



Polilaktik Asit Biyokompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Modellenmesi

Biyokompozit Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora Tezi

Özay Aksoy

ORCID 0000-0002-4257-4665

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Özgür Seydibeyoğlu

Aralık 2022

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Özay Aksoy** tarafından hazırlanan **Polilaktik Asit Biyokompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Modellenmesi** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

ONAYLAYANLAR:

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. M. Özgür Seydibeyoğlu**
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Levent Aydın
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Elif Alyamaç Seydibeyoğlu
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Prof. Dr. Ümit Halis Erdoğan
Dokuz Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Sarıkanat
Ege Üniversitesi

Savunma Tarihi: 29.12.2022

Yazarlık Beyanı

Ben, **Özay Aksoy**, başlığı **Polilaktik Asit Biyokompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Modellenmesi** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

- Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Doktora derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.
- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

Tarih: 29.12.2022

Polilaktik Asit Biyokompozitlerin Geliştirilmesi ve Mekanik Modellenmesi

ÖZ

Türkiye’de yerel madenler kullanılarak biyokompozit hammaddelerin üretilmesinin ön hazırlık araştırılması, yerel bilimsel imkanlar kullanılarak teknik özelliklerinin ve farklı sektörler için mekanik ürünleştirme kapasitesinin belirlenmesi tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada kullandığımız Polilaktik Asitin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) 65 °C olup gevrek bir polimerdir. Perlit, silikat içerikli volkanik bir kaya olup, hızlıca ısıtıldığı zaman cevher formundaki hacminin 20 katına kadar genleşebildiği görülmektedir.

Bu doktora tez çalışmasında, Polilaktik Asit ve farklı türde perlitleri karıştırıp yeni bir biyokompozit malzeme grubu üretilmiştir. Bu yeni malzeme grubundan mekanik bir ürün elde etmek için, biyokompozitlerin mekanik, reolojik ve termal özellikleri incelenmiştir. Araştırma esnasında, polilaktik asit, perlit ve kavak ağacı biyokompozitlerinin öncelikli olarak otomotiv ve züccaciye sektörleri için uygulama imkanlarının incelemesi hedeflenmiştir. Genleşmiş ve yarı işlenmiş formlardaki perlit numuneleri x-ışını floresans spektrometresi, x-ışını kırınımı, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, piknometre, Brunauer-Emmett-Teller yüzey alanı analizi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, ısı kütlesi kaybı analizi ile test edilmiş ardından ekstrüderde polilaktik asit ve polilaktik asit+kavak ağacı talaşı ile farklı yüzde oranlarında karıştırılmıştır. Son olarak üretilen biyokompozit numuneler çekme testi, reometre, ısı kütlesi kaybı analizi, diferansiyel taramalı kalorimetre ile karakterize edilip Mathematica yazılımı kullanılarak mekanik modelleme yapılmıştır. Bu sayede polilaktik asit+perlit malzemesi matematiksel ve deneysel anlamda karakterize edilmiştir. Çalışmanın bu iki yönlü karakterizasyonu literatüre kazandırılmıştır. Geline aşamada standart mikromekanik yarı deneysel modeller kullanılarak malzeme davranışını tahmin etmek mümkün olmadığından, modifiye edilmiş Guth hesaplama yöntemi geliştirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: PLA, perlit, biyokompozit, mekanik modelleme, karakterizasyon

Development and Mechanical Modelling of Polylactic Acid Biocomposites

Abstract

In the scope of this doctoral thesis, preliminary research on biocomposite materials with domestic minerals, determination of technical properties and mechanic product realization capacities for different sectors using local scientific capabilities were performed. Polylactic Acid used in this study, is a brittle polymer whose glass transition temperature (T_g) is 65 °C. Perlite is a silicate containing volcanic rock that can expand up to 20 times its volume in the ore form when heated rapidly.

In this doctoral thesis, PLA and different perlite samples were mixed and new biocomposite materials were produced. In order to obtain new products from these new materials; mechanical, rheological and thermal properties of biocomposites were investigated. During the research, it was aimed to examine the application possibilities of polylactic acid, perlite, poplar wood sawdust biocomposites primarily for the automotive and glassware sectors. In this context, perlite samples in expanded and semi-processed forms were tested with x-ray fluorescence spectroscopy, x-ray diffractometer, optical microscope, scanning electron microscope, pycnometer, Brunauer-Emmett-Teller surface area analysis, Fourier transform infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis” and then mixed with polylactic acid and polylactic acid+poplar wood sawdust at different percent ratios in the extruder. Finally, the produced biocomposite samples were characterized by tensile test, rheometer, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimeter and modelled with Mathematica software. For this reason, polylactic acid+perlite material was characterized mathematically and experimentally. This two way characterization of the study was brought to the literature. Since it was not possible to predict material behavior using standard micromechanical semi-empirical models at this stage, modified Guth calculation method was developed.

Keywords: PLA, perlite, biocomposites, mechanical modelling, characterization

Tez çalışmasını anneme, babama, ablama ve danışman hocama ithaf ediyorum.

Teşekkür

Tez çalışmasına katkılarından dolayı:

Bias Mühendislik'e Digimat lisansı için ve sonlu elemanlar yöntemiyle biyokompozit malzeme simülasyonuna katkılarından dolayı,

Erenli Kauçuk firmasından Dr. Gökçe Bakiler'e, İren Seçkin İşcan'a, Egeplast firmasından Ali Güroğlu'na çekme testlerinin denemeleri için,

Ege Üniversitesi'nden Doç. Dr. Mehmet Sarıkanat'a çekme testlerinin gerçekleştirilmesi için,

Budin Masterbatch firmasından Mert Yüçetürk'e ekstrüderde biyokompozitlerin oluşturulması için,

Gebze Teknik Üniversitesi'nden Dr. Öğretim Üyesi Merve Mocan'a bilimsel katkıları için,

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi'nden Nihan Özveren Uçar'a hammadde karakterizasyonundaki desteği ve bilimsel katkıları için,

Biyokompozit malzemeler konusunda bilimsel çalışmalarda destek olan Prof. Dr. Nilgül Çetin, Prof. Dr. Kutlay Sever ve Dr. Öğr. Üyesi Elif Alyamaç Seydibeyoğlu'na,

Reolojik analizlerde destek olan Dr. Öğr. Üyesi Nusret Kaya ve Dr. Sibel Demiroğlu Mustafafov'a,

Mathematica yazılımı yardımıyla mekanik modellemede destek olan Doç. Dr. Levent Aydın'a,

Doktoramda büyük desteğini aldığım sayın danışman hocam Prof. Dr. M. Özgür Seydibeyoğlu'na,

Teşekkür ederim.

Özay AKSOY

İçindekiler

Yazarlık Beyanı	ii
Öz	iii
Abstract	iv
Teşekkür	vi
Şekiller Listesi.....	xii
Tablolar Listesi.....	xiv
Kısaltmalar Listesi	xvi
Semboller Listesi.....	xviii
Giriş	1
1.1 Kompozit Nedir?.....	2
1.2 Biyokompozitlerin Tanımı.....	3
1.2.1 Güçlendirici Malzemesi.....	3
1.2.2 Matriks / Anafaz Malzemesi.....	4
1.3 Biyopolimerler	4
1.4 Polilaktik Asit (PLA)	6
1.4.1 Kullanılan Polilaktik Asit (PLA) Özellikleri.....	8
1.5 Perlit.....	8
1.6 PLA + Perlit Biyokompozitlerin Analitik Yöntemlerle Modellenmesi.....	10
1.6.1 Küresel Partikül Sistemleri İçin Yarı Deneysel Modeller	11
1.6.1.1 Halpin Tsai Modeli.....	12
1.6.1.2 S Kombine Kuralı.....	13
1.6.1.3 Chantler, Hu ve Boyd Modeli	14

1.6.1.4	Guth ve Gold Modeli.....	14
1.6.2	Küresel Olmayan Partiküllü Sistemler İçin Yarı Deneysel Modeller	15
1.6.2.1	Halpin Kardos Modeli	15
1.6.2.2	Değiştirilmiş Halpin Tsai Modeli.....	16
1.6.2.3	Guth Modeli	16
1.6.2.4	Brodnyan Modeli.....	17
1.7	Literatür Özeti.....	17
1.8	Özgün Değer	19
1.9	Problem Analizi, Araştırma Amaçları ve Önemi.....	20
	Deneysel.....	22
2.1	Malzemeler	22
2.2	Malzemelerin Hazırlanması	24
2.3	Gerçekleştirilen Testler	26
2.3.1	Alt Hammadde Grubu Perlit Testleri.....	26
2.3.1.1	X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF).....	26
2.3.1.2	X-Işını Kırınımı (XRD).....	26
2.3.1.3	Optik Mikroskop	26
2.3.1.4	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	26
2.3.1.5	Sıvı Piknometresi	27
2.3.1.6	Brunauer-Emmett-Teller Yüzey Alanı Analizi (BET).....	27
2.3.1.7	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR).....	28
2.3.1.8	Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA).....	28
2.3.2	Biyokompozitlere Uygulanan Testler.....	28
2.3.2.1	Biyokompozitlere Uygulanan Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri	28
2.3.2.2	Biyokompozitlere Uygulanan Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri	28

2.3.2.3	Biyokompozitlere Uygulanan Reometre Testleri.....	28
2.3.2.4	Biyokompozitlere Uygulanan Çekme Testleri.....	29
2.4	Mekanik Modelleme	29
Sonuçlar ve Tartışma.....		31
3.1	Perlit Madeni.....	31
3.1.1	XRF Analizi.....	31
3.1.2	XRD Analizi	34
3.1.3	Optik Mikroskop.....	35
3.1.4	SEM İncelemeleri	36
3.1.5	Yoğunluk	38
3.1.6	BET Yüzey Alanı Analizi.....	39
3.1.7	FTIR Analizi.....	39
3.1.8	TGA.....	41
3.2	Perlit + PLA Testleri.....	43
3.2.1	Perlit + PLA DSC Testleri.....	43
3.2.1.1	Mikronize / Genleşmemiş Tip 1 Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri.....	43
3.2.1.2	İnce / Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri	45
3.2.1.3	İnce / Genleşmemiş Maden Tip 3 Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri.....	46
3.2.2	Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri	47
3.2.2.1	Mikronize / Genleşmemiş Maden Tip 1 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri	47
3.2.2.2	İnce / Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri	49
3.2.2.3	İnce Maden / Genleşmemiş Tip 3 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri	50
3.2.3	Perlit + PLA Reometre Testleri	52

3.2.3.1	Karşılaştırmalı Mikronize Maden / Mikronize-Genleşmemiş- Tip 1 Perlit + PLA Depolama/Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama.....	53
3.2.3.2	Karşılaştırmalı Mikronize Maden / Mikronize-Genleşmemiş- Tip 1 Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama.....	54
3.2.3.3	Karşılaştırmalı İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Depolama / Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama ..	55
3.2.3.4	Karşılaştırmalı İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama.....	56
3.2.3.5	Karşılaştırmalı İnce Genleşmemiş Maden Tip 3 Perlit + PLA Depolama / Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama.....	57
3.2.3.6	Karşılaştırmalı İnce / Genleşmemiş Maden Tip 3 Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama.....	58
3.2.4	Perlit + PLA Çekme Testleri	59
3.3	İnce Genleşmiş Perlit + Kavak Ağacı Talaşı + PLA Testleri	62
3.3.1	Kavak Ağacı Tozu + İnce Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri	62
3.3.2	Kavak Ağacı Tozu + İnce Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri	63
3.3.3	Perlit + Kavak Ağacı Talaşı + PLA Reoloji Testleri.....	64
3.3.3.1	Karşılaştırmalı Kavak Ağacı Tozu + İnce Perlit + PLA Depolama / Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama.....	64
3.3.3.2	Karşılaştırmalı Kavak Ağacı Tozu + İnce Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama	65
3.3.4	İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + Kavak Ağacı Talaşı + PLA Çekme Testleri	65
3.4	İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Young Modülünün Modellenmesi	66
4	Sonuç.....	70
	Kaynaklar	73
	Ekler	84

Ek A Tezden Üretilmiş Yayınlar	85
Ek B Mathematica Kaynak Kodları (B.1, B.2, B.3).....	86
Özgeçmiş	98

Şekiller Listesi

Şekil 1.1	Plastiklerin sınıflandırılması	5
Şekil 1.2	Laktit ve PLA'ların stereoizomerlerinin yapıları.....	7
Şekil 1.3	Genleşmiş perlit.....	8
Şekil 2.1	Labtech Mühendislik LTE-20-44 çift vidalı ekstrüder	25
Şekil 2.2	ASTM D638 IV standardına göre çekme testi çubuğu ölçüleri	29
Şekil 3.1	Test edilen perlit numunelerinin XRD desenleri.....	34
Şekil 3.2	Perlitlerin optik mikroskop görüntüleri.....	36
Şekil 3.3	1000X büyütmede perlit örneklerinin SEM görüntüleri	37
Şekil 3.4	Genleşmiş ve ön işlenmiş perlit numunelerinin FTIR spektrumları	40
Şekil 3.5	Tüm perlit numunelerinin TGA sonuçları (%94-100)	42
Şekil 3.6	Mikronize / genleşmemiş tip 1 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) Grafiği	43
Şekil 3.7	İnce / genleşmiş tip 2 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) grafiği	45
Şekil 3.8	İnce / genleşmemiş maden tip 3 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) grafiği	46
Şekil 3.9	Mikronize / genleşmemiş maden tip 1 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) grafiği	47
Şekil 3.10	İnce / genleşmiş tip 2 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) grafiği	49
Şekil 3.11	İnce / genleşmemiş maden tip 3 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) grafiği	50
Şekil 3.12	Karşılaştırmalı mikronize maden / mikronize genleşmemiş perlit depolama / kayıp modülü + PLA – açısal hız tarama testleri	53
Şekil 3.13	Karşılaştırmalı mikronize / genleşmemiş maden perlit + PLA kompleks viskozite – açısal hız grafiği.....	54
Şekil 3.14	Karşılaştırmalı ince tip2 genleşmiş perlit depolama / kayıp modülü – açısal hız tarama testleri	55

Şekil 3.15	Karşılaştırmalı ince / genişmiş perlit + PLA kompleks viskozite – açısız hız grafiği	56
Şekil 3.16	Karşılaştırmalı ince/genleşmiş perlit + PLA depolama / kayıp modülü – açısız hız grafiği	57
Şekil 3.17	Karşılaştırmalı ince genişmiş perlit + PLA kompleks viskozite – açısız hız grafiği	58
Şekil 3.18	Kavak ağacı tozu + ince genişmiş tip 2 perlit + PLA biyokompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) testleri	62
Şekil 3.19	Kavak ağacı tozu + ince genişmiş tip 2 perlit + PLA biyokompozitlerin ısı kütle kaybı analizi (TGA) testleri.....	63
Şekil 3.20	Karşılaştırmalı kavak ağacı tozu + ince genişmiş tip 2 perlit + PLA depolama/kayıp modülü reometre testleri – açısız hız tarama	64
Şekil 3.21	Karşılaştırmalı kavak ağacı tozu + ince genişmiş tip 2 perlit + PLA kompleks viskozite reometre testleri – açısız hız tarama	65
Şekil 3.22	Halpin Kardos denklemi için kompozit malzemenin Young modülü – güçlendirici malzemenin hacim kütle oranı grafiği.....	66
Şekil 3.23	Değiştirilmiş Halpin Tsai, Guth, Brodnyan, Halpin Kardos denklemleri için kompozit malzemelerin Young modülü – güçlendirici malzemenin hacim kütle oranı grafikleri	67
Şekil 3.24	PLA+Perlit test edilen deneysel değerler, değiştirilmiş Guth modeli, Guth modeli, kompozit malzeme Young modülü-pulsu formda olan hacim oranları grafikleri.....	68
Şekil 3.25	HDPE+Perlit test edilen deneysel değerler, değiştirilmiş Guth modeli, Guth modeli, kompozit malzeme Young modülü c pulsusu formda olan perlitlerin hacim oranları grafikleri	69

Tablolar Listesi

Tablo 1.1	Türkiye perlit rezervleri	9
Tablo 2.1	PLA-Luminy L130 özellikleri.....	24
Tablo 2.2	Oluşturulan PLA ve perlit biyokompozitlerin içeriği ve isimlendirilmesi	25
Tablo 2.3	Oluşturulan perlit + PLA + kavak ağacı hibrit biyokompozitlerin içeriği ve isimlendirilmesi.....	26
Tablo 3.1	Genleşmiş ve ön işlenmiş perlitlerin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça yüzde – toz metodu).....	33
Tablo 3.2	[63], [64] makalelerinde bulunan perlitlerin kimyasal bileşimleri (ağırlık yüzdeleri %)	33
Tablo 3.3	Perlitlerin gerçek yoğunlukları.....	38
Tablo 3.4	Perlitlerin BET yüzey alan değerleri.....	39
Tablo 3.5	Perlitlerin FTIR sonuçları.....	41
Tablo 3.6	Farklı tip perlitlerde uçucu içerik yüzdeleri	42
Tablo 3.7	Mikronize/genleşmemiş tip 1 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları.....	44
Tablo 3.8	İnce genleşmiş tip 2 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları.....	46
Tablo 3.9	İnce maden tip 3 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları	47
Tablo 3.10	Mikronize / genleşmemiş maden tip 1 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) test sonuçları.....	48
Tablo 3.11	İnce / genleşmiş tip 2 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) test sonuçları	50
Tablo 3.12	İnce maden / genleşmemiş tip 3 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) test sonuçları.....	51
Tablo 3.13	Oluşturulan perlitlerin çekme testi değerleri.....	59

Tablo 3.14 Çekme testinde kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri	60
Tablo 3.15 Kavak ağacı tozu + ince genişmiş tip 2 perlit + PLA biyokompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları.....	62
Tablo 3.16 Kavak ağacı tozu + ince genişmiş tip 2 perlit + PLA ısıl kütle kaybı analizi (TGA) test sonuçları.....	63
Tablo 3.17 PLA + ince / genişmiş tip 2 perlit + kavak ağacı talaşı çekme testi sonuçları	65

Kısaltmalar Listesi

PLA	Polilaktik Asit
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi
XRD	X-Işını Kırınımı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
BET	Brunauer-Emmett-Teller Yüzey Alanı Analizi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
TGA	Isıl Kütle Kaybı Analizi
KAT	Kavak Ağacı Talaşı/Tozu
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
Si	Silisyum
N	Azot
O	Oksijen
PVC	Polivinil Klorür
PC	Polikarbonat
PS	Polistiren
PMK	Polimer Matriks Kompozit
EKK	Elyaf Katkılı Kompozit
SMK	Seramik Matriks Kompozit
SiK	Silikon Karbür
MMK	Metal Matriks Kompozit
PGA	Poliglikolik Asit
PCL	Polikaprolakton

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
a	Tarımsal Genleşmiş Perlit
b	Kalın Genleşmiş Perlit
c	İnce Genleşmiş Perlit
d	M1 Genleşmiş Perlit
e	M3 Genleşmiş Perlit
f	Kalın Genleşmemiş Perlit
g	İnce Genleşmemiş Perlit
h	Mikronize Genleşmemiş Perlit
CHB	Chantler, Hu ve Boyd
GG	Guth ve Gold
HT	Halpin Tsai
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans
UV-VIS	Ultraviyole ve Görünür Bölge Moleküler Spektrofotometresi
PAni	Polianilin
PHA	Polihidroksialkanoat
MROM	Değiştirilmiş Karışımlar Kuralı
FEG	Alan Emisyon Tabancası

Semboller Listesi

E	Young Modülü
ν	Poisson Oranı
K	Malzemelerin Hacim Modülü
G	Malzemelerin Kayma Modülü
ξ	Halpin Tsai Denkleminde Matriksin Poisson Oranı, Güçlendirici Geometrisi, Yönlendirme ve Yüklenme Yönüne Bağlı Olan Bir Şekil Faktörü
V_f^{max}	S Kombine Kuralı'nda Güçlendirici Malzemenin En Fazla Hacim Oranı
E_k	Kompozit Malzemenin Young Modülü
E_m	Matriks Malzemenin Young Modülü
E_g	Güçlendirici Malzemenin Young Modülü
ν_g	Güçlendirici Malzemenin Poisson Oranı
ν_m	Matriks Malzemenin Poisson Oranı
μm	Mikron
ω	Reoloji Analizlerinde Salınım Frekansı/Açısal Hız
G'	Depolama Modülü
G''	Kayıp Modülü
η^*	Kompleks Viskozite

Bölüm 1

Giriş

Metaller, seramikler ve polimerler ana başlıkları altında olmak üzere üç temel kategoride katı malzemeler sınıflandırılmıştır. Çoğu malzeme ana hatlarıyla bir grupta kalır. Bunların yanında yarı iletkenler, biyomalzemeler, akıllı malzemeler, kompozit malzemeler, nano mühendislik malzemeleri ve ileri malzemeler de bulunmaktadır [1]. Metaller, demir, bakır, alüminyum gibi bir ya da daha fazla metalik elementleri ve aynı zamanda görece az oranda metal olmayan elementleri (karbon, oksijen, nitrojen, hidrojen) bulundurlar [2]. Metallerdeki atom elementleri ve alaşımları, düzenli yapıdadır ve seramikler, karbonlara nazaran daha yoğun yapıdadır. Metalleri mekanik özellikler açısından incelemek gerekirse rijit, mukavemeti yüksek, sünek, kırılma tokluğu yüksek olarak belirtebiliriz. Bu özellikler sayesinde yapısal uygulamalarda metaller geniş kullanım alanı bulmaktadır. Metaller, bir bölüme bağlı olmayan yüksek sayıda elektrona sahiptirler ve bu elektronlar belirli atomlara bağlı değildir. Metallerin elektrik iletkenliği gibi özellikleri, serbest elektronlar kaynaklıdır [1].

Seramikler daha çok oksitler, nitrürler ve karbürler olarak karşılaşılan, metalik ve metalik olmayan elementler arasındaki bileşiklerdir. Alüminyum oksit, silikon dioksit, silikon karbür, silikon nitrür, kil, cam, porselen örnek gösterilebilir. Metaller gibi plastik deformasyona uğramazlar ve kırılğan bir yapıya sahiptirler. Geçmişte seramikler oldukça gevrek bir yapı göstermelerine rağmen, yeni seramik malzemeler kırılmaya karşı dayanıklı olarak geliştirilmektedir. Bunlara örnek uygulamalar olarak tencere seti, çatal bıçak takımı, araba motor parçaları olarak belirtilebilir. Bunun yanında seramikler doğasında olarak ısıya ve elektriğe karşı yalıtkan; metal ve polimerlere nazaran yüksek sıcaklıklara ve zorlu ortamlara daha çok dayanıklıdır. Optik özellikler açısından seramikler şeffaf, yarı saydam veya opak olabilir; oksit seramiklerin bazıları manyetik davranış sergiler [3]–[7].

Polimerler bilinen plastik ve kauçuk malzemeleri içerir. Birçoğu karbon, hidrojen ve diğer metalik olmayan elementleri (Si, N, O) içeren organik bileşiklerden oluşmaktadır. Genellikle yapısında karbon zinciri olan büyük moleküler yapılar vardır. Bazı bilinen polimerler polietilen (PE), naylon, polivinil klorür (PVC), polikarbonat (PC), polistiren (PS) ve silikon kauçuktur. Bu malzemelerin genel olarak düşük yoğunlukları vardır, bunun yanında mekanik özellikleri genel olarak metaller ve seramiklerden farklıdır. Diğer malzeme tipleri kadar rijit ve mukavemeti yüksek değildir. Düşük yoğunluklarına nazaran yoğunlukla birim kütlelerine oranla polimerlerin rijitliğinin ve mukavemetinin; metallere oranla karşılaştırılabilir olduğu görülmektedir. Polimerlerin çoğu oldukça sünek ve esnektir ve karmaşık şekillerde kolaylıkla üretilebilirler [1].

1.1 Kompozit Nedir?

Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla ayrı malzemeyi bulundurlar. Oluşan yeni malzeme, alt malzemelerden farklı yeni özelliğe sahip olur. İnsan yapımı kompozitler, alt bileşenlerine nazaran ağırlıklı olarak rijitliği ve sağlamlığı daha yüksek, güçlendirici katkının sürekli matriks faz içerisine katılmasıyla elde edilir. Matriks fazın iki ana görevi bulunmaktadır: Dışardan uygulanan kuvvetleri ara yüzlerdeki kayma kuvvetleri ile güçlendirici malzemeye iletme, güçlendirici malzemeyi dış ortam etkilerine ve mekanik zarara karşı korumaktır [8]. Matriks deneni anafaz, güçlendirici ya da dolgu malzemesini içermektedir. İkincil faz matriksin içinde bulunup kompozit malzemenin mukavemetini ve rijitliğini artırır. Bu faz bazen matriks fazın termal iletkenliğini ve elektriksel direncini değiştirmek için de kullanılır. Güçlendirici kısım daha çok elyaftan yapılı fakat taneciklerden ya da daha kompleks malzemelerden de oluşabilir. Kompozitler, matriks fazlarına göre üç ana sınıfa ayrılmıştır.

(i) Polimer Matriks Kompozitler (PMK) en çok bilinen ve elyaf katkılı kompozitler olarak bilinen kompozitlerdir. PMK'lar Elyaf Katkılı Kompozitler (EKK) ya da reçine tabanlı kompozitler olarak da bilinirler. Bu kompozit malzemeler: Polimer reçineyi matriks/anafaz olarak; cam elyaf, karbon elyaf ve poliaramid gibi elyaf çeşitlerini güçlendirici olarak kullanır [9].

(ii)Seramik Matriks Kompozitler (SMK) yüksek sıcaklıkta işleme ve sert ortamlara karşı korozyon dayanımı olduğu zaman kullanılan kompozit malzemelerdir. Bu tip kompozit malzemeler, seramik matriksle birlikte Silikon Karbür (SiK) ya da Bor Nitrür (BN) gibi kısa elyaf ya da tel formunda olan güçlendirici malzemeler içerirler.

(iii) Metal matriksli kompozitler (MMK'ler) daha çok ileri malzemeler olarak ele alınır. MMK'ler yüksek rijitlik ve mukavemet/yoğunluk oranı, bazı durumlarda özel elektriksel ve termal özellikler içermektedir. Bu özelliklerin kombinasyonu, metal matriksli kompozitleri uçak ve uzay yapısal parçaları için oldukça cazip hale getirmektedir. Alüminyum ve magnezyum içeren metal matriksli kompozit malzemeler otomotivde artan bir şekilde yer edinmektedir [10].

1.2 Biyokompozitlerin Tanımı

Yukarıda (Bölüm 1 / Kısım 1.1 / Madde (i), (ii), (iii)) bahsettiğimiz kompozit tipleri arasında biyokompozit malzemeler, en az matriks ya da güçlendirici gibi bir fazın yenilenebilir-biyokökenli malzemedan yapıldığı malzemelerdir. Bunlar aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.2 / Madde 1,2,3) bileşenlerden yapılabilir.

1. Doğal elyaf (bitki ya da hayvan elyafı) ve biyobozunmayan polimerler (örneğin epoksi reçine, fenolik reçine ve plastomerler: Polietilen, polipropilen, polivinil klorür, polistiren)
2. Sentetik elyaf
3. Biyopolimerler [11].

1.2.1 Güçlendirici Malzemesi

Elyaf, kompozit malzemelere mukavemet ve rijitlik katar; sonuç olarak kompozitlerin özellikleri elyafın doğasında bulunan özelliklere göre şekillenir. Doğal elyaf; bitkisel, hayvansal ve mineral elyaf olarak sınıflandırılabilir [8]. Kompozitlerin oluşturulması için elyafın seçimi kompozitin rijitliğine ve çekme dayanımına bağlıdır [12]. Güçlendirici elyafın seçimindeki diğer kriterler uzamadaki kırılma, termal kararlılık, elyaf ve maktriğin birbirine yapışması, kompozit üründe dinamik yüklenmeye karşı dayanım ve uzun yorulma ömrü, fiyat ve işleme sıcaklığıdır. Doğal elyafın

potansiyelini, çekme dayanımı, Young modülü, uzamadaki kırılma göz önünde tutularak sentetik elyafla karşılaştırmak gerekebilir. Bu durumda örneğin keten ve kenevir elyafların, E-cam elyafla kolaylıkla yarışabilecek olduğu görülmektedir [13].

1.2.2 Matriks / Anafaz Malzemesi

Geleneksel kompozitlerde matriks malzemesine örnekler, termoplastik ya da termoset polimer olarak sırasıyla polietilen ve doymamış polyesterdir. Şu anki biyokompozit teknolojisine göre, sentetik termoplastik ve termosetlerin kompozitlerin arzı, ticari biyokompozit üretiminden daha fazladır. Ağırlıklı olarak kullanılan biyokompozitlerin üretimi, matriks fazın yenilenebilir kaynaklar kökenli olduğunu belirtmektedir. Bu nedenle polietilen ve polipropilen odun-plastik kompozitlerinde geniş bir kullanım bulmaktadır, özellikle Kuzey Amerika'da bu alt grup kompozitler özel olarak dikkat çekmektedir ve geniş üretim alanı bulmaktadır [12]. Paketleme endüstrisi için geliştirilen termoplastik biyopolimerler, diğer elyaf katkılı kompozit malzemeler için matriks sistemi gereksinimlerini tam olarak karşılamazlar. Özel olarak yüksek değerde olan uzamadaki kırılma ve yüksek işleme viskozitesi, istenen kullanım için dezavantajdır [12]. Termoplastiklerdeki sınırlı kullanımların sonucu olarak, yenilenebilir kaynaklardan termoset malzemelerin elde edilmesine önemli ölçüde ihtiyaç bulunmaktadır [14].

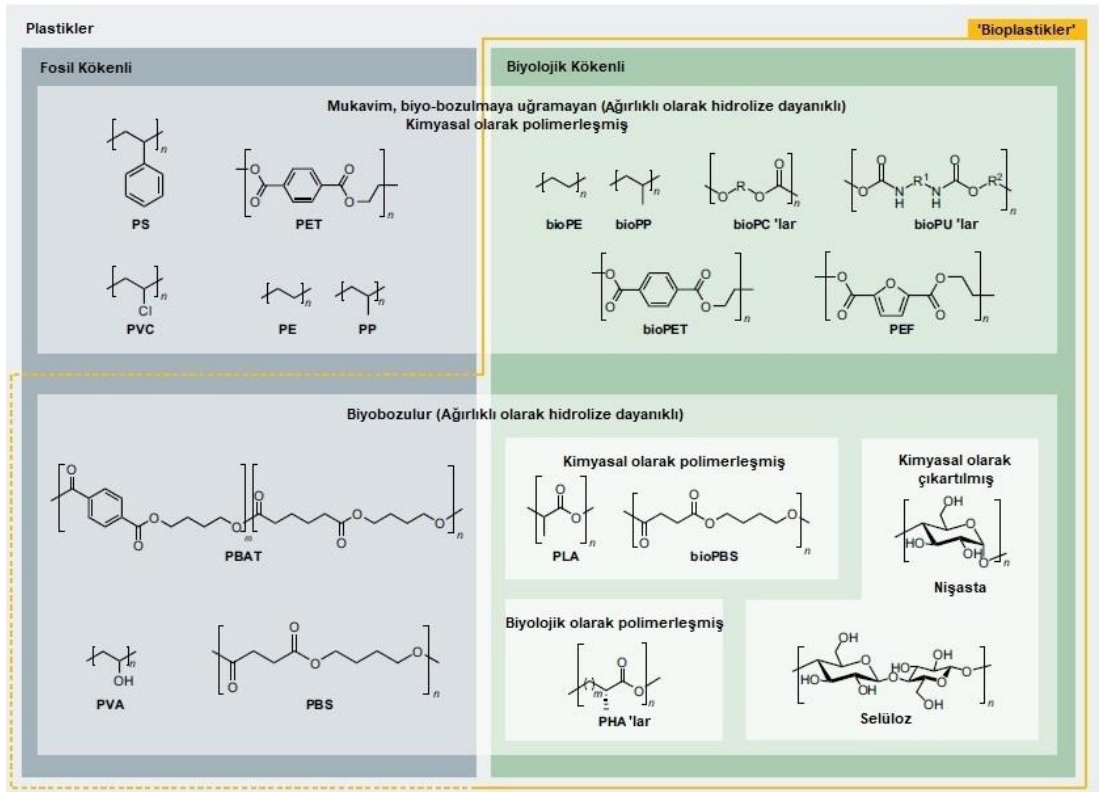
1.3 Biyopolimerler

Biyopolimer terimi genel olarak doğal olarak yaşayan organizmalar tarafından üretilen organik polimerler olarak anlaşılır. Biyopolimerlerin ana avantajlarından bir tanesi, mikroorganizmaların enzimatik faaliyetleri neticesinde oluşan ve doğadaki basit moleküllerden olan karbon dioksit, su ya da metan gibi basit moleküllere yüksek hızlarda biyobozunmasıdır. Yenilenebilir kaynaklar kökenli polimerik malzemeler belirli çevresel şartlar altında ya biyobozulur ya da gübrenilebilir olabilirler. Biyopolimerler, üretim metoduna ya da kaynağına göre sınıflandırılabilir:

- Polisakkarit ya da protein gibi biyokütleden çıkartılan ya da alınan polimerler.

- Yenilenebilir biyokökenli monomerlerden klasik kimyasal sentez yoluyla üretilen polimerler (Örneğin: PLA).
- Mikroorganizmalardan ya da genetiği oynanmış bakterilerden üretilen polimerler (Örneğin: Polihidroksialkanoat, bakteriyel selüloz) [15], [16].

Biyobozunur polimerler genel olarak medikal ve paketlenme mühendisliği uygulamalarında kullanılmaktadır. Alifatik polyesterlerin esnek ester bağları olduğundan dolayı, bunlar farklı pH çözeltilerinde toksik olmayan maddelere bozunurlar. Sonuç olarak medikal ve paketlenme uygulamaları için en ümit vaat eden hammaddeler, biyobozunur polimerlerden oluşmaktadır. Mükemmel biyouyumluluk özelliklerinden dolayı, polilakton sınıfından polilaktik asit (PLA), poliglikolik asit (PGA), polikaprolakton (PCL) ve kopolimerleri de medikal alanda kullanılan sentetik kompostlanabilir polimerler olmaktadır. Biyopolimerler, yenilenebilirlik, biyobozunurluk ve şeffaflık, kaplama için mükemmel film formuna gelme kabiliyeti, iyi termal dayanım, kalıcılık ve mukavemet gibi mekanik ve işleme özellikleriyle, paketlenme mühendisliği alanında kullanılabilir [17].

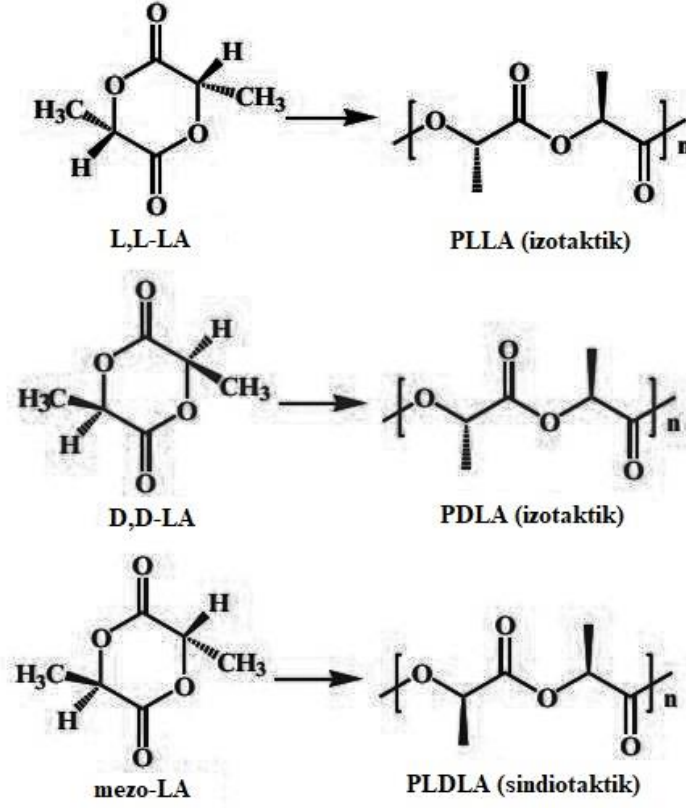


Şekil 1.1: Plastiklerin sınıflandırılması [18]

Plastikler (Bölüm 1 / Kısım 1.3 / Şekil 1.1)'e göre sınıflandırılmaktadır. Bunların arasından PLA, ABD gıda ve ilaç yönetimi tarafından 1970'lerde onaylanmıştır ve ilaç dağıtım gereçlerinde, gıda paketlenme uygulamalarında, dikişler, klipsler, plakalar ve vidalarda kullanılmaktadır. Bunun yanında paketlenme mühendisliğinin ve medikal sistemlerin pratik gerekliliklerini göz önünde bulundurmanız gerekirse, PLA'nın birçok açık dezavantajları bulunmaktadır: PLA'nın bozunma hızı özel uygulamaların gerekliliklerinin karşılayamamaktadır, örneğin PLA uygulamasının doku uyumluluğu özelliğinin hücre tanılama merkezleri bulunmamaktadır. Bu alan PLA yüzey uygulamalarının doku mühendisliği alanını etkilemektedir. Bunun yanında PLA'yı doğrudan paketlenme malzemesi olarak kullanılmak istenirse, gevrek kırılma gözlemlenir. Endüstriyel ilgi, PLA'nın katma değerli bir malzemeye dönüşmesi için mekanik özelliklerini artırma yolunda olmaktadır. PLA'nın hidrofilik olması, bozunurluğu ve uzama esnasında kırılması; antimikrobiyal, antioksidant, biyoaktif fonksiyonel malzemeler oluşturulabilirliği incelenmiştir [17].

1.4 Polilaktik Asit (PLA)

PLA'yı detaylı olarak incelemek gerekirse termoplastik polimerlerden olup, yüksek dayanım ve Young modülüne sahip bir polimerdir. Genel olarak alfa hidroksil asitlerden yapılan alifatik polyester ailesine dahildir. Biyobozunur ve gübrelenebilir olarak sınıflandırılmıştır. PLA, endüstriyel paketlenme alanında ya da biyoyumlu/biyolojik olarak emilenebilir tıbbi araç ve gereç pazarında kullanılır. Standart plastik ekipmanlarında kalıplanabilir ürün, film ya da elyaf üretmek üzere kullanılabilir [19]. L- ve D- izomeri karışımı olarak polimerleştirme sonucunda stereokimyasal yapısı kolaylıkla değiştirilebilir birkaç polimerden biridir (Bölüm 1 / Kısım 1.4 / Şekil 1.2) ve gıda etkileşimi olarak güvenlidir. PLA, ester bağlarının basit hidrolizi ile bozunur ve de enzimlerin hidrolizi katalizlemesine ihtiyaç duymaz. Bozunma hızı parçanın boyutuna ve şekline, izomer oranına, hidroliz sıcaklığına bağlıdır [20].



Şekil 1.2: Laktit ve PLA'ların stereoizomerlerinin yapıları [21]

PLA, şu anda ameliyat dikişleri, dializ ortamı ve ilaç dağıtım sistemlerinde kullanılmaktadır, bunun yanında doku mühendisliği için de kullanılan malzemelerde de kullanılmaktadır. Biyobozunur olması nedeniyle gübre torbaları, gıda ambalajları ve tek kullanımlık sofra takımları olarak da kullanılmaktadır. Genel olarak polimerin performansını arttırmak için hem kimyasal hem de fiziksel metotlar uygulanabilmektedir. Kimyasal metotlarda, polimerin omurgasına çözünürlüğü ve bant aralığını etkileyen fonksiyonel gruplar eklenmesiyle yapı değiştirilir [22]. Kimyasal teknikler, genel olarak iyi performansla sonuçlanır. Fiziksel yöntemlerde, malzemenin kararlılığı gibi özellikleri polimere anorganik partiküllerin katılmasıyla arttırılabilir [23]. Maliyeti azaltmak için PLA'ya nişasta katılması önerilmiştir. Bununla birlikte nişasta ve PLA arasındaki düşük yapışmadan dolayı karışım düşük mekanik özelliklere sahiptir. Sitrat esterleri gibi çok çeşitli kimyasal PLA'ya plastifiyan etkisiyle katılmaktadır [24]. Maliyet bunun gibi kimyasal yöntemlerle düşürülebilmesine rağmen, kaliteyi değiştirmek kolay olmamaktadır. Çalışmamızda, perlitte PLA'yı karıştırarak yeni bir karışım elde edilip ve özellikleri incelenmiştir.

Bunun yanında PLA'yı perlit ve kavak ağacı talaşı ile karıştırıp yeni özellikleri üzerine ön araştırma yapılmıştır.

1.4.1 Kullanılan Polilaktik Asit (PLA) Özellikleri

Standart PLA ile karşılaştırmak gerekirse, kullanılan PLA homopolimerleri daha yüksek erime sıcaklıklarına sahiptir ve yüksek kristallenme hızına sahiptir. Sonuç olarak Luminy L130 hammaddesinden yarı kristalin polimerik parçalar üretilmektedir [25].

1.5 Perlit



Şekil 1.3: Genleşmiş perlit [26]

Kimyasal olarak perlit ağırlıklı olarak amorf silikat ve alüminyum oksit; düşük ölçekte potasyum ve sodyum oksit; daha az ölçüde demir, magnezyum, kalsiyum ve titanyumdan oluşmaktadır [27]. Perlitin diğer volkanik kayalardan ayıran özelliği, 760-980 °C bandına hızlıca ısıtıldığı zaman orijinal hacminin 4 ila 20 katına çıkabildiğinin görülmesidir [28]. Bu yapıya genleşmiş perlit denmektedir. Genleşmiş perlit (Bölüm 1 / Kısım 1.5 / Şekil 1.3)'te gösterilmektedir. Eğer perlit yavaş ısıtılırsa, perlitin içindeki su kademe kademe dağılır ve şişme gerçekleşmez [29]. Isıl işlemten sonra porozitif ve düşük yoğunluklu, griden beyaza geçiş yapan bir yapıya dönüşmektedir. %2 ile %5 arasında suya sahip olan işlenmemiş perlit, 60 milyon yıldan daha az yaşta olup, yüksek silikatlı volkanik kayalar grubundadır [30]. Genleşmiş perlit, düşük termal iletkenlik [31], yüksek ses emilim ve yüksek sıcaklık dayanımı [32], kimyasal durgunluk [33], fiziksel rijitlik [34] ve su tutma kabiliyetlerini [35] barındırmaktadır.

Yapılan çalışmanın Türkiye ekonomisine oldukça büyük ölçüde katkıda sağlayabileceği düşünülmektedir. Tablo 1.1'e bakıldığında 6 milyar tona yakın perlit rezervinin Türkiye'de olduğu görülmektedir [26].

Tablo 1.1: Türkiye perlit rezervleri [26]

İl	Rezerv Maden (Ton)	Yüzde (%)
Ağrı	150.000.000	%2,54
Ankara	65.310.000	%1,10
Balıkesir	46.986.000	%0,79
Bitlis	790.000.000	%13,35
Çankırı	70.000.000	%1,18
Erzincan	71.500.000	%1,21
Erzurum	207.586.147	%3,51
Eskişehir	41.777.200	%0,71
İzmir	62.150.000	%1,05
Kars	2.091.346.000	%35,35
Nevşehir	770.000.000	%13,01
Van	1.550.000.000	%26,20
Toplam	5.916.655.347	%100,00

Açık işletmecilikle elde edilen perlit üretiminde, öğütme, kurutma, eleme, sınıflandırma, boyutlama, depolama basamakları bulunmaktadır. Üretilen final ürünün, oldukça homojen ve saf bir biçimde alt gruplarına bölünmesi, belirlenen tane boyuna ayrılması istenmektedir [36], [37]. Endüstrideki son kullanıcılarla yapılan mülakatlarda, perlit üreticileri ile son kullanıcılar arasında büyük bir boşluk olduğu görülmüştür. Bu alanda kapsamlı araştırma görülmediğinden dolayı çalışmamızda: Tarımsal-genleşmiş "a", kalın-genleşmiş "b", ince-genleşmiş "c", M1-genleşmiş "d", M3-genleşmiş "e", kalın-genleşmemiş "f", ince-genleşmemiş "g", mikronize-genleşmemiş "h" ticari isimlerinde olan perlitlerinin karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Toprağa katkı olacak parçacıkların seri imalattaki boyutları hakkında optik mikroskop bilgi verebilir. Kaba tip genleşmiş perlitler tekstil alanında kot kumaşlarını

beyazlatmada ve inşaat sektöründe izolasyon malzemesi olarak kullanılırlar. İnce perlit alçılarda donma süresini arttıran dolgu malzemesidir. M1 tipi perlitler ayçiçekyağı fabrikalarında basınç ile filtrasyon için kullanılmaktadır. M3 tipi perlitler meyve suyu üretim firmalarında vakum filtrasyonu için kullanılmaktadır. Mikronize mineral, M1 ve M3 perlitleri; ince mineral, ince perlitleri; kalın mineral ise kalın perlitleri üretmek için kullanılır [38].

1.6 PLA + Perlit Biyokompozitlerin Analitik Yöntemlerle Modellenmesi

Uzun yıllar önce, kompozitlerin bileşenlerinin şekilbilimleri üzerine inşa edilmiş özellik tahmin etme modelleme çerçeveleri ortaya atılmıştır. Bu tür teorilerin temel amacı, bileşen (anafaz/matriks ve güçlendirici malzeme) özelliklerinin, Poisson oranı, Young modülü, hacim oranı, dolgu maddesi, en-boy oranı gibi verilerin katkısını dikkate alarak; modellerin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki tahmin etme davranışını görmektir. Teorik yaklaşımlar aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6 / Madde 1,2) kabullere sahiptir [39].

1. Faz alanları doğrudan birbirine bağlıdır, sonuç olarak fazların arayüzlerinde kayma gerçekleşmez.
2. Malzemelerin cevap karakteristikleri içindeki bölgesel değişimleri yerine, genel ortalama cevapları dikkate alınmıştır.

Mikro boyutlu partiküller içeren kompozitler için birçok analitik ve sayısal modeller türetilmiştir. Bu modeller çerçevesinde, bilim adamları malzemelerin elastik özelliklerini tahmin etmek ya da hacim değişikliklerini hesaplayabilmek kabiliyetlerine kavuşmuşlardır. Bu kuramlar, genel olarak fizik savlarına ve benzetme parametrelerinin belirlenmesiyle ilişkilidir [40]. Bu tez kapsamında karakterizasyonu gerçekleştirilen kompozitin Young modülünün partikül katkı oranına göre değişimini modelleme üzerine yoğunlaşmıştır. Malzemenin fiziksel özelliklerine ait olan parametrelerin belirlenmesine dayanan yarı-deneysel modeller, geometrik özellikler (güçlendirici malzemesinin eninin boyuna oranı, hacim oranı, güçlendirici malzeme yönlenmeleri) bunların dağılımı ve miktarını sistem girdisi olarak kabul eder.

Deneysel verilerin gerçekliğinden faydalanılan bu sistematik sayesinde pür teorik modellerdeki yetersizlikler aşılabilmektedir.

Kompozit malzemelerden farklı olarak izotropik malzemelerde birbirinden bağımsız en az iki parametre (Young modülü (E) ve Poisson oranı (ν) gibi) bilindiğinde aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6 / Denklem 1.1, 1.2, 1.3) denklemlerde görüldüğü üzere diğerlerine ulaşmak mümkündür. Young modülü malzemenin çekme yüklemesine karşı deformasyon direncini tanımlar. Matematiksel olarak Young modülünün anlamlarından bir tanesi malzemenin çekme testinde doğrusal elastik bölgedeki çekme geriliminin (birim alan başına düşen kuvvet), eksenel birim uzamaya bölünmesidir. Yapılan çalışmada Young modülü ASTM D638 testinden ölçülmüştür. Poisson oranı, çekme testinde enine daralma miktarının boyuna uzama miktarının negatif değeridir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.1)$$

$$K = \frac{9KG}{3K + G} \quad (1.2)$$

$$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)} \quad (1.3)$$

Yukarıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6 / Denklem (1.1), (1.2)) modellerde, malzemelerin hacim modülünü K , kayma modülünü G temsil etmektedir. Bu çalışmada küresel ve küresel olmayan partikül sistemler için yarı deneysel modeller araştırılmıştır.

1.6.1 Küresel Partikül Sistemleri İçin Yarı Deneysel Modeller

Yarı deneysel modeller bazı deneysel parametrelere ve aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1 / Denklem 1.4, 1.5) forma dayanmaktadır [41].

$$P_k = \frac{P_m (1 + \xi XV_g)}{1 - X\Psi V_g} \quad (1.4)$$

$$X = \frac{P_g - P_m}{P_g + xP_m} \quad (1.5)$$

P hacim modülünü (K) ya da kayma modülünü (G), V_g hacim oranını ifade etmektedir. k , m , g alt simgeleri sırasıyla kompozit, matriks başka bir söylemle anafaz, ve güçlendirici anlamına gelmektedir. Formüllerdeki ζ ve ψ değerleri her bir modelde özel olarak ele alınabilececek özel değişkenler olarak tanımlanabilir. Yukarıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6, 1.6.1 / Denklem (1.1), (1.2), (1.3), (1.4), (1.5)) formüllere göre, literatürde küresel güçlendirici malzemeler içeren kompozit malzemenin Young modülünü tahmin etmek için geliştirilmiş formüller bulunmaktadır. Bu formülasyonlarda güçlendirici partiküller ya küresel ya da küresele yakın geometridelerdir. ζ ve ψ değişkenleriyle ilişkili en çok kullanılan modeller arasında Chantler, Hu ve Boyd, Guth ve Gold, Halpin Tsai denklemleri bulunmaktadır.

1.6.1.1 Halpin Tsai Modeli

Halpin Tsai, en-boy oranının fonksiyonu olarak, sürekli elyafli kompozitlerin rijitliğini tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Bu teori Hermans[41] ve Hill'in[42] önceki mikromekanik çalışmaları üzerine kuruludur. Halpin & Tsai, Hermans'ın modellerini partiküllü sistemlere uyarlamıştır. (1.4) ve (1.5) denkleminde P Young modülünü ifade etmektedir. Aynı şekilde ζ matriksin poisson oranı, güçlendirici geometrisi, yönlendirme ve yüklenme yönüne bağlı olan bir şekil faktörünü temsil etmektedir ve partikül katkılı kompozitler için 2 olarak bulunmuştur. Bunun yanında kayma modülü tahminleri için $\zeta = 1$ değeri ya da aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.1 / Denklem 1.6) eşitlik kullanılabilir.

$$\xi_G = \frac{7 - 5\nu_m}{8 - 10\nu_m} \quad (1.6)$$

Matriksin Poisson oranını (ν_m) denkleme dahil edilerek parametre kesin olarak hesaplanabilir. Aynı şekilde Hacim modülünde, terim aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.1 / Denklem 1.7) gibidir.

$$\xi_K = \frac{2(1 - 2\nu_m)}{1 + \nu_m} \quad (1.7)$$

Denklem (1.4) ve (1.5)'de kullanılan son parametre olan ψ değişkeni Halpin Tsai modelinde 1 olarak alınır. Düşük hacim oranlarında Halpin Tsai modeli deneysel

veriye uygun sonuç vermektedir fakat yüksek hacim oranlarında kompozit malzemenin rijitliğinin yanlış tahminlerine neden olmaktadır [39]. Bu konu, modelde bazı değişiklikleri gerektirmiştir. Halpin Tsai, modeli kısa elyafli kompozitlere uyarlayarak ξ şekil değişkenini 0 ile ∞ arasında sınırlamıştır. Örneğin eğer ξ , ∞ olarak seçilirse (1.4) ve (1.5) denklemleri aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.1 / Denklem 1.8) karışımların oluşturulması (MROM) kuralına dönüşmektedir.

$$P = v_f P_f + v_m P_m \quad (1.8)$$

Bunun yanında $\xi = 0$ seçilirse, Halpin Tsai denklemleri aşağıda (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.1 / Denklem 1.9) belirtildiği üzere karışımların tersi kuralına dönüşmektedir.

$$\frac{1}{P} = \frac{v_f}{P_f} + \frac{v_m}{P_m} \quad (1.9)$$

1.6.1.2 S Kombine Kuralı

S Kombine kuralı, rijit küresel katkı maddelerin matrislerle daha uyumlu olduğu durumlarda, güçlendirici malzemelerin Young modülü gibi incelenen özelliklerinin polimerden daha yüksek olması halinde kullanılmaktadır ($P_g > P_m$). Rijit ve aynı boyuttaki küresel tanecikler için, ξ_G , ξ_K ve ψ aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.2 / Denklem 1.10, 1.11, 1.12) gibi tanımlanabilir [39].

$$\xi_G = \frac{7 - 5v_m}{8 - 10v_m} \quad (1.10)$$

$$\xi_K = \frac{2(1 - 2v_m)}{1 + v_m} \quad (1.11)$$

$$\psi = 1 + \left(\frac{1 - Vf}{Vf^{max}} \right) (Vf \cdot Vf^{max} + (1 + Vf)(1 - Vf^{max})) \quad (1.12)$$

Burada, Vf^{max} güçlendirici malzemenin en fazla hacim oranıdır. Halpin Tsai ve S Kombine kuralını karşılaştırmak gerekirse ψ değişkeninin her modelde, ayrı matematik formda olduğu görülebilir.

1.6.1.3 Chantler, Hu ve Boyd Modeli

Chantler ve arkadaşları ilgili yayında klasik Hertzian elastik kontak teorisine dayanan yeni bir model sunmuştur [43]. Bu modele göre aşağıdaki tanımlar (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.3 / Denklem 1.13, 1.14) kompozit malzemelerin Young modüllerini (E_k) tahmin etmek için kullanılabilir.

$$E_k = E_m (E_g/E_m)^{1 - (1 - \nu_f)^\beta} \quad (1.13)$$

$$\beta = \frac{2[(1 - \nu_g^2)/(1 - \nu_m^2)]^{1.7}}{\ln(E_g/E_m)} \quad (1.14)$$

Sırasıyla, ν_g ve ν_m güçlendirici ve matriks malzemesinin Poisson oranını, E_m ve E_g matriks malzemesinin ve güçlendirici malzemenin elastik/Young modülünü temsil etmektedir. Bu çalışmaya göre, önceki çalışmada verilen görüngüsel modelin [44], E_g/E_m modül oranlarının 10'dan büyük olması durumunda yetersizdir. Değiştirilmiş yaklaşım ile kompozit modülünün tahmin edilmesi için daha tutarlı bir model öngörülmüş ve aynı zamanda esnek güçlendirici ve reçine malzemeleri için sınır koşullarına cevap verdiği görülmüştür. Önceki bahsettiğimiz modellere (HT, S) göre özel olarak CHB modeli, güçlendirici malzemenin Poisson oranını (ν_f) göz önünde tutmaktadır. Halpin Tsai modelinde olduğu gibi, CHB modelinde de Young modülünün direkt olarak hesaplanmasına izin verilmektedir.

1.6.1.4 Guth ve Gold Modeli

Guth ve Gold, Einstein denklemindeki Einstein katsayısını (K_E) 2,5'a eşitleyerek, güçlendirici malzemenin düşük oranları için ($< \%10$) aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.4 / Denklem 1.15) belli kütlede olan küresel katkılı partiküllerde, sadece elastomerlere uygulanabilecek şekilde denklemi modifiye etmiştir. Bu yapı sadece hacimce %30'a kadar olan yapıdaki konsantrasyonlar için geçerlidir.

$$E_k = E_m[1 + 2.5 Vf + 14.1Vf^2] \quad (1.15)$$

Birçok model güçlendirici malzemenin konsantrasyonlarının $0 \leq Vf \leq 1/3$ olduğu durumlarda yeterli derecede tahmin edebilmektedir, bunun yanında S kombine kuralında yüksek hacim oranlarında tahmin edebilme imkânı bulunmaktadır [41]. Guth ve Gold modeli %45'e ulaşan yüksek orandaki hacim oranlarında tahmin edebilme kabiliyetini elde etmek için aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.1.4 / Denklem 1.16) şekilde değiştirilmiştir.

$$E_k = E_m[1 + 2.5 Vf + 16.2Vf^2] \quad (1.16)$$

1.6.2 Küresel Olmayan Partiküllü Sistemler İçin Yarı Deneysel Modeller

Küresel olmayan güçlendirici partiküllü kompozitler, küresel partiküllü olanlara göre daha yüksek Young modülüne (E) sahiptirler. Bu tip kompozitlerde Young modülünü tahmin etmek için aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.2.1, 1.6.2.2, 1.6.2.3, 1.6.2.4) modeller bulunmaktadır.

1.6.2.1 Halpin Kardos Modeli

Halpin Kardos denklemleri pulsu yapılar için aşağıdaki formda (Bölüm 1 / Kısım 1.6.2.1 / Denklem 1.17, 1.18) olduğu şekilde değiştirilmiştir[45].

$$E_k = \frac{E_m(1 + \xi\eta Vf)}{1 - \eta Vf} \quad (1.17)$$

$$\eta = \frac{E_g/E_m - 1}{E_g/E_m + \xi} \quad (1.18)$$

Burda E_g güçlendirici malzemenin Young modülünü, ξ ise güçlendirici malzeme yönlendirmesine ve yükleme yönüne bağlı bir şekil faktörünü temsil eder. Dikdörtgen

pul güçlendirici yapısındaki kompozit sistemleri için ζ değişkeni “ $2w/t$ ”e eşittir ve “ w ” genişliğe, “ t ” dağınık fazın kalınlığı anlamına gelmektedir. Güçlendirici malzemelerin uzunluk/genişlik oranı olan α , kompozit malzemenin Young modülünün tahmininde güçlendirici malzemenin düşük hacim oranlarında olmasına rağmen önemli bir etkiye sahiptir [41].

1.6.2.2 Değiştirilmiş Halpin Tsai Modeli

Maksimum hacimsel paketleme oranı, sadece partiküllerin hacmi olan gerçek hacmin gözle görünen hacmine oranıdır. Değiştirilmiş Halpin Tsai modeli aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.2.2 / Denklem 1.19, 1.20, 1.21) şekilde yazılabilir [41].

$$E_k = \frac{E_m(1 + \xi\eta Vf)}{1 - \psi\eta Vf} \quad (1.19)$$

$$\psi = 1 + \left(\frac{1 - Vf^{max}}{(Vf^{max})^2} \right) Vf \quad (1.20)$$

$$\eta = \frac{E_g/E_m - 1}{E_g/E_m + \xi} \quad (1.21)$$

1.6.2.3 Guth Modeli

Guth ve Gold modelinde verilen Young modülü ve güçlendirici malzemenin yoğunluğu arasındaki ilişki Guth tarafından küresel olmayan partikül kompozitler için değiştirilmiştir[46]. Bu değiştirilmiş model, küresel partikülleri matrikse gömülmüş çubuk şeklinde olan güçlendirici malzemeler şeklinde ele almıştır. Guth ve Gold denkleminde şekil faktörü eklenerek, aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.2.3 / Denklem 1.22) gibi yeni bir denklem geliştirmiştir.

$$E_k = E_m[1 + 0.67 \alpha Vf + 1.62(\alpha Vf)^2] \quad (1.22)$$

Bu denklemde α şekil faktörüdür (uzunluğunun genişliğe oranı). E_m matriksin, E_k kompozit malzemenin Young modülüdür[47].

1.6.2.4 Brodnyan Modeli

Mooney denklemlerini değiştirerek Brodnyan, küresel olmayan partiküllü kompozitler için $1 < \alpha < 15$ arasında olması şartıyla, aşağıdaki (Bölüm 1 / Kısım 1.6.2.4 / Denklem 1.23) denklemi Young modülünü tahmin etmek için kullanmıştır [41].

$$E_k = E_m \text{Exp} \left(\frac{2.5Vf + 0.407(\alpha - 1)^{1.508} Vf}{1 - V_f/V_f^{max}} \right) \quad (1.23)$$

α partiküllerin en/boy oranıdır.

1.7 Literatür Özeti

Yapılan çalışmayla ilgili olarak üç grup makale ile karşılaşılmıştır. İlk grup makalede, PLA'nın hammadde özellikleriyle ilgili inceleme makaleler [17], [20], [48] araştırılmıştır. İkinci grup makalede, [34], [49], [50] perlitin termoplastik kompozit üretiminde kullanılması tartışılmıştır. Üçüncü grup makalede, [24], [51], [52] PLA ve perlitin karıştırılmasıyla oluşturulan yeni kompozit malzemeler çalışılmıştır. "Polilaktik asit (PLA) sentez ve değiştirmeler: bir inceleme" [17], makalesinde paketleme malzemesi, ameliyatlarda dikiş ipliği gibi çok farklı kullanım alanları olan PLA'nın polikondenzasyonla sentezlemesi, halka açılım polimerizasyonu incelenmiştir. Laktid'in PGA, PEG, Dextran gibi diğer monomerlerle ve polimerlerle etkileşimi gözden geçirilip; yüzey kaplama, kimyasal değiştirme, plazma işleme gibi PLA tipi kopolimerlerin yüzey değiştirme işlemleri tartışılmıştır. "PLA'nın Literatür İncelenmesi" [20], makalesinde PLA'nın sentezi, fizikokimyasal, kimyasal, mekanik özellikleri incelenmiştir. PLA birim hücre şeklinde ilerleyen polimerik heliks şeklinde bulunmaktadır. İşleme koşulları, bu makalede açıklanmıştır. Kristallenme özellikleri ve erime reolojileri araştırılmıştır. PLA'nın NMR, UV-VIS, FTIR spektroskopileri detaylı olarak tartışılmıştır.

“Laktik asitin doğrudan polimerleşmesinde mikroperlit kullanılması” [51], çalışmasında iyileştirilmiş termal özellikte PLA elde etmek için laktik asitlerin mikroperlit bulunduğu ortamda kondenzasyonunu incelenmektedir. Moleküler ağırlıkları GPC, kimyasal yapı analizi FTIR, kristallenme oranı XRD, termal kararlılığı DSC ve TGA ile ölçülmektedir. Perlitin varlığının bileşiğin kristallini, bozunma sıcaklığını; dolayısıyla PLA'nın termal kararlılığını arttırdığı görülmüştür. “PS/Perlit kompozitlerinde genişmiş perlitin değerlendirilmesi” [49], çalışmasında polistiren ve perlit karışımı olan kompozitler %10 ve %20 oranlarında çift vidalı ekstrüderde karıştırılıp kompozit numuneler elde edilmiştir. SEM görüntülerinde bazı perlit partiküllerinin proses esnasında kırıldığı görülmüştür. Perlitin katılmasının PS'in termal kararlılığı değiştirmedeği; PS'in camsı geçiş sıcaklığını 20°C düşürdüğü görülmüştür. Polimere sırasıyla %10 ve %20 oranında perlit katılmasının elastik modülü %23 ve %31 oranlarında arttırdığı ve viskoziteyi azalttığı görülmektedir. Sonuç olarak üretilen karışımların, kompozit, termoform paketlemenin izolasyon alanındaki kullanımlar için uygun olabileceği görülmektedir.

“Çok amaçlı kullanımlar için polilaktik asit/nanoperlit nanokompozitlerinin reolojik, yüzeysel ve hücresel özelliklerindeki nanoperlit etkisi” [52] çalışmasında; nanopartikül boyutunda perlitte granül halinde PLA, eritme karıştırılma metodu ile birleştirilip nanokompozit üretilmiştir. Fonksiyonel gruplar ve kimyasal yapıları incelemek için FTIR kullanılmıştır. DSC tarafından incelenen termal özellikleri nano-perlit oranının artmasının kristaliteyi ve erime sıcaklığını azalttığı görülmektedir. 13-15 ay boyunca biyobozunurluklarının gerçekleşip, nanoperlit %5'e kadar eklendiği zaman reolojik olarak depolama ve kayıp modüllerinin arttığı görülmüştür. Biyomedikal ve paketleme uygulamaları için üretilen nanokompozitlerin uygun olabileceği belirlenmiştir.

“Polilaktik / perlit ve polilaktik / montmorillonit kompozitlerinin hazırlanması, karakterizasyonu ve mekanik özellikleri” [24], ile ilgili çalışmada PLA/perlit ve PLA / montmorillonit kompozitleri, ekstrüderde eritme ve çözücü yardımıyla işleme yöntemleriyle hazırlanmıştır. Kompozit malzeme karakterizasyonunda anorganik malzeme çeşitlerinin etkileri ve organik/anorganik oranları araştırılmıştır. Elastik modülü DMA ile ölçülecektir. Organik-anorganik kompozit malzemelerin termal kararlılığı DSC ve TGA ile ölçülmüştür. PLA/anorganik kompozitleri saf PLA'ya göre

yüksek derecede termal ve mekanik iyileşme göstermiştir. “Polianilin/perlit kompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu” [50] ile ilgili çalışmada, öncelikle uygun bir başlatıcı ve 0.5 mL HCl çözücü kullanılarak kimyasal polimerleşme ile iletken polianilin (PAni) sentezi ile gerçekleştirmiştir. Daha sonra anilin monomeri ile anorganik yapıda olan genişmiş perlit (EP), HCl ortamında başlatıcı $(NH_4)_2S_2O_8$ ile PAni / perlit kompoziti sentezlenmiştir. Amaca uygun olarak kompozitlerdeki PAni oranı 3, 2, 1 ve 0,5 mL olarak seçilmiştir.

“Genleşmiş perlitin ve epoksi / perlit köpüklerin elastik ve mekanik özellikleri” [34] çalışmasında, hafif sentetik genişmiş köpüklerde genişmiş perlitin kullanımları araştırılmıştır. Perlit akustik ve termal izolasyon, kimyasal etkensizlik, fiziksel dirençlilik, ateşe karşı dayanım, su tutma özelliklerine sahiptir. Bu özellikler yanında perlitin bol ve ucuz olması sentetik köpük üretimi için uygun bir aday olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada genişmiş perlitlerin yapısal, mikroyapısal, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Genleşmiş perlit kullanımının epoksi reçineye karıştırıldıktan sonra hafif genişmiş perlit / epoksi köpük üretimiyle arttırılabileceği görülmüştür.

“Perlitin karakterizasyonu ve genişleme davranışı” [53] çalışmasında perlit silika bazlı volkanik bir kayadır, ani olarak ısıtıldığında içindeki bir miktar suyun açığa çıkmasıyla genişleme özelliği gösterir. Genleşmiş perlit, gözenekli yapısı sayesinde birçok endüstriyel alanda kullanımı mevcuttur. Bu çalışmada üç farklı bölgeden alınan perlit örnekleri karakterize edilip laboratuvar ortamında genişleme davranışları izlenmiştir. Karakterizasyon özelliklerini belirlemek için XRD, XRF, TGA, SEM ve Optik Mikroskop kullanılmıştır. Perlitin amorf ve kristal yapısını belirlemek için XRD cihazı, perlitin kimyasal bileşiklerinin belirlenmesinde XRF cihazı, sıcaklıkla ağırlık kaybının ölçülmesinde TGA cihazı, morfolojik yapı hakkında bilgi alınması için SEM cihazı, ham ve genişmiş perlit örneklerinin görüntüleri için ise Optik Mikroskop kullanılmıştır.

1.8 Özgün Değer

Yapılan literatür incelenmesinde çalışmamıza benzer bir makale ile karşılaşılmamıştır. Önerilen teknik olan PLA, perlit ve kavak ağacı kullanılarak yeni bir kompozit

malzeme üretilmesinin ilk defa denenecek bir karışım, yöntem ve bağlantılı karakterizasyonlar zinciri olduğu görülmektedir. Ağaç türlerinden kavak ağacı talaşı seçilmesinin ana nedenlerinden biri, kesilen bir kavak ağacı yerine 3 ila 5 sene süre zarfında yeniden büyüyen bir ağaç türü olmasıdır. Çalışılan konu tamamen yeni bir alan olduğu için araştırmanın bu kısmından çıkacak yayınların literatüre ve var olan endüstriyel yöntemlere katkı yapabileceği düşünülmüştür. Çalışmanın en özgün yanlarından biri genleşmiş perlit üretiminde istenmeyen pul şeklinde formlarının biyopolimerler için yeni bir dolgu malzemesi olduğu görülmüştür. Bunun yanında yukarıda (Bölüm 1, Kısım 1.7) literatür özetinde belirtildiği gibi termoplastik malzemelerle perlitin karıştırılarak yeni kompozit malzemeler elde edilmesi hakkında literatürde çok az sayıda olan yayımla karşılaşılmıştır. Farklı amaçlarla perlitin PLA ile karıştırılması ile ilgili olarak literatürde az sayıda yayın bulunmuştur [24], [51], [52]. Bu açıdan dünya kaynaklarının altı milyar ton civarında kaynağın Türkiye’den çıktığı bilinen perlit madeninin endüstriyel alanda yeni kullanım sahasının yaratılması açısından yaptığımız çalışma önemlilik teşkil etmektedir [26]. Perlit ve polimer kompozisyonları için patent alınmıştır, burada biyopolimerler ve perlit biyokompozitlerden hiç bahsedilmemektedir [54]. Ford firması tarafından 2020 yılında alınan patentte polipropilen ile perlitten kompozitler oluşturulup, araç akustik izolasyon malzemesi olarak kullanılmıştır [55]. Bunun dışında son yıllarda örneğin otomotiv sektöründe perlit ve termoplastik malzemeler kullanılarak yapılan herhangi bir patent ile karşılaşılmamıştır [34], [49], [50]. Perlit daha çok inşaat sektöründe kullanılan bir volkanik kayadır [26]. Perlitten yapılan biyotermoplastik kompozitlerin reel endüstriye uygulama alanlarının yeni nesil teknolojiler kullanılarak genişletilmesi bu projenin temel hipotezlerinden biri olmaktadır. Bu bağlamda teknolojinin özelliklerinin belirlenebilmesi için malzeme temel özelliklerinin belirlenmesi ya da karakterizasyonu zorunlu bir ihtiyaçtır.

1.9 Problem Analizi, Araştırma Amaçları ve Önemi

Karbon ayak izi, çevreye salıverdiğimiz CO₂ miktarının ölçüsüdür [56]. Bunu düşürmek ve oluşan biyokompozitin biyobozunup doğaya tekrar dönmesini sağlamak biyomalzemelerin temel hedeflerinden biridir. Anorganik katkı malzemesi olarak perlit madeni seçilmiştir. Bunun nedeni çalışma öncesindeki öngörüye göre oldukça ucuz bulunan madenlerden birinin perlit olup, dünyadaki kaynaklarının önemli bir

miktarının Türkiye’den çıkartılabilecek ve endüstriyel polimerlere katılabilecek yeni nesil alternatif inovatif katkı malzemelerden birinin olmasıdır. Yapılan tez kapsamında farklı perlit çeşitlerinden ve PLA’dan %100 biyobozunur ve endüstride kullanılmaya hazır yeni biyokompozit malzemeler üretilip karakterize edilmesi ve bilgisayar ortamında modellenmesi istenmektedir. Bilgisayar destekli mühendislik yaklaşımında polimer ve güçlendirici malzemesinin mekanik özellikleri yazılıma işlendiği zaman kompozitin mekanik özelliklerini öğrenebilmekteyiz. Tersine mühendislik kapsamında Mathematica yazılımı yardımıyla yarı deneysel analitik modellerle ya da Digimat programı yardımıyla, kompozitin ve bileşenlerden birinin Young modülleri bilindiği zaman üçüncül malzemenin mekanik özellikleri hesaplanabilmektedir. Digimat programında her bir birim hacmin özelliklerinin hesaplanması-Young modülününün analiz edilmesi-Intel(R) Core (TM) i3-5005U CPU @ 2.00GHz, 4 GB Ram bilgisayarda 12 saatten fazla sürmektedir ve de yazılım tüm partikülleri benzer kabul edip kendi kapalı kaynak koduna göre hesaplamaktadır. Bu şekilde yöntem iş yönetimi zaman sınırlarını aşmakla birlikte, sonuçların kapalı kaynak kodunda doğruluğundan emin olunamamaktadır. Digimat tüm güçlendirici parçaları homojen ve kendi algoritmalarına göre birim hacim üzerinde dağıtmaktadır. Yapılan çalışmada ise partikül boyutundaki perlitlerin boyutları endüstriyel ortamda homojen değildir / düzensizdir. Yapılan çalışmada bunu, Digimat’teki sonlu elemanlar yöntemiyle belirtmek mümkün değildir. Şu ana kadar literatürde doğrulanmış benzer bir malzeme modelleme çalışması olmaması yanında, programın bizim çalışmamıza uygunluğunu denemek yerine, geçmişte bulunmuş olan yarı deneysel mikromekanik modelleme tekniklerinden faydalanılmıştır. Burada, güçlendirici malzemelerinin küresel olduğu ve küresel olmadığı durumlardaki kompozit malzemeler için geliştirilmiş olan mikromekanik modellerin çalışmamıza uygunluğu incelenmiştir. Genel olarak endüstrideki kullanım mikromekanik modellerden çıkan verileri, analiz mühendisliğine girdi olarak kullanmaktır. Sonuç olarak Digimat de kapalı kaynak kodla belirli teoriler üzerine oturmaktadır. Çalışmamızda farklı perlit çeşitleri ve PLA biyokompozitlerine özgü modeller, açık kaynak kod olarak geliştirilmiştir. Perlit hammaddesi (pul şeklinde olan genişmiş perlitler) için standart Guth modelin modifiye edilerek Mathematica tabanında hesaplama sistematığı oluşturulmuştur.

Bölüm 2

Deneysel

Yapılan çalışmada, ilk olarak kullanılan hammaddeler karakterize edilmiştir. Üreticiden gelen 8 adet farklı perlit bulunmaktadır. Genleşmiş ve yarı işlenmiş perlitlere X-ışını floresans spektrometresi (XRF), X-ışını kırınımı (XRD), optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), sıvı piknometresi, brunauer-Emmett-Teller yüzey alanı analizi (BET), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), Isıl kütle kaybı analizi (TGA) testleri uygulanmıştır. Bunlar arasından ince genleşmiş perlit (ince), yarı işlenmiş perlitler (ince maden, mikronize maden) seçilip PLA ile karıştırılmıştır. İkincil bir proseste genleşmiş perlit + PLA + kavak ağacı talaşıyla birlikte eritme ve karıştırma metoduyla PLA polimeriyle karıştırılmıştır. Daha sonra üretilen biyokompozit malzemelere çekme, reoloji, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC), ısı kütle kaybı analizi (TGA) testleri yapılmıştır. Oluşan biyokompozit malzemenin Young modülü tahminlerinin deneysel veriler ile doğrulanması için yarı deneysel teoriler incelenmiştir ve yazılan Mathematica kodları ile hangi teorileri ile öğütülmüş genleşmiş perlit + PLA'ya özel yeni bir teori geliştirilmiştir. Toz formunda olan öğütülmüş genleşmiş perlit endüstriyel kullanımda-örneğin Seracılık-yan ürün olarak elde edilen atık bir formdur [38] bunu faydalı bir forma getirmek yapılan çalışmanın bir faydasıdır.

2.1 Malzemeler

Bu çalışmada biyokompozitler üretilirken 5 farklı malzeme kullanılmıştır. Polimer anafaz olarak Polilaktik asit (PLA) olarak seçilmiştir. Ticari ismi Luminy L130 olan ve Total-Corbion firması tarafından üretilen PLA kullanılmıştır. Luminy L130 PLA

homopolimeri, yüksek sıcaklığa dayanıklı olup enjeksiyon kalıpcılığı için uygundur. Tarımsal-genleşmiş “a”, kalın-genleşmiş “b”, ince-genleşmiş “c”, M1-genleşmiş “d”, M3-genleşmiş “e” ticari isimli perlitleri genleşmiş formdadır. Kalın-genleşmemiş “f”, ince-genleşmemiş “g”, mikronize-genleşmemiş “h” perlitler “ön-işlenmiş” hammaddelerin ticari isimleridir. Ön-işleme işlemi, perlitin madenden elde edildikten sonra ezilmesi esnasında yapılan işlemdir ve madenden sonra ikincil bir fabrikada gerçekleştirilmektedir. Daha sonrasında “f, g, h” perlitleri üçüncül bir perlit işleme ve genleşme fabrikasında işlenmektedir. Kalın, ince, mikronize genleşmemiş perlitlerin tanecik boyutları sırasıyla 40~500 µm, 150~600 µm, 0~150 µm 'dur. “h” numunesinin tanecik boyut aralığı, ikincil fabrikada küçültülmüştür. Bu çalışmada genleşmiş perlitler laboratuvarında ezilmiştir. Bu işlem sonucunda genleşmiş perlitler pulsu forma dönüşmüştür. 8 farklı perlit numunesinin fiziksel, kimyasal, morfolojik, termal analizleri ‘Kale Perlit’ [38] üreticinden tedarik edildikten sonra yapılmıştır. Kullanılan PLA türü PLLA olup kimyasal yöntemle üretilmiştir. Kullanılan perlit madenleri, İzmir Bergama bölgesinde üretilmiş olup Agropas Ticaret Şirketi (Ankara, Türkiye) vasıtasıyla tedarik edilmiştir. 5 adet genleşmiş perlit ve 3 adet genleşmemiş perlitten, 1 çeşit genleşmiş perlit (İnce-genleşmiş “c”) ve 2 adet çeşit ön işlenmiş perlit (İnce-genleşmemiş “g”, Mikronize-genleşmemiş “h”) seçilmiştir.

Tablo 2.1: PLA-Luminy L130 özellikleri [25]

Fiziksel Özellikler	Metot	Değer
Yoğunluk	Literatür Değeri	1.24 g/cm ³
Akış Eriyik İndeksi	ISO 1133-A (210 °C / 2.16kg)	24 g/10 dakika
Akış Eriyik İndeksi	ISO 1133-A (190 °C / 2.16kg)	10 g/10 dakika
Stereokimyasal Saflığı	Total Corbion PLA metodu	≥ %99 (L-izomer)
Görünüm	Görsel	Kristalin Beyaz Peletler
Artakalan Monomer	Total Corbion PLA metodu	≤ %0.3
Su / Nem	Yük Ölçümsel Karl-Fischer	≤ 400ppm
Erime Sıcaklığı	DSC	175°C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	DSC	55–60°C
Çekme Modülü	ISO 527-1	3500MPa
Çekme Dayanımı	ISO 527-1	50MPa
Kırılmadaki Uzama	ISO 527-1	≤ %5
Charpy çentikli çarpma, 23°C	ISO 179-1	≤ 5kJ/m ²
Isıl Eğilme Sıcaklığı, amorf	ISO 75-1	55-60°C
Isıl Eğilme Sıcaklığı, kristalin	ISO 75-1	100-110°C

Atık kavak ağacı talaşı Lypsos Mineral A. Ş. (Bornova, İzmir) vasıtasıyla Uyar Paletçilik (Çine, Aydın) tarafından temin edilmiştir. Young modülü, çekme dayanımı gibi değerler ele alınırken, bu tablodaki değerler değil, malzemeler temin edildikten sonra üretilen numuneler üzerinden ölçülen ASTM test sonuçları referans alınmıştır.

2.2 Malzemelerin Hazırlanması

Toz formunda olan 5 çeşit genleşmiş ve 3 çeşit yarı işlenmiş toplam 8 çeşit perlit numunesi, PLA ile karıştırılmadan önce detaylı özelliklerinin incelenmesi için 8 farklı karakterizasyon testine sokulmuştur. Çalışmanın ikinci kısmında ekstrüderde genleşmiş mikronize maden, ince-genleşmiş, ince maden perlit PLA ile aşağıdaki (Bölüm 2 / Tablo 2.2) oranlarda karıştırılmıştır. Tez çalışması kapsamında pellet

halinde numuneler Budin Masterbatch firmasında pellet formunda üretildikten sonra 120x120x2.5 mm boyutunda plakalar sıcak preste basılmıştır. Kullanılan sıcaklık aralığı 180°C – 190°C olarak seçilmiştir. Kullanılan ekstrüder marka ve modeli Labtech Mühendislik LTE-20-44'tür.

Tablo 2.2: Oluşturulan PLA ve perlit biyokompozitlerin içeriği ve isimlendirilmesi

Malzeme Formülü	Numune Kodu	PLA % İçeriği	Mikronize Maden % İçeriği	İnce Genleşmiş Perlit % İçeriği	İnce Maden % İçeriği
100PLA	Num0	100	0	0	0
90PLA10MM	Num1	90	10	0	0
80PLA20MM	Num2	80	20	0	0
70PLA30MM	Num3	70	30	0	0
90PLA10İGP	Num4	90	0	10	0
80PLA20İGP	Num5	80	0	20	0
70PLA30İGP	Num6	70	0	30	0
90PLA10İM	Num7	90	0	0	10
80PLA20İM	Num8	80	0	0	20



Şekil 2.1: Labtech Mühendislik LTE-20-44 çift vidalı ekstrüder [57]

Testlerimizde kullandığımız karışım oranları aşağıda (Bölüm 2 / Tablo 2.3) belirtilmiştir.

Tablo 2.3: Oluşturulan perlit + PLA + kavak ağacı hibrit biyokompozitlerin içeriği ve isimlendirilmesi

Malzeme Formülü	Numune Kodu	PLA % İçeriği	İnce Tip2 Genleşmiş Perlit % İçeriği	Kavak Ağacı Talaşı % İçeriği
90PLA10KAT	Num9	90	0	10
92_5PLA2_5İGP5KAT	Num10	92,5	2,5	5
92_5PLA5İGP2_5KAT	Num11	92,5	5	2,5

2.3 Gerçekleştirilen Testler

2.3.1 Alt Hammadde Grubu Perlit Testleri

2.3.1.1 X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF)

Spectro IQ II X-ışını Floresans (XRF) spektrometresi toz metodu vasıtasıyla oksitli kimyasal kompozisyonu ölçmek için kullanılmıştır.

2.3.1.2 X-Işını Kırınımı (XRD)

Perlit ağırlıklı olarak amorf bir malzemedir ve bu çalışmada Bruker D-8 Advance X-ışını kırınım ölçeri, 0,01973° basamağıyla $5^\circ < 2\theta < 65^\circ$ aralığında, Cu K α (40 kV, 40 mA) radyasyonu ile birlikte, küçük kristalitelere olan faz yapısını belirlemek için kullanılmıştır.

2.3.1.3 Optik Mikroskop

Nikon Eclipse LV150, perlit numunelerinin mikroskopik ölçüde optik ölçümlerini yapmak için kullanılmıştır.

2.3.1.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM deneyinde, numuneler karbon banda yapıştırılmıştır. Daha sonrasında iletken yüzey oluşturmak ve yüklenmeyi önlemek için altınla kaplanmıştır. PHILIPS XL 30S

FEG (Alan Emisyon Tabancası) cihazı ikincil elektron modunda taramalı elektron görüntüleri oluşturmak için kullanılmıştır.

2.3.1.5 Sıvı Piknometresi

Sıvı piknometresi ile ölçüm metodu, ince parçacıklı malzemeler için kesin sonuçlar vermesiyle, yoğunluk ölçümleri için kullanılmaktadır [58]. Deneyde, küçük bir şişe boyutunda, ağzına bir kapiler kapak yerleştirilmiş 50 mL'lik bir piknometre kullanılmıştır. Malzeme piknometre içine yerleştirilmiştir ve malzeme için uygun sıvı dökülmüştür. Deneyde, perlitler hidrolize olmayan numuneler olduğundan dolayı, perlit yoğunluğunu belirlemek için sıvı olarak su kullanılmıştır. Daha sonrasında 25°C'de kapiler kapakla birlikte kurutulmuştur ve ağırlığı ölçülmüştür.

Boş piknometre kapiler kapakla birlikte 25°C'de kurutulmuştur ve ağırlığı bulunmuştur (A). Daha sonrasında piknometrenin dörtte biri numune ile doldurulmuştur ve ağırlığı bir kez daha ölçülmüştür (B). Piknometre daha sonra yavaşça su ile doldurulmuştur ve taneler arasında hava kabarcığı kalmamasını sağlamak amacıyla çalkalanmıştır. Daha sonra sistem 25°C'de kapiler kapakla birlikte kurutulur ve ağırlığı ölçülür (C). Daha sonra piknometre kapiler kapakla birlikte 25°C'de kuruduktan sonra son olarak piknometre boşaltılıp su ile doldurulmuştur ve ağırlığı ölçülmüştür (D). Gerçek/doğru yoğunluk aşağıdaki (Bölüm 2 / Kısım 2.3.1.5 / Denklem 2.1) formülle birlikte hesaplanmıştır, ρ_{perlit} ve ρ_{su} sırasıyla perlit ve suyun yoğunluklarıdır.

$$\rho_{perlit} = \left(\frac{B - A}{(D - A) - (C - B)} \right) \times \rho_{su} \quad (2.1)$$

2.3.1.6 Brunauer-Emmett-Teller Yüzey Alanı Analizi (BET)

Bu deneyde, Gemini® VII2390a cihazı perlit tozlarının spesifik yüzeylerini ölçmek için 77 Kelvin'de sıvı nitrojen altında kullanılmaktadır. Kullanılan metot, Brunauer Emmett Teller (BET) yöntemidir. Ölçümden önce perlit numuneleri 120°C'de vakum ortamında gazdan arındırılmıştır. [59]

2.3.1.7 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Perlit minerallerinde bükülme titreşimlerini, asimetrik gerilmeyi ve bağların simetrik gerilmesini ölçmek için Perkin Elmer 100 spektrometresi kullanılmıştır.

2.3.1.8 Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA)

TA TGA-SDT Q600 cihazı perlit numuneleri 1200°C'e ısıtıldığı zaman, içindeki uçucu içeriği ölçmek için kullanılmıştır. Azot ortamında sıcaklık arttırma hızı 20°C/dakika ve gaz akış hızı 50 mL/dakika'dır.

2.3.2 Biyokompozitlere Uygulanan Testler

2.3.2.1 Biyokompozitlere Uygulanan Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri

DSC testleri için TA DSC Q2000 cihazı kullanılmıştır. Perlit+PLA ve Perlit + PLA + Kavak ağacı talaşı granüllerine uygulanan test şartları: Numunelerin bulunduğu kap tipi olarak alüminyum hermetik pan, ısıtma hızı 10°C/dak, soğutma hızı 10°C/dak, azot ortamı, 20°C analiz başlangıç sıcaklığı, 190°C analiz bitiş sıcaklığı, ısıtma ve soğutma sayısının 2 kez olması olarak belirtilebilir.

2.3.2.2 Biyokompozitlere Uygulanan Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri

Perlit + PLA ve Perlit + PLA + Kavak ağacı talaşı granüllerine uygulanan test şartları: Numuneler alüminyum hermetik kaplara konulması, azot ortamı, sıcaklık artış hızı 10°C/dak, analiz bitiş sıcaklığı 600°C, gaz akış hızı 10 mL/dak olarak belirlenebilir.

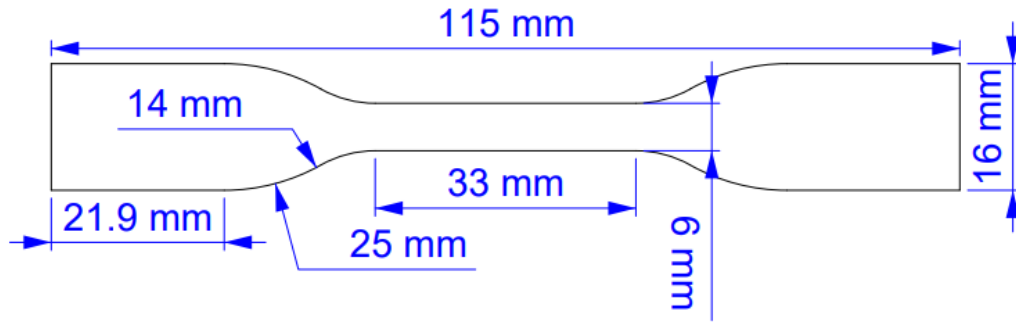
2.3.2.3 Biyokompozitlere Uygulanan Reometre Testleri

25 mm çapında 2,5 mm kalınlığında kesilmiş disk halindeki Perlit+PLA ve Perlit + PLA + Kavak Ağacı Talaşı numuneleri, Hybrid Rheometer Discovery HR-2 cihazında, akış analiz testlerine tabi tutulmuştur. Uygulanan şartlar: Azot ortamı, 190°C sıcaklık,

salınım frekansının (titreşim frekansı) ω 0,1 rad/s'den 100 rad/s'ye değiştirilmesi olarak belirtilebilir.

2.3.2.4 Biyokompozitlere Uygulanan Çekme Testleri

Ekstuder'den çıkan biyokompozit granüller, sıcak preste plaka halinde basılıp, ASTM D638-IV standardına göre geometrik olarak işlenmiştir. Bilgisayar destekli talaşlı imalatta dik işlem merkezinde kesme işlemi kullanılmıştır. Çalışmamızda olduğu gibi kesici ucun hava ile soğutulduğu durumlarda perlitle güçlendirilmiş polimer kompozitin tezgâhta kesilebilmesi mümkün olmaktadır. Bilgisayar destekli takım tezgahında işlenen ve çekme testine tabi tutulacak ASTM D638-IV standardındaki parçanın ölçüleri aşağıda (Bölüm 2 / Şekil 2.2) belirtilmiştir.



Şekil 2.2: ASTM D638 IV standardına göre çekme testi çubuğu ölçüleri

Oluşturulan ASTM D638-IV numunelerinden Perlit + PLA tipi olanları Hegewald & Peschke ve Perlit + PLA + Kavak Ağacı Talaşı, PLA + Kavak Ağacı Talaşı olanları MTS (20 kN), çekme testi makinalarında 2 mm/dakika hızında çekme deneylerine tabi tutulmuştur.

2.4 Mekanik Modelleme

Digimat ticari olarak faydalanılan bir malzeme modelleme programıdır. Polimerin ve güçlendirici hammaddenin mekanik özellikleri bilindiği zaman kompozit malzemenin özelliklerinin hesaplanması digimat yazılımının temel işlevlerindedir. Programın uygulamaları oldukça geniştir. Örneğin ana parçanın mekanik özellikleri hesaplanması için mikromekanik modellemede Digimat'te orta alan homojenizasyon teorisi ve Digimat-fe modülleri kullanılmaktadır. Orta alan homojenizasyon teorisi analitik bir

yöntemdir. Digimat FE modülü ise sonlu elemanlar yöntemi hesabına dayanır. Burada relatif hacim elemanı oluşturulur ve bu oluşan en küçük yapı, tüm geometri için temel oluşturur. Kompozit, matriks ve güçlendirici malzemeler mekanik özelliklerini Digimat temel veri olarak kabul eder. Bunların birinin eksikliğinde, Digimat tersine mühendislik modülüyle 2 grubun değerleri biliniyorsa diğer kalan malzeme grubunun özelliklerini hesaplayabilir. Digimat-MX, statik ve dinamik tersine mühendislik modülüyle çekme gerilme-uzama eğrisi üzerinde işlem yapar. Bunun için deneysel ve Digimat verileri/eğrileri arasında çakışma olması koşuluyla iterasyon yapılmaktadır. Çalışmamızda Digimat yerine analitik metotlar kullanılmıştır. Bunun nedenleri tezin giriş bölümü, problemin analizi kısmında irdelenmiştir. Yarı deneysel modellerle yapılan kabullerde, oluşan mekanik davranışın tamamını bire bir modellemek mümkün değildir. Küresel olan partiküller için olan modeller, Halpin Tsai, S Bileşke kuralı, Chantler, Hu ve Bond kuralı, Guth ve Gold modelidir. Küresel olmayan partiküllü sistemlerde yarı deneysel modeller: Halpin Tsai Modeli, Değiştirilmiş Halpin Tsai modeli, Guth modeli, Brodnyan modelleridir. Mathematica programında yazılan kodlar yardımıyla, perlit pulları ve PLA karışımı için Değiştirilmiş Guth modeli türetilmiştir.

Bölüm 3

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmanın son kısmının dört alt bölümü vardır. Perlit tozlarının karakterizasyonu ve yorumlanması, PLA-perlit biyokompozitlerinin karakterizasyonu ve yorumlanması, PLA-perlit-kavak ağacı hibrit biyokompozitlerinin karakterizasyonu ve yorumlanması, PLA-perlit biyokompozitlerinin mikromekanik modellenmesi olarak açıklanabilir.

3.1 Perlit Madeni

3.1.1 XRF Analizi

Bu çalışmada hammaddenin içeriklerinin oranları belirtilerek malzemenin tipleri belirlenmiştir. Burada, perlitler XRF testinde [60] çalışmasında görüldüğü gibi XRF içeriklerinin en alt ve en üst sınırlarının tanımlanmasıyla belirtilir. Görülmüştür ki her bir belirlenmiş malzeme miktarı için XRF testleri ayrı ayrı tekrarlanmalıdır. Bunun nedeni örneğin aynı perlit madeninde farklı damarların, birbirleriyle eşleşmeyen XRF sonuçları verebilecek olmasıdır. XRF, genişmiş perlitin üretiminin anlaşılması için oldukça kullanışlı test tekniğidir. Bu kapsamda perlit mineralinin menşesi, analiz ile direkt ilişkili olan kimyasal bileşimi gibi değişkenlerle birlikte XRF, genişmiş perlitin üretimini anlamak için oldukça kullanışlı bir test olmaktadır. Bu hususlar; [61], [62] makalelerinde açıklanmaktadır.

“Fe”nin içeriği “a” numunesinden “h” numunesine kadar artmaktadır. Bu kapsamda “f, g, h” ön-işlenmiş, genişmemiş perlitlerdir. “SiO₂”nin oranı “Tablo 3.1 ve Tablo 3.2”de görüldüğü gibi %75 oranındadır. Fakat [63]’ın çalışmasında görüldüğü üzere “SiO₂”nin içeriği %72,48 civarındadır ve bunun yanında “Fe₂O₃” içeriği yüksektir.

Test edilen genleşmiş perlit örneklerinde görüldüğü üzere, “Na₂O” içeriği %3 civarındadır, “b” örneğinde %2,52 kadar düşük bir değere gelmektedir. Genleşmemiş ön-işlenmiş perlitlerde, “f, g, h” örneklerinde “Na₂O” içerikleri genleşmiş perlit içeriklerinden farklı olmaktadır: %1,36, %1,50 değerleriyle en düşük değerlere sahiptir. ”h” örneğinde %4,52 içeriğiyle birlikte içerik en yüksektir. [63] çalışmasında görüldüğü üzere “Na₂O” içeriği %3,56’dır. [63], [64] yayınlarında görüldüğü üzere, “Na₂O” içeriği %1,87 ile en düşük değer, %4,68 ile en yüksek değerde olmaktadır.

Test edilen perlitlerde görüldüğü üzere “Fe₂O₃” içeriği “h” numunesinde %1,12 en yüksek değerdedir ve “e” numunesinde %0,56’dan daha düşük değerde ölçülmemektedir. Literatürde, [63]’ün çalışmasında, “Fe₂O₃” içeriği yüksektir – %1,23. Bunun yanında [64] ’ın çalışmasında, “Fe₂O₃” içeriği test edilen genleşmiş ve genleşmemiş ön işlenmiş perlitlerde ortalamanın üzerindedir. “K₂O” içerikleri literatürde ve test edilen numunelerde %4,12-4,81 oranlarıyla birlikte aynı değerleri vermektedir. Tüm test edilen numuneler arasında en düşük “SiO₂”lu %73,69; en yüksek “Na₂O”lu değer %4,52 “h” perlit numunesinde görülmüştür. “Al₂O₃” içeriği literatürde düşüktür %13 ve test edilen numunelerde %15-16 oranlarıyla yüksektir. Bu farklı yüzdelerin nedeni farklı menşeli madenler ve damarları gibi farklı kaynaklar olmasıdır. “b, c, h” perlitlerinde “Ti₂O” perlitlerinin ağırlık yüzdesinin miktarı sıfıra yakındır. Test cihazının algılayabileceği değerden düşüktür. Bu araştırmanın sonuçları [65] ’nın araştırmalarına uymakta olup, perlitin farklı metal katyonlar ile stabilize olan aluminosilikat negatif yüklü ağ olarak düşünüldüğünü kanıtlamaktadır. Bu bulgular ileriki bölümlerde tartışılacaktır ve bunun yanında XRD test cihazı küçük içeriklerdeki küçük kristalleri algılamamaktadır. “Tablo 3.1 ve 3.2”de görüldüğü gibi Si, Al, Na, K oksitlerini algılayabilir.

Tablo 3.1: Genleşmiş ve ön işlenmiş perlitlerin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça yüzde – toz metodu)

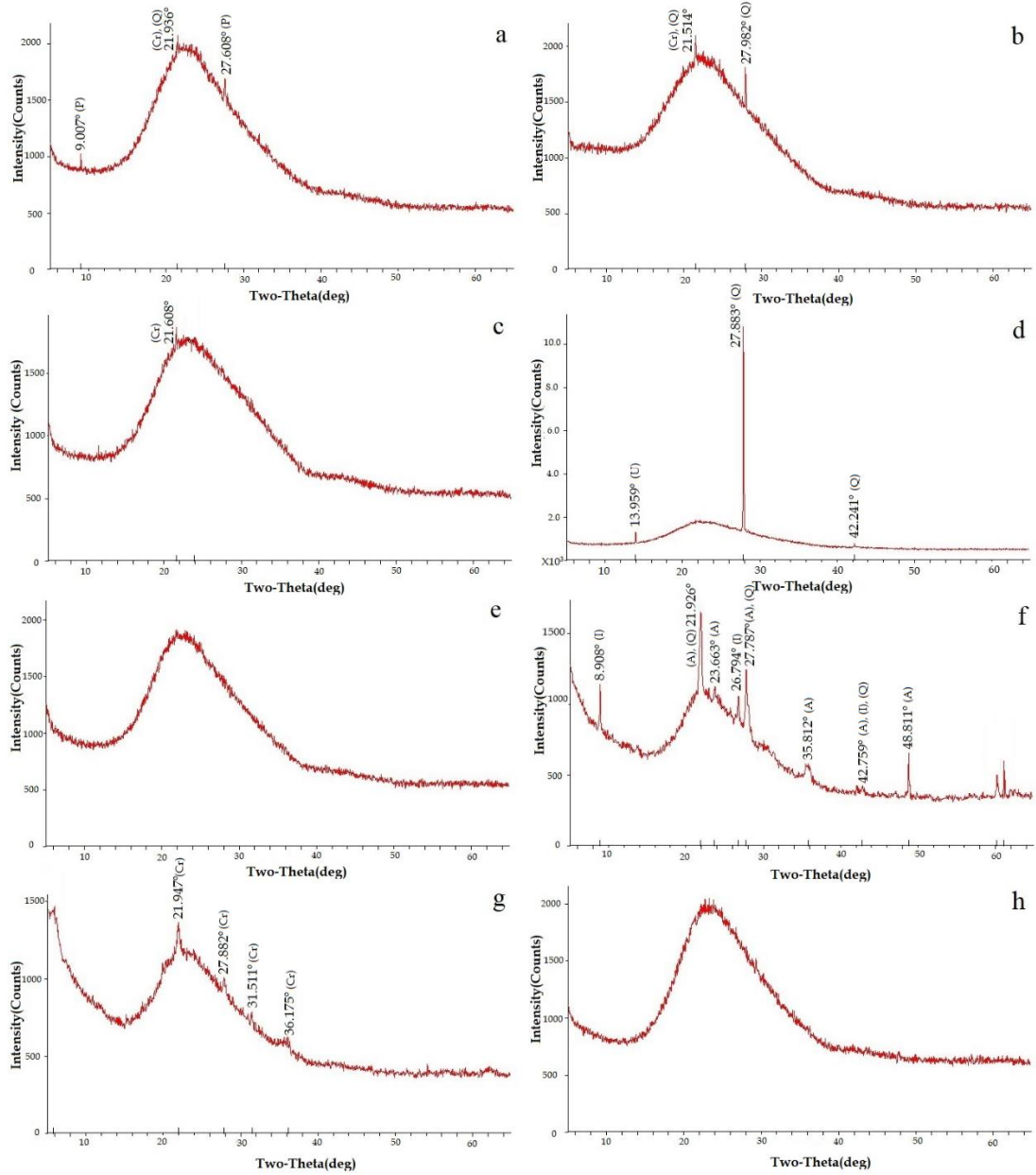
İçerik	a	b	c	d	e	f	g	h
SiO ₂	75,58	75,14	75,31	75,26	75,68	75,24	75,59	73,69
Al ₂ O ₃	15,56	15,50	15,62	15,36	15,33	16,04	16,04	15,25
Fe ₂ O ₃	0,58	0,72	0,59	0,65	0,56	0,72	0,81	1,12
TiO ₂	0,014	0- 0,0008	0- 0,0008	0,0049	0,096	0,016	0,189	0- 0,0008
CaO	0,54	0,75	0,64	0,58	0,53	0,61	0,69	0,72
MgO	0,29	0,28	0,29	0,28	0,28	0,28	0,37	0,28
K ₂ O	4,12	4,81	4,25	4,27	4,01	4,44	4,46	4,12
Na ₂ O	2,99	2,52	3,03	3,24	3,33	1,36	1,50	4,52
Diğer	0,326	0,28	0,27	0,355	0,184	1,294	0,521	0,3
Toplam	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tablo 3.2: [63]; [64] Makalelerinde bulunan perlitlerin kimyasal bileşimleri (ağırlık yüzdeleri %)

İçerik	Reka et al., 2019;[63]	Adi-Darmawan et al., 2021; [64]	Adi-Darmawan et al., 2021, [64] Genleşmiş Perlit
SiO ₂	72,48	76,49	74,33
Al ₂ O ₃	13,15	12,92	12,75
Fe ₂ O ₃	1,23	0,93	0,95
TiO ₂	0,15	0,12	0,15
CaO	1,13	0,92	2,10
MgO	0,35	0,13	0,88
K ₂ O	4,21	4,52	4,14
Na ₂ O	3,56	1,87	4,68
Diğer	3,74	2,1	0,02
Toplam	100,0	100,0	100,0

3.1.2 XRD Analizi

Genleşmiş ve ön-işlenmiş perlitlerin XRD grafikleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yaklaşık 15 ve 35 ° 2θ arasındaki değişken kamber desen, amorf kütlelerin varlığını belirtmektedir.



Şekil 3.1: Test edilen perlit numunelerinin XRD desenleri

(P: Paragonit, Cr: Kristobalit, Q: Kuartz, A: Albit, I: İllit)

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi perlit numuneleri daha çok amorf fazda algılanmıştır. Buna ek olarak bazı kristal fazlar da gözlemlenmiştir. Bu kristal fazlar aşağıdaki gibi

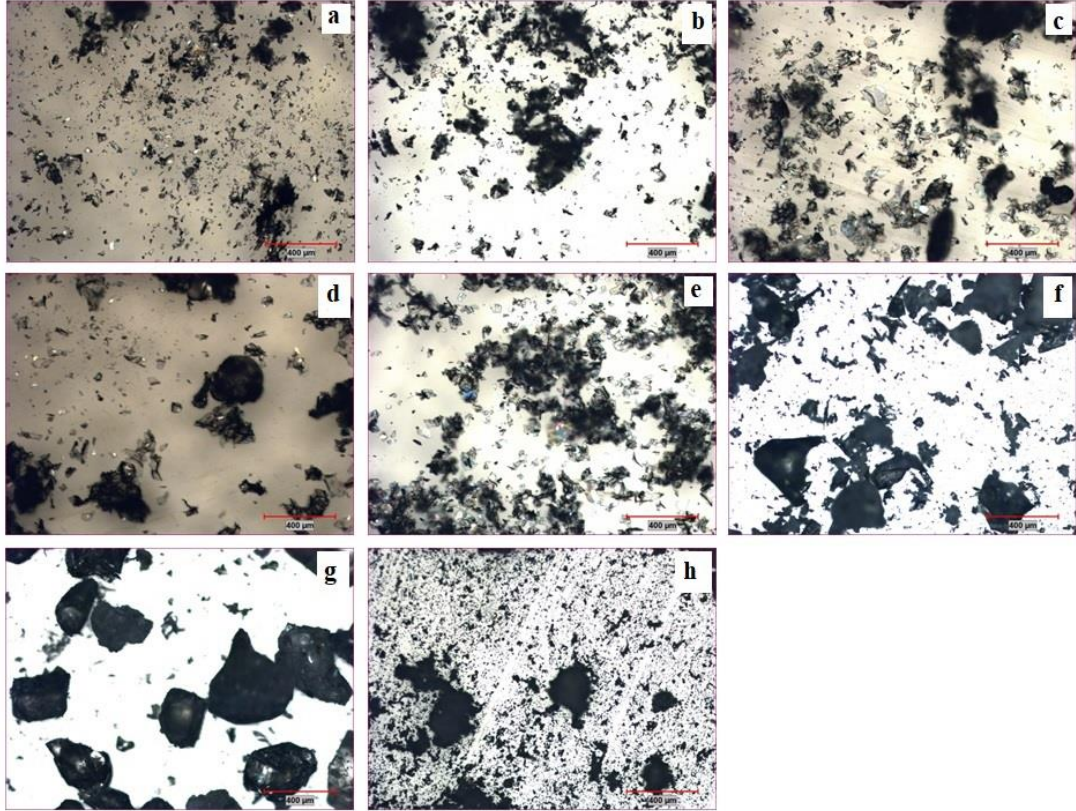
sembolize edilmiştir: Paragonit, grafikte "(P)" olarak kısaltılmıştır ve ampirik formülü " $\text{NaAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ " olarak belirtilebilir. Kristobalit, "(Cr)" olarak kısaltılabilir ve ampirik formülü " SiO_2 "'dür. Kuartz, "(Q)" olarak belirtilmiştir ve burada kristalin mineral " SiO_2 "'ten oluşmuştur. Albit, "(A)" olarak kısaltılmıştır. Albit'in ampirik formülü " $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ "'tür. İllit, "(I)" olarak sembolize edilmiştir. İllit'in bileşimlerinden birinin " $\text{KAl}_4(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ " olduğu belirtilebilir.

Şekil 3.1'de belirtildiği gibi Tarımsal-genleşmiş "a", kalın-genleşmiş "b", ince-genleşmiş "c", M1-genleşmiş "d", M3-genleşmiş "e" ticari isimli perlitler genleşmiş formdadırlar. Kalın-genleşmemiş "f", ince-genleşmemiş "g", mikronize-genleşmemiş "h" isimleri "ön-işlenmiş" perlitler için kullanılan isimlerdir ve bunlar maden cevherinden elde edilen ezilmiş halde bulunan perlitlerdir. Bu araştırmada, XRD karakterizasyon sonuçları literatürle eşleşen aynı karakterizasyon sonuçlarını vermektedir [66]–[69]. Bu çalışmalarda görülmüştür ki amorf faz, orijinal hacmin genleşmiş kısmını oluşturmaktadır. Kaba-genleşmemiş ticari isimli "f" perlitinde; XRD testinden sonra, malzemenin kristal fazlarla birlikte amorf olduğu görülmüştür. "f" perlitinin doğal kaynaklardan geldiğinden dolayı albit, illit ve kuartz içerdiği görülmüştür. İllit'in alkali kil içeren; potasyum, alumina, silika hidrat olduğu görülmüştür. Albit sodium, alumina, silikat içeren feldispat fazıdır. Bu fazların perlitte bulunabileceği beklenebilir. Perlit "potasyum, sodyum" ajanları erimiş faza dönüşebilir. Bu elementler soğuma hızına bağlı olarak amorf faza dönüşebilir. Perlitin küçük amorf faza sahip olması ya da olmaması kimyasal bileşim yanında ısı işlem koşullarına da bağlıdır [65]. Mikronize-genleşmemiş ticari isimli "h" perlitinde, pik gözlemlenmemiştir. Bu karakterizasyonun nedeni perlitin çıkarıldığı madenin tam menşei ve damarı ile ilişkili olabilir. Bu analiz sonucunda tüm elementlerin amorf fazda olan düzensiz ağ yapısında olduğu sonucuna varılabilir.

3.1.3 Optik Mikroskop

Bu araştırmada, optik mikroskop genleşmiş ve genleşmemiş perlitlerin maksimum partikül boyutlarının limitlerini belirlemeye yarar. Bu Şekil 3.2'deki 400 μm ölçeğindeki optik mikroskopla mümkün olmaktadır. Parçacıkların ölçüm boyutları optik mikroskopla mümkündür; bu büyüklükler SEM'de görülmemektedir. "a/tarımsal-genleşmiş", "b/kalın-genleşmiş", "c/ince-genleşmiş" numunelerde, ince

tozlar gözlemlenmiştir bunun nedeni laboratuvarında uygulanan öğütme işlemidir. Şekil 3.2’de, “d/M1-genleşmiş” perlit numunelerinde 300-400 μm boyutlu parçacıklar gözlemlenmiştir. “e/M3-genleşmiş” perlit numunelerinde ince tozlar görülmüştür. “f/kalın-genleşmemiş” ve “g/ince-genleşmemiş” perlit numuneleri genleşmemiştir ve görülen perlit numuneleri 400 μm ’dan büyüktür. 150 μm ’den küçük parçacıklar Şekil 3.2’te “h/mikronize-genleşmemiş” perlit panelinde görülmektedir.

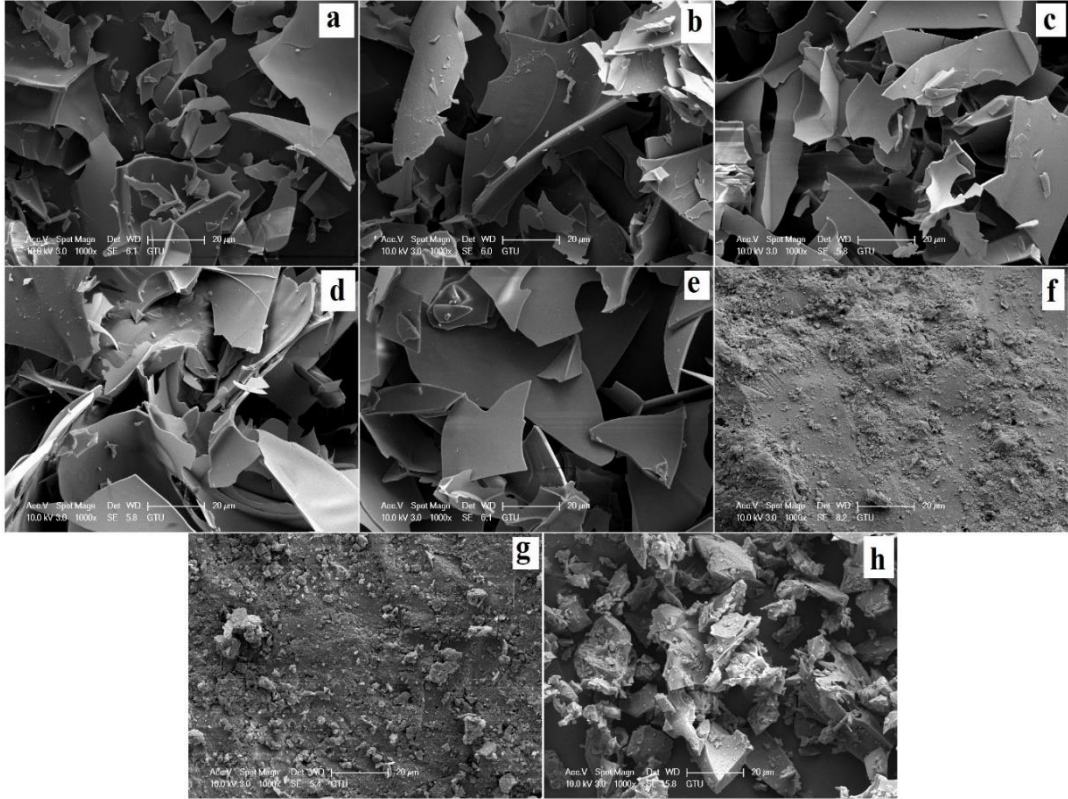


Şekil 3.2: Perlitlerin optik mikroskop görüntüleri

3.1.4 SEM İncelemeleri

Optik mikroskop incelemesinde parçacıkların boyutlarını ve şekillerini belirlemek için incelemeler yapıldıktan sonra, perlit numunelerinin detaylı olarak morfolojik analizleri için SEM analizi kullanılmaktadır. Literatürde de optik mikroskoptan SEM analizine geçiş aynı şekilde kullanılmıştır [70]. Pulsu şekilde olmayan perlitler “f, g, h” denen ön-işlenmiş perlitlerde gözlenmiştir. Köpüklü ve çatlaklı perlitler bazı çalışmalarda [53], [71]–[73] raporlanmıştır. Bu çalışmada pul şeklinde perlitler, geometrik olarak öğütülmüş “a, b, c, d, e” perlitlerinde gözlemlenmiştir. Cevher perlitler elde edildikten

sonra, kalın, ince ve mikronize forma ikinci endüstriyel tesiste ezilir ve burda perlitler genişlememiş formunu korur. Daha sonrasında perlitler, üçüncül genişletirme fabrikasında (bu çalışmada kullanılan örnekler için “KalePerlit” işletmesi) köpüksü yapıya kavuşmaktadır. Daha sonrasında “a, b, c, d, e” genişmiş perlitlerde perlit köpüklerinin duvarlarını oluşturan duvarlar ya da zarlar pulsu yapıları oluşturmaktadır; burda fabrikadaki eleme ve laboratuvardaki öğütme işlemleri tesir etmektedir.



Şekil 3.3: 1000X büyütmede perlit örneklerinin SEM görüntüleri

3.1.5 Yoğunluk

Tablo 3.3: Perlitlerin gerçek yoğunlukları

Perlit Numuneleri	Yoğunluk (g/cm ³)
a/Tarımsal-genleşmiş	2,45
b/Kalın-genleşmiş	2,31
c/İnce-genleşmiş	2,35
d/M1-genleşmiş	0,84
e/M3-genleşmiş	1,34
f/Kalın-genleşmemiş	2,39
g/İnce-genleşmemiş	2,44
h/Mikronize- genleşmemiş	2,00

“d/M1-genleşmiş”, “e/M3-genleşmiş”, “h/Mikronize-genleşmemiş” numuneleri haricinde tüm perlit numuneleri için gerçek yoğunluklar, 2,31-2,45 g/cm³ aralığında bulunmaktadır. Gerçek yoğunluğu ölçmeden önce bu örnekler için taşıma yapılmamıştır. “d/M1-genleşmiş”, “e/M3-genleşmiş”, “h/Mikronize-genleşmemiş” perlitlerin boyutları 200 µm’den düşüktür. Özellikle farklı parçacık boyutlarına sahip olan “d/M1-genleşmiş” ve “e/M3-genleşmiş” perlitlerin boyutları diğerlerinden farklıdır bunun nedeni bu ticari perlitlerin genleşmiş formda olmasıdır. “d/M1-genleşmiş”, “e/M3-genleşmiş” perlitlerde düşük yoğunlukların olmasının nedeni boşluklara sahip olmasıdır. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi “h/Mikronize-genleşmemiş” perlit ikincil endüstriyel tesiste ezilmiştir ve “h/Mikronize-genleşmemiş” perlitlerin boyutları 0 ile 150 µm arasındadır. “h/Mikronize-genleşmemiş” perlitin parçacık boyutları ön-işlenmiş perlitlerin parçacık boyutlarından optik mikroskopta görüldüğü üzere farklıdır. Bu çalışmada gerçek yoğunluk ölçülmüştür çünkü bu değerler doğrudan biyopolimerlerin young modülü tahmini için mikromekanik modellemede kullanılmaktadır.

3.1.6 BET Yüzey Alanı Analizi

BET analizleri perlit numunelerin yüzey alanlarını ölçmek için kullanılırlar, bu çalışmada 1–3 m²/g arasında ölçülmüştür. "a" (2,99 m²/g) ve "c" (2,65 m²/g) değerinde olan perlit numuneleri için toplam yüzey alanları en yüksektir. "d" perlitini haricinde, genişmiş perlitlerin toplam yüzey alanları ön-işlenmiş perlitlerden daha yüksektir. "d" numunesi daha düşük yüzey alanına sahiptir çünkü bunun daha düşük yoğunluğu vardır, sonuç olarak bunun düşük kütle/hacim oranına sahiptir. Perlit numuneleri için benzer yüzey alan değerleri önceki çalışmalarda yayınlanmıştır [59], [74], [75]. Bunun yanında "5 m²/g" den daha büyük olan yüzey alanları; farklı işleme, fiziksel koşullar ve madenlerin menşei nedeniyle olup literatürde [64], [69], [76], [77] belirtilmiştir.

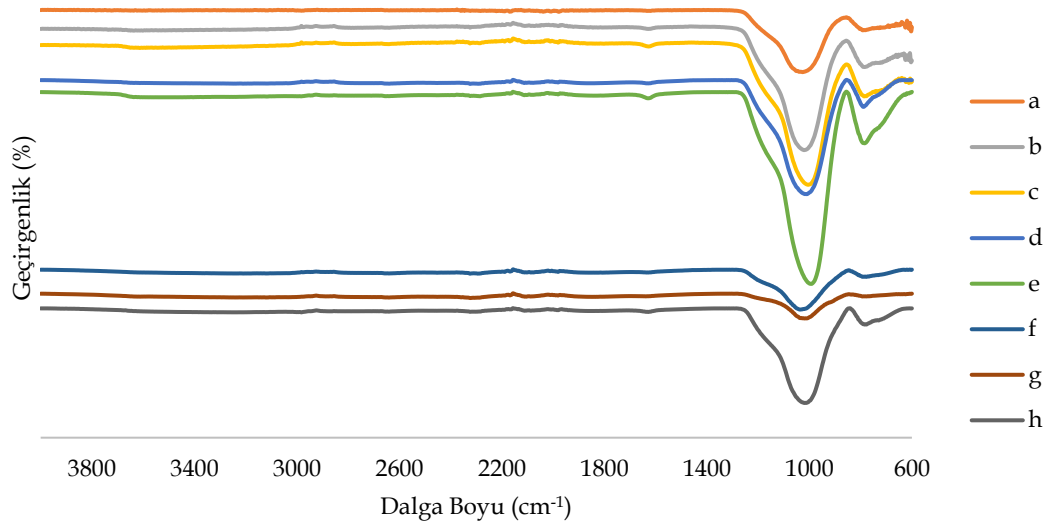
Tablo 3.4: Perlitlerin BET yüzey alan değerleri

Perlite Örnekleri	Toplam Yüzey Alanı (m ² /g)
a	2,99
b	1,97
c	2,65
d	1,21
e	2,10
f	1,68
g	1,83
h	1,12

3.1.7 FTIR Analizi

FTIR analizinde nitel analiz, bazı derinlemesine çalışmalarda ise nicel analiz yapılabilmektedir. Bu çalışmadaki FTIR grafiklerinde, perlit malzemelerdeki ilgili bağları gösteren nitel analizler yapılmıştır. Tüm perlit numunelerinin FTIR spektrumları 780, 1000 ve 1628 cm⁻¹'de absorpsiyon bantları göstermiştir (Şekil 3.4). 770 – 788 cm⁻¹ (Bölüm 3 / Tablo 3.5) aralığında gözlenen pikler, Si-O gruplarının gerilme titreşimlerinin bir sonucudur. Yaklaşık 1000 cm⁻¹'deki bant, Si-O-M (M: Al veya Si) gruplarındaki gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Si-O simetrik ve asimetric gerilme bantlarının yaklaşık değerlere sahip olup ve önceki çalışmalara

benzer olduğu görülmüştür [78], [79]. 780 ve 1000 cm^{-1} 'de tüm genişmiş perlitlerin ve ön işlemden geçirilmiş "h" perlitin geçirgenlik değerleri benzerdir ve "f" ve "g" için karşılık gelen değerlerden daha yüksektir. 1628 cm^{-1} civarındaki (1600-1650 cm^{-1} arası) pikler, su moleküllerinden kaynaklanan O-H gruplarının eğilme titreşimleriyle ilişkilidir [63], [68], [78], [79]. Genleşmiş perlitin "a" su içeriğinin en düşük olması nedeniyle diğer perlitlere göre daha düşük bir O-H bandına sahip olduğu görülmüştür. FTIR analizinin sonuçları önceki çalışmalarla iyi bir uzlaşım içindedir [59], [63], [68], [78]–[80].



Şekil 3.4: Genleşmiş ve ön işlenmiş perlit numunelerinin FTIR spektrumları

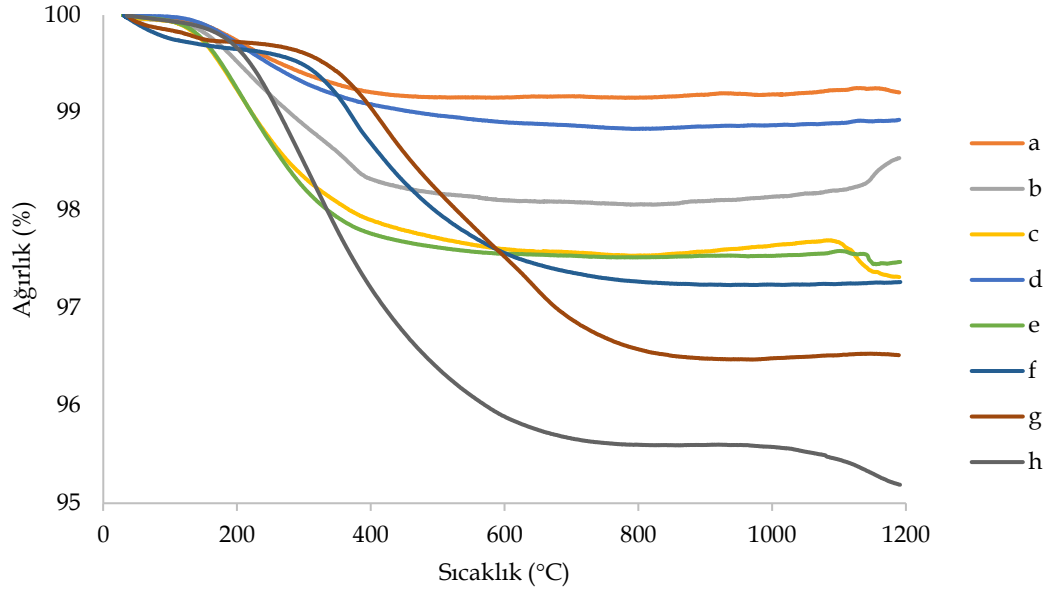
Tablo 3.5: Perlitlerin FTIR sonuçları

Perlit numuneleri	O-H eğilme titreşimi	Si-O-Si titreşimi (asimetrik gerilme)	Si-O-Si titreşimi (simetrik gerilme)
a	1624,5	1018,6	783,3
b	1628,3	1020,6	784,9
c	1630,1	1004,4	786,2
d	1632	1009,3	788
e	1628,3	991,3	783,5
f	1628,3	1035,6	778,1
g	1628,3	1011,6	-
h	1628,3	1011,7	777,2

3.1.8 TGA

Beş genleşmiş ve üç genleşmemiş/önceden-işlenmiş perlit örneklerinin TGA sonuçları Şekil 3.5'te gösterilmektedir. “0-1200°C” sıcaklık bandında, genleşmiş perlitlerin ağırlık kayıplarının %0,5-2,5 aralığında, ön işlem görmüş “f, g, h” perlitlerinin ise “f, g, h” %2,5-5,0 arasında olduğu görülmüştür. “0-250°C” sıcaklık aralığındaki ağırlık kayıpları, perlit yüzeyi tarafından emilen nemin çıkmasıyla, su ve silikat zincirleri arasındaki H- bağlarının kırılmasıyla ilişkilidir. Yaklaşık “250-500°C” aralığındaki ağırlık kayıpları, numunelerde kalan kimyasal olarak bağlı suyun dehidroksilasyonunu göstermektedir. TGA sonuçlarına göre, genleşmiş perlitlerin ağırlık kayıpları birinci sıcaklık aralığında meydana gelirken, önceden işlenmiş perlitlerin ağırlık kayıpları ikinci sıcaklık aralıklarında meydana gelmiştir. Bu fark muhtemelen perlitin genleşme kabiliyeti ile ilgilidir. Bu özelliğin bir sonucu olarak, test sırasında sıcaklığın artmasıyla ham perlitlerin kapalı hücre gözeneklerinde moleküler su açığa çıkması nedeniyle ağırlık kayıpları gözlenmiştir [53], [59], [63], [78]. İşlenmiş perlitlerin Isıl Kütle Kaybı Analizini gerçekleştiren önceki çalışmalar, numunenin %2-5'inin uçucu içeriğe karşılık geldiğini bildirmiştir [30], [34], [53]. Bu çalışmada, “h”, “f” ve “g” perlit örneklerinin sırasıyla %4,81, %2,76, %3,62'si uçucu içeriğe aittir. Mevcut numunelerdeki ağırlık kaybının nedenleri, daha önceki bir araştırmaya [78]

göre nem kaybı ve ayrıca termal bozunma olabilir. “Şekil 3.5”de ”b” ve ”c” numunelerinde 800°C'den sonra pozitif eğimler gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, ısıtma işlemi sırasındaki oksidasyon kaynaklı olabilir.



Şekil 3.5: Tüm perlit numunelerinin TGA sonuçları (%94-100)

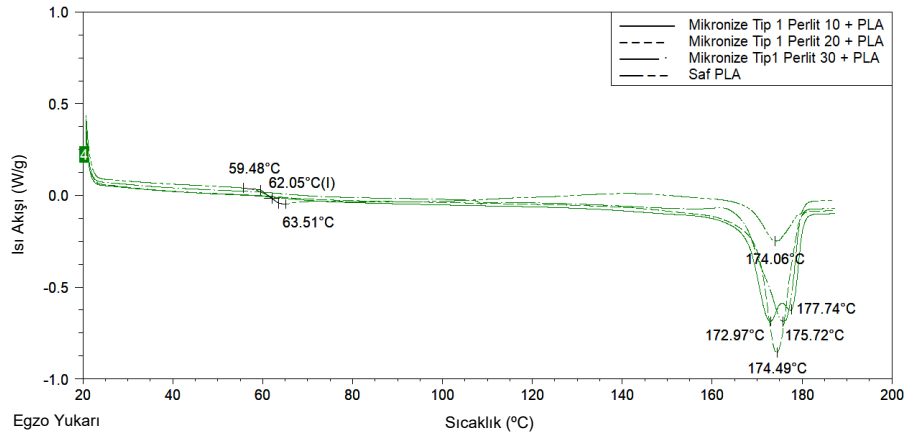
Tablo 3.6: Farklı tip perlitlerde uçucu içerik yüzdeleri

Perlit Numuneleri	% Uçucu içerik yüzdesi
a	0,84
b	1,93
c	2,68
d	1,15
e	2,54
f	2,74
g	3,49
h	4,82

3.2 Perlit + PLA Testleri

3.2.1 Perlit + PLA DSC Testleri

3.2.1.1 Mikronize / Genleşmemiş Tip 1 Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri



Şekil 3.6: Mikronize / genişmemiş tip 1 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) grafiği

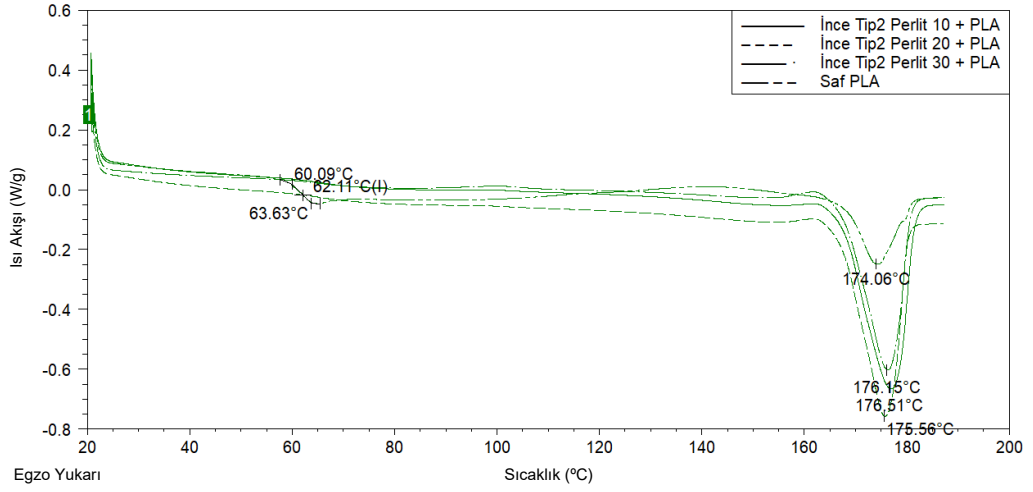
İlgili [81] makalesinde işlenmemiş saf malzeme olarak, enjeksiyon edilmiş, enjekte edilmiş ve tavlanmış, ekstrüderde işlenmiş, enjeksiyonla kalıplanmış ve tavlanmış PLA'ların ilk ısıtmada ve ikinci ısıtmadaki DSC grafikleri gözlemlenmiştir. İlk ısıtmada oldukça keskin bir T_g ve T_m değerleri vardır. Malzemenin daha önceden maruz kalmış olduğu iç gerilmelerden arınması (termal geçmişin silinmesi) için yapılan yukarıdaki (Şekil 3.6) ölçümde ikinci ısıtmadan sonraki değerler verilmiştir. Yapılan çalışmada ikinci ısıtmada T_g 'de sonra plato bölgesi görülmüştür [81]. Özellikle PLA'nın yanmaması için en fazla DSC sıcaklığının T_m+15 °C seçildiği belirtilmiştir. Yapılan tezde erime öncesi kristalizasyon'da sadece kütlece %30 karışımda yüksek bir oranda olmasına rağmen bir hafif bir etki olduğu görülmüştür. Her ne kadar ileride gerçekleştirmiş olduğumuz TGA testlerinde %30 değerinde Tip1%30 Perlit+PLA karışımında homojen bir karışım olmadığı görülse de T_m testlerinde fiziksel bir karışım olduğundan dolayı -kimyasal karışım olmadığından dolayı [51]- T_g ve T_m 'de çok büyük farklılık görülmediği düşünülmektedir.

Tablo 3.7: Mikronize / genleşmemiş tip 1 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	T _g (°C)	T _m (°C)
100PLA	Num0	62,05	174,06
90PLA10MM	Num1	-	172,97 177,74
80PLA20MM	Num2	-	174,49
70PLA30MM	Num3	-	175,72

“%10 Mikronize Perlit + PLA” da iki farklı kristal sistemi etkili olabildiği görülmüştür. Diğer grafiklerde, polimere perlit katılması 175 °C (üretici değeri) olan erime sıcaklığında büyük bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Bunun yanında PLA’ya Mikronize/Genleşmemiş Tip 1 Perlit katıldığı zaman T_g değişim eğrisi grafikten seçilememektedir. Üretici firmanın yazılımında, program herhangi bir T_g değerini okuyamamıştır. Bunun nedeninin ilk ısıtma ve soğutma çevriminden sonraki olan moleküller arasındaki rahatlamış minimum enerji kaynaklı düzenleme olduğu görülmüştür.

3.2.1.2 İnce / Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri



Şekil 3.7: İnce genleşmiş tip 2 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) Grafiği

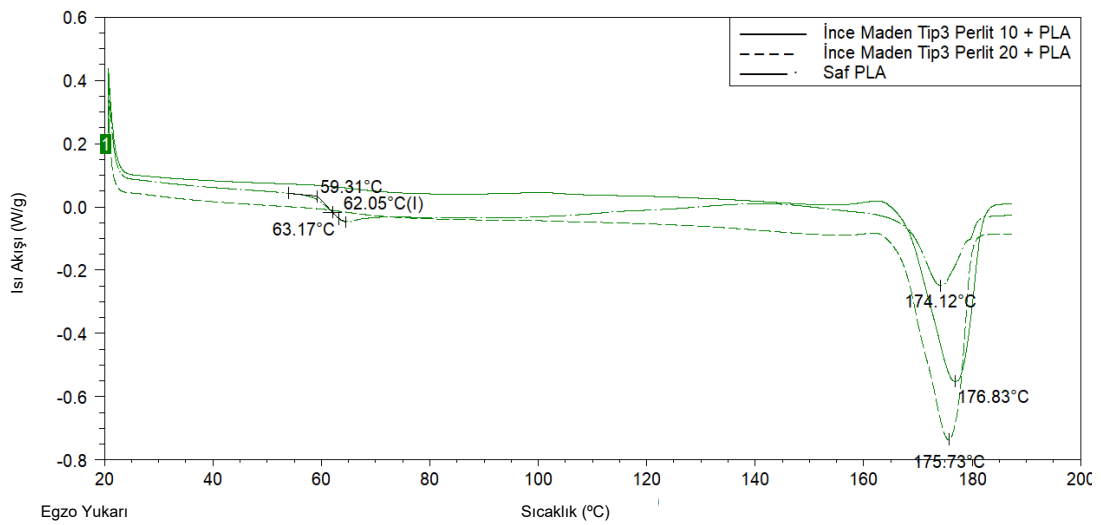
PLA'da erime entalpisinden, ön erime ve soğuk kristalizasyon entalpileri çıkartılarak malzemenin füzyon ısısı hakkında bilgi sahip olduğu için [82], [83], yapılan analizlerde PLA'ya perlit katıldıktan sonra ön-erime kristallenme bölgesinin oluşması önemli bir bulgudur. Saf PLA'da ise soğuk kristallenme eğrisi çok geniş bir alana yayıldığı için bir taban net olarak seçilememektedir. PLA'ya perlit katıldıktan sonra oldukça plato şeklinde olan ya da başka bir deyişle grafikten tam olarak seçilemeyen soğuk kristallenme bölgesi kaybolmuştur. Bu da önemli bir bulgudur. PLA ile bulgular [82], [83], makalelerinde tartışılmaktadır. T_m'de önemli bir değişiklik olmamıştır. Tip1 perlit+PLA'daki aynı yaklaşımlar geçerlidir.

Tablo 3.8: İnce / genişmiş tip 2 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	T _g (°C)	T _m (°C)
100PLA	Num0	62,11	174,06
90PLA10İGP	Num4	-	176,51
80PLA20İGP	Num5	-	175,56
70PLA30İGP	Num6	-	176,15

Polimerin erime camısı geçiş sıcaklığının 55-60 °C arasında olduğu üreticiden alınan bilgidir. Polimerin erime noktasının 175 °C olduğu üretici bilgisidir. Tip 2 perlit katılması önemli bir oranda erime sıcaklığındaki farka neden olmamıştır. İlginç bir bulgu olarak, ağırlıkça %10, %20, %30 katkılarında-Num4, Num5, Num6 numunelerinde-DSC testinde perlit katıldıktan sonra DSC testinde ısıtma (3.) döneminde malzemenin camısı geçiş sıcaklığı grafikten seçilememektedir. Bununla ilgili ölçümler ve moleküllerin düzenininin rahatlaması olduğu anlaşılmıştır.

3.2.1.3 İnce / Genleşmemiş Maden Tip 3 Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri



Şekil 3.8: İnce / genişmemiş maden tip 3 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) grafiği

Daha önceden belirttiğimiz konular yukarıdaki (Şekil 3.8) testler için geçerlidir. İkinci ısıtmadan sonra rahatlamış moleküller biyokompozitin amorf yapıda davranmasına neden olmuştur. PLA'ya perlit katılması ön-erime kristalizasyonuna neden olmuştur.

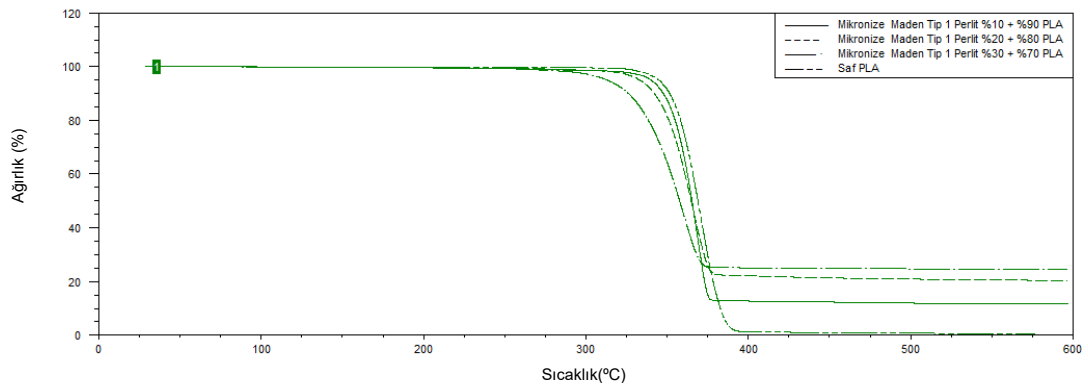
Tablo 3.9: İnce maden tip 3 perlit + PLA diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	T _g (°C)	T _m (°C)
100PLA	Num0	62,05	174,12
90PLA10İM	Num7	-	176,83
80PLA20İM	Num8	-	175,73

Polimerin erime camısı geçiş sıcaklığının 55-60 °C arasında olduğu, hammadde üreticisi sayfasında görülmüştür. Polimerin erime noktasının 175 °C olduğu üretici tarafından belirtilmiştir. PLA'ya Tip 3 perlit katılması erime sıcaklığındaki büyük farka neden olmamıştır. DSC testinde perlit katıldıktan sonra DSC ısıtma (3.) döneminde malzemenin camısı geçiş sıcaklığı Num7 ve Num8 numunelerinde grafikten seçilememektedir.

3.2.2 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri

3.2.2.1 Mikronize / Genleşmemiş Maden Tip 1 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri



Şekil 3.9: Mikronize / genleşmemiş maden tip 1 perlit + PLA ısıl kütle kaybı analizi (TGA) grafiği

Yapılan tüm TGA testlerinde göstermiştir ki üretilen tip 1 ve tip 2 PLA + Perlit biyokompozitlerinde üretilen hammaddelerin ölçümlerinde ağırlıkça yüzdelere göre beklenenden farklı değerler oluşmaktadır. Burada, test şartlarının standart olduğu kabul edilirse, hammadde ve üretim değişkenlerinin etkili olduğu düşünülmektedir. [51] makalesine göre TGA makalelerinde saf PLA ve %0,4 %0,8 %1,2 mikroperlit yığınlarıyla katalizörle sentezlenmiş PLA'nın TGA'sı incelenmiştir. Makalede TGA eğrisi, saf TGA eğrisine göre 100 C sağa kaymıştır. Yapılan tez çalışmasında ise fiziksel karışım elde edilmiş olup Saf PLA'nın TGA eğrisi sola kayıp, termal dayanımı düşmüştür. Volkanik kayalı kompozitlerde kimyasal olarak silan kullanıldığı zaman mekanik özelliklerin arttığı görülmüştür [84]. Perlit biyokompozitlerinde uyumlaştırıcıların termal ve mekanik özellikleri etkileyebilecek ve ileride yapılabilecek çalışmalardan bir tanesi olabileceği düşünülmektedir.

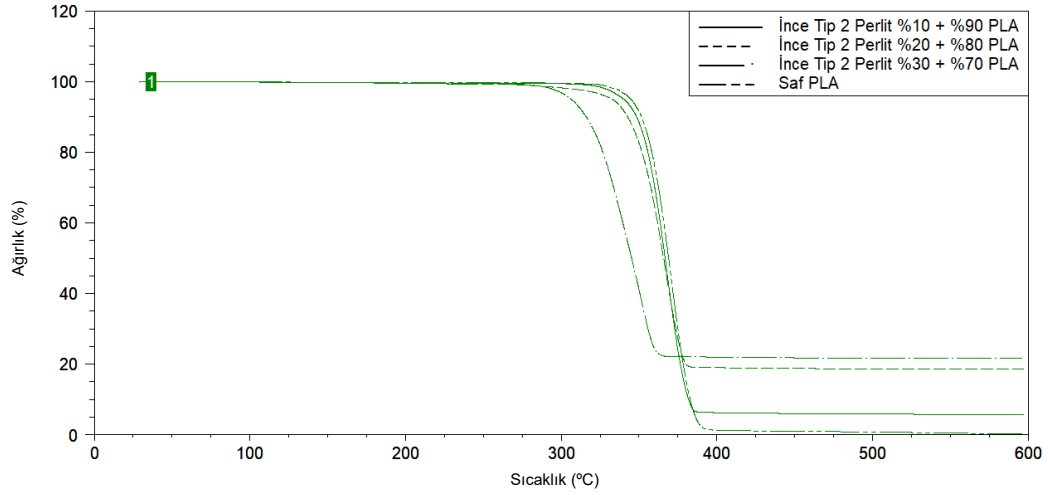
Tablo 3.10: Mikronize / genleşmemiş maden tip 1 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	Bozunma miktarı (%)	Bozunma Sıcaklığı (°C)
100PLA	Num0	%99,83	368,82
90PLA10MM	Num1	%88,27	363,91
80PLA20MM	Num2	%79,66	360,91
70PLA30MM	Num3	%75,45	351,72

%30 perlitte homojen karışma olduğu düşünülmemektedir. Yapılan testte, 15 mg numune kullanılmıştır. Kullandığımız polimerin yoğunluğu $1,25 \text{ gr/cm}^3$ ve perlit minerallerinin yoğunluğu 2 gr/cm^3 civarında olmaktadır. Perlit madenlerinin boyutları 500-1000 mikron civarındadır ve de ekstrüderde polimerle karışırken mineraller düzensiz olarak kırılmaktadırlar. Bunun yanında ekstrüdere girmeden önce perlit madenleri oldukça gauss eğrisinde düzensiz geometridedirler. Hassas TGA kütle ölçüm sonuçlarını bu kadar çok olumsuz etkileyen parametre bulunması durumunda da, 10 miligramlık Perlit+PLA biyokompozit numunelerinde 0.1 miligram hassasiyet sağlanamamaktadır. Başka bir bakış açısıyla 10 miligram biyokompozitin ne kadarının perlit olacağı oldukça hassas olarak belirlenememektedir. Bunda ağırlıkça yüzde azalmada ekstruder makinasının performansı da etkili olabilmektedir. Sonuç olarak ağırlıkça yüzde azalma beklenen sonuçları yüksek hassasiyette vermemiştir,

başka bir yaklaşımla belirtilen numunelerde hassas homojen karışma olduğu düşünülmemektedir ve ağırlıkça yüzde azalma beklenen oranlarda alınamamaktadır.

3.2.2.2 İnce / Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri



Şekil 3.10: İnce genleşmiş tip 2 perlit + PLA ısıl kütle kaybı analizi (TGA) grafiği

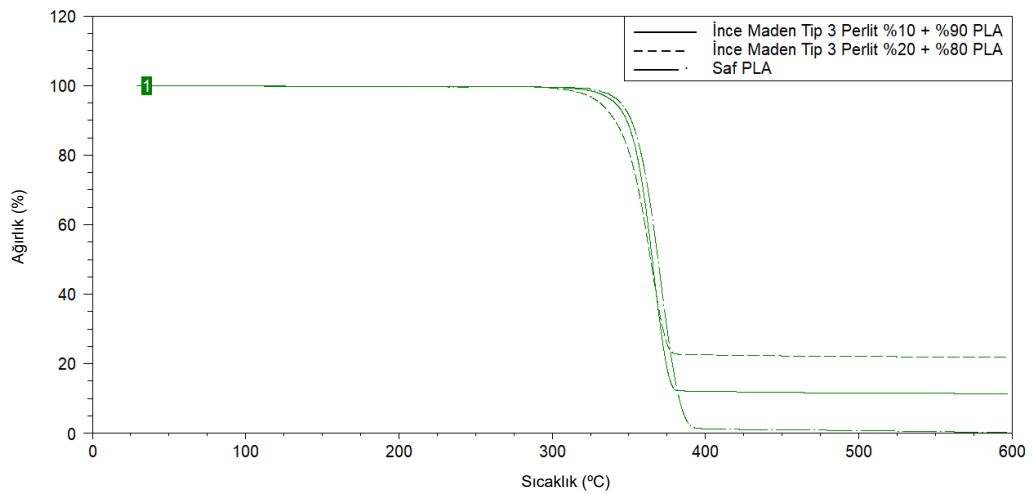
Biyokompozitlerde İnce-Genleşmiş-Tip 2 Perlit + PLA karışımlarında numune içindeki topaklaşma nedeniyle %30 ve %10 oranlardaki karışımlarda topaklaşma olduğu düşünülmektedir. Bunun nedeni %30 İGP'te 600°C'e çıkıldığı zaman %20 civarında kül haline gelmemiş yani sıcaklıktan etkilenmeyen perlit maddenin kalmış olmasıdır. Oysaki homojen bir karışım olsaydı, %30 civarında bir kül haline gelmemiş malzemenin 600°C'e çıkıldığı zaman geride kalmış olması gerekirdi. %10 ince genleşmiş perlitten yapılan biyokompozitte %94,30'unun bozulduğu incelenmiştir. Oysa bu miktarın %90 civarında olması beklenirdi. Bu ağırlıkça %10'luk karışımda da homojen bir ince genleşmiş perlit dağılımı olmadığı görülmüştür.

Tablo 3.11: İnce / genişmiş tip 2 perlit + PLA ısıl kütle kaybı analizi (TGA) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	Bozunma miktarı (%)	Bozunma Sıcaklığı (°C)
100PLA	Num0	%99,83	368,82
90PLA10İGP	Num4	%94,30	365,92
80PLA20İGP	Num5	%81,50	362,37
70PLA30İGP	Num6	%78,41	339,80

PLA'ya %10 ve %20 ince genişmiş perlit katıldığı zaman bozunma sıcaklığının 368,82 °C'ten düşük seviyede 6,37°C aralıkta değiştiğini belirtebiliriz. Genel olarak biyokompozitte aynı katkılarda, biyopolimerin yüzdece miktarı azaldığında, daha düşük bozunma sıcaklığı beklenmektedir. Bunun yanında, bozunma sıcaklığı %20 ince genişmiş perlit olan 362,37°C'den, %30 ince genişmiş perlite 339,80 °C'e düştüğü görülmüştür. %20'den %30'a, %10'luk ince genişmiş perlit artımında en fazla 10°C'yi aşmayacak bir sıcaklık değişiminin olması beklenirdi. Bu açıdan 22,70°C'lik değişim beklenmeyen bir sonuçtur [85].

3.2.2.3 İnce Maden / Genleşmemiş Tip 3 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri



Şekil 3.11: İnce maden / genleşmemiş tip 3 perlit + PLA ısıl kütle kaybı analizi (TGA) grafiği

Biyokompozitlerde ise termal kararlılık açısından PLA ve biyokompozitler incelenmiştir. Perlit inşaat endüstrisinde izolasyon malzemesi olarak kullanılsa bile burada PLA'ya daha fazla perlit katılması biyokompozitin termal kararlılığını arttırmamıştır. [86] çalışmasına göre PLA/PBAT/Volkanik parçacıklar (örneğin perlit ve ponza kayaları) kompozitlerinde termal kararlılık düşmüştür. Bunun nedeni daha kısa polimer zincirleri ve volkanik parçacık katılmasıyla birim kütle başına artan zincir sayılarındaki artma olmuştur. Bunun dışında Perlitin PLA içinde homojen olarak dağılıp bir topaklaşma yapmadığı görülmektedir. %10 perlit katkısının 600°C'a kadar formunu kaybetmediği görülmüştür. Daha önceden incelendiği gibi Perlit madenin erime sıcaklığı 1100°C ~ 1200°C civarında olduğu için bunun beklenen bir sonuç olduğu sonucu olduğu belirtilebilir.

Tablo 3.12: İnce maden / genleşmemiş tip 3 perlit + PLA ısıl kütle kaybı analizi (TGA) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	Bozunma miktarı (%)	Bozunma Sıcaklığı (°C)
100PLA	Num0	%99,83	368,82
90PLA10İM	Num7	%88,64	363,775
80PLA20İM	Num8	%78,08	360,205

Bozunma sıcaklığı saf PLA'da 368,82°C bulunmuştur. Bozunma sıcaklığı saf PLA'ya göre katkı miktarı arttıkça azalmıştır. Burda kütlece %90 PLA %10 İnce Maden/Genleşmemiş Tip 3 Perlit karışımında, bozunma sıcaklığı 363,775°C'e düşmüştür bunda daha az bozunan PLA miktarının etkisinin olabileceği öngörülmüştür. %20 Perlit katkısına çıkıldığı zaman bozunma sıcaklığı daha da azalmıştır. Bunda daha da az miktarda olan biyopolimer miktarının etkisi olduğu görülmektedir. Benzer rejim [87] makalesindeki biyokompozitlerde de görülmüştür. Genel olarak ısıl testler esnasında perlit partikülleri kapalı polimer networkü içindedir. DSC testlerinde, perlit kaynaklı ve olası PLA biyokompozitlerin içinde barındırılan bir boşluk olarak açık bir veri olarak okunamamıştır. Bunun yanında perlitler, bünyesinde su barındıran ve belirli sıcaklık aralıklarında bunu kaybeden malzemelerdir [88]. Suyun buharlaşması, biyopolimerin kül haline gelmesi ve karışım

oranlarındaki kararsızlık-bir bakıma prosesteki topaklaşma nedeniyle-TGA testinde açık bir bilgi verilmemektedir.

3.2.3 Perlit + PLA Reometre Testleri

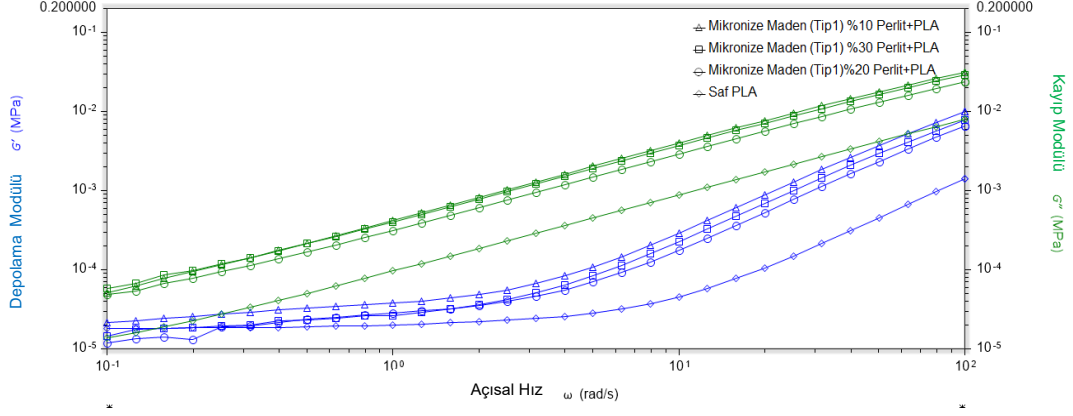
Depolama modülü G' (MPa), viskoelastik davranışın elastik kısmını ya da enerjinin depolanmasını belirtmek için kullanılır. Kayıp Modülü G'' (MPa), viskoelastik davranışın viskoz kısmını gösterir. Kompleks viskozite (η^*), açısal hızın (ω) bir fonksiyonu olarak akışa göre toplam direnç olarak tanımlanabilir ve en yüksek stres büyüklüğü ile uzama büyüklüğünün bir bölümü olarak verilebilir.

$$\eta^* = G^* / \omega$$

$$G^* = G' + i G''$$

$$(G^*)^2 = (G')^2 + (G'')^2$$

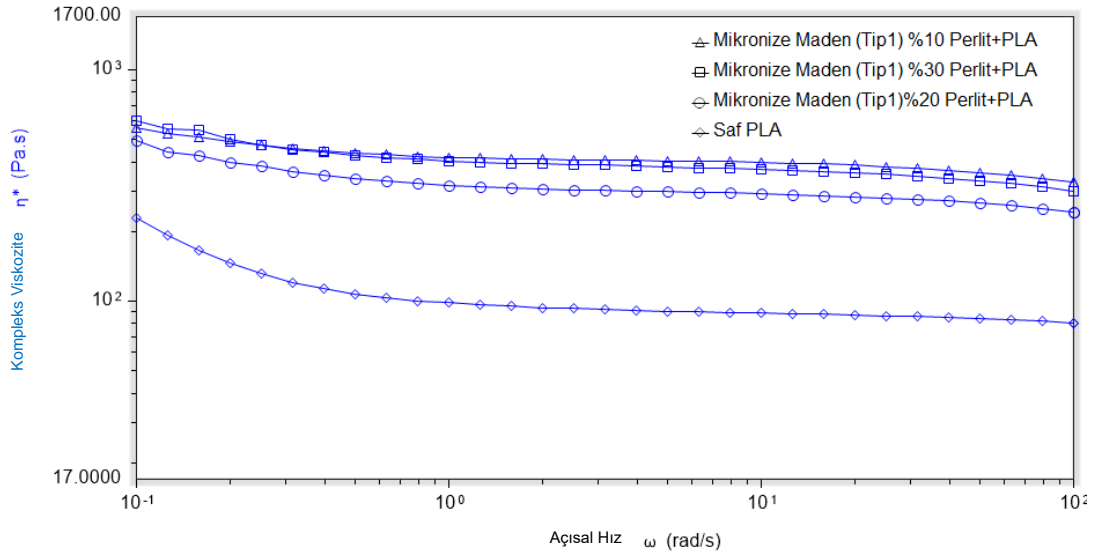
3.2.3.1 Karşılaştırmalı Mikronize Maden / Mikronize-Genleşmemiş-Tip 1 Perlit + PLA Depolama/Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.12: Karşılaştırmalı mikronize maden / mikronize genleşmemiş perlit depolama / kayıp modülü – açısal hız tarama testleri

“Şekil 3.12”de görüldüğü üzere depolama modülünde düşük frekanslarda değişiklik olmamaktadır. Bunun yanında hem depolama modülünde hem de kayıp modülünde sıfıra yakın değerlerden 0.01 yakın değerlere yükselme olmaktadır. Yapı, viskoelastik davranış gösterse bile bu değişimin az olduğu görülmektedir.

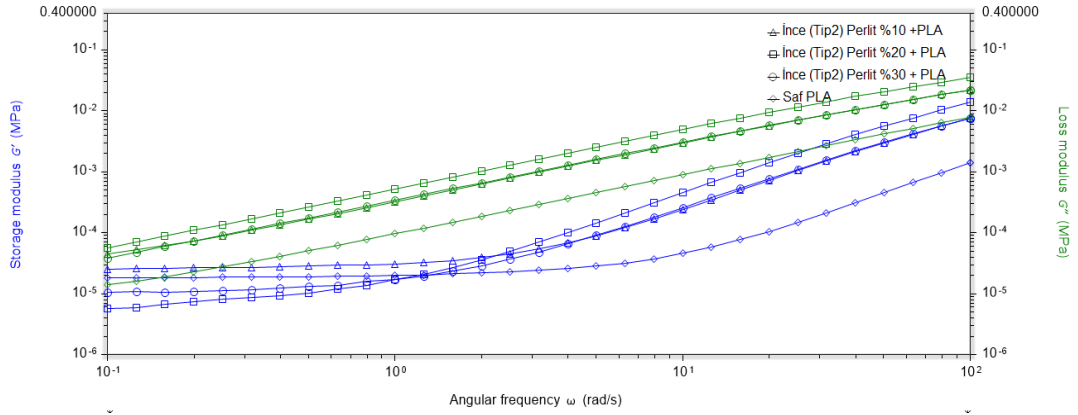
3.2.3.2 Karşılaştırmalı Mikronize Maden / Mikronize-Genleşmemiş-Tip 1 Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.13: Karşılaştırmalı mikronize genleşmemiş maden perlit + PLA kompleks viskozite – açısal hız grafiği

Mikronize maden (mikronize genleşmemiş) perlit depolama modülü & açısal hız ölçümlerinde perlit oranını arttırdıkça perlitlerde topaklanma olabileceği görülmektedir. Kompleks viskozite grafiğine göre perlit konsantrasyonu artarken, bunun belirli bir eşik değeri olduğu düşünülmektedir. Bu değer arttıktan sonra kompleks viskozite yani eriyiğin akışa gösterdiği dirençte eşik değerinden sonra topaklaşma olduğu düşünülmektedir. İyi karışım olmadığı için topaklaşma olabilir. Bu daha yüksek konsantrasyonlarda doğru orantılı bir artış olması gerekirken viskozitenin neden düştüğünü açıklamaktadır. Polimer zincirinin arasına katkı girdiği için ağ oluşmakta ve kompleks polimer zinciri zayıfladığında viskozite düşmektedir. Bu da konsantrasyon arttıkça viskozitenin artmadığını göstermektedir [89], [90], [91]. “mikronize-genleşmemiş-perlit ve PLA karışımı” , “mikronize-genleşmemiş-perlit ve PLA karışımı” benzer reolojik davranışlar gözlemlenmiştir.

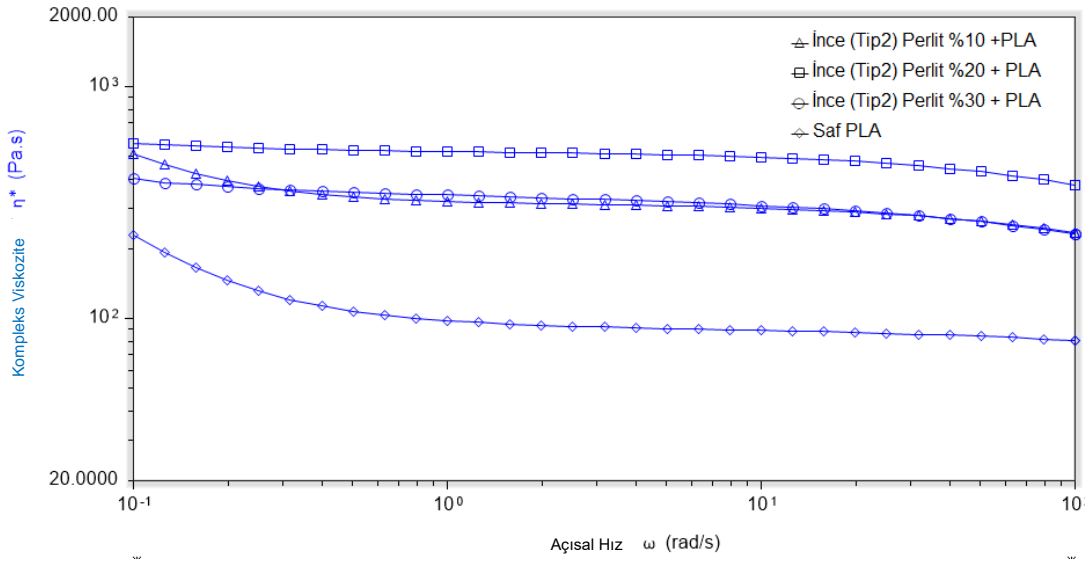
3.2.3.3 Karşılaştırmalı İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Depolama / Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.14: Karşılaştırmalı ince tip2 genleşmiş perlit depolama / kayıp modülü – açısal hız tarama testleri

Kayıp modülü genel olarak depolama modülüne göre yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlar Polistren/genleşmiş perlit kompozitlerinde de görülmüştür [49]. Kompleks viskozite hesaplarken görülen topaklanma rejimi burda da görülmektedir [52]. Depolama modülünde 2 radyan/saniye'ye kadar bir değişiklik olmamaktadır. Bu esnada kompozit malzemenin depolama modülünde ve kayıp modülünde eriyik formda büyük bir değişim gözlenmemiştir. Genel olarak deneylerde görüldüğü kadarıyla testin başlangıç aşamasındaki değişimleri gözardı edebilmekteyiz. Bunun nedeni ölçtüğümüz polimer biyokompozitin yapısı akışkan ölçümlerinin, çok düşük frekanslardan yüksek frekanslara gelirken, başlangıç değerlerdeki dinamik hareketlere uygun hale gelmemesidir.

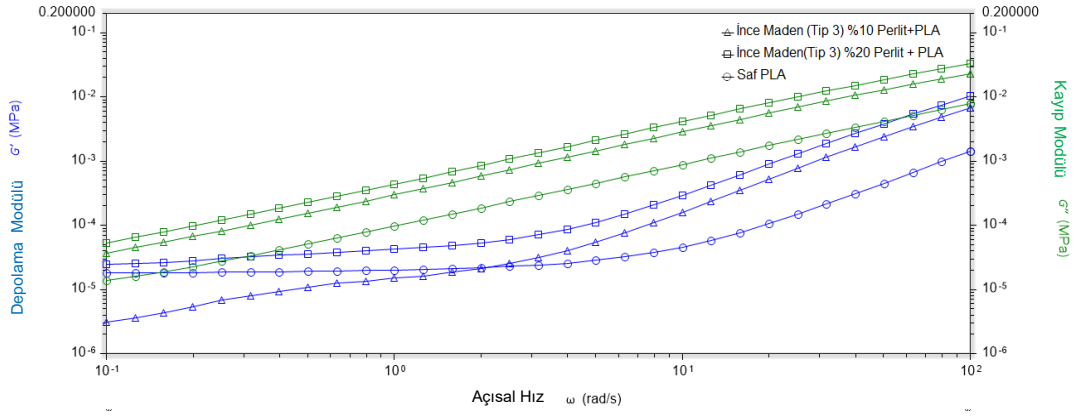
3.2.3.4 Karşılaştırmalı İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.15: Karşılaştırmalı ince genleşmiş perlit + PLA kompleks viskozite – açısal hız grafiği

Bir önceki analizlerde belirtildiği gibi başlangıç değerlerdeki kompleks viskozite ölçümleri dikkate alınmamıştır. Daha sonrasında kompleks viskozite değerlerinde büyük bir değişim olmamıştır. Kompleks viskozite yani bir plato bölgesi göstermiştir. Bunda, test esnasında polimerin yanmayacak şekilde erime sıcaklığının üzerinde olmasının etkili olabileceği düşünülmektedir ($T_m+15^\circ\text{C}$). Oluşturulan perlit biyokompozitlerinin T_m 'den sonra akışkanlığının yüksek seviyede olduğu görülmektedir (~130 Pa.s). Grafikte görüleceği üzere, %10-%20-%30 konsantrasyonlarında kompleks viskozite katılan perlit oranıyla görece doğru orantılı olarak artmadığı için %30 ince-genleşmiş perlit karışımında topaklaşma sorununun olabileceği görülmektedir.

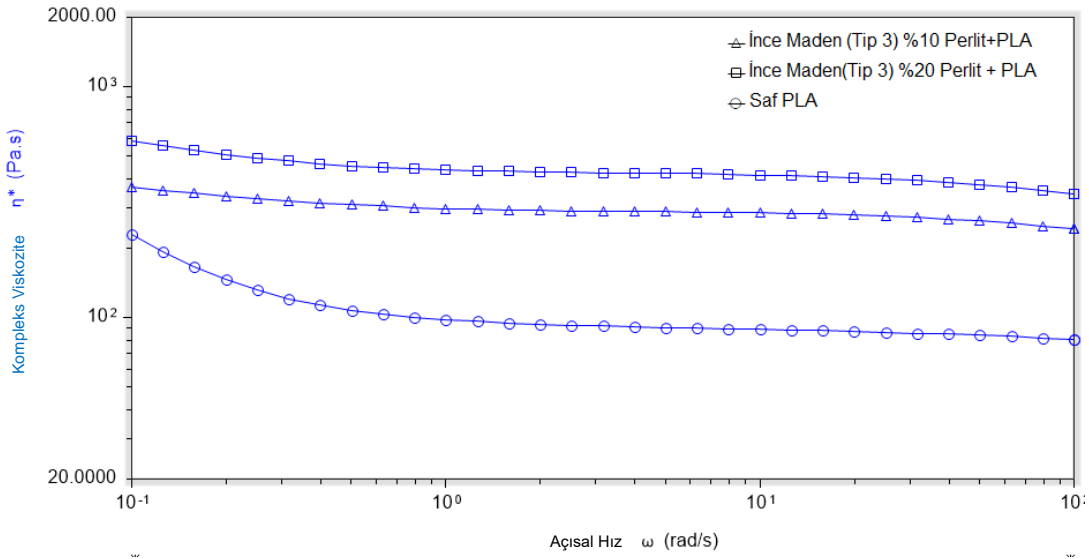
3.2.3.5 Karşılaştırmalı İnce Genleşmemiş Maden Tip 3 Perlit + PLA Depolama / Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.16: Karşılaştırmalı ince genleşmiş perlit + PLA depolama / kayıp modülü – açısal hız grafiği

Depolama modülü yaklaşık 2 radyan/saniye açısal hız değerinden sonra artmaktadır. Açısal hız taranması esnasında depolama ve kayıp modülünde büyük bir değişiklik olmayıp viskoelastik bir yapı gözlemlenmiştir. Bunun yanında konsantrasyon arttıkça değerlerin artması homojen bir dağılım olabileceğini işaret etmektedir. Bu konu, daha öncesinde aynı üçüncü oluşturulan biyokompozitte, TGA testlerinde de gözlemlenmiştir.

3.2.3.6 Karşılaştırmalı İnce / Genleşmemiş Maden Tip 3 Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.17: Karşılaştırmalı ince / genişmiş perlit + PLA kompleks viskozite – açısal hız grafiği

Depolama ve kayıp modül & açısal hız grafiklerinde karşılaşılan yaklaşık 2 radyan/saniye açısal hız değişim değeri burada da gözlemlenmiştir. Daha sonrasında polimer biyokompozitlerin, akışa karşı gösterdiği bir dirençte yani kompleks viskozitesinde Y-ekseninde çok az bir değişiklik olmuştur. Konsantrasyonun artmasıyla kompleks viskozitede artma görülmüştür. Yapılan doktora çalışması kapsamında, perlit mikro parçalarına bir yüzey çalışması yapılmamıştır. Bunun yanında örneğin [92] çalışmasında görüldüğü kadarıyla, alçak yoğunluklu polietilen/perlit nanokompozitlerinde; yüzey işlemleri perlit yüzeyleri ve matriks arasındaki bağı geliştirmektedir. Bu nedenle daha yüksek etkileşimler beklenebilir. Bu yaklaşım perlit/PLA mikro ya da nano kompozitlerinde de uygulanabilir. [92] çalışmasında görüldüğü gibi perlit oranı arttıkça kompleks viskozite de artmaktadır.

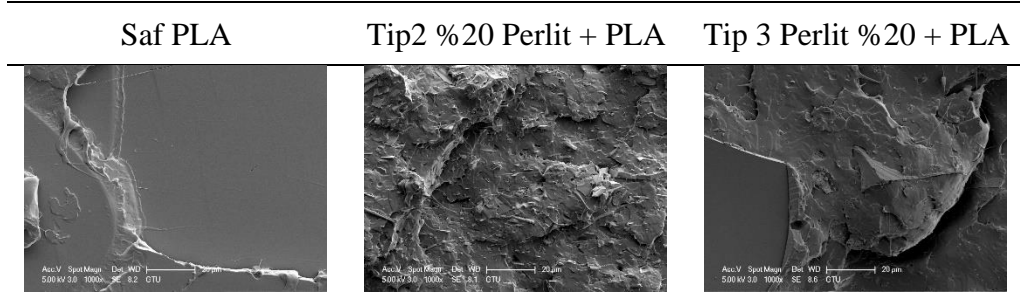
3.2.4 Perlit + PLA Çekme Testleri

Tablo 3.13: Oluşturulan perlitlerin çekme testi değerleri

Malzeme Formülü	Numune Kodu	En Yüksek Dayanım (N/mm ²)	Kırılmada Yüzde Uzama (%)	Young Modülü (N/mm ²) (MPa)
100PLA	Num0	69,62 ± 2,80	5,38	2365,43 ± 15,08
90PLA10MM	Num1	60,52 ± 1,39	4,16	2156,15 ± 8,17
80PLA20MM	Num2	59,53 ± 5,89	3,43	3205,21 ± 45,33
70PLA30MM	Num3	51,89 ± 5,50	2,58	3247,07 ± 156,10
90PLA10İGP	Num4	64,53 ± 2,02	4,18	2660,31 ± 72,37
80PLA20İGP	Num5	60,15 ± 5,49	3,88	3004,99 ± 192,46
70PLA30İGP	Num6	51,67 ± 0,78	2,59	3370,23 ± 42,06
90PLA10İM	Num7	60,39 ± 0,19	3,94	2680,43 ± 186,81
80PLA20İM	Num8	55,83 ± 2,15	3,48	2987,78 ± 339,44

PLA hammaddesine Perlit eklenince maksimum gerilmede azalma, elastik modülünde artma görülmüştür. Perlitin kırılğan yapıda mekanik davranış gösteren volkanik kaya olduğu çekme testlerinden incelenmiştir. “Tablo 3.14”te kırılma yüzeyleri SEM’le gözlemlendiğinde, pulsu yapıdaki Tip2 genleşmiş perlitlerin PLA ile iyi yapıştığı belirlenmiştir ve Young modülünün en fazla “Tip 2 perlit + PLA” biyokompozitlerinde arttığı gözlemlenmiştir. Kullandığımız PLA enjeksiyon kalıpcılığı için uygun suyun kaynama sıcaklığına dayanımı olan bir türdür. Çekme testi için hazırlanan köpek kemiği numuneleri elde edilirken, oluşturulan biyokompozitlerin frezede işleme yatkınlığı ve işlem sonrası pürüzsüz yüzeyler elde edilebilirliği görülmüştür. Bu nedenle biyokompozitlerde plastik enjeksiyon sonrası işlemlerde avantaj görülebilir.

Tablo 3.14: Çekme testinde kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri



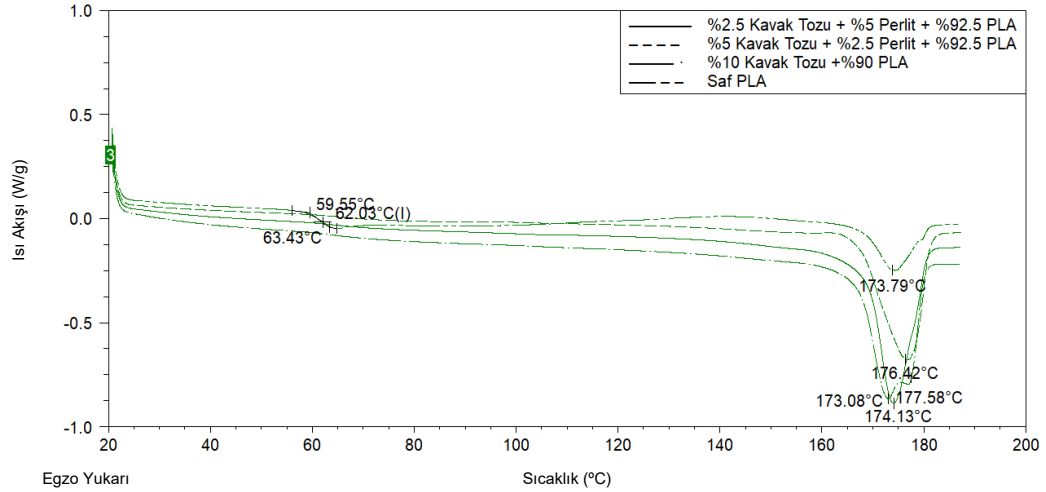
Saf PLA’da blok şeklinde kırılma gözlemlenmiştir. “Tablo 3.14”’e göre “Tip 2 %20 Perlit + PLA” arayüzeylerinin, “Tip 3 %20 Perlit + PLA”’ya göre yapışma olarak daha iyi olduğu görülmektedir. Bunun yanında Tip 2 Perlit’in biyokompozitin daha yüksek maksimum gerilme ve Young modülü kompozit yapısının daha uyumlu olduğunu onaylamaktadır. Tip 3 perlit biyokompozitinde granül halinde kırılma gözlemlenmiştir. En düşük mekanik özellikler Tip 3 yapılan karışımlardadır. Kırılma yüzeyleri resimlerinde genişmiş perlitlerde perlitlerin disk ya da kare şeklinde olabileceği ve uzunluk/kalınlık oranlarının resim üzerinden yapılan ölçümler ile 15 civarında olduğu görülmüştür. Bu değer daha sonra yapılan mekanik modelleme tekniklerinde kullanılmıştır. Genleşmemiş perlitin kırılma yüzeylerinde küre şeklinde temsil edilebilecek taneciklere ve buğday tanesi ya da endüstriyel deyişle granül formunda kırılmalara rastlanmıştır. Buna ek olarak perlit hammaddelerinin Optik Mikroskop görüntülerinde perlit tozunun içinde boyutsal farklılıklar olabileceği görülmüştür. Bu hem DSC hem de TGA ve diğer testlerde perlitin biyopolimer üzerinde homojen dağılmadığı/topaklaşma olduğu sonucuna bir neden olabilir. Bunun için perlitin madenden çıkartıldığı sonrası ikinci aşama ve üçüncü aşama fabrikalarında boyutların düzenli yani istenen belirli aralıklara hale getirilmesi gerekmektedir. İçinde en az su bulduran arınmış pulsu formda saf Perlit ve biyokompozitlerini modellemek için oluşturduğumuz üç perlitte Tip2 yani ince genişmiş formda olan perlit tercih edilmiştir. Genleşmeden dolayı da Tip2 kompozitte suyun perlit bünyesinde düşük durumda bulunabildiği görülmektedir. Tip1 Perlit + PLA biyokompozitlerin Young modülünün, ağırlıkça Perlit katkısı ile doğru orantılı olarak artmadığı görülmektedir. Burada yukarıda (Bölüm 3 / Kısım 3.2.4) belirtildiği kadarıyla güçlendiricinin içeriği ve boyutları, PLA'nın kompleks molekül yapısı ve üretim metodu (bizim çalışmamızda plastik enjeksiyon için uygun olan PLA seçilmiştir.), PLA ile karıştırma esnasında ekstrüder namlusunun çalışma sıcaklığı

($T_m+15^\circ\text{C}$), test şartlarında değişkenlerin etkili olabileceği düşünölmektedir. Bunlar, farklı Young modöölü ölçüm değerlerine yol açabilir. Tüm bütün bu deney sonuçlarını genel olarak gözden geçirmek gerekirse [84] literatür incelemesiyle birlikte tez kapsamında detaylı görsel, görsel ve sayısal veriler çalışıldığı belirtilebilir.

Çalışmamızda çekme testinde kırılma bölgesinin SEM görüntüleri incelenmiştir. Burada perlitlerin çekme dayanımının, Perlit + PLA arayüzey yapışma kuvvetinden daha düşük olduğu sonucuna varılabilir. Çünkü perlitler üzerinden kırılmıştır ve de biyopolimer perlit arayüzey bölgesinde PLA'da herhangi bir akma görölmemektedir. PLA'nın kopmada uzaması %5 civarında olduğu görölmektedir. Oysaki Perlit kırılğan bir malzeme olduğu için maksimum çekmede uzamayı düşürmüştür. Bununla ilgili PLA'nın tokluğu ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [93]. Tezimizde hedeflediğimiz kullanım alanı olan otomotiv ve züccaciye sektörleri için genleşmiş pulsu formda perlitin iyi bir kullanılabilir atık malzeme olduğu incelenmiştir. Araç kullanıcıları için, iç giydirme parçalarda çarpışma testlerinde ilk şok ve darbe emildikten sonra hareketin-enerjinin sönlünerek-durması gerekmektedir [94]. Biyokompozit parça tasarımında görünen yüzeyler et kalınlığı verilecek, genel olarak kalıp yüzeyinde desen atılacak ana yüzeyler olarak belirlenir. Bunun yüzeylerin mekanik tasarım için boss ve federler atılmaktadır. Bu açıdan parça tasarımı esnasında malzeme özelliklerinin tamamının bilinmesi zorunludur [95]. Konuyla ilgili olarak [96], [97] makalelerinde belirtildiği gibi otomotiv endüstrisinde biyokompozitler bir çok yerde kullanılmaktadır. Sonuç olarak otomotiv sektöründe uygulama özelliklerinin biyokompozit mekanik özellikleri ile optimize edilmesi gereği ihtiyacı olmasıyla birlikte biyokompozitin Young modöölünün hammadde özellikleriyle tahmin edilmesi şeklinde bir çalışma yapılmıştır. Bununla ilgili olarak 8 teoremin ince genleşmiş PLA (SEM resimlerinden ölçüldüğü kadarıyla pulların uzunluk/kalıklık oranı=15) çalışmaya uygunluğu incelenip, PLA+pulsu formda olan perlit seçilmiştir. Biyokompozit parça, malzeme üretimi öncesi ve sonrası hammadde malzeme karakterizasyonu açısından özellikler belirlenecektir.

3.3 İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + Kavak Ağacı Talaşı + PLA Testleri

3.3.1 Kavak Ağacı Tozu + İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testleri



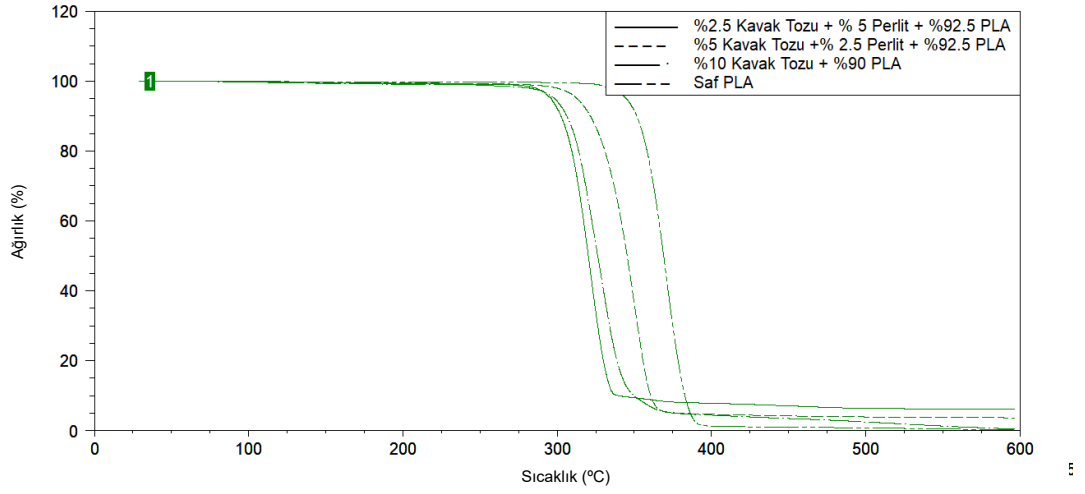
Şekil 3.18: Kavak ağacı tozu + ince genleşmiş tip 2 perlit + PLA biyokompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) testleri

Tablo 3.15: Kavak ağacı tozu + ince genleşmiş tip 2 perlit + PLA biyokompozitlerin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	T _g (°C)	T _m (°C)
100PLA	Num0	62,03	173,79
90PLA10KAT	Num9	-	173,08 177,58
92_5PLA2_5İGP 5KAT	Num10	-	176,42
92_5PLA5İGP2_ 5KAT	Num11	-	174,13

T_m = 173.08 °C, 177,58 °C %10 Kavak Ağacı Tozu + %90 PLA biyokompozitinde, kavak partiküllerindeki kristalin yapıdan dolayı iki erime pik noktasının görülebileceği düşünülmektedir. Katkıların, biyokompozitlerin erime sıcaklığı ve camsı geçiş sıcaklığında saf PLA'ya göre düşük seviyede bir değişim gözlemlenmiştir.

3.3.2 Kavak Ağacı Tozu + İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Isıl Kütle Kaybı Analizi (TGA) Testleri



Şekil 3.19: Kavak ağacı tozu + ince genleşmiş tip 2 perlit + PLA biyokompozitlerin ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) testleri

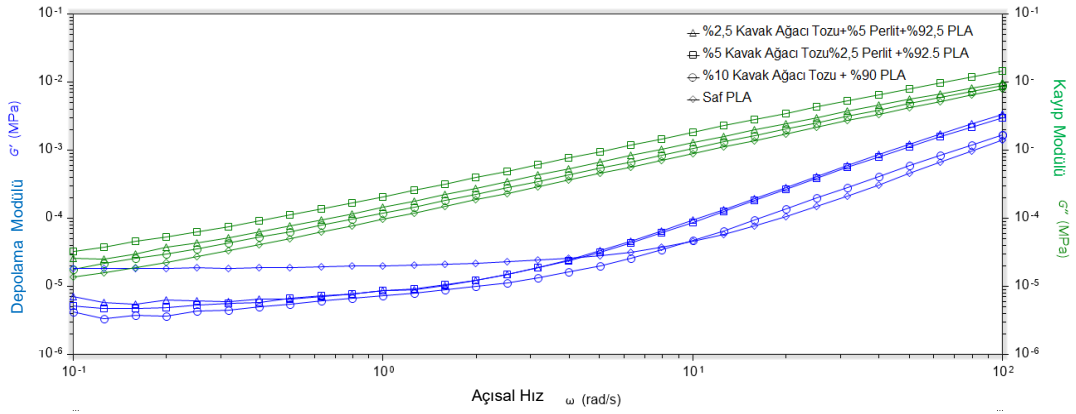
Tablo 3.16: Kavak ağacı tozu + ince genleşmiş tip 2 perlit + PLA ısı kütlesi kaybı analizi (TGA) test sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	Bozunma miktarı (%)	Bozunma Sıcaklığı (°C)
100PLA	Num0	%99.83	368.82
90PLA10KAT	Num9	%99.62	325.455
92_5PLA2_5İGP5KAT	Num10	%96.36	344.925
92_5PLA5İGP2_5KAT	Num11	%93.94	319.265

Bozunma miktarı açısından kalan perlit oranları ısıtma işlemi sonrası katılan perlitte doğru orantı göstermektedir. PLA'ya kavak ağacı ve perlit katıldıktan sonra bozunma sıcaklığı düşmektedir. Bir önceki kısımdaki PLA+Perlit oranlarında belirtildiği gibi Kavak Ağacı+Genleştirilmiş Perlit+PLA karışımlarında da homojen bir karışma olmadığı görülmektedir.

3.3.3 İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + Kavak Ağacı Talaşı + PLA Reoloji Testleri

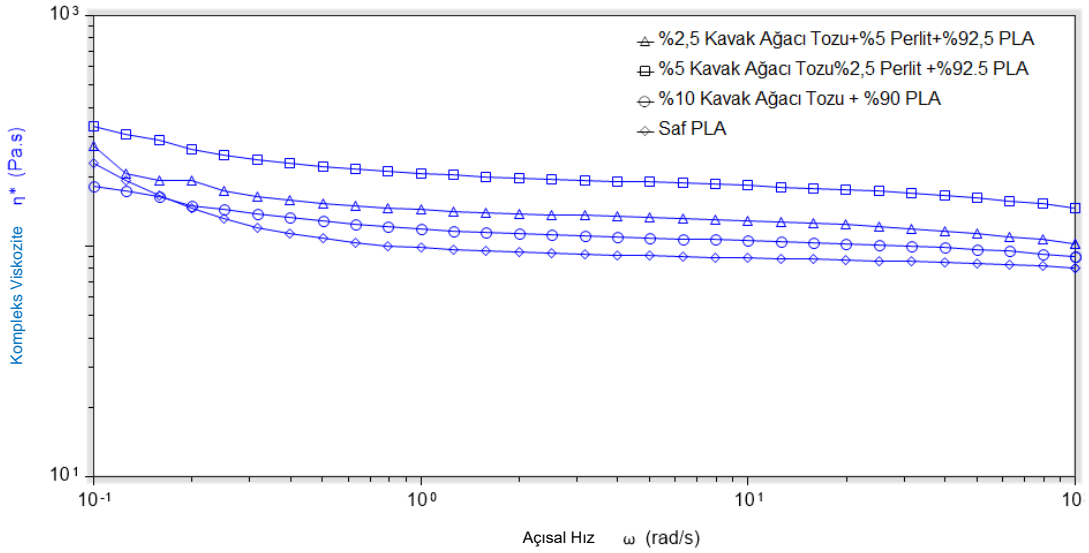
3.3.3.1 Karşılaştırmalı Kavak Ağacı Tozu + İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Depolama/Kayıp Modülü Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.20: Karşılaştırmalı kavak ağacı tozu + ince genleşmiş tip 2 perlit + PLA depolama/kayıp modülü reometre testleri – açısal hız tarama

4 radyan/saniye'ye kadar depolama modülünde bir değişiklik olmamıştır. Genel itibariyle malzeme viskoelastik yapı göstermiştir. Fakat bir sonraki sayfada belirtilen kompleks viskozite açısal hız grafiğinde görüldüğü üzere kavak ağacı oranı arttıkça kompleks viskozitenin de artması beklenirdi. Fakat böyle bir karışımın olmadığı görülmektedir.

3.3.3.2 Karşılaştırmalı Kavak Ağacı Tozu + İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Kompleks Viskozite Reometre Testleri – Açısal Hız Tarama



Şekil 3.21: Karşılaştırmalı kavak ağacı tozu + ince genleşmiş tip 2 perlit + PLA kompleks viskozite reometre testleri – açısal hız tarama

3.3.4 İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + Kavak Ağacı Talaşı + PLA Çekme Testleri

Tablo 3.17: PLA + ince genleşmiş tip 2 perlit + kavak ağacı talaşı çekme testi sonuçları

Malzeme Formülü	Numune Kodu	En Yüksek Gerilme (N/mm ²)	Kırılmada Uzama (%)	Elastik Modülü (N/mm ²) (MPa)
100PLA	Num0	69.62	5.38	2365.43
90PLA10KAT	Num9	43.30	1.98	2508.11
92_5PLA2_5İG P5KAT	Num10	47.63	2.15	2608.42
92_5PLA5İGP2 _5KAT	Num11	49.50	2.10	2748.28

PLA hammaddesine %10 kavak ağacı talaşı eklenince, maksimum dayanımda %37,80'lik bir azalma gözlenmektedir. 90PLA10KAT biyokompozitindeki katkıyı referans kabul edersek Perlit katkısının artması Young modülünün artmasına neden olmuştur. 92_5PLA2_5İGP5KAT ve 92_5PLA5İGP2_5KAT katkılarında maksimum

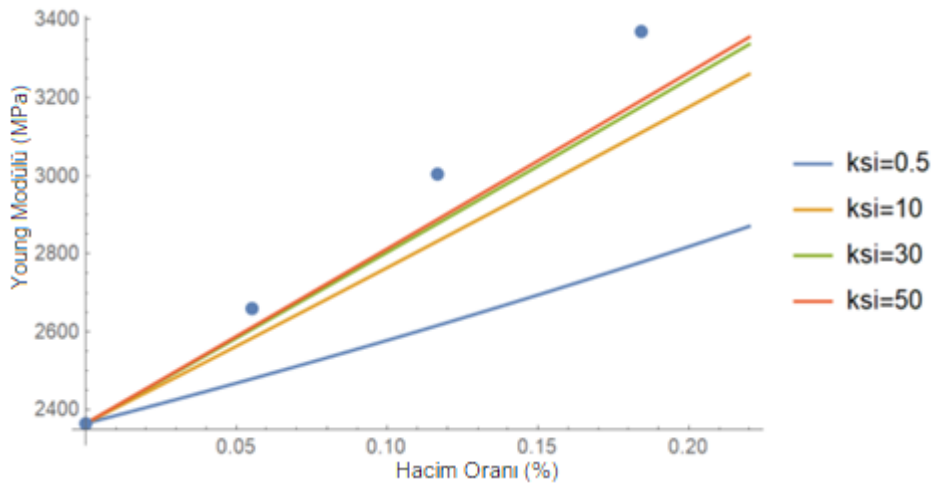
gerilim artmasında oldukça hafif bir ikili etki olabileceği düşünülmektedir. Bunun değerinin $(49,5-43,3)/43,3=\%14,31$ olduğu belirlenmiştir.

3.4 İnce Genleşmiş Tip 2 Perlit + PLA Young Modülünün Modellenmesi

Güçlendirici küresel partikülleri referans alan modeller olan Halpin Tsai, S Kombine Kuralı, Chantler-Hu ve Boyd, Guth ve Gold denklemlerinde; dolgu maddesinin Young modülü öngörülme ve E_k hesaplanmaya çalışılmıştır. Fakat güçlendirici küresel partikülleri referans alan modeller ile pulsu tip2 perlitler için gerçekçi değerler elde edilememiştir, bununla ilgili kaynak kod Ek B.1’de verilmiştir. Bununla birlikte küresel partikül kabullü yaklaşımlardan Halpin Kardos denkleminde, Ksi parametresinin radikal değişimlerine rağmen modelin tahmin yeteneği ciddi oranda artmamaktadır. Bu durum Şekil 3.22’de görülmektedir

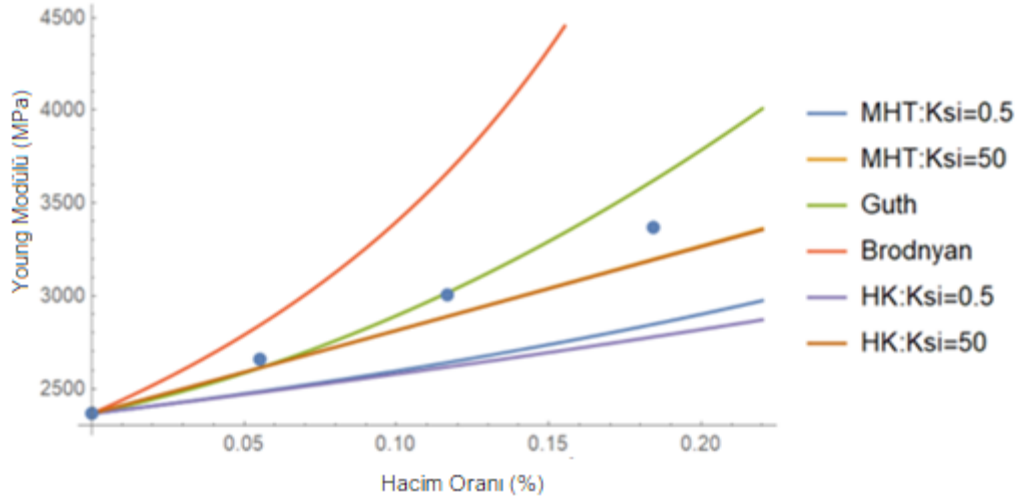
$$E_k = \frac{E_m(1 + \xi\eta Vf)}{1 - \eta Vf} \quad (1.17)$$

$$\eta = \frac{E_g/E_m - 1}{E_g/E_m + \xi} \quad (1.18)$$



Şekil 3.22: Halpin Kardos denklemi için kompozit malzemenin Young modülü & güçlendirici malzemenin hacim kütle oranı grafiği

Bu bağlamda PLA+Perlit yapısının küresel olmadığı durumlar, matematiksel olarak karakterize edilmiş olmaktadır. Buradan hareketle ikinci adım olarak küresel olmayan partikül tabanlı modeller çalışılıp tahmin kabiliyetleri değerlendirilmiştir. Guth, Değiştirilmiş Halpin Tsai, Brodnyan, Halpin-Kardos modellerinin tahmin sonuçları ve deneysel veri ile karşılaştırma yapılmıştır. En iyi sonuç Guth modelinde alınmıştır.



Şekil 3.23: Değiştirilmiş Halpin Tsai, Guth, Brodnyan, Halpin Kardos denklemleri için kompozit malzemelerin Young modülü-güçlendirici malzemenin hacim kütle oranı grafiği

Perlitlerin yeni oluşturduğumuz kompozit malzeme için geliştirilen değiştirilmiş Guth modelinde deneysel veriler ile tam çakışma olmaktadır. Ek B.2'deki kaynak kod sayesinde tezimizde kullandığımız ince genleşmiş perlitler ve PLA için aşağıdaki katsayılar bulunmuştur.

Standart Guth:

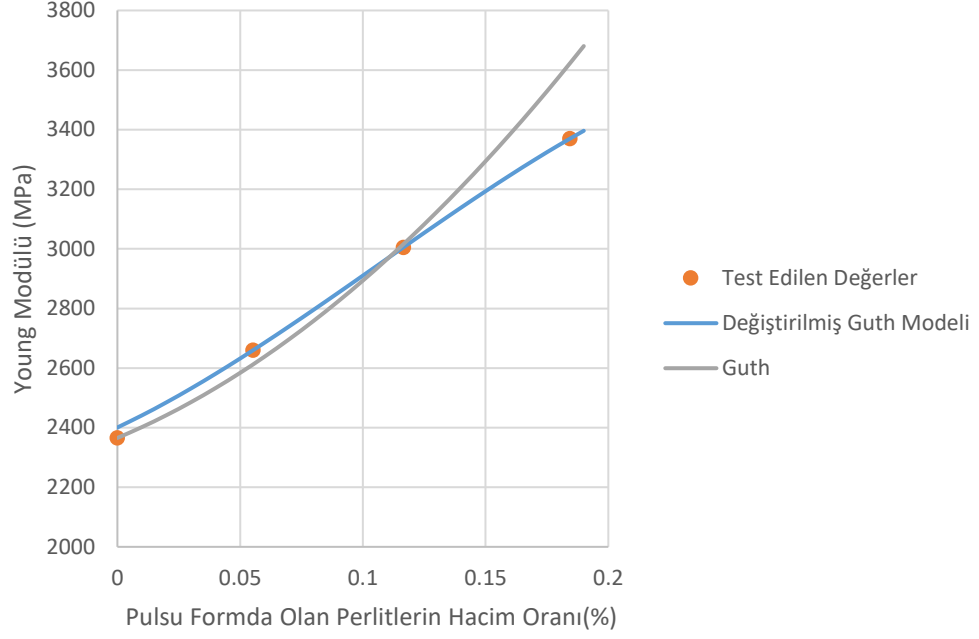
$$E_c = E_m \cdot (1 + 0.67 \text{ Alpha} (V_f + b) + 1.62 (\text{Alpha} (V_f + b))^2$$

$$\{b \rightarrow 0\}$$

Değiştirilmiş Guth Modeli:

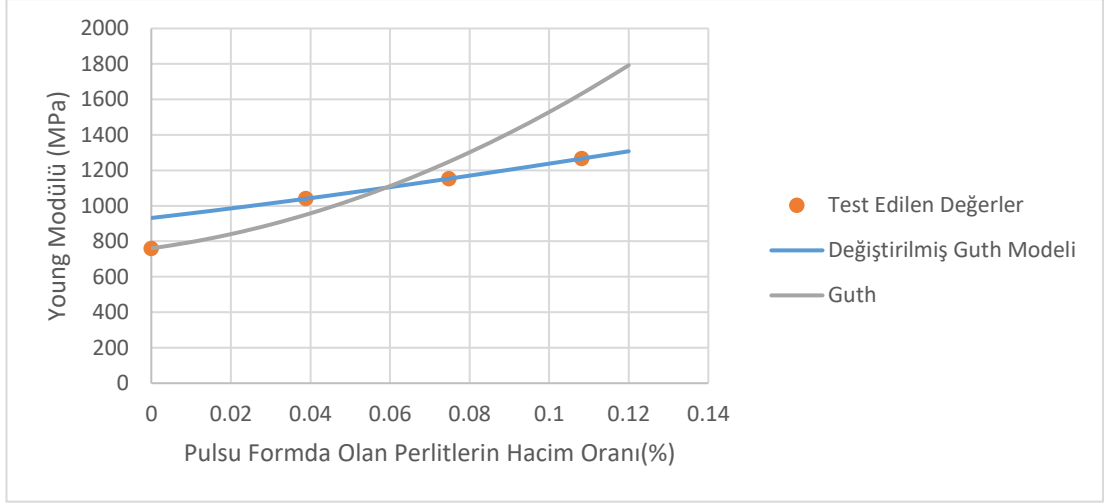
$$E_c = E_m \cdot (1 + 0.67 \text{ Alpha} (V_f + b) + 1.62 (\text{Alpha} (V_f + b))^2 + m (\text{Alpha} (V_f + b))^3$$

$$\{\text{Alpha} \rightarrow 2.23438, b \rightarrow 0.00945187, m \rightarrow -2.08516\}$$



Şekil 3.24: PLA+Perlit test edilen deneysel değerler, değiştirilmiş Guth modeli, Guth modeli, kompozit malzeme Young modülü-pulsu formda olan perlitlerin hacim oranları grafikleri

Yeni oluşturduğumuz kompozit malzeme için geliştirilen değiştirilmiş Guth modelinde %10 ve %30 arasındaki deneysel verilerde tam çakışma olmaktadır. Bu bağlamda tez kapsamında literatüre yeni olarak kazandırılan özgün olan kapsam: Mathematica programı yardımıyla tamamen yeni bir hesaplama yönteminin, yani değiştirilmiş Guth modelinde katsayı bulma şeklinin bulunmuş olmasıdır. Ek B.2’de kullanılan yöntem daha sonrasında [85] makalesinde EkB.3’de değerlendirilmiştir ve de yine aynı başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Farklı katsayılarla değiştirilmiş Guth hesaplama yöntemi bulunmuştur. Sonuç olarak bulunan hesaplama metodunda yüksek yoğunluklu polietilen ve ağırlıkça %10, 20, 30 oranlarında perlit karıştırılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken polimer ve perlit ölçümlerinde Young modülü standart sapma değerlerinin çok yüksek aralıkta olmasıdır. Bahsedilen önemli faktörleri göz önünde tutmak gerekirse, yapılan Young modülü ölçümünün standart sapması aralığında ölçümde teoriye uygun olabilecek değerler seçilmiştir. Çünkü hem PLA+perlit, hem de HDPE+perlit makalesinde polimer matrikse katılan perlit oranı arttıkça kompozitin Young modülünün değerinin artması prensibi geçerlidir.



Şekil 3.25: HDPE+Perlit test edilen deneysel değerler, değiştirilmiş Guth modeli, Guth modeli, kompozit malzeme Young modülü – pulsu formda olan perlitlerin hacim oranları grafikleri

[85] makalesinde görüldüğü gibi HDPE+perlit numunelerine özgü bulunan katsayılar aşağıdaki gibidir.

{Alpha -> 2.23438, b -> 0.00945187, m -> -2.08516}

Bölüm 4

Sonuç

Şu an itibarıyla Türkiye’de değerli olan “Doğal Zeolit, Bor Mineralleri, Kil Mineralleri (Vermikülit, Montmorillonit, Halloysit, Sepiyolit) ve Perlit” madenleri bulunmaktadır. Bunlar şu ana kadar yeterli derecede incelenmediği görülmektedir. Tezin yapıldığı sırada 2021 yılında yapılan Bitlis Eren Üniversite’indeki sempozyumda görüldüğü kadarıyla Türkiye maden sanayisinde ilgili katma değer sağlanamaması nedeniyle perlit ve ponza taşı üzerine üretici tarafından araştırma ve geliştirme isteği bulunmaktadır. Ayrıca perlit madeni üzerine yapılan araştırmalarında MTA verilerine göre her ne kadar 6 milyar ton’dan fazla perlit madeninin Türkiye’de olduğu görülse de bunlardan sadece ticari olarak makul olan yataklar işletilmektedir. Burada nakliye maliyetleri önem kazanmakta olup Perlit madenlerinin limanlara yakınlığı önemlidir. Ülkemiz için bu kadar potansiyeli olan perlit madeni için bir bilgi ağacı oluşturulmamıştır. Yurt dışındaki kaynaklar referans alınmaktadır. Bu açıdan tezin ilk aşamasında İzmir bölgesinden çıkan perlitin karakterizasyonu üzerine çalışılmıştır ve karakterizasyon sonuçları dünyadaki her kullanıcının ücretsiz olarak erişebileceği açık erişimli bir dergide yayınlanmıştır. Burada amaç yerli bir know-how yaratmaktır.

Tezin ikinci aşamasında doktora tezinin özgünlük oluşturması ve yeni %100 geri dönüşüme uygun biyokompozit hammaddeler üretilmesi açısından perlit hammadde ile %100 biyobozunur biyopolimer olan PLA çift vidalı ekstrüderde karıştırılmıştır. Çalışma sırasında test edilen perlit türü ilk aşamada incelediğimiz yumuşak PLA’dır. Ekstrüderin doğası gereği içine giren partiküller kırılmaktadır. Bunun yanında kullandığımız perlitlere özel 15 mikron boyutunda iki boyutlu perlit tozlarının biyokompozitlerden çekilen SEM görüntülerinden incelenebileceği görülmüştür. 15 mikron boyutundaki perlit pulları (bu çalışmamızda tip 2 perlit olarak belirttiğimiz) normal olarak endüstriyel kullanımda istenmeyen atık formda bir perlitir. Ve de

yapılan çalışmada bu atık formda olan genişmiş pulsu perlitin PLA ile karıştırılarak yeniden değerlendirildiği belirtilebilir. Çalışmamız mikro ölçekte benzer biyokompozitlerin üretilmesi açısından dünyadaki yapılan en son yayınlardan biridir. Her ne kadar tez çalışması ile ilgili araştırmalara 2019'da başlansa da, 2020'den sonra yurt dışında PLA ve nanoperlitler ile yayın yapılmıştır. Yurt dışı yayınlarda; kullanım alanları hakkında net olarak belirtilmemiş noktalar vardır. Yapılan tez kapsamındaki biyokompozitlerin otomotiv ve züccaciye sektörlerinde kullanılması hedeflenmiştir. Tez başlangıcında yapılan araştırmalarda perlit hammaddesinin petrol kökenli hammaddeler ile dünyada çok az sayıda akademik yayın olduğu görülmüştür. Burada daha önceki alınan patentlerden incelendiği kadarıyla Ford firmasının çalışmasında, perlitin kullanıldığı akustik izolasyon malzemesi olarak yeni bir yaklaşım ile karşılaşılmıştır.

PLA ve perlit erime-karıştırma metoduyla ekstüderde üretilen hammadde özelliklerini inceledikten sonra ürünleştirme aşamasında "PLA + Kavak Ağacı Talaşı + İnce Genişmiş Pulsu Formdaki Toz Halindeki Perlit biyokompozitleri üretilir mi?" sorusuna yanıt aranmıştır. İlk önce PLA'nın %80 civarında olduğu diğer güçlendirici hammaddelerin daha az oranlarında biyokompozitler oluşturulmaya çalışılmıştır fakat sadece belirtilen oranlar elde edilebilmiştir. Bunun yanında ağaç talaşı katkılı polimer kompozitleri üretmek, yapılan literatür incelemesine göre zor bir süreçtir. Burada amaç başlangıç bir çalışma yapmaktır ve de bazı sonuçlara ulaşılmıştır. Örneğin reoloji testlerine göre partiküllerin topaklaşabileceği düşünülmektedir. Bunun da proses esnasında yani ekstrüderde üretim esnasında zorluğa başka bir deyişle topaklaşma etkilerine yol açabileceği düşünülmektedir. Burada belki kimyasal ajana ihtiyaç duyulabileceği düşünülmektedir.

Biyokompozitin mekanik özellikleri incelenmiştir. Biyokompozite katılan pulsu formdaki perlit katılması esnasında, biyokompozitin Young modülünde artma, maksimum gerilmede düşme gözlemlenmiştir. Talaşlı imalata yatkınlık özelliği olumlu bir özellik olarak incelenmiştir. Çünkü örneğin otomotiv endüstrisinde büyük iç giydirmeye parçalarında kalıp değiştirmek ya da kalıbın içerisinde lokma değiştirmek yüksek maliyetli ve de zaman isteyen bir işlemdir. Bunun yerine robot-cnc'ler tarafından polimer parça işlenebilir. Bu da oluşturduğumuz polimer biyokompozitin olumlu yanlarından birini göstermektedir. Kullandığımız genişmiş pulsu formdaki

perlitin biyopolimerlerde camsı katkı maddesi yerine geçebilecek yeni bir katkı maddesi olabileceği düşünülmektedir. Bu açıdan araştırma esnasında literatüre göre yenilikçi bir çalışma yapıldığı düşünülmektedir. Son olarak hammaddenin mekanik ürünleştirme özelliklerini öngörebilmek için, genişmiş atık perlitten oluşan biyokompozitin Young modülü tahmin edilmek istenmiştir. Bunun için 8 adet mikromekanik model denenmiş, sonuçta Guth modelinde en yakın sonuçlar elde edilmiştir. Guth modeli, geniştirilmiş perlit pulları/zarları için değiştirilerek, yeni bir model geliştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] W. D. Callister ve D. G. Rethwisch, “Fundamentals of materials science and engineering : an integrated approach”, s. 91.
- [2] H. C. Vacher, “Oxygen, nitrogen, and hydrogen as constituents in metals”, *Journal of Chemical Education*, c. 9, sayı 1, ss. 47–54, 1932, doi: 10.1021/ed009p47.
- [3] T. Ayode Otitoju, P. Ugochukwu Okoye, G. Chen, Y. Li, M. Onyeka Okoye, ve S. Li, “Advanced ceramic components: Materials, fabrication, and applications”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, c. 85, ss. 34–65, 2020, doi: 10.1016/j.jiec.2020.02.002.
- [4] H. J. Conrad, W. J. Seong, ve I. J. Pesun, “Current ceramic materials and systems with clinical recommendations: A systematic review”, *Journal of Prosthetic Dentistry*, c. 98, sayı 5, ss. 389–404, 2007, doi: 10.1016/S0022-3913(07)60124-3.
- [5] R. Rakshit ve A. K. Das, “A review on cutting of industrial ceramic materials”, *Precision Engineering*, c. 59, sayı Nisan, ss. 90–109, 2019, doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.05.009.
- [6] J. R. Kelly ve P. Benetti, “Ceramic materials in dentistry: Historical evolution and current practice”, *Australian Dental Journal*, c. 56, sayı SUPPL. 1, ss. 84–96, 2011, doi: 10.1111/j.1834-7819.2010.01299.x.
- [7] M. Belmonte, “Advanced ceramic materials for high temperature applications”, *Advanced Engineering Materials*, c. 8, sayı 8, ss. 693–703, 2006, doi: 10.1002/adem.200500269.
- [8] P. A. Fowler, J. M. Hughes, ve R. M. Elias, “Biocomposites: Technology, environmental credentials and market forces”, *Journal of the Science of Food*

- and Agriculture*, c. 86, sayı 12. ss. 1781–1789, Eyl. 12, 2006, doi: 10.1002/jsfa.2558.
- [9] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, ve A. Elharfi, “Polymer composite materials: A comprehensive review”, *Composite Structures*, c. 262, sayı Kasım 2020, ss. 0–3, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [10] A. Mortensen ve J. Llorca, “Metal matrix composites”, *Annual Review of Materials Research*, c. 40, ss. 243–270, 2010, doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104511.
- [11] Z. Djordjevi, O. Gavrilovi, ve S. Savi, “Biocomposites – Ecologically”, *Ist International Conference on Quality of Life, June 2016*, sayı Haziran, ss. 267–270, 2016.
- [12] S. S. Morye ve R. P. Wool, “Mechanical properties of glass/flax hybrid composites based on a novel modified soybean oil matrix material”, *Polymer Composites*, c. 26, sayı 4, ss. 407–416, Ağu. 2005, doi: 10.1002/pc.20099.
- [13] G. Satlow, B. Wulfhorst, ve S. Zaremba, “Faserstoff-Tabelle: Flachs sowie andere Bast- und Hartfasern”, *Chemical fibers international : CFI*, c. 44, ss. 765–785, 1994.
- [14] N. Teramoto ve M. Shibata, “Trehalose-based thermosetting resins. I. Synthesis and thermal properties of trehalose vinylbenzyl ether”, *Journal of Applied Polymer Science*, c. 91, sayı 1, ss. 46–51, Oca. 2004, doi: 10.1002/app.13167.
- [15] E. E. Tanase, M. Rapa, ve O. Popa, “BIOPOLYMERS BASED ON RENEWABLE RESOURCES - A REVIEW”, *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*, c. 18, ss. 188–195, 2014.
- [16] T. Mukherjee ve N. Kao, “PLA Based Biopolymer Reinforced with Natural Fibre: A Review”, *Journal of Polymers and the Environment*, c. 19, sayı 3, ss. 714–725, 2011, doi: 10.1007/s10924-011-0320-6.
- [17] Y. Cheng, S. Deng, P. Chen, ve R. Ruan, “Polylactic acid (PLA) synthesis and

- modifications: A review”, *Frontiers of Chemistry in China*, c. 4, sayı 3, ss. 259–264, 2009, doi: 10.1007/s11458-009-0092-x.
- [18] J. G. Rosenboom, R. Langer, ve G. Traverso, “Bioplastics for a circular economy”, *Nature Reviews Materials*, c. 7, sayı 2, ss. 117–137, 2022, doi: 10.1038/s41578-021-00407-8.
- [19] D. L. Kaplan, “Biopolymers from Renewable Resources”, içinde *Biopolymers from Renewable Resources*, Springer Berlin Heidelberg, 1998, ss. 367–411.
- [20] D. Garlotta, “A Literature Review of Poly(Lactic Acid)”, *Journal of Polymers and the Environment*, c. 9, sayı 2, ss. 63–84, 2019.
- [21] T. Biela ve M. Studies, *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. ss. 1–10, 2020, doi: 10.1007/978-3-642-36199-9.
- [22] S. J. Chung *vd.*, “Highly efficient light-emitting diodes based on an organic-soluble poly(p-phenylenevinylene) derivative carrying the electron-transporting pbd moiety”, *Advanced Materials*, c. 10, sayı 14, ss. 1112–1116, 1998.
- [23] H. Neugebauer, C. Brabec, J. C. Hummelen, ve N. S. Sariciftci, “Stability and photodegradation mechanisms of conjugated polymer/fullerene plastic solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 61, sayı 1, ss. 35–42, Şub. 2000, doi: 10.1016/S0927-0248(99)00094-X.
- [24] H. Tian ve H. Tagaya, “Preparation, characterization and mechanical properties of the polylactide/perlite and the polylactide/montmorillonite composites”, *Journal of Materials Science*, c. 42, sayı 9, ss. 3244–3250, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0230-5.
- [25] Chitec, “Product Data Sheet Luminy L130”, *Spectrum*, ss. 1–2, 2006.
- [26] www.mta.gov.tr, “MTA Genel Müdürlüğü”, 2022. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/> (erişim May. 27, 2021).
- [27] F. McGonigle, *Industrial Minerals and Their Uses*. Noyes Publications, 1996.

- [28] L. D. Maxim, R. Niebo, ve E. E. McConnell, “Perlite toxicology and epidemiology - A review”, *Inhalation Toxicology*, c. 26, sayı 5. Informa Healthcare, ss. 259–270, 2014, doi: 10.3109/08958378.2014.881940.
- [29] J. A. Aguilar-Garib, V. García-Onofre, U. Ortiz, ve Z. Valdez-Nava, “Microwave energy for expanding perlite ore”, *Journal of Applied Research and Technology*, c. 11, sayı 6, ss. 823–830, Ara. 2013, doi: 10.1016/S1665-6423(13)71588-8.
- [30] K. Barker, J.M. Santini, “Perlite”, içinde *Industrial Minerals and Rocks - Commodities, Markets, and Uses*, and S. T. K. J.E. Kogel, N.C. Trivedi, J.M. Barker, Ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2006, ss. 685–702.
- [31] F. Chen *vd.*, “Fly ash based lightweight wall materials incorporating expanded perlite/SiO₂ aerogel composite: Towards low thermal conductivity”, *Construction and Building Materials*, c. 249, s. 118728, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118728.
- [32] S. Yilmazer ve M. B. Ozdeniz, “The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates”, *Building and Environment*, c. 40, sayı 3, ss. 311–318, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.07.004.
- [33] A. P. Papadopoulos, A. Bar-Tal, A. Silber, U. K. Saha, ve M. Raviv, *Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes*, sayı Aralık. 2008.
- [34] H. A. Haery, “Elastic And Mechanical Properties Of Expanded Perlite And Perlite/Epoxy Foams”. 2017.
- [35] M. Jamei, H. Guiras, Y. Chtourou, A. Kallel, E. Romero, ve I. Georgopoulos, “Water retention properties of perlite as a material with crushable soft particles”, *Engineering Geology*, c. 122, sayı 3–4, ss. 261–271, 2011, doi: 10.1016/j.enggeo.2011.06.005.
- [36] H. Bulgurcu, “Genleşmiş Perlit İçeren Çimento ve Alçı Bağlayıcılı Yapı Malzemelerin Isıl ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, 2009.

- [37] Doğusan Boru Sanayi ve Ticaret A.Ş., “Perlit”, *Info Catalog*, 2021. <https://www.dogusanas.com.tr/perlit.pdf>.
- [38] www.kaleperlit.com.tr, “Kale Perlite | <http://www.kaleperlit.com.tr/>”, 2022. <http://www.kaleperlit.com.tr/> (erişim Oca. 31, 2022).
- [39] L. A. Carlsson, J. W. Gillespie, C. H. Zweben, ve University of Delaware. Center for Composite Materials., *Delaware Composites Design Encyclopedia*. Technomic Pub. Co, 2017.
- [40] P. Lingois ve L. Berglund, “Modeling elastic properties and volume change in dental composites”, *Journal of Materials Science*, c. 37, sayı 21, ss. 4573–4579, 2002, doi: 10.1023/A:1020688013593.
- [41] M. Ö. Seydibeyoğlu, A. K. Mohanty, ve M. Misra, *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. 2017.
- [42] R. Hill, “Theory of mechanical properties of fibre-strengthened materials: I. elastic behaviour”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, c. 13, sayı 4, ss. 189–198, 1965, doi: 10.1016/0022-5096(65)90008-6.
- [43] P. M. Chantler, X. Hu, ve N. M. Boyd, “An extension of a phenomenological model for dental composites”, *Dental Materials*, c. 15, sayı 2, ss. 144–149, 1999, doi: 10.1016/S0109-5641(99)00024-X.
- [44] M. Braem, V. E. Van Doren, P. Lambrechts, ve G. Vanherle, “Determination of Young’s modulus of dental composites: A phenomenological model”, *Journal of Materials Science*, c. 22, sayı 6, ss. 2037–2042, 1987, doi: 10.1007/BF01132936.
- [45] J. C. Halpin ve J. L. Kardos, “The Halpin-Tsai equations: A review”, *Polymer Engineering & Science*, c. 16, sayı 5, ss. 344–352, 1976, doi: 10.1002/pen.760160512.
- [46] E. Guth, “Theory of Filler Reinforcement”. 1945.
- [47] Y. P. Wu, Q. X. Jia, D. S. Yu, ve L. Q. Zhang, “Modeling Young’s modulus of rubber-clay nanocomposites using composite theories”, *Polymer Testing*, c. 23,

sayı 8, ss. 903–909, 2004, doi: 10.1016/j.polymertesting.2004.05.004.

- [48] J. Lunt, “Large-scale production, properties and commercial applications of poly lactic acid polymers”, *Polymer Degradation and Stability*, c. 59, sayı 1–3, ss. 145–152, 1998, doi: 10.1016/s0141-3910(97)00148-1.
- [49] A. G. de Oliveira, J. C. Jandorno, E. B. D. da Rocha, A. M. F. de Sousa, ve A. L. N. da Silva, “Evaluation of expanded perlite behavior in PS/Perlite composites”, *Applied Clay Science*, c. 181, sayı Temmuz, s. 105223, 2019, doi: 10.1016/j.clay.2019.105223.
- [50] M. Ö. Uçar, “Polianilin/perlit kompozitlerinin sentezi ve karakterizasyonu”, Süleyman Demirel Üniversitesi, 2019.
- [51] Ö. Eğri, “Use of micropelite in direct polymerization of lactic acid”, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, c. 24, sayı 2, ss. 142–149, 2019, doi: 10.1080/1023666X.2018.1562412.
- [52] S. Toghi Aval vd., “Nanoperlite effect on thermal, rheological, surface and cellular properties of poly lactic acid/nanoperlite nanocomposites for multipurpose applications”, *Polymer Testing*, c. 91, sayı May, s. 106779, 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106779.
- [53] D. Gül, “Characterization and Expansion Behaviour of Perlite”, sayı July, ss. 1–94, 2016.
- [54] F. R. Ca ve H. Street, “WO 2008/053236 A1”, 2008.
- [55] M. A. M. Paul Kenneth Dellock, Stuart C. Salter, Richard Gall, David Brin Glickman, “Extrusion Grade Perlite Reinforced Polypropylene Polymer”. 2020.
- [56] SEM Plastik, “Karbon Ayak İzi Konusunda Genel Bilgiler | Sem Plastik”, 2018. <https://www.semplastik.com.tr/cevre-ve-biz-detay/52/karbon-ayak-izi-konusunda-genel-bilgiler> (erişim May. 27, 2021).
- [57] “Twin Screw extruder 20 mm - Labtech Engineering”. <https://www.labtechengineering.com/product/lte-20-and-ltem-20/> (erişim May. 22, 2022).

- [58] W. F. F. Ilahi ve D. Ahmad, “A study on the physical and hydraulic characteristics of cocopeat perlite mixture as a growing media in containerized plant production”, *Sains Malaysiana*, c. 46, sayı 6, ss. 975–980, 2017, doi: 10.17576/jsm-2017-4606-17.
- [59] S. Kabra, S. Katara, ve A. Rani, “Characterization and Study of Turkish Perlite”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, c. 2, sayı 9, ss. 4319–4326, 2013.
- [60] M. Nasrollahzadeh, S. M. Sajadi, A. Rostami-Vartooni, M. Bagherzadeh, ve R. Safari, “Immobilization of copper nanoparticles on perlite: Green synthesis, characterization and catalytic activity on aqueous reduction of 4-nitrophenol”, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, c. 400, ss. 22–30, 2015, doi: 10.1016/j.molcata.2015.01.032.
- [61] P. M. Angelopoulos, D. I. Gerogiorgis, ve I. Paspaliaris, “Model-based sensitivity analysis and experimental investigation of perlite grain expansion in a vertical electrical furnace”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, c. 52, sayı 50, ss. 17953–17975, 2013, doi: 10.1021/ie401144r.
- [62] P. M. Angelopoulos, D. I. Gerogiorgis, ve I. Paspaliaris, “Mathematical modeling and process simulation of perlite grain expansion in a vertical electrical furnace”, *Applied Mathematical Modelling*, c. 38, sayı 5–6, ss. 1799–1822, 2014, doi: 10.1016/j.apm.2013.09.019.
- [63] A. A. Reka *vd.*, “Chemical, mineralogical and structural features of native and expanded perlite from Macedonia”, *Geologia Croatica*, c. 72, sayı 3, ss. 215–221, 2019, doi: 10.4154/gc.2019.18.
- [64] D. Adi Darmawan, A. Wahyudi, H. Eric Mamby, ve I. Suherman, “Characterization of perlite and expanded perlite from West Sumatera, Indonesia”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, c. 882, sayı 1, s. 012010, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/882/1/012010.
- [65] M. Roulia, K. Chassapis, J. A. Kapoutsis, E. I. Kamitsos, ve T. Savvidis, “Influence of thermal treatment on the water release and the glassy structure of

- perlite”, *Journal of Materials Science*, c. 41, sayı 18, ss. 5870–5881, 2006, doi: 10.1007/s10853-006-0325-z.
- [66] A. Rostami-Vartooni, M. Nasrollahzadeh, ve M. Alizadeh, “Green synthesis of perlite supported silver nanoparticles using Hamamelis virginiana leaf extract and investigation of its catalytic activity for the reduction of 4-nitrophenol and Congo red”, *Journal of Alloys and Compounds*, c. 680, ss. 309–314, 2016, doi: 10.1016/j.jallcom.2016.04.008.
- [67] H. Xu, W. Jia, S. Ren, ve J. Wang, “Novel and recyclable demulsifier of expanded perlite grafted by magnetic nanoparticles for oil separation from emulsified oil wastewaters”, *Chemical Engineering Journal*, c. 337, sayı Aralık 2017, ss. 10–18, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2017.12.084.
- [68] H. Saufi, M. El Alouani, S. Alehyen, M. El Achouri, J. Aride, ve M. Taibi, “Photocatalytic Degradation of Methylene Blue from Aqueous Medium onto Perlite-Based Geopolymer”, *International Journal of Chemical Engineering*, c. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/9498349.
- [69] Y. Bian, K. Wang, J. Wang, Y. Yu, M. Liu, ve Y. Lv, “Preparation and properties of capric acid: Stearic acid/hydrophobic expanded perlite-aerogel composite phase change materials”, *Renewable Energy*, c. 179, ss. 1027–1035, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.07.125.
- [70] I. Palomar ve G. Barluenga, “A multiscale model for pervious lime-cement mortar with perlite and cellulose fibers”, *Construction and Building Materials*, c. 160, ss. 136–144, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.032.
- [71] S. Kaufhold *vd.*, “Porosity and distribution of water in perlite from the island of Milos, Greece”, *Journal of the Korean Physical Society*, c. 3, sayı 1, ss. 1–10, 2014, doi: 10.1186/2193-1801-3-598.
- [72] V. Pavlík ve J. Bisaha, “Lightweight mortars based on expanded perlite”, *Key Engineering Materials*, c. 776 KEM, ss. 104–117, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.776.104.
- [73] M. Vyšvařil *vd.*, “Non-hydrophobized perlite renders for repair and thermal

- insulation purposes: Influence of different binders on their properties and durability”, *Construction and Building Materials*, c. 263, ss. 1–14, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120617.
- [74] D. Bastani, A. A. Safekordi, A. Alihosseini, ve V. Taghikhani, “Study of oil sorption by expanded perlite at 298.15 K”, *Separation and Purification Technology*, c. 52, sayı 2, ss. 295–300, 2006, doi: 10.1016/j.seppur.2006.05.004.
- [75] M. Torab-Mostaedi, H. Ghassabzadeh, M. Ghannadi-Maragheh, S. J. Ahmadi, ve H. Taheri, “Removal of cadmium and nickel from aqueous solution using expanded perlite”, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, c. 27, sayı 2, ss. 299–308, 2010, doi: 10.1590/S0104-66322010000200008.
- [76] K. Srivastava, N. Shringi, V. Devra, ve A. Rani, “Pure Silica Extraction from Perlite: Its Characterization and Affecting factors”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, c. 2, sayı Temmuz, 2013, [Çevrimiçi]. Available at: www.ijirset.com.
- [77] X. Wang vd., “Synthesis, structural characterization and evaluation of floating B-N codoped TiO₂/expanded perlite composites with enhanced visible light photoactivity”, *Applied Surface Science*, c. 349, ss. 264–271, 2015, doi: 10.1016/j.apsusc.2015.05.002.
- [78] M. Cabuk, T. A. Yesil, M. Yavuz, ve H. I. Unal, “Colloidal and viscoelastic properties of expanded perlite dispersions”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, c. 29, sayı 1, ss. 32–40, 2018, doi: 10.1177/1045389X17698248.
- [79] C. Bilgiç ve Ş. Bilgiç, “Application of Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy to Analysis of Clays”, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, sayı 20 19, ss. 37–46, 2019, doi: 10.17100/nevbiltek.632788.
- [80] S. Edebali, “Alternative Composite Nanosorbents Based on Turkish Perlite for the Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution”, *Journal of Nanomaterials*, c. 2015, ss. 18–20, 2015, doi: 10.1155/2015/697026.

- [81] F. Carrasco, P. Pagès, J. Gámez-Pérez, O. O. Santana, ve M. L. MasPOCH, “Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties”, *Polymer Degradation and Stability*, c. 95, sayı 2, ss. 116–125, 2010, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.045.
- [82] N. Ljungberg ve B. Wesslén, “The effects of plasticizers on the dynamic mechanical and thermal properties of poly(lactic acid)”, *Journal of Applied Polymer Science*, c. 86, sayı 5, ss. 1227–1234, 2002, doi: 10.1002/app.11077.
- [83] N. Ljungberg ve B. Wesslén, “Preparation and properties of plasticized poly(lactic acid) films”, *Biomacromolecules*, c. 6, sayı 3, ss. 1789–1796, 2005, doi: 10.1021/bm050098f.
- [84] O. Çoban ve T. Yılmaz, “Volcanic particle materials in polymer composites: a review”, *Journal of Materials Science*, c. 57, sayı 36, ss. 16989–17020, 2022, doi: 10.1007/s10853-022-07664-0.
- [85] M. Atagür vd., “Mechanical, thermal, and viscoelastic investigations on expanded perlite-filled high-density polyethylene composite”, *Journal of Elastomers and Plastics*, c. 50, sayı 8, ss. 747–761, 2018, doi: 10.1177/0095244318765045.
- [86] O. Çoban, M. Ö. Bora, K. Togayhan, ve G. Özkoç, “Mechanical and Thermal Properties of Volcanic Particle Filled PLA/PBAT Composites”, *Polymer Composites*, ss. 1–12, 2017, doi: 10.1002/pc.
- [87] L. Qin vd., “Mechanical and thermal properties of poly(lactic acid) composites with rice straw fiber modified by poly(butyl acrylate)”, *Chemical Engineering Journal*, c. 166, sayı 2, ss. 772–778, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2010.11.039.
- [88] M. Raji vd., “Utilization of volcanic amorphous aluminosilicate rocks (perlite) as alternative materials in lightweight composites”, *Composites Part B: Engineering*, c. 165, sayı July 2018, ss. 47–54, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.098.
- [89] M. Liu, W. Li, J. Rong, ve C. Zhou, “Novel polymer nanocomposite hydrogel with natural clay nanotubes”, *Colloid and Polymer Science*, c. 290, sayı 10, ss.

895–905, 2012, doi: 10.1007/s00396-012-2588-z.

- [90] E. Akın, D. S. Mustafafov, E. Alyamaç, ve S. M. Özgür, “Elektro Çekim Yöntemi ile Halloysit Katkılı Biyo-Bazlı Termoplastik Poliüretan Nanolif Üretimi ve Karakterizasyonu”, *Tekstil ve Mühendis*, c. 27, sayı 120, ss. 218–229, 2020, doi: <https://doi.org/10.7216/1300759920202712001>.
- [91] S. Demiroğlu Mustafafov, A. K. Mohanty, M. Misra, ve M. Ö. Seydibeyoğlu, “Fabrication of conductive Lignin/PAN carbon nanofiber with enhanced graphene for the modified electrode”, *Carbon*, c. 147, ss. 262–275, 2019, doi: 10.1016/j.carbon.2019.02.058.
- [92] R. Sahraeian, M. Esfandeh, ve S. A. Hashemi, “Rheological, thermal and dynamic mechanical studies of the LDPE/ perlite nanocomposites”, *Polymers and Polymer Composites*, c. 21, sayı 4, ss. 243–249, 2013, doi: 10.1177/096739111302100406.
- [93] M. L. Robertson, K. Chang, W. M. Gramlich, ve M. A. Hillmyer, “Toughening of polylactide with polymerized soybean oil”, *Macromolecules*, c. 43, sayı 4, ss. 1807–1814, 2010, doi: 10.1021/ma9022795.
- [94] D. Soliman, “Department of Mechanical and Aerospace Engineering MSc Thesis in Mechanical Engineering Finite element modelling of vehicles and human body models for passive safety”, sayı October, 2020.
- [95] C. J. Ribeiro, J. C. Viana, F. Vilaça, ve J. Azenha, “Development of automotive plastic pillars for preventing occupant injuries by finite element simulations: The role of material properties”, *Materials Science Forum*, c. 587–588, ss. 956–960, 2008, doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.587-588.956.
- [96] O. Akampumuza, P. M. Wambua, A. Ahmed, W. Li, ve X. Qin, “Review of the Applications of Biocomposites in the Automotive Industry”, *Polymers and Polymer Composites*, c. 17, sayı 2, ss. 101–113, 2016, doi: 10.1002/pc.
- [97] G. Koronis, A. Silva, ve M. Fontul, “Green composites: A review of adequate materials for automotive applications”, *Composites Part B: Engineering*, c. 44, sayı 1, ss. 120–127, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.07.004.

Ekler

Ek A

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Konferans Bildirileri

1. Özay AKSOY, Merve MOCAN, Mert YÜCETÜRK, Elif ALYAMAÇ, Levent AYDIN, Bahadır GÜRSOY, Mehmet Özgür SEYDİBEYOĞLU, Perlit Biyokompozitlerinin Üretilmesi ve Karakterizasyonu, 38-42, e-ISBN:978-605-71070-0-8, Uluslararası Ponza ve Perlit Sempozyumu (PuPeS'21), 4-6 Kasım 2021, Bitlis/TÜRKİYE

Makaleler

1. Aksoy O, Alyamac Seydibeyoglu E, Mocan M, Sutcu M, Ozveren-Ucar N, Seydibeyoglu M O. Characterization of perlite powders from Izmir, Türkiye region. Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2022;58(6):155277. doi:10.37190/ppmp/155277.

Projeler

1. 2021-TDR-FEBE-0005 Bilimsel Araştırma Projesi

Ek B

Mathematica Kaynak Kodları

EK B.1

Pulsu Formda olan genleşmiş İnce Genleşmiş Perlitlerin ve Kompozit Malzemelerin Young modülleri hesaplanmaya çalışılırken yazılan Mathematica Kodları ve Sonuçları

(*Tüm deneysel sonuçlar için spherical particulate varsayımıyla sonuçları*)

(*Halpin Tsai Model*)

(*+Ec=2660'İnce-genleşmiş (Tip 2) %10 Ağırlıkça+PLA'*)

Clear["Global`*"]

Em=2365.43;

(*Ec=2660'İnce-genleşmiş (Tip 2) %10 Ağırlıkça+PLA'*)

Vf=0.0553;

ksi=2;

X=(Ef-Em)/(Ef+ksi Em);

Ec=Em*(1+ksi X*Vf)/(1-X 1 Vf)

Out[1]=

Out[6]= (2365.43 (1+(0.1106 (-2365.43+Ef))/(4730.86 +Ef)))/(1-(0.0553 (-2365.43+Ef))/(4730.86 +Ef))

In[11]:= FindRoot[Ec==2660,{Ef,1000}]

In[12]:= {Ef->20678.6477470959 }

{Ef->20678.6477470959` }

(*Halpin Tsai Model*)

(*Ec=3005'İnce-genleşmiş (Tip 2) %20 Ağırlıkça+PLA'*)

Out[1]=

Clear["Global`*"]

Em=2365.43;

(*Ec=3005 'İnce-genleşmiş (Tip 2) %20 Ağırlıkça+PLA'*)

Vf=0.1165;

ksi=2;

$X = \frac{E_f - E_m}{E_f + \text{ksi} E_m}; E_c = E_m \frac{1 + \text{ksi} X V_f}{1 - X V_f}$

Out[6]= $(2365.43 (1 + (0.233 (-2365.43 + E_f)) / (4730.86 + E_f))) / (1 - (0.1165 (-2365.43 + E_f)) / (4730.86 + E_f))$

In[7]:= FindRoot[Ec==3005,{Ef,1000}]

Out[7]= {Ef->19710.9}

(*Halpin Tsai Model*)

(*+Ec=3370'İnce-genleşmiş (Tip 2) %30 Ağırlıkça+PLA'*)

Out[1]=

Clear["Global`*"]

Em=2365.43;

(*Ec=3370 'İnce-genleşmiş (Tip 2) %30 Ağırlıkça+PLA'*)

Vf=0.1844;

ksi=2;

X=(Ef-Em)/(Ef+ksi Em);Ec=Em*(1+ksi X*Vf)/(1-X 1 Vf)

Out[6]= (2365.43 (1+(0.3688 (-2365.43+Ef))/(4730.86 +Ef)))/(1-(0.1844 (-2365.43+Ef))/(4730.86 +Ef))

In[7]:= FindRoot[Ec==3370,{Ef,1000}]

Out[7]= {Ef->16936.8}

(*****)

(*S Kombine Kuralı*)

(*Ec=2660 İnce-genleşmiş (Tip 2) %10 Ağırlıkça+PLA'*)

Clear["Global`*"]

Em=2365.43;

(*Ec=2660 İnce-genleşmiş (Tip 2) %10 Ağırlıkça+PLA'*)

Vf=0.0553;

ksi=2;

Vfmax=Vfmax;(*0.66-1 arasında değilebilir teoriye göre *)

Psi=1+((1-Vf)/Vfmax)*(Vf*Vfmax+(1+Vf) (1-Vfmax));

X=(Ef-Em)/(Ef+ksi Em);Ec==Em*(1+ksi X*Vf)/(1-X Psi Vf)

Out[7]= Ec==(2365.43 (1+(0.1106 (-2365.43+Ef))/(4730.86 +Ef)))/(1-(0.0553 (-2365.43+Ef) (1+(0.9447 (1.0553 (1-Vfmax)+0.0553 Vfmax))/Vfmax)))/(4730.86 +Ef))

```
In[8]:= Vfmax=0.66;FindRoot[2660==(2365.43` (1+(0.1106` (-2365.43`+Ef))/(4730.86` +Ef)))/(1-(0.0553` (-2365.43`+Ef) (1+(0.9447` (1.0553` (1-Vfmax)+0.0553` Vfmax))/Vfmax))/(4730.86` +Ef)), {Ef, 2800}]
```

```
Out[8]= {Ef->12956.2}
```

(*S Kombine Kurali*)

(*+Ec=3005'İnce-genleşmiş (Tip 2) %20 Ağırlıkça+PLA'*)

```
Clear["Global`*"]
```

```
Em=2365.43;
```

(*Ec=3005 'İnce-genleşmiş (Tip 2) %20 Ağırlıkça+PLA'*)

```
Vf=0.1165;
```

```
kxi=2;
```

Vfmax=Vfmax;(*0.66-1 arasında değilebilir teoriye göre *)

```
Psi=1+((1-Vf)/Vfmax)*(Vf*Vfmax+(1+Vf) (1-Vfmax));
```

```
X=(Ef-Em)/(Ef+kxi Em);Ec==Em*(1+kxi X*Vf)/(1-X Psi Vf)
```

```
Out[15]= Ec==(2365.43 (1+(0.233 (-2365.43+Ef))/(4730.86 +Ef)))/(1-(0.1165 (-2365.43+Ef) (1+(0.8835 (1.1165 (1-Vfmax)+0.1165 Vfmax))/Vfmax))/(4730.86 +Ef))
```

```
In[16]:= Vfmax=0.66;FindRoot[3005==(2365.43` (1+(0.233` (-2365.43`+Ef))/(4730.86` +Ef)))/(1-(0.1165` (-2365.43`+Ef) (1+(0.8835` (1.1165` (1-Vfmax)+0.1165` Vfmax))/Vfmax))/(4730.86` +Ef)), {Ef, 2800}]
```

```
Out[16]= {Ef->11908.5}
```

(*S Kombine Kurali*)

(*+Ec=3370'İnce-genleşmiş (Tip 2) %30 Ağırlıkça+PLA'*)

Clear["Global`*"]

Em=2365.43;

(*Ec=3370 'İnce-genleşmiş (Tip 2) %30 Ağırlıkça+PLA'*)

Vf=0.1844;

ksi=2;

Vfmax=Vfmax;(*0.66-1 arasında değilebilir teoriye göre *)

Psi=1+((1-Vf)/Vfmax)*(Vf*Vfmax+(1+Vf) (1-Vfmax));

X=(Ef-Em)/(Ef+ksi Em);Ec==Em*(1+ksi X*Vf)/(1-X Psi Vf)

Out[23]= Ec==(2365.43 (1+(0.3688 (-2365.43+Ef))/(4730.86 +Ef)))/(1-(0.1844 (-2365.43+Ef) (1+(0.8156 (1.1844 (1-Vfmax)+0.1844 Vfmax))/Vfmax))/(4730.86 +Ef))

In[25]:= Vfmax = 0.66; FindRoot[3370 == (2365.43` (1+(0.3688` (-2365.43` +Ef))/(4730.86` +Ef)))/(1-(0.1844` (-2365.43` +Ef) (1+(0.8156` (1.18440000000000000001` (1-Vfmax)+0.1844` Vfmax))/Vfmax))/(4730.86` +Ef)), {Ef, 2800}]

Out[25]= {Ef->10357.9}

(*Chantler*)

(*+Ec=2660 Ince genleşmiş yuzde on pul perlit icin;*)

Clear["Global`*"]

Pvf=0.3;

Pvm=0.3;

Ef=Ef;

Em=2365.43;

(*Ec=2660 Ince genişmiş yuzde on pul perlit icin;*)

Vf=0.0553;

Beta1=(2*((1-Pvf^2)/(1-Pvm^2))^1.7)/(Log[Ef/Em]);

Ec=Em (Ef/Em)^(1-(1-Vf)^Beta1)

Out[8]= 2365.43 0.000422756^(1-0.9447^(2./Log[0.000422756 Ef])) Ef^(1-0.9447^(2./Log[0.000422756 Ef]))

In[9]:= FindRoot[Ec==2660,{Ef,2000}]

Out[9]= {Ef->375.539}

Clear["Global`*"]

Pvf=0.3;

Pvm=0.3;

Ef=Ef;

Em=2365.43;

(*Ec=3005 yuzde yirmi ince pul perlit icin;*)

Vf=0.1165;

Beta1=(2*((1-Pvf^2)/(1-Pvm^2))^1.7)/(Log[Ef/Em]);

Ec=Em (Ef/Em)^(1-(1-Vf)^Beta1)

```
Out[8]= 2365.43 0.000422756^(1-0.8835^(2./Log[0.000422756 Ef])) Ef^(1-0.8835^(2./Log[0.000422756 Ef]))
```

```
In[9]:= Plot[3005-Ec,{Ef,10,5000}]
```

```
(*****)
```

```
(*Guth and Gold*)
```

```
(*Ec=2660'İnce-genleşmiş (Tip 2) %10 Ağırlıkça+PLA'*)
```

```
Clear["Global`*"]
```

```
Em=2365.43;
```

```
(*Ec=2660'İnce-genleşmiş (Tip 2) %10 Ağırlıkça+PLA'*)
```

```
Vf=0.0553;
```

```
Ec=Em (1+2.5 Vf+16.2 Vf^2)
```

```
Out[4]= 2809.64
```

```
Clear["Global`*"]
```

```
Em=2365.43;
```

```
(*Ec=3005'İnce-genleşmiş (Tip 2) %20 Ağırlıkça+PLA'*)
```

```
Vf=0.1165;
```

```
Ec=Em (1+2.5 Vf+16.2 Vf^2)
```


Out[8]= 3574.45

Clear["Global`*"]

Em=2365.43;

(*Ec=3370 İnce-genlesmis (Tip 2) %30 Ağırlıkça+PLA'*)

Vf=0.1844;

Ec=Em (1+2.5 Vf+16.2 Vf^2)

Out[12]= 4758.9

EK B.2

İnce Genleştirilmiş Perlit Pul Formu	Ağırlıkça %10	Ağırlıkça %20	Ağırlıkça %30	α Ortalama
α (uzunluk/genişlik)	2.5152	2.15538	1.87311	2.18123
Em	2365.43	2365.43	2365.43	
Ec	2660	3005	3370	
Vf	0.553	0.1165	0.1844	

PUL FORMUNDA OLAN PERLİT MADENİ KULLANILDIĞI ZAMAN UZUNLUK/GENİŞLİK ORANI 1.87 İLE 2.51 ARASINDA DEĞİŞİYOR.

Örnek Mathematica Kodu

```
Clear["Global`*"]
Em=Matrix'in Sayısal Olarka Young
Modülü;
Vf=Filler'in Volume Fraction'u;
Ec=Em*(1+0.67 Alpha Vf+1.62 (Alpha
Vf)^2)
FindRoot[Ec==Herhangi bir
sayı,{Alpha,Range[20]}]
Alpha=
Ec=
```

PLA+perlit biyokompozitlerinde değiştirilmiş Guth Modeli için yazılan kod:

```
Vf = {0.0, 0.0553, 0.1165, 0.1844};
```

```
ec = {2365.43, 2660, 3005, 3370};
```

```
Em = 2365.43;
```

```
eqs = Table[ec[[i]] == Em*(1 + 0.67 Alpha (Vf[[i]] + b) + 1.62 (Alpha (Vf[[i]] + b))^2 + m
(Alpha (Vf[[i]] + b))^3), {i, 2, Length[ec]}]
```

```
c1 = FindRoot[eqs, {{Alpha, 2}, {b, 0.015}, {m, 2}}]
```

```
{Alpha -> 2.23438, b -> 0.00945187, m -> -2.08516}
```

```
Table[eqs[[i]] /. c1, {i, 1, Length[eqs]}]
```

EK B.3

HDPE+Perlit Kompozitleri için Yazılan Teori

	10%	20%	30%	α Ortalama
Metehan Atagür Makale	10%	20%	30%	
α (uzunluk/genişlik)	9.45078	4.75614	4.12922	6.112
Em (Polietilen)	760	760	760	
Ec	1113	1097	1233	
Vf	0.038854806	0.07480315	0.108159393	
Mm	70	70	70	
Mf	7	14	21	
Density Matrix	0.95	0.95	0.95	
Density Filler	2.35	2.35	2.35	
Volume Filler	2.978723404	5.957446809	8.936170213	
Volume Matriks	73.68421053	73.68421053	73.68421053	
Total Volume	76.66293393	79.64165733	82.62038074	

Vf = {0.0, 0.0388548, 0.07480315, 0.10816};

ec = {760, 1040, 1153, 1266};

Em = 760;

eqs = Table[ec[[i]] == Em*(1 + 0.67 Alpha (Vf[[i]] + b) + 1.62 (Alpha (Vf[[i]] + b))^2 + m (Alpha (Vf[[i]] + b))^3), {i, 2, Length[ec]}]

{1040 == 760 (1 + 0.67 Alpha (0.0388548 + b) + 1.62 Alpha^2 (0.0388548 + b)^2 + Alpha^3 (0.0388548 + b)^3 m),

1153 == 760 (1 + 0.67 Alpha (0.0748032 + b) + 1.62 Alpha^2 (0.0748032 + b)^2 + Alpha^3 (0.0748032 + b)^3 m),

1266 == 760 (1 + 0.67 Alpha (0.10816 + b) + 1.62 Alpha^2 (0.10816 + b)^2 + Alpha^3 (0.10816 + b)^3 m)}

c1 = FindRoot[eqs, {{Alpha, 2}, {b, 0.015}, {m, 2}}]

{Alpha -> 2.64062, b -> 0.0856224, m -> -0.755579}

Table[eqs[[i]] /. c1, {i, 1, Length[eqs]}] {True, True, True}

Özgeçmiş

Adı Soyadı: Özay Aksoy

Eğitim:

1998–2003 İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Lisans Programı
2008–2011 İstanbul Teknik Üniversitesi, Polimer Bilim ve Teknolojisi Yüksek Lisans Programı
2019– İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Biyokompozit Mühendisliği Doktora Programı

İş Deneyimi:

2004 – 2007 Vestel Elektronik A.Ş, Kıdemli Mekanik Tasarım Mühendisi
2007 – 2009 Ford Otosan A.Ş, Ürün Geliştirme ve Tasarım Mühendisi
2011 – 2013 Olgun Çelik A.Ş, Proje Lideri

Yayınlar (varsa):

1. (Book Chapter) Özay Aksoy, Alperen Doğru, Mert Yüçetürk, Elif Alyamaç, M.Ozgur Seydibeyoglu, 5 - Rheology of nanocomposites,
Editor(s): Sanjay Mavinkere Rangappa, Jyotishkumar Parameswaranpillai, T.G. Yashas Gowda, Suchart Siengchin, M. Ozgur Seydibeyoglu,
In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering,
Nanoparticle-Based Polymer Composites, Woodhead Publishing, 2022, Pages 109-118, ISBN 9780128242728,
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824272-8.00001-4>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128242728000014>)