

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAZALT ELYAF TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA) KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Murat KAYA

MAYIS 2016
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

**BAZALT ELYAF TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA) KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Murat KAYA

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 / 05 / 2016

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 06 / 2016

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ASLAN

Trabzon 2016

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Murat KAYA Tarafından Hazırlanan**

**BAZALT ELYAF TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA) KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 07 / 06 / 2016 gün ve 1656 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa ASLAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mürşit TUFAN

H. Çuvalcı
M. Aslan
M. Tufan

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Teknolojinin ilerlemesiyle önemi daha çok artmaya başlayan kompozit malzeme sektörünün en önemli sorunlarından biri, şüphesiz yaygın kullanılan kompozit hammaddelerinin, yenilenemeyen petrol kaynaklı olmasıdır. Bu sorun araştırmacıları doğal kaynaklardan elde edilebilecek, sürdürülebilir hammaddeleri aramaya yönlendirmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmada, doğal kaynaklardan elde edilen polimer ve elyaf kullanılarak üretilen termoplastik polimer matrisli kompozit malzeme üretimi yapılmış ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Öncelikle bu çalışmanın her aşamasında bana yardımcı olan ve yakın ilgisini esirgemeyip değerli fikirleriyle beni yönlendiren danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa ASLAN'a teşekkürlerimi arz ederim.

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli hocalarıma, araştırma görevlilerine çalışmalarında gösterdikleri ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Başta, bu çalışmanın başından itibaren yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Ertuğrul Gazi KAYMAZ olmak üzere bölümümüzdeki tüm yüksek lisans öğrencisi arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamın üretim aşamasında laboratuvarını açıp yardımlarını esirgemeyen Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Endüstri Mühendisliği'nden sayın Yrd. Doç. Dr. Mürşit TUFAN'a ve yüksek lisans öğrencisi Uğur ÇUKUR'a sonsuz teşekkür ederim.

Sevgili annem ve babam ve değerli ağabeylerim olarak bu zorlu süreçte bana maddi ve manevi destek olan tüm aileme yürekten teşekkürlerimi sunarım.

Murat KAYA

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bazalt Elyaf Takviyeli Polilaktik Asit (PLA) Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mustafa ASLAN’ ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/06/2016

Murat KAYA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IIIV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Kompozit Malzemeler	2
1.3. Termoplastik Polimer Matrisler.....	3
1.4. Polilaktik Asit (PLA)	4
1.4.1. Polilaktik Asit (PLA) Üretimi	5
1.4.2. Polilaktik Asitin (PLA) Mekanik Özellikleri	6
1.4.3. Polilaktik Asitin (PLA) Kullanım Alanları.....	8
1.5. Doğal Lifler	8
1.6. Bazalt Elyaf	9
1.6.1. Bazalt Elyaf Üretimi	10
1.6.2. Bazalt Elyafın Mekanik Özellikleri	11
1.6.3. Bazalt Elyaf Kullanım Alanları	12
1.7. Kullanılan Üretim Yöntemleri.....	13
1.7.1. Tek Vidalı Ekstrüderle Harmanlama	13
1.7.2. Basınçlı Kalıplama.....	15
1.8. Literatür Çalışmalarının Özeti ve Çalışmanın Amacı	16
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	22
2.1. Kullanılan Malzemeler	22
2.2. Numune Üretimi	23
2.3. Testlerin Yapılışı	29
2.3.1. Yoğunluk Testi	29
2.3.2. Çekme Testinin Yapılması	29
2.3.3. Eğilme Testinin Yapılması	30

2.3.4.	Darbe Testinin Yapılması	31
2.3.5.	Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	32
3.	BULGULAR.....	33
3.1.	Yoğunluk Testi Sonuçları	33
3.2.	Çekme Testi Sonuçları.....	34
3.3.	Eğilme Testi Sonuçları	35
3.4.	Darbe Testi Sonuçları	36
3.5.	Kırılma Yüzeyi Görüntüleri.....	37
4.	İRDELEME	42
4.1.	Elyaf Boyutu ve Elyaf Kaplamasının Mekanik Özelliklere Etkisi	42
4.1.1.	Yoğunluk Testi	42
4.1.2	Çekme Testi	43
4.1.3	Eğilme Testi.....	45
4.1.4.	Darbe Testi.....	47
4.1.5.	Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	48
4.2.	Elyaf Ağırlık Oranının Malzeme Özelliklerine Etkisi.....	48
4.2.1.	Yoğunluk Testi	48
4.2.2.	Çekme Testi	49
4.2.3.	Eğilme Testi.....	51
4.2.4.	Darbe Testi.....	53
4.2.5.	Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	54
5.	SONUÇLAR.....	55
6.	ÖNERİLER.....	56
7.	KAYNAKLAR	57

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

BAZALT ELYAF TAKVİYELİ POLİLAKTİK ASİT (PLA) KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Murat KAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa ASLAN
2016, 61 Sayfa

Bu çalışmada termoplastik polimer esaslı bir grup kompozit malzeme, basınçlı kalıplama yöntemi ile üretildi. Kompozit malzeme üretiminde, matris malzemesi olarak polilaktik asit (PLA), takviye malzemesi olarak kırılmış bazalt elyaf kullanıldı. Farklı ön işlem ve elyaf oranlarında üretilen kompozit levhalardan çıkarılan deney numuneleri üzerinde mekanik ve fiziksel deneyler yapılarak söz konusu numunelerin çekme mukavemeti, darbe mukavemeti, elastisite modülü, % uzama ve yoğunluk gibi değerleri belirlendi. Bunun yanında çekme deney numunelerinin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelendi.

Yapılan çalışmalar sonucunda elyaf boyutunun, elyaf kaplamasının ve elyaf ağırlık oranının artışının kompozit malzemelerin çekme, eğilme ve darbe mukavemetlerini arttırdığı ancak % 45 ağırlık oranının üzerindeki elyaf katkısının bu özellikleri olumsuz yönde etkilediği gözlemlendi. Öte yandan elyaf hacim oranı arttıkça üretilen kompozit malzemelerin elastisite modüllerinin sürekli arttığı belirlendi.

Deneyler sonucunda en üstün mekanik özelliklere sahip malzemenin % 45 ağırlık oranında kaplama yapılmış bazalt elyaf içeren kompozit malzemenin olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler : Kompozit Malzeme, Polilaktik Asit(PLA), Bazalt Elyaf

Master Thesis

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF BASALT FIBER REINFORCED POLYLACTIC ACID (PLA) COMPOSITESS' MECHANICAL PROPERTIES

Murat KAYA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering Graduate Program
Supervisor: Ass. Prof. Mustafa ASLAN
2016, 61 Pages

In this study, a series of thermoplastic polymer based composite materials were produced by compression moulding method. Polylactic acid (PLA) and chopped basalt fiber were used as matrix materials and reinforcement in composites. The experimental specimens which machined from composite materials at different fiber contents, treatments and sizes were used to determine mechanical and physical properties of composite materials such as density, tensile strength, impact strength, percent elongation, elasticity modulus. Also, fracture surfaces of tensile test specimens were examined by a scanning electron microscope (SEM).

It was observed that the mechanical properties of composites increased with the fiber size, fiber treatment and increasing fiber weight fraction,. The mechanical properties of composites decreased when fiber was added more than 45 %. On the other hand, it was found that elasticity modulus of composite materials increased with the increase of fiber volume fraction. As a result of this work, it was determined that the composite material which has 45 % weight fraction and fiber treatment has the best mechanical properties.

Key Words : Composite Materials, Polylactic acid (PLA), Basalt Fiber

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Elyaf takviyeli kompozitlerde liflerin kompozit içerisindeki dizilişi	3
Şekil 2.	Laktik asit ve steroizomerlerinin zincir yapıları	5
Şekil 3.	Kondenzasyon polimerizasyonu ile laktik asitten PLA üretimi	6
Şekil 4.	Laktid birimlerinin halka açılması polimerizasyonu ile PLA üretimi	6
Şekil 5.	(a) Bazalt kayacı ve (b) bazalt taşı.....	10
Şekil 6.	Örnek bir bazalt elyaf üretimi akış şeması	11
Şekil 7.	Bazalt elyafın farklı formları	13
Şekil 8.	Ekstrüderde kullanılan farklı vida tipleri	14
Şekil 9.	Ekstrüder bölümlerinin şematik gösterimi.....	14
Şekil 10.	Tipik bir basınçlı kalıplama cihazı	15
Şekil 11.	Bazalt elyafın üretim sırasındaki farklı formları.....	25
Şekil 12.	Çalışmada kullanılan Rondol marka tek vidalı ekstrüder	26
Şekil 13.	Çalışmada kullanılan Fritsch marka değirmen	27
Şekil 14.	Ekstrüderden çıkan malzemenin görünüşü	27
Şekil 15.	Üretime hazır, öğütülmüş malzeme	28
Şekil 16.	Çalışmada kullanılan basınçlı kalıplama cihazı.....	28
Şekil 17.	Yapılacak testler için hazırlanmış numunelerin görünüşü.....	29
Şekil 18.	Çekme testi düzeneği	30
Şekil 19.	Eğilme testi düzeneği	31
Şekil 20.	Darbe testinin yapıldığı Instron marka Charpy darbe testi cihazı	31
Şekil 21.	Saf PLA'nın SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500	37
Şekil 22.	KB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 250, (b) X 1000.....	37
Şekil 23.	OB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 250, (b) X 1000.....	38
Şekil 24.	KKB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 250, (b) X 500.....	38
Şekil 25.	KOB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 250.....	38
Şekil 26.	% 20 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500.....	39
Şekil 27.	% 25 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500.....	39
Şekil 28.	% 30 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500.....	39
Şekil 29.	% 35 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500.....	40

Şekil 30.	% 40 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500.....	40
Şekil 31.	% 45 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500.....	40
Şekil 32.	% 50 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500.....	41
Şekil 33.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk grafiği	42
Şekil 34.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin çekme mukavemeti grafiği	43
Şekil 35.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin elastisite modülü grafiği	44
Şekil 36.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin yüzde uzama grafiği	45
Şekil 37.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme mukavemeti grafiği.....	45
Şekil 38.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme modülü grafiği	46
Şekil 39.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme miktarı grafiği	47
Şekil 40.	Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti grafiği.....	48
Şekil 41.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk grafiği	49
Şekil 42.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin çekme mukavemeti grafiği.....	49
Şekil 43.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin elastisite modülü grafiği.....	50
Şekil 44.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin yüzde uzama grafiği	51
Şekil 45.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme mukavemeti grafiği	51
Şekil 46.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme modülü grafiği	52
Şekil 47.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme miktarı grafiği.....	53
Şekil 48.	Uzun elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti grafiği	54

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Bazı termoplastik polimerlerin mekanik özellikleri.....	4
Tablo 2. PLA ve farklı türevlerinin bazı mekanik özellikleri.....	7
Tablo 3. PLA ve bazı termoplastiklerin mekanik özellikleri.....	7
Tablo 4. Bazı doğal liflerin mekanik özellikleri.....	9
Tablo 5. Bazaltın kimyasal bileşimi	10
Tablo 6. Bazalt elyafın mekanik özelliklerinin diğer elyaflarla karşılaştırılması.....	12
Tablo 7. Literatür çalışmalarının özet tablosu	20
Tablo 8. Deneysel çalışmalarda kullanılan matris malzemesinin özellikleri	22
Tablo 9. Deneysel çalışmalarda kullanılan elyafın özellikleri	23
Tablo 10. Üretilen kompozitlerin bileşimleri	23
Tablo 11. Üretilen kompozitlerin öğütme tipleri.....	25
Tablo 12. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk değerleri	33
Tablo 13. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk değerleri	33
Tablo 14. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin çekme testi değerleri	34
Tablo 15. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin çekme testi değerleri.....	34
Tablo 16. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme testi değerleri.....	35
Tablo 17. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme testi değerleri	35
Tablo 18. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti değerleri.....	36
Tablo 19. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti değerleri	36

SEMBOLLER DİZİNİ

PLA	: Polilaktik Asit
PLLA	: Poli-L Laktik Asit
PDLA	: Poli-D Laktik Asit
M _w	: Molekül Ağırlığı
HRF	: Rockwell F Sertlik Skalası
PA	: Poliamid
PE	: Polietilen
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PI	: Poliimid
PES	: Polieter Sülfon
PPS	: Polifenilen Sülfid
PEEK	: Polieter Eter Keton
PEKK	: Polieter Keton Keton
PEI	: Polieterimid
PBS	: Polibütilen Süksinat
SEM	: Scanning Electrone Microscope
°C	: Celcius Derece
%	: Yüzde
m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre

m ²	: Metrekare
MPa	: Mega Pascal
Gpa	: Giga Pascal
cm ³	: Santimetreküp
gr	: Gram
N	: Newton
kJ	: Kilo Joule
KB30	: Kısa Boyutlu Bazalt Elyaf İçeren Numune
OB30	: Orta Boyutlu Bazalt Elyaf İçeren Numune
KKB30	: Kısa Boyutlu Kaplanmış Bazalt Elyaf İçeren Numune
OKB30	: Orta Boyutlu Kaplanmış Bazalt Elyaf İçeren Numune
UKB20	: %20 Uzun Bazalt Elyaf İçeren Numune
UKB25	: %25 Uzun Bazalt Elyaf İçeren Numune
UKB30	: %30 Uzun Bazalt Elyaf İçeren Numune
UKB35	: %35 Uzun Bazalt Elyaf İçeren Numune
UKB40	: %40 Uzun Bazalt Elyaf İçeren Numune
UKB45	: %45 Uzun Bazalt Elyaf İçeren Numune
UKB50	: %50 Uzun Bazalt Elyaf İçeren Numune

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Eski çağlardan başlayarak insanlar, hayatlarını kolaylaştırmak için çeşitli malzemeler kullanmışlardır. Kullandıkları bu malzemeleri zamanla geliştirmiş ve gittikçe daha iyi özelliklere sahip malzemeler elde etmişlerdir. Kullanılan bu malzemeleri temel olarak metaller, seramikler ve polimerler olarak üçe ayırabiliriz. Bu malzemelerin ikisinin ya da daha fazlasının beraber kullanıldığı malzemelere ise kompozit malzemeler denir.

Kompozit malzemeler, iki ve ya daha fazla malzemenin birleştirilerek daha üstün özellikler taşıyan yeni bir malzeme elde edilmesiyle oluşur. Kompozit malzemeyi oluşturan malzemeler farklı kimyasal yapıya sahiptirler. Bu malzemeler arasında bir arayüzey bulunur [2].

Elyaf takviyeli kompozitler, kompozit malzemeler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bu tür kompozitlere ileri teknoloji kompozitleri de denilmektedir. Bunlar elastisite modülü ve mukavemeti yüksek elyaflar kullanılarak üretilmektedirler. Diğer kompozitlere göre oldukça yüksek mukavemet ve rijitliğe sahiptirler [3].

Kompozit malzemeler polimer malzemelerle birlikte farklı bir önem kazanmışlardır. Gündelik eşyalar için yeterli dayanımları, düşük maliyet ve ağırlıklarıyla polimerler, daha önce farklı malzemelerin kullanıldığı alanlar için önemli bir alternatif haline gelmiştir [4].

Polimerler, termoset ve termoplastik olmak üzere iki temel gruba ayrılırlar. Termosetler kurluşerek son hallerini alırlar. Yeniden ergitilip kullanılamazlar. Genelde rijittirler ve düşük esnekliğe sahiptirler. Bunun nedeni yapılarında bulunan çapraz bağlardır. Termoplastikler genelde esnek malzemelerdir. Bu malzemeler yeniden ergitilip şekillendirilebilirler [4].

Polimer malzemelerin bu avantajlarıyla birlikte en önemli dezavantajları petrol kaynaklı olmalarıdır. Çünkü; petrol kaynaklarının gün geçtikçe daha çok azalması ve buna bağlı fiyat artışı ve ayrıca bu malzemelerin doğada bozunur olmamasıyla çevre kirliliğine neden olması, araştırmacıları doğal kaynaklardan elde edilebilecek, sürdürülebilir ve doğada bozunabilen malzemeler aramaya sevk etmektedir. Bu biyobozunur malzemeler doğada çokça bulunduğu ve ucuz olmaları sebebiyle alternatif bir hammadde olarak tercih edilmektedirler [5].

Polilaktik asit (PLA), yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, biyobozunur, alifatik bir termoplastik türüdür. Bu yüzden petrol kaynaklı polimerler için iyi bir alternatiftir. PLA iyi mekanik özelliklere sahip bir malzemedir ve ambalaj sektöründen otomotive birçok alanda kullanılmaktadır [6,7].

1.2. Kompozit Malzemeler

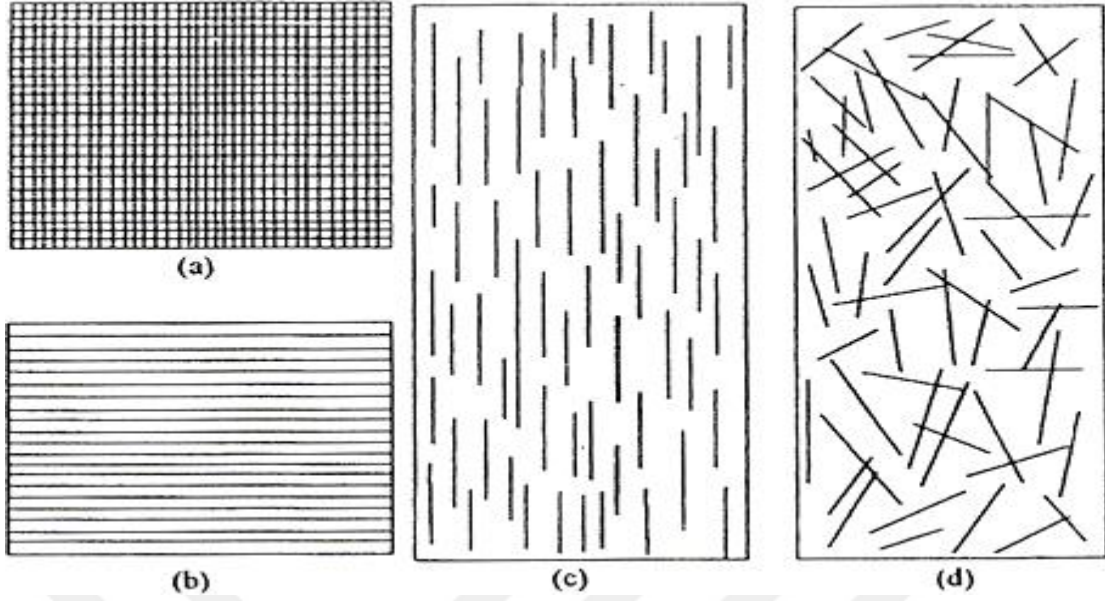
Kompozit malzemeler matris ve takviye edici lif olmak üzere iki temel bileşenden meydana gelir.

Matrisin görevi; içindeki takviye edici lifleri bir arada tutmak ve onların malzeme üzerine gelen yüke karşı koyabilmesine yardımcı olmaktır. Kompozit malzemeye gelen tüm yükler matris yoluyla takviye elemanına aktarılır. Matris aynı zamanda kullanılan takviye malzemelerini birbirinden izole ederek, kompozit malzemeye daha fazla destek verebilmelerini sağlar. Genelde katı malzeme olan takviye malzemelerin her birinin matris içerisinde ayrı bir girdi gibi davranmaları toplamda oluşturdukları destekten daha fazla destek üretmelerini sağlar. Böylece malzeme üzerindeki boşluklar birbirine temas eden takviye edicilerin üzerinden ilerleyemez [8].

Elyaf takviyeli kompozitlerde, iki temel yapıdan biri olan elyaf, yüksek mukavemetli ve rijittir. Bu tür malzemelerin özellikleri açısından en önemli parametreler, elyaf yönlenmesi, elyaf hacim oranı ve lif-matris ara yüzey özellikleridir. Kullanılan matris malzemesi ve takviye elemanının çeşidi yanında, bu üç parametre, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerdir. Şekil 1’de farklı tip elyaf dizilişleri gösterilmiştir [15].

Bir kompozit malzemedeki takviye edicinin görevi; kompozit malzeme içindeki mekanik dayanım, rijitlik ve diğer mekanik özelliklerini sağlamaktır. Kompozit malzeme üzerine gelen yük lif-matris arayüzeyi tarafından lifler üzerine transfer edilmektedir. Uygulanan yükün %70-90’ı lifler tarafından taşınmaktadır. Lifler, mekanik özelliklerin yanı sıra ısı genleşme, iletkenlik, ısı taşıma katsayısı üzerinde de etkindirler. Elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak cam, karbon ve aramid elyafları kullanılırlar [25,15].

Fakat bu elyaf tiplerinin tamamının petrol kaynaklı olmaları araştırmacıları doğal kaynaklardan elde edilebilecek elyaf çeşitlerini araştırmaya yöneltmiştir. Bu liflere örnek olarak doğal lifler ve mineral lifleri örnek gösterilebilir.



Şekil 1. Elyaf takviyeli kompozitlerde liflerin kompozit içerisindeki dizilişi; a) Örgülü elyaf takviyeli, b) Sürekli elyaf takviyeli, c) Yönlendirilmiş süreksiz elyaf takviyeli, d) Gelişigüzel dağılmış süreksiz elyaf takviyeli kompozitler [15]

1.3. Termoplastik Polimer Matrisler

Termoplastik polimerler, birbirine kovalent bağla bağlı, çok uzun molekül zincirleri halinde bulunan malzemelerdir. Isıtıldıklarında moleküller arasındaki kuvvetler zayıflar ve birbirlerinden ayrılırlar. Bu özellikleri kolayca şekillendirilebilmelerini sağlar. Bu işlem polimer malzeme yeniden ısıtılarak defalarca tekrarlanabilir. Dolayısıyla bu polimerler tekrar kullanım ve düşük enerji maliyetleri nedeniyle büyük avantaj oluşturmaktadır. Ayrıca imalat sonrası termoset polimerler gibi bir kütleme işlemine gereksinimleri olmaması da seri üretime olanak sağlar [27].

Termoplastikler, matris olarak termosetlere göre daha az kullanılsa da yüksek darbe tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmaması gibi avantajları bulunmaktadır. Termoplastik malzemeler, üretimin zorluğu ve yüksek maliyet gibi sebeplerle kompozit malzeme üretiminde termosetlere göre daha az tercih edilmekle birlikte; artık bu problemler çözülerek daha hızlı ve hatasız üretimlere geçilmiştir [27].

Termoplastikler kullanım alanlarına göre üç grupta toplanabilir.

Genel Kullanım Termoplastikleri: Bu termoplastikler genelde uzun ve kısa elyaf takviyeleriyle kullanılırlar. Ucuz olmaları, kolay işlenebilmeleri ortak özellikleridir.

- Polipropilen (PP)
- Poliamid (naylon) (PA)
- Polietilen (PE)
- Polistiren (PS)

Mühendislik Termoplastikleri: İleri teknoloji termoplastik matrislerdir.

- Poliimid (PI)
- Polieter Sülfon (PES)
- Polifenilen Sülfid (PPS)

Yüksek Performans Termoplastikleri: Yüksek erime sıcaklığına sahiptirler.

- Polieter Sülfon (PES)
- Polieter Eter Keton (PEEK)
- Polieter Keton Keton (PEKK)
- Polieterimid (PEI) [28]

Tablo 1. Bazı termoplastik polimerlerin mekanik özellikleri [28]

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Modülü (GPa)	% Uzama
PP	0,937	36,8	1,9	1,4	120
PEEK	1,33	110	4,5	4,8	37
PA6	1,12	72,6	1,9	2	94
PES	1,4	87,4	3,7	4,3	30

1.4. Polilaktik Asit (PLA)

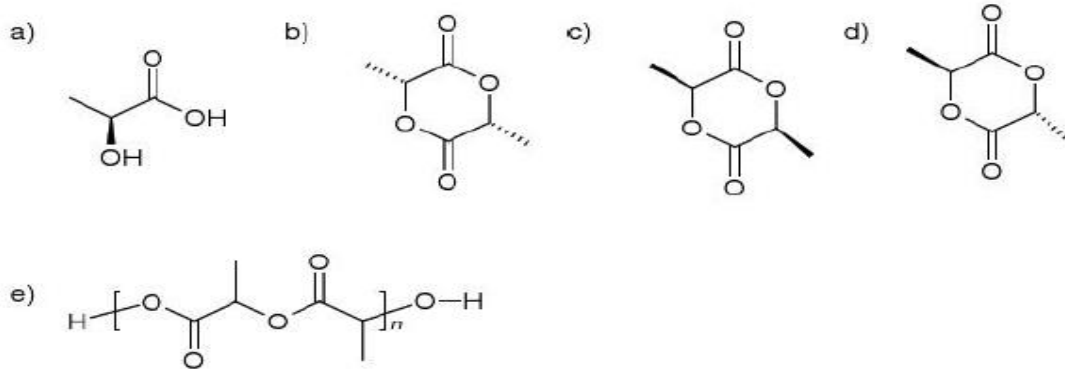
Bu çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan polilaktik asit (PLA); termoplastik, alifatik bir polyester türüdür. PLA, diğer biyobozunur malzemelere kıyaslandığında iyi özelliklere sahiptir ve petrol bazlı polimerlerin yerine geçmeye adaydır. PLA, enjeksiyon

kalıplama, ekstrüzyon gibi geleneksel termoplastik üretim yöntemleriyle üretilen bir polimerdir. Yüksek elastisite ve mukavemet değerlerine sahiptir. PLA oda sıcaklığında polistirene (PS) yakın bir mukavemete sahiptir. Bu iyi özellikleriyle birlikte düşük ergime sıcaklığı, düşük darbe direnci ve gevreklik PLA'nın kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır [10].

1.4.1. Polilaktik Asit (PLA) Üretimi

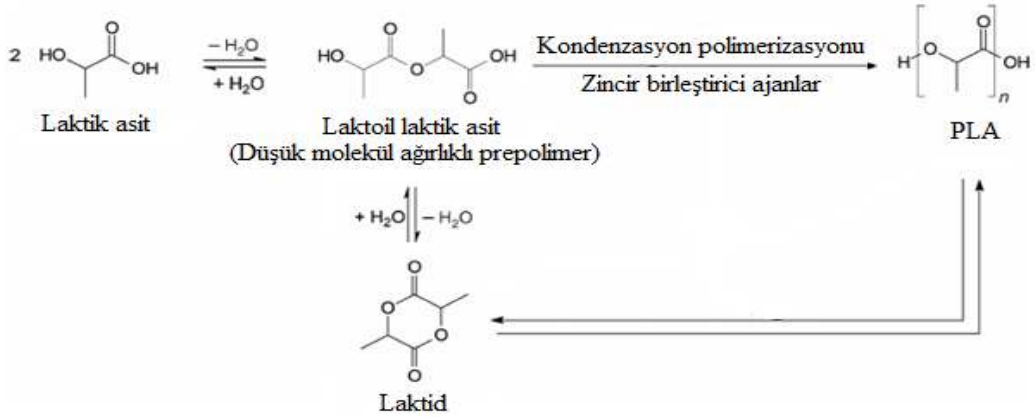
PLA'nın en küçük birimi olan laktik asit; mısır, şeker kamışı gibi karbonhidratların fermantasyonuyla elde edilir. Laktik asit iki stereoizomer; D-laktid, L-laktid, ve D,L-laktid (mezolaktid) olmak üzere üç adet forma sahiptir. Şekil 2'de laktik asit ve stereoizomerlerinin zincir yapıları gösterilmiştir [1,9].

Poli l-laktik asit yarı kristalin, poli d-laktik asitse amorf yapıya sahiptir [10]. PLA, monomeri olan laktik asitin kondenzasyon polimerizasyonu veya halkalı yapıda bulunan dimer laktidin katalitik halka açılması reaksiyonu ile meydana getirilebilmektedir [1,11,12].

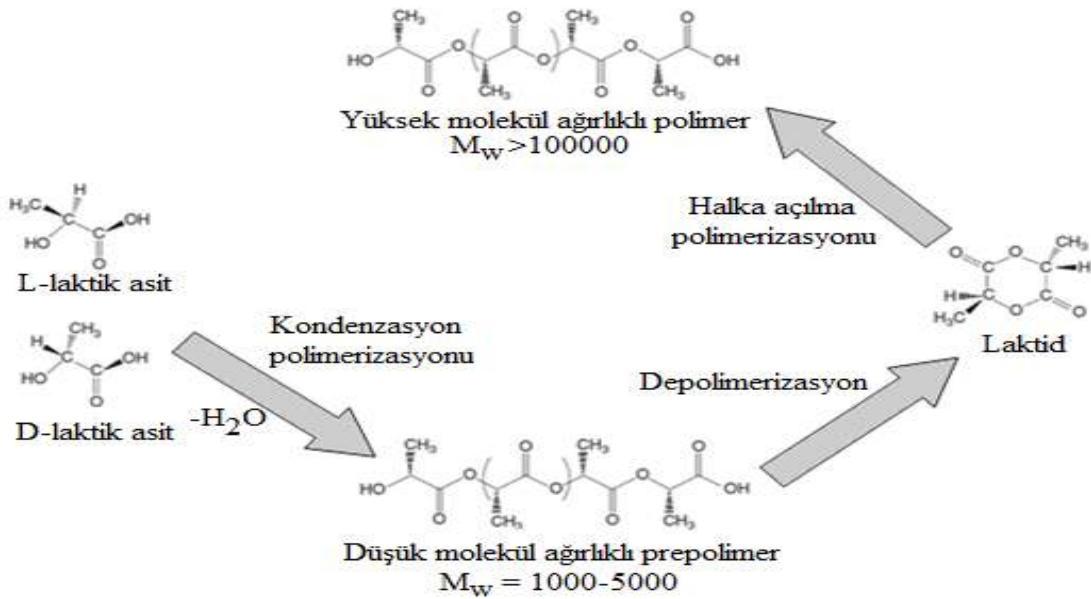


Şekil 2. Laktik asit ve stereoizomerlerinin zincir yapıları; a)laktik asit b)d-laktid c)l-laktid d)d,l-laktid e)polilaktik asit

Şekil 3'te gösterilen kondenzasyon polimerizasyonunun ilk basamağında lineer dimer (laktoil laktik asit) oluşmaktadır. Bu aşamayı oligomer oluşumu takip etmekte ve bu sırada su açığa çıkmaktadır. Aynı anda düşük oranlarda halkalı yapıdaki dimer (laktid) de oluşmaktadır. Laktid, laktoil laktik asitin molekül içi esterifikasyonu veya oligomerlerin parçalanması ile oluşmaktadır [1,12].



Şekil 3. Kondenzasyon polimerizasyonu ile laktik asitten PLA üretimi [1,12]



Şekil 4. Laktid birimlerinin halka açılması polimerizasyonu ile PLA üretimi [1,12]

1.4.2. Polilaktik Asitin (PLA) Mekanik Özellikleri

PLA, polistirene (PS) yakın mekanik özelliklere sahiptir. PLA yaklaşık 50-70 MPa çekme mukavemeti ve 3-4 GPa elastisite modülüne sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı

ambalajdan konteynıra kadar birçok alanda kullanılır. Bununla birlikte düşük yüzde uzama miktarı ve oda sıcaklığında gevrek olması PLA kullanımını sınırlandırmaktadır [10].

PLA'nın mekanik özellikleri içerdiği D-laktid ve L-laktid oranına bağlıdır. Yarı kristalin olan L-laktid oranı arttıkça rijitlik artar ve darbe direnci azalır. D-laktid ise amorf olduğundan tam ters bir etki oluşturur [10].

Tablo 2. PLA ve farklı türevlerinin bazı mekanik özellikleri [29]

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	% Uzama
PLA	21	0,35	2,5
PLLA (Poli l-laktik Asit)	15,5	2,7	3
PDLA (Poli d,l-laktik Asit)	27,6	1	2

PLA'nın mekanik özelliklerini belirleyen bir diğer unsur da molekül ağırlığıdır. Molekül ağırlığı arttıkça mekanik özelliklerin arttığı görülmüştür [10].

Tablo 3. PLA ve bazı termoplastiklerin mekanik özellikleri [1,13,14]

Polimer Türü	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Çentikli Izod Darbe Mukavemeti (kJ/m ²)	% Uzama
PLA	66	3.8	3.7	25	4
PS	40	3.4	3.3	28	2
PP	40	1.4	1.5	80	400
HDPE	15	1	0.8	128	600

1.4.3. Polilaktik Asitin (PLA) Kullanım Alanları

PLA kendine has özelliklerinden dolayı yaygın kullanılan petrol esaslı termoplastiklerin yerini alabilecek bir potansiyele sahiptir. PLA bardak, şişe ve ambalaj filmleri için uygundur. Tabak, kapak, su ve soğuk içecek şişeleri gibi rijit termoform ürünlerde de PLA kullanılır. PLA düşük nem absorpsiyonu ve düşük alev alma özelliği sayesinde tekstil lifi olarak da kullanılabilir. PLA, ultraviyole ışınlarına dirençli olduğundan dışmekan uygulamalarında da kendine yer bulur. Lif uygulamaları gömlekler, mobilya, dokumalar, halılar, yastıklar, perdeler, iç giyim ve spor giyim gibi alanları içerir. PLA'nın gelecekte ulaşım ve yapı, elektronik cihazlar gibi alanlarda kullanılacağı tahmin edilmektedir [10].

1.5. Doğal Lifler

Doğal lifler, doğal kaynaklardan (bitkisel, hayvansal, mineral vb.) elde edilen geri dönüşüm sorunu olmayan liflerdir. Son yıllarda çevresel kaygıların artması birçok alanda doğal liflerin kullanımının önünü açmıştır. Karbon ve cam elyaf gibi yüksek mekanik özellikler gösterememeleriyle beraber düşük mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler. Doğal liflerden kullanım alanı ve miktarı açısından en çok kullanılanları bitkisel kaynaklı doğal liflerdir. Bunlara keten, kenevir, kenaf, jüt ve sisal lifleri örnek gösterilebilir. Bu liflerin en önemli avantajları, doğal kaynaklı olmaları ve buna bağlı olarak üretimlerinin kolay ve ucuz olması, düşük yoğunluklarıyla birlikte özgül mekanik değerlerinin diğer liflerle kıyaslanabilir olmasıdır. Bu avantajlarıyla birlikte üretim şartlarına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişkenlik göstermesi ve liflerin şişmesine sebep olan su emme özellikleri bitkisel doğal lif kullanımını sınırlandırmaktadır [30]. Tablo 4'te bazı bitkisel doğal liflerin mekanik özellikleri gösterilmiştir [30,31].

Tablo 4. Bazı doğal liflerin mekanik özellikleri [30,31]

LİF TİPİ	YOĞUNLUK (g/cm ³)	ÇEKME MUK. (MPa)	ELASTİSİTE MOD. (GPa)	% UZAMA
KETEN	345 - 1035	27,6	2,7 - 3.2	1,5
KENEVİR	690	70	1,6	1,48
JÜT	393 - 773	26,5	1,5 - 1,8	1,3
KENAF	930	53	1,6	-
SİSAL	511-635	9,4 - 22	2 - 2,5	1,5

1.6. Bazalt Elyaf

Polimer kompozitlerde kullanılan önemli elyaflardan biri de bazalt elyafıdır. Bazalt elyafın en önemli özelliği şüphesiz mineral kaynaklı olmasıdır. Bazalt elyaf, volkanik bazalt kayacının çekilmesiyle elde edilir. Bazalt yerkabuğunda bol miktarda bulunur. Bazalt elyaf cam lifine benzer kimyasal bileşenlere sahip olmakla birlikte daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir [17,18]. Bazalt mükemmel ısıl dayanıma sahip, biyolojik olarak inert ve doğaya uyumlu bir elyafıdır [19,20,21]. Bazaltın en önemli bileşenleri; SiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO ve demir oksitler FeO ve Fe₂O₃'dur [22,23]. Tablo 5'te örnek bir bazalt bileşimi verilmiştir.

Bazaltın rengi kahverenginden koyu yeşile değişir. Erime sıcaklığı 1350-1700°C arasındadır. Yoğunluğu yaklaşık 2,7 g/cm³'tür. Bazalt elyaf bu özelliklerinden dolayı sivil mimariden askeri uygulamalara kadar çok farklı alanlarda kullanılmaktadır [16,24,19].

Tablo 5. Bazaltın kimyasal bileşimi [36]

Mineral	% Ağırlık
SiO ₂	52,8
Al ₂ O ₃	17,5
Fe ₂ O ₃	10,3
MgO	4,63
CaO	8,59
Na ₂ O	3,34
K ₂ O	1,46
TiO ₂	1,38
P ₂ O ₅	0,28
MnO	0,16
Cr ₂ O ₃	0,06



a)



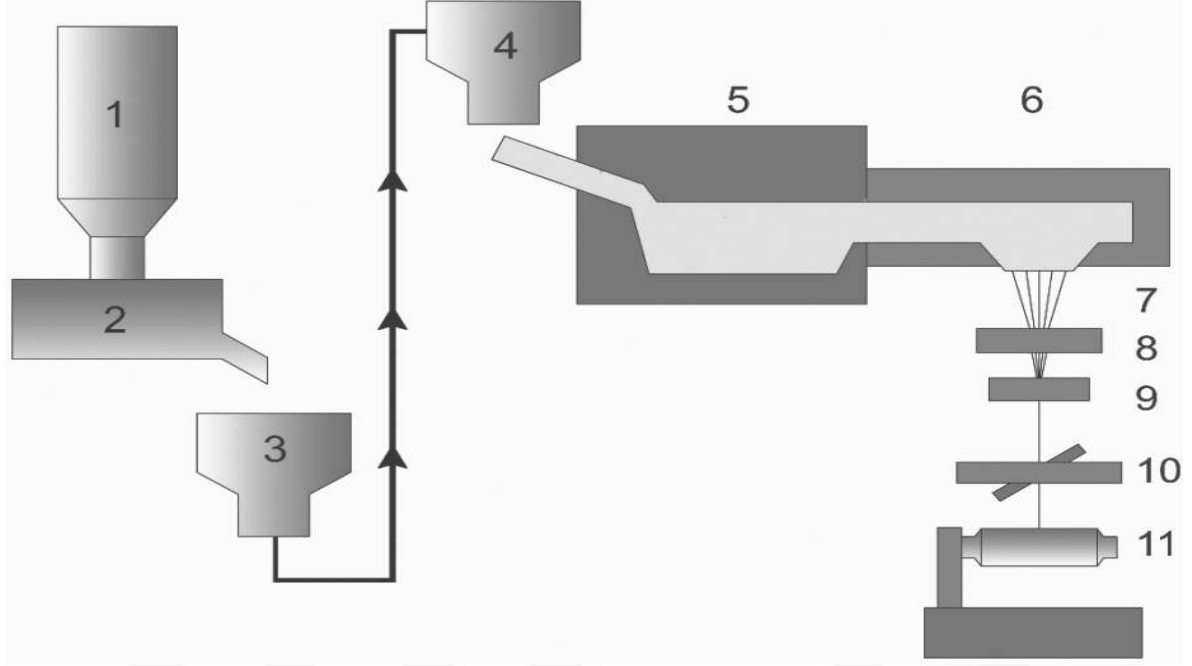
b)

Şekil 5. (a) Bazalt kayacı ve (b) bazalt taşı [32,33]

1.6.1. Bazalt Elyaf Üretimi

Bazalt elyafı temel olarak iki şekilde üretilir. Bunlarda ilki Junker metodudur. Bu metotta kısa bazalt elyafları üretilir. Uzun bazalt elyaf üretim metodu cam elyaf üretimine benzer. Bazalt elyaf üretimi bazalt kayacının kırılıp yıkanmasıyla başlar. Daha sonra kurutma işlemi uygulanan kayaç direkt fırına beslenir. Ergimiş bazalt hızlı bir şekilde

soğuyarak tamamen amorf yapıya dönüşür. Ergiyik haldeki bazalt üstünde yüzlerce mikro delik bulunan platin burca doğru beslenir. Bu deliklerin akışı sayesinde bazalt sürekli elyaf halinde çekilir. Elyaf çapı, deliklerin çapı ve eriyiğin vizkositesiyle kontrol edilir. Çekilen elyaflar su yardımıyla soğutulur ve katılaştırılır [25,26,34].



Şekil 6. Örnek bir bazalt elyaf üretimi akış şeması; 1) Öğütülmüş kaya silosu 2) Yükleme istasyonu 3) Taşıma sistemi 4) Yığın şarj istasyonu 5) İlk ergime bölgesi 6) İkinci ısıtma bölgesi ve hassas sıcaklık kontrolü 7) Filament biçimlendirme burcu 8) Boyutlandırma aleti 9) Demet biçimlendirme istasyonu 10) Elyaf germe istasyonu 11) Otomatik sarma istasyonu [34]

1.6.2. Bazalt Elyafın Mekanik Özellikleri

Bazalt elyaf üretimi zor olmakla birlikte iyi mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptir. Mekanik özellikleri karbon ve cam elyaf arasında olmasının yanında fiyatı da uygundur. Tablo 6'da bazaltın diğer elyaf tipleriyle kıyaslaması yapılmıştır. Bazalt elyafı E-camı elyafından daha iyi çekme mukavemeti ve karbon elyaftan daha iyi kopma uzamasına sahiptir. Bununla birlikte kimyasal etkilere, darbeye ve aleve dayanıklıdır [35].

Bazalt elyafı $2,6-2,8 \text{ gr/cm}^3$ gibi düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu özelliğiyle cam ve karbona yakın bir yoğunlukta ve çeliğe göre çok hafiftir. Bazaltın sertliği Mohr skalasına

göre 5-9 arasında değişir. Elmasın sertliğinin 10 olduğu göze alınırsa bazaltın aşınma direncinin çok iyi olduğu söylenebilir [35].

Tablo 6. Bazalt elyafın mekanik özelliklerinin diğer elyaflarla karşılaştırılması [36]

Özellikler	Bazalt Elyaf	E-Camı Elyafı	S-Camı Elyafı	Karbon Elyaf
Çekme Mukavemeti (MPa)	3000 - 4840	3100 - 3800	4020 - 4650	3500 - 6000
Elastisite Modülü (GPa)	79,3 - 93,1	72,5 - 75,5	83 - 86	230 - 600
Kopma Uzaması (%)	3,1	4,7	5,3	1,5 - 2
Elyaf Çapı (µm)	6 - 21	6 - 21	6 - 21	5 - 15
Çizgisel Yoğunluk (Teks)	600 - 4200	40 - 4200	40 - 4200	60 - 2400
Kullanım sıcaklığı (°C)	-260.....+700	-50.....+380	-50.....+300	-50.....+700

1.6.3. Bazalt Elyaf Kullanım Alanları

Bazaltın radyasyondan etkilenmemesi sebebiyle nükleer ürünlerin üretimi ve taşınmasında kullanılabilecek iyi bir alternatiftir. Bu özelliğinden dolayı nükleer enerji tesislerinde kullanılması insan sağlığı ve çevre açısından oldukça yararlı olmaktadır [36,37].

Bazalt elyaf, ısı ve aleve dayanıklıdır. Bu özelliğinden dolayı araba koltuklarında ve elektrik kablolarında kullanılır. Uçaklarda radar anten örtüsü (şimşek çarpması karşı) kullanılır [38].

Bazalt elyaf, iyi mekanik özellikleri, matrisle iyi ıslanması ve geri dönüşümlü olması sebebiyle kompozit malzemelerde geniş bir kullanım alanı vardır. Bazalt elyaf, UV

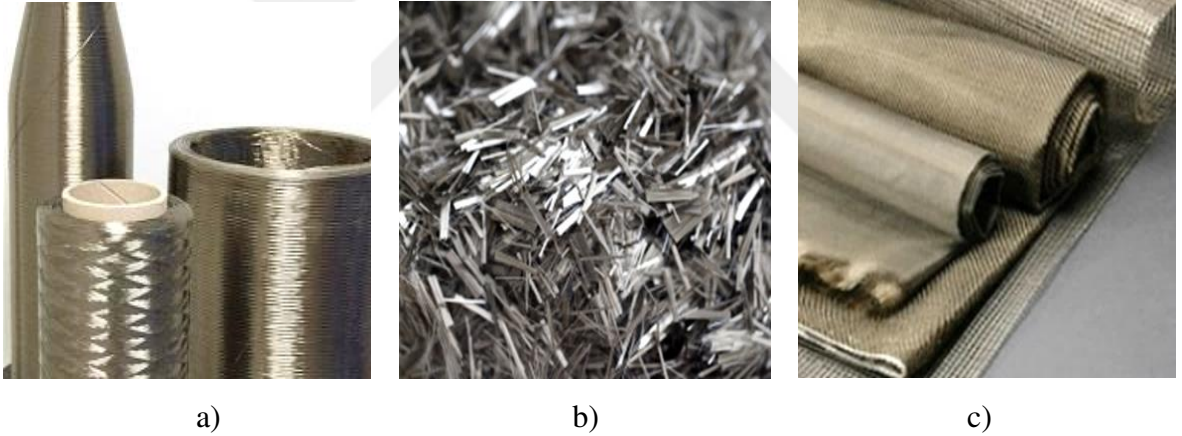
(ultraviyole) direnci, asit direnci, alkali direnci ve düşük su absorpsiyonu özellikleriyle dışmekan uygulamaları için iyi bir seçenektir [38].

Otomotiv sektöründe de iç ve dış paneller, gövde parçaları ve ses yalıtımında bazalt elyaf kullanılmaktadır.

Eğlence ve spor sektöründe de bazalt elyaftan yararlanılır. Örneğin hokey sopaları, tenis racketleri, kayaklar ve yaylar bazalt elyafın kullanım alanlarındandır [38].

Yapı alanlarında da bazaltın geniş bir kullanım alanı vardır. Depreme dayanıklı binalarda, zemin ve temellerde ve harçlarda bazalt elyaf kullanılır. Ayrıca bazalt taşı, kaldırım taşı olarak kullanılır. Bunun dışında mimari yapılarda, parmaklıklarda, sütunlarda kullanılan bazalt elyaf ayrıca rebar formunda da yapıya mukavemet vermek için kullanılır [39].

Bazaltın çok iyi korozyon direnci sebebiyle kanal borularında, deniz kıyısı gibi yüksek oranda korozif ortam uygulamalarında bazalt elyaf kullanılır [39].



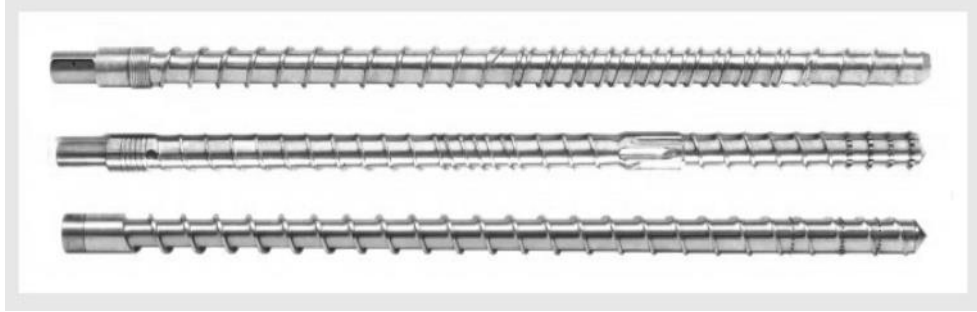
Şekil 7. Bazalt elyafın farklı formları: a) sürekli elyaf b) kırılmış elyaf c) dokuma elyaf [40]

1.7. Kullanılan Üretim Teknikleri

1.7.1. Tek Vidalı Ekstrüderle Harmanlama

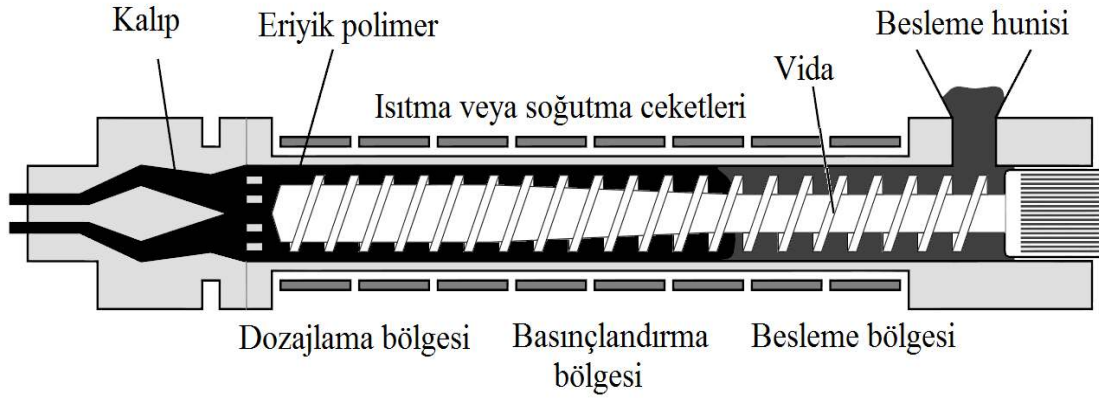
Ekstrüzyon işlemi, akışkan haline getirilen polimerin, istenilen şekilde hazırlanan bir kafadan, devamlı bir şekilde geçirilerek şekillendirilmesidir. Bu makineler genelde düşük molekül ağırlıklı kopolimer üretimi için kullanılır [41].

Tek vidalı ekstrüderler besleme bölgesi, basınçlandırma bölgesi ve dozaj bölgesi olmak üzere üç bölümden oluşur [43].



Şekil 8. Ekstrüderde kullanılan farklı vida tipleri [42]

Besleme bölgesinde besleme hunisine dökülen polimer vida boyunca basınçlandırma bölgesine pompolanır. Bu anda ısıtma işlemi de başlar. Basınçlandırma bölgesinde, besleme bölgesinde polimer granülleri arasına sıkışmış hava ve gazlar, bu bölgedeki sıkıştırma ile dışarı atılır ve yoğunluk artışı sağlanır. Dozajlama bölgesinde vidanın sabit diş derinliği sebebiyle malzeme homojen bir sıcaklık ve basınç dağılımına sahiptir. Dozajlama bölümünü geçen eriyik polimer kalıba girer ve kalıp ağzı kesitinin şeklini alır [41].



Şekil 9. Ekstrüder bölümlerinin şematik gösterimi [43]

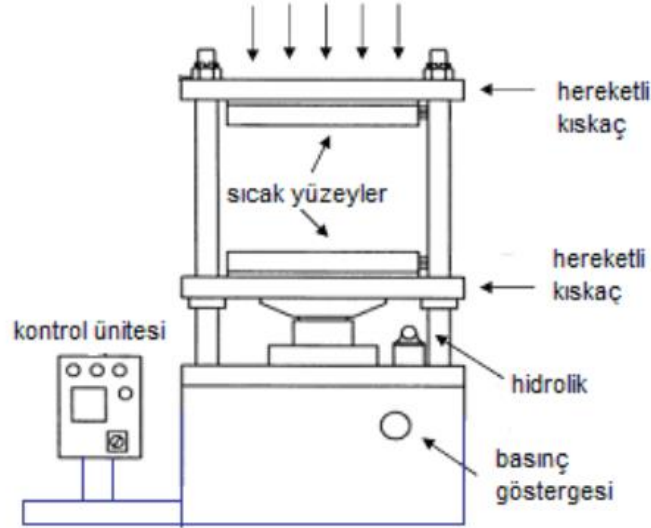
1.7.2. Basıncı Kalıplama

Basıncı kalıplama cihazı; hareket edebilir ve ısınabilir iki metal yüzey, sıcaklık kontrol ünitesi, basınç göstergesi ve hidrolik koldan oluşmaktadır. Metal yüzeylerin sıcaklığı, kontrol ünitesi kullanılarak, istenilen sıcaklığa ayarlanır.

Üretilcek malzeme, ekstrüderden çıktıktan sonra bir kalıp içerisine konularak bu iki ısınabilir metal yüzey arasına yerleştirilir. Malzeme belirli bir sıcaklık altında, kalıbın şeklini alabilmesi için gerekli basınç uygulanır. Şekilde örnek bir basıncı kalıplama cihazı gösterilmiştir [44].

Basıncı kalıplama yönteminde kalıba alınan malzemenin; biçimlendirme sıcaklığı, basıncı ve süresi malzeme cinsine ve biçimlendirilecek parçanın büyüklüğü ile konstrüksiyonuna göre değişir. Genelde bu değerler; basınç için 7-80 MPa, sıcaklık için 135-200°C ve polimerizasyon süresi için 1-20 dakika olarak verilebilir.

Ucuz ve basit bir yöntem olan basıncı kalıplama; elektrik anahtarları, radyo televizyon kasaları, çekmece ve kasaya benzeyen parçalar, düğme ve elektrik parçaları gibi küçük ve çok boşluklu parçaların üretimi için uygundur. Karmaşık şekilli ve ağır parçaların üretimi için uygun değildir.



Şekil 10. Tipik bir basıncı kalıplama cihazı [44]

1.8. Literatür Çalışmalarının Özeti ve Çalışmanın Amacı

Tabi ve arkadaşları, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle üretilen, kırılmış bazalt elyafla takviye edilmiş PLA kompozitlerinin mekanik ve termal özelliklerini incelemiştir. Bazalt elyafların bir kısmına silan uygulanmış, diğer kısmının ise silanı giderilmiş ve silan muamelesinin özelliklere etkisi araştırılmıştır. Kompozitler iki grup halinde üretilmiştir. İlkinde ağırlıkça % 5-10-15-20-30-40 silan uygulanmış bazalt elyaf içerecek şekilde malzemeler üretilmiştir. Diğerinde ise silanı giderilmiş bazalt elyaflı ağırlıkça % 5-10-15 bazalt elyaf içeren kompozitler üretilmiştir. Silan uygulanmış grupta genel olarak ağırlıkça % 40 bazalt oranına kadar mekanik özelliklerin devamlı arttığı görülmüştür. Silanı giderilmiş gruptaki numunelerde ise % bazalt oranı artışının özellikleri pek değiştirmedigi görülmüştür. Ayrıca silan uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerinin silanı giderilmiş numunelerden daha iyi olduğu görülmüştür [45].

Liu ve arkadaşları, bazalt elyaf, cam elyaf ve PLA kullanarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Çalışmada üretim, ekstrüzyon ve ardından enjeksiyon kalıplama şeklinde yapılmıştır. Bazalt elyaf oranları hacimce % 0-10-20-30-40 olarak seçilmiştir. Aynı oranlarda cam elyaf malzemesi de kullanılarak bazalt elyafla cam elyafla karşılaştırılması sağlanmıştır. % 40 bazalt ve cam elyaf oranına kadar mekanik özellikler artış göstermekle birlikte % 20 elyaf oranlarından sonra darbe mukavemetleri düşmüştür. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin cam elyaflı kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler gösterdiği görülmüştür. Ayrıca kompozit malzemelere çeşitli oranlarda farklı tokluk artırıcılar katılmış ve mekanik özellikler incelenmiştir [46].

Zhang ve Xin, PLA, PP (Polipropilen) ve PA6 (Poliamid 6) polimerlerini kullanarak polimer kompozitler üretmişlerdir. Polimerler önce oda sıcaklığında karıştırılıp 20 MPa basıçta 5 dakika preslenmiş ardından enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmişlerdir. PLA ve PP matris malzemesi olarak seçilmiş ve farklı oranlarda bazalt elyaf ve PA6 parçacıkları eklenmiştir. Bazalt elyaf oranları hacimce % 0-5-10-15-20-25 ve PA6 parçacıkları ise hacimce % 0-10-20-30-40 olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucu hacimce % 20 bazalt oranına kadar çekme mukavemeti ve elastisite modülünün arttığı % 25 bazalt oranında ise bu değerin düştüğü görülmüştür. PA6 parçacıkları hacimce % 10 oranında en iyi mekanik özellikleri göstermiş, özellikle % 20 oranından sonra mekanik özellikler belirgin şekilde düşmüştür [47].

Zhang ve arkadaşları, bazalt elyafı ve PBS (Polibütilen Süksinat) polimeriyle kompozit malzeme üretmişlerdir. Malzemeler çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyon kalıplamayla üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucu hacimce % 15 oranında bazalt elyafı hazırlanmış kompozitin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [48].

Guo ve arkadaşları, silan bağlanma ajanı KH550 (3-aminopropil trimetoksi silan) ile modifiye edilmiş ve modifiyesiz bazalt elyaf kullanarak malzeme üretmişlerdir. Matris malzemesi olarak PP seçilmiştir. Çalışmada bazalt elyafa farklı oranlarda KH550 uygulanmış ve optimum ajan oranı belirlenmeye çalışılmıştır. Bazalt elyaf % 4-6-8 silan bağlayıcılı çözelti ile modifiye edilmiş ve modifikasyonun malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. İlk önce PP mikserde karıştırılıp düz vulkanizasyon makinesinde kalıplanmıştır. Kalıplamada 2.5 MPa basınç 5 dakika süre ile uygulanmış ve PP plakalar elde edilmiştir. Daha sonra bazalt elyaf bu PP plakalar arasına konulmuş ve kalıplama işlemi tekrar edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda % 4 oranında silan bağlayıcı uygulanmış bazalt elyaf kompozitlerin en uygun özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir [12].

Tabi ve arkadaşları, uzun ve kısa bazalt elyafı kullanarak kompozit malzemeler üretmişler ve elyaf boyutunun malzeme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada matris malzemesi olarak PLA kullanılmıştır. Uzun bazalt elyafına ilk önce PLA ile ön kaplama yapılmış daha sonra 10 mm'lik peletler şeklinde kesilmiştir. Peletler, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama işlemiyle polimer kompozitler haline getirilmiştir. Çalışmanın sonucunda uzun elyafli kompozitlerin kısa elyafli kompozitlere göre daha iyi özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir [49].

Manshor ve arkadaşları, durian kabuğu lifleriyle takviye edilmiş PLA kompozitlerinin özelliklerini incelemişlerdir. Lifler önce % 4 NaOH çözeltisinde bekletilerek ön işleme tabi tutulmuşlardır. Lif/çözelti oranı ağırlıkça 1/10'dur. Kompozit malzemeler, ağırlıkça % 0-10-20-30-40 lif içerecek şekilde çift vidalı ekstrüderde harmanlanıp enjeksiyon kalıplamayla üretilmişlerdir. Yapılan deneyler sonucu PLA kompozitlerinin % 30 lif oranında en iyi özellikleri gösterdiği belirlenmiştir [50].

Ochi, sıcak pres yöntemiyle ürettiği % 30'dan % 70'e kadar tek yönlü kenaf lifi içeren PLA kompozitlerinin özelliklerini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucu % 70 kenaf lifi içeren malzemenin en iyi mekanik özelliklere sahip olduğu ortaya konulmuştur [51].

Janoobi ve arkadaşları, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle selüloz nanofiber-PLA kompozitleri üretmişler ve lif oranının malzeme özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Elyaf

oranları % 0-1-3-5 olarak belirlenmiştir. Elyaf oranının artmasıyla çekme mukavemeti ve elastisite modülünün arttığı görülmüştür [52].

Oksman ve arkadaşları, PLA ve keten kompozitlerinin özelliklerini araştırmışlardır. Ürettikleri kompozitlerde ağırlıkça % 30-40 lif oranlarını kullanmışlardır. Ayrıca malzemelere farklı oranlarda plastikleştirici (triasetin) katılmıştır. Malzemeler ekstrüderde harmanlanıp basınçlı kalıplama tekniğiyle üretilmişlerdir. Yapılan deneylere göre PLA kompozitlerinin çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerlerinin PP kompozitlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. PLA matrisli kompozitler için % 30 elyaf oranının optimum olduğu belirlenmiştir. Triasetinin darbe tokluğuna pek etki etmediği ayrıca çekme mukavemeti ve elastisite modülünde düşüşe neden olduğu görülmüştür [53].

Bax ve Müssig, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle PLA-keten ve PLA-yapay selüloz kompozitleri üretmişlerdir. Keten kompozitlerde lif oranı ağırlıkça % 0-10-20-30, yapay selüloz kompozitlerinde lif oranı % 0-10-20-30-40 olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucu PLA-yapay selüloz çekme ve darbe mukavemetinin PLA-keten kompozitlerinden daha iyi olduğu görülmüştür. Elastisite modülünde ise PLA-keten kompozitleri diğerinden daha yüksek değere sahiptir. Ayrıca, genel olarak lif oranının artmasıyla mekanik özellikler artarken, PLA-yapay selüloz liflerinde % 30'dan sonra mekanik özelliklerin düştüğü görülmüştür [54].

Sawpan ve arkadaşları, PLA ve polyester matrisleriyle doğal bir lif olan kenevir lifi kullanarak kompozit malzemeler üretmişlerdir. Kompozit malzemeler üretilmeden önce liflere alkali işlem ve silan işlemi yapılmıştır. Silan işleminde lifler % 0.5 silan içeren aseton çözeltisinde 45 dakika bekletilmiştir. Alkali işlemde ise lifler % 5'lik NaOH çözeltisinde 30 dakika bekletilmiştir. İşlemlerden sonra lifler suyla yıkanmıştır. Kompozitler takviye malzemesi olarak uzun ve kısa kenevir lifleri, matris olarak PLA ve polyester olacak şekilde hazırlanmıştır. Kısa lifler ortalama 4.9 mm boyundadır. Kısa lifli kompozitler PLA matrisiyle ağırlıkça % 10-20-30, polyester matrisiyle ağırlıkça % 30-40-50 oranında lif içerecek şekilde üretilmişlerdir. Uzun lifli kompozitlerin üretiminde önce PLA filmleri üretilmiş daha sonra bu filmlerin arasına lifler konularak sıcak preste üretim yapılmıştır. Uzun liflerin boyutu ortalama 65 mm'dir. PLA-uzun lif kompozitlerinde ağırlıkça %30-35-40, polyester-uzun lif kompozitlerinde ise ağırlıkça %30-40-50 oranlarında lif kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucu PLA polimerinin geleneksel enjeksiyon kalıplamada % 30 oranından sonra mekanik özelliklerin düştüğü ve % 30 lif oranının bu polimer için maksimum nokta olduğu bulunmuştur. Alkali ve silan işlemlerinin bağlanmayı artırarak

mekanik özellikleri iyi yönde etkilediği belirlenmiştir. Kompozitlerde genel olarak lif oranının artmasıyla eğilme modülünün de arttığı görülmüştür. Fakat lif oranı arttıkça eğilme mukavemeti tüm kompozitlerde düşüş göstermiştir. Bu düşüşün nedeninin doğal liflerde görünen lif kusurlarından bükülmelerin neden olabileceği belirtilmiştir [55].

Hu ve Lim, % 30-40-50 kenevir elyafı içeren PLA matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Uzun ve kısa liflerle hazırlanan kompozitlerden bir kısmına ayrıca alkali işlem uygulanmış ve bu işlemin malzeme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kompozit malzemeler, 0.3 mm kalınlığında PLA filmlerin arasına lifler konularak sıcak pres yöntemiyle üretilmişlerdir. Yapılan deneyler sonucu % 40 kenevir lifi içeren malzemenin en iyi özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca alkali işlem uygulanan malzemelerin işlem görmemiş malzemelerden daha iyi mekanik özellikler gösterdiği belirlenmiştir [56].

Baghaei ve arkadaşları, basınçlı kalıplama yöntemiyle kenevir ve yapay selüloz liflerinden PLA ve PP kompozitleri üretmişlerdir. Yapılan deneylerde yapay selüloz lifli kompozitlerin kenevir lifli kompozitlerden daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca PLA kompozitlerinin PP kompozitlerine göre daha yüksek özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir [57].

Groupnar, kenevir ve yapay selüloz lifleriyle takviye edilmiş PLA kompozitlerinin özelliklerini incelemiştir. Kompozit malzemeler basınçlı kalıplama yöntemiyle üretilmiştir. Kompozit malzemelerin elyaf oranı ağırlıkça % 40 olarak belirlenmiştir. Kompozitler, % 40 kenevir lifi, % 40 yapay selüloz lifi ve % 20 kenevir - % 20 yapay selüloz lifi karışımı şeklinde takviye edici elyaflarla desteklenmiştir. Yapılan deneyler sonucu yapay selüloz lifli kompozitlerin en iyi ekme mukavemeti, darbe mukavemeti ve yüzde uzamaya sahip olduğu görülmüştür. Kenevir lifli kompozitler çekme mukavemeti, elastisite modülü ve yüzde uzama özelliklerinde saf PLA'dan daha iyi olsa da darbe mukavemetinde saf PLA'nın gerisinde kalmıştır. Yalnızca kenevir lifi içeren kompozite kıyasla iki lifin karışımından oluşan kompozit malzemenin daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir [58].

Literatür çalışmalarında PLA matrisi daha çok doğal liflerle takviye edilerek kompozit üretimi yapılmıştır. Bazalt elyafı olan çalışmalar doğal liflere nispeten sınırlıdır. Bu çalışmada doğal liflere kıyasla daha iyi mekanik özellik göstermesi açısından takviye edici olarak bazalt elyaf kullanılmış ve üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Elyaf kaplamasının, elyaf boyutunun ve elyaf ağırlık oranının kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır.

Tablo 7. Literatür çalışmalarının özet tablosu

Yöntem	Malzemeler (Elyaf ve Matris)	Elyaf Oranı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Darbe Mukavemeti (kJ/m ²)	Referans Kaynak Numarası
Basınçlı Kalıplama	Bazalt-PLA	Ağırlıkça %45	53,7	8,8	117,7	8,2	18,5	Mevcut Çalışma
Enjeksiyon Kalıplama	Bazalt-PBS	Hacimce %15	45	1,1	70	3,75	7,5	[48]
Enjeksiyon Kalıplama	Bazalt-PP	Hacimce %20	29,5	2,3	64	3,2	65	[47]
Enjeksiyon Kalıplama	Bazalt- PLA	Ağırlıkça %40	110	(Değer yok)	145	(Değer yok)	20	[49]
Enjeksiyon Kalıplama	Bazalt- PLA	Ağırlıkça %40	120	8	180	12	40	[45]
Enjeksiyon Kalıplama	Bazalt- PLA	Ağırlıkça %27	120	6	190	9	65	[46]
Vulkanizasyon Makinesinde Kalıplama	Bazalt (%6 silan uygulamış)-PP	(Değer yok)	56,1	(Değer yok)	42,8	(Değer yok)	45	[16]
Enjeksiyon Kalıplama	Durian kabuğu- PLA	Ağırlıkça %30	(Değer yok)	(Değer yok)	160	35	6,75	[50]

Tablo 7'nin devamı

Yöntem	Malzemeler (Elyaf ve Matris)	Elyaf Oranı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Darbe Mukavemeti (kJ/m ²)	Referans Kaynak Numarası
Enjeksiyon Kalıplama	Selüloz nanolif- PLA	Ağırlıkça %5	71,2	3,6	(Değer yok)	(Değer yok)	(Değer yok)	[52]
Enjeksiyon Kalıplama	Yapay selüloz-PLA	Ağırlıkça %30	57,97	4,85	(Değer yok)	(Değer yok)	72,24	[54]
Enjeksiyon Kalıplama	Kenevir-PLA	Ağırlıkça %30	(Değer yok)	(Değer yok)	89,8	6,4	(Değer yok)	[55]
Basınçlı Kalıplama	Keten-PLA	Ağırlıkça %30	53	8,3	(Değer yok)	(Değer yok)	(Değer yok)	[53]
Basınçlı Kalıplama	Kenevir-PLA	Hacimce %40	55	8,5	113	(Değer yok)	(Değer yok)	[56]
Basınçlı Kalıplama	Kenevir-PLA	Hacimce %25,2	80	7	120	6	26	[57]
Basınçlı Kalıplama	Kenevir-PLA	Ağırlıkça %40	81,8	6,8	(Değer yok)	(Değer yok)	39,7	[58]
Basınçlı Kalıplama	Kenaf (Tek yönlü) -PLA (Emülsiyon tipi)	Hacimce %70	220	23	250	22	(Değer yok)	[51]

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada PLA matris, değişik elyaf oranlarında bazalt elyaf ile takviye edilerek kompozit malzeme üretimi yapıldı. Elyaf uzunluğunun, ısıtılma işleminin ve elyaf oranının mekanik özelliklere olan etkisi incelendi.

Bu çalışmada incelenen numunelerin üretiminde matris malzemesi olarak 3-boyutlu yazıcı malzemesi üreten Oo-kuma şirketinden temin edilen PLA kullanıldı. Bu ürünün teknik özellikleri Tablo 8’de verildi. Takviye malzemesi olarak Spinteks A.Ş.’nin ürettiği 3 mm boyunda kırılmış demet haldeki bazalt elyafı kullanıldı. Söz konusu elyafın kimyasal bileşimi ve özellikleri Tablo 9’da verildi.

Tablo 8. Deneysel çalışmalarda kullanılan matris malzemesinin özellikleri [10]

Özellikler	Polilaktik Asit (PLA)	Birim
Yoğunluk	1,24	gr/cm ³
Çekme Dayanımı	50-70	MPa
Elastiklik Modülü	3-4	GPa
Kopma Uzaması	2-10	%
Eğilme Dayanımı	100	MPa
Eğilme Modülü	4-5	GPa
Darbe Dayanımı (Izod, çentikli)	3-7	kJ/m ²
Sertlik (Rockwell-H)	70-90	
Erime Sıcaklığı	180	°C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	60-70	°C

Tablo 9. Deneysel çalışmalarda kullanılan bazalt elyafın özellikleri [34]

Özellik	Değer	Birim
Çap	14.1 ± 2.9	(μm)
Kesit Alanı	163.5 ± 63.3	(μm^2)
Çekme Mukavemeti	1811 ± 331	(MPa)
Yüzde uzama	3.47 ± 0.70	(%)
Elastisite Modülü	53.2 ± 7.4	(GPa)
Yoğunluk	2.63	(gr/cm^3)

2.2. Numune Üretimi

Bu çalışmada numune üretimi için basınçlı kalıplama yöntemi kullanıldı. Üretimi yapılan kompozitlerin bileşimleri Tablo 10’da verildi.

Tablo 10. Üretilen kompozitlerin bileşimleri

NUMUNE KODU	%ELYAF ORANI (AĞIRLIKÇA)	%ELYAF ORANI (HACİMCE)	KAPLAMA DURUMU	ELYAF BOYUTU
PLA	0	0	-	-
KB30	30	17	YOK	KISA
OB30	30	17	YOK	ORTA
KKB30	30	17	VAR	KISA
OKB30	30	17	VAR	ORTA

Tablo 10'un devamı

NUMUNE KODU	%ELYAF ORANI (AĞIRLIKÇA)	%ELYAF ORANI (HACİMCE)	KAPLAMA DURUMU	ELYAF BOYUTU
UKB20	20	11	VAR	UZUN
UKB25	25	14	VAR	UZUN
UKB30	30	17	VAR	UZUN
UKB35	35	21	VAR	UZUN
UKB40	40	24	VAR	UZUN
UKB45	45	28	VAR	UZUN
UKB50	50	32	VAR	UZUN

Numune üretimi iki grup halinde yapıldı. Kısa ve orta boyutlu elyaf lar birinci grup, uzun elyaf lı malzemeler ise ikinci grup olarak belirlendi. Kısa ve orta elyaf lı malzemelerin analizlerinde elyaf kaplaması ve elyaf boyutunun mekanik özelliklere etkisi araştırıldı. İkinci grup olan uzun elyaf lı malzemelerde ise farklı elyaf ağırlık oranlarının mekanik özelliklere etkisi araştırıldı. Kısa ve orta boyutlu malzemelerin analizlerine, %30 elyaf ağırlık oranına sahip uzun elyaf lı malzeme de katıldı. Bununla elyaf boyutunun mekanik özelliklere etkisi araştırıldı.

Numune kodlamada ilk harf (K, O ve U) elyaf boyutunu göstermektedir. Hem ekstrüderden önce hem de ekstrüderden sonra elekli öğütülen malzemeler kısa (K) ile, yalnızca ekstrüderden sonra elekli olarak öğütülen malzemeler orta (O) ile, yalnızca ekstrüderden sonra eleksiz öğütülen malzemeler uzun (U) ile kodlanmıştır.

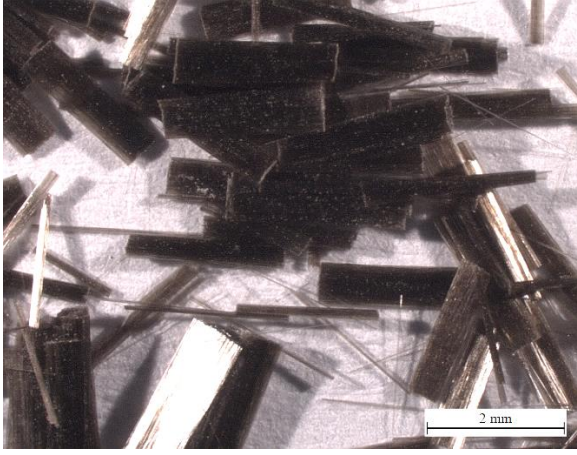
İkinci harf olarak kaplamayı ifade eden (K) harfidir. İkinci harfi (K) olan malzemelerin elyaf ları kaplanmış, (K) harfi yazılmayan malzemelerin elyaf kaplamaları ısıl işlemle giderilmiştir.

En sondaki sayılar ise kompozitteki bazaltın ağırlık oranını göstermektedir.

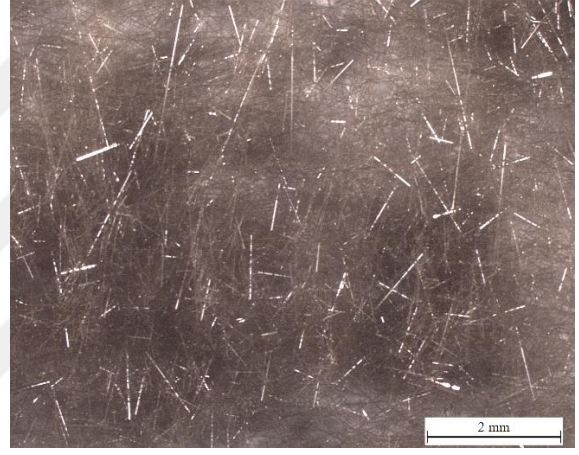
Tablo 11'de kompozit malzemeler öğütme durumuna göre sınıflandırılmıştır.

Tablo 11. Üretilen kompozitlerin öğütme tipleri

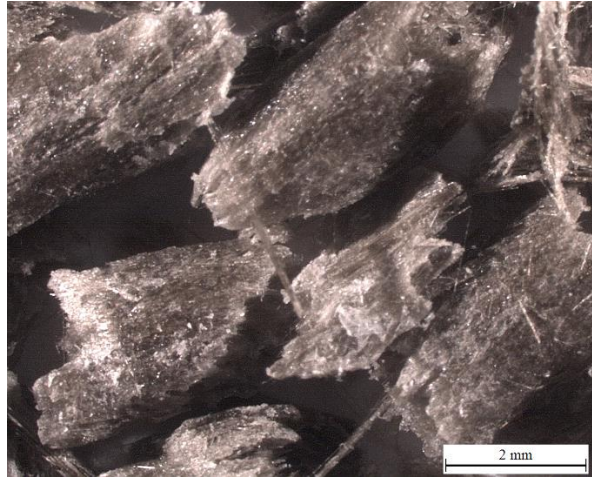
ELYAF BOYUTU	EKSTRÜDERDEN ÖNCE ÖĞÜTME	EKSTRÜDERDEN SONRA ÖĞÜTME TİPİ
KISA	VAR	ELEKLİ
ORTA	YOK	ELEKLİ
UZUN	YOK	ELEKSİZ



a)



b)



c)

Şekil 11. Bazalt elyafın üretim sürecindeki farklı formları: a) işlem görmemiş kırık elyaf, b) ekstrüderden önce öğütülmüş elyaf, c) ekstrüderden çıkan malzeme

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan elyafların bir kısmının üzerinde bağlanma ajanı kaplamasının giderilmesi için 200°C sıcaklıkta 2 saat süre ile fırında bekletildi. Daha sonra kaplaması giderilen ve giderilmeyen elyaflardan bir kısmı ise öğütüldü. Üretim aşamasından önce elyaflar nemden arındırılmak üzere 24 saat süre ile 100°C’de kurutma fırınında bekletildi. Üretime hazır hale gelen elyaflardan ve PLA granüllerinden belirli oranlarda alınarak karışımlar hazırlandı. Daha sonra bu karışımlar ekstrüdere beslendi. Ekstrüzyon işleminde kovan sıcaklığı 190-210-220-240°C olarak belirlendi. Vida dönme hızı 70 rpm olarak seçildi.



Şekil 12. Çalışmada kullanılan Rondol marka tek vidalı ekstrüder

Ekstrüderden çıkan malzeme yine 24 saat süre ile 100°C’de fırında kurutuldu. Fırından çıkan bu peletler öğütme cihazında öğütüldü. Uzun lifli malzemeler eleksiz, orta ve kısa lif boyutlu peletler elekli bir şekilde öğütme işlemine tabi tutuldu. Öğütülen kompozit tozları 0,4x16x22 cm ve 0,4x16x18 cm boyutlarındaki metal kalıplara doldurularak sıcak pres işlemine hazır hale getirildi. Malzemenin pres sonrası kalıptan ayrılması için kompozit tozlarının altı ve üstü teflon kalıp ayırıcı ile kapatılmıştır.



Şekil 13. Çalışmada kullanılan Fritsch marka değirmen



Şekil 14. Ekstrüderden çıkan malzemenin görünüşü

Hazırlanan kompozit tozları basınçlı kalıplama makinesinde 190°C’de 5 dakika süre ile preslenmiş ve kompozit malzeme üretimi tamamlanmıştır. Presten alınan kompozit paneller soğumaya bırakılmış ardından kalıptan çıkartılmıştır.

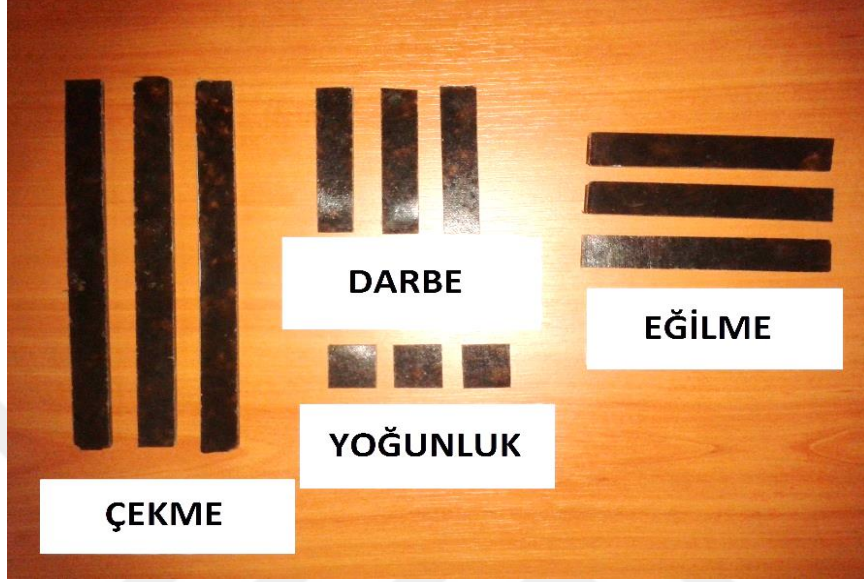


Şekil 15. Üretime hazır, öğütülmüş malzeme



Şekil 16. Çalışmada kullanılan basınçlı kalıplama cihazı

Hazırlanan panellerden, yapılacak deneylerdeki standartlara uygun boyutlarda örnekler kesilmiştir. Kesilen numunelerin kenar kısımları çentik etkisi oluşturmamaları için zımparalanarak deneylere hazır hale getirilmiştir.



Şekil 17. Yapılacak testler için hazırlanmış numunelerin görünüşü

2.3. Testlerin Yapılışı

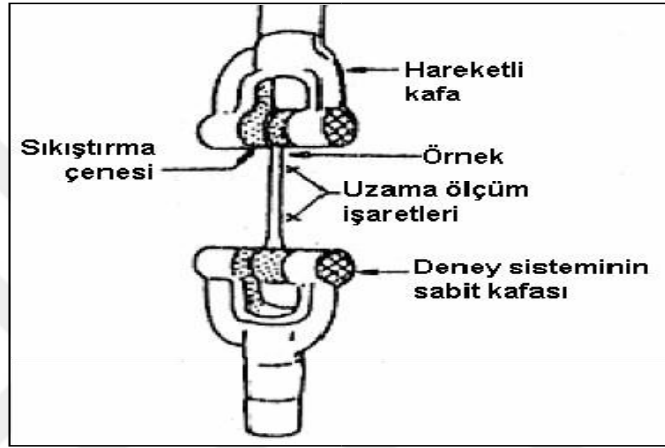
2.3.1. Yoğunluk Testi

Yapılan çalışmada kompozit malzemelerin yoğunluğunu ölçmek için Archimedes yöntemi kullanıldı. Bu yöntemin prensibi, numunelerin saf su içindeki ve havadaki ağırlık farkını kullanarak cismin yoğunluğunun hesaplanmasıdır. Numuneler ilk önce kurutma fırınında 24 saat bekletildi ve kuru olarak tartıldı. Daha sonra numuneler su çekmemeleri için parafinle kaplandı. Numuneler önce havada asılı şekilde tartıldı. Daha sonra numune, bir destek üzerinde bulunan saf suya daldırılarak tartıldı. Numunelerin yoğunluğu hesaplanırken, aşağıda verilen eşitlik kullanıldı [25].

$$cisman\ yoğunluğu = \frac{(cisman\ kuru\ ağırlığı \times suyun\ yoğunluğu)}{(cisman\ havadaki\ ağırlığı - cisman\ sudaki\ ağırlığı)} \quad (1)$$

2.3.2. Çekme Testi

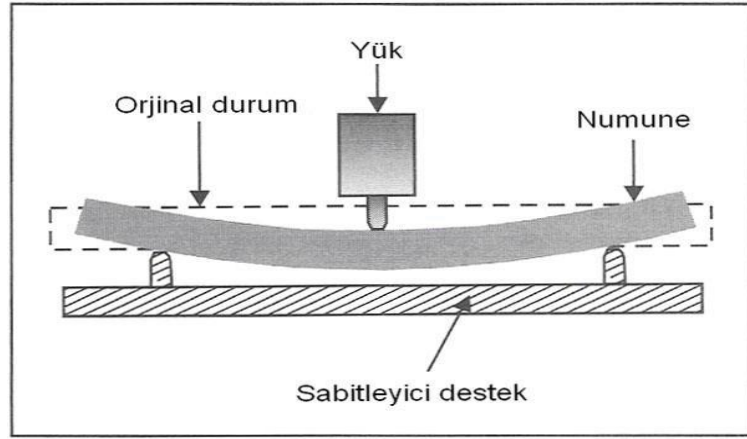
Çekme testleri 100 kN yükleme kapasiteli MTS marka çekme deney makinesinde yapıldı. Numuneler 150x15x4 mm boyutlarında kesildi ve zımparalandı. Numuneler çeneler arasına bağlanıp 2 mm/dk sabit çekme hızında deneyler gerçekleştirildi. Şekil 18’de temsili çekme testi düzeneği gösterildi. Yapılan testlerde numunelerin çekme mukavemeti, elastisite modülü ve yüzde uzama değerleri belirlendi.



Şekil 18. Çekme testi düzeneği [15]

2.3.3. Eğilme Testi

Eğilme testleri, düzenek değiştirilerek çekme testinin yapıldığı cihazda yapıldı. Numuneler 100x15x4 mm boyutlarında kesildi ve zımparalandı. Testler 5 mm/dakika hızıyla yapıldı. Numunelerin eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve uzama miktarları belirlendi.



Şekil 19. Eğilme testi düzeneği [25]

2.3.4. Darbe Testi

Darbe testleri Instron marka Charpy darbe test cihazıyla yapıldı. Numuneler 65x15x4 mm ebatlarında kesildi ve zımparalandı. Numunelere çentik açılmadı. Test uygulandı ve numunelerin darbe mukavemeti değerleri belirlendi.



Şekil 20. Darbe testinin yapıldığı Instron marka Charpy darbe testi cihazı

2.3.5. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Çekme testi sonucunda kopan numunelerin kırılma yüzeylerinden alınan örnekler taramalı electron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelendi. Numuneler önce 24 saat süre ile kurutma fırınında kurutularak nemleri alındı. Daha sonra yüzeyleri kaplanarak analize hazır hale getirildi. Numunelerin farklı bölgelerinden farklı büyütmelerde görüntüler alındı.



3. BULGULAR

3.1. Yoğunluk Testi Sonuçları

Yoğunluk testi sonuçları Tablo 12 ve Tablo 13'te gösterilmiştir.

Tablo 12. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk değerleri

Numune Kodu	Yoğunluk (gr/cm ³)
PLA	1,23 ± 0,01
KB30	1,43 ± 0,01
OB30	1,40 ± 0,01
KKB30	1,46 ± 0,02
OKB30	1,41 ± 0,02
UKB30	1,43 ± 0,02

Tablo 13. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk değerleri

Numune Kodu	Yoğunluk (gr/cm ³)
PLA	1,23 ± 0,01
UKB20	1,37 ± 0,02
UKB25	1,39 ± 0,02
UKB30	1,43 ± 0,02
UKB35	1,45 ± 0,02
UKB40	1,52 ± 0,03
UKB45	1,58 ± 0,02
UKB50	1,63 ± 0,02

3.2. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonuçları Tablo 14 ve Tablo 15'te gösterilmiştir.

Tablo 14. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin çekme testi değerleri

Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yüzde Uzama (%)
PLA	33,8 ± 3,8	3,46 ± 0,11	1,21 ± 0,06
KB30	22,9 ± 3,5	5,53 ± 0,52	0,58 ± 0,08
OB30	29,6 ± 1,5	6,08 ± 0,4	0,59 ± 0,07
KKB30	37,4 ± 0,6	6,09 ± 0,08	0,66 ± 0,03
OKB30	41,9 ± 2,5	6,19 ± 0,2	0,82 ± 0,09
UKB30	47 ± 2,8	6,68 ± 0,36	0,97 ± 0,06

Tablo 15. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin çekme testi değerleri

Numune Kodu	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yüzde Uzama (%)
PLA	33,84 ± 3,8	3,46 ± 0,09	1,22 ± 0,06
UKB20	44,59 ± 1,6	5,08 ± 0,27	1,18 ± 0,06
UKB25	48,34 ± 0,3	6,06 ± 0,17	1,04 ± 0,05
UKB30	47 ± 2,8	6,68 ± 0,36	0,97 ± 0,06
UKB35	46,18 ± 0,7	6,92 ± 0,6	0,84 ± 0,05
UKB40	49,06 ± 2,2	7,85 ± 0,49	0,83 ± 0,07
UKB45	53,73 ± 3,7	8,84 ± 0,59	0,72 ± 0,06
UKB50	46,49 ± 1,8	9,77 ± 0,33	0,58 ± 0,08

3.2. Eğilme Testi Sonuçları

Eğilme testi sonuçları Tablo 16 ve Tablo 17’de gösterilmiştir.

Tablo 16. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme testi değerleri

Numune Kodu	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Eğilme Miktarı (mm)
PLA	101,5 ± 7,2	3,46 ± 0,21	5,67 ± 0,8
KB30	66,8 ± 8,3	6,24 ± 0,21	2,19 ± 0,29
OB30	79,6 ± 7,1	4,35 ± 1,3	2,81 ± 0,4
KKB30	103,4 ± 10	3,08 ± 0,24	3,1 ± 0,42
OKB30	119,8 ± 15,3	5,54 ± 0,72	3,37 ± 0,38
UKB30	103 ± 11,7	5,56 ± 0,36	4,04 ± 0,38

Tablo 17. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme testi değerleri

Numune Kodu	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Eğilme Miktarı (mm)
PLA	101,5 ± 7	3,46 ± 0,2	5,67 ± 0,8
UKB20	101 ± 10	4,65 ± 0,11	5,31 ± 0,17
UKB25	100,5 ± 11,8	5,5 ± 0,14	4,46 ± 0,27
UKB30	103 ± 11,7	5,56 ± 0,36	4,04 ± 0,38
UKB35	102,3 ± 16	6,25 ± 0,48	3,94 ± 0,43
UKB40	108,6 ± 5,7	6,57 ± 0,74	3,86 ± 0,34
UKB45	117,7 ± 7	8,17 ± 0,33	3,51 ± 0,07
UKB50	106,5 ± 9,6	9,18 ± 0,9	3,27 ± 0,2

3.2. Darbe Testi Sonuçları

Darbe testi sonuçları Tablo 18 ve Tablo 19’da gösterilmiştir.

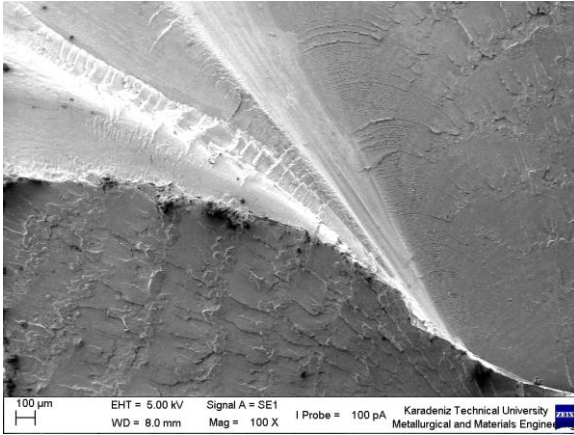
Tablo 18. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti değerleri

Numune Kodu	Darbe Mukavemeti (kJ/m ²)
PLA	6,9 ± 1,3
KB30	6,1 ± 1
OB30	7,6 ± 2,1
KKB30	8,8 ± 1,8
OKB30	7,9 ± 1
UKB30	14,6 ± 1

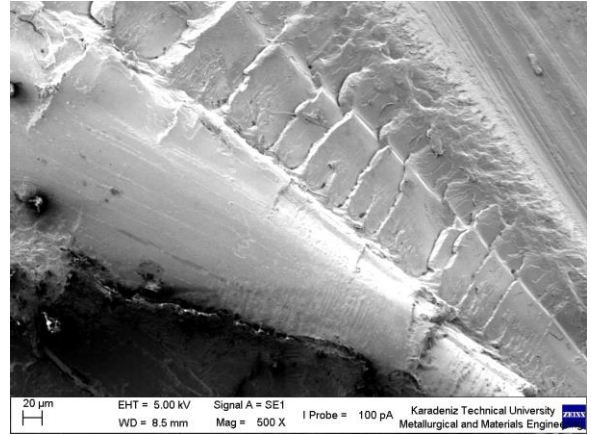
Tablo 19. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti değerleri

Numune Kodu	Darbe Mukavemeti (kJ/m ²)
PLA	6,9 ± 1,3
UKB20	13 ± 2,5
UKB25	14 ± 2,5
UKB30	14,6 ± 1
UKB35	14,8 ± 1,7
UKB40	18,3 ± 2,3
UKB45	18,5 ± 2,3
UKB50	16,4 ± 2,2

3.5. Kırılma Yüzeyi Görüntüleri

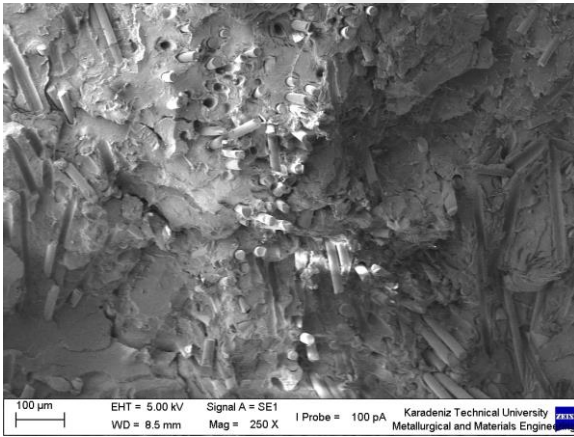


(a)

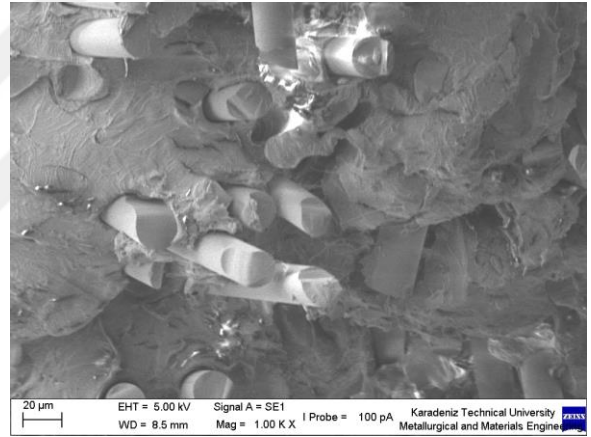


(b)

Şekil 21. Saf PLA'nın SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500

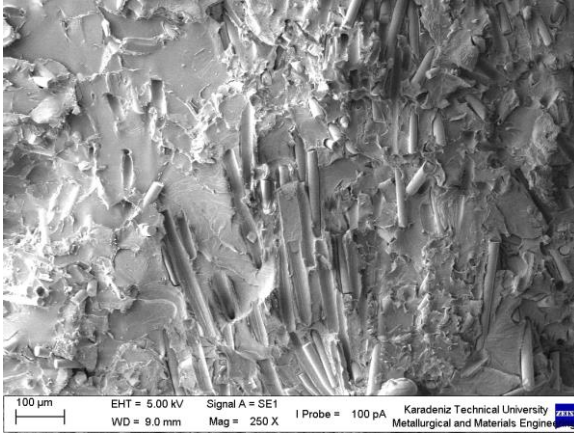


(a)

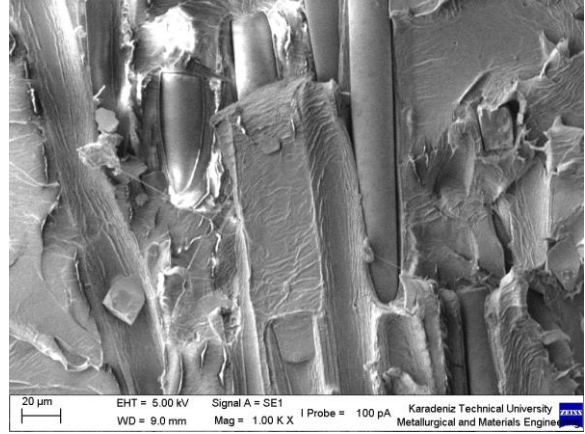


(b)

Şekil 22. KB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 250, (b) X 1000

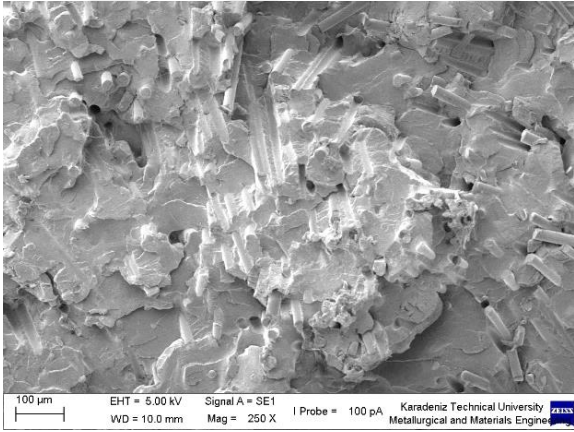


(a)

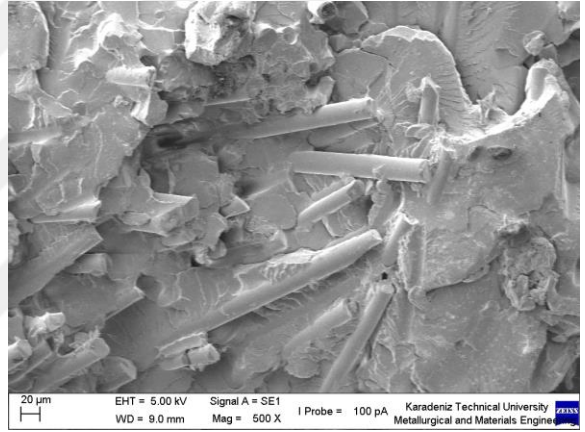


(b)

Şekil 23. OB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 250, (b) X 1000

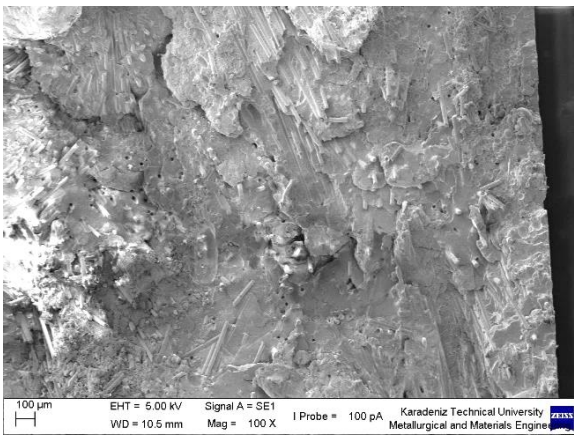


(a)

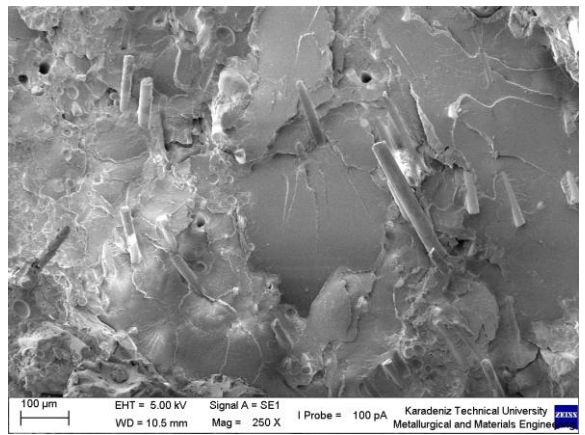


(b)

Şekil 24. KKB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 250, (b) X 500

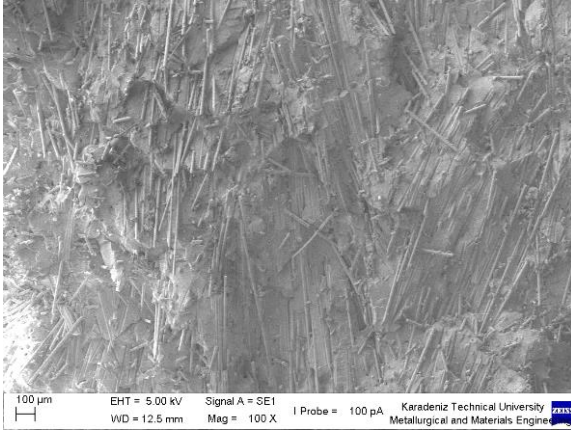


(a)

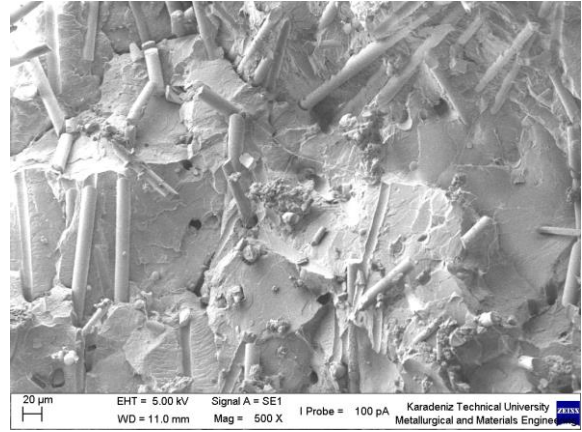


(b)

Şekil 25. OKB30 kodlu numunenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 250

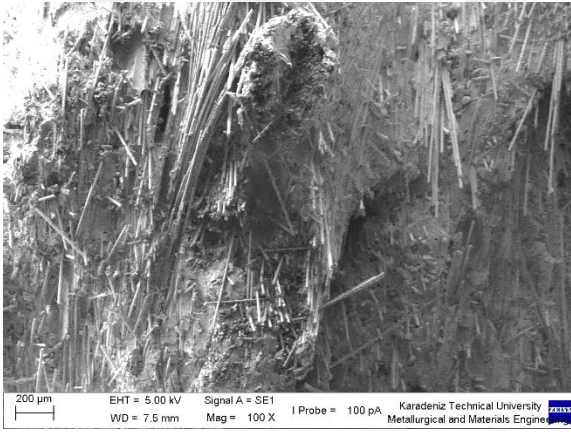


(a)

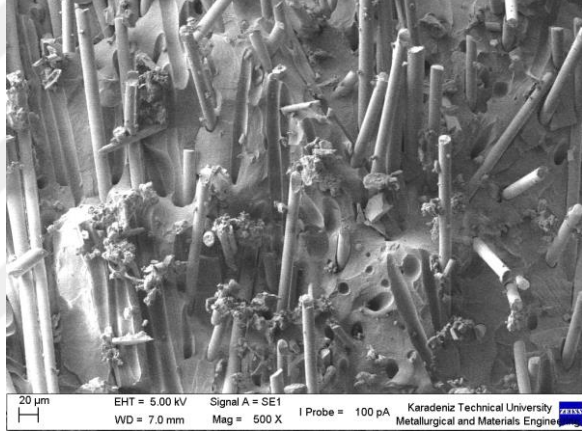


(b)

Şekil 26. % 20 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500

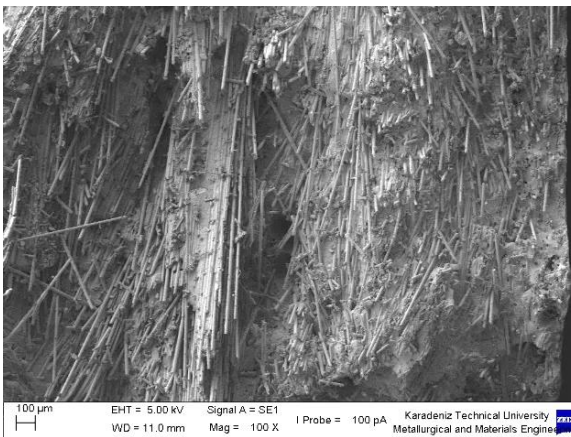


(a)

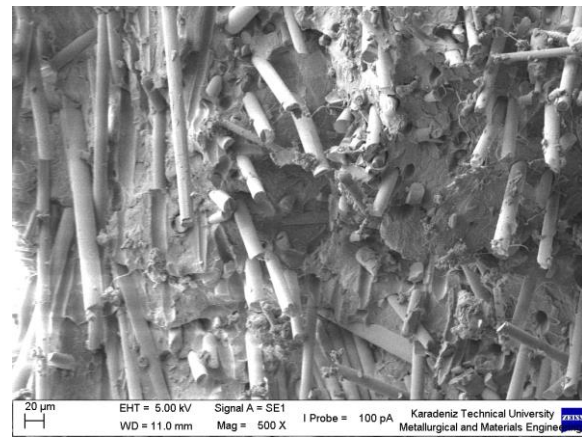


(b)

Şekil 27. % 25 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500

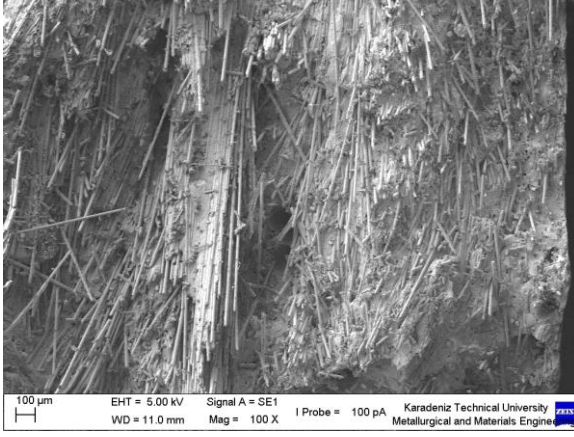


(a)

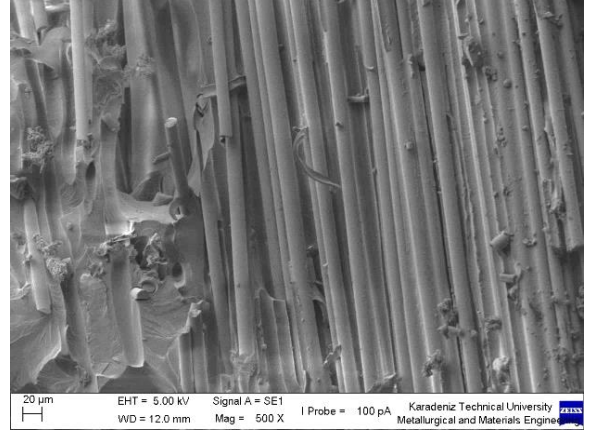


(b)

Şekil 28. % 30 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500

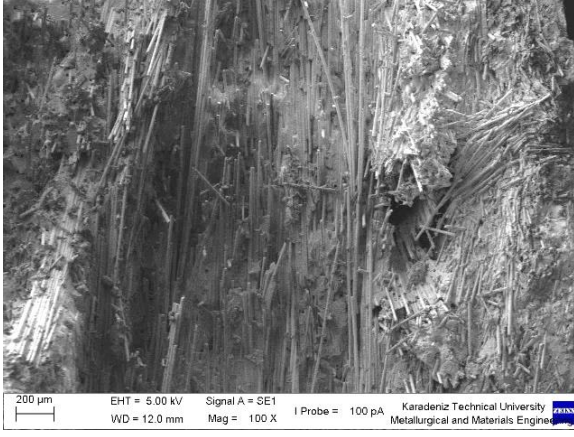


(a)

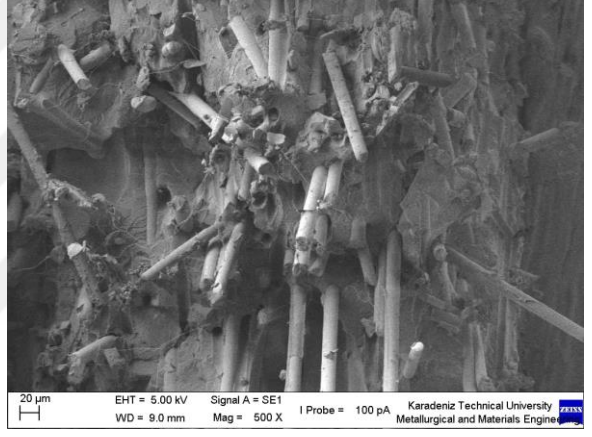


(b)

Şekil 29. % 35 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500

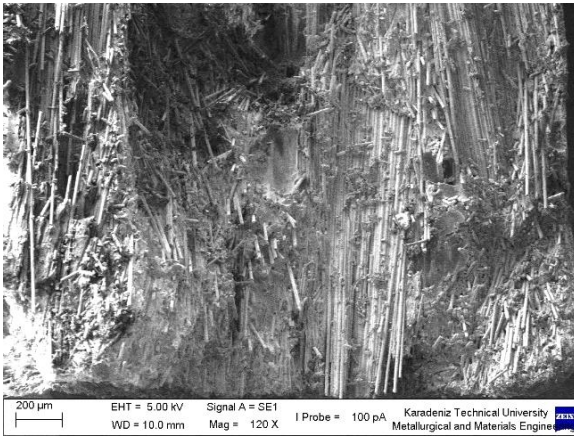


(a)

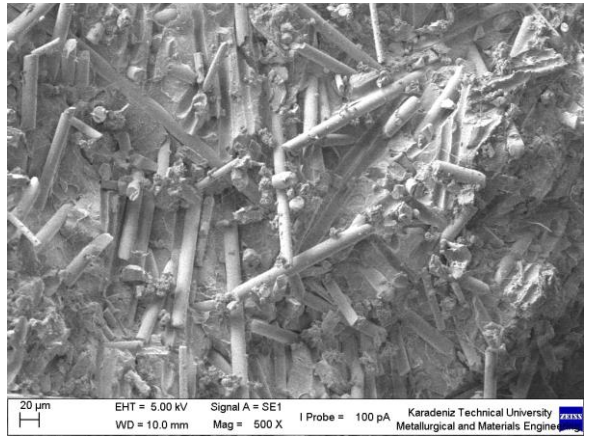


(b)

Şekil 30. % 40 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500

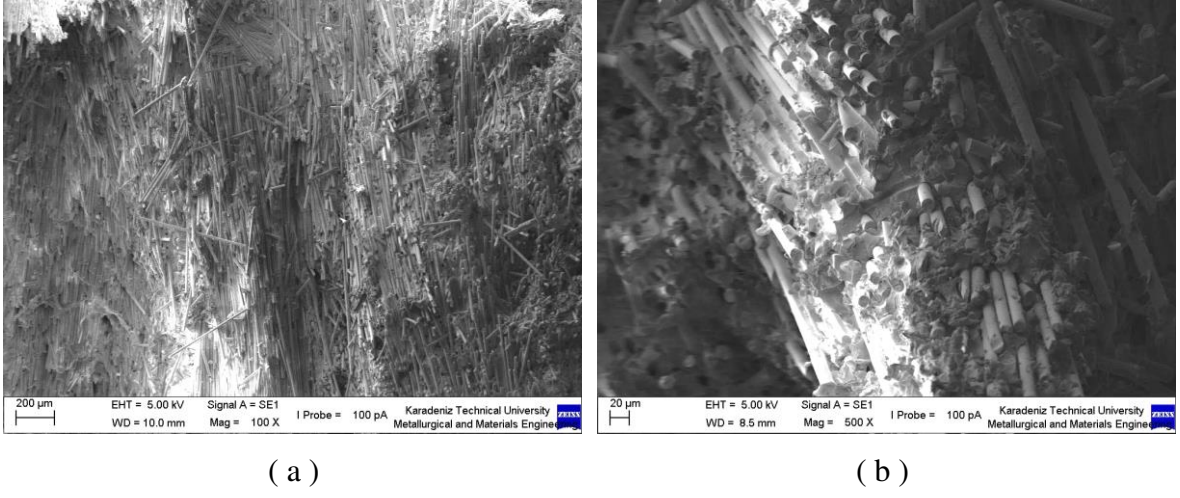


(a)



(b)

Şekil 31. % 45 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500



Şekil 32. % 50 elyaf içeren malzemenin SEM görüntüleri; (a) X 100, (b) X 500

4. İRDELEME

4.1. Elyaf Boyutu ve Elyaf Kaplamasının Malzeme Özelliklerine Etkisi

4.1.1. Yoğunluk Testi

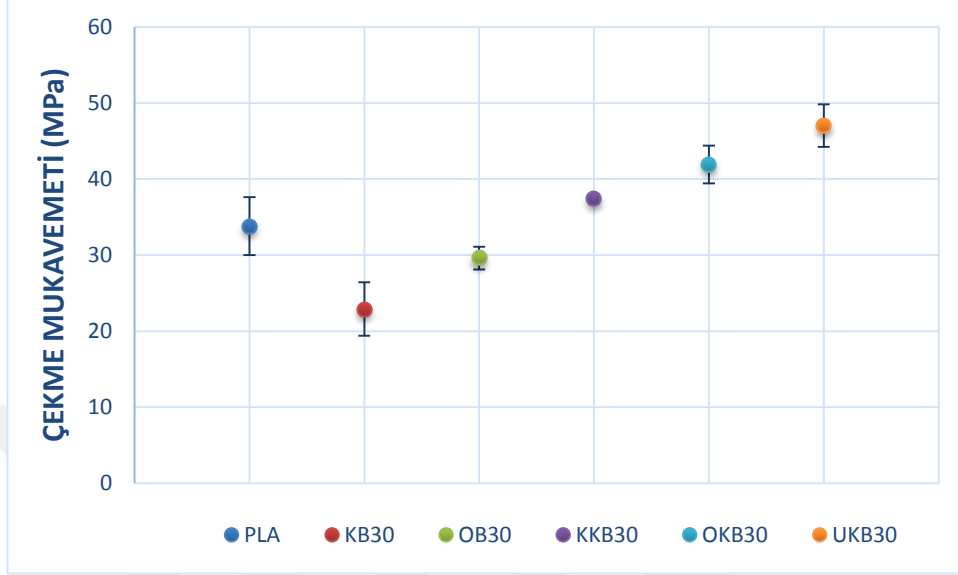


Şekil 33. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk grafiği

Yapılan yoğunluk testleri sonucunda en yüksek yoğunluğa sahip malzemenin 1,45 gr/cm³ değeriyle KB30 kodlu kısa, kaplamasız elyafli malzeme ve en düşük yoğunluk değerinin ise 1,23 gr/cm³ ile saf PLA'ya ait olduğu görülmüştür. Bazalt elyafı ilavesinin saf PLA'nın yoğunluğunu yaklaşık % 18'e kadar artırdığı belirlenmiştir. Bazalt elyafın yoğunluğunun yaklaşık 2,59 gr/cm³'lük değeriyle PLA'dan çok yüksek olduğu düşünülürse bu beklenen bir sonuçtur.

Orta ve kısa elyaf boyutlu malzemelerden kısa olanların uzun olanlardan nispeten daha yoğun olduğu görülse de uzun elyaf boyutlu malzemenin yoğunluğu kısa elyafli olanlara yakın olarak belirlenmiştir.

4.1.2. Çekme Testi

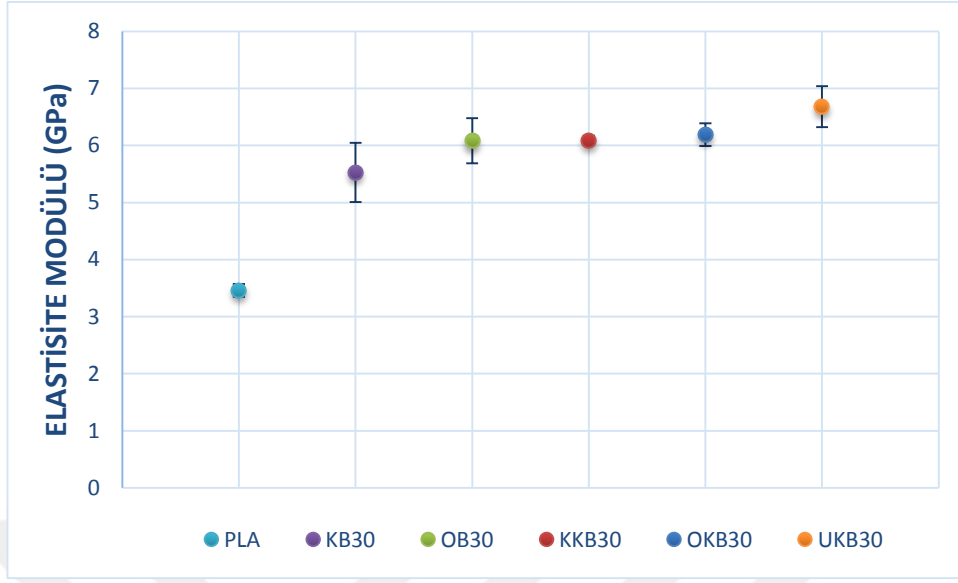


Şekil 34. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin çekme mukavemeti grafiği

Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerde en yüksek çekme mukavemeti değeri OKB30 kodlu orta elyaf boyutlu kaplanmış malzemesine aittir. Bu malzemenin çekme mukavemeti değeri, 41,9 MPa'dır. Bu değer saf PLA'nın 33,8 MPa değerinden % 24 daha fazladır.

En düşük değer 22,9 MPa ile KB30 kodlu kısa, kaplanmamış malzemeye ait olduğu ve kaplanmış malzemelerin kaplanmamış malzemelerden daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu göz önünde belirlenmiştir. Kaplanmış malzemeler kaplanmamışlara göre % 34 daha fazla çekme mukavemetine sahiptir. Bu durum, kaplama yapılan malzemelerde matris ve elyaf arayüzeyinin daha iyi yapışma sağlamasıyla açıklanabilir.

Diğer yandan artan elyaf boyutuyla çekme mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. hem kaplanmış hem de kaplanmamış malzemelerde orta elyaf boyutlu malzemeler kısa elyaflılardan daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. bunun bir göstergesi olarak UKB30 kodlu uzun elyaflı malzeme, kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerde en yüksek çekme mukavemeti değeri OKB30 malzemesinden daha yüksek çekme mukavemeti değeri göstererek tüm kısa ve orta elyaflı malzemeleri geride bırakmıştır.

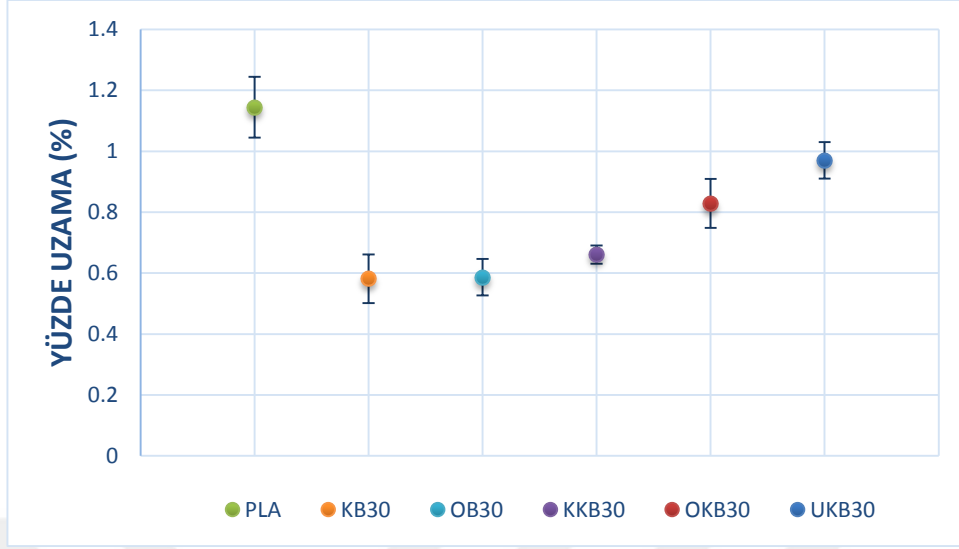


Şekil 35. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin elastisite modülü grafiği

Elastisite modülü değerlerine baktığımızda grupların, çekme mukavemetine benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Fakat elastisite modülü değerlerinde bu artış ve azalışın belirgin olmadığını söyleyebiliriz. Özellikle 5,53 GPa değeri ile en düşük elastisiteye sahip KB30 kodlu kısa kaplanmamış malzeme hariç tutulursa diğer kısa ve orta elyafli malzemeler hemen hemen aynı elastisite modülüne sahiptirler. Bu malzeme gruplarının elastisite modülü değeri yaklaşık 6 GPa'dır. Fakat uzun elyafli UKB30 malzemesi 6,68 GPa ile bunlardan daha yüksek bir değere sahiptir. Bu durumda orta ve kısa elyafli malzemelerde elyaf boyutunun elastisiteye belirgin bir etkisi olduğu söylenemez.

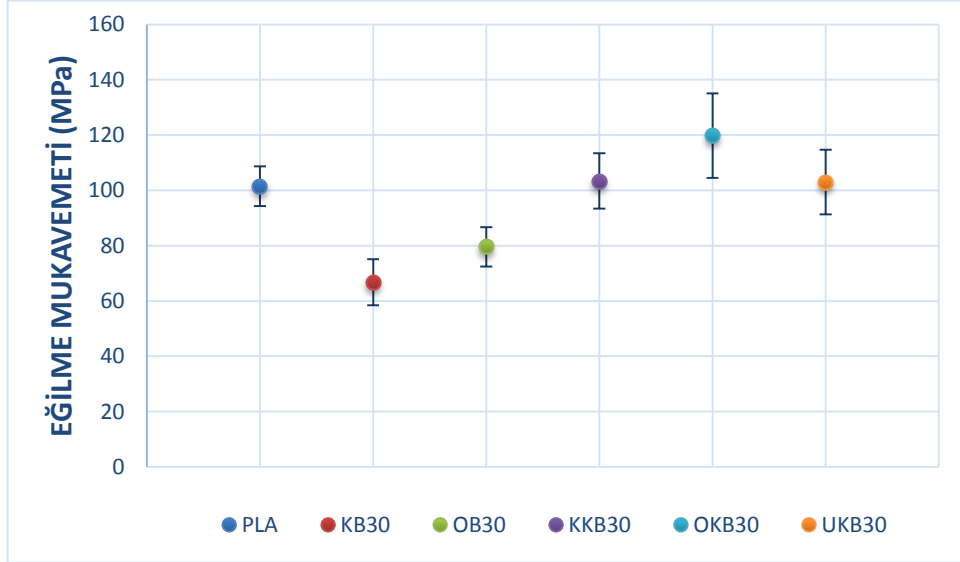
Saf PLA'nın 3,46 GPa elastisite ile tüm gruplar içinde en düşük elastisiteye sahip olduğu dikkate alınarak elyaf katkısıyla elastisite modülü değerinin arttığı söylenebilir. Bazalt elyaf katkısı bu gruplarda elastisite modülünü yaklaşık ortalama % 70 artırmıştır.

Yüzde uzama değerleri Şekil 36'da gösterilmiştir. En yüksek değer 1,14 ile saf PLA'nındır. Elyafli malzemelere bakarsak kaplamasız elyafılardan kaplanmış elyafılara yüzde uzama değerinin arttığı görülmektedir. KB30 ve OB30 kodlu kaplamasız malzemeler yaklaşık 0,58 ile en düşük değere sahiptirler. KKB30, OKB30 ve UKB30 malzemelerine bakılırsa elyaf boyutunun da aynı şekilde yüzde uzama değerini arttırdığı söylenebilir. Genel olarak elyaf katkısı yüzde uzamayı olumsuz etkilemiştir. Elyaf katkısı % uzama değerini % 50'ye kadar düşürmüştür.



Şekil 36. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin yüzde uzama grafiği

4.1.3. Eğilme Testi



Şekil 37. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme mukavemeti grafiği

Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerde en yüksek eğilme mukavemeti değeri OKB30 kodlu orta elyaf boyutlu kalplanmış malzemesine aittir. Bu malzemenin çekme

mukavemeti değeri, 119,8 MPa'dır. En düşük değer ise 66,8 MPa ile KB30 kodlu malzemenindir.

Kaplanmış malzemelerin kaplanmamış malzemelerden daha yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğu göz önünde belirlenmiştir. Kaplanmış malzemeler kaplanmamışlara göre % 34 daha fazla eğilme mukavemetine sahiptir. Bu durum, kaplama yapılan malzemelerde matris ve elyaf arayüzeyinin daha iyi yapışma göstermesiyle açıklanabilir.

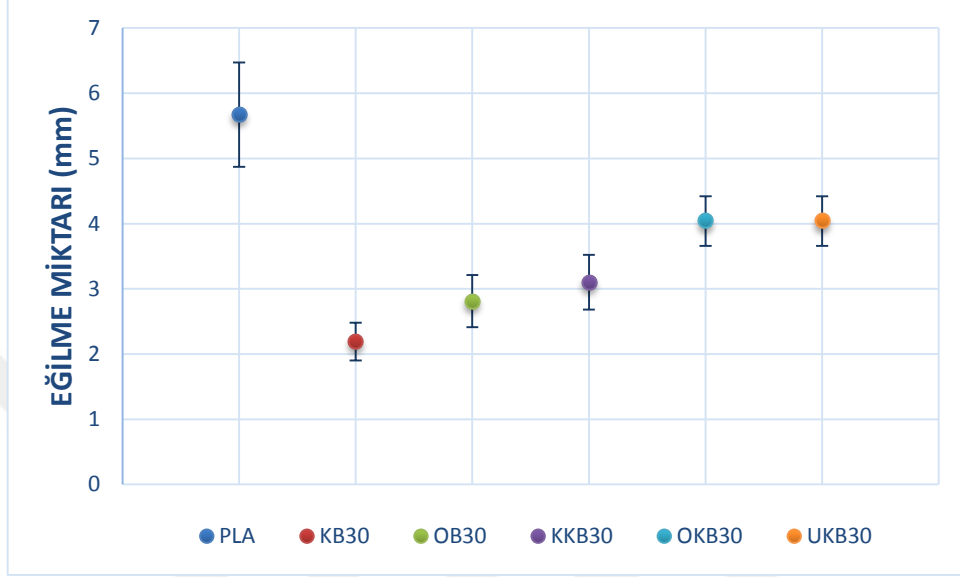
Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerde artan elyaf boyutuyla çekme mukavemetinin arttığı belirlenmiştir. Kaplanmış ve de kaplanmamış malzemelerde orta elyaf boyutlu malzemeler kısa elyaflılardan daha yüksek eğilme mukavemetine sahiptir. Fakat UKB30 malzemesinin OKB30'dan daha düşük eğilme mukavemeti göstermesinden dolayı bu mukavemet artışının elyaf boyutunun artmasıyla devamlı olarak artacağı söylenemez. Bununla birlikte gruplarda ve de özellikle UKB30 malzemesindeki yüksek standart sapmalar da gözardı edilmemelidir.



Şekil 38. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme modülü grafiği

Eğilme modülü değerleri diğer grafiklerden farklı bir eğilim sergilemektedir. En yüksek değer 6,24 GPa ile KB30 kodlu malzemenindir. En düşük değer ise 3,08 GPa ile KKB30 kodlu malzemenindir. Bununla birlikte her iki malzeme de yüksek standart sapmaya sahip olması önemlidir. Malzemeler kaplama türü ya da elyaf boyutuna göre düzgün

eğilimler göstermediği için sonuçları yorumlamak güç olmaktadır. Fakat KKB30 malzemesi dışarıda tutulursa genel olarak elyaf katkısıyla eğilme modülünün arttığı söylenebilir.



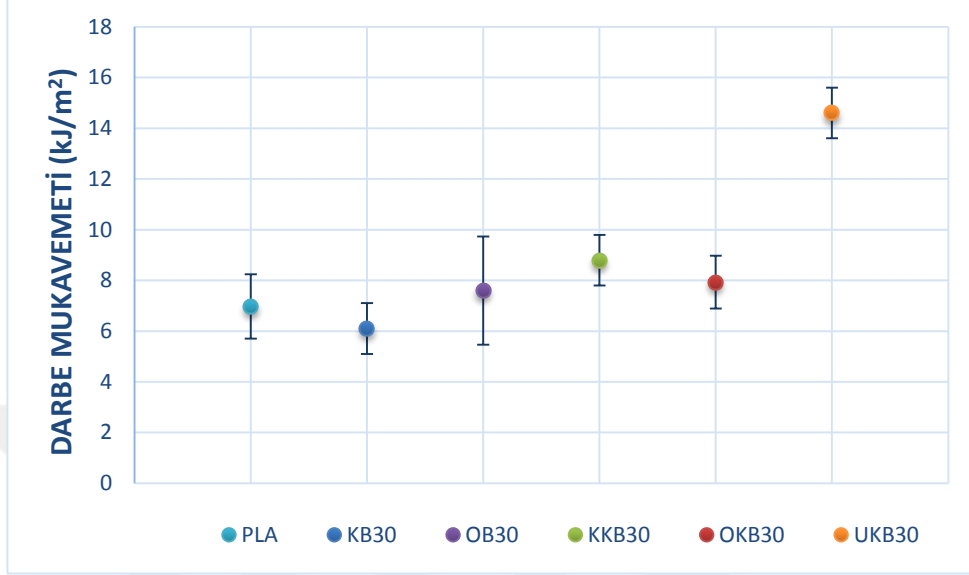
Şekil 39. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin eğilme miktarı grafiği

Eğilme miktarı değerlerinde en yüksek değer 5,67 ile saf PLA'dadır. Elyafli malzemelere bakarsak, kaplamasız elyafılardan kaplanmış elyafılara doğru, eğilme miktarı değerinin arttığı görülmektedir. KB30 kodlu kaplamasız malzeme yaklaşık 2,19 mm ile en düşük değere sahiptir. Orta ve kısa elyafli malzemelere bakılırsa elyaf boyutunun da aynı şekilde eğilme miktarı değerini arttırdığı söylenebilir. UKB30'un OKB30'a yakın bir eğilme miktarına sahip olması, elyaf boyutunun devamlı olarak eğilme miktarını artırmadığını gösteren bir sonuçtur. Genel olarak elyaf katkısı uzama miktarını olumsuz yönde etkilemiştir. Elyaf katkısı eğilme miktarı değerini yaklaşık % 50'ye kadar düşürmüştür.

4.1.4. Darbe Testi

Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerde, darbe mukavemeti değerleri belirgin farklar barındırmamakla birlikte genel bir ifadeyle elyaf katkısıyla darbe mukavemetinin arttığı söylenebilir. Bununla birlikte en düşük değer 6,1 (kJ / m²) ile KB30 kodlu

malzemenindir. En yüksek değer ise 8,8 ile KKB30 malzemesidir. UKB30 malzemesi ise diğer tüm gruplardan belirgin şekilde yüksek darbe mukavemetine sahiptir.



Şekil 40. Kısa ve orta elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti grafiği

4.1.5. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

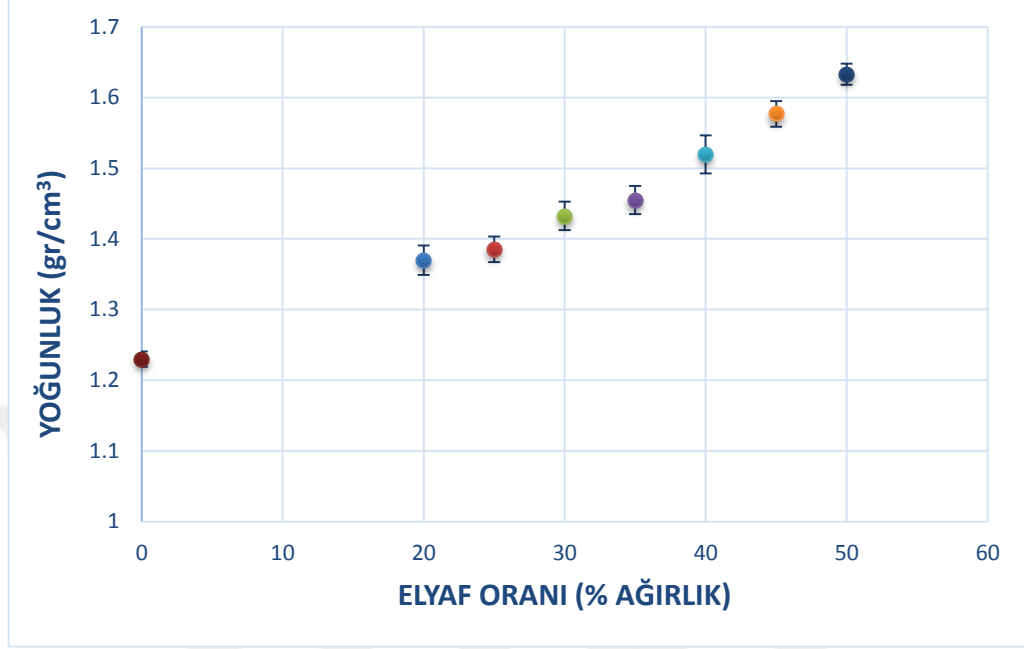
Alınan SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere elyaf kaplaması elyafın matrise daha iyi yapışmasını bu da mekanik özellikleri artırmaktadır. Görüntülere bakılırsa elyaf kaplaması yapılmayan malzemelerin yapışmasının iyi olmadığı ve elyafların matristen sıyrıldığı anlaşılmaktadır. Görüntülerde elyaf boyutlarıyla ilgili açık bir fark görülmemektedir.

4.2. Elyaf Ağırlık Oranının Mekanik Özelliklere Etkisi

4.2.1. Yoğunluk Testi

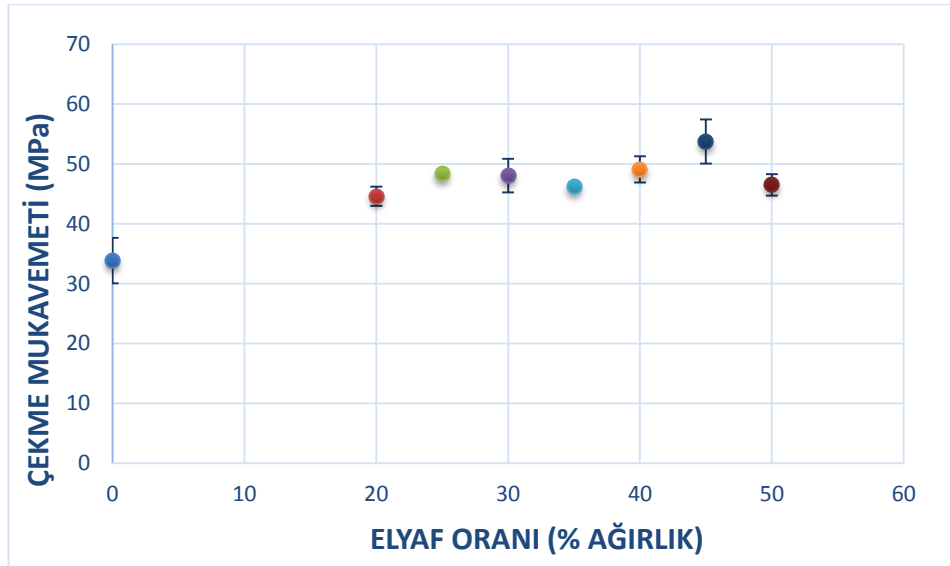
Yapılan yoğunluk testinde ortaya çıkan sonuçlar Şekil 41’de gösterilmiştir. Grafikte artan bazalt elyaf ağırlık oranıyla yoğunluk değerlerinin de arttığı ve en yüksek değere sahip malzemenin ağırlıkça %50 elyaf içeren malzeme olduğu görülmektedir. Bazaltın yoğunluğunun 2,59 gr/cm³ olduğu bilindiğinden bu beklenen bir sonuçtur. %50 elyaf içeren

malzemenin yoğunluğu $1,63 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Saf PLA'nın yoğunluğu $1,23 \text{ gr/cm}^3$ olduğundan bazalt elyaf katkısı yoğunluğu %33'e kadar artırmıştır.



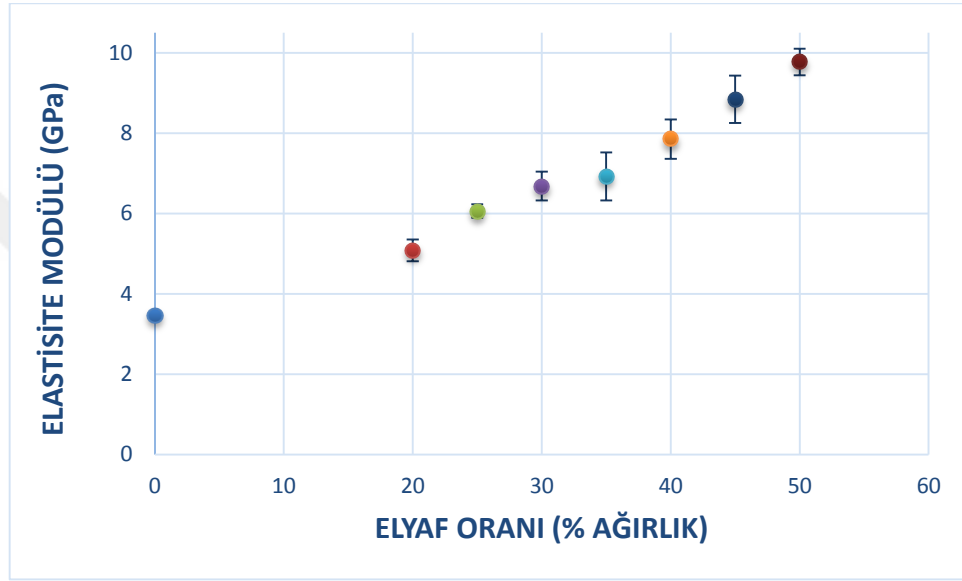
Şekil 41. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk değerlerinin grafiği

4.2.2. Çekme Testi



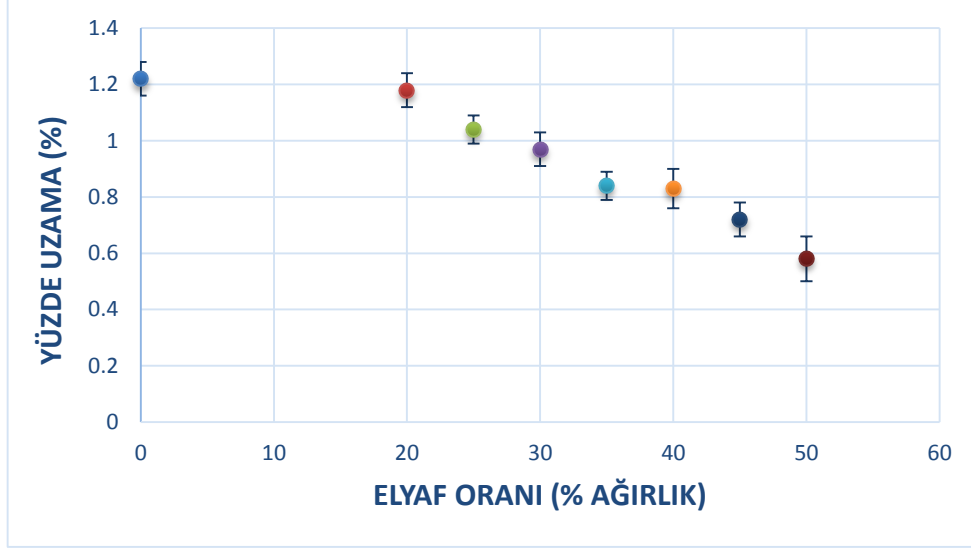
Şekil 42. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin çekme mukavemeti grafiği

Bazalt elyaf takviyesinin çekme mukavemetini arttırdığı Şekil 42’de görülmektedir. Ayrıca %45 elyaf oranına kadar gruplar arasında belirgin bir fark olmamakla birlikte %45 elyaf oranında en yüksek değere çıkan çekme mukavemeti değerinin elyaf oranı %50’ye çıktığında belirgin bir düşüşe geçtiği görülmektedir. %45 elyaf oranlı malzemenin çekme mukavemeti 55,73 MPa’dır. En düşük değer ise 33,84 MPa ile saf PLA’nındır. %50 elyaf oranında düşüşün sebebi malzeme içerisindeki boşluklar olabilir.



Şekil 43. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin yoğunluk grafiği

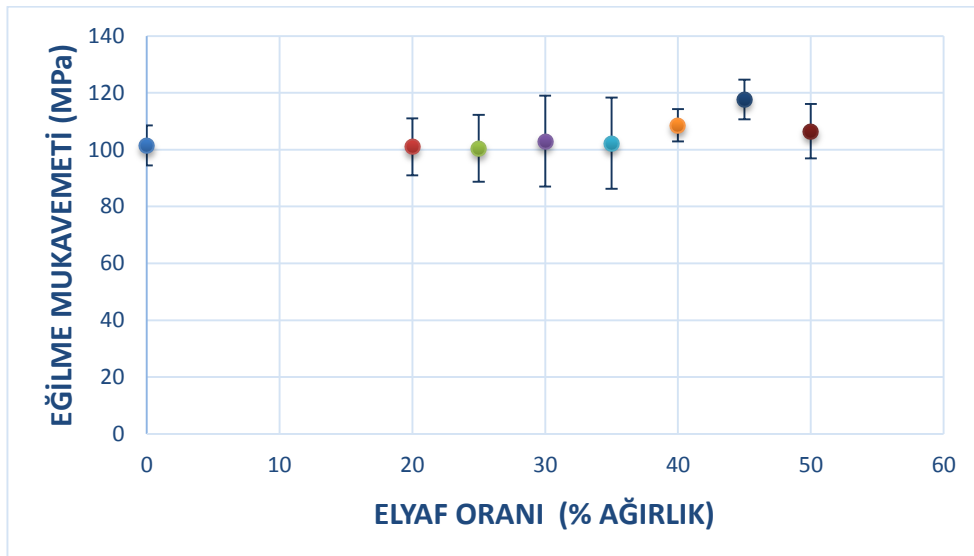
Şekil 43’te açıkça görüldüğü gibi artan bazalt elyaf oranı elastisite modülünü de artırmaktadır. Çekme mukavemeti değerinden farklı olarak %50 elyaf oranında da bu artış devam etmiş ve en yüksek elastisite modülü değeri ağırlıkça %50 elyaf içeren malzemede gözlenmiştir. %50 elyaf içeren malzemenin elastisite modülü 9,77 GPa’dır. Saf PLA ise 3,46 GPa ile en düşük değere sahiptir. Bazalt katkısı elastisiteyi yaklaşık %180’e kadar artırmıştır.



Şekil 44. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin yüzde uzama değerlerinin grafiği

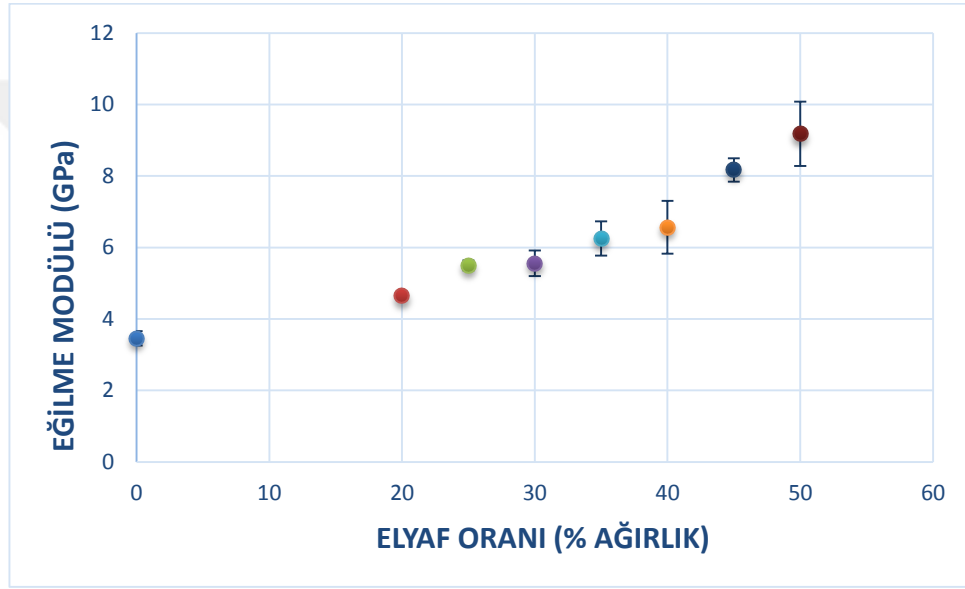
Yüzde uzama grafiğinde en yüksek değer PLA'nındır. PLA'nın yüzde uzaması 1,22'dir. Grafikte artan elyaf oranıyla birlikte yüzde uzamanın düzgün bir şekilde azaldığı ve %50 elyafli numunede 0,58 ile en düşük değeri gösterdiği görülmektedir. Genel bir ifadeyle elyaf oranının artmasıyla yüzde uzama miktarı azalmıştır. Yüzde uzama değeri saf PLA'ya göre %52'ye kadar düşmüştür.

4.2.3. Eğilme Testi



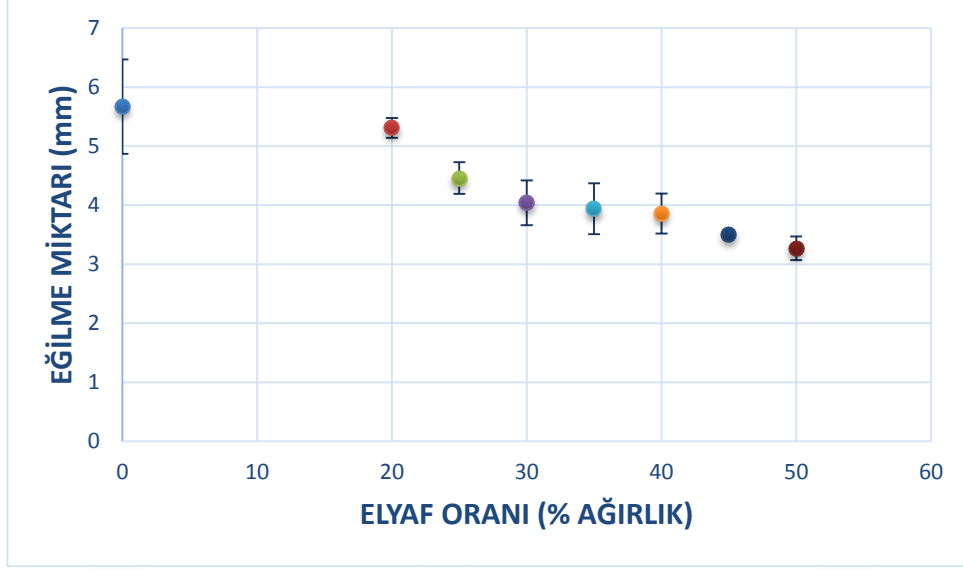
Şekil 45. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme mukavemeti grafiği

Şekil 45'ten anlaşılabacağı gibi bazalt elyaf takviyesi %35 elyaf oranına kadar eğilme mukavemetini pek artırmamakla beraber %40 ve %45 elyaf oranına sahip malzemelerde eğilme mukavemetindeki artışın ardından %50 elyaf oranında ise yine bir düşüş görülmektedir. En yüksek eğilme mukavemeti değeri %45 elyaf içeren malzemeye aittir. Bu malzemenin eğilme mukavemeti 117,7 MPa'dır. %50 elyaf oranında, artan elyaf oranıyla birlikte mukavemetteki düşüşün sebebi, malzeme içerisinde bulunan boşluklar olabilir. Bu boşlukların varlığı %50 oranında matrisin elyafı iyi ıslatamamasına neden olur.



Şekil 46. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme modülü grafiği

Eğilme modülü değeri genel olarak bazalt elyaf oranının artmasıyla artmıştır. En yüksek değer %50 elyaf içeren malzeme aittir. Eğilme mukavemeti değerinden farklı olarak %50 elyaf oranında da bu artış devam etmiş ve en yüksek elastisite modülü değeri ağırlıkça %50 elyaf içeren malzemede gözlenmiştir. %50 elyaf içeren malzemenin eğilme modülü 9,18 GPa'dır. Saf PLA ise 3,46 GPa ile en düşük değere sahiptir. Artan bazalt katkısıyla elastisite modülü %160'a kadar artmıştır.

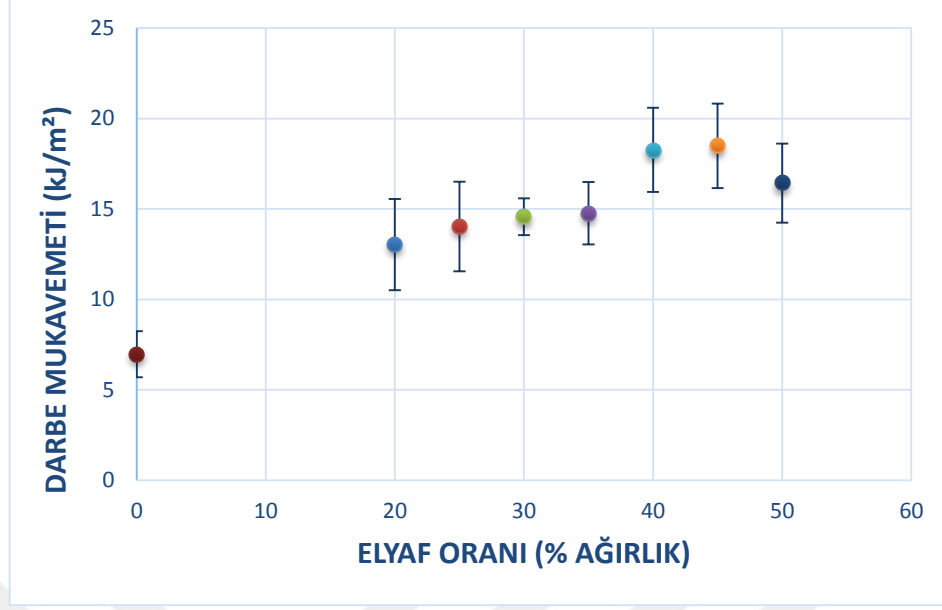


Şekil 47. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin eğilme miktarı grafiği

Eğilme miktarı değerlerinde en yüksek değer saf PLA'ya aittir. Genel olarak elyaf takviyesinin bu değeri düşürdüğü görülmüştür. PLA'nın eğilme miktarı 5,67 mm'dir. En düşük değer ise 3,27 mm ile %50 elyafı malzemeye aittir. Artan bazalt oranıyla eğilme miktarı değeri %42'ye kadar düşmüştür.

4.2.4. Darbe Testi

Darbe mukavemeti değerinin artan Elyaf oranıyla genelde arttığı görülmüştür. Bazı gruplar arasında belirgin farklar olmamakla birlikte %40 ve %45 elyaf içeren malzemelerin en yüksek değere sahip oldukları %50 elyaf oranında ise darbe mukavemetinin düştüğü görülmüştür. Bu düşüşün muhtemel sebebi malzeme içinde oluşan boşluklardır. Artan boşluk miktarı matrisin elyafı sarmaması ve mukavemetin düşmesine sebep olur.



Şekil 48. Uzun elyaf boyutlu malzemelerin darbe mukavemeti grafiği

4.2.5. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Alınan SEM görüntülerinden anlaşıldığı üzere elyaf oranı arttıkça malzemedeki elyafların yoğunlaştığı görülmüştür. Uzun elyaflı malzemelerde aynı zamanda kaplama da olduğu için matris malzemesiyle iyi ıslanma gösterdiği görüntülerden anlaşılmıştır. Ayrıca elyafların kırılma yüzeyine paralel bir şekilde yönlendiği görülmüştür. Bu yönlenmenin malzemenin özelliklerini olumsuz etkilediği söylenebilir.

5. SONUÇLAR

1. Bazalt elyaf kaplaması PLA matrisli kompozit malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir.
2. Bazalt elyaf boyutu artışı, genel olarak kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini artırmaktadır.
3. Bazalt elyaf takviye oranının artmasıyla kompozit malzemenin yoğunluğu da artmaktadır.
4. Kırılmış bazalt elyaf takviyesi, PLA malzemenin çekme, eğilme ve darbe mukavemetini arttırmaktadır. En yüksek çekme, eğilme ve darbe mukavemeti ağırlıkça % 45 elyaf oranında gözlenmiştir.
5. Optimum mekanik özellikler, ağırlıkça % 45 bazalt elyaf oranına sahip kompozit malzemelerde görülmektedir.
6. Kompozit malzemelerde elastisite ve eğilme modülleri artan bazalt elyaf ağırlık oranıyla doğrusal olarak artmaktadır.
7. Kompozit malzemelerin yüzde uzama ve uzama miktarı artan bazalt elyaf takviyesi ile birlikte azalmaktadır.

6. ÖNERİLER

1. Elyafar kırık olarak değil, sürekli ya da dokuma şeklinde kullanılabilir.
2. Elyafara daha farklı kaplamalar uygulanabilir.
3. Kompozit numune üretiminde enjeksiyon kalıplama yöntemi uygulanabilir.
4. Tek vidalı yerine çift vidalı ekstrüder kullanılabilir.
5. Bazalt elyaf, cam ve karbon elyafarla hibrit olarak kullanılabilir.



7. KAYNAKLAR

1. Demir Topuk, Z., Doğal Lif Takviyeli Eko-Kompozitlerde Arayüzeyin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013.
2. Aydın F., Cam Lif Takviyeli Plastik (GFRP) Kompozit ve Beton İle Üretilen Hibrit Yapı Elemanlarının Mekanik Performansının Araştırılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Sakarya, 2011.
3. Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
4. Vadori, R., Studies on the Blending of Poly(Lactic Acid) and Acrylonitrile Butadiene Styrene, Yüksek Lisans Tezi, University of Guelph, Ontario, 2012.
5. Çelebi H. ve Dehmen S., Synthesis and Characterization of Starch/Polycaprolactone Based Biodegradable Nanocomposites, Journal of Engineering and Natural Sciences, 31 (2013) 53-62.
6. Meinander K., Niemi M., Hakola J.S. ve Selin J-F., Polylactide-Degradable Polymers for Fibres and Films, Macromol Symp., 123, 147–54, 1997.
7. Mathew A.P, Oksman K. ve Sain, M., Mechanical Properties of Biodegradable Composites From Poly Lactic Acid (PLA) and Microcrystalline Cellulose (MCC). Journal of Applied Polymer Science, 97 (2005) 2014–2025.
8. Yıldırım, R., Ceviz Kabuğundan Polimer Kompozit Levha Üretimi Ve Bazı Teknolojik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2005, 23-27.
9. Vegt A. K., From Polymers to Plastics, Delft University Press, 205-213, 2002.
10. Hakkarainen, M. ve Wistrand, A.F., Update on Polylactide Based Materials. Shawbury, Shrewsbury, GBR: iSmithers Rapra Publishing, ProQuest ebrary, 2011.
11. Yıldızhan H., Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2008.
12. Auras R., Lim L., Selke S.E.M. ve Tsuji H., Poly(lactic acid)-Synthesis, Structures, Properties, Processing and Application, 1st edition, New Jersey, U.S.A., 2010.
13. Altun, Y., Improvement Mechanical and Flame Retardancy Properties of Biocomposites Based on Low Density Polyethylene and Polylactic Acid, Doktora Tezi, O.D.T.Ü., Polymer Science and Technology Department, Ankara, 2015.
14. Mohanty A. K., Misra M. ve Drzal, L.T., Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites, Taylor&Francis Group, (2005).

15. Erbay, K., Silah Gövdeleri İçin Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
16. Guo, J., Mu S., Yu,C., Hu,C., Guan,F., Zhang.H. ve Gong,Y., Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene/Modified Basalt Fabric Composites, Journal of Applied Polymer Science, 132, 42504 (2015).
17. Lopresto, V., Leone, C. ve De Iorio, I., Mechanical Characterisation of Basalt Fibre Reinforced Plastic, I. Composite Part B Eng., 42 (2011) 717-723.
18. Ulegin, S.V., Kadykova, Y. A., Artemenko, S. E. ve Demidova, S.A., Basalt-Filled Epoxy Composite Materials, International Polymer Science and Technology, 41, 5, (2014) 57.
19. Czigany, T., Deak, T. ve Tamas, P., Discontinious Basalt and Glass Reinforced PP Composites From Textile Prefabricates: Effect of Interfacial Modification on the Mechanical Performance, Composite Interfaces, 15, 7–9 (2008) 697–707.
20. J. Militky, V. Kovacic ve J. Rubnerová, Influence of Thermal Treatment on Tensile Failure of Basalt Fibers, Engng Fract. Mech., 69 (2002) 1025–1033.
21. J. Militky ve V. Kovacic, Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments, Textile Research Journal, 66 (1996) 225–229.
22. Morozov, N.N., Bakunov, V.S. ve Morozov, E.N., Materials Based on Basalt From the European North of Russia, Glass and Ceramics, 58 (2001) 100–104.
23. Jung, T., ve Subramanian, R.V., Strengthening of Basalt Fiber by Alumina Addition, Scripta Metallurgica et Materialia 28 (1993) 527-532.
24. Landucci, G., Rossi, F., Nicoletta, C. ve Zanelli, S., Fire Saf. J., 44 (2009) 1103.
25. Gümölcine, T., İzofthalik Polyester Reçine Matrisli Sürekli E-Camı ve Bazalt Fiber Destekli Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
26. Swink M., Continuous Filament Basalt A Unique Fiber Capable of Leadership in High Temperature Applications, Kuzey Amerika Tekstil Sempozyumu, Atlanta, GA, USA, Nisan, 2002.
27. Ünal, A.R., Geri Dönüşmüş Termoplastik Matrisli Kompozitlerin Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
28. Bal, H., Thermal and Mechanical Properties of Continious Fiber Reinforced Thermoplastics, Yüksek Lisans Tezi, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 2009.

29. Satyanarayana, K. G., Arizaga, G.G.C. ve Wypych, F., Biodegradable Composites Based On Lignocellulosic Fibers—An Overview, Progress in Polymer Science, 34 (2009) 982–1021.
30. Özdemir, Y., Otomotiv Sektöründe Kullanılan Doğal Lif Destekli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2009.
31. Karaduman, Y., Doğal Lif Destekli Polimer Kompozit Malzemelerin Otomotiv Sektöründe Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2009.
32. <http://www.mustafatunc.biz/bazalt>, 30 Mayıs 2016.
33. <http://www.bazaltkuptas.com/>, 30 Mayıs 2016.
34. Deák, T. ve Czigány, T., Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison, Textile Research Journal, 79, 7 (2009) 645–651.
35. Jamshaid, H. ve Mishra, R., A Green Material From Rock: Basalt Fiber – A Review, The Journal of The Textile Institute, 107, 7 (2016) 923–937.
36. Singha, K., A Short Review on Basalt Fiber, International Journal of Textile Science 1, 4 (2012) 19–28.
37. Artemenko, S.E. ve Y.A., Kadykova, Polymer Composite Materials Based on Carbon, Basalt, and Glass Fibres, Fibre Chemistry, 40, 1 (2008).
38. <http://www.basaltex.com/en/applications.aspx>, 31 Mayıs 2016.
39. <http://www.technobasalt.com/applications/>, 31 Mayıs 2016.
40. <http://www.spinteks.com/tr~urun~160~bazalt.html>, 31 Mayıs 2016.
41. Taşdemir, M., Polimer Karışımları ve Uygulamaları, Birinci Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2013.
42. Ekşi, O., Plastik Esaslı Malzemelerin Isıl Şekil Verme Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2007.
43. Karagöz, S., Poli(laktik Asit)/Modifiye Termoplastik Nişasta Karışımları, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012.
44. Zarrabi Ahrabi, A., Pet Atıkları Kullanılarak Kompozit Malzeme Üretiminin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.

45. Tábi, T., Tamás, P. ve Kovács, J.G., Chopped Basalt Fibres: A New Perspective in Reinforcing Poly(lactic Acid) to Produce Injection Moulded Engineering Composites From Renewable and Natural Resources., eXPRESS Polymer Letters, 7, 2 (2013) 107–119.
46. Liu, T., Yu, F., Yu, X., Zhao, X., Lu, A. ve Wang, J., Basalt Fiber Reinforced and Elastomer Toughened Polylactide Composites: Mechanical Properties, Rheology, Crystallization, and Morphology, Journal of Applied Polymer Science, 125 (2012) 1292–1301.
47. Zhang, Z.F. ve Xin, Y., Mechanical Properties of Basalt-Fiber-Reinforced Polyamide-6/Polypropylene, Composites Mechanics of Composite Materials, 50, 4 (2014) 509-514.
48. Zhang, Y., Yu, C., Chu, P.K., Lv, F., Zhang, C. ve Ji, J., Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fiber Reinforced Poly(butylene Succinate) Composites, Materials Chemistry and Physics, 133 (2012) 845– 849.
49. Tabi, T., Egerhazi A.Z., Tamas P., Czigany T. ve Kovacs J.G., Investigation of Injection Moulded Poly(lactic Acid) Reinforced with Long Basalt Fibres, Composites: Part A, 64 (2014) 99–106.
50. Manshor M.R., Anuar H., Aimi, M.N.N., Fitrie M.I.A., Nazri, W.B.W., Sapuan S.M., El-Shekeil, Y.A. ve Wahit M.U., Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Durian Skin Fibre Reinforced PLA Biocomposites, Materials and Design, 59 (2014) 279–286.
51. Ochi, S., Mechanical Properties of Kenaf Fibers and Kenaf/PLA Composites, Mechanics of Materials, 40 (2008) 446–452.
52. Jonoobi, M., Harun J., Mathew, A.P. ve Oksman, K., Mechanical Properties of Cellulose Nanofiber (CNF) Reinforced Polylactic Acid (PLA) Prepared by Twin Screw Extrusion, Composites Science and Technology, 70 (2010) 1742–1747.
53. Oksman, K., Skrifvars, M. ve Selin, J.F., Natural Fibres as Reinforcement in Polylactic Acid (PLA) Composites, Composites Science and Technology, 63 (2003) 1317–1324.
54. Bax, B. ve Müssig J., Impact and Tensile Properties of PLA/Cordenka and PLA/Flax Composites, Composites Science and Technology, 68 (2008) 1601–1607.
55. Sawpan, M.A., Pickering K.L. ve Fernyhough, A., Flexural Properties of Hemp Fibre Reinforced Polylactide and Unsaturated Polyester Composites, Composites: Part A, 43 (2012) 519–526.
56. Hu, R.H. ve Lim, J.K., Fabrication and Mechanical Properties of Completely Biodegradable Hemp Fiber Reinforced Polylactic Acid Composites, Journal of Composite Materials, 41, 13 (2007) 1655-1669.

57. Baghaei, B., Skrifvars, M., Rissanen, M. ve Ramamoorthy, S.M., Mechanical and Thermal Characterization of Compression Moulded Polylactic Acid Natural Fiber Composites Reinforced with Hemp and Lyocell Fibers, *Journal of Applying Polymer Science*, 131, 40534 (2014) 1-10.
58. Grouponar, N., Improvement of the Mechanical Properties of Biodegradable Hemp Fiber Reinforced Poly(lactic acid) (PLA) Composites by the Admixture of Man-made Cellulose Fibers, *Journal of Composite Materials*, 43, 06 (2009) 689-702.



ÖZGEÇMİŞ

Murat KAYA 1989 yılında İstanbul/Pendik’te doğdu. 2007 yılında Fatin Rüştü Zorlu Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi’ni bitirdi. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinden “Metalurji Mühendisi” ünvanı ile mezun oldu. 2013 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.

