiber seçimine göre aşağıdaki özellikler değişmektedir;

- Yoğunluk
- Çekme dayanımı ve modülü
- Basma dayanımı ve modülü
- Kırılma ve yorulma dayanımı
- Darbe dayanımı
- Elektriksel ve termal özellikler
- Maliyet (Sgriccia ve diğ. 2008)

Fiberlerin oryantasyonu, üretim şekline göre; aynı yönlü, çift yönlü, çok yönlü veya rastgele dizilmiş olabilir (Şekil 2.27).



Şekil 2.27: İki boyuta fiberlerin oryantasyonu (Sgriccia ve diğ. 2008)

Fiber türleri, doğal fiberler, sentetik organik fiberler, sentetik inorganik fiberler olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Doğal fiberler; pamuk, ipek, yün benzeri, bitkisel veya hayvansal temele dayanan malzemelerdir. Sentetik organik fiberler grubunu; en geniş kullanım alanına sahip aramid ve polietilen oluşturmaktadır. Sentetik inorganik fiberler grubunda en geniş kullanıma sahip örnekler ise ; cam elyaf, alumina, boron, karbon ve silikondur (Matthews ve Rawlings 1999).

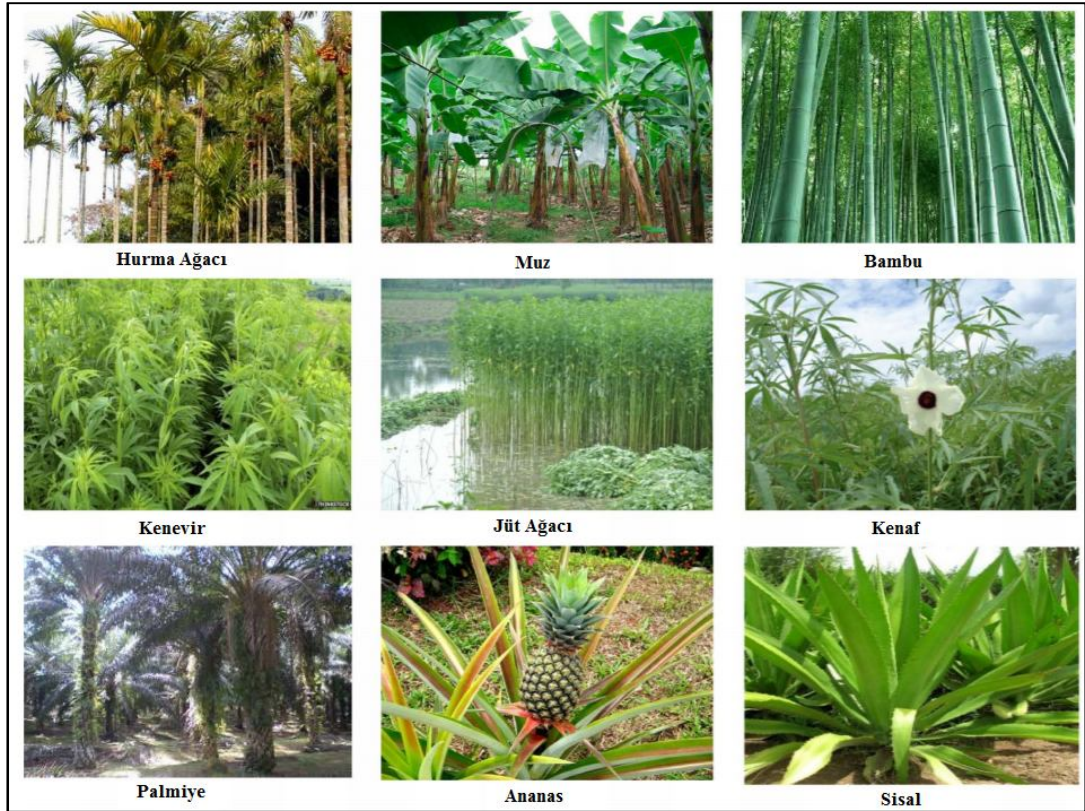
Doğal fiberler, bitkilerden elde edilen fibril yapı, fotosentez sonucu bitkinin gelişimi ile elde edilen malzemelerdir. Bu fiberler, biyokütle, fotokütle, fosentezik fiber olarak da adlandırılabilir. Doğal fiberlerin kullanımı milattan önce 8.000 yıllarına kadar dayanmaktadır. O yıllarda keten ve kenevir kumaşların kullanıldığına dair bulgular vardır. 21. Yüzyılın başlarında, yenilenebilir olmayan kaynakların sınırlı ve tükenbilir olduğu, bunun yerine yenilenebilir kaynaklara yönelmenin gerektiği bilinci oluşmaya başlamıştır (Rowell 2008).

Doğal fiberlerin elde edildiği bitkiler kullanımlarına göre; birincil ve ikincil olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Birincil bitkiler, fiberleri için yetiştirilen bitkilerdir. İkincil bitkiler ise, kullanılırken fiberlerin yan ürün olarak ortaya çıktığı bitkilerdir. Jüt, kenevir, kenaf, sisal ve pamuk birincil bitki örnekleridir. Palmiye, agave, mısır sapları ve hindistan cevizi, ikincil bitki örnekleridir. Tablo 2.1’de günümüzde, dünyada üretilen fiber kaynağı miktarları görülebilir (Rowell 2008).

Tablo 2.1: Dünyadaki fiber kaynakları miktarı (Rowell 2008)

Fiber Kaynağı	Dünyada miktar (kuru ağırlık olarak ton)
odun	1.750.000.000
samansız bitkiler (buğday, pirinç, yulaf, arpa, keten, çim)	1.450.000.000
bitki sapları (mısır, çalı süpürgesi, pamuk)	970.000.000
şeker kamışı posası	75.000.000
saz	30.000.000
bambu	30.000.000
pamuk kozası	15.000.000
kabuk fiberleri (jüt, kenaf, kendir)	8.000.000
papirüs	5.000.000
ana gövde fiberleri (jüt, kenaf, kendir)	2.900.000
pamuk çekirdeği elyafı	1.000.000
halfa otu (esparto grass)	500.000
yaprak (sisal, abaka)	480.000

Son yıllarda yenilenebilir kaynaklardan üretilen doğal fiberlerin plastik matrislerde takviye olarak kullanılması fazlaca ilgi duyulan bir alan haline gelmiştir. Bu fiberlerin orijinleri bitkilerdir. Bitkilerden elde edilen fiberlerin, cam elyaf ve karbon elyaf gibi fiberlere göre avantajları; düşük maliyet, düşük yoğunluk, kabul edilebilir özgül dayanım, yüksek tokluk, iyi ısı özellikler, daha az deri ve solunum yolu iritasyonu ve doğada çözülebilir olmaları olarak özetlenebilir. Doğal fiberler, cam elyafa göre çok iyi ses absorbe etme özelliğine ve düşük özgül ağırlığa sahiptir. Bu durum onları ulaşım (otomotiv, uçak-uzay) alanında çok dikkat çekici kılmaktadır (Agarwal ve diğ. 2006). Şekil 2.28’de endüstriyel olarak kullanılan çeşitli fiber kaynağı bitkiler görülebilir.



Şekil 2.28: Doğal fiber bitkileri (Sanjay ve diğ. 2016)

Doğal fiberlerin dezavantajları; su ile reaksiyona girmeleri, sınırlı bir uzunluğa sahip olmaları, fiber çaplarının büyük olması ve değişken boyutlarda bulunmalarıdır. Bitkisel fiberler suyla çok hızlı reaksiyona girerler ve bu durum sonuç olarak nihai malzemenin mekanik özelliklerine olumsuz olarak yansır. Kimyasal işlemlerle fiberlerin hidrofilik özellikleri azaltılabilir fakat bu işlem maliyet artışını beraberinde getirir. Bitkisel fiberlerin boylarının kısa ve çaplarının

büyük olması, takviye olarak bazı durumlarda yetersiz kalmalarına sebep olmaktadır. Bitki fiberlerinin doğal olmaları, sürekli aynı özellikte hammadde bulmayı da zorlaştırabilmektedir ve bu durum nihai üründe malzeme özelliklerinin değişken olması riskini de beraberinde getirmektedir (Agarwal ve diğ. 2006).

Doğal fiberlerin sentetik fiberlerle karşılaştırması Tablo 2.2’de görülebilir.

Tablo 2.2: Fiberlerin karşılaştırması (Bavan ve Kumar 2010)

Bakış Açısı	Özellik	Doğal Fiberler	Sentetik Fiberler
Teknik	Mekanik Özellikler	Orta	Yüksek
	Nem Hassasiyeti	Yüksek	Düşük
	Termal Hassasiyet	Yüksek	Düşük
Çevresel	Kaynak	Sınırlı	Sınırlı
	Üretim	Düşük	Yüksek
	Geri Dönüşüm	İyi	Orta

Doğal fiberlerin kullanıldığı sektörler şöyle sıralanabilir; kompozitler, otomobiller, tekstil, oluklu ve karton ambalaj, kalıplanmış selülozik ürünler, emici maddeler (sorbent), filtreler (Matthews ve Rawlings 1999).

Doğal fiberler altı gruba ayrılmaktadır, bunlar;

- Kabuk fiberleri (jüt, keten, kenevir, ramie, kenaf)
- Yaprak fiberleri (abaka, sisal, ananas)
- Tohum fiberleri (hindistan cevizi, pamuk)
- Ana gövde fiberleri (kenaf, kendir, hint keneviri)
- Kamış fiberleri (buğday, mısır ve pirinç)
- Diğer tüm fiberler (odun ve kök fiberleri) (Faruk ve diğ. 2012)

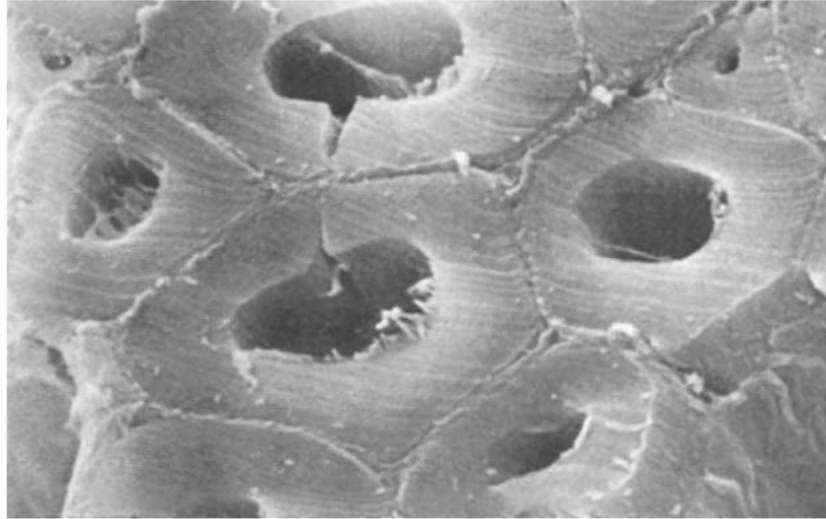
2.2.1 Kabuk Fiberleri

Genel kabul görmüş doğal fiber tasnif yöntemine göre, fiberin bitkide bulunduğu konuma bağlı olarak; bitkinin gövdesinin dışında bulunan fiberlere kabuk fiberleri denir. Kabuk fiberlerinde bir tek lif, birkaç bitki hücresinden oluşmuş bir

demettir. Bu yüzden kabuk fiberlerine çok hücreli elyaf da denir. Bu gruba örnek olarak; keten, kenevir, jüt ve rami verilebilir (Lewin 2006).

Jüt bitkisi tekstil alanında diğer tüm kabuk fiberlerinden en yoğun kullanılanıdır. Ağaçların boyları yaklaşık 2,5-3,5 metre civarındadır. Pamuktan sonra dünyada en fazla üretimi yapılan bitkidir. Tropik iklimde yetişir, anavatanı Hindistandır. Dünya üretiminin yaklaşık %80'i Hindistan, Bangladeş ve Pakistan'da yetişir (Lewin 2006).

Jütün gövdesinde lif hücreleri demetler halinde bulunur. Enine kesiti incelendiğinde beşgen, altıgen formunda köşeli hücreler görülebilir (Başer 2002). Şekil 2.29'da jüt bitkisinin fiberleri elektron mikroskobu altındaki görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.29: Jüt fiberlerinin elektrok mikroskobunda x7600 görüntüsü (Lewin 2006)

2.2.1.1 Palmiye Fiberleri

Tez projesi kapsamında kullanılan fiberlerden biri palmiye fiberleridir. Palmiye fiberleri, kabuk fiberleri grubuna dahildir. Bu fiberleri kağıt elyafına dönüştürmek için kullanılan yöntemlerden yaygın olanı kraft (sülfat) yöntemidir. Bu yöntemde, NaOH, Na₂S and Na₂CO₃ kimyasalları, lignini eritmek, sıcaklık ve basınç yardımı ile doğal fiberleri birbirinden ayırmak için kullanılırlar. Tablo 2.3'de, kraft

yöntemi ile fiber hammadde hazırlamak için kullanılan “beyaz likör” diye tabir edilen çözelti ve konsantrasyonlar görülebilir.

Tablo 2.3: Beyaz likör çözelti ve konsantrasyon tablosu

Bileşik	Konsantrasyon (g/l)	
	NaOH olarak	Bileşik olarak
NaOH	90,0	90
Na ₂ S	40	39
Na ₂ CO ₃	19,8	26,2
Na ₂ SO ₄	4,5	8
Na ₂ S ₂ O ₃	2	4
Na ₂ SO ₃	0,6	0,9
Diğer bileşikler	-	2,5
Toplam alkali (TA)	156,9	170,6
Toplam sülfür (TS)	47,1	19,7
Efektif Alkali (EA)	110	-
Aktif Alkali (AA)	130	-

Elde edilen fiberler, tel örgüler ve yıkama üniteleri yardımıyla, kimyasallardan ve pişmemiş malzemelerden temizlenir. Ağartılmış fiber hammadde elde etmek için, liflerin yüzeyindeki artık lignin, klor dioksit, aktif klor, hidrojen peroksit, ozon ve perasetik asit ile uzaklaştırılır (Suciu 2013).

Gelecekte kullanım ihtiyacının artacağı düşünülen doğal fiber hammadde kaynakları ve sürdürülebilirlik üzerine yaşanan tartışmalar, odun dışı fiber kaynaklarını daha önemli hale getirmektedir. Palmiye ağacı (*Elaeis guineensis*), fiber üretimi hammaddesi olarak büyük potansiyel gösteren bir bitki türüdür. Palmiye biyokütlesi, palmiye ağacından yağ üretildikten sonra posa diye tabir edilen kısımları fiber üretimi için kullanılır. Palmiye bitkisinin atığı ve fiber haline gelmiş palmiye hammaddesi Şekil 2.30’da görülmektedir.



Şekil 2.30: Palmiye bitkisi atığı

Palmiye ağacından kraft yöntemiyle fiber hammadde üretildiğinde verim %45 olmaktadır (Nasrullah ve Daud 2013).

2.2.2 Yaprak Fiberleri

Bitkinin, konum olarak, yapraklarında bulunan ve bu yaprakların işlenmesi ile elde edilen fiberlere; yaprak fiberleri denir. Bunlar genellikle; sisal, abaka, ananas gibi geniş yapraklı tropikal bitkilerden elde edilir (Başer 2002).

Sisal fiberleri en yaygın kullanılan yaprak fiberlerindedir. Lif uzunluğu 0,6 ile 1,5 mm arasında değişmektedir. Çekme dayanımı, elyaf boyunca farklılık gösterebilmektedir. Sisal takviyeli kompozitler arabaların iç mekanlarında kullanılmaya başlanmıştır (Lampke ve diğ. 2005).

Ananas yaprakları, ananas bitkisinde yer alan, ortalama 90 cm uzunluğunda, 5 ile 7,5 cm eninde, kılıç görünümünde, koyu yeşil renkli yapraklardır. Uzun ve dayanıklı liflere sahiptir. Otomotiv endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır (Lampke ve diğ. 2005).

2.2.3 Tohum Fiberleri

Bu lifler bitki tohumunun üzerinde bulunur ve tek bir lifçik tek bir bitki hücresinden ibarettir. Bu nedenle “tek hücreli elyaf” olarak da isimlendirilirler.

Tohum fiberlerine örnek olarak; hindistan cevizi fiberleri, pamuk fiberleri ve kapok verilebilir. Palmiye meyvesi fiberleri de bu gruba girmektedir (Başer 2002).

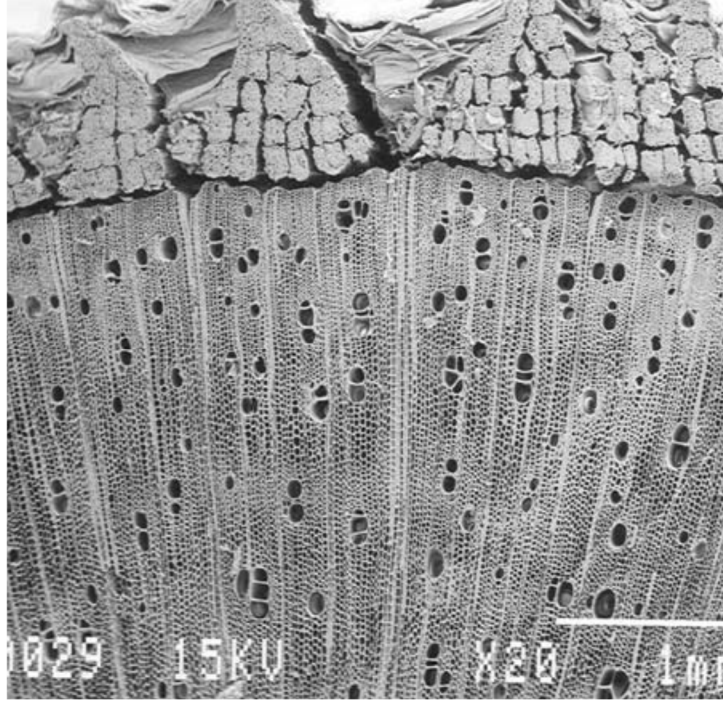
Pamuk, tohumu çekirdeğinin kabuğundan dışarı taşmış çok hücreli fibril yapıda bir bitkidir. Pamuk fiberlerinin uzunlukları 25-60 mm aralığındadır. En eski pamuk tohumu çeşitleri, milattan önce 5800 yıllarına aittir ve Meksika'da bulunmuştur (Lampke ve diğ. 2005).

Palmiye meyvesi, palmiye yağı, ilaç sanayi, gübre endüstrisi, gıda gibi bir çok alanda kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak her yıl çok yüklü miktarda palmiye meyvesi fiberi yan ürün olarak çıkmaktadır. Palmiye meyvası posaları, kullanılmamaları durumunda çevreye çok fazla zarar vermektedirler. Bu nedenle, farklı kullanım alanlarının geliştirilmesi için önemli sayıda akademik çalışma gerçekleştirilmektedir (Lampke ve diğ. 2005).

Palmiye fiberlerinin ortalama uzunluğu 4 mm ve çapları ortalama 30 μm 'dir. Kaba taneli bir fiberdir, sert ve gevrek. Ambalaj sanayinde istenen hacimlilik özelliği düşüktür (Rowell 2008).

2.2.4 Ana Gövde Fiberleri

Bitkinin kabuklarının, ana gövdeden ayrılmasıyla elde edilen fiber türüne; ana gövde fiberleri denir. Kenaf, kendir ve hint keneviri bunlara örnektir (Faruk ve diğ. 2012). Ana gövde fiberlerinin kabuk fiberlerinden farkı Şekil 2.31'de görülebilir.



Şekil 2.31: Kabuk fiberleri ve ana gövde fiberleri (Mohanty ve diğ. 2002)

Kenaf, hibiscus ailesine ait bir bitkidir ve 300'e yakın çeşiti vardır. Kompozit malzeme olarak uygun bir takviye olması nedeniyle yetiştirilmesi yaygınlaşmaktadır (Faruk ve diğ. 2012).

Kendir ve kenevir de ana gövdeden elde edilen, mukavetmeleri yüksek ve kompozit malzeme üretiminde kullanımı yaygınlaşmaya başlayan diğer doğal fiber kaynaklarıdır (Lampke ve diğ. 2005).

2.2.4.1 Kayın Fiberleri

Tez kapsamında kullanılan kayın fiberleri, ana gövde fiberleri grubuna dahildir. Kayından kağıt elyafı üretmek için yaygın olarak kullanılan yöntem, yarı kimyasal termo-mekanik kağıt hamuru üretim yöntemi olan; CTMP yöntemidir. CTMP yönteminde, Kraft yöntemine göre daha az kimyasal kullanılır ve fiberler mekanik liflendirme ile birbirinden ayrılır. Bunu sağlamak için basınçlı rafinör kullanılır. Bu yöntemde kullanılan kimyasal maddeler düşük oranda NaOH veya Na_2CO_3 'tür. Bu nedenle, CTMP verimi %88-96 arasındadır ancak elde edilen mukavemet özellikleri, kraft yönteminden daha düşüktür (Sixta ve Krottschek 2006).

Ülkemizde Doğu Karadeniz ve Doğu Anadolu bölgelerinde yetişen kayın ağacı fotoğrafı, Şekil 2.32’de görülebilir. CTMP yöntemiyle üretilmiş kayın ağacı fiberleri yine Şekil 2.32’de görülebilir.



Şekil 2.32: Kayın ağacı ve fiber hammaddesi

2.2.4.2 Okaliptus Fiberleri

Tez kapsamında kullanılan bir diğer doğal fiber, ana gövde fiberleri grubuna dahil olan okaliptus fiberidir. Bugün için kağıt üretiminde kullanılan liflerin çok büyük kısmı sülfat (kraft) yöntemi ile elde edilmekte olup bu yöntemde farklı hammaddeler önce belli boyutta yongaya dönüştürülmektedir. Hazırlanan bu yongalar NaOH ve Na₂S karışımından oluşan bir sulu çözelti içerisinde 1-2 saat süre ile 160-180°C’de reaksiyona sokulmaktadır. Süre sonunda hammadde olarak kullanılan yongalar life dönüşmekte olup kimyasal maddeler uzaklaştırılarak elemenden geçirilen lifler üretimde kullanılmaktadır. Aynı lifler beyazlatma işlemine tabi tutularak da farklı üretimde, örneğin temizlik kağıtları, yazı-baskı kağıtları üretiminde de kullanılabilir. Bu amaçla, sülfat pişirmesinden elde edilen ve kimyasallar ile pişmemiş kısımları uzaklaştırılan hamur ağırlıklı olarak klor içeren ClO₂, Cl₂ veya hipoklorit gibi maddelerle ağartma işlemine uğratılır. Böylece lif yapısındaki kalıntı lignin uzaklaştırılır. Bu çalışmada kullanılan okaliptus lifleri de çok kademeli ağartma işlemine uğratılan hamurdandır.

Okaliptus kraft hammadde hazırlama üretim yönteminde elde edilen verim yaklaşık %50’dir (Sixta ve Krottschek 2006). Yoğun olarak uzak doğuda yetişen fakat ülkemizde de yetişebilen okaliptus ağacı fotoğrafı, Şekil 2.33’de görülebilir. Ağartılmış kraft yöntemiyle üretilmiş plaka halindeki okaliptus kağıt elyafları yine Şekil 2.33’de görülebilir.



Şekil 2.33: Okaliptus ağacı ve fiber hammaddesi

2.2.5 Kamış Fiberleri

Buğday, mısır ve pirinç gibi otsu ve kamış formundaki fiberlere, kamış fiberleri demir (Faruk ve diğ. 2012).

Pirinç çeltiği, yüksek pirinç tüketim miktarı nedeniyle yüklü miktarda yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Yan ürün olmasından dolayı, katma değerli bir ürüne dönüştürülme çalışmaları günümüzde yaygın olarak devam etmektedir. Kompozit malzeme üretimi için polipropilen matris ile denemeler yapılmış ve umut vadeden sonuçlar alınmıştır (Faruk ve diğ. 2012).

Mısır kabuklarından elde edilen fiberler de kompozit malzeme üretiminde kullanılmaya çalışılmaktadır. Mısır fiberlerinin ortalama uzunlukları 1,5 mm'dir. Kopma dayanımları yüksektir fakat gevrek bir yapıdadırlar (Rowell 2008).

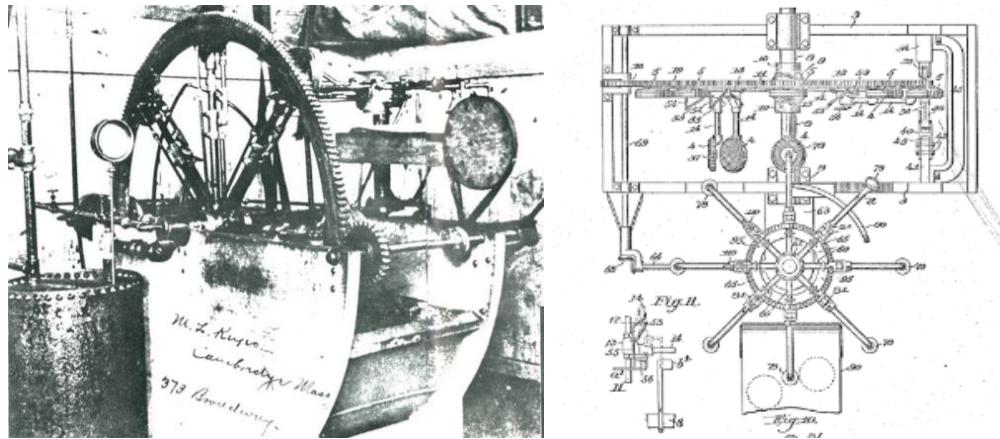
Saman, bilinen en eski kompozit malzeme bileşenlerinden birisidir. Milattan önce 5000-3300 yıllarında çamurdan yapılan kerpiç yapılarda kullanıldığı tespit edilmiştir. Odun türlerinden sonra dünyada en fazla bulunan doğal fiber kaynağıdır. Lif çapları 0,4-3,4 mm arasında değişmekle birlikte, ortalama 1,4 mm'dir. Saman fiberleri fazla miktarda silika içermektedir.

2.2.6 Diğer Tüm Fiberler

Yukarıdaki sınıflandırmaların dışında kalan tüm fiberler, diğer fiberler olarak adlandırılırlar. Kök fiberleri de bu grupta sınıflandırılmaktadır (Faruk ve diğ. 2012). Bu gruba giren odun ve odun kaynaklı lifler, dünyada en yaygın bulunan doğal fiber kaynaklarıdır.

2.3 Kalıplanmış Selülozik Ürün Üretim Yöntemi

Kalıplanmış selülozik ürün üretimi ilk olarak 1903 yılında Martin Keyes'in, hamur haline getirilmiş fiberlerin (fiber-su çözeltisi) kalıp ve vakum yardımıyla tabak şeklinde form verildiği, günde 50.000 tabak üretme kapasitesine sahip bir makine icat etmesiyle başlamıştır. Şekil 2.34'te bu makine ve bu makine için alınmış patent resmi görülebilir (Keyes 2012).

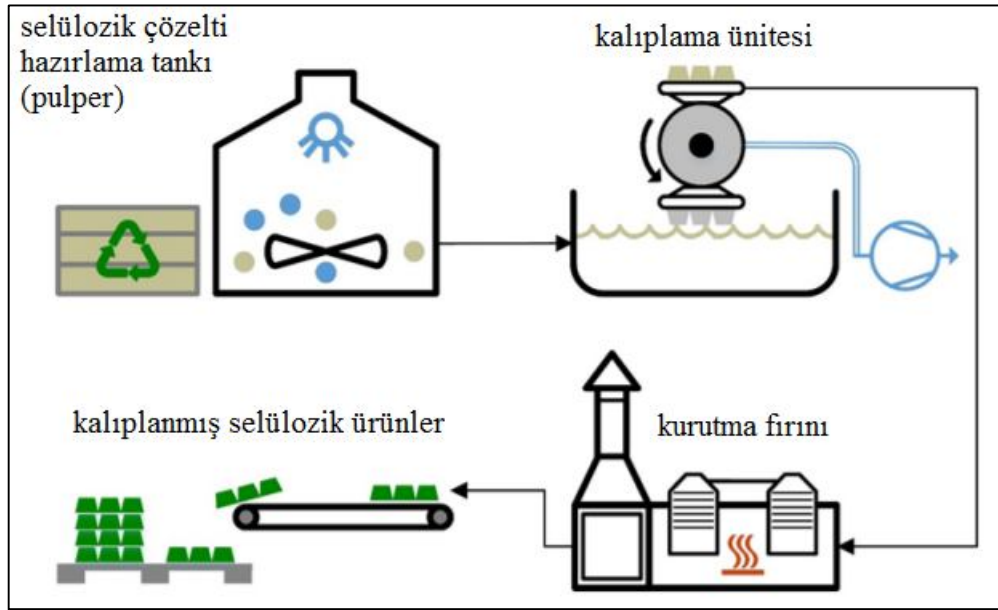


Şekil 2.34: İlk kalıplanmış selülozik ürün üretim makinesi (Keyes 2012)

Tabak üretimi ile 1903'te başlayan kalıplanmış selülozik ürün üretimi, 1920'li yıllarda yumurta ambalajı (yumurta viyölü) üretimi ile yaygınlaşmaya başlamıştır.

Kalıplanmış selülozik ürün üretim yöntemi, ilk önce pulper adı verilen karıştırıcıda doğal fiberlerin çözünmesi/ayrışması ile başlar. Su-fiber çözeltisi haline gelen fiberler kalıplama ünitesine nakledilir. Kalıplama ünitesinde su-fiber çözeltisine daldırılan kalıp vakum yardımı ile fiberleri üzerine çeker ve istenilen

form oluşturulur. Ardından form verilmiş fiberler kalıptan alınarak kurutulur ve istenilen form bu şekilde elde edilmiş olur. Bu üretim yöntemi ile 300.000 adet/gün'e yaklaşan hızlarda üretim yapmak mümkün olmaktadır. Proses seri üretime uygundur. Her ürün için kalıp imalatı gerektiğinden ilk yatırım maliyeti yüksektir. Bu yöntemle üretilen ürünlerin yoğunlukları 0,15-0,3 g/cm³ arasındadır. Bu da, kalıplanmış selülozik ürünleri, yüksek mukavemet gerektirmeyen parçalarda önemli bir ağırlık hafifletici olarak öne çıkarmaktadır. Şekil 2.35'de bu üretim prosesinin şematize edilmiş hali görülebilir.



Şekil 2.35: Kalıplanmış selülozik ürün üretim süreci (Didone ve diğ. 2017)

Günümüzde, bu üretim yöntemi ile en fazla yumurta ambalajları üretilse de yumurta ambalajı dışında kullanım alanları da giderek yaygınlaşmaktadır. Duvar kağıtlarından sandalyeye ve hatta deterjan şişelerine kadar çok çeşitli ürünler pazarda yerlerini almıştır.

Kalıplanmış selülozik ürün üretim prosesinin başlangıcı daha önce de bahsedildiği gibi, doğal fiberlerin su ve karıştırıcı ile çözelti haline getirilmesidir. Doğal fiberler pulper denen karıştırıcıda, suyun içinde karıştırıcı bıçaklar yardımı ile liflerine ayrılmaktadır. Şekil 2.36'da pulperde çözünen yani liflerine ayrılan fiberler görülmektedir.



Şekil 2.36: Pulperde çözünen (liflerine ayrılan) fiberler

Bu üretim yönteminde çözeltilinin içine dalan kalıp, pulperde liflerine ayrılan fiberleri, vakum yardımıyla üzerine çekmektedir. Çok sayıda delik içeren ve tel örgüyle kaplanmış kalıp, fiber kütesine form verirken su deliklerden vakum yoluyla ayrılmaktadır. Şekil 2.37’de, aynı yöntemle şekil verilmiş doğal fiberler görülmektedir.



Şekil 2.377: Kalıplanmış doğal fiberler (Bravo 2016)

Kalıplanmış selülozik ürün üretimi yöntemine örnek olarak Şekil 2.38’deki doğal fiberden oluşan kask görülebilir.



Şekil 2.38: Kalıpta form verilmiş doğal fiber malzemeden kask (Suciu 2013)

3. YÖNTEM

Doktora tezi kapsamında doğal fiber takviyeli kompozit numuneler üretilmiş ve bunların mekanik özellikleri incelenmiştir. Doğal fiber takviyeli kompozit üretirken; öncelikle doğal fiber numune üretim sisteminde, plaka şeklinde fiber esaslı takviyeler üretilmiştir. Ardından, tasarlanıp imal edilen RTM sisteminde, fiber plakalar, reçine enjeksiyonu ile kompozit haline getirilmiştir. Son olarak kompozit haline getirilen plakaların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Doktora tez projesinin uygulama kısmı 3 ana bölümde gruplanabilecek yöntemle gerçekleştirilmiştir, bunlar;

- Doğal fiber numune üretim istasyonunda fiber numunelerin üretilmesi
- RTM sistem tasarımı, imalatı ve fiber plakaların kompozite dönüştürülmesi
- Mekanik testler

3.1 Doğal Fiber Numune Üretim İstasyonunda Fiber Numunelerin Üretilmesi

Tez projesi kapsamında doğal fiber numuneler üretmek için kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yöntemi seçilmiştir. Bu sayede kalınlığı 3-4 mm'yi bulan doğal fiber plakalar üretilmiştir.

Deneylerde kullanılacak hammaddelerin bağ yapma yeteneklerini değerlendirmek için öncelikle kayın ağacı fiberleri, palmye fiberleri ve okaliptus fiberlerinden, daire şeklinde ince numuneler elde edilmiştir. Şekil 3.1'de, bu numuneler görülebilir.



Şekil 3.39: Kayın, palmye, okaliptus fiber numuneleri

Üretilen daire şeklinde 0,8mm kalınlığındaki daire numuneler incelenmiş ve fiberlerin bağ yapma kapasitelerinin, plaka şeklinde 3,5mm – 4mm kalınlığında numune üretimine uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

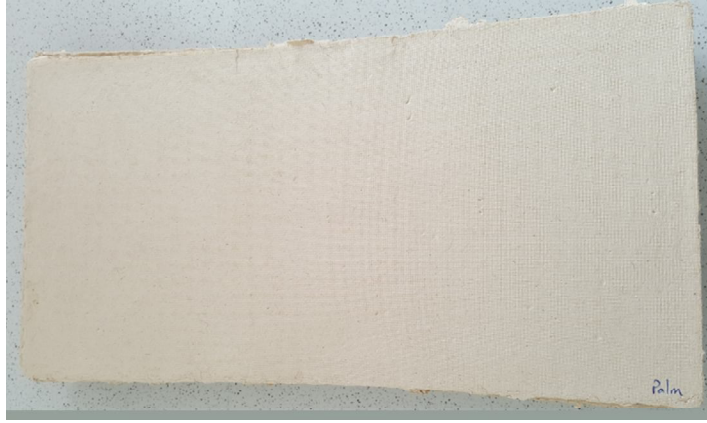
Doğal fiber numuneler, içinde karıştırıcısı bulunan bir kalıplanmış selülozik numune üretim sisteminde üretilmiştir. Bu sistemde, doğal fiberler bir karıştırıcı tankta su ile karıştırılarak çözdürülmüş ve su-fiber çözeltisi oluşturulmuştur. Karıştırıcı bıçakları hem fiberleri parçalamış, hem de çözeltiyi karıştırmıştır. Düz plaka şeklindeki kalıplarda, vakum yardımıyla bu elyaflar şekillendirilmiştir. Şekil 3.2’de doğal fiber numune üretmede kullanılan numune üretim sistemi görülmektedir.



Şekil 3.40: Doğal fiber üretim sistemi

Deneylerde kullanılan palmiye fiberleri, ağartılmamış kraft yöntemi ile üretilmiştir. Palmiye hammadeden üretilmiş fiberlerin parlaklığı 37 (R457 metoduna göre) ölçülmüştür. Fiber Kalite Ölçüm cihazına göre; fiberlerin ortalama elyaf boyları 0,613 mm, elyafların ortalama enleri 17,7 µm ve kırıntı içeriği % 11.05 ölçülmüştür.

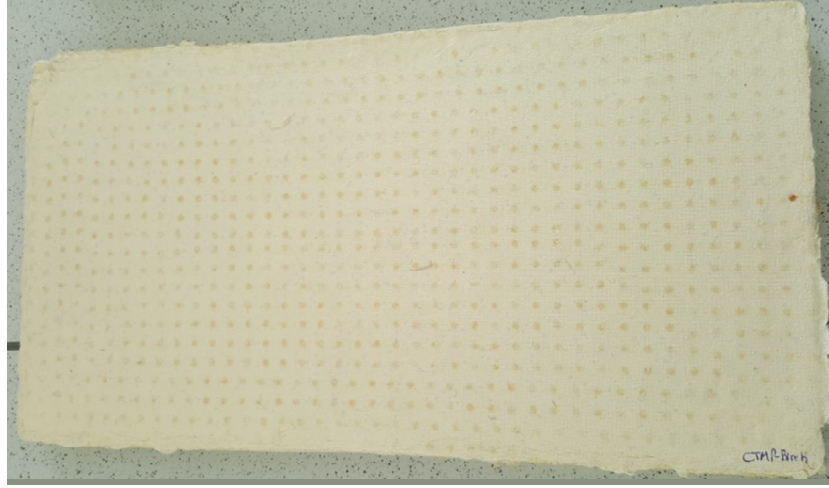
Numune üretim istasyonunda suyla birlikte karıştırılarak hamur haline getirilen palmiye fiberleri, vakum ve pres altında şekillendirilmiştir. Şekil 3.3’de, plaka halinde, 3,5 mm ve 4 mm kalınlığında palmiye selülozundan üretilen kompozit takviyelerinden biri görülebilir.



Şekil 3.41: Palmiye selülozundan kompozit takviyesi

Deneylerde kullanılan kayın fiberleri CTMP yöntemi ile üretilmiştir. Kayından üretilmiş fiberlerin parlaklığı 67 (R457 metoduna göre) ölçülmüştür. Fiber Kalite Ölçüm cihazına göre; fiberlerin ortalama elyaf boyları 1,059 mm, elyafların ortalama enleri 25,0 µm ve kırıntı içeriği (inorganik madde) % 6,73 ölçülmüştür.

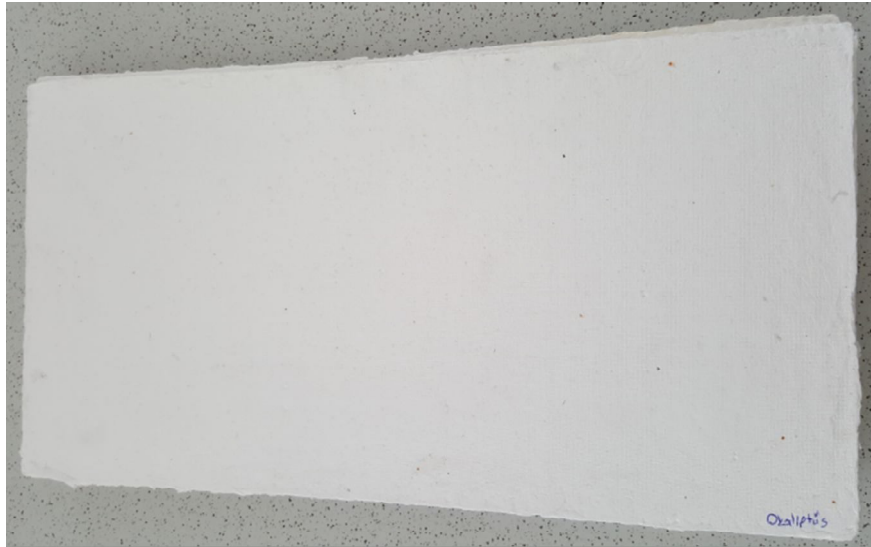
Numune üretim istasyonunda suyla birlikte karıştırılarak hamur haline getirilen kayın fiberleri, vakum ve pres altında şekillendirilmiştir. Şekil 3.4’de, plaka halinde, 3,5mm ve 4mm kalınlığında kayın selülozundan üretilen kompozit takviyelerinden biri görülebilir.



Şekil 3.42: Kayın ağacı selülozundan kompozit takviyesi

Deneyleerde kullanılan okalıptüs fiberleri, ağartılmış kraft yöntemiyle üretilmiştir. Okalıptüs fiberlerinin parlaklığı 83 (R457 metoduna göre) ölçülmüştür. Okalıptüs fiberlerinin kappı sayıları 44 ölçülmüştür. Fiber Kalite Ölçüm cihazına (FQA) göre; fiberlerin ortalama elyaf boyları 0,763mm, elyafların ortalama enleri 16,7 µm ve kırıntı içeriği % 3,04 ölçülmüştür.

Numune üretim istasyonunda suyla birlikte karıştırılarak hamur haline getirilen okalıptüs fiberleri, vakum ve pres altında şekillendirilmiştir. Şekil 3.5’de, plaka halinde, 3,5 mm ve 4 mm kalınlıklarda okalıptüs selülozlarından üretilen bir kompozit takviyesi görülebilir.



Şekil 3.43: Okalıptüs selülozundan kompozit takviyesi

- Vakum sistemi ve taşma kabı
- Sıcaklık kontrol ünitesi

3.2.1.1 Enjeksiyon Sistemi

İmal edilen RTM sistemi numune üretme amaçlı olduğu için enjeksiyon ünitesi olarak basınçlı kap kullanılmıştır. Basınçlı kap hazır olarak temin edilmiştir. Şekil 3.7’te sistemde kullanılan basınçlı kap görülmektedir.

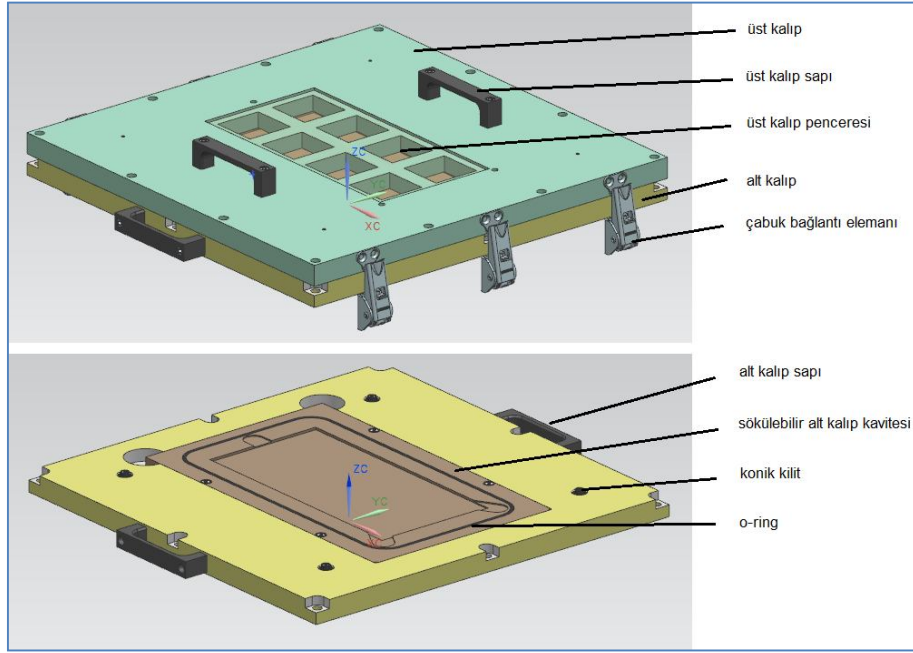


Şekil 3.45: Reçine Enjeksiyonu İçin Kullanılan Basınçlı Kap (Pulsar 2016)

Reçine bir kap içinde, katılaştırıcı ile karıştırılarak basınç tankının içine konmuştur. Pnömatik hortum ile kalıp, reçine bağlantısı yapılmıştır. Basınçlı havanın basınç tankına verilmesi ile reçine kalıp içine dolmaya başlamıştır. Fazla reçine kalıp çıkışından taşma kabına dolmuştur..

3.2.1.2 Kalıp

Doğal fiber bazlı takviyenin yerleştirilerek içine reçinenin enjekte edileceği kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıp 300 mm x 150 mm boy ve eninde tasarlanmıştır. Et kalınlığı ilk etapta 3,5 mm düşünülmüştür. Kalıpta reçinenin akışının gözlenebilmesi için pencere düşünülmüştür. Kalıp konstrüksiyonu Şekil 3.8’de görülebilir.



Şekil 3.46: RTM Sistemi Kalıbı

Çabuk montaj ve söküm için hızlı bağlantı elemanları ve kalıp sapları, merkezleme için konik kilit, sızdırmazlık için o-ring eklenmiştir.

3.2.1.3 Gövde

Gövde; kalıp grubunu, ısıtma sistemini, izolasyon plakasını ve bir adet raf ihtiva edecek şekilde tasarlanmıştır. Talaşlı imalat ve kaynaklı imalat ile parçalar imal edilip birbirine civata ve kaynakla montajlanacak şekilde tasarım yapılmıştır. Şekil 3.9’da gövdenin montaj resminin bir görünüşü verilmiştir.

4	AKB M4x35 CIVATA	DIN 931	12	X6CrNi18-10 (AISI 304)
15	HB M10x30 CIVATA	DIN 7991	11	X6CrNi18-10 (AISI 304)
12	HB M6x25 CIVATA	DIN 7991	10	X6CrNi18-10 (AISI 304)
2	AYAK 2		9	
2	AYAK 1		8	
2	AYAK MONTAJ PLAKASI 2	RTM 500-1-07	7	S235 JR (ST 37)
2	AYAK MONTAJ PLAKASI 1	RTM 500-1-06	6	S235 JR (ST 37)
3	MONTAJ PLAKASI	RTM 500-1-05	5	S235 JR (ST 37)
1	SASE	RTM 500-1-04	4	
1	DESTEK PLAKASI	RTM 500-1-03	3	EN-AW 6061 T6
1	İZOLASYON PLAKASI	RTM 500-1-02	2	ELISTO THERMOSTAR HD800
1	RAF	RTM 500-1-01	1	EN-AW 6061 T6
ADET	TANIM	RESİM/STANDART NO	PARÇA NO	MALZEME
TANIM: RTM SİSTEMİ GÖVDE MONTAJ RESMİ				ÖLÇEK: 1/10

Şekil 3.47: RTM Sistemi Şase Önden Görünüş

3.2.1.4 Vakum Sistemi ve Taşma Kabı

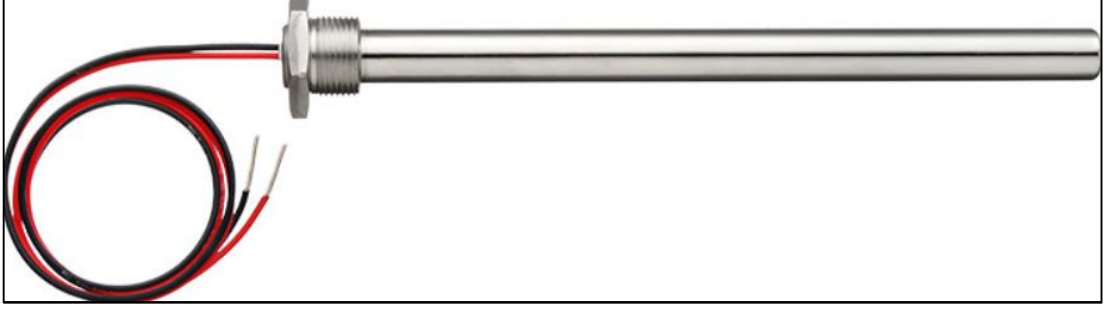
Reçine kalıba enjekte edilirken, gazın tahliyesini sağlamak ve reçinenin akışına yardımcı olmak için vakum pompası kullanılmıştır. Vakum pompası taşma kabına bağlı, taşma kabı ise kalıba bağlı hale getirilmiştir. Taşma kabı, sadece dışarı taşan reçinenin içinde toplanacağı, özelliği olmayan, harcı alem olarak nitelendirilebilecek bir malzemedir. Vakum pompası olarak Rocker 300 marka Şekil 3.48'de görülen pompa kullanılmıştır.



Şekil 3.48: Vakum pompası

3.2.1.5 Sıcaklık Kontrol Ünitesi

Reçinenin kirlenmesini sağlamak için alüminyum malzemeden imal edilen bir ısıtma plakası ve 6 adet fişek rezistanstan oluşan ısıtma sistemi hazırlanmıştır. Şekil 3.11'de, kullanılan fişek rezistans gösterilmiştir.



Şekil 3.49: Fişek Rezistans (Mattsson 2015)

3.2.2 RTM Sistemi İmalatı

RTM sisteminin şasesinin kaynaklı imalatının tamamlandığı, ısıtma plakasının işlendiği, rezistans deliklerinin delindiği, izolasyon plakasının işlendiği ve bunların hepsinin montajlandığı imalat aşaması Şekil 3.12’de görülebilir.



Şekil 3.50: RTM Sisteminin imalat aşaması-1

RTM sisteminin Şekil 3.12’de yer alan imalat sürecinin ardından, rezistanslarının montajı yapılmıştır. Bunun ardından kalıp kısmı imal edilmiştir. Kalıp alt gövdesi, Şekil 3.13’de görüldüğü gibi, o-ring ile çevrelenmiştir. Kalıp montajı ve de-montajının kolay olması için kulp imal edilmiş ve montajlanmıştır. Konik kilitler de kalıba monte edilmiştir.



Şekil 3.51: RTM Sistemi Kalıp Alt Kısmı

RTM sisteminin kompakt olması ve laboratuvar içinde hareketinin kolay olması için montajı yapılan tekerler Şekil 3.14’te görülebilir.



Şekil 3.52: RTM Sistemi Ayak Montajı

RTM sisteminin üst kalıbı, Şekil 3.15’te görüldüğü gibi imal edilmiştir. Reçinenin akışının izlenebilmesi için kalıp pencereli şekilde imal edilmiştir.



Şekil 3.53 :RTM Sistemi Üst Kalıbı

Üst kalıbın ve diğer RTM ekipmanlarının montajlı hali Şekil 3.16'da görülebilir.



Şekil 3.54: RTM Sistemi Şase-Kalıp ve Isıtma Grubu

Enjeksiyon sistemi, kalıp, gövde, vakum sistemi ve taşıma kabı, sıcaklık kontrol ünitelerinin montajlı hali Şekil 3.17'te gösterilmiştir.



Şekil 3.55: Reçine transfer kalıplama sistemi

3.2.3 RTM Sisteminde Kompozit Malzeme Üretimi

Reçine transfer kalıplama sistemi imal edildikten sonra sıra doğal fiber takviyeli kompozit üretimi aşamasına gelmiştir. Daha önce üretilmiş olan okalıptus, kayın ve palmye fiberlerinden plaka şeklinde kompozit takviyeleri RTM sisteminde kalıp içine yerleştirilmiştir. Hunstman Araldite® LY 1564 epoksi reçine ve Aradur® 3487 sertleştirici karışımı kalıba enjekte edilmiş, ardından kürlenerek kompozit malzeme haline getirilmiştir. Kullanılan epoksi ve sertleştiricinin özellikleri Ek-A'da görülebilir.

Epoksi ve sertleştirici karışım, bir kabın içine yerleştirilmiş ve basınçlı kabın içine konulmuştur. Mavi pnömatik hortumlar sayesinde bir taraftan reçine enjekte edilirken, kalıbın ortasından da vakum sayesinde akışa yardım edilmiş, hava kabarcıkları oluşumunun önüne geçilmiştir. Kompozit üretimi esnasında çekilen fotoğraf Şekil 3.18'de görülebilir.



Şekil 3.56 :Kompozit üretiminden bir görüntü

Bu yolla üretilen palmiye fiberi takviyeli kompozit malzeme, Şekil 3.19’da görülebilir. Palmiye fiberleri reçine ile birleşince kahverengi bir renk almıştır.



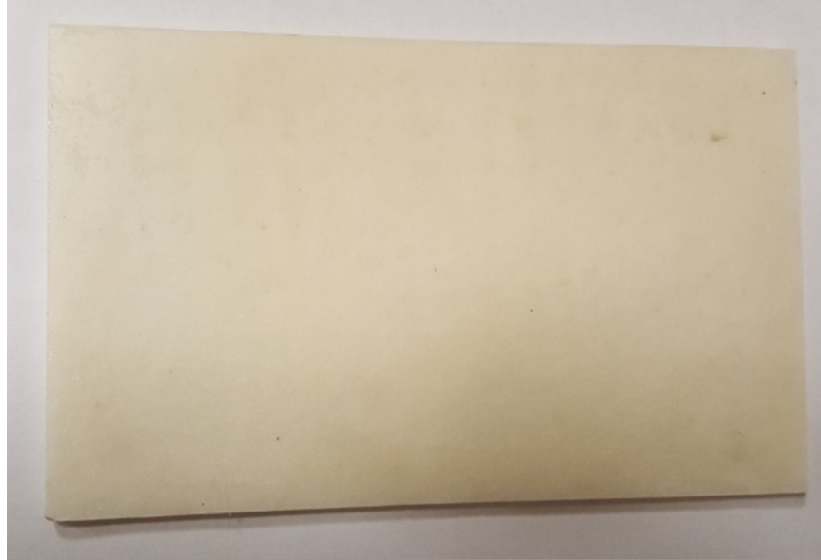
Şekil 3.57: Palmiye selülozu takviyeli kompozit

Aynı yolla, kayın fiberlerinden üretilen doğal fiber takviyeli, epoksi matrisli kompozit malzeme Şekil 3.20’de görülebilir.



Şekil 3.58: Okaliptus selülozu takviyeli kompozit

Yine bu yolla, okaliptus fiberlerinden üretilen doğal fiber takviyeli, epoksi matrisli kompozit malzeme Şekil 3.21’de görülebilir.



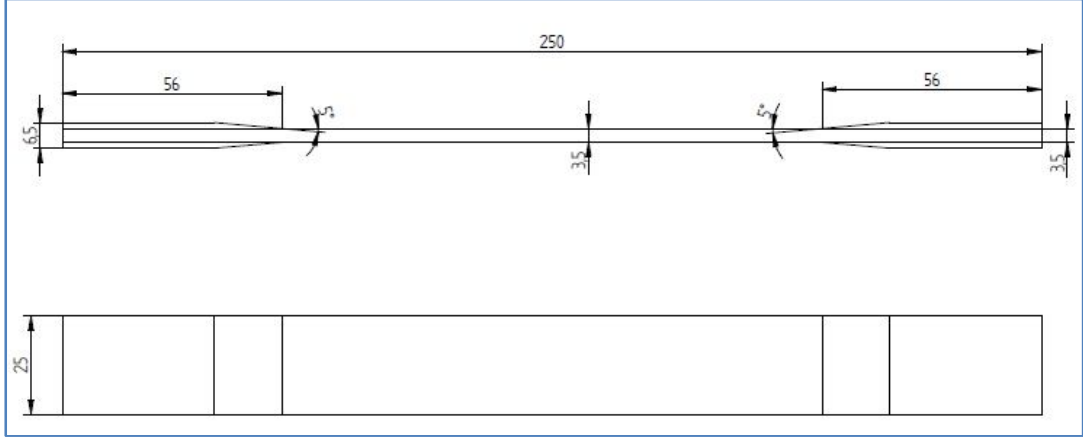
Şekil 3.59: Kayın Ağacı Selülozu Takviyeli Kompozit

3.3 Mekanik Testler

Doktora tezinde bu bölüme kadar; selülozik numune üretim sisteminde plaka haline getirilen palmye, kayın ve okaliptus fiberleri, reçine transfer kalıplama ünitesinde epoksi reçine matris ile birleştirilerek; plaka şeklinde doğal fiber takviyeli kompozit numuneler üretilmiştir. Bundan sonraki süreçte, üretilen doğal fiber takviyeli kompozit malzemenin çekme, eğme, basma ve izod testleri yapılmış ve bu testlerden elde edilen mekanik özellikleri incelenmiştir.

3.3.1 Çekme Testi

Üretilen numunelerden, ASTM D 3039 standardına göre Şekil 3.22’de gösterildiği gibi numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin boyu 250mm, eni 25mm, kalınlığı 3,5mm’dir.



Şekil 3.60: ASTM D3039 çekme numunesi özellikleri

Palmye fiberi takviyeli kompozit malzemeden 5 adet, kayın ağacı fiberi takviyeli kompozit malzemeden 5 adet, okaliptus fiberi takviyeli kompozit malzemeden 5 adet numune üretilmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3.61: Çekme testi numuneleri

Reçinesiz, selülozun çekme dayanımını görmek için, okaliptus, kayın ve palmye fiberlerinden, Şekil 3.24’de görüldüğü gibi, reçinesiz 3’er numune hazırlanmış ve bu numunelere de çekme testi uygulanmıştır.



Şekil 3.62: Reçinesiz çekme numuneleri

Hazırlanan numunelere, Zwick/Roell Z010 – 10kN çekme testi cihazında, çekme testi uygulanmıştır. Cihazın ve test esnasında cihaz çenesine bağlı numunenin fotoğrafları Şekil 3.25’te görülebilir.



Şekil 3.63: Çekme testi cihazı

3.3.2 Izod Testi

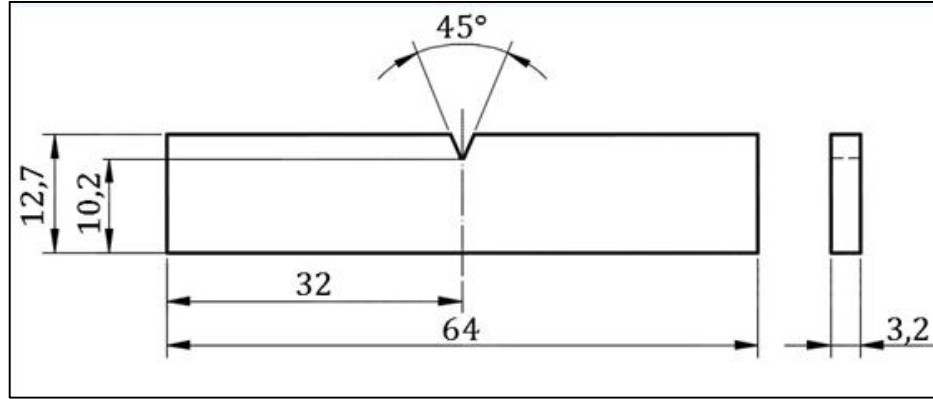
Deneylerde Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan CEAST P/N 6958.000 marka Izod darbe cihazı kullanılmıştır. Test cihazı, maksimum 25J’lük potansiyel enerjiye sahip olup farklı enerji kapasitelerinde çekiçler kullanılabilir. Cihaz termoplastik malzemelerin, esneklik davranışlarını standart gerilme durumlarında,

darbe kırılgenliklarına bakarak değerlendirmektedir. Şekil 3.26’da deney cihazı gösterilmiştir.



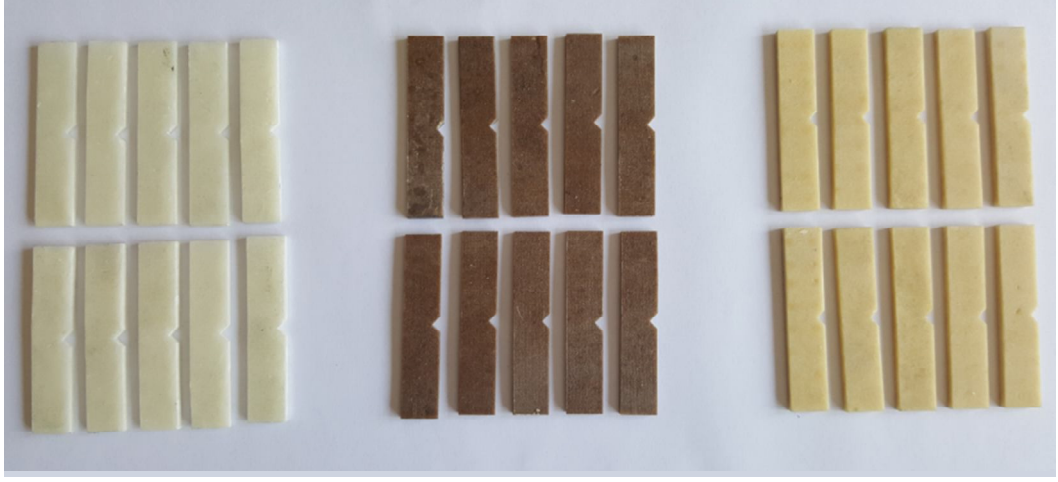
Şekil 3.64: Deneylerde kullanılan Izod darbe cihazı

Deney numuneleri, ASTM D256 standardına uygun olarak Şekil 3.27’de gösterilen boyutlarda hazırlanmıştır.



Şekil 3.65: Izod numune lleri

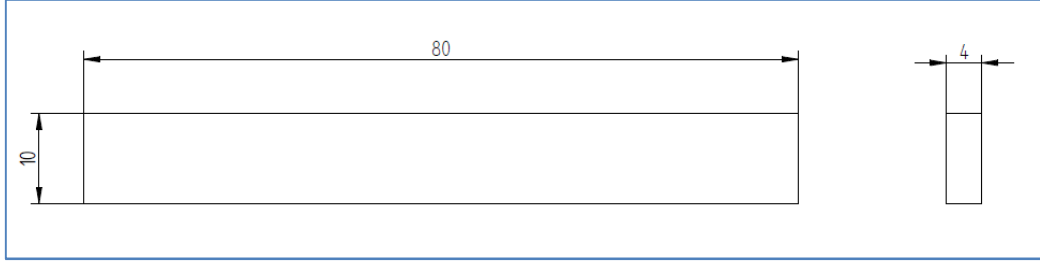
ASTM D256 standardına uygun olarak, okalıptus fiberi takviyeli kompozit malzemeden 10 adet, kayın ağacı fiberi takviyeli kompozit malzemeden 10 adet, palmiye fiberi takviyeli kompozit malzemeden 10 adet numune üretilmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



Şekil 3.66: Izod testi numuneleri

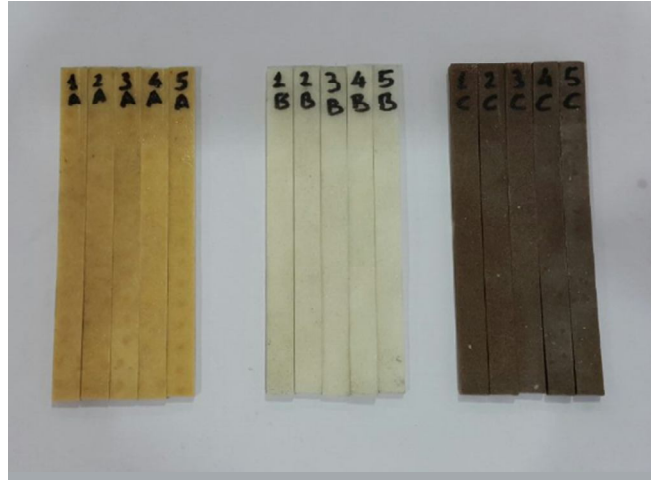
3.3.3 Eğme Testi

Yine aynı dönem içerisinde üretilen numunelerden, ISO 178 standardına göre Şekil 3.29’da gösterildiği gibi numuneler hazırlanmıştır.



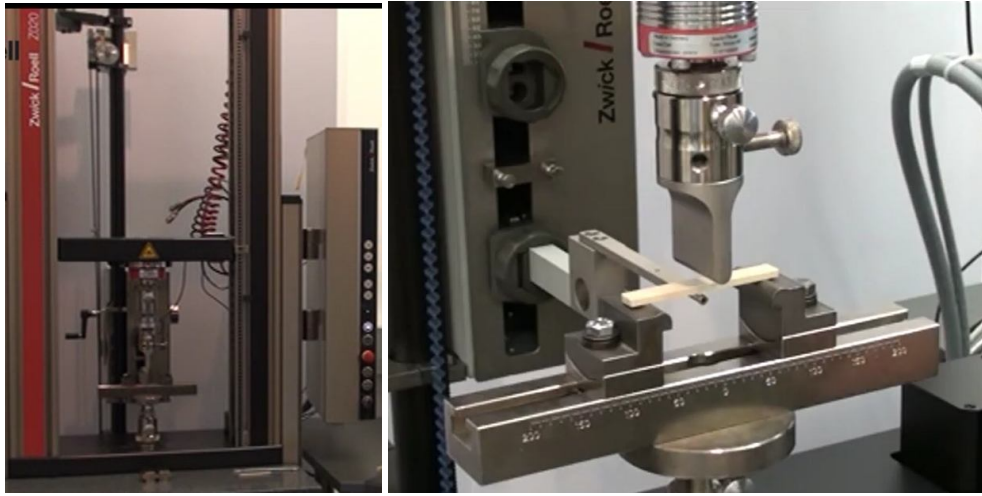
Şekil 3.67: Eğme testi numuneleri

Numunelerin boyu 80 mm, eni 10 mm, kalınlığı 4 mm’dir. Okalıptus selülozu takviyeli kompozit malzemedan 5 adet, kayın ağacı selülozu takviyeli kompozit malzemedan 5 adet, palmiye selülozu takviyeli kompozit malzemedan 5 adet numune üretilmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 3.30’da görülebilir.



Şekil 3.68: Eğme testi numuneleri

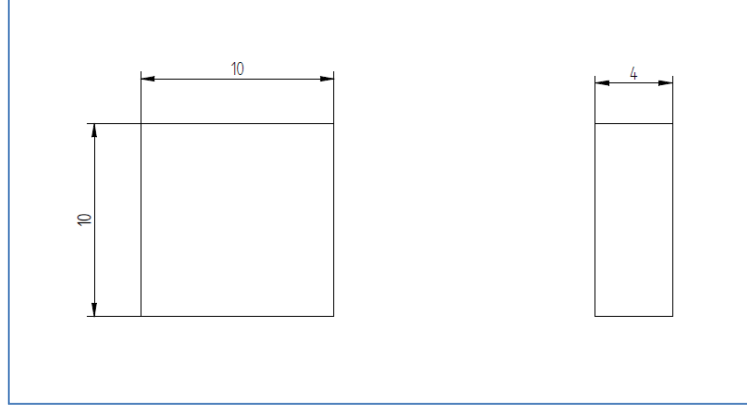
Hazırlanan numunelere, Zwick/Roell Z020 eğme testi cihazında, eğme testi uygulanmıştır. Cihazın fotoğrafları Şekil 3.31’de görülebilir.



Şekil 3.69: Eğme testi cihazı

3.3.4 Basma Testi

Deney numuneleri, TS EN ISO 604 standardına uygun olarak, uzunluk 10mm, genişlik 10 mm ve kalınlık 4mm olacak şekilde Şekil 3.32’deki teknik resme göre hazırlanmıştır.



Şekil 3.70: Basma testi numuneleri teknik resmi

Bu standarda ve ölçülere uygun olarak, okalıptus fiberi takviyeli kompozit malzemeden 5 adet, kayın ağacı fiberi takviyeli kompozit malzemeden 5 adet, palmye fiberi takviyeli kompozit malzemeden 5 adet numune üretilmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 3.33'de gösterilmiştir.



Şekil 3.71: Basma testi numuneleri

Hazırlanan numunelere, Besmak Eğme-Çekme-Basma test cihazında, 1 mm/dak ilerleme hızında basma testi uygulanmıştır. Cihazın fotoğrafları Şekil 3.34'de görülebilir.



Şekil 3.72: Besmak eğme çekme basma test cihazı

4. BULGULAR

4.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme testi, malzemelerin mukavetini belirlemek amacıyla kullanılan temel testlerden biridir. Çekme testi, malzemeye çekme kuvveti uygulayarak malzemenin bu kuvvete verdiği gerilme tepkisini ölçer. Çekme mukavemeti (basma durumunda da basma mukavemeti) olarak tarif edilen R_m , malzemenin çekme testi esnasında dayandığı maksimum gerilmedir. Malzemenin çekme testi esnasında ilk boyuna göre bağıl olarak uzamasına; “birim uzama” denir ve “ ϵ ” sembolü ile gösterilir. Elastisite modülü (E) ise, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin bir ölçüsüdür.

Kayın, palmiye ve okaliptus fiberleri takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme numunelerine (her bir malzeme türünden 5’er adet numune) uygulanmış çekme testi sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Kompozit numuneler çekme deneyi sonuçları

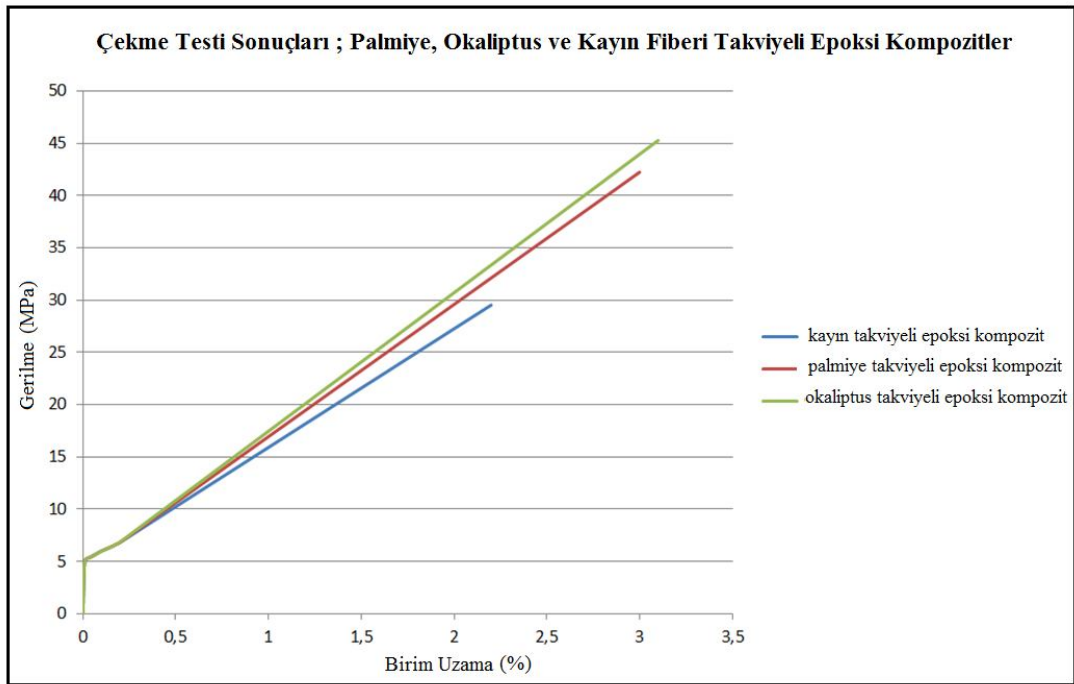
Kayın,Palmiye,Okaliptus/Epoksi Kompozit Çekme Deneyi Sonuçları				
Numuneler		Kayın/Epoksi	Palmiye/Epoksi	Okaliptus/Epoksi
R_m (MPa)	Numune 1	28	43	45
	Numune 2	29	42	47
	Numune 3	31	45	44
	Numune 4	31	43	44
	Numune 5	30	40	48
Ortalama (MPa)		29,8	42,6	45,6
ϵ (%)	Numune 1	2,2	3	3,1
	Numune 2	2,3	3,1	3,2
	Numune 3	2,2	3	3,2
	Numune 4	2,2	3,1	3,1
	Numune 5	2,3	3	3,1
Ortalama (%)		2,2	3,0	3,1

Reçinesiz, kayın, palmiye ve okaliptus fiberlerine uygulanmış çekme testi sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Reçinesiz numuneler çekme testi sonuçları

Kayın,Palmiye,Okalıptus Reçinesiz Selüloz Çekme Deneyi Sonuçları				
Numuneler		Kayın	Palmiye	Okalıptus
Rm (MPa)	Numune 1	3	3,8	5
	Numune 2	3	4	4,8
	Numune 3	3,2	4	4,8
Ortalama (MPa)		3,1	3,9	4,9
ε (%)	Numune 1	1,4	1,8	2
	Numune 2	1,5	1,8	2,1
	Numune 3	1,5	1,7	2
Ortalama (%)		1,5	1,8	2,0

Kayın, palmiye ve okalıptus fiberleri takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme numunelerinin gerilme-birim uzama eğrileri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.73: Çekme testi sonuçları

Okalıptüs/epoksi kompozitleri, üç kompozit türü arasında en iyi çekme dayanımı performansını göstermiştir. %3.1 birim uzama ile 45 MPa gerilmeye dayanabilmiştir. Palmiye/epoksi kompozitleri okalıptus/epoksi kompozitlerine kıyasla biraz daha düşük gerilme dayanımı sergilemiştir fakat genel olarak yakın çekme dayanımı performansı sergiledikleri söylenebilir. Kayın/epoksi kompozitleri

en düşük çekme dayanımı sergilemişlerdir. Ortalama 30 MPa gerilme dayanımı ve %2.2 birim uzama performansı göstermişlerdir.

Her üç fiber takviye türü için de aynı miktarda reçine matris kullanılmasına rağmen, mekanik özellikler farklılık göstermiştir. Bunun sebebi, fiber takviyelerin hammadde ve üretim süreçlerinin farklı olmasıdır. Kayın ağacı fiberleri, ilk olarak kayın ağacı gövdesinden termo-kimyasal yöntemle fibrile edilmiştir. Bu nedenle kayın fiberlerinin dayanımı bağıl olarak düşüktür. Çünkü lif üretim sürecinde kullanılan rafinörde liflendirme liflerin kesilmesine sebep olmuştur. Oysa okaliptus lifleri kraft yöntemi ile kimyasal olarak elde edildiğinden böyle bir durum söz konusu değildir. Palmiye fiberleri ise oldukça uzun liflidir. Kraft üretim yönteminde hammadde firesi daha fazla fakat liflerin uzunluğu ve mukavemeti daha yüksektir. Sonuç olarak, özellikleri birbirine daha yakın olmakla birlikte okaliptus/epoksi kompozitleri biraz yüksek çekme dayanımı performansı göstermiştir.

Kullanılan hamurlardan okaliptüs hamuru sülfat yöntemi ile elde edilmiştir. Oysa, kayın hamuru yarı kimyasal yöntemle elde edilmiştir. Genel olarak, yarı kimyasal hamurlar orta mukavemette bir özellik gösterirlerken, kimyasal hamurlar yüksek mukavemet vermektedir (Biermann 1996). Aynı zamanda palmiye hamuru da kimyasal ağartılmamış bir hamur olup gerçekte palmiye meyvesinin kabuklarından elde edildiğinden kırıntı içeriği dolayısıyla okaliptüs ile karşılaştırıldığında daha düşük mukavemet vermesi kaçınılmazdır.

Diğer taraftan, okaliptüs hamuru ağartıldığı için yarı kimyasal hamura göre lif yüzeyleri bağlanma için daha aktiftir. Çünkü yarı kimyasal yolla elde edilen liflerin yüzeyinde yoğun şekilde lignin bulunmaktadır (Perrin ve diğ. 2014), (Ek ve diğ. 2009). Kayın hamuru yarıkimyasal hamur olduğundan lif yüzeyinde okaliptusa göre daha fazla lignin bulunmakta, daha fazla ince kırıntı oluşmakta ve lif yüzeyleri hamur üretim aşamasındaki mekanik etki nedeniyle çok fazla zarar görmüş olabilmektedir. Bu da mukavemeti olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak ağartılmış kağıt hamurlarının bağlanma yeteneği her zaman diğerlerinden daha yüksek olmaktadır. Okaliptus hamurları ile yapılan deneylerin daha yüksek sonuç vermesi bu durumun doğal sonucudur (Sarıkaya ve diğ. 2019).

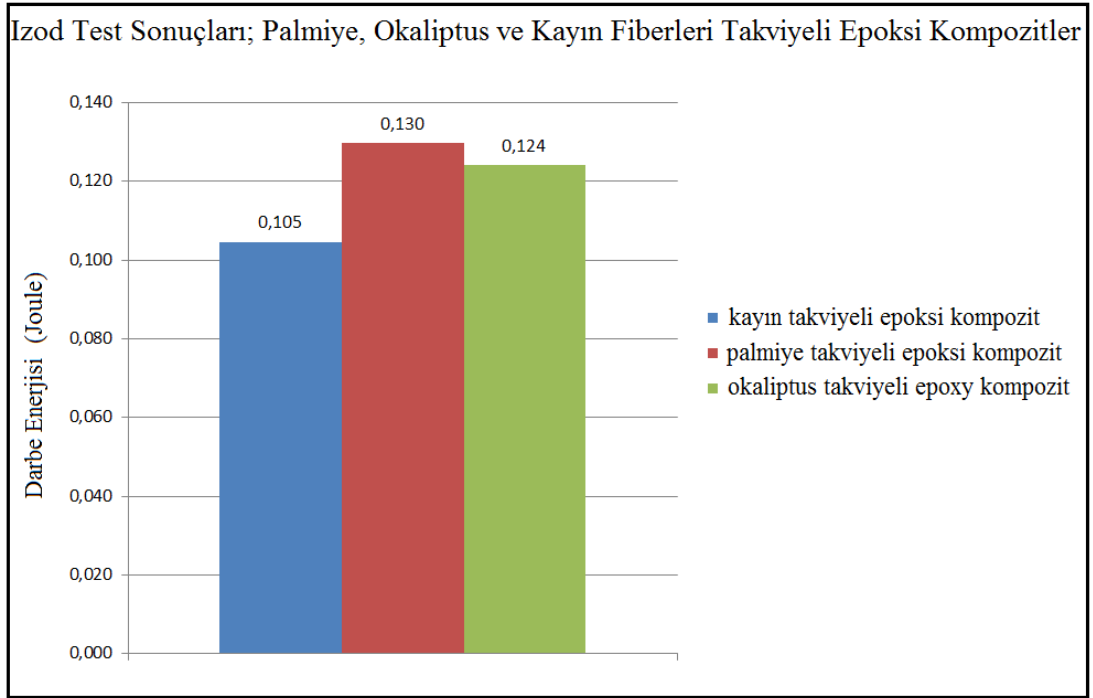
4.2 Izod Deneyi Sonuçları

Kayın, palmiye ve okaliptus fiberleri takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme numunelerine (her bir malzeme türünden 10'ar adet numune) uygulanmış Izod darbe testi sonuçları, Tablo 4.3'de verilmiştir. Reçinesiz numunelere de aynı test uygulanmış fakat kırılma olmadığı için sonuç alınamamıştır.

Tablo 4.3: Izod deneyi sonuçları

Kayın,Palmiye,Okaliptus/Epoksi Kompozit Izod Deneyi Sonuçları			
Numuneler	Kırılma Enerjileri (J)		
	Kayın/Epoksi	Palmiye/Epoksi	Okaliptus/Epoksi
Numune 1	0,115	0,126	0,128
Numune 2	0,100	0,128	0,126
Numune 3	0,104	0,13	0,12
Numune 4	0,104	0,122	0,122
Numune 5	0,100	0,135	0,126
Numune 6	0,098	0,126	0,124
Numune 7	0,108	0,142	0,123
Numune 8	0,101	0,13	0,124
Numune 9	0,108	0,132	0,122
Numune 10	0,108	0,126	0,126
Ortalama (J)	0,105	0,130	0,124

Tablo 4.3'teki sonuçların grafik halindeki karşılaştırmaları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.74: Izod deney sonuçları

Palmiye fiberi takviyeli epoksi kompozitler, ortalama 0,130 Joule enerji absorpsiyonu ile en iyi Izod darbe testi performansını sergilemiştir. Okalıptus fiberi takviyeli epoksi kompozitleri, palmiye/epoksi kompozitlerine göre 0,124 Joule ile biraz daha düşük darbe enerjisi absorbe edebilmiştir. Kayın fiberi takviyeli epoksi kompozitler, 0.105 Joule ile en düşük darbe enerjisini absorbe etmişlerdir.

Doğal fiber takviyeli ürünlerin Izod darbe özellikleri, fiberlerin arasındaki hidrojen bağlarından doğrudan etkilenir ve bu bağlar daima fiberlerin kendilerinden daha zayıftır. Fiberler arasındaki bağlanmış alan, fiber uzunluğuna, fiber kalınlığına ve rafinör ile saçaklandırılma derecesine bağlı olarak değişir. Mekanik bir özellik olarak, doğal fiber takviyeli epoksi kompozitlerin darbe enerjisi absorbe etmesi, fiber hammaddelerinden ve ayrıca bu fiberlerin bağ yapma özelliklerinden direkt olarak etkilenir. Kayın fiberleri, palmiye ve okalıptusa göre daha kısa elyaf içerdiğinden, bağ yapma miktarı da daha az olmuştur ve buna bağlı olarak darbe enerjisi absorpsiyon değeri düşüktür. Palmiye ve okalıptus fiberi takviyeli kompozitler nispeten yakın Izod darbe deneyi sonuçlarına sahiptir.

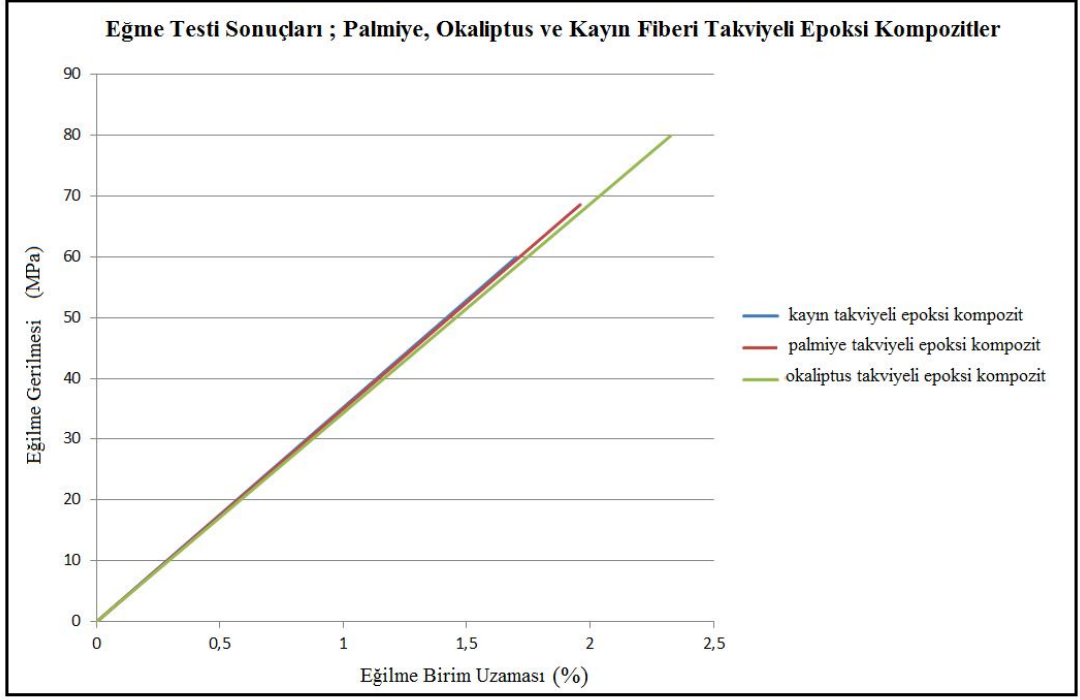
4.3 Eğme Deneyi Sonuçları

Kayın, palmiye ve okalıptus fiberleri takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme numunelerine (her bir malzeme türünden 5'er adet numune) uygulanmış eğme deneyi sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4: Eğme deneyi sonuçları

Kayın,Palmiye,Okalıptus/Epoksi Kompozit Eğme Deneyi Sonuçları				
Numuneler		Kayın/Epoksi	Palmiye/Epoksi	Okalıptus/Epoksi
Rm (MPa)	Numune 1	62,3	69,4	85,8
	Numune 2	62,3	73,1	81,4
	Numune 3	51,5	65,3	82,1
	Numune 4	58	65,7	83
	Numune 5	65,2	68,6	68,9
Ortalama (MPa)		59,9	68,4	80,2
ε (%)	Numune 1	1,7	1,8	2,5
	Numune 2	1,7	2	2,3
	Numune 3	1,7	1,9	2,2
	Numune 4	1,4	2	2,2
	Numune 5	1,8	1,9	2,2
Ortalama (%)		1,7	1,9	2,3
(E) - MPa	Numune 1	3860	4060	4550
	Numune 2	3920	4000	4250
	Numune 3	3130	3720	4260
	Numune 4	4210	3730	4430
	Numune 5	3860	4020	3690
Ortalama (MPa)		3796	3906	4236

Kayın, palmiye ve okalıptus fiberleri takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme numunelerinin eğilme gerilmesi – eğilmede birim uzama eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.75: Eğme testi sonuçları

Diğer mekanik testler gibi, numunelerin eğme testlerinde de fiberlerin özelliklerine bağlı olarak farklılıklar söz konusudur. Elde edilen sonuçlara göre, doğal fiber takviyeli kompozitlerin eğme dayanımları şöyledir; okalıptus/epoksi, palmiye/epoksi ve kayın/epoksi yüksekten düşüğe doğru sıralanmıştır. Eğilmede birim uzama değerleri de benzer sıradadır. Kompozit numuneler arasındaki tek fark doğal fiber türü olduğu için eğilme dayanımı ve eğilmede birim uzama sonuçları kullanılan fiberin özelliklerine doğrudan bağlıdır.

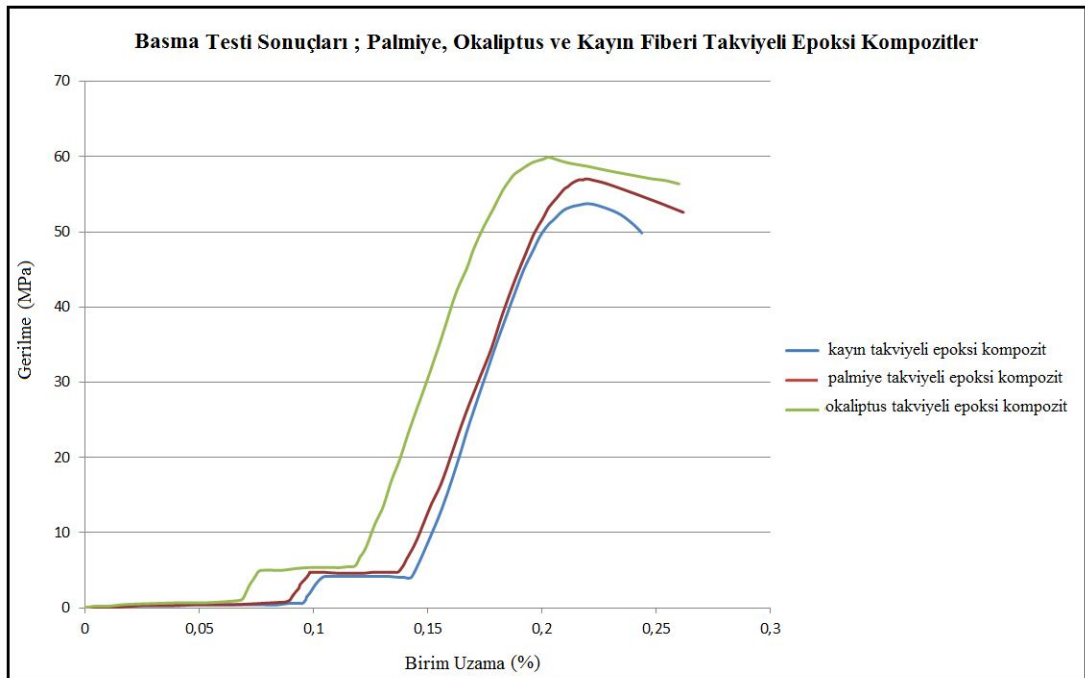
4.4 Basma Deneyi Sonuçları

Kayın, palmiye ve okalıptus fiberleri takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme numunelerine (her bir malzeme türünden 5'er adet numune) uygulanmış basma deneyi sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5: Basma deneyi sonuçları

Kayın,Palmiye,Okalıptus/Epoksi Kompozit Basma Deneyi Sonuçları				
Numuneler		Kayın/Epoksi	Palmiye/Epoksi	Okalıptus/Epoksi
Rm (MPa)	Numune 1	53	58	59
	Numune 2	54	57	60
	Numune 3	52	57	59
	Numune 4	53	56	60
	Numune 5	52	57	60
Ortalama (MPa)		52,8	57,0	59,6
ε (%)	Numune 1	1,23	1,24	1,30
	Numune 2	1,26	1,21	1,27
	Numune 3	1,27	1,30	1,26
	Numune 4	1,16	1,22	1,32
	Numune 5	1,17	1,30	1,24
Ortalama (%)		1,22	1,25	1,28

Kayın, palmiye ve okalıptus fiberleri takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme numunelerinin basmada gerilme-birim uzama eğrileri Şekil 4.4'te verilmiştir.

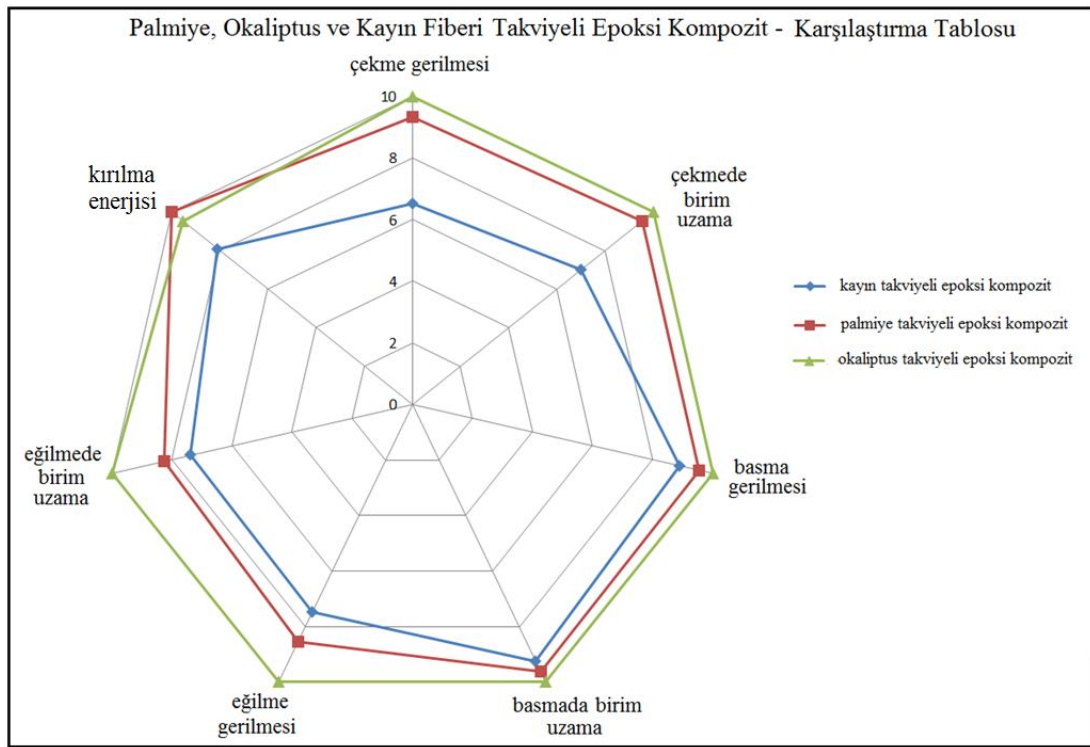


Şekil 4.76: Basma testi sonuçları

Basma dayanımı, fiber bazlı ürünler için hacimsel yoğunluğun, fiber oryantasyonunun ve fiberler arası bağlanmanın bir fonksiyonudur. Bu mekanizma, basma dayanımı sonuçlarında görüldüğü gibi, doğal fiber takviyeli kompozitler için de geçerlidir ve reçine aynı olduğu durumda fiber türleri, basma dayanımı sonuçları üzerinde belirleyici olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, okalıptüs/epoksi kompozitleri, kayın fiberi ve palmiye fiberi takviyeli epoksi kompozitlerinden daha yüksek basma dayanımı göstermiştir. Ayrıca, palmiye/epoksi kompozitleri, kayın/epoksi kompozitlerinden daha yüksek basma dayanımına sahiptir. Bunlara ilaveten, basmada birim uzama davranışları da basma dayanımı sıralamasına benzer olmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kayın, palmiye ve okaliptus fiberi takviyeli epoksi bazlı kompozitlerin, çekme gerilmesi, çekmede birim uzama, basma gerilmesi, eğilme gerilmesi, eğilmeye birim uzama ve kırılma enerjisi özelliklerinin, bağıl olarak 10 üzerinden karşılaştırıldığı bir örümcek ağı diyagramı hazırlanmıştır ve Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Bu örümcek ağı diagramı üzerinden karşılaştırmalı olarak mukayeseleri yapılmıştır.



Şekil 5.77: Mekanik özelliklerin bağıl olarak karşılaştırılması

Kalıplanmış fiber numune üretimi ve vakum destekli RTM prosesi kombinasyonu ile kompozit malzeme üretiminden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır;

- Kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yönteminin, doğal fiber hazırlama için tamamen uygun bir yöntem olduğu gözlenmiştir.

- Kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yöntemiyle 5 mm'ye kadar fiber tabaka kalınlığı elde edilmesinde bir sorun olmadığı gözlenmiştir.

• Doğal fiberlerden serbest yüzeyli formların, kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yöntemiyle kolaylıkla üretilebilir ve RTM yöntemi ile entegre edilebilir olduğu görülmüştür. Böylelikle geleneksel karbon-cam elyaf/matris bazlı kompozitlere kıyasla maliyet avantajı sergileyebileceği görülmüştür.

• Geleneksel kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yöntemi ve reçine transfer kalıplama prosesi, uygun şekilde kombine edilebilmiştir. Kalıplanmış selülozik ambalaj üretim yöntemi, fiber takviyesi üretimi için önemli bir potansiyele sahiptir.

Kayın, palmiye ve okaliptus fiberli, epoksi matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri bütün olarak değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir;

1. Okaliptus fiberi takviyeli epoksi bazlı kompozit malzeme, kırılma enerjisi haricinde bütün özelliklerde en iyi performansı göstermiştir. Sadece kırılma enerjisi özelliği açısından palmiye fiberi takviyeli epoksi kompozitten 5% daha düşük bir dayanım göstermiştir.
2. Palmiye fiberi takviyeli epoksi bazlı kompozit, okaliptus fiberi takviyeli epoksi kompozit ile çok yakın mekanik dayanım sergilemiştir. Sadece eğilme zorlanmasında aralarındaki fark 20% mertebelerine çıkmıştır.
3. Kayın fiberi takviyeli epoksi kompozit malzeme, tüm mekanik özelliklerde, okaliptus ve palmiye fiberli kompozitlerden daha düşük dayanım sergilemiştir.
4. Genel görünüm olarak, her üç doğal fiber takviyeli kompozit de umut vadeden sonuçlar sergilemiştir ve bazı durumlarda mühendislik malzemesi olarak kullanılacaklarını göstermiştir.
5. Okaliptus ve palmiye fiberi takviyeli epoksi kompozit malzemeler yakın mekanik özellikler sergilemiştir.
6. Palmiye ve okaliptus fiberi takviyeli kompozitlerin basma dayanımları birbirine çok yakın çıkmıştır.

Bu çalışma kapsamında, fiber olarak 3 farklı malzeme (palmiye, okaliptus ve kayın), reçine olarak da epoksi kullanılmıştır. Bu çalışmanın devamı olarak, doğal fiber takviyeler ile PLA matris denenebilir. Böylelikle %100 sürdürülebilir, doğal malzemelerden kompozit üretilerek mekanik özellikleri incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

Aeroworks, "Hand Lay-up [online]", (25 August 2018), <http://www.aeroworks.nl/?p=3&cat=41.>, (2010).

Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K., Analysis and Performance of Fiber Composites, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., (2006).

Al-Oqla, F. M., and Sapuan, S. M., "Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry", *J. Clean. Prod.*, 66 (1), 347-354, (2014).

Alves, C., Silva, A. J., Reis, L. G., Freitas, M., Rodrigues, L. B., and Alves, D. E., "Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites," *J. Clean. Prod.*, 18 (4), 313-327, (2010).

Ashori, A., "Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries", *Bioresour. Technol.*, 99 (11), 4661-4667, (2008).

Banerjee, S. and Sankar, B. V., "Mechanical properties of hybrid composites using finite element method based micromechanics", *Compos. B. Eng.*, 58 (1), 318-327, (2014).

Başer, İ., Elyaf Bilgisi, İstanbul: Marmara Üniversitesi Yayınları, (2002).

Bektaş, N. B., Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Denizli: PAÜ Ders Notları, (2011).

Biermann, C. J., Handbook of Pulping and Papermaking, Oregon: Academic Press, (1996).

Bravo, Y., "Eco centric depot [online]", (12 November 2018), <http://www.ecocentricdepot.com/>, (2016).

Brosius, D., "Natural fiber composites slowly take root", *Compos. Tech.*, 12 (1), 121, (2006).

Campinhos, E., "Sustainable plantations of high-yield shape Eucalyptus trees for production of fiber: the Aracruz case," *New. For.*, 17 (1-3), 129-143, (1999).

Chamis, C. C. and Lark, R. F, Hybrid composites – State-of-the-art review: Analysis, Design, Application and Fabrication, California: NASA Technical Memorandum, (1977).

Chandu, G., "Material Science : Chapter 7: Composites [online]", (24 December 2017), <http://iesgeneralstudies.com/chapter-7-composites/>, (2017).

Chou, T., and Kelly, A., "Mechanical properties of composites," *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 10 (1), 229-259, (1980).

Chung, D. D., "Dispersion of short fibers in cement," *J. Mat. Civil Eng.*, 17 (4), 379-383, (2005).

CIEC Staff, "The Essential Chemical Industry [online]", (21 December 2017), <https://www.york.ac.uk/chemistry/news/deptnews/essentialchemind/>, (2013).

Czichos, H. and Hennecke, M. (Eds.), *Hütte, Mühendislik Bilimi*, İstanbul: Literatür, (2010).

Didone, M., Saxena, P., Brilhuis-Meijer, E., Tosello, G., Bissacco, G., Mcaloone, T. C., et al., "Moulded pulp manufacturing: Overview and prospects for the process technology", *Packag. Technol. Sci.*, 30 (6), 231-249, 2017.

Discover Composites, "Closed-molding [online]", (5 November 2018), <https://discovercomposites.com/what-are-composites/processes/closed-molding/>, (2015).

Du, Y., Wu, T., Yan, N., Kortschot, M. T., and Farnood, R., "Fabrication and characterization of fully biodegradable natural fiber-reinforced poly (lactic acid) composites", *Compos. B. Eng.*, 56 (1), 717-723, (2014).

Ek, M., Gellerstedt, G., and Henriksson, G., *Pulping Chemistry and Technology*, Göthingen: Hubert and Co. GmbH and Co., (2009).

Ersoy, M. S., "Lif Takviyeli Polimerik Kompozit Malzeme Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı*, Kahramanmaraş, (2005).

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., and Sain, M., "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010", *Prog. Polym. Sci.*, 37 (11), 1552-1596, (2012).

Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., and Sain, M., "Progress report on natural fiber reinforced composites", *Macromol. Mater. Eng.*, 299 (1), 9-26, (2014).

Fiberfence, "Pultrusion process [online]", (2 October 2018), <http://fiberfence.com/about-composite/the-process/pultrusion-process/>, (2018).

George, J., Sreekala, M. S., and Thomas, S., "A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites", *Polym. Eng. and Sci.*, 41 (9), 1471-1485, (2001).

Haque, M. M., Hasan, M., Islam, M. S., and Ali, M. E., "Physico-mechanical properties of chemically treated palm and coir fiber reinforced polypropylene composites", *Bioresour. Technol.*, 100 (20), 4903-4906, (2009).

Hsiao, S. W. and Kikuchi, N., "Numerical analysis and optimal design of composite thermoforming process", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 188 (1-2), 1-34, (1999).

Jacob, M., Thomas, S., and Varughese, K. T., "Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites", *Compos. Sci. Technol.*, 64 (7), 955-965, (2004).

Kaw, A. K., *Mechanics of composite materials*, Boca Raton: CRC press, (2005).

Keulen, C. J., "Design and manufacturing of composite structures using the resin transfer molding technique", Ph.D. Thesis, *University of Victoria, British Columbia*, (2007).

Keyes Fiber, "Molded pulp history [online]", (18 March 2019), <http://www.keyespackaging.com/history/>, (2012).

Kim, J. S., Yoon, H. J., and Shin, K. B., "A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fibers", *Int. J. Impact Eng.*, 38 (4), 198-207, (2011).

Koronis, G., Silva, A., and Fontul, M., "Green composites: a review of adequate materials for automotive applications", *Compos. B. Eng.*, 44 (1), 120-127, (2013).

Lampke, T., Mishra, S., and Bismarck, A., "Plant Fibers as Reinforcement for Green Composites", (Eds: Mohanty, A. K., Misra, M., and Drzal, L. T.) *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*, Boca Raton: CRC Press, 37-109, (2005).

Lamplas, "Spray Lay-up moldings [online]", (18 June 2018), <https://www.lamplas.co.uk/>, (2018).

Lei, Y., Wu, Q., Yao, F., and Xu, Y., "Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 38 (7), 1664-1674, (2007).

Lewin, M., *Handbook of Fiber Chemistry*, Boca Raton: CRC Press, (2006).

Mallick, P. K.(Ed.), *Composites engineering handbook*, New York: Marcel Dekker Inc., (1997).

Mallick, P. K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, Boca Raton; CRC Press, (2008).

Masterbond, "Masterbons [online]", (1 October 2018), <https://www.masterbond.com/industries/wet-lay-uphand-lay-manufacturing-process-composites.>, (2017).

Matthews, F. L. and Rawlings, R. D., *Composite Materials: Engineering and Science*, Washington: CRC Press, (1999).

Mattsson, L., "IPH, International heating products [online]", (5 November 2018), <http://www.ihpheating.com/products/cartridge-heaters/high-density-cartridge-heaters/>, (2015).

Mazumdar, S., Composites manufacturing: materials, product, and process engineering, Boca Raton: CRC Press, (2002).

Mohanty, A. K., Drzal, L. T., and Misra, M., “Novel hybrid coupling agent as an adhesion promoter in natural fiber reinforced powder polypropylene composites”, *J. Mater. Sci. Lett.*, 21 (23), 1885-1888, (2002).

Moore, D. "Metal matrix innovations [online]", (26 December 2017), <http://www.dantmoore.com/companies/metal-matrix-innovations/>. (2017).

Nash, “Vacuum pumps [online]”, (7 August 2018), http://www.gdnash.com/products_systems/vectra_gl_xl/, (2016).

Nasrullah, R. C. L., and Daud, W. R. W., "Oil palm frond fibers pulp from kraft pulping process—effect of beating", In Proceedings of The Annual International Conference, 3 (3), 2013.

Nuplex, “Filament winding [online]”, (1 October 2018), <http://www.nuplex.com/composites/processes/filament-winding>, (2013).

Perox, W., "Composite Materials [online]”, (21 December 2017), https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/Composite_3d.png., (2009).

Perrin, J., Pouyet, F., Chirat, C., and Lachenal, D., “Formation of Carboxyl Groups on Cellulosic Pulp: Effect on Alkali Resistance”, *Bioresour.*, 9 (4), 7299-7310, (2014).

Pollitt, E., “Global Hemp [online]”, (10 October 2018), <http://www.globalhemp.com/2011/02/automotive-composites.html>, (2011).

Pulsar, “Pressure tanks [online]”, (5 November 2018), http://www.pulsar.com.tr/OKI/tr/pressure_tanks.htm, (2016).

Rowell, R. M. and Stout, H. P., “Jute and Kenaf” (Ed: Lewin, M.), Handbook of Fiber Chemistry, Boca Raton: CRC Press, 405-453, (2007).

Rowell, R. M., "Natural Fibers: Types and Properties", (Ed: Pickering, K.), Properties and performance of natural-fiber composites, Boca Raton: CRC Press, 3-66, (2008).

Salpietra, M. "The World's Strongest Stuff [online]", (24 December 2017), <http://www.pbs.org/wgbh/nova/tech/strong-materials.html>, (2010).

Sanjay, M. R., Arpitha, G. R., Naik, L. L., Gopalakrishna, K., and Yogesha, B., "Applications of natural fibers and its composites: An overview", *Nat. Res.*, 7 (3), 108 (2016).

Saravana Bavan, D., and Mohan Kumar, G. C., "Potential use of natural fiber composite materials in India", *J. Reinf. Plast. Comp.*, 29 (24), 3600-3613, (2010).

Sarikaya, E., Çallioğlu, H., and Demirel, H., "Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties", *Compos. B. Eng.*, 167, 461-466, (2019).

Sgriccia, N., Hawley, M. C., and Misra, M., "Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 39 (10), 1632-1637, (2008).

Singh, B., and Gupta, M., "Natural Fiber Composites for Building Applications", (Eds: Mohanty, A. K., Misra, M., and Drzal, L. T.) *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*, Boca Raton: CRC Press, 261-291, (2005).

Sixta, H., Potthast, A. and Krottschek, A. W., "Chemical Pulping Processes", (Ed: Sixta, H.) *Handbook of Pulp*, New York: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 111-113, (2006).

Sreekala, M. S., Kumaran, M. G., and Thomas, S., "Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties", *J. Appl. Polym. Sci.*, 66 (5), 821-835, (1997).

Sreekala, M. S., Thomas, S., and Neelakantan, N. R., "Utilization of short oil palm empty fruit bunch fiber as a reinforcement in phenol-formaldehyde resins: studies on mechanical properties", *J. Polym. Eng.*, 16 (1), 265-294, (1996).

Substech, "Compression molding of polymers [online]", (2 October 2018), http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=compression_molding_of_polymers, (2014).

Suciu, P., "Pulp nonfiction the paper helmet [online]", (24 May 2015), <http://www.bikeradar.com/commuting/news/article/pulp-nonfiction-the-paper-helmet-37951/>, (2013).

Suddell, B. C., and Evans, W. J., "Natural fiber composites in automotive applications", (Eds: Mohanty, A. K., Misra, M., and Drzal, L. T.) *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*, Boca Raton: CRC Press, 231-261, (2005).

Thakur, V. K., *Green Composites from Natural Resources*, Boca Raton: CRC Press, (2014).

Thunwall, M., Boldizar, A., Rigdahl, M., Banke, K., Lindström, T., Tufvesson, H., and Högman, S., "Processing and properties of mineral-interfaced cellulose fibre composites", *J. Appl. Polym. Sci.*, 107 (2), 918-929, (2008).

Tonoli, G. H. D., Savastano, H., Fuente, E., Negro, C., Blanco, A., and Lahr, F. R., "Eucalyptus pulp fibres as alternative reinforcement to engineered cement-based composites", *Ind. Crops Prod.*, 31 (2), 225-232, (2010).

Tsukrov, I., "Materials World Network: Multi-Scale Study of Chemical Vapor Infiltrated Carbon/Carbon Composites [online]", (25 December 2017), <http://www.unh.edu/cc-composites/>, (2012).

WebAnonim1, "1001 Crash - Aviation safety and plane crash investigation [online]", (15 October 2017), <https://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>, (2011).

WebAnonim2, "Wooden House with WPC Composite Wall [online], (12 October 2018), <https://hohecotech.en.made-in-china.com/productimage/ONyQuLfHHGVp-2f1j00vdLTSZKypjcI/China-Natural-Fiber-Composite-Wall-Panels.html>, (2007).


Wood, K., "Composites World [online]", (23 December 2017), <https://www.compositesworld.com/articles/ceramic-matrix-composites-heat-up/>, (2013).

Xu, H., Li, Y., Brinson, C., and Chen, W., "A descriptor-based design methodology for developing heterogeneous microstructural materials system", *J. Mech. Des.*, 136 (5), 51007, (2014).

EKLER

7. EKLER

EK A – Reçine ve Sertleştiricisi

<p>Advanced Materials</p> <p>Araldite® LY 1564* / Aradur® 3487*</p> <p>WARM CURING EPOXY SYSTEM</p> <p>Araldite® LY 1564 Aradur® 3486 (formulated amine hardener) Aradur® 3487 (formulated amine hardener)</p>		 <p>Enriching lives through innovation</p>	
APPLICATIONS	Industrial composites		
PROPERTIES	Laminating system with low viscosity and high flexibility. The reactivity may easily be adjusted to demands through the combination of both hardeners. The long pot life of XB 3486 facilitates the production of very large industrial parts. The systems are qualified by Germanischer Lloyd.		
PROCESSING	<ul style="list-style-type: none"> • Resin Transfer Moulding (RTM, SCRIMP) • Wet lay-up • Filament Winding 		
PRODUCT DATA	Araldite® LY 1564		
	Aspect (visual)	clear liquid	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	1200 - 1400**	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.1 - 1.2	[g/cm ³]
	Epoxy index (ISO 3001)	5.9 - 6.05**	[Eq/kg]
	Aradur® 3487		
	Aspect (visual)	clear colourless to slightly yellow liquid	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1B)	30 - 70	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	0,98 - 1,0	[g/cm ³]
	Amine value (ISO 9702)**	9,30 - 10,20	[Eq/kg]
STORAGE	<p>Provided that Araldite® LY 1564 SP and Aradur® 3486 or Aradur® 3487 are stored in a dry place in their original, properly closed containers at the storage temperatures mentioned in the MSDS they will have the shelf lives indicated on the labels. Partly emptied containers should be closed immediately after use.</p>		
<p><small>** Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.</small></p>			

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Engin Sarıkaya
Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli, Çivril – 25.03.1982
Lisans Üniversite : İstanbul Teknik Üniversitesi
Y. Lisans Üniversite (varsa) : Pamukkale Üniversitesi
Elektronik posta : enginsarikaya@gmail.com
İletişim Adresi : Yenişehir Mah., Merkezefendi, Denizli

Yayın Listesi :

- Meran, C., and Sarıkaya, E., “Investigation of the effects of various surface treatments on properties of plastic mould steels X40CrMoV5-1”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 55(1), 54-58, (2012).
- Sekercioglu, T., Sarıkaya, E., and Asi, O., “Experimental and Numerical Failure Analysis of Vertical Rods Used in Paper Molding Machine”, Journal of failure analysis and prevention, 13(5), 607-612, (2013).
- Sarıkaya, E., Çallioğlu, H., and Demirel, H., “Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties”, Composites Part B: Engineering, 167, 461-466, (2019).