



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÇÖREKOTU POSASI VE KALSİT DOLGULU EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ARİF EMRE AĞCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Polimer Bilimi ve
Teknolojisi Anabilim Dalı
Polimer Bilimi ve Teknolojisi Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. İLYAS KARTAL

İSTANBUL, 2025



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ÇÖREKOTU POSASI VE KALSİT DOLGULU EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ARİF EMRE AĞCAN
(526622009)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Polimer Bilimi ve
Teknolojisi Anabilim Dalı
Polimer Bilimi ve Teknolojisi Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. İLYAS KARTAL

İSTANBUL, 2025

TEŞEKKÜR

Öncelikle, hayatım boyunca bana sonsuz sevgi ve destek veren **annem, babam ve kardeşime,**

Tezimin hazırlanmasında bana rehberlik eden ve yol gösteren değerli danışmanım **Doç. Dr. İlyas KARTAL'a,**

Tezim için gerekli malzemelerin tedarikinde yardımlarını esirgemeyen **Bülent ÖNTAŞ'a** ve DEMMERG Kimya Ar-Ge sorumlusu **Uğur YILDIZ'a,**

Akademik gelişimimde önemli katkıları olan **Doç. Dr. Ömer Yunus GÜMÜŞ** ve Sibernetik Makina & Otomasyon Genel Müdürü **Adem ŞAHİNER'e,**

Hayata bakış açısıyla beni motive eden ve manevi olarak yanımda olan arkadaşım **Enes Zikri ÇAVUŞ'a** içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, **Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP)** tarafından 11270 proje numarası ile desteklenmiştir. Bu destek için **BAP'a** teşekkür ederim.

Bu tez, sizlerin desteği olmadan bu aşamaya gelemezdi. Hepinize minnettarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
SEMBOLLER	x
KISALTMALAR	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xiv
BÖLÜM 1 KOMPOZİT MALZEMELER.....	1
1.1 Kompozit Malzemelere Giriş.....	1
1.2 Kompozit Malzemeleri Takviyesine Göre Sınıflandırma.....	2
1.2.1 Elyaf takviyeli kompozitler	2
1.2.2 Partikül takviyeli kompozitler	4
1.3 Kompozit Malzemeleri Matrisine Göre Sınıflandırma	5
1.3.1 Metal matrisli kompozitler	5
1.3.2 Seramik matrisli kompozitler	6
1.3.3 Polimer Matrisli kompozitler	6
1.4 Kompozitlerde Kullanılan Polimer Matris Çeşitleri	7
1.4.1 Termosetler.....	7
1.4.1.1 Epoksiler	8
1.4.1.2 Doymamış poliester	10
1.4.1.3 Fenolikler ve Aminolar.....	11
1.4.1.4 Polüretanlar.....	12
1.4.1.5 Silikonlar	13
1.4.1.6 Poliimidler	13

1.4.2 Termoplastikler	14
1.4.2.1 Polipropilen	15
1.4.2.2 Polietilen.....	16
1.4.2.3 Poliamid.....	16
1.4.2.4 Poli (Akrilonitril Bütadien Stiren).....	16
1.4.2.5 Polilaktik Asit.....	17
1.4.2.6 Çapraz bağlı termoplastikler.....	17
1.4.3 Elastomerler	18
1.4.3.1 Doğal Kauçuk	19
1.4.3.2 EPDM bazlı elastomerler.....	19
1.4.3.3 Silikon Kauçuğu	19
1.4.3.4 Olefin termoplastik elastomerler	20
BÖLÜM 2 POLİMER MATRİSLERDE KULLANILAN DOLGU MALZEMELERİ	21
2.1 Polimer Matrislerde Dolgular	21
2.2 Doğal mineral esaslı dolgu maddeleri	21
2.2.1 Kalsit	21
2.2.2 Kaolin.....	22
2.2.3 Mika	22
2.2.4 Talk.....	22
2.2.5 Volastonit	23
2.2.6 Kuvars	23
2.2.7 Demir Oksit.....	24
2.3 Sentetik dolgu maddeleri	24
2.3.1 Karbon siyahı	24
2.3.2 Çökelmiş silika.....	25

2.3.3 Füme silika	25
2.4 evre dostu dolgu maddeleri	25
2.4.1 Çörek Otu Posası	26
2.4.2 Kahve telvesi	27
2.4.3 Pirinç kabuğu.....	28
2.4.4 Mısır Koçanı.....	28
2.4.5 Hindistan cevizi kabuğu	29
BÖLÜM 3 LİTERATÜR ARAşTIRMASI	30
3.1. Epoksi Kompozitlerde Kullanılan Atık Esaslı Dolgular.....	30
3.2 Epoksilerde Parçacık Oranının Etkisi	35
3.3 Epoksilerde Parçacık Boyutunun Etkisi	40
3.4 Epoksilerde Partikül Yüzey Muamelesinin Etkisi	42
3.5 Epoksilerde Lif Oranının Etkisi	44
3.6 Epoksilerde Lif Yüzey Muamelesinin Etkisi.....	45
3.7 Epoksilerde Termal Olarak Bozundurulmuş Atık Esaslı Dolgular.....	46
3.8 Epoksilerde Dolgu Maddelerinin Hibrit Kullanımı	47
BÖLÜM 4 DENEYSEL ALIşMALAR	52
4.1 Kullanılan Malzemeler	52
4.1.1 Epoksi reçine	52
4.1.2 Kürleyici.....	52
4.1.3 Dolgu maddeleri	53
4.2 Numunelerin Hazırlanması	54
4.2.1 Çörek otu posasının öğütülmesi	54
4.2.2 Karışım içeriği ve açık kalıba döküm	54
4.3 Karakterizasyon Yöntemleri	55

4.3.1 Çekme testi.....	56
4.3.2 Darbe testi	56
4.3.3 Sertlik testi.....	57
4.3.4 Su absorplama testi.....	58
4.3.5 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	58
BÖLÜM 5 BULGULAR VE TARTIŞMA	60
5.1 Çekme Testi Sonuçları.....	60
5.2 Darbe Testi Sonuçları	61
5.3 Sertlik Testi Sonuçları	62
5.4 Su Absorplama Testi Sonuçları	62
5.5 SEM Analizi Sonuçları	64
5.6 Renk Kazanımı	66
BÖLÜM 6 SONUÇLAR	67
KAYNAKÇA	68
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

ÇÖREKOTU POSASI VE KALSİT DOLGULU EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Kompozit malzemeler, gelişmiş malzeme özellikleri elde etmek için ana bileşen olan matris ile fiber veya partikül takviyelerinden oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin önemli bir sınıfı, polimer matrisli kompozitlerdir. Takviye malzemeleri sentetik olabilmektedir ancak sürdürülebilirlik adına doğal veya atık kaynaklardan elde edilen malzemeler de son zamanlarda takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu şekilde hazırlanan kompozitler daha düşük maliyetli olup çevreye verilen zararı azaltmaktadır.

Kompozit üretiminde matris olarak kullanılan epoksi reçinelerin kaplama, yapı, elektronik ve yapıştırıcı gibi birçok sektörde kullanımı yaygındır. Polimer kompozitlerde mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla kalsit, dolgu malzemesi olarak tercih edilmektedir. Çörek otu posası ise çörek otu yağı üretiminden arta kalan bir atıktır. Bu çalışmada, maliyet ve çevreye duyarlılık açısından avantajlı hibrit kompozitler üretmek amacıyla çörek otu posası ve kalsit, epoksi reçine için dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır.

Kompozitlerin hazırlanması için öncelikle çörek otu posası öğütülerek toz haline getirilmiştir. Elde edilen toz, 200 µm delik aralığına sahip eleklerden geçirilmiştir. Epoksi reçine, kürleyici madde, kalsit ve çörek otu posası tozu bir kap içine alınarak karıştırılmıştır. Kalsit/çörek otu posası tozlarının epoksi reçineye göre % ağırlıkça oranları 0/20, 5/15, 10/10, 15/5 ve 20/0 olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar teflon kalıpta açık döküm yöntemiyle şekillendirilmiştir. Numunelerin performansını karakterize etmek için çekme, darbe, sertlik ve su absorplama testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kırık yüzey görüntüleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Bunun yanı sıra dolgu ilavesi sayesinde epoksi reçinenin kazandığı renkler gözlemlenmiştir.

Elastik modül ve darbe mukavemeti değeri, %15 kalsit ve %5 çörek otu posası dolgulu epoksi kompozitlerde, saf epoksiden daha üstün performans göstermiştir. Çekme mukavemeti değeri ise yalnızca %20 kalsit dolgulu epoksi kompozitlerde daha yüksek bulunmuştur. Numunelerin shore D sertlik değerleri incelendiğinde, çörek otu posasının

sertlik değerini azaltıcı bir etki gösterdiği ve kalsitin artırıcı bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Su absorplama testine göre ise her iki dolgu da su absorplama yüzdesini artırırken, çörek otu posası daha fazla artırıcı etkiye sahiptir. Numunelerin kazandığı renkler incelendiğinde çörek otu posası ve kalsit, epoksi reçineye kendi doğal renkleri olan siyah ve beyaz rengi kazandırmıştır. İki dolgunun birlikte kullanımı, kompozit içindeki oranlarına göre gri rengin farklı tonlarını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Çörek otu posası, kalsit, epoksi reçine, kompozit malzeme, mekanik özellikler



ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF BLACK CUMIN PULP AND CALCITE FILLED EPOXY COMPOSITES

Composite materials consist of the matrix, which is the main component, and fiber or particle reinforcements to achieve improved material properties. An important class of composite materials is polymer matrix composites. Reinforcement materials can be synthetic, but for sustainability, materials obtained from natural or waste sources have recently been used as reinforcement materials. Composites prepared in this way are less costly and reduce environmental damage.

Epoxy resins, used as matrices in composite production, are widely utilized in various industries such as coatings, construction, electronics, and adhesives. Calcite is preferred as a filler material in polymer composites to enhance mechanical properties. Black cumin pulp, on the other hand, is a waste product from black cumin oil production. In this study, black cumin seed pulp and calcite were used as filler materials in epoxy resin to produce cost-effective and environmentally friendly hybrid composites.

To prepare the composites, firstly the black cumin pulp was ground into powder. The obtained powder was passed through sieves with 200 μm hole spacing. Epoxy resin, curing agent, calcite and black cumin pulp powder were taken into a container and mixed. The weight percent ratios of calcite/black cumin pulp powders to epoxy resin were determined as 0/20, 5/15, 10/10, 15/5 and 20/0. The prepared mixtures were shaped using the open casting method in a teflon mold. Tensile, impact, hardness and water absorption tests were performed to characterize the performance of the samples. The fractured surface images of the samples were examined using scanning electron microscope (SEM). In addition, the colors gained by the epoxy resin due to the filler addition were observed.

The elastic modulus and impact strength values showed superior performance in epoxy composites filled with 15% calcite and 5% black cumin pulp than pure epoxy. The tensile strength value was found to be higher only in 20% calcite filled epoxy composites. When the shore D hardness values of the samples were examined, it was observed that black cumin pulp had a decreasing effect on the hardness value and calcite had an increasing effect. According to the water absorption test, while both fillers increase the water

absorption percentage, black cumin pulp has a greater increasing effect. When the colors of the samples were examined, black cumin pulp and calcite gave the epoxy resin its natural colors of black and white. The use of two fillers together showed different shades of gray depending on their proportions in the composite.

Keywords: Black cumin pulp, calcite, epoxy resin, composite material, mechanical properties



SEMBOLLER

cm³ : Santimetre küp

m : Metre

m² : Metrekare

mm : Milimetre

nm : Nanometre

µm : Mikrometre

µ : Mikron

MPa : Megapaskal

kJ : Kilojoule

g : Gram

kg : Kilogram

L : Litre

pH : Potansiyel hidrojen

mmol : Milimol

Pa.s : Pascal-saniye

Tm : Ergime sıcaklığı

Tg : Camsı geçiş sıcaklığı

% : Yüzde

°C : Santigrat derece

Å : Angstrom

KISALTMALAR

ABS	: Poli (akrilonitril bütadien stiren)
CB	: Karbon siyahı
CD	: Kompakt disk
CNT	: Karbon nanotüp
DC	: Doğru akım
DGEBA	: Diglisidil eter bisfenol A
DTG	: Diferansiyel termal termogravimetrik
EMI	: Elektromanyetik girişim
EPDM	: Etilen propilen dien monomeri
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
PA	: Poliamid
PE	: Polietilen
PET	: Polietilen Tereftalat
PLA	: Polilaktik asit
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz cihazı
TPE-O	: Termoplastik poliolefin elastomerleri
UV	: Ultraviyole

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. 1	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	2
Şekil 1. 2	Polimerler matris malzemelerinin sınıflandırılması.....	7
Şekil 1. 3	Diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) epoksi reçinesi	8
Şekil 1. 4	Epoksi reçine çeşitleri	9
Şekil 1. 5	Kürleme maddesi çeşitleri.....	9
Şekil 1. 6	Kürleme sistemleri	9
Şekil 1. 7	Sektörlere göre epoksi tüketim oranı ve uygulama alanları.....	10
Şekil 1. 8	Elastomerlerin moleküler yapısı	18
Şekil 2. 1	Çörek otu tohumu ve çörek otu posası.....	27
Şekil 3. 1	Yıllara göre literatürde yayınlanan makale miktarları	31
Şekil 4. 1	Epoksi Reçine	52
Şekil 4. 2	Kürleyici.....	53
Şekil 4. 3	Toz formundaki a) çörek otu posası ve b) kalsit.....	53
Şekil 4. 4	Çörek otu posasından toz dolgu üretimini gösteren akış şeması	54
Şekil 4. 5 a)	Açık kalıba yapılan döküm, b) kalıptan alınan dog bone ve darbe testi numuneleri ve c) numunenin zımparalanması.....	55
Şekil 4. 6	Çekme test cihazı	56
Şekil 4. 7	Darbe test cihazı.....	57
Şekil 4. 8	Sertlik ölçüm cihazı.....	57
Şekil 4. 9	Su absorplama testi sürecinden bir görüntü	58
Şekil 4. 10	SEM cihazı	59
Şekil 5. 1	Numunelerin a) elastik modül ve b) çekme mukavemeti değerleri	60
Şekil 5. 2	Numunelerin darbe mukavemeti değerleri.....	61
Şekil 5. 3	Numunelerin sertlik değerleri	62

Şekil 5. 4 Numunelerin su absorpsiyon grafiği	63
Şekil 5. 5 Numunelerin SEM görüntüleri a) saf epoksi; b) 10K10Ç, c) 20Ç; d) 20K ...	65
Şekil 5. 6 Numunelerin renkleri	66



TABLO LİSTESİ

Tablo 3. 1 Epoksi reçinelerde kullanılan atık esaslı dolgular ve gelişen malzeme özellikleri (Ağcan & Kartal, 2025)..... 31

Tablo 4. 1 Dolgu maddelerinin epoksi reçineye göre ağırlıkça oranları ve numune isimleri 55



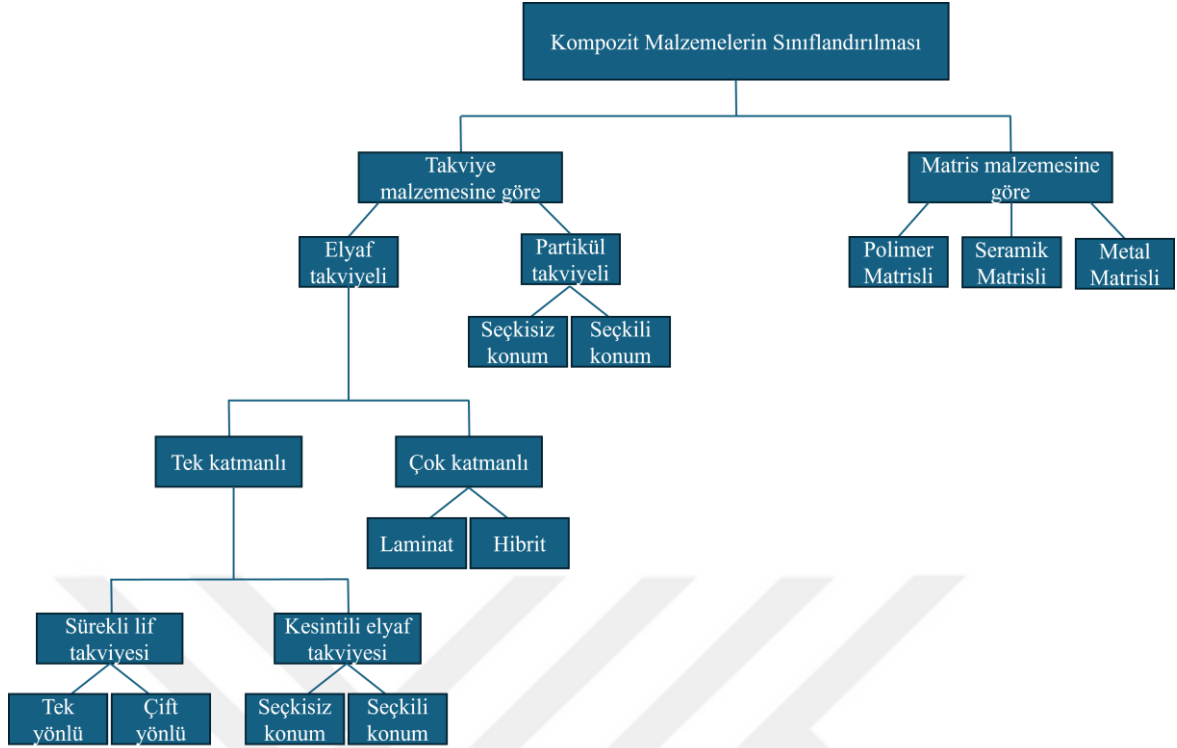
BÖLÜM 1 KOMPOZİT MALZEMELER

1.1 Kompozit Malzemelere Giriş

Kompozit malzeme, farklı fiziksel veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşur ve kendisini oluşturan bileşenlerden farklı özellikler gösterir. Kompozit malzemenin bileşenleri temel olarak takviye ve matristen oluşur. Takviye, matris tarafından çevrelenmiştir. Takviye ve matris arasındaki arayüz ise arayüz fazı olarak adlandırılır. Takviye malzemesi filament (sürekli veya doğranmış), pul veya granüler halde bulunur ve kompozit malzeme dış yüke maruz kaldığında taşıyıcı faz olarak davranır. Matrisin görevi ise takviye fazını desteklemek ve korumaktır. Kompozit malzemelerin özellikleri, içerdikleri malzemelerin türü, özellikleri ve dağılımlarıyla yakından ilişkilidir. Bununla birlikte takviye malzemesinin özellikleri ve matrisin yapısı gibi unsurlar da önemlidir. Üretim yöntemleri ve çevresel koşullar da bu özellikleri etkilemektedir. (Yao ve ark., 2019).

Kompozit malzemelerin kullanım alanları havacılık, otomobil bileşenleri, inşaat, tekstil, spor, biyomedikal ve bunun gibi daha birçok alanı kapsamaktadır (Kesarwani ve ark., 2015; Rajak ve ark., 2019). Bu malzemelerin bazı avantajları arasında hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon dayanımı, yüksek darbe dayanımı, tasarım esnekliği, boyutsal kararlılık ve dayanıklılık bulunmaktadır (Reddy Nagavally, 2016).

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması takviye malzemesine göre veya matris malzemesine göre yapılabilir. Takviye malzemesine göre yapılan sınıflandırma elyaf takviyeli ve partikül takviyeli olmak üzere ikiye ayrılabilir. Matris malzemesine göre ise polimer, seramik veya metal matrisli kompozitler olarak sınıflandırılabilir (Rajak ve ark., 2019). Partikül takviyeli kompozitler, matris içindeki partiküllerin dağılımına göre seçkisiz veya seçkili konum olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitler ise tek katmanlı veya çok katmanlı olmak üzere ayırım göstermektedirler. Çok katmanlılar laminat ve hibrit olarak ikiye ayrılırken, tek katmanlılarda ise elyaf sürekli veya kesintili halde kullanılabilir. Yapılan sürekli lif takviyesi tek veya çift yönlü olabilmektedir. Kesintili elyaf ise partikül takviyesinde olduğu gibi seçkisiz veya seçkili konumlandırılabilir (Verma ve ark., 2012). Bu sınıflandırma şekil 1.1’de ifade edilmiştir.



Şekil 1. 1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Rajak ve ark., 2019; Verma ve ark., 2012)

1.2 Kompozit Malzemeleri Takviyesine Göre Sınıflandırma

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye malzemeleri elyaf, partikül veya levha türünde olabilmektedir. Lifler veya partiküller gibi takviyeler, kompozitlerin mukavemetini, sertliğini ve sağlamlığını geliştirerek onları çeşitli uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Uygun takviye malzemeleri seçilerek termal iletkenlik, elektrik iletkenliği ve korozyon direnci gibi spesifik özellikler, uygulama gereksinimlerini karşılayacak şekilde uyarlanabilir. Bu açıdan takviye malzemelerinin sınıflandırılması ve istenen özelliklerin elde edilebilmesi için uygun takviyelerin seçimi önemli bir konudur (Huang ve ark., 2023; Jenson Joshua ve ark., 2020).

1.2.1 Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan elyaflar, doğal veya sentetik kaynaklı olabilmektedir. Sentetik elyaflara örnek olarak karbon, cam, kevlar ve bazalt gibi elyaflar verilebilir. Bu elyaflar sayesinde malzemenin mukavemeti ve rijitliği yükselir; aşınma, sıcaklık ve kimyasal direnci artar.

Bu sentetik elyaflardan biri olan cam elyafın, epoksi ve doymamış poliestere gibi polimerik reçinelerde takviye elyafı olarak kullanılması çok yaygındır. Diğer takviye elyaflarıyla karşılaştırıldığında daha düşük bir rijitliğe sahip olsa da maliyeti uygundur ve yüksek dayanıklılık ile düşük yoğunluğa sahiptir. Bu duruma ithafen, gelecekte de cam elyafın ana takviye elyaflarından biri olarak kullanılmaya devam edilmesi beklenmektedir (Chawla, 2016).

Karbon elyafı, %90 veya daha fazla karbon içeriğine sahiptir. Düşük karbon içeriğine sahip organik liflerin termal dönüşümüyle üretilmektedirler. Diğer elyaflarla karşılaştırıldığında yüksek çekme mukavemeti ve rijitlik, yüksek kimyasal direnç ve düşük yoğunluk gibi avantajlara sahiptir. Karbon elyaflar, polimer reçinelerde takviye edici eleman olarak kullanıldıklarında, mükemmel derecede hafiflik ve mekanik özellikler sergilerler. Diğer elyaflarla hazırlanan kompozitlere veya alüminyum gibi metallere karşı, gösterdikleri performans bakımından avantajlıdır (Pusch & Wohlmann, 2018).

Kevlar, aramid liflerinin ticari adıdır. Aramid lifinin yapısı anizotropiktir ve genellikle sarı renktedir. Cam liflerine kıyasla aramid lifleri maliyetlidir. Kevlar, gerilme uygulamalarında iyi performans gösterir ancak basınç altında başarısız olabilir. Yüksek mukavemet, rijitlik, çekme mukavemeti ve modüle sahiptirler. Ayrıca, düşük ağırlık ve yoğunluklarıyla da dikkat çekerler. Darbe dayanıklı yapılar genellikle bu tür malzemeler kullanılarak üretilirler (Elsheikhi & Benyounis, 2022).

Bazalt liflerinin üretilmesi için ilk olarak parçalanmış bazalt kayaları 1400 °C’de eritilir. Sonrasında erimiş malzeme çekilir. Cam elyafla kıyaslandıklarında mekanik ve fiziksel özellikleri üstündür. Kimyasal olarak aktif ortamlara karşı güçlü dayanıklılık, yangına karşı direnç ve titreşim ve akustik yalıtım yetenekleri, temel avantajları arasında bulunmaktadır (Maxineasa & Taranu, 2018a).

Bahsi geçen sentetik liflerin yanı sıra, kompozit malzemelerin üretiminde doğal elyaflar da kullanılmaktadır. Doğal elyaflar, sentetik elyaflara göre daha ucuz, düşük yoğunluklu ve çevre dostu olmaları gibi avantajlarıyla son yıllarda dikkat çekmektedir (Rajak ve ark., 2019).

Doğal elyaflar bambu, kenaf, kenevir, sisal, jüt, keten, pamuk ve ağaç lifi, buğday ve mısır sapı gibi bitkisel kaynaklardan elde edilebileceği gibi ipek ve yün gibi hayvansal kaynaklardan da elde edilebilir. Bu doğal elyaflar protein, selüloz ve mineral bazlı olabilir.

Örneğin, protein bazlı doğal elyaflar arasında yün ve ipek bulunurken, selüloz bazlılar arasında pamuk, keten ve jüt gibi lifler sayılabilir. Ayrıca, mineral bazlı doğal elyaflar arasında asbestos gibi malzemeler de bulunur.

Doğal elyafların bileşimi genellikle çeşitlidir ve bu liflerin ana bileşen oranları incelendiğinde, çoğunlukla %3 ila 33 arasında lignin, %30 ila 80 arasında selüloz ve %7 ila 40 arasında hemiselüloz bulunmaktadır.

Doğal elyaflar, kompozit malzemelerin farklı özelliklerini ve uygulamalarını etkilemek için birçok mühendislik alanında, geniş bir yelpazede kullanılabilir. Bazı örnekleri arasında otomotiv, inşaat, mobilya ve paketleme uygulamaları gibi alanlar bulunmaktadır (Azman ve ark., 2021).

1.2.2 Partikül takviyeli kompozitler

Partikül takviyeli kompozitlerde partikül takviyeleri, matris malzemelerinin istenen özelliklerini geliştirmek için sıklıkla kullanılır. Bu özellikler arasında termal ve elektriksel iletkenlik, sürtünme ve aşınma direnci ile yüzey sertliği bulunur. Örneğin birçok ticari olarak önemli elastomer esnekliğini korurken, dayanıklılığını ve aşınma direncini artırmak amacıyla karbon siyahı ve/veya silika ile takviye edilir. Ayrıca, belirli partikül takviyeleri kullanılarak matris fazının miktarı azaltılabildiğinden, nihai kompozitin maliyeti de düşebilir. (Case & Reifsnider, 2003).

Partikül takviyeli kompozitlerin avantajları arasında üretim ve şekillendirme kolaylığı ve düşük maliyet bulunmaktadır (Rajak ve ark., 2019). Fiber takviyesine kıyasla güçlendirme konusunda daha az etkilidir ancak sertlikte kazanç sağlayabilmekte, mukavemet ve tokluk özelliklerinde artış sağlayabilmektedir (Tanzi ve ark., 2019).

Partikül takviyelerinin boyutları genellikle 100 µm'den küçüktür ve toz halinde bulunurlar. Bunun haricinde nanopartikül dolgu maddeleri de bulunmaktadır ve bunların en az bir boyutu 1 ila 10 nm aralığındadır (DeArmitt & Rothon, 2017).

En yaygın kullanılan partikül dolgular talk, alçıtaşı, kaolin, alüminyum hidroksit, kalsit, doğal kalsiyum silikat ve kuartz olarak sıralanabilir. Kullanılan nanopartiküllere örnek olarak ise silisyum dioksit (SiO₂), titanyum dioksit (TiO₂), karbon nanotüp (CNT), grafen, gümüş nanopartikülleri ve çinko oksit gibi örnekler vermek mümkündür. Bu nanopartiküller, istenen malzeme özellik ve uygulamalarına bağlı olarak polimer, metal

veya seramik matrislere dahil edilebilir (Hanemann & Szabó, 2010).

1.3 Kompozit Malzemeleri Matrisine Göre Sınıflandırma

Matris malzemesi olarak polimerler, seramikler veya metaller tercih edilebilmektedir. Bu seçimler, son malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler.

Matris, takviyenin şeklini koruyarak gerekli yapıyı oluştururken takviye, matrisin mekanik, fiziksel, termal ve elektriksel karakteristiklerini artırabilir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin performansı hem matrisin hem de takviyenin niteliklerine bağlıdır (A. K. Sharma, Bhandari, Aherwar, & Rimašauskiene, 2020).

1.3.1 Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitlerin genel özellikleri arasında yüksek boyut stabilitesi, iyi nem direnci, iletkenlik, yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu bulunmaktadır.

Kaliteli bir matris oluşturmak için metaller ve alaşımlar kullanılmaktadır. Kullanılan yaygın matris malzemeleri arasında titanyum, alüminyum ve magnezyum bulunmaktadır.

Ayrıca metal matriste kullanılacak olan takviye elemanı da yüksek mukavemet elde edilmesinde son derece önemlidir. Al_2O_3 , SiC, B_4C gibi seramikler parçacık, lif ve kıl formunda takviye edici eleman olarak kullanılabilir.

Takviye malzemesinin boyut ve şekli, üretilen kompozitin özelliklerini belirlemede önemli rol oynar. Bunların yanı sıra üretim yöntemi de istenilen özellikleri elde etmek için dikkatle seçilmelidir (Singh ve ark., 2020).

Metal matrisli kompozitlere olan talep dünya çapında artmakta ve uygulama alanları genişlemektedir. Havacılık, otomotiv, elektronik aletler ve askeri uygulamalar gibi alanlarda büyük öneme sahiptir. Mükemmel özellikleri ve fiyatları nedeniyle, özellikle otomotiv sektöründe çok kullanılmaktadır. Bu malzemelerde uygulama alanı belirlenirken performansın yanı sıra maliyetin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Metal matrisli kompozitler her ne kadar maliyet ve kullanım eksikliği nedeniyle dezavantajlara sahip olabilseler de imalat yöntemlerindeki gelişmeler nihai maliyeti azaltabilmektedir.

Son yıllarda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, metal matrisli kompozitlerin imalat yöntemlerinde önemli gelişmelere yol açmıştır. Bu gelişmeler, malzemelerin üretim

maliyetlerini düşürerek son kullanıcılar için daha rekabetçi fiyatlar sunma potansiyeline sahiptir (A. K. Sharma, Bhandari, Aherwar, Rimašauskiene, ve ark., 2020).

1.3.2 Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, geleneksel seramiklere göre daha gelişmiş özelliklere sahiptirler ve seramik matris içine gömülü seramik elyaflardan oluşmaktadırlar. Her ne kadar kırılğan bileşenlere sahip olsalar da takviye/matris arayüzeyinin etkili tasarımı sayesinde matristeki çatlaklar durdurulmakta ve saptırılmaktadır.

Takviye malzemesi çoğunlukla parçacık veya whisker formundadır. Herhangi bir seramik malzeme, matris ve fiberlerin bileşenleri olabilir. Piyasada satılan en önemli seramik matrisli kompozitler, takviye/seramik matris olarak Alümina/Alümina, Silikon Karbür/Silikon Karbür, Karbon/Silikon Karbür, Karbon/Karbon olarak sıralanabilir.

Yüksek sıcaklıklara dayanımları, üstün mukavemet ve rijitlikleri sayesinde çeşitli yüksek performans uygulamalarında kullanılmaya elverişlidirler (Zhang, 2014). Özellikle yüksek sıcaklık içeren uygulamalarda çok önemli bir yere sahiptir çünkü termal şoklara ve korozyona karşı dirençli olmanın yanı sıra yüksek erime noktalarına, yüksek sıcaklıklarda kararlı yapıya ve kaliteli dinamik yük taşıma kapasitesine sahiptirler (Alojaly ve ark., 2023). Bu yüksek performans uygulamalarına örnek olarak gaz türbinleri, nükleer füzyon reaktörleri gibi nükleer uygulamalar, uçak frenleri gibi sürtünme uygulamaları ve gaz türbinleri verilebilir (Bansal & Lamon, 2014).

1.3.3 Polimer Matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler son yıllarda yoğun olarak çalışılmakta olan bir alandır. Yüksek mekanik özellikleri nedeniyle çeşitli endüstrilerde ve mühendislik uygulamalarında sıkça tercih edilmektedir.

Polimer matrisli kompozit oluşturulması için tasarım yapılırken kompoziti oluşturan matris ve takviye gibi bileşenler, nihai kompozitin sahip olacağı özellikler ve bu özelliklere göre ürünün kullanılacağı alan dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir.

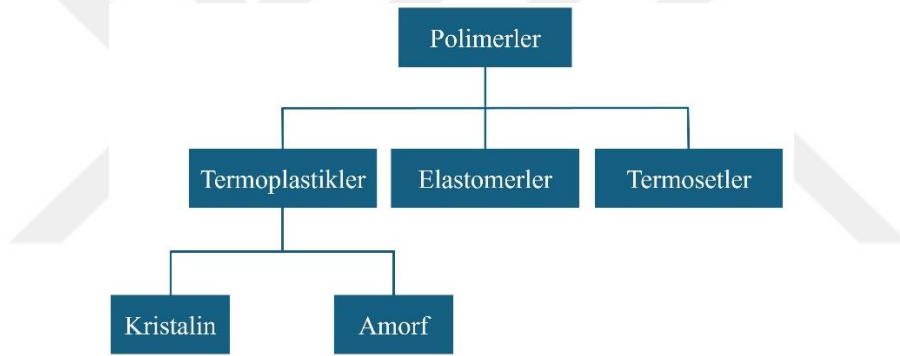
Polimer matrisli kompozitlerin avantajları arasında gelecek vadeden bir teknoloji, yüksek performans ve dayanıklılık, iyi derecede rijitlik ve mukavemet yer almaktadır. Genel olarak proses edilmeleri, diğer matris malzemeleriyle kıyaslandığında daha kolaydır ve

daha düşük maliyetlidir. Neme karşı hassasiyet, özel proses gereksinimleri ve maksimum çalışma sıcaklığının düşük olması gibi durumlar ise dezavantajları olarak gösterilebilir.

Polimer matrisli kompozitler, havacılık, savunma, inşaat ve biyomedikal endüstriler gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca güneş pilleri ve yakıt hücreleri gibi enerji sektöründe de önemli bir rol oynamaktadırlar (Kangishwar ve ark., 2023).

1.4 Kompozitlerde Kullanılan Polimer Matris Çeşitleri

Polimer matris malzemelerin sınıflandırılması yaygın olarak moleküler yapılarına göre yapılmaktadır. Bu kapsamda sınıflandırma termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak ifade edilmektedir. Termoplastikler ise kristalin ve amorf olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, şekil 1.2’de gösterilmektedir (Robert J. Young & Peter A. Lovell, 2011).



Şekil 1. 2 Polimerler matris malzemelerinin sınıflandırılması (Robert J. Young & Peter A. Lovell, 2011)

1.4.1 Termosetler

Termoset polimerler, moleküler yapıları çapraz bağlı ve üç boyutlu olan malzemelerdir. Genel olarak rijitlerdir. Yüksek derecedeki çapraz bağlanmanın neticesi olarak zincir hareketleri kısıtlıdır. Isıtıldıklarında erimez ve çözünmezler, bozulmaya uğrarlar (Robert J. Young & Peter A. Lovell, 2011; Yaşlak, 2008).

Toplam plastik tüketiminin yaklaşık %15 ila 20’sini oluşturan termosetlerin yaygın kullanım alanı kompozit malzemeler, yapıştırıcılar ve kaplamalar olarak sıralanabilmektedir.

Termosetlerin, lineer yapıdaki termoplastiklere kıyasla avantajları ısıya, sürünmeye ve

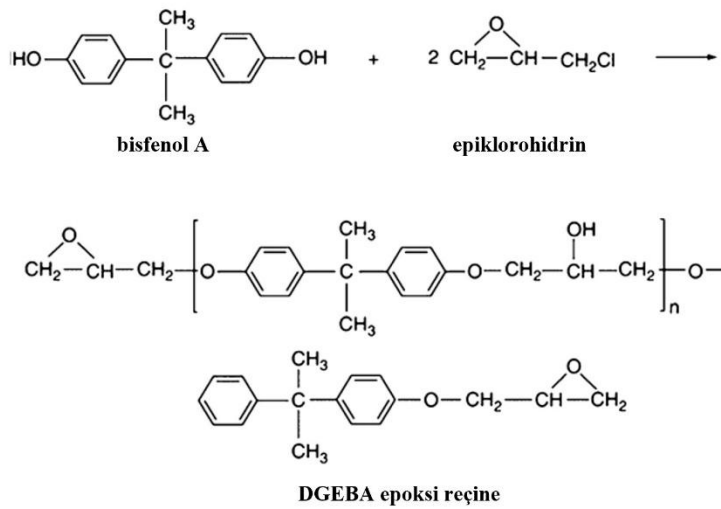
çözücü saldırısına karşı daha dirençli olmalarıdır (Quirino ve ark., 2021).

Termoset polimerler, kompozit üretiminde matris malzemesi olarak kullanılabilir. Bu termosetler arasında doymamış poliesterler, fenolikler ve aminolar, epoksiler, poliüretanlar, silikonlar, poliimidler ve çapraz bağlı termoplastikler bulunmaktadır (Dodiuk & Goodman, 2014).

1.4.1.1 Epoksiler

Aminlerin epoksiyle reaksiyonundan oluşan ürünlerin hazırlanması için ilk patent başvurusu, Alman araştırmacı Paul Schlack tarafından 1934 yılında yapılmıştır (Pham & Marks, 2005). Bundan dört yıl sonra, İsviçreli Pierre Castan ve Amerikalı Sylvan Greenlee, bu alandaki çalışmalarını başarıyla tamamlamışlardır. İlerleyen yıllarda, epoksi reçineler hayatımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiş ve modern toplum için vazgeçilmez bir hal almıştır (Negoita ve ark., 2016).

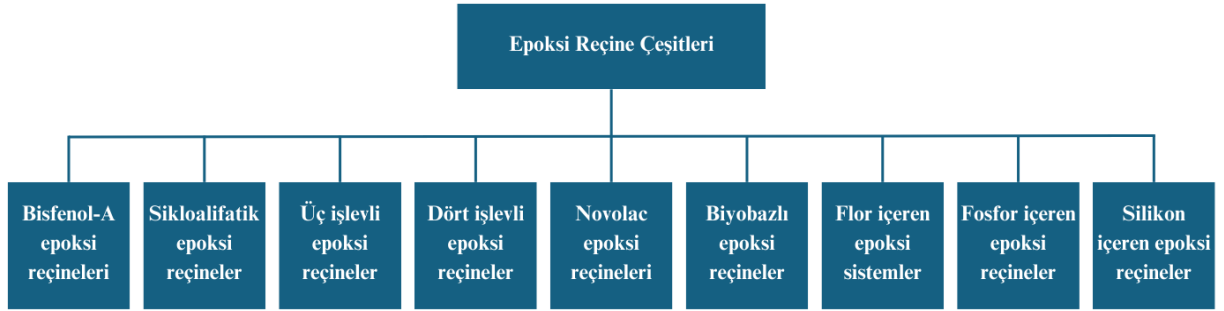
Epoksi reçineler, içerisinde en az iki oksijen içeren siklik üç üyeli halka yapısını barındırmaktadır. Bu yapılar epoksi grupları, oksiran veya epoksit grupları olarak adlandırılmaktadır. İlk ticari epoksi reçineler, epiklorohidrin ve bisfenol A'nın reaksiyon ürünlerinden elde edilmiştir. Böylelikle bisfenol A epoksi reçineleri üretilmiştir. İlgili reaksiyon Şekil 1.3'de gösterilmiştir (Higgins ve ark., 2020).



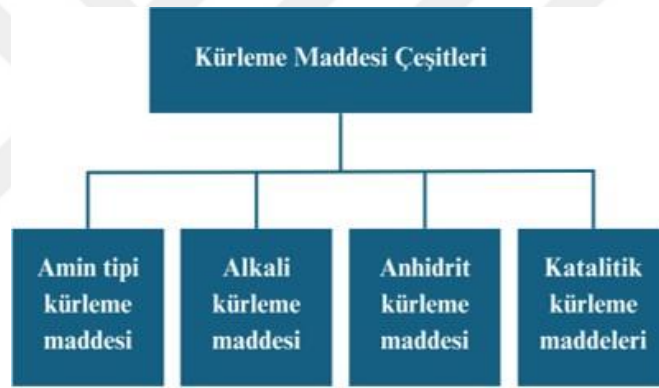
Şekil 1. 3 Diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) epoksi reçinesi (Higgins ve ark., 2020)

Epoksi reçinelerin sıvı formdan katı forma geçebilmeleri için kurlenmeleri gerekir (Higgins ve ark., 2020). Kurlenmiş epoksi reçine oluşturmak için gerekli bileşenler epoksi

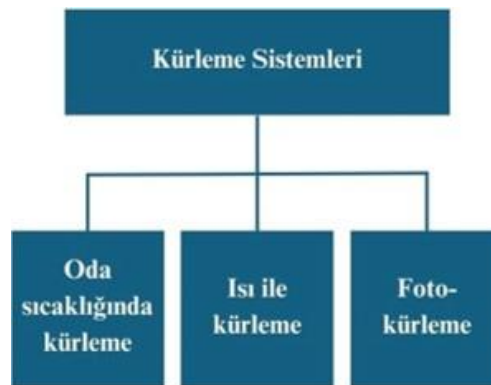
reçine ve kürleme maddesidir. Epoksi reçine ve kürleme maddesinin türü değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca kürleme prosesi de farklılık gösterebilir ve tüm bunlar kürlenmiş epoksi reçinenin özelliklerini belirlemede rol oynar. Şekil 1.4'te bazı epoksi reçine çeşitleri, şekil 1.5'te kürleme maddesi çeşitleri ve şekil 1.6'da kürleme sistemleri tablo halinde gösterilmiştir (Jin ve ark., 2015).



Şekil 1. 4 Epoksi reçine çeşitleri



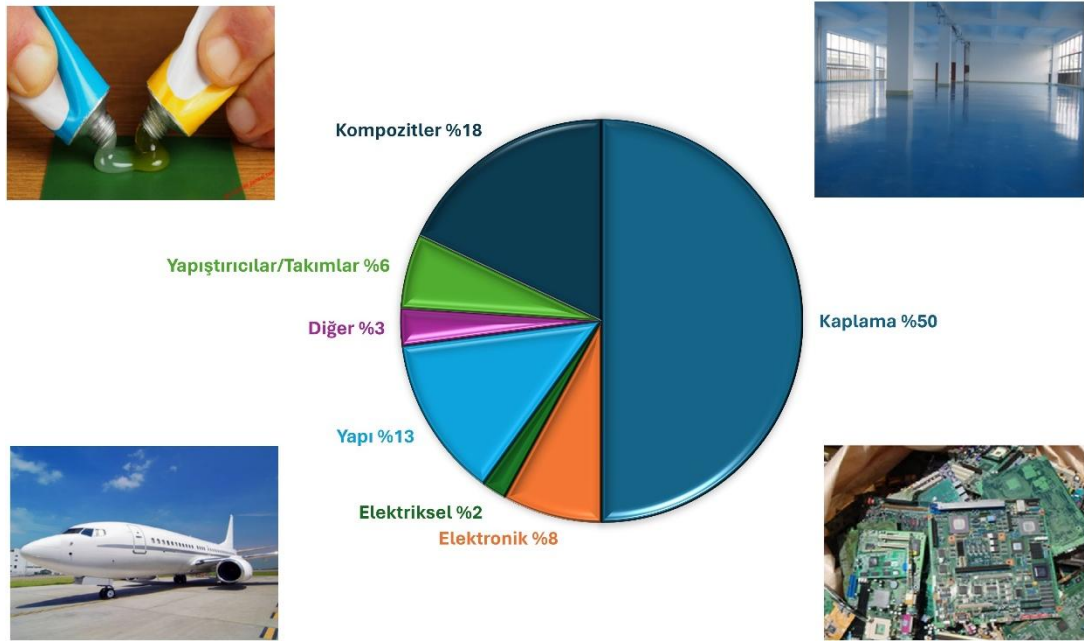
Şekil 1. 5 Kürleme maddesi çeşitleri



Şekil 1. 6 Kürleme sistemleri

Epoksi reçinelerin uygulama alanı oldukça geniştir ve birçok sektörde tercih edilir. Bu sektörler arasında kompozit, yapıştırıcı, yapı, kaplama, elektrik ve elektronik

bulunmaktadır. Şekil 1.7’de sektörler bazında epoksilerin tüketim oranı ve uygulama alanlarından bazılarını içeren figürler gösterilmektedir. Kaplama sektörünün, tüketim miktarının yarsını oluşturuyor olması özellikle dikkat çekicidir (Jin ve ark., 2015; Mi ve ark., 2022).



Şekil 1. 7 Sektörlere göre epoksi tüketim oranı ve uygulama alanları (Ağcan & Kartal, 2025)

1.4.1.2 Doymamış poliestere

Doymamış poliestere, doymamış dibazik asit ile glikol arasındaki kondenzasyon reaksiyonu sonucu üretilir. Karbon atomları birbirlerine çift bağlarla bağlanmıştır. Ortoftalik ve izoftalik olmak üzere iki türü vardır. Ortoftalik olanlar ortoftalik asitten oluşur ve %35 – 45 arasında stiren içermektedirler. Yüksek mekanik özellik, sıcaklık veya korozyon direnci gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilebilirler. Maliyet açısından daha uygundurlar. İzoftalik olanlar ise %42 – 50 arasında stiren içermektedirler ve daha yüksek performans gerektiren alanlarda kullanımları uygundur. Malzeme üretilirken, yumuşak ve sünek veya rijit bir yapıda özellikler sergileyecek şekilde ayarlanabilir.

Dikkat çeken avantajları arasında düşük maliyeti, kısa kürlenme süresi ve düşük viskozitesi bulunmaktadır. Kürlenme süresi, reçinenin formülasyonuna göre değişiklik

göstermekle beraber oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda gerçekleşecek şekilde ayarlanabilir.

Diğer termosetlerle kıyaslandığında hava koşullarına karşı dayanımı daha az, mekanik özellikleri daha düşük ve büzülmesi yüksektir. Büzülmenin azalması, yapıya termoplastik eklenerek sağlanabilir (Maxineasa & Taranu, 2018b; Ouarhim ve ark., 2019).

Kullanıldıkları endüstriler arasında otomotiv ve denizcilik bulunmaktadır. Kompozit endüstrisinde kullanılan reçinelerin %75'ini oluşturmaktadırlar. Yat ve yelkenli teknelerin büyük bir kısmında kullanılmaktadırlar (Marcio, 2015).

1.4.1.3 Fenolikler ve Aminolar

Fenolik reçineler, bir diğer adıyla fenol-formaldehit reçineleri, ilk termoset plastik olarak değerlendirilmektedir. Genel amaçlı termoset olarak kabul edilseler de mühendislik uygulamalarında kullanılabilmektedirler. Bu reçinelerin üretimi fenoller ile formalin olarak isimlendirilen formaldehit çözeltilerinin reaksiyonu sonucu gerçekleşmektedir. Fenolik reçinelerin üretimindeki üç ana malzeme fenol, formaldehit ve heksametilen tetramin bulunur. Ticari açıdan temini mümkün olan ilk sentetik reçineler olarak tanımlanmaktadır ve tamamen sentetik malzemelerden üretilmektedir.

Fenolik reçinelerin resole ve novalac fenolik reçineler olmak üzere iki türü bulunmaktadır. Resole olanlar alkalik katalizör kullanılarak üretilir. Yapısında metilol taşımaktadırlar. 1 yıldan kısa raf ömrüne sahiptir. Kürlendiğinde su ayırmaktadır. Genellikle sıvı yapıdadır. Novalac olanlar ise asidik katalizör ile üretilir. Resole fenolik reçinelerin aksine yapılarında metilol taşımamaktadırlar. Raf ömürleri sonsuzdur. Kürlendiğinde amonyak salmaktadır. Boyutsal stabiliteleri resollerden daha iyidir. Genellikle katı yapıdadır.

Opak bir görünüme sahip olan fenolik reçineler, işlendikten sonra renk olarak siyah veya koyu kahverengi tonlarında olabilmektedir. Form olarak toz, film, sıvı veya pul halinde bulunabilirler. Kırılgan davranışlarını önlemek için dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Özelliklerinin ayarlanması için katkı ve dolgu maddeleriyle formülasyonların belirlenmesi gerekmektedir.

Fenoliklerin kullanım yerleri arasında otomotiv parçaları, elektrikli cihazlar, izolasyon ve yapıştırıcılar gibi alanlar bulunmaktadır (Pizzi & Ibeh, 2014b).

Amino reçinelerin ise oluşması için aldehitler, amidik veya aminik gruplar içeren bileşiklerle tepkimeye girerler ve kondensasyon polimerizasyonu gerçekleşir. Aldehit olarak en çok kullanılan ise formaldehittir. Bu reçinelerin en çok bilinen iki türü üre-formaldehit ve melamin-formaldehittir. Üre-formaldehit'in avantajları arasında nispeten düşük maliyet ve büyük ölçekte üretime uygunluk, alev almayan bir yapı, sertlik, iyi termal özellikler, çeşitli kürleme koşullarına uyum ve kürlenmiş renk olmaması yer alır. Üre-formaldehit'in dezavantajı su ve nemden etkilenmesidir. Bu sebeple saf üre-formaldehit yapıştırıcılar, iç mekân uygulamalarında kullanılmaktadır. Bunun aksine melamin-formaldehit, su ve neme karşı daha dirençlidir, dış mekân uygulamalarında da kullanılabilir. Melamin-formaldehitin ucuzlatılması için üre ilave edilerek melamin-üre-formaldehitler elde edilebilir.

Amino reçinelerinin uygulama alanları arasında yapıştırıcılar, koruyucu kaplamalar, tekstil işleme ve kaplama, kâğıt işleme ve kaplama bulunmaktadır (Pizzi & Ibeh, 2014a).

1.4.1.4 Polüretanlar

Poliüretanlar, termoplastik veya termoset formda bulunabilmektedir. Termoplastik olanlar çapraz bağ içermezken, termoset olanları çapraz bağ içermektedir. Poliol ve izosiyanatların reaksiyonuyla elde edilmektedirler. Sentez ve formülasyonda kullanılabilecek diğer bileşenler katalizörler, köpürtücü ajanlar, yüzey aktif maddeler ve katkı maddeleri olarak sıralanabilir.

Polioller, poliüretanın esnek yapısına katkı sağlayan bölümdür ve formülasyonda fazla bulunduğu takdirde malzeme daha yumuşak ve hidrofilik hale gelir. İzosiyanatlar ise kürlenmeden sorumludur ve malzemeye sertlik katar, formülasyonda fazla bulunması sertliği ve hidrofobikliği artırır. Katalizörlerin görevi ise poliol ve izosiyanat arası reaktiviteyi artırmak ve reaksiyon için gerekli sıcaklığı düşürmektir. Köpürtücü ajanlar, poliüretan'ın içinde kabarcıklar oluşturarak köpürmeyi sağlar. Yüzey aktif maddeler, yapının homojen olmasından sorumludur. Ayrıca katkı maddeleriyle poliüretana UV direnci, mekanik özellikler, alev geciktirme ve maliyet azaltma gibi avantajlar sağlanabilmektedir (De Souza ve ark., 2021).

Poliüretanların uygulama alanları arasında inşaat ve ev aletleri, otomotiv endüstrisi, marin ve biyomedikal uygulamalar bulunmaktadır. Isı yalıtımı, ağırlık azaltıcı ve koruyucu

kaplama gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Avar ve ark., 2012; De Souza ve ark., 2021).

1.4.1.5 Silikonlar

Silikonlar, aynı zamanda poliorganosiloksanlar olarak da bilinir, organik ve inorganik bileşenleri birleştiren hibrit polimerler kategorisine aittirler. Moleküler zincirleri, sırasıyla silikon ve oksijen atomlarından oluşan bir omurgaya sahiptir ve bu yapılar lineer veya dallanmış olabilir (Köhler ve ark., 2020).

Lineer silikonlar, oda sıcaklığında akıcı bir davranış sergilemektedirler. Sistemdeki mol kütlesi, fiziksel özellikleri üzerinde etki sahibidir. Mol kütlesi düşük olduğunda düşük viskozite sergilerken, yüksek olduğunda viskoelastik davranış sergiler. Toluen gibi yaygın organik çözücülerde çözünbilmektedirler. Silikon elastomerler ise, bahsedilen sistemin çapraz bağlanması sonucu oluşmaktadır. Böylelikle lastik benzeri elastikiyete sahip olmakta ve tam iyileşme ile yüksek esneklik göstermektedirler. Toluen gibi çözücülerde şişerler ancak moleküler yapıdaki çapraz bağlar nedeniyle çözünmezler. Çapraz bağ yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda ise düşük esneklik ve çok az şişme göstererek reçine benzeri özellik sergilemektedirler.

Silikonlar, biberon emziklerinde, köpük giderici olarak yiyecek hazırlama ve bira üretiminde, kaplama olarak kağıtlarda ve kalıp ayırıcı maddelerde, hipodermik iğnelerin yağlanması, deodorant gibi kişisel bakım ürünlerinde, medikal ürünler olarak kateterler, parmak eklemleri, meme implantları ve kalp pili lead'lerinden kullanılmaktadır (Clarson, 2003).

1.4.1.6 Poliimidler

Poliimidler, DuPont™ firması tarafından geliştirilen ve yüksek sıcaklıkta kullanılan mühendislik polimerleridir. Diaminlerden veya diizosiyanatlardan ve dianhidritlerden oluşmaktadır. Kullanılacak diamin ve dianhidrit değiştirilerek özellikleri ayarlanabilir. En yaygın metot, dianhidrit ile diamin arasındaki reaksiyondur ki polimerizasyon sırasında su molekülleri elimine edilir. Dianhidrit ile diizosiyanat arasındaki reaksiyon ise poliimidin polimerizasyonu boyunca karbon dioksit moleküllerinin elimine edilmesiyle sonuçlanır. 500 °C üstünde termal stabilite, kimyasal direnç, dielektrik özellikler ve üstün mekanik performans gibi niteliklere sahiptir (McKeen, 2017).

Polimidlerin kullanımları arasında havacılık, otomotiv, elektrik yalıtımı, fotovoltaiik modüller, hoparlör bileşenleri gibi alanlar mevcuttur. Bu uygulamaların gerekliliklerine göre fiber ve nanofiber, film, kaplama, yapıştırıcı, köpük veya membran gibi çeşitli biçimlerde üretilmeleri mümkündür (Hicyilmaz & Bedeloglu, 2021; McKeen, 2017).

1.4.2 Termoplastikler

Termoplastiklerin moleküler yapıları lineer veya dallanmış olarak bulunabilmektedir. Lineer yapıdaki termoplastiğe örnek olarak yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) verilebilirken, dallanmış yapıdaki termoplastiğe ise düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) örnek verilebilmektedir. Termosetlerin aksine ısı uygulandığında bozulmayıp, sıvı hale gelmektedirler.

Günümüzde ticari üretimde en yaygın kullanılan polimerler arasında olan termoplastikler, enjeksiyonlu kalıplama ve ekstrüzyon gibi işleme teknikleri ile şekillendirilebilmektedir. Isıtılarak sıvı hale getirilmenin haricinde, belirli çözücüler kullanılarak çözünebilmektedirler. Yeniden ısıtılarak tekrar şekil alabildikleri için geri dönüşümleri de mümkündür. Kullanım alanları arasında yapıştırıcılar, fiberler ve yüzey kaplama polimerleri bulunmaktadır (Robert J. Young & Peter A. Lovell, 2011; Yaşlak, 2008).

Termoplastik polimerler amorf veya kristalin olarak sınıflandırılabilirler. Amorf polimerlerde, polimer zinciri rastgele yapıda ve düzensizdir. Kristalin yapıdaki polimerde ise polimer zincirleri belirli bir düzende paketlenmiştir. Kullanılan plastiklerin geneli, bu iki fazı bir arada barındırdığından yarı kristalin olarak adlandırılırlar (Saçak, 1998).

Sıvı durumdayken dolaşmış durumda bulunan zincirlere sahip polimer, soğutulup katı duruma getirilirken kristalleşmesi zordur. Bunun sebebi, dolaşık makromoleküllerin önemli derecede düzenlenmesinin gerekliliğidir. Böylelikle hem kristalin, hem de amorf bölgelere sahip olan yarı kristalin polimerler oluşmuş olur (Robert J. Young & Peter A. Lovell, 2011). Polimer malzemenin tamamen kristalin, yarı kristalin veya amorf olma durumu, polimerin üretim veya işlenme şartlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Polimerin kristal yapıda olmasında rol alan iki önemli etken, polimer zincirlerinin kristal yapıyı alma yeteneği ve polimer molekülleri arasındaki etkileşimlerdir (Yaşlak, 2008).

Kristalin termoplastiklere örnek olarak polipropilen, düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu polietilen verilebilmektedir. Amorf termoplastiklerin bazı örnekleri ise

polistiren, polivinilklorür ve polimetilmetakrilat olarak ifade edilebilir. Bu iki fazı birlikte barındıran yarı kristalin termoplastiklere ise örnekler polibütilen tereftalat, poliamid-imid ve poliester olarak sıralanabilir (Grigore, 2017).

Termoplastik polimerler, kompozit üretiminde matris malzemesi olarak kullanılabilir. Termoset matrislerle kıyaslandığında bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantajların arasında daha hızlı üretim, geri dönüşüme elveriş ve daha yüksek tokluk bulunmaktadır (Valente ve ark., 2023).

Genel olarak kompozit üretiminde tercih edilen termoplastik matrislerin bazı örnekleri polipropilen (PP), polietilen (PE), poliamid (PA), poli (akrilonitril bütadien stiren) (ABS), ve polilaktik asit (PLA) olarak sıralanabilir (Xavier, 2022).

1.4.2.1 Polipropilen

Polipropilen, propilen gazının polimerizasyonu sonucu oluşturulan bir termoplastiktir. Yüksek sıcaklıkta petrol hidrokarbonlarının ve propanın parçalanmasıyla üretilmektedir. İzotaktik, ataktik ve sindiyotaktik olmak üzere üç temel yapısal stereostatik düzenleme türüne sahiptir. Ticari olarak temin edilebilen PP'nin büyük bir kısmı %95 izotaktik yapıya sahiptir ve genellikle geosentetik uygulamalarında kullanılır. Özellikleri bakımından polietilenle benzerlik göstermektedir. Polietilen ile kıyaslandığında daha düşük bir yoğunluğa, daha rijit bir yapıya, kimyasal saldırı ve oksidasyona karşı daha fazla hassasiyete, çevresel stres çatlamasına karşı yüksek dayanıklılığa ve daha yüksek bir servis sıcaklığına sahiptir (Koerner ve ark., 2007).

Polipropilen matrisli kompozitlerin uygulama alanlarına bakıldığında, kısa ve uzun elyaf takviyeli olanların çok geniş bir alana yayıldığını ve neredeyse tüm sektörleri kapsadığı gözlenmektedir. Özellikle uzun elyaf takviyeli olanların otomotiv sektöründe kullanıldığı bilinmektedir ve günümüzde geri dönüştürülmüş süreksiz karbon fiber takviyesini PP matriste değerlendirerek otomotiv sektöründe kullanılması ile ilgili çalışılmaktadır. Mat takviyeli PP kompozitler de hafif alt gövde sistemleri, ön destek çerçevesi ve akü tepsisi gibi otomotiv uygulamalarında tercih edilmektedir. Kumaş takviyeli PP kompozitlerin kullanım alanına tipik örnekler ise koltuk ve zemin panelleri ve koruma kalkanları olarak sıralanabilir. Laminat PP kompozitler ise havacılık, otomotiv ve spor endüstrisinde kullanılmak üzere eğilimi olan büyük ölçekli yapılarda

kullanılmaktadır. Son olarak ise PP matrisli nanokompozitler, benzersiz özellikleri bir araya getirerek bazı endüstriyel uygulamalar için yol açmıştır ve gelecekte uygulama yelpazesinin genişlemesi beklenmektedir. Bu uygulamalar arasında bariyer özellikleri nedeniyle paketlenme sektörü ve yüksek sertlik, düşük yoğunluk, mukavemet, mar ve çizilme direnci, gelişmiş sıcaklık dayanımı gibi özellikleri nedeniyle ise otomotiv sektörü bulunmaktadır (Ageyeva ve ark., 2019).

1.4.2.2 Polietilen

Polietilenin moleküler yapısı, CH_2 moleküllerinin bir zincir boyunca tekrar etmesi şeklindedir. En büyük tonajlı plastik malzemedir. Polietilen, uygun maliyeti, geniş bir frekans spektrumunda üstün elektriksel izolasyon özellikleri, kimyasallara karşı dayanıklılığı, işlemeye uygunluğu, dayanıklılığı, esnek yapısı ve bazı kalınlıklarda gösterdiği saydamlık ile dikkat çeker. Yüksek yoğunluklu, lineer düşük yoğunluklu, ultra yüksek molar kütleli PE ve başka PE kopolimerleri gibi ticari öneme sahip farklı türleri bulunmaktadır (Ronca, 2017). Uygulama alanları ise genel olarak gıda ambalajları, binalar ve inşaat olarak ifade edilebilir (Yasim-Anuar ve ark., 2022).

1.4.2.3 Poliamid

Poliamidler, genellikle bir diaset ile bir diaminin kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan ve kristal yapıya sahip polimerler olarak tanımlanmaktadır (McKeen, 2023). Naylon olarak da bilinen Poliamid (PA), mühendislikte tercih edilen bir plastik türüdür ve sert yapısı, yüksek dayanımı ve mükemmel mekanik özellikleri sayesinde çeşitli mekanik alanlarda kullanılır. İşlenmesi kolay olan bu malzeme, bronz, pirinç ve alüminyum gibi metallerin alternatifi olarak endüstriyel ve tarımsal alanlarda sıklıkla tercih edilir. Ancak, nemi çekme özelliği bulunduğu için, su içinde kullanımı boyutlarında değişikliklere yol açabilmekte ve önerilmemektedir. Poliamidin farklı varyasyonları arasında PA 6, PA 12, PA 66, PA 69 ve PA 46 bulunmaktadır (N. Kumar ve ark., 2022).

1.4.2.4 Poli (Akrilonitril Bütadien Stiren)

ABS, akrilonitril, bütadien ve stiren monomerlerinin birleşiminden oluşan bir triblok kopolimerdir. Bu malzemenin sağlamlığı ve mukavemeti, akrilonitril ve bütadien bileşenlerinden gelirken; tokluğu stiren tarafından sağlanır. Ev eşyalarından mühendislik

parçalarına kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan ABS, düşük maliyeti ve yüksek parlaklık seviyesiyle öne çıkar. Ayrıca, karmaşık geometrilerin kolayca şekillendirilmesine olanak tanır ve yüksek dayanıklılığı sayesinde yapısal uygulamalarda sıkça tercih edilir. Elektriksel yalıtım özellikleri ve düşük ısı genleşme katsayısı ile elektronik bileşenler için ideal bir alt tabaka malzemesidir. Kimya endüstrisinde, özellikle boru ve bağlantı elemanları üretiminde tercih edilen ABS, hidroklorik asit başta olmak üzere birçok kimyasala karşı direnç gösterir (Dromel & Singh, 2021; Mangore ve ark., 2022).

1.4.2.5 Polilaktik Asit

Polilaktik asit (PLA), laktik asit, glikoz veya sükroz gibi yenilenebilir kaynakların fermantasyonu ile üretilen, çevre dostu bir poliesterdir. Biyolojik olarak parçalanabilme ve geri dönüştürülebilme özellikleriyle dikkat çeker. Gıda ambalajlarından tekstil ürünlerine, mühendislik plastiklerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir ve bu alanlarda gelişmeye devam etmektedir. PLA, termal işlenebilirlik açısından diğer biyoplastiklerle karşılaştırıldığında daha üstün performans sergiler ve enjeksiyon kalıplama, film ekstrüzyonu gibi işleme yöntemleriyle şekillendirilebilir. Ayrıca, PET ile benzer çekme mukavemeti ve elastik modül değerlerine sahip olup, üretimi sırasında daha az karbondioksit emisyonu ve enerji tüketimi ile çevresel etkisini minimize eder. PLA'nın gelecekteki büyüme potansiyeli, sürdürülebilir malzemelerin öneminin artmasıyla birlikte daha da önem kazanmaktadır (Byun & Kim, 2014; Hagen, 2012).

1.4.2.6 Çapraz bağlı termoplastikler

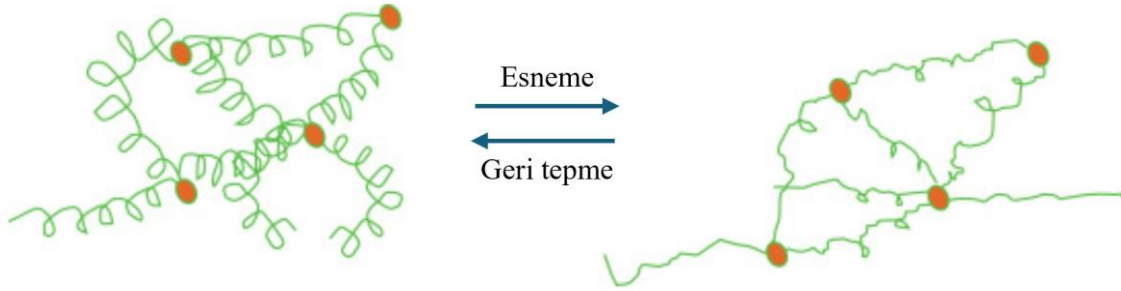
Polietilen ve polipropilen gibi alifatik polimerler ve akrilatlar, çapraz bağlanabilmektedir. Bu çapraz bağlanmaların gerçekleşebilmesi için oligomerler, reaktif metakrilat (akrilik) grupları veya izosiyanatlarla kaplanmıştır. Sonrasında çapraz bağlanma ve polimerizasyon için ultraviyole kaynaklardan veya elektron ışınlarından gelen yüksek yoğunluklu radyasyon kullanılmaktadır. Polietilen gibi termoplastiklerde çapraz bağlanma için radyasyon yayma işleminin yanı sıra kimyasal yöntemler de kullanılmaktadır. Termoplastiklerin çapraz bağlanması sayesinde, malzemedeki fiziksel özelliklerin termal bozulmayla kaybedilmesinin önüne geçilebilmektedir. Zorlu ortamların ve sıvıların sebep olduğu çatlama etkilerine karşı daha dirençli malzemeler elde edilmektedir. Bununla

beraber soğuk deformasyon ve akmaya karşı direnç de artmaktadır.

Çapraz bağlı termoplastiklerin uygulamaları arasında cam kaplamalar, diş emayeleri ve basınca duyarlı yapıştırıcılar gibi alanlar bulunmaktadır ki bunlar yüksek yapışma ve düşük büzülme özelliklerine sahip filmler hazırlandığı anlamına gelmektedir. Ayrıca borular, kablo kaplamaları, dönel kalıplanmış ürünler ve köpükler de üretilmektedir (Patterson ve ark., 2014).

1.4.3 Elastomerler

Elastomerler, düşük moleküler kuvvetlerle bir arada tutuldukları için oldukça esnek bir yapıya sahiptirler. Amorf bir yapıları vardır ve elastik modülleri düşüktür. Gerilme altında, içlerinde kristal bölgeler oluşabilir. Moleküler yapılarındaki çapraz bağlar gevşektir. Uzun, gevşek olarak çapraz bağlanmış ve rastgele sarılmış olan moleküler yapıları sayesinde, üzerlerine uygulanan gerilim veya kuvvet sonrası ilk şekillerine geri dönmektedirler. Ayrıca, yüksek aşınma direncine ve sızdırmazlık özelliğine sahiptirler. Camsı geçiş sıcaklığı oda sıcaklığından düşük olan malzemelerdir ve enerjiyi absorbe edebilme yetenekleri vardır. Elastomer malzemelerin moleküler yapısı, şekil 1.8’de gösterilmiştir. (Özdemir, 2020; Sastri, 2022).



Şekil 1. 8 Elastomerlerin moleküler yapısı (Sastri, 2022)

Şekil hafızası, kendi kendini iyileştirme, algılama ve alev geciktiriciliği gibi malzeme özelliklerinin gerektiği alanlarda kullanım için elverişlidirler (S. Kumar ve ark., 2022).

Elastomerler de kompozit üretiminde matris olarak kullanılmaktadır ve bazı elastomer matris örnekleri doğal kauçuk, EPDM bazlı elastomerler, silikon kauçuğu ve olefin termoplastik elastomerler olarak sıralanabilir (Parameswaranpillai ve ark., 2022).

1.4.3.1 Doğal Kauçuk

Doğal kauçuk, cis-1,4-poliizopren olarak tanımlanan, esnek ve yumuşak mekanik özelliklere sahip, doymamış bir alifatik hidrokarbon polimeridir. Ham formunda, kauçuk hidrokarbon içeriği %94 civarında olup, fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde etkili olan protein, yağ asitleri ve karbonhidratlar içerir. Bitkisel lateks kaynaklarından elde edilen bu değerli biyopolimer, lastik endüstrisi başta olmak üzere birçok alanda kullanılır. Performansını artırmak için mikro ve nano boyutlarda dolgularla zenginleştirilir; grafit ve karbon siyahı gibi mikro katkıları ile grafen ve karbon nanotüpleri gibi nano dolgular, malzemenin elektriksel iletkenliğini ve mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu özellikler, doğal kauçuğun elektronikten biyomedikale kadar geniş bir uygulama yelpazesinde tercih edilmesini sağlar (İbrahim ve ark., 2019; Kausar, 2023).

1.4.3.2 EPDM bazlı elastomerler

Etilen propilen dien monomeri (EPDM), etilen içeriğinin %45 ile %75 arasında değiştiği ve ozon ile oksidasyona karşı direnci, yan zincirlerdeki düşük doymamışlık seviyesi sayesinde yüksek olan bir polimerdir. EPDM, amorf yapıda olup, dolgusuz haliyle mekanik özellikleri sınırlıdır; bu nedenle, mukavemetini artırmak için genellikle yarı takviyeli karbon siyahları gibi dolgu maddeleri eklenir. Esnek yapısı ve elektrik yalıtkanlığı, EPDM'yi contalar, radyatörler, hortumlar ve elektrik kabloları gibi çeşitli uygulamalar için ideal kılar. Ayrıca, iletken karbon siyahı, metaller, iletken polimerler, karbon nanotüpleri gibi iletken malzemeler eklenerek elektriksel olarak iletken hale getirilebilir ve bu sayede basınca duyarlı anahtarlar, aktüatörler, mikrodalga emilimi, EMI koruması ve biyosensörler gibi alanlarda kullanılır (Athawale & Joshi, 2016; Chandrasekaran, 2017; Wypych, 2013).

1.4.3.3 Silikon Kauçuğu

Silikon kauçuk, hem inorganik hem de organik bileşenleri içeren eşsiz bir moleküler yapıya sahip olan “organosiloksan polimer” olarak tanımlanır. Silikon kauçuğun Si-O bağları ve inorganik nitelikleri, ona ısıya dayanıklılık, kimyasal istikrar, elektrik izolasyonu, aşınma karşıtlığı, atmosferik koşullara ve ozona karşı direnç gibi özellikler kazandırır. Bu özellikler sayesinde, silikon kauçuk havacılıktan otomotive, inşaat

elektronik ve tıbbi cihazlara kadar geniş bir yelpazede kullanılmakta ve petrokimyasal malzemelerin yerini almaktadır. Günümüzde, daha dayanıklı elastomerler talep eden sektörlerin ihtiyaçları doğrultusunda silikon kauçuk uygulamalarının kullanım alanları hızla artmaktadır (Shit & Shah, 2013).

1.4.3.4 Olefin termoplastik elastomerler

Poliolefinler dünyadaki en büyük kimyasal ticaret sınıfını oluşturmaktadırlar. Termoplastik poliolefin elastomerleri (TPE-O), dayanıklılık, işleme kolaylığı, sıkıştırma setine karşı direnç, yaşlanma ve kimyasal maddelere karşı üstün direnç gibi mükemmel mekanik özellikler sergileyen yüksek performanslı malzemelerdir. Fotovoltaik panellerden otomotiv parçalarına, kablo üretimine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler ve 2026 yılına kadar bu alanlardaki talebin yıllık olarak 5,55 milyon ton seviyesine ulaşması öngörülmektedir. Pazar payı %20'nin üzerinde olan TPE-O'lar, gelecek vaat eden bir pazar potansiyeline sahiptir. TPE-O'lar, plastik ve kauçuk fazlarından oluşmaktadırlar. Plastik faz, fiziksel çapraz bağlarla çekme dayanımını artırırken, yüksek erime noktasına (T_m) sahip kristal yapılar içerir. Kauçuk faz ise, düşük camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahip yapılarla oda sıcaklığında esneklik sunmaktadır (Sun ve ark., 2023).

BÖLÜM 2 POLİMER MATRİSLERDE KULLANILAN DOLGU MALZEMELERİ

2.1 Polimer Matrislerde Dolgular

Polimer matrisler için kullanılan dolgu maddeleri doğal mineral esaslı, sentetik ve çevre dostu dolgular olarak sınıflandırılabilir. Özellikle çevre dostu dolgular, son zamanlarda dikkat çekici hale gelmiştir. Çevre dostu dolgular, doğada çözünebilen malzemelerden oluşabileceği gibi, atık kaynaklardan da elde edilebilir. Bu kapsamda kentsel ve sanayi etkinlikleri sonucu oluşan atıklar, dolgu malzemesi olarak işlenir ve çevre dostu dolgular haline gelirler. Böylelikle sürdürülebilir malzeme kullanımını teşvik edilmekte ve polimerlerin özellikleri geliştirilmektedir (Cabrera, 2021; Rothon, 2017a).

2.2 Doğal mineral esaslı dolgu maddeleri

Doğal mineral esaslı dolgu maddeleri arasında kalsiyum karbonat dolguları (kalsit), kaolin, mika, talk, kalsiyum silikat, kuvars ve demir oksit gibi dolgu maddeleri bulunmaktadır (Rothon, 2017a).

2.2.1 Kalsit

Kalsitin kimyasal yapısı CaCO_3 'tür. Kalsiyum karbonat mineralleri arasında farklı kristal yapılarında bulunan aragonit ve vateritle karşılaştırıldığında, en kararlı polimorftur. Süt beyazı bir renge sahiptir, yüzeyi parlaktır ve camsı bir görünüme sahiptir. Saf kalsit %56,03 oranında CaO (kalsiyum oksit) ve %43,97 oranında CO_2 (karbondioksit) içermektedir. Kalsit üretim ve ihracatında önde gelen ülkeler arasında ise Fransa, Norveç, Malezya, Vietnam ve Belçika bulunmaktadır.

Kullanımları arasında heykel ve sanat eserleri, kesme taşlar, uçaksavar silahları ve piramit blokları gibi alanlar bulunmaktadır (Haldar, 2020). Bunun yanı sıra kalsit cevherinin öğütülmesiyle toz haline gelen kalsit, birçok sektörde ve geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bazı kullanım alanları arasında boyalar, kâğıt, plastik, film ve poşet, kablo, boru, yapı kimyasalları ve mastik, yalıtım ve izolasyon, tekstil, gıda, deterjan, tarım ve ilaç bulunmaktadır. Kalsitin, bu alanların bazılarında sağladığı katkılar arasında ürün maliyetinin düşürülmesi, renk vericilik, parlaklık ve yüzey pürüzsüzlüğü, UV direncinde artış, aşındırma etkisinde düşüş ve mukavemette artış gibi özellikler yer almaktadır

(*KALSİT KULLANIM ALANLARI*, n.d.).

Öğütülerek toz formuna gelen kalsit, polimer kompozitlerde tercih edilen bir dolgu malzemesidir çünkü ekonomik, kolay bulunur, üretimi basit, rengi beyazdır ve mekanik özellikleri, örneğin mukavemet, modül ve tokluk gibi faktörleri iyileştirme kapasitesine sahiptir (Ersoy & Köse, 2020). Kalsit dolgu maddelerinin polimer matris içindeki dağılımı, elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar (Emre Sucu & Dandan Doganci, 2024). Ek olarak, eşkenar dörtgen kalsit ve küresel vaterit gibi kalsit parçacıklarının morfolojisinin, elde edilen polimer kompozitlerin özelliklerini etkilediği gösterilmiştir (Karboga & Öner, 2020).

2.2.2 Kaolin

Çok yönlü bir kil minerali olan Kaolin, polimerlerde önemli bir dolgu maddesidir; mekanik ve termal özellikleri geliştirirken aynı zamanda daha az su emilimi ve gelişmiş yangın direnci sunar. Kalsinasyon ve yüzey modifikasyonu gibi gelişmiş işlemler kaolinin özelliklerini daha da optimize eder. Parçacık dağılımı ve polimer uyumluluğu konusundaki zorluklar devam ederken, kaolinin nanokompozitler, hibrit kompozitler ve biyolojik olarak parçalanabilir polimerler geliştirme potansiyeli, bu alanda önemli ilerlemeler vaat eden canlı bir araştırma alanıdır (Anam ve ark., 2023).

2.2.3 Mika

Mika, ısıda eğilme sıcaklığını arttırmak ve polimerlerdeki çarpıklığı azaltmak için kullanılan levhacık şeklindeki takviye edici dolgu maddeleridir. Mineralojik olarak mika grubu tamamı monoklinik kristal yapıya ve mükemmel bazal bölünmeye sahip fillosilikatlardan oluşur. Mika çeşitleri arasında beyazdan griye renklerde muskovit, kahverengimsi tonlarda flogopit, koyu kahverengiden siyaha biyotit ve beyazdan griye lepidolit bulunur. Özellikle polimer uygulamalarında muskovit ve flogopit en çok tercih edilen türlerdir, biyotit ise belirli durumlarda kullanılır (Zilles, 2017).

2.2.4 Talk

Talk, genellikle polimer matrislerin mekanik ve termal özelliklerini artırmak için kullanılan bir dolgu maddesidir. Bu doğal mineral, çevre dostu, ekonomik ve yüksek performanslı olmasıyla bilinir. Kimyasal formülü $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ olan talk, katmanlı bir

yapıya sahiptir ve bu levhacıklar, zayıf van der Waals kuvvetleri sayesinde ve kesme kuvvetleri altında birbirlerine göre kayabilir. Bu özellik, talkın polimerler içinde homojen bir şekilde dağılmasını ve istenilen yönde hizalanmasını kolaylaştırır (Russo ve ark., 2014).

2.2.5 Volastonit

Yaygın olarak Volastonit olarak bilinen kalsiyum silikat, CaSiO_3 kimyasal formülüne sahiptir. İnosilikatlar familyasına ait olup kimyasal olarak piroksen grubu minerallere benzer. Düşük termal genleşme katsayıları sayesinde daha iyi boyutsal kararlılık sağlayabilmeleri sebebiyle geleneksel dolgu maddelerine alternatif haline gelmektedir.

Volastonit, talk ile güçlendirilmiş polimer kompozitlerden daha üstün sertlik, bükülme direnci, çekme dayanımı ve darbe direnci sunar. Silikat mineralleri gibi, volastonit yüzeyi de su moleküllerini çekme eğilimindedir, bu da polar olmayan polimerlerle bağlanmasını zorlaştırabilir. Ancak, volastonit yüzeyinin özel işlemlerle modifiye edilmesi bu sorunu çözebilir. Ayrıca, volastonit, cam elyafı gibi daha maliyetli dolgu maddelerine kıyasla termoplastik kompozitler için uygun maliyetli ve fonksiyonel bir alternatif sunmaktadır (Chan ve ark., 2020).

2.2.6 Kuvars

Kuvars, saf silisyum dioksit kristallerinden oluşan bir mineraldir. Doğada sıklıkla karşılaşılan bu mineralin özgül ağırlığı $2,65 \text{ g/cm}^3$ olup, sertliği 7'dir. Kuvars, heksagonal sistemde kristalleşir ve doğal olarak hem kristal hem de amorf formda bulunabilir. Kristal büyüklüklerine göre iri kristalli ve kriptokristalin olarak ikiye ayrılabilir. İri kristalli kuvars türleri arasında Ametist, Dumanlı kuvars, Venüs saçları ve Morion bulunurken, kriptokristalin türler arasında Çakmaktaşı, Akik ve Kalsedon yer alır. Ayrıca beyaz, mor, pembe, kırmızı, mavi gibi renklere sahip olmanın yanı sıra renksiz halde de bulunabilir (Kuvars Tozu 44 Mikron, CAS No. 14808-60-7 - NANOKAR, n.d.).

Kuvars, dolgu olarak kullanıldığında mukavemeti artırma, viskoziteyi ayarlama, hava koşullarına karşı oldukça dirençli olma ve pürüzsüz bir yüzey oluşturma potansiyeline sahiptir. Bunun sebebi, SiO_2 'nin spesifik bir kristal formunun varlığıdır (S. K. Das ve ark., 2021).

2.2.7 Demir Oksit

Manyetit (Demir Oksit), Fe_3O_4 kimyasal formülüne sahip, plastik dolgu malzemeleri arasında olan doğal bir demir oksittir. Bu madde, özellikle otomotiv sektöründe ses izolasyonu sağlayan yüksek yoğunluklu malzemelerin üretiminde tercih edilir ve ürünlere kaliteli bir görünüm kazandırır. X ışını ve diğer radyasyon türlerini engelleme yeteneği, kurşun içeren malzemelere güvenli bir alternatif olmasını sağlar. Yüksek hacimce özgül ısı kapasitesi sayesinde, yeşil bina tasarımlarında enerji depolama ve serbest bırakma işlevi görür. Mikrodalga ve indüksiyonla ısıtılabilme özelliği sayesinde pişirme uygulamalarında potansiyeldir. Isı iletkenliği, elektronik cihazlarda ısı yönetimi için idealdir, elektrik iletkenliği ise antistatik özellikler sağlar. Ayrıca manyetit, polimer zeminlerin kayma direncini artıran sert ve köşeli parçacıklardan oluşur. Mıknatıslara olan güçlü çekimi ile plastiklere manyetik fonksiyonlar ekleyebilir. Bu çok fonksiyonlu dolgu maddesinin, çeşitli uygulama alanlarında kullanımı artmaya devam etmektedir (DeArmitt, 2017).

2.3 Sentetik dolgu maddeleri

Sentetik dolgu maddelerine örnek olarak karbon siyahı, çökeltilmiş silika ve füme silika gösterilebilir.

2.3.1 Karbon siyahı

Karbon siyahı, ana element olarak karbon içeren bir sentetik malzemedir. Altıgen karbon halkalarından oluşan üç boyutlu tabakalar halindedir. Birbirine paralel olan karbon siyahı katmanları düzenli değil, eşmerkezli iç katmanlar şeklindedir. Genel olarak kauçuklarda takviye edici, renklendirici ve iletken bir dolgu olarak kullanılmaktadır.

Karbon siyahının çeşitleri arasında kanal siyahı, termal siyahı, fırın siyahı, asetilen siyahı ve lamba siyahı bulunmaktadır. Tipik özellikleri olarak yoğunlukları $1,7-1,9 \text{ g/cm}^3$, yağ emilimi $50-300 \text{ g/100 g}$, su süspansiyonunun pH'ı 2-8, spesifik yüzey alanı $7-560 \text{ m}^2/\text{g}$ ve birincil parçacık boyutu $14-250 \text{ nm}$ 'dir.

Karbon siyahı elde etmek için hidrokarbon içeren malzemelerin prolizi yapılır veya bu malzemeler yakılır. Partikül ve agrega büyüklüğü, karbon siyahı için çok önemli bir faktördür. Agrega boyutu, karbon siyahının özelliklerini belirlemektedir (Joseph ve ark., 2017; Miguel Martín-Martínez, 2002).

2.3.2 Çökeltmiş silika

Çökeltilmiş silikalar, aynı zamanda beyaz karbon siyahı olarak da adlandırılır. Üretimleri, bir sodyum silikat çözeltisinin genellikle sülfürik asit olmak üzere bir asitle reaksiyona sokulmasıyla gerçekleşir. 1 ton çökeltmiş silika üretimi için 5 ton civarında suyun buharlaşması ve ürünün kurutulması için harcanan enerjiden dolayı nispeten pahalı bir işlemdir.

Çökeltilmiş silikalar küçük boyut ve yüksek spesifik yüzey alanları sayesinde, elastomer uygulamaları için uygundur. Genellikle organo-silan birleştirme maddesi kullanılmak üzere, iyi bir polimer-dolgu arayüzey yapışmasının sağlanması için dolgu yüzeyinin kimyasal olarak işlenmesi gerekmektedir. Karbon siyahlarından farklı özellikleriyle beraber onlara benzer şekilde iyi takviye elemanlarıdır. (Rothon, 2017b).

2.3.3 Füme silika

Füme silika, silikon elastomerlerde takviye malzemesi olarak kullanılan niş ve yüksek fiyatlı bir dolgu maddesidir. Parçacık boyutu çok küçüktür ve amorf yapıdadır. Daha az kümelenmiştir. Daha az adsorbe edilmiş suya sahip olmakla birlikte hidroksil içeriği daha düşüktür. Çökeltilmiş silikaların aksine, genelde önceden kaplanmış halde satılır (Rothon, 2017b).

2.4 Çevre dostu dolgu maddeleri

Çevre dostu dolgu maddeleri, yeşil polimer kompozitlerin üretiminde kullanılır. Bu dolgu malzemeleri, doğada bozunabilen doğal kaynaklardan elde edilebileceği gibi (Gupta ve ark., 2023), atıkların işlenmesiyle de elde edilebilir. Özellikle atıkların dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesi, sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm adına çok önemlidir.

Endüstriyel, kentsel ve tarımsal atıkların çevreye olan zararları oldukça büyüktür ve aynı zamanda sağlık sorunlarına yol açabilirler. Hava, toprak ve su kalitesi gibi önemli çevresel unsurlar, özellikle endüstriyel atıklar tarafından ciddi şekilde etkilenebilir.

Atıkların çeşitliliği oldukça geniştir; örneğin, kâğıt hamuru ve kâğıt endüstrisi atıkları, tekstil endüstrisi atıkları, deri endüstrisi atıkları, inşaat ve yıkım atıkları, atık lastikler ve gıda atıkları gibi birçok farklı türde atık bulunmaktadır. Ancak, bu atıklar, belirli işlemlerden geçirilerek yeniden kullanılabilirler. Örneğin atıklar, polimer matrislerde

dolgu olarak kullanılabilirler. Bu yaklaşım, polimer malzemelerin maliyetini düşürürken aynı zamanda performanslarını da artırabilir. Bu şekilde, atıkların zararlı etkileri azaltılabilir ve çevre dostu bir yaklaşım benimsenmiş olur (Cabrera, 2021).

Belli işlemlerden geçirilerek elyaf veya toz formuna dönüştürülen atıklar, polimer matrislerde dolgu olarak kullanılmakta olup, bu kullanım sürecinde çeşitli modifikasyonlara tabi tutulabilmektedirler. Bu modifikasyonlar, dolgu malzemesi ile polimer arasında daha etkili bir etkileşim sağlayarak kompozitin daha ileri düzeyde bir performans sergilemesini sağlar. Bu gelişmiş performansın elde edilmesi için yapılan muameleler arasında kimyasal işlemler olan alkali ve asit muamelesi, esterleştirme ve silan muamelesi gibi seçenekler bulunmaktadır. Atık materyallerin karbonizasyonu, ısı vererek kurutma işlemi ve uyumlaştırıcı ilavesi gibi muameleler, tercih edilen yöntemler arasındadır. Bu şekilde, atıkların geri dönüşümü ve dolgu olarak kullanılması sürecinde çeşitli işlemler uygulanarak daha sağlam ve işlevsel kompozit malzemeler elde edilebilmektedir (O. Das ve ark., 2022).

Çevre dostu dolgular kullanılarak üretilen polimer kompozitler, çeşitli sektörlerde potansiyel olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Literatürde biyomedikal uygulamalar (Oladele IO & Isola BA, 2016a), otomobil bileşenleri (Prabhu L ve ark., 2019), paketleme uygulamaları (Jayaraman ve ark., 2023a), ve zemin kaplama uygulamaları gibi alanlarda kullanımlarının değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur.

Literatürdeki çevre dostu dolgular arasında kahve telvesi (da Silva ve ark., 2020), pirinç kabuğu (Arjmandi ve ark., 2015), mısır koçanı (Lima de Oliveira ve ark., 2020) ve hindistan cevizi kabuğu (Agunsoye ve ark., 2012) gibi örnekler bulunmakta olup, bu tez kapsamında dolgu maddesi olarak çörek otu posası tercih edilmiştir.

2.4.1 Çörek Otu Posası

Tek yıllık otsu bir bitki olan çörek otu, Ranunculaceae (düğün çiçeğigiller) familyasına mensuptur ve içerisinde toplam 20 tür barındırır. Genellikle Akdeniz'e kıyısı olan ülkelerde yaygın olarak bulunur. Türkiye'deki üretim miktarı, 2019 verilerine göre 3603 tona ulaşmıştır (Ayhan & Altınkaynak, 2022).

Geleneksel tıbbi göre dünya çapında birçok hastalığın (baş ağrısı, astım, soğuk algınlığı vb.) önlenmesi ve tedavisi için çörek otu tohumları kullanılmaktadır. Çörek otunun

tohumları, sadece sağlık açısından değil, aynı zamanda benzersiz lezzet ve aromasıyla da tanınır. Bu nedenle, mutfaklarda baharat ve çeşni olarak da sıkça kullanılırlar (Datta ve ark., 2012; Koşar & Özel, 2018)

Bunun yanı sıra tohumlar önemli miktarda yağ içerir ve bu yenilebilir yağdır. Çörek otu tohumu yağı, genellikle ekonomik pazarlarda göz ardı edilse de dini metinlerde sıkça geçmesi ve farmakolojik özellikleriyle dikkat çekmesi nedeniyle, giderek büyüyen bir niş pazar oluşturmaktadır (Bakhshabadi ve ark., 2017).

Çörek otu otu yağı üretiminden sonra, çörek otu posası atık olarak ortaya çıkmaktadır. (Güngör, 2023). Bu atık, farklı alanlarda değerlendirilebilir. Yapılan bazı çalışmalar göstermektedir ki çörek otu posası sulardan demir(III) iyonunun giderilmesinde (İşlek Coşkun, 2020), aktif karbon üretiminde (Aslan, 2021), polimer matrislerde dolgu olarak (Güngör, 2023), sulu çözeltilerden boyar madde giderici (Seçme & Savci, 2018), doğal gübre ve hayvan yemi olarak (Teymur ve ark., 2023) kullanılabilmektedir. Çörek otu tohumu ve posasının görselleri, şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 1 örek otu tohumu ve çörek otu posası (Ramadan, 2016; Seçme & Savci, 2018)

2.4.2 Kahve telvesi

Dünya genelinde kahveye karşı olan yüksek talep nedeniyle, günlük tüketilen kahve miktarı yaklaşık olarak sekiz milyon ton civarındadır. Kahve hazırlama işleminde, kahvenin %0,2’lik bir kısmı kullanılmakta olup geriye kalan kahve telvesi, atık olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, son yıllarda çevresel sorunlara neden olmaktadır. Geçmişte çoğunlukla yakılan, denize dökülen veya çöplüklere gömülen kahve taveleri, döngüsel ekonominin öneminin artmasıyla birlikte yeniden değerlendirilmeye

başlanmıştır.

Kahve telvesi, düşük maliyet ve bol miktarda bulunabilirlik gibi özellikleri sebebiyle, araştırma ve geliştirme faaliyetleri açısından dikkate değer bir konuma gelmiştir. Solucan gübresi olarak topraktaki biyodizel üretiminin yanı sıra, polimer matrislerde dolgu maddesi olarak kullanımı teşvik edilmektedir. Bu geri dönüşüm faaliyeti ile birlikte sürdürülebilir bir çevreye katkıda bulunmaktadır (da Silva ve ark., 2020; Yang ve ark., 2022a).

2.4.3 Pirinç kabuğu

Pirinç kabuğu selüloz bazlıdır ve bolca bulunabilmektedir. Çeşitli en boy oranlarında olup lifli bir yapısı vardır. Tokluğu, aşındırıcılığı, düşük kütle yoğunluğu ve hava koşullarına karşı direnci sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Potansiyel olarak enerji üretim kaynağı ve finansal sürdürülebilirlik konusunda yapılan araştırmalar ümit vadetmektedir. Bununla beraber pirinç kabuğunun endüstriyel kullanımı hala ekonomik açıdan sınırlıdır. Bu durum, pirinç kabuğu gibi malzemelerin daha etkin kullanımını araştırmak ve bu tür uygulamalar için maliyet-etkin süreçler geliştirmek amacıyla küresel çapta yoğun araştırmaların yapılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmalar, bu tür organik atıkların potansiyelini tam olarak ortaya çıkararak, onları değerli endüstriyel kaynaklara dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Bu bağlamda pirinç kabuğu, polimer matrislerde dolgu olarak kullanımı açısından adaydır. Pirinç kabuğunun dolgu olarak kullanıldığı yaygın polimerler polivinil klorid, polietilen, polipropilen ve polilaktik asit olarak sıralanabilir (Arjmandi ve ark., 2015).

2.4.4 Mısır Koçanı

Mısır koçanı, botanikte Zea mays olarak bilinen ve Poaceae familyasına ait olan mısır bitkisinin merkezi çekirdeğidir. Bu çekirdeğin görevi, mısır tanelerinin gelişmesine ve sabitlenmesine hizmet etmektir. Dünya genelinde yıllık mısır koçanı üretimi yaklaşık 185 milyon ton civarındadır. Bu sebeple polimer kompozitler gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda dolgu olarak kullanımı için zengin bir lignoselülozik atık kaynağı konumundadır. Esasen mısır, besin kaynağı olarak yetiştirilir ve üretim sürecinde atık olarak ortaya çıkan mısır koçanının ekonomik değeri henüz tam olarak anlaşılmamış olan tarımsal yan ürünler arasında yer almaktadır. 100 kg mısır koçanı için ortalama 18kg mısır

koçanı atık olarak ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların çevresel etkileri ve yeniden kullanım potansiyelleri hakkında endişeler oluşmaktadır. Bu sebeple mısır koçanı için kullanım yolları araştırmak ve bu gibi atıkları değerli kaynaklara dönüştürerek sürdürülebilirliğe katkı sağlamak önem arz etmektedir (Garadimani ve ark., 2015; Lima de Oliveira ve ark., 2020; Ramos ve ark., 2019).

2.4.5 Hindistan cevizi kabuğu

Global olarak her yıl yaklaşık 33 milyar Hindistan cevizi hasat edilmekte ve yalnızca %15'lik bir kısmı talaş ve fiber olarak kullanılmaktadır. Bu durum, çevre kirliliğini azaltmak ve doğal kaynakları daha verimli kullanmak için bu alanda aksiyon alınması gerektiğini göstermektedir.

Hindistan cevizi kabuğu tozu, doğal bir lignoselüloziktir ve polimerlerde takviye olarak kullanımı çok büyük bir potansiyele sahiptir. Kurutulmuş bir Hindistan cevizi kabuğu bileşim olarak selüloz, lignin, pentozan, kül ve uçucu madde içermektedir. Hindistan cevizi kabuğunun yüksek mukavemet ve modül gibi özellikleri sayesinde, eko kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanılabilirdiği bilinmektedir (Agunsoye ve ark., 2012; Nadzri ve ark., 2020).

BÖLÜM 3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

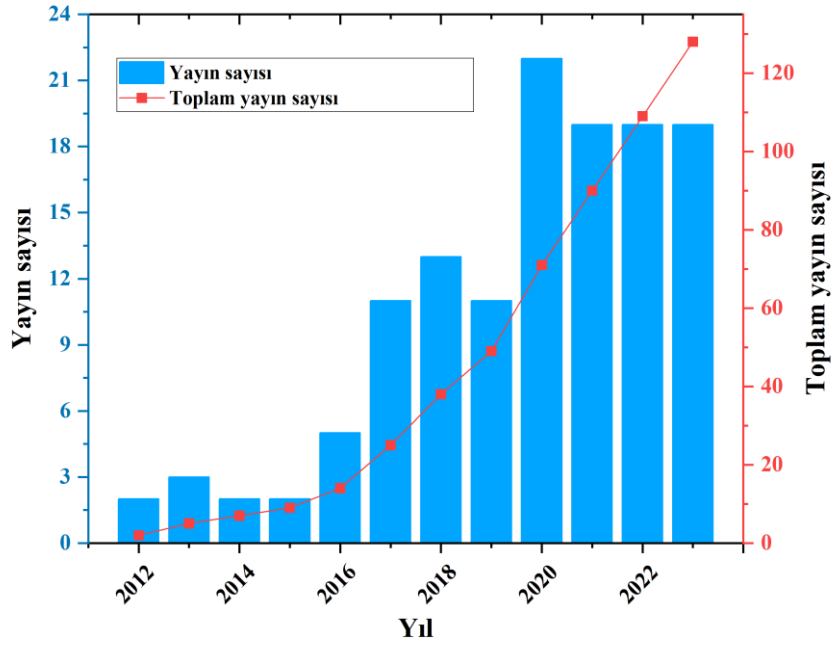
3.1. Epoksi Kompozitlerde Kullanılan Atık Esaslı Dolgular

Bu bölümdeki literatür taraması, yazarın International Journal of Adhesion and Adhesives dergisinde yayımlanan çalışmasından geniş ölçüde derlenmiştir (Ağcan & Kartal, 2025).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, atık maddelerin toz veya elyaf formuna getirilip epoksi reçinelerde dolgu olarak değerlendirilmesiyle ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanılmaktadır. Bu atıklar, endüstriyel, tarımsal, maden minerali, tehlikeli veya tehlikesiz atıklar gibi kategorilere ayrılabilir. Bu çalışmaların arkasındaki motivasyon, atık malzemeleri geri dönüştürerek çevreyi korumak, epoksi reçinenin maliyetini ve çevreye verdiği zararı düşürmek ve bazı durumlarda malzeme özelliklerini geliştirmektir (Chandra Dubey ve ark., 2021).

Atıklardan elde edilen dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş epoksi reçineler, geleneksel epoksi kompozitlere sürdürülebilir bir alternatif sunar ve tribolojik, elektriksel ve hem iç hem de dış mekan uygulamaları dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın kullanım için umut vaat etmektedir. (Naik ve ark., 2021). Kullanım alanlarına ilişkin bazı spesifik örnekler arasında zemin kaplamaları, otomotiv parçaları, ses yalıtım malzemeleri, paketleme, mobilya ve biyomedikal uygulamalar yer alabilir (Kartal & Ağcan, 2024).

Literatür incelendiğinde, atık kaynaklardan elde edilen dolguların epoksi matris içinde kullanımıyla ilgili çalışma sayısının artış gösterdiği gözlemlenebilir. Şekil 3.1'de, yıllar geçtikçe epoksi reçinede atıklardan elde edilen dolgu maddelerinin kullanımıyla ilgili yayın sayısındaki artışı gösteren bir grafik sunulmuştur. Veriler, başlıklarında, özetlerinde veya anahtar kelimelerinde "epoxy", "waste" ve "filler" terimlerini içeren makaleler filtrelenerek ScienceDirect arama motoru kullanılarak toplanmıştır.



Şekil 3. 1 Yıl bazında epoksi içerisinde atık kaynaklı dolgu malzemeleri üzerine yapılan yayın sayısı ve kümülatif yayın sayısı (Ağcan & Kartal, 2025).

Atık esaslı dolgu maddeleri, organik ve inorganik olarak da sınıflandırılabilir. Epoksi reçineler için inorganik dolgu maddelerinin bazı örnekleri arasında yumurta kabuğu, cam ve deniz kabuğu parçacıkları bulunur (Abdelmalik ve ark., 2019; Chowaniec & Ostrowski, 2018; Heriyanto ve ark., 2019). Organik parçacıklara ise örnek olarak fındık, ceviz kabuğu gibi tarımsal atıklar ve ağaç talaşları verilebilir. (R. Kumar ve ark., 2014; Sienkiewicz ve ark., 2022). Bu bölümde, epoksi reçinesi için atık esaslı dolgu maddeleri ele alınmakta ve detaylı olarak incelenmektedir. Tablo 1, epoksidede dolgu maddesi olarak kullanılan atıklar ve bu atıkların epoksidede geliştirdiği özellikler sunulmuştur.

Tablo 3. 1 Epoksi reçinelerde kullanılan atık esaslı dolgular ve gelişen malzeme özellikleri (Ağcan & Kartal, 2025)

Atık Esaslı Dolgular	Gelişen Malzeme Özellikleri	Kaynak
Çörek otu posası	Darbe mukavemeti	(Kartal & Ağcan, 2024)
Hidrometalurjik çinko tesisinin atıkları	Mekanik özellikler	(Rödelheimer & d'Almeida, 2001)
Karbon tozu atıkları	Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, darbe direnci, sertlik ve erozyon direnci	(Thomas ve ark., 2014)

Tablo 3. 1 devam Epoksi reçinelerde kullanılan atık esaslı dolgular ve gelişen malzeme özellikleri (Ağcan & Kartal, 2025)

Ahşap talaşı kömürü, çam kozalağı kömürü, plastik atık kömürü	Isıl kararlılık, elektriksel iletkenlik ve sertlik, Young modülü ve çekme gibi mekanik özellikler	(Ahmetli ve ark., 2013)
Atık fıstık kabuğu tozu	Mekanik ve termal özellikler	(Prabhakar ve ark., 2015)
Parçacıklı keçi kemiği	Mekanik ve aşınma özellikleri	(Oladele IO & Isola BA, 2016b)
Neem ağacı parçacıkları ve atık lastik kauçuk parçacıkları	Bükülme mukavemeti	(Diwedi ve ark., 2017)
Üre formaldehit atığı	Mekanik özellikler (sertlik, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü)	(Acikbas & Acikbas, 2017)
Atık granit tozu	Darbe dayanımı, nem emilimi	(Subhash ve ark., 2018)
Mermer tozu	Çekme dayanımı, eğilme dayanımı, dinamik mekanik özellikler, sertlik	(Fiore ve ark., 2018)
(Cam veya porselen) atık tozu	Isı iletkenliği, yalıtım özellikleri, akustik empedans, daha düşük su emilimi	(Fahad & Naser, 2018)
Atık cam tozu	Kaplama mukavemeti	(Chowaniec & Ostrowski, 2018)
Atık kauçuk lastik	Çekme dayanımı, kayma aşınma direnci	(Shivamurthy ve ark., 2018)
Hindistan cevizi kabuğu tozu, demirhindi kabuğu tozu	Mekanik özellikler	(Somashankar ve ark., 2018)
Kuars artıkları, kum, deniz kabuğu atıkları, dolomit, kireç taşı agregaları, beton atıkları ve kireç taşı tozu	Çizilme direnci hariç tüm mekanik özellikler	(Heriyanto ve ark., 2019)
Atık tavuk yumurtası kabuğu tozu	Çekme mukavemeti, ısı dağılımı, elektrik yalıtımı	(Abdelmalik ve ark., 2019)
EPMD ve lastik atık tozu	Mekanik ve termal özellikler	(Turkben, 2019)
Tatlı limon kabuğu	Çekme, eğilme ve termal özellikler açısından olumsuz etkilenirken, eğilme dayanımı ve modülü açısından kabul edilebilir performansa sahiptir.	(H. Sharma ve ark., 2019)
Atık çay lifleri	Çekme dayanımı, çekme modülü, eğilme dayanımı, eğilme modülü ve darbe dayanımı, ses emilim katsayısı	(Prabhu ve ark., 2019)
Tekstil endüstrisi atıkları	Termal kararlılık, DC iletkenliği	(Atif ve ark., 2020)
Kanlı Benekli Yüzücü Yengeç Kabuğu	Isıl kararlılık, çekme, eğilme, basınç, kesme, darbe ve sertlik özellikleri	(Kumaran ve ark., 2020)
Hindistan cevizi, ceviz ve bael meyvesi kabuğu	Mekanik özellikler (çekme dayanımı, eğilme dayanımı)	(Mohankumaradhy ve ark., 2020)
Atık cam tozu	Yüzeyden kopma dayanımı	(Chowaniec ve ark., 2020)
Elektronik atık	Çekme, eğilme, darbe mukavemeti ve sertlik	(Venkatakrishnan ve ark., 2020)
Lastik parçacıkları	Çekme, eğilme ve darbe dayanımı	(Yogeshwaran ve ark., 2021)
Tarımsal atık soya sapı lifleri	Mekanik performans (çekme, eğilme, darbe ve katmanlar arası kayma dayanımı), su direnci, termal kararlılık, azaltılmış termal genleşme katsayısı	(Vinod ve ark., 2021)

Tablo 3. 1 devam Epoksi reçinelerde kullanılan atık esaslı dolgular ve gelişen malzeme özellikleri (Ağcan & Kartal, 2025)

Elektronik atık	Çekme, eğilme, darbe mukavemetleri ve sertlik	(Quberk Jeeva Singh ve ark., 2021)
Balık kılıcı parçacıkları	Çekme ve eğilme dayanımı, termal kararlılık	(Hani ve ark., 2021)
Kenevirin atık lifleri	Isıl direnç, sertlik	(Gargol ve ark., 2021)
Atık Granit Tozu	Arttırılmış viskozite, temas açısı, çekme mukavemeti	(Chowaniec, 2021a)
Atık kireçtaşı tozu	Yüzeyden kopma dayanımı	(Chowaniec, 2021b)
Atık cam tozu	Sertlik değeri, elektriksel özellikler (direnç ve dielektrik sabiti)	(Buaphuen ve ark., 2021)
Atık granit tozu	Yüzeyden kopma dayanımı	(Kampa ve ark., 2022)
Endüstriyel atıklar	Mekanik özellikler (çekme dayanımı, eğilme dayanımı, katmanlar arası kayma dayanımı, darbe dayanımı ve sertlik)	(Mayana ve ark., 2022)
Tasar ipek elyaf atığı	Boşluk oranları, su emilimi, çekme, eğilme ve darbe dayanımı, sertlik değeri, azaltılmış özgül aşınma oranları	(Ranakoti ve ark., 2022)
Atık kahve telvesi	Geliştirilmiş alev geciktiricilik ve azaltılmış toksik gazlar	(Yang ve ark., 2022b)
Atık mermer tozu parçacıkları ve tamarind kabuğu tozu	Çekme ve eğilme kabiliyetleri	(Karthikeyan ve ark., 2022)
Zeytin ağacı yaprağı tozu ve ananas yaprağı lifi	Darbe dayanımı, eğilme dayanımı ve modülü, daha yüksek depolama modülü, daha düşük kayıp modülü ve daha düşük sönümleme	(Senthilkumar ve ark., 2022)
Atık yumurta kabuğundan elde edilen CaCO ₃	Dielektrik sabiti ve elektriksel iletkenlik	(Aigbodion, 2022)
Nar Kabuğu Tozu	Mekanik özellikler (darbe, eğilme ve çekme dayanımı)	(Saikumar Reddy ve ark., 2022)
Atık kireçtaşı tozu	Uygun yüzeyden kopma dayanımı, viskozite, sertlik	(Chowaniec-Michalak, Czarnecki, Sadowski, ve ark., 2022)
Cam Atık Parçacıkları	Mekanik özellikler (basınç dayanımı, Young modülü, Vickers sertliği)	(Kadhim ve ark., 2022)
Atık kuvars tozu	Kabul edilebilir yüzeyden kopma dayanımı	(Chowaniec ve ark., 2022)
Atık lastikler ve atık tekstil	Isı iletkenliği ve ses emilim katsayısı, basınç özellikleri, tokluk	(Kanta Mahapatra ve ark., 2022)
Atık granit tozu	Yüzeyden kopma dayanımı	(Chowaniec-Michalak, Czarnecki, & Sadowski, 2022)
Ağaç (Milletia pinnata) yaprağı tozu	Çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe dayanımı ve sertlik.	(Mathenulla Shariff ve ark., 2023)

Tablo 3. 1 devam Epoksi reçinelerde kullanılan atık esaslı dolgular ve gelişen malzeme özellikleri (Ağcan & Kartal, 2025)

Atık mermer tozu ve muz lifi	Maksimum basma gerilmesi, basma gerinimi ve aşınma oranı	(Jayaraman ve ark., 2023b)
Muz lifi kumaş ve atık CD tozu	Mekanik özellikler (çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımı)	(Immanuel Durai Raj ve ark., 2023)
Atık kuvars tozu	Zararlı içeriklerin azaltılması, kabul edilebilir yüzeyden kopma dayanımı, maliyet	(Chowaniec ve ark., 2023)
Granit tozu atıkları	Isı iletkenliği, yüzey direnci, hacim direnci, bozunma gerilimi ve dielektrik dayanımı	(Arumugam ve ark., 2023)
Atık mermer tozu	Çekme, eğilme, sertlik ve su emme özellikleri	(Priyadarshini ve ark., 2023)
EPDM ve lastik atıkları	Çekme dayanımı, termal kararlılık, elektriksel iletkenlik ve azaltılmış yanıcılık, kopma uzaması, çekme dayanımı, e-modülü	(Temiz ve ark., 2023)
Atık kuvars-feldspat tozu	Yüzeyden kopma dayanımı, termal şoktan kaynaklanan delaminasyon riskinin azaltılması	(Krzywiński ve ark., 2023)
Kırmızı muz boş meyve salkımlarından elde edilen selüloz nanofiberler	Çekme, eğilme ve darbe dayanımları, termal özellikler, sertlik	(Rajan ve ark., 2023)
Hindistan cevizi lifi ve şeker kamışı ile neem ağacı tozu	Mekanik özellikler (çekme, eğilme, darbe ve sertlik)	(Dattatreya ve ark., 2023)
Granit tozu ve mermer tozu	Fiziksel ve mekanik özellikler, aşınma direnci	(Maluga ve ark., 2023)
Yer fıstığı kabuğu	Mikro sertlik, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve katmanlar arası kayma dayanımı	(Soni ve ark., 2023)
EPDM ve lastik atık tozu	Mekanik ve termal özellikler	(Turkben ve ark., 2023)
Hurma çekirdeği ve Hindistan cevizi kabuğu tozu	Aşınma direnci, sertlik	(Sathees Babu ve ark., 2023)
Kestane ağacı talaşı	Çekme, sertlik özellikleri	(Kartal & Özcan, 2023)
Fıstık kabuğu	Maksimum çekme ve eğilme mukavemeti, sertlik, yoğunluk	(Özen ve ark., 2024)
Lif atıkları (pamuk, hindistan cevizi ve şeker kamışı)	Ses absorpsiyon katsayısı, darbe ve eğilme dayanımları, ısıl direnç, ısıl yayınlılık, ısıl genleşme katsayısının azalması	(Hassan ve ark., 2020)
Atık mermer tozu ve kısa muz lifi	Eğilme modülü	(Arunkumar ve ark., 2023)

Tablo 3.1'e bakıldığında, atık dolgu ve polimer kombinasyonlarını tasarlamak için geniş bir olasılık yelpazesi olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi, dünya çapında birçok farklı atık malzeme ve polimer türü bulunması olarak açıklanabilir. Bu dolgular, tekil kullanımın yanı sıra hibrit olarak da polimer matris içine dahil edilebilir. Bunların sonucu olarak, ekolojik yaklaşım arayışları ve ekonomik faydalar gibi teşvik edici

unsurların neticesinde, ilerleyen yıllarda bu konu hakkında daha fazla yayın yapılabileceği söylenebilir.

3.2 Epoksilerde Parçacık Oranının Etkisi

Parçacık oranının epoksi reçinelerin mekanik (Thomas ve ark., 2014), termal, su emilimi, yalıtım (Fahad & Naser, 2018), ve elektriksel (Abdelmalik ve ark., 2019) özellikler gibi özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Kullanılan dolgu türüne bağlı olarak, dolgu oranı arttıkça bu özelliklerde iyileşmeler veya bozulmalar olabilir. Artan orandan kaynaklanan bozulma etkisi genellikle matris içindeki parçacıkların kümelenmesine ve düzensiz dağılmasına atfedilir (Abdelmalik ve ark., 2019). Dolgu maddelerinin aglomerasyonu kompozitlerde gözenekler ve kabarcıklar oluşturabilir ve bu da kompozitin özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir (Kartal & Özcan, 2023). Ancak malzeme özelliklerindeki bu bozulmalar, hazırlanan kompozitleri işe yaramaz hale getirmeyebilir. Yüksek performansın kesin bir gereklilik olmadığı alanlarda, azaltılmış kompozit maliyeti ve çevre dostu olma gibi avantajlar sağladıkları için kullanılabilirler (Chowaniec-Michalak, Czarnecki, Sadowski, ve ark., 2022). Epoksi reçinelerde kullanılan atık esaslı dolgu oranının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi, literatürdeki birçok çalışmada araştırılmıştır.

Kartal ve Ağcan (Kartal & Ağcan, 2024) yaptıkları çalışmada çörek otu posasını öğütüp toz haline getirdiler ve epoksi reçinede dolgu olarak kullandılar. Sonuç olarak %5, 10 ve 15 oranlarında kullanılan çörek otu posası, epoksi reçinenin darbe mukavemetini geliştirdi. Dolgunun bundan fazla oranlarda kullanılması, darbe mukavemetini düşürdü.

Thomas ve ark. (Thomas ve ark., 2014) laminat kompozitleri kesti ve epoksi matrisinde kullanılmak üzere karbon tozu atığı elde etti. Atık dolgu oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelediler ve oranları %5, %10 ve %20 olarak seçtiler. Atığın epoksi matrisine dolgu maddesi olarak eklenmesi basınç dayanımını, eğilme dayanımını, darbe direncini, sertliği ve erozyon direncini iyileştirdi.

Diwedi ve ark. (Diwedi ve ark., 2017) epoksi reçinede dolgu olarak kullandıkları neem ağacı ve atık lastik parçacıkları oranının su emilimi, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çekme dayanımının, dolgu oranındaki artışla azaldığı gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı açısından %10 neem ağacı, lastiğe kıyasla üstün

performans gösterdi. Ancak dolgu oranı arttıkça, numunenin kırılabilirliği ve kauçuk parçacıklarının epoksi reçineyle zayıf bağlanması nedeniyle eğilme özellikleri azaldı. Ek olarak, su emilimi artan bir eğilim gösterdi.

Subhash ve ark. (Subhash ve ark., 2018) epoksi ve granit tozunda oluşan kompozitler geliştirilerek mekanik özellikleri ve nem emilim karakteristiklerini araştırdılar. Dolgu oranları %10, %20 ve %30 olarak belirlendi. Nem emiliminin düşük olduğu bulundu. Mekanik özellikler kabul edilebilir bulundu. Ancak %20 dolgu eklenmesinin ardından kompozitin sertliğinde bir azalma gözlemlendi. Sonuç olarak, %40'ı aşan bir dolgu eklenmesi önerilmemiştir.

Fahad ve ark. (Fahad & Naser, 2018) epoksi reçinesinde atık cam ve porselen atık tozlarını ayrı ayrı kullanarak epoksinin yalıtım özelliklerini geliştirdiler. Dolgu maddesi içeriğinin etkisi kapsamlı bir şekilde incelendi. Dolgu maddelerinin eklenmesi, epoksinin yalıtım özelliklerinde bir iyileşmeyle sonuçlandı. Her iki toz için de dolgu maddesi içeriğinin artmasıyla, kompozitlerin akustik empedansı daha yüksek yoğunluk nedeniyle arttı. Cam tozu içeriği arttıkça, termal iletkenlik azaldı. Bunun tersine, porselen tozu için, tozun eklenmesiyle termal iletkenlik arttı. Su emilim testlerinin sonuçlarına göre, porselen tozu dolgu maddesi içeriğindeki artışla birlikte, kompozit daha düşük su emilimi sergiledi.

Chowaniec ve ark. (Chowaniec & Ostrowski, 2018) epoksi reçinesine çeşitli ağırlık oranlarında atık cam tozu ekleyerek epoksi ile beton temel arasındaki yapışma özelliklerini geliştirmeyi amaçlamıştır. Atık cam tozu, cam mikro kürelerin üretiminden elde edilmiştir. Kaplamadan önce, beton alt tabakaların yüzeyleri bir taşlama işleminden geçirilmiştir. Kaplama ile alt tabaka arasındaki yapışma için cam tozunun optimum ağırlık oranının %40 olduğu belirlenmiştir.

Abdelmalik ve ark. (Abdelmalik ve ark., 2019) elektrik ve elektronik güç sistemlerinde değerlendirme için yalıtım malzemesi geliştirme amacıyla karşılaştırmalar yaparak, epoksi içindeki atık tavuk yumurtası kabuğu tozu ve TiO_2 nanopartiküllerinin ağırlık yüzdesi üzerinde ayrı ayrı bir araştırma yürüttüler. Çalışma, mekanik ve dielektrik özelliklerin incelenmesini kapsıyordu. Dolgu maddelerinin %1 ve %2 ağırlık yüzdeleri için, TiO_2 takviyeli epoksi kompozitler üstün çekme mukavemeti gösterdi. Bununla birlikte, yumurta kabuğu tozu dolgulu kompozitler %3, %4 ve %5 dolgu ilavelerinde daha

iyi çekme mukavemeti gösterdi. Özellikle, en iyi çekme mukavemetine sahip kompozit, epoksi matrisinde %2 TiO₂ içeren kompozitti. Yumurta kabuğu tozu/epoksi kompozitinin daha düşük çekme mukavemeti, matristeki yumurta kabuğu parçacıklarının boyutuna ve dağılımına bağlandı. Yumurta kabuğu tozu/epoksi kompozitlerinin ısı iletkenliğinin tüm dolgu yüklemelerinde daha iyi olduğu ve bunun da gelişmiş ısı dağıtma özelliklerini gösterdiği gözlemlendi. Dielektrik sabiti epoksi/yumurta kabuğu tozu kompoziti için üstündü ve kayıp tanjantı karşılaştırılabilirdi. Yumurta kabuğu tozu kompozitinin iletkenliğinde %3'e kadar bir azalma vardı, bu da iyi elektriksel yalıtım özelliklerini gösteriyordu.

Turkben (Turkben, 2019), atık lastik tozu ağırlık oranlarının, epoksi karışımları üzerindeki etkisini incelemiştir. Atık kauçuk ve EPDM tozu karşılaştırıldığında, atık kauçuk tozu ile hazırlanan kompozitler en uygun mekanik ve termal özellikleri sergilemiştir. Dolgu maddelerinin ağırlık oranları söz konusu olduğunda, EPDM ve lastik tozları için sırasıyla %20 ve %30 en uygun oranlar olarak gözlemlenmiştir.

Sharma ve ark. (H. Sharma ve ark., 2019) %5, %10 ve %15'lik değişen ağırlık yüzdelerine sahip C limetta (mosambi) kabuğu parçacıkları kullanarak bir epoksi kompozit ürettir. Çalışma mekanik ve termal özelliklere odaklandı. Kompozitler, özellikle çekme ve eğilme özellikleri açısından dolgu içeriğindeki artıştan olumsuz etkilendi. Ek olarak, dolgu maddesinin dahil edilmesi kompozitlerin termal özelliklerini karakterize edildiğinde olumlu sonuçlar vermedi. Epoksi özelliklerindeki azalmaya rağmen, hazırlanan kompozitlerin eğilme dayanımı ve modülü açısından kabul edilebilir performans gösterdiği belirlendi. Bu kompozitler ayrıca kullanılan epoksi oranında azalma ve atıkların değerlendirilmesi gibi avantajlar sunmuş oldu.

Chowaniec ve ark. (Chowaniec ve ark., 2020) epoksiye farklı ağırlık oranlarında atık cam tozu eklenmesinin etkisini inceleyerek epoksinin yüzeyden kopma dayanımını iyileştirdiler. Epoksi kaplama için öğütülmüş ve ham yüzey olmak üzere iki tip çimentolu alt tabaka kullanıldı. Yüzeyden kopma dayanımı, %7,4 ile %35,9 ağırlık oranı arasında cam tozu eklenmesiyle arttırıldı. Ham yüzey için daha düşük bir ortalama yüzeyden kopma dayanımı değeri vardı. Bu nedenle, yüzeyin taşlanması yüzeyden kopma dayanımını iyileştirdiğinden bahsedildi. Yüzeyden kopma dayanımının iyileşmesinin

nedeni, cam tozunun kaplamadan alt tabakaya nüfuz etmesi, gözenekleri doldurması ve alt tabakanın yüzeye yakın katmanını güçlendirmesi olarak açıklandı.

Venkatakrishnan ve ark. (Venkatakrishnan ve ark., 2020) epoksi matrisinde dolgu maddesi olarak cam elyaflarla karıştırılmış elektronik atık parçacıklarının değişen ağırlık yüzdelelerini (%5, %10, %15, %20) kullandılar. Çalışmaları, %15'lik bir elektronik atık dolgu maddesi içeriğinin en yüksek mukavemeti gösterdiği sonucuna vardı.

Chowaniec (Chowaniec, 2021b) matris olarak epoksi ve dolgu maddesi olarak atık kireçtaşı tozu kullanarak farklı dolgu oranlarının kompozit üzerindeki etkisini inceledi. Amaç, atık malzemenin geri dönüşümü ve kabul edilebilir yapışkanlık özellikleri gösteren bir zemin kaplaması geliştirmektir. İki tür beton alt tabaka kullanıldı; biri ham yüzeyli, diğeri ise taşlanmış. Çalışma, toz için %29'luk bir ağırlık oranına kadar tüm kaplamaların her iki tür beton alt tabaka için de kabul edilebilir yüzeyden kopma dayanımları gösterdiği sonucuna vardı.

Buaphuen ev ark. (Buaphuen ve ark., 2021) evsel atık camı toz haline getirdikten sonra, epoksi takviyesi için farklı ağırlık yüzdelinde dolgu maddesi olarak kullandılar. Tozun eklenmesi, epoksi reçinesinin sertlik değerinde bir artışa neden oldu. Elektriksel özellikler açısından, epoksiye %1 ağırlıkça cam tozu eklenmesiyle hem direnç hem de dielektrik sabiti önemli ölçüde arttı. Ancak, %1 ağırlıkça tozdan daha fazla eklenmesi, matriste tozun aglomerasyonuna ve zayıf dağılımı nedeniyle elektriksel özelliklerin bozulmasına yol açtı. Bu atığın, özellikle elektriksel yalıtım gerektiren uygulamalarda ticari SiO₂ tozuna uygun bir alternatif olabileceği sonucuna varıldı.

Kampa ve ark. (Kampa ve ark., 2022) %10'luk artışlarla %10 ağırlıktan %60'a kadar değişen ağırlık yüzdelinde atık granit tozu ekledikleri epoksinin yapışkan özelliklerini inceledi. Bu dolgu oranları arasında, gelişen çekme dayanımına göre optimum değerlerin %10 ağırlık veya %20 ağırlık olduğu belirlendi. Epoksi/granit toz kompozitinin çekme dayanımındaki bu artış, bu oranlardaki tozların, beton alt tabakanın gözeneklerini doldurup yüzeyine nüfuz etme yeteneğine atfedildi.

IO ve ark. (Oladele IO & Isola BA, 2016b) biyomedikal uygulamalar için epoksi reçineye farklı ağırlık yüzdelinde eklenen keçi kemiği parçacıklarının etkisini araştırdı. Ağırlık yüzdeleri %2 ile %20 arasında değişiyordu. Mekanik ve aşınma özelliklerinin optimum kombinasyonu, ağırlıkça %16 keçi kemiği tozu içeren epoksi kompozitte gözlemlendi.

Chowaniec ve ark. (Chowaniec-Michalak, Czarnecki, Sadowski, ve ark., 2022) zemin kaplama malzemesi hazırlamak için epoksi reçinede dolgu maddesi olarak değişen ağırlık yüzdelerinde (%0, 7, 14, 19, 24, 29) atık kireçtaşı tozu kullandılar. Kaplama için alt tabaka beton olarak seçildi. Epoksi içindeki dolgu oranının artmasıyla, kaplamanın alt tabakaya yayılma kabiliyeti kısıtlanmadan reçinenin viskozitesi arttı. Sertlik değerlerinde de artış oldu. Bunun aksine, çekme, eğilme ve yüzeyden kopma dayanımları kireçtaşı tozu konsantrasyonunun artmasıyla azaldı. Ancak, dolgulu epoksi reçinelerinin yüzeyden kopma dayanımı değerleri, minimum ortalama değer olarak bilinen 1,5 MPa'nın üzerinde olduğu için yine de uygun bulundu.

Chowaniec ve arkadaşları tarafından yürütülen başka bir çalışmada (Chowaniec ve ark., 2023), epoksi reçineye değişen ağırlık yüzdelerinde atık kuvars tozu ilave edilmiştir ve kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak, tüm numunelerin yüzeyden kopma dayanımı kabul edilebilir düzeyde olup, yapıştırıcı özelliklerinde herhangi bir bozulma gözlenmemiştir. Ek olarak, atık kuvars tozunun dahil edilmesi hem malzeme maliyetinde hem de epoksinin zararlı bileşenlerinde bir azalmaya yol açmıştır.

Arumugam ve ark. (Arumugam ve ark., 2023) iki farklı epoksi matris türüne ayrı ayrı granit tozu ilavesinin değişen ağırlık yüzdelerinin etkisini araştırdı. Çalışma, kompozitlerin termal iletkenliğinin, yüzey özdirencinin, hacim özdirencinin, bozulma voltajının ve dielektrik dayanımının granit tozu oranındaki artışla arttığı sonucuna vardı.

Kartal ve Özcan, (Kartal & Özcan, 2023) matris olarak epoksi ve dolgu maddesi olarak kestane talaşı kullandılar. Dolgunun ağırlık oranları %5, %10, %15 ve %20 olarak belirlendi ve kompozitler hazırlandı. Sonuçlara göre %10 dolgu oranı, kompozitin mekanik özelliklerini ve sertlik değerini artırdı. Bu oranda kullanılan dolgu maddesi, matris içinde homojen bir dağılım gösterdi. Ayrıca, dolgu maddesi içeriği arttıkça talaşın değişen boyutlarından dolayı Izod darbe dayanımının azaldığı tespit edildi.

Ozen ve ark. (Özen ve ark., 2024) epoksi reçineye %1 ve %2 oranlarında fıstık kabuğu tozu kattılar. Artan toz oranı, maksimum çekme ve eğilme mukavemetinin, sertliğin ve yoğunluğun artmasına neden oldu.

3.3 Epoksilerde Parçacık Boyutunun Etkisi

Epoksi/atık esaslı toz kompozitlerin özelliklerini etkileyen temel faktörlerden biri de kullanılan tozun parçacık boyutudur. Parçacık boyutundaki azalma, mekanik özellikleri geliştirir (Rödelheimer & d'Almeida, 2001). Gelişen bu özelliklere örnek olarak eğilme mukavemeti ve modülü (Acikbas & Acikbas, 2017), sertlik (Shivamurthy ve ark., 2018) ve yüzeyden kopma dayanımı (Chowaniec, 2021a) verilebilir. Ayrıca epoksi reçinenin alev geciktiricilik özellikleri (Yang ve ark., 2022b), epoksi reçineye dahil edilen dolgu maddelerinin türüne ve partikül boyutlarına bağlı olarak geliştirilebilir. Parçacık boyutunun epoksi kompozitlerdeki bu spesifik özellikleri nasıl etkilediğiyle ilgili bir çok çalışma mevcuttur.

Rödelheimer ve ark. (Rödelheimer & d'Almeida, 2001) epoksi reçinede dolgu maddesi olarak bir hidrometalurjik çinko tesisi atığı kullandı. Atık, çamur olarak elde edildi ve kurutulduktan sonra toz halindeydi. Tozlar aglomere halde olduğundan, eleme yoluyla parçacık boyutları optimize edildi. %10 ila %50 hacim fraksiyonlarında epoksi/atık dolgu maddesi hazırlandılar. Altı farklı parçacık boyutu kullanıldı. Parçacık boyutunun azalmasıyla mekanik özelliklerin arttığı bulundu. Bu atığın epoksi matrislerde kullanılabileceği sonucuna varıldı.

Açıkbaş ve ark. (Acikbas & Acikbas, 2017) atık endüstriyel klozet kapağı tozu parçacık boyutunun, epoksi üzerindeki etkisini inceledi. Parçacık boyutundaki artış, daha yüksek eğilme mukavemeti ve eğilme modülü, aynı zamanda gözeneklilikte bir azalma ile sonuçlandı.

Shivamurthy ve ark. (Shivamurthy ve ark., 2018) yaptıkları çalışmada epoksi matrise dolgu maddesi olarak atık lastik kauçuğu dahil etmişler, değişken parametreler olarak dolgunun parçacık boyutu ve ağırlık yüzdesini dikkate almışlardır. Kauçuk parçacıklarının ağırlık yüzdeleri %15, %30 ve %45, parçacık boyutları 100 µm, 200 µm ve 300 µm olarak belirlenmiştir. Tüm parçacık boyutları için, %15 ağırlıkça dolgu maddesi ilavesinin çekme mukavemetinde iyileşmeye, bundan fazla ilavenin ise azalmaya yol açtığı sonucuna varıldı. Hem kauçuk parçacık boyutunun hem de ağırlık oranının sinerjik etkileri nedeniyle Young modülünde bir azalma gözlemlendiği ifade edildi. %15 ve %30 dolgu maddesi ilaveleri için, parçacık boyutundaki artış daha yüksek sertlikle ilişkilendirildi. Bu, daha ince parçacıkların daha homojen dağılımına ve daha

düşük sertliğe bağlandı.

Quberk Jeeva Singh ve ark. (Quberk Jeeva Singh ve ark., 2021) elektronik atık (kompakt disk) parçacık ilavesinin ve boyutunun kenar lifi/epoksi kompozitlerinin özellikleri üzerindeki etkisini araştırdı. Atık parçacıklar 300 μ , 425 μ ve 600 μ boyutlarında kategorilere ayrıldı. 600 μ parçacık boyutuna sahip atık tozu içeren kompozit, üstün çekme ve darbe özellikleri sergiledi. Bu, atık CD tozunun 300 μ ile 600 μ arasında eleme işlemi sonucunda alüminyum ve akrilik plastiğe kıyasla daha yüksek oranda polikarbonat bulunmasına bağlandı. Tersine, 300 μ parçacık boyutuna sahip atık tozuyla hazırlanan kompozit, daha yüksek alüminyum ve akrilik plastik içeriği nedeniyle gelişmiş eğilme mukavemeti gösterdi.

Chowaniec (Chowaniec, 2021a) atık granit tozu/epoksi kompozitleri geliştirdi. Atık granit tozu iki farklı grup halinde ayrı olarak kullanılmış olup, parçacık boyutu dağılımlarına göre biri daha yüksek oranda ince parçacıklara sahipken, diğeri daha kaba parçacıklara sahipti. Epoksi reçinede %7 ila %29 arasında değişen bu tozların çeşitli ağırlık yüzdeleri, epoksi kaplama malzemesinin viskozitesi, temas açısı ve çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini analiz etmek için incelendi. Her iki toz grubunda artan içerikle viskoziteyi benzer şekilde artırdığı, bunun da parçacık boyut dağılımının viskozite üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğunu gösterdiği sonucuna varıldı. Özellikle, boyut dağılımlarında daha yüksek oranda ince parçacık bulunan kompozitler, daha kaba parçacıklara sahip olanlara kıyasla daha iyi yüzeyden kopma dayanımı gösterdi. Viskozite ve temas açısının yüzeyden kopma dayanımı üzerindeki etkisi düşünüldüğünde hem viskozitede hem de temas açısında bir artışın başlangıçta çekme mukavemetinde bir azalmaya yol açtığı, ardından viskozite ve temas açısında daha fazla artışla başlangıç değerine geri dönüldüğü gözlemlendi.

Yang ve ark. (Yang ve ark., 2022b) epoksi/atık kahve telvesi kompozitlerini, farklı parçacık boyutlarında telve kullanarak üretti. Dolgu maddesinin matrise dahil edilmesi ve ortalama boyutunun azaltılması, epoksinin alev geciktiriciliğini iyileştirdi ve toksik gazları önemli ölçüde azalttı. Bu durum, daha küçük boyutlardaki dolgu parçacıklarının, matriste daha iyi bir dağılım sergileyebilmesiyle ilişkilendirildi. Kompozit, dolgu maddesi taneciklerinin ortalama boyutunun azalmasıyla birlikte pik ısı salınım oranında ve toplam ısı salınımında bir azalma gösterdi. Ayrıca, daha ince dolgu maddesinin dahil

edilmesiyle mekanik özelliklerde önemli bir azalma olmadı.

Chowaniec ve ark. (Chowaniec ve ark., 2022) epoksi reçinenin yapıştırıcı özelliklerinin, değişen ağırlık yüzdelerinde ve parçacık boyutlarında eklenen atık kuvars tozundan nasıl etkilendiğini araştırdılar. Yüzeyden kopma dayanımı testinden sonra, yapıştırıcı özelliklerinin tüm numuneler için kabul edilebilir olduğu bulundu. En iyi ağırlıklı ortalama parçacık boyutunun, ara parçacık boyutu olarak tanımlanan 26 μm olduğu belirlendi. Ayrıca, yapıştırıcı özellikleri üzerinde parçacık boyutunun etkilerini daha da açıklığa kavuşturmak için 0 ile 5 μm arasında daha yüksek parçacık içeriğine sahip tozlar kullanılarak daha fazla test yapılması gerektiğinden bahsettiler.

3.4 Epoksilerde Partikül Yüzey Muamelesinin Etkisi

Atık esaslı partikül dolgular, yüzey muamelesi yoluyla modifiye edilebilirler ve bu sayede epoksi reçinenin özelliklerini daha fazla geliştirebilirler. Bu yüzey muamelesi yöntemleri arasında plazma muamelesi gibi fiziksel yöntemler (Fiore ve ark., 2018) bulunduğu gibi, alkali muamelesi gibi kimyasal yöntemler (Prabhakar ve ark., 2015) de bulunmaktadır. Parçacık yüzey muamelesinin amacı, malzeme özelliklerini geliştirmek için polimer matris ile dolgu partikülleri arası etkileşimi iyileştirmek ve matristeki boşlukları azaltmaktır (Kumaran ve ark., 2020).

Prabhakar ve ark. (Prabhakar ve ark., 2015) atık fıstık kabuğu tozunu epoksi matriste dolgu olarak kullanmadan önce %2, %5 ve %7 konsantrasyonlarında alkali ile muamele ettiler. Dolgu maddesi ağırlık oranları %5, %10 ve %15 olarak belirlendi. Alkali ile muamele, dolgu maddesi-matris yapışmasında iyileşmeye yol açarak daha iyi çekme dayanımı sağladı. Alkali konsantrasyonu ve dolgu maddesinin ağırlık oranları arttıkça çekme dayanımı da kademeli olarak iyileşti. %7 alkali muamelesi görmüş ve %15 fıstık kabuğu tozu eklenmiş epoksi kullanımının en iyi mekanik ve termal özellikleri sergilediği sonucuna varıldı.

Fiore ve ark. (Fiore ve ark., 2018) mermer tozunu plazma ile muamele edip epoksi içerisinde dolgu maddesi olarak kullandılar. Ayrıca, ağırlıkça %10, %20 ve %30 olmak üzere farklı dolgu maddesi oranlarının etkileri araştırıldı. Dolgu maddesi içeriğindeki artışla birlikte hem muamele edilmiş hem de muamele edilmemiş dolgu maddeleriyle hazırlanan kompozitlerde darbe dayanımı azaldı. Malzemenin sertliği daha yüksek dolgu

maddesi içeriğiyle arttı ve tozların plazma muamelesi bu sertliği daha da artırdı. Muamele edilmemiş tozlar, artan dolgu maddesi içeriği ve epoksi/tozun düşük uyumluluğu nedeniyle artan boşluk içeriğine atfedilen çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve dinamik mekanik özelliklerde bir azalmaya yol açtı. Plazma muamelesinden sonra, dolgu maddesi ve epoksi arasındaki gelişmiş arayüz yapışması nedeniyle çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve dinamik mekanik özellikler iyileşti. Toz içeriğindeki artışla birlikte gözlenen bozunma oranı ve ağırlık kaybındaki azalma, daha düşük miktarda epoksiye bağlandı. Ancak, plazma muamelesinin kompozitin termal davranışı üzerinde hiçbir etkisi olmadı.

Heriyanto ve ark. (Heriyanto ve ark., 2019) atık tozları muamele etmek için amino bazlı bir bağlayıcı madde kullandı. Bu sayede inorganik olan dolgu ile organik olan matris arasındaki zayıf bağ gelişti ve epoksi reçinenin eğilme mukavemeti önemli ölçüde arttı. Bu işlemin bir sonucu olarak, çizilme direnci hariç tüm mekanik özelliklerde iyileşme görüldü.

Kumaran ve ark. (Kumaran ve ark., 2020) portunus sanguinolentus kabuğu atık tozunu, kloroform ve metanol çözeltisi, sodyum hidroksit ve hidroklorik asit kimyasalları ile ayrı ayrı muamele etti. Bu işlem, yağ giderme, deproteinizasyon, dekarbonizasyon ve deasetilasyona yönelikti. Hem işlem görmüş hem de işlem görmemiş atık tozlar, jüt kumaş takviyeli epoksi içinde ayrı ayrı dolgu maddesi olarak kullanıldı. Tozun ağırlık yüzdesi %10 olarak belirlendi. Ek olarak, karşılaştırma amacıyla toz ilavesi olmayan jüt kumaş takviyeli epoksi kompozit üretilti. Kimyasal olarak muamele edilmiş toz içeren kompozit, diğer kompozitlere kıyasla çekme, eğilme, basınç, kesme, darbe ve sertlik özelliklerinde iyileşmeler gösterdi. Bu iyileşme, dolgu maddesi-matris etkileşiminin iyileştirilmesi ve boşluk azaltılmasından kaynaklandı. Kimyasal muamele yoluyla proteinin giderilmesi ve tozda kalsiyum karbonatın bulunması, muamele edilmiş toz içeren kompozitte gözlemlenen daha yüksek termal kararlılığa katkıda bulundu.

Yogeshwaran ve ark. (Yogeshwaran ve ark., 2021) jüt lifi, abaka lifi ve atık lastik parçacığı kullanarak el yatırması tekniğiyle epoksi hibrit kompozitler hazırladılar. Takviye malzemelerinin ön muamelesi gerçekleştirildi ve ön muamelenin kompozit özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Liflerin üzerindeki bağlayıcı tabakanın, lif özelliklerine olan etkisini ortada kaldırmak için alkali muamelesi gerçekleştirildi. Kauçuk parçacıkları ile matris arasındaki etkileşimi iyileştirmek için parçacıklar sülfirik

asit ile muamele edildi. Sonuç olarak kompozitlerin mekanik özellikleri, liflerin ve parçacıkların muamelesi yoluyla iyileştirildi.

Hani ve ark. (Hani ve ark., 2021) balık kılçığı parçacıklarını ısı muameleye tabi tuttu ve bunları dolgu olarak kullanıp epoksi kompozitler hazırladı. Isı muamele sayesinde, balık kılçığı parçacıkları ile epoksi reçinesi arasındaki etkileşim gelişti. Dahası, kompozitlerin hem çekme hem de eğilme mukavemeti iyileşti. Bu iyileşme, ısı muamele görmüş parçacıklara sahip kompozitteki daha düşük boşluk oranına atfedildi ve bu da parçacıklar ile epoksi matrisi arasında verimli gerilim transferini kolaylaştırdı. Buna ek olarak, muamele edilmiş parçacıklarla hazırlanan kompozit üstün termal kararlılık gösterdi.

3.5 Epoksilerde Lif Oranının Etkisi

Literatürdeki çalışmalar, kullanılan elyafa göre epoksi reçinesinde iyileşme veya bozulma olabileceğini ortaya koymaktadır. Elyaf lar kendi özelliklerini epoksi matrisine dahil edebilir ve kompozitin son özelliklerinde önemli bir rol oynayabilir. Bu özelliklerin dahil edilmesi, kompozitlerdeki elyaf oranının artmasıyla daha da güçlü olabilir (Hassan ve ark., 2020).

Gargol ve ark. (Gargol ve ark., 2021) çeşitli ağırlık yüzdelerinde atık lif kullanarak kenenvir/epoksi kompozitler üretti: %0, %5, %10, %20 ve %30. Lifi epoksiye dahil edilmesi kompozitlerin termal direncini artırdı. TGA ve DTG eğrilerinin analizi benzer eğilimleri ortaya koydu. Dahası, lif içeriğindeki artış kompozitlerin sertlik değerlerinde bir azalmaya neden oldu.

Hassan ve ark. (Hassan ve ark., 2020) %10, %15 ve %20 hacim oranlarında ayrı olarak pamuk, hindistan cevizi ve şeker kamışı atık lifleriyle güçlendirilmiş epoksi kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, kompozitlerin ses emilim katsayıları her bir lif türü için artan lif oranıyla artmıştır. Hindistan cevizi lifi takviyeli epoksi, diğer kompozitler arasında en yüksek ses emilim katsayısını sergilemiştir. Ses emilim katsayısındaki iyileşme, liflerin gözenekliliğiyle ilişkilendirilmiştir. Ek olarak, kompozitlerin darbe ve eğilme dayanımları, artan lif oranlarıyla gelişmiştir. En yüksek gelişme ise pamuk liflerinin daha yüksek mukavemete sahip olmasından dolayı pamuk lifi takviyeli epoksidede gözlenmiştir. Isıl direnç de matris faza kıyasla liflerin daha düşük ısı iletkenliği nedeniyle artan lif içeriğiyle artmıştır. Isıl difüzivite, lif takviyesiyle

arttırılmıştır. Ek olarak, ısı genleşme katsayısı, lif oranı arttıkça azalmıştır. Geliştirilen kompozitlerin kullanım alanları olarak iç mekan panelleri, bazı ses yalıtım özelliklerine sahip otomotiv gövde bileşenleri ve bina inşaatı önerilmiştir.

3.6 Epoksilerde Lif Yüzey Muamelesinin Etkisi

Partiküllere benzer şekilde lifler de yüzey muamelelerine tabi tutulabilirler. Bu muamelelerin amacı, lifler ve matris arasındaki arayüz bağlarının iyileştirilmesi ve böylece epoksi kompozitin özelliklerinin geliştirilmesidir. Ek olarak, matristeki boşluk fraksiyonları azaltılabilir ve bu da kompozitin daha düşük su emilimine sahip olmasına sebep olabilir (Ranakoti ve ark., 2022). Bu muamelelere örnek olarak oksalik asit, silan ve NaOH muameleleri verilebilir. (Vinod ve ark., 2021).

Vinod ve ark. (Vinod ve ark., 2021) tarımsal atık soya sapı liflerinin yüzeylerini oksalik asit, silan ve NaOH ile ayrı ayrı muamele ettiler. Sonuçlara göre, yüzeylerinin parçalanması nedeniyle muamele edilmiş liflerin çapında bir azalma oldu. Ek olarak, muamele edilmiş liflerdeki selüloz oranında bir artış oldu. Böylece, silan ve oksalik asitle muamele edilmiş lifler yoğunluklarında bir artış gösterdi. Dahası, kompozit, muamele edilmiş liflerin artan kristal boyutu nedeniyle su direnci gösterdi. Liflerin kimyasal muamelesinden sonra kompozitlerin termal genleşme katsayısı azaldı. Özellikle, silanla muamele edilmiş liflere sahip kompozit, termal kararlılıkta en önemli iyileşmeyi gösterdi. Silanla muamele edilmiş lifler için mekanik özellikler de daha önemli ölçüde iyileşti.

Ranakoti ve ark. (Ranakoti ve ark., 2022) tasar ipek elyaf atığını NaOH bağlayıcı madde ile muamele ederek epoksi matrisinde dolgu olarak kullandılar ve etkisini araştırdılar. Farklı ağırlık yüzdelерinin (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) etkisi, muamele edilmiş ve edilmemiş elyaflar için ayrı ayrı incelendi. Dolgu maddesinin ağırlık yüzdesinin artırılması, matristeki boşluk oranında bir artışa yol açtı. Dolgu maddesinin NaOH ile muamele edilmesi, kompozitin boşluk oranlarını azalttı. Boşluk oranındaki artış, su emilimindeki artış ile ilişkilendirildi. Sonuç olarak, hem muamele edilmiş hem de muamele edilmemiş elyaflar için dolgu maddesi oranının artırılması su emilimini artırdı ve elyafların muamele edilmesi, kompozitin daha düşük bir su emilim oranı sergilemesine sebep oldu. Ayrıca, dolgu maddesinin artan oranıyla çekme, eğilme, darbe dayanımı ve sertlik değerlerinde artış oldu ve dolgu maddesinin NaOH ile muamelesi sonucu daha fazla artış gözlemlendi. Bu artış, elyaf ve epoksi matrisi arasındaki gelişmiş arayüz

yapışmasına atfedildi. Ek olarak, özgül aşınma oranları, dolgu maddesi oranının artmasıyla azaldı ve dolgu maddesinin NaOH ile işlenmesi daha da fazla azalmaya yol açtı.

Prabhu ve ark. (Prabhu ve ark., 2019) cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin sisal ve atık çay lifleriyle hibridizasyonu üzerine araştırma yürütmüşlerdir. Çalışmada, cam elyafının ağırlık oranı %10 olarak sabitlenirken, sisal ve atık çay liflerinin ağırlık oranları değiştirilmiştir. Değişimler, sisal ve atık çay lifleri için sırasıyla 10:20, 20:10, 15:15, 5:25 ve 25:5 olarak belirlenmiştir. Ek olarak, lifler hidrofilik maddeleri nedeniyle NaOH işlemine tabi tutulmuş ve lifler ile matris arasındaki arayüz bağları güçlendirilmiştir. Cam elyafının yanına ek olarak sisal elyaf eklenmesinin, çekme dayanımı, çekme modülü, eğilme dayanımı, eğilme modülü ve darbe dayanımında artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. %20 sisal ile %10 atık çayın kombinasyonu maksimum değerleri sağlamıştır. Ayrıca, hibridizasyon yoluyla ses emilim katsayısı artmıştır. Çalışmada, geliştirilen malzemenin otomobil parçalarında, ses yalıtım malzemelerinde ve mobilyalarda uygulama alanı bulabileceği öne sürülmüştür.

Rajan ve ark. (Rajan ve ark., 2023) kırmızı muz boş meyve salkımlarından elde edilen selüloz nanofiberleri silanla muamele ederek çeşitli ağırlık yüzdelerinde (%1, 2, 3, 4 ve 5) epoksi takviyesi olarak kullandılar. %3 dolgu yüklemesine sahip numune en yüksek çekme ve eğilme mukavemetlerini sergiledi. Ancak, dolgu yüklemesindeki daha fazla artış, elyaf ve epoksi arasındaki zayıf etkileşim nedeniyle bu özelliklerde bir azalmaya yol açtı. Ek olarak, %3 ağırlık dolgu yüklemesine kadar sertlikte ve darbe dayanımında tutarlı bir artış oldu. Bu elyaf oranı ayrıca epoksinin termal özelliklerinin iyileştirilmesine de katkıda bulundu.

3.7 Epoksilerde Termal Olarak Bozundurulmuş Atık Esaslı Dolgular

Atık kaynakları ayrıca dolgu maddelerinde kullanılmak üzere termal olarak bozundurulabilirler. Termal bozunma yoluyla bu atıkların karbon içerikleri artabilir. Bu dolgu maddelerinin kullanımı epoksi reçinesinin özelliklerini iyileştirebilir ve onu yüksek performanslı uygulamalar için uygun hale getirebilir. Atıkların termal olarak bozundurulup karbon açısından zenginleştirilmesi ve epoksi reçinede dolgu olarak kullanılmasıyla ilgili, literatürde bazı çalışmalar bulunmaktadır (Ahmetli ve ark., 2013; Atif ve ark., 2020).

Atif ve ark. (Atif ve ark., 2020) pamuk döküntüsü, tarama artığı ve hurda dahil olmak üzere tekstil endüstrisinden gelen atıkları kullanarak bunları termal işlem yoluyla karbon parçacıklarına dönüştürdüler. Bu karbon parçacıkları, UV ile kürlenmiş bir epoksi matrisinde dolgu maddesi olarak kullanıldı. Karbon parçacıklarının epoksiye dahil edilmesi termal kararlılıkta bir artışa neden oldu ve ayrıca kompozitlerin DC iletkenliğinde bir artışa yol açtı.

Ahmetli ve ark. (Ahmetli ve ark., 2013) PET, talaş ve çam kozalağı atıklarını 450°C'de pirolize ederek kömürleşmiş maddeler elde ettiler. Bu kömürleşmiş maddeler daha sonra dolgu maddesi olarak bir epoksi matrisine dahil edildi. Çam kozalağı ve plastik atık kömürleşmiş maddeleriyle doldurulan epoksilerin termal kararlılığında bir artış gözlemlendi. Ek olarak, plastik atık kömürleşmiş maddelerin dahil edilmesi en yüksek elektriksel iletkenliği sağladı. Sertlik, Young modülü ve çekme mukavemeti gibi mekanik özellikler, her türlü kömürleşmiş maddenin eklenmesiyle iyileşme gösterdi.

3.8 Epoksilerde Dolgu Maddelerinin Hibrit Kullanımı

Birden fazla türde atık esaslı dolgu maddesini epoksi reçinede dolgu olarak kullanmak mümkündür (Mohankumararadhya ve ark., 2020). Ayrıca, hibrit olarak kullanılan dolgulardan biri atık esaslı olabilirken, diğeri ticari olarak temin edilebilen bir dolgu olabilmektedir (Aigbodion, 2022). Literatürde partikül-partikül (Somashekhar ve ark., 2018) ve lif-partikül (Senthilkumar ve ark., 2022) formlarında dolgu maddelerinin epoksi reçinede hibrit dolgu olarak kullanılmasıyla alakalı çalışmalar mevcuttur. Hibrit dolgu maddelerinin epoksiye dahil edilmesi epoksi reçinenin özelliklerini iyileştirebilir. Ancak bazı durumlarda, dolgu maddelerinin hibridizasyonu ile özellikler tatmin edici olmayabilir (Senthilkumar ve ark., 2022).

Somashekhar ve al. (Somashekhar ve ark., 2018) kompozit malzeme hazırlamak için farklı oranlarda hindistan cevizi kabuğu tozu, demirhindi kabuğu tozu ve epoksi reçinesini karıştırdılar. Mekanik özellikleri artırmak için epoksi reçinede en iyi bileşimin %50 hindistan cevizi ve %5 demirhindi kabuğu tozu olduğunu bildirdiler.

Mohankumararadhya ve ark. (Mohankumararadhya ve ark., 2020) epoksi reçinesinde hibrit atık esaslı dolgu maddelerinin kullanımını inceledi. Odun elması/hindistan cevizi kabuğu tozu ve ceviz/hindistan cevizi kabuğu tozu gibi dolgu maddelerini içeren iki tür

kompozit hazırladılar. Çekme ve eğilme testlerine göre, tozların hibrit kullanımının, tozların tek tek kullanımına kıyasla bu özellikleri iyileştirdiği sonucuna varıldı. Ceviz/hindistan cevizi kabuğu tozu ile hazırlanan kompozit, bunlar arasında en iyi sonucu gösterdi.

Mayana ve ark. (Mayana ve ark., 2022) çeşitli endüstriyel atıkları dolgu maddesi olarak cam elyafı ile birlikte farklı ağırlık yüzdelerinde kullanmıştır. %10 ağırlık oranında kömür tozu ve kömür uçucu külü karışımı ile %50 ağırlık oranında cam elyafı birleştirilmiş kompozit en yüksek darbe dayanımı ve sertlik değerlerini göstermiştir. Öte yandan en iyi çekme dayanımı %2,5 ağırlık oranında kömür tozu ve kömür uçucu külü karışımı ile elde edilmiştir. Ek olarak, %10 ağırlık oranında kömür tozu ve çimento baypas tozu karışımı eğilme dayanımı ve katmanlar arası kesme dayanımında en önemli gelişmeyi göstermiştir. Bu bulgular, bu endüstriyel atık tozlarının mekanik özellikleri yalnızca cam elyafı/epoksi kompozit kullanmaya göre daha da fazla artırabileceğini göstermektedir.

Karthikeyan ve ark. (Karthikeyan ve ark., 2022) epoksi matriste dolgu maddesi olarak atık mermer tozu ve demirhindi kabuğu tozu kullandılar ve hibrit kompozitler hazırladılar. Dolgu maddeleri değişen ağırlık yüzdelerinde kullanılırken, epoksinin ağırlık yüzdesi sabit kaldı. Dolgu maddelerinin hibrit olarak dahil edilmesi, çekme ve eğilme kabiliyetleri üzerinde olumlu bir etkiye sahipti. Dolgu maddelerinin optimum ağırlık yüzdelerinin, %15 ağırlıkta atık mermer tozu ile %35 ağırlıkta demirhindi kabuğu tozu olduğu belirlendi.

Senthilkumar ve ark. (Senthilkumar ve ark., 2022) hibrit epoksi kompozit üretmek için zeytin ağacı yaprağı tozu ve ananas yaprağı lifi kullandılar. Ananas yaprağı lifi oranındaki artış, darbe dayanımında önemli bir iyileşmeye yol açtı ve en yüksek darbe dayanımı saf ananas yaprağı lifi takviyeli epoksi ile elde edildi. Benzer şekilde, en yüksek eğilme dayanımı ve modülü yalnızca ananas yaprağı lifi ile takviye edilmiş kompozitlerde gözlemlendi. Ancak, dolgu maddelerinin hibrit kullanımı, eğilme dayanımı ve eğilme modülü açısından tatmin edici sonuçlar vermedi. Bununla birlikte, dolgu maddelerinin hibrit kullanımı, dolgu maddelerinin matriste iyi dağılımı ve dolgu maddeleri ile matris arasındaki iyi arayüz yapışması sayesinde daha yüksek depolama modülüne, daha düşük kayıp modülüne ve daha düşük sönümlemeye sahip kompozitler elde edilmesini sağladı.

Aigbodion (Aigbodion, 2022), dolgu maddesi olarak karbon nanotüp ve atık yumurta kabuklarından elde edilen CaCO_3 kullanarak, hibrit epoksi kompozit üretti. Bu dolgu maddelerinin hibrit kullanımı dielektrik sabitinde ve elektriksel iletkenlikte artışa neden oldu. Bu sonuç, iletken bir ağın oluşumuyla kolaylaştırılan hibrit dolgu maddesinin yüksek elektron hareketliliğine atfedildi.

Kanta Mahapatra ve ark. (Kanta Mahapatra ve ark., 2022) ses emilim katsayısını ve termal yalıtım özelliklerini araştırmak için atık lastik ve tekstillerle güçlendirilmiş epoksi kompozitler geliştirdiler. Akustik emilim katsayısı başarıyla artırıldı ve termal iletkenlik azaltıldı.

Mathenulla Shariff ve ark. (Mathenulla Shariff ve ark., 2023) mekanik mukavemeti artırmak için *milletia pinnata* yaprak tozu, alümina/bor nitrür parçacıkları ve cam levhaları takviye olarak kullanarak epoksi hibrit kompozitler hazırladılar. Alümina ve bor nitrür, matrisler içerisinde ayrı ayrı kullanıldı. Dolgu maddeleri, matris ve takviyeler arasındaki mükemmel etkileşime ve iyice karışmaya atfedilen homojen bir dağılım sergiledi. Sonuç olarak, mekanik özellikler geliştirildi. Bununla birlikte, bor nitrür içeren kompozitler, alümina içerenlere kıyasla üstün mekanik özellikler sergiledi. *Milletia pinnata* yaprak tozu, genellikle seramik dolgu maddeleriyle ilişkilendirilen kırılganlığı ortadan kaldırmaya katkıda bulundu.

Jayaraman ve ark. (Jayaraman ve ark., 2023b) ambalaj uygulamaları için epoksi reçinede farklı ağırlık yüzdelerindeki atık mermer tozu ve muz lifini dolgu olarak kullandılar. Sonuçlar, mermer tozunun ağırlık yüzdesinin artırılmasının basınç özelliklerini iyileştirdiğini gösterdi. Ayrıca, dolgu maddelerinin hibridizasyonu epoksinin tokluğunu artırdı.

Immanuel Durai Raj ve ark. (Immanuel Durai Raj ve ark., 2023) epoksiyi farklı ağırlık yüzdelerinde muz lifi ve atık CD tozuyla güçlendirdi. Muz lifi ve atık CD tozunu birleştirmenin, epoksinin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini buldular. En iyi sonuç, muz lifinin ağırlığına göre %10 atık CD tozu eklenerek elde edildi.

Priyadarshini ve ark. (Priyadarshini ve ark., 2023) epoksi/cam elyaf kompozitlerinde dolgu olarak atık mermer tozunu çeşitli ağırlık yüzdelerinde kullandılar. Mekanik özellikler ve su emme yüzdesi, tozun ağırlıkça %8 eklenmesine kadar arttı; ancak, %10 eklenmesiyle hem mekanik özelliklerde hem de su emme kapasitesinde bir azalma

gözlendi. Ek olarak, sertlik değeri tozun ağırlıkça %10 eklenmesiyle zirveye ulaştı. Morfolojik incelemeler, mermer tozu içeriğinin artmasıyla boşluk miktarlarında ve boyutlarında kademeli bir artış olduğunu ortaya koydu.

Temiz ve ark. (Temiz ve ark., 2023) etilen-propilen-dien monomer kauçuğu (EPDM) ve lastik atığı piroliz katı ürünü karbon siyahı (CB) dahil olmak üzere endüstriyel atıkları epoksiye dahil ederek epoksi kompozitler hazırladılar. Çalışmada, EPDM hem tek başına hem de CB ile birlikte hibrit dolgu maddesi olarak kullanıldı. EPDM ve EPDM-CB hibritlerinin çeşitli ağırlık yüzdeleri (farklı oranlarda) ayrı ayrı incelendi. Bulgular, en yüksek çekme dayanımının 3:1 ağırlık oranında EPDM-CB hibrit dolgu maddesi ile elde edildiğini ortaya koydu. Hibrit kompozitteki EPDM oranının artırılmasının çekme dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görüldü. Ancak epoksideki EPDM oranının artırılması sertlik, yoğunluk, elastikiyet modülü ve çekme dayanımında bir azalmaya neden oldu. Termal kararlılık açısından, hibrit kompozitler saf epoksiden daha iyi performans gösterdi. Ayrıca hibrit kompozitlerdeki daha yüksek CB içeriği, hibrit dolgu maddeleri ile epoksi arasındaki güçlü etkileşime atfedilen elektriksel iletkenliğin artmasına ve yanıcılığın azalmasına neden oldu.

Arunkumar ve ark. (Arunkumar ve ark., 2023) doğranmış muz lifi ve atık mermer tozunu epoksi reçinede farklı ağırlık yüzdelerinde dolgu olarak kullandılar. Epoksi reçineye %25 muz lifi ve %10 atık mermer tozu ilavesi ile elde edilen numune, üstün performans göstererek optimum mekanik özellikler sergiledi.

Dattatreya ve ark. (Dattatreya ve ark., 2023) bir epoksi matris içinde jüt lifi, şeker kamışı küspesi, hindistan cevizi lifi ve neem ağacının hibrit dolgu olarak kullanımını araştırdılar. Jüt elyaf ağırlık yüzdesi %25 olarak sabitlenirken, diğer dolgu maddelerinin ağırlık yüzdeleri değiştirildi. Sonuçlar, %15 neem odun atığı, %5 hindistan cevizi lifi ve %5 şeker kamışı küspesi ile doldurulmuş kompozitin en iyi çekme, eğilme ve darbe dayanıklılıklarını sergilediğini gösterdi. Bunun sebebi, liflerin ve tozun matriste etkili dağılımı olarak açıklandı. Ayrıca %5 neem odun atığı, %5 hindistan cevizi lifi ve %15 şeker kamışı küspesi içeren kompozit en yüksek sertlik değerini gösterdi. Bu kompozitin otomotiv uygulamaları için uygun olduğu öne sürüldü.

Maluga ve ark. (Maluga ve ark., 2023) granit ve mermer tozunu epoksi reçinede hibrit dolgu olarak kullandılar. Mermer ağırlık yüzdesini %10'da sabitleyip granit ağırlık

yüzdelelerini %5, %10, %15 ve %20 olarak değiştirdiler. Fiziksel ve mekanik özellikler, hibrit dolgu maddesinin artan oranıyla iyileşme gösterdi. Ek olarak, mermer ve granit dolgusunun sayesinde, ortaya çıkan malzemelerin aşınma direncini arttığı ifade edildi.

Soni ve ark. (Soni ve ark., 2023) sisal lifleri ve yer fıstığı kabuğu parçacıkları kullanarak epoksi hibrit kompozitler hazırladılar. Sisalin ağırlık yüzdesi %30'da sabit tutulurken, yer fıstığı kabuğunun ağırlık yüzdeleri %0, %5, %10, %15 ve %20 olarak değiştirildi. Sonuçlar, yer fıstığı kabuğu oranındaki artışı kompozitler içindeki boşluk içeriğinde de artışa neden olduğunu gösterdi. Ek olarak, mikro sertlik değeri yer fıstığı kabuğu oranındaki artışla birlikte arttı. %15 yer fıstığı kabuğu oranına kadar mekanik özelliklerde bir iyileşme gözlemlendi; ancak, %20 oranına artış mekanik özelliklerde bir azalmaya yol açtı. Ayrıca, yer fıstığı kabuğunun eklenmesi aşınma direncini artırdı.

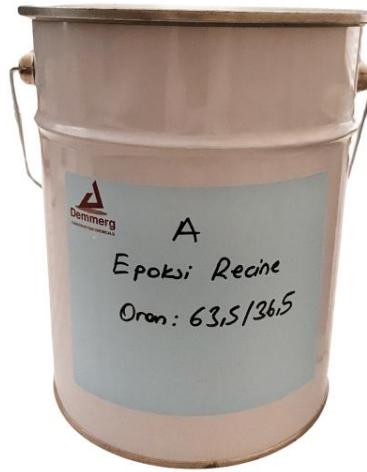
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kompozit üretimi için kullanılan matris malzemesi epoksi reçinedir. Dolgu malzemeleri ise kalsit ve çörek otu posasıdır.

4.1.1 Epoksi reçine

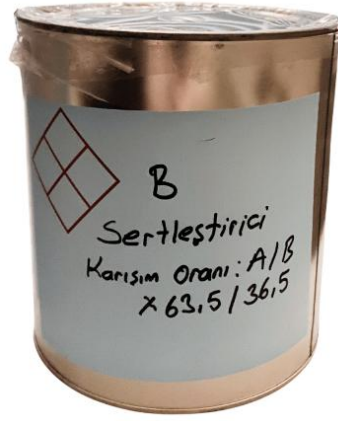
Düşük viskoziteli sıvı epoksi reçine olan matris malzemesinin ticari ismi RC 8132 olup Demmerg Kimya firmasından temin edilmiştir. Şeffaf sıvı görünümüne sahiptir. Viskozitesi 0,5 ~ 0,7 Pa.s arasında değişmektedir. Yoğunluğu 1,10 kg/L'dir. Epoksi eşdeğeri 200 ~ 205 g/eq arasında olup, epoksi grup içeriği ise 4650 – 5130 mmol/kg arasında değişmektedir. Şekil 4.1'de çalışmada kullanılan epoksi reçine gösterilmektedir.



Şekil 4. 1 Epoksi Reçine

4.1.2 Kürleyici

Sıvı formadaki epoksi reçinenin sertleşmesi için kullanılan kürleyici madde RE-CURE 503 ticari ismine sahip olup Demmerg Kimya firmasından temin edilmiştir. Düşük viskozitelidir (200-400 cp - 25 °C) ve modifiye sikloalifatik poliamin sertleştiricidir. Yüksek parlaklık değerlerine sahip olmakla birlikte kimyasallara ve hava koşullarına karşı dirençlidir. Şeffaf görünüme sahiptir. Yoğunluğu 25 °C'de 1,03 g/ml'dir. Amin hidrojen eşdeğer ağırlığı ise 115 g/eq'dir. Şekil 4.2'de çalışmada kullanılan kürleyici madde gösterilmiştir.



Şekil 4. 2 Kürleyici

4.1.3 Dolgu maddeleri

Kompozitlerin üretiminde inorganik dolgu maddesi olarak kalsit ve organik dolgu maddesi olarak çörek otu posası kullanılmıştır. Her iki dolgu maddesi de toz formundadır. Kalsit, NİDAŞCARB 3 ticari ismine sahip olup Nidaş firmasından temin edilmiştir. Ortalama tane boyutu $2,67 - 2,95 \mu\text{m}$ 'dir. Doğal kaynaklardan elde edilmiş, yüksek saflık ve beyazlıkta kalsiyum karbonattır. Soğuk pres çörek otu yağı çıkarma işleminden arta kalan ve atık bir malzeme olan çörek otu posası ise yerel tedarikçilerden temin edilmiştir. Çalışmada çörek otu posası öğütülerek toz haline getirilmiş, elekten geçirilmiş ve $0 - 200 \mu\text{m}$ arasında tane boyutlarına sahip olması sağlanmıştır. Toz formundaki kalsit ve çörek otu posası, şekil 4.3 (a) ve (b)'de sırasıyla gösterilmiştir.

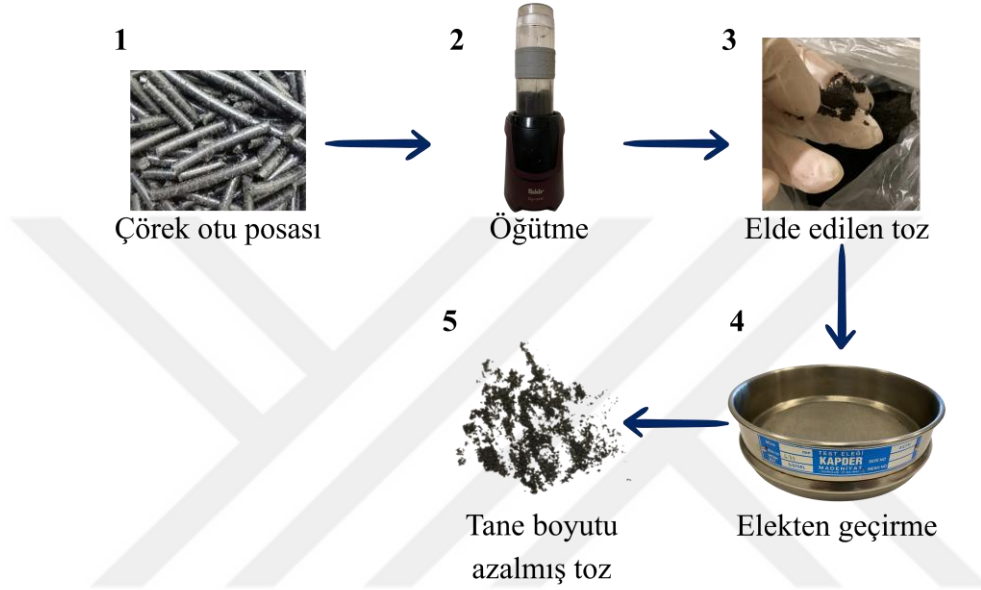


Şekil 4. 3 Toz formundaki a) kalsit ve b) çörek otu posası

4.2 Numunelerin Hazırlanması

4.2.1 Çörek otu posasının öğütülmesi

Başlangıçta silindirik yapıda olan çörek otu posaları öğütülerek toz formuna getirilmiştir. Devamında bu toz, 200 µm delik aralığına sahip eleklerden geçirilmiştir. Çörek otu posasının toz formuna getirilmesi ile ilgili işlem basamakları, şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 4 Çörek otu posasından toz dolgu üretimini gösteren akış şeması

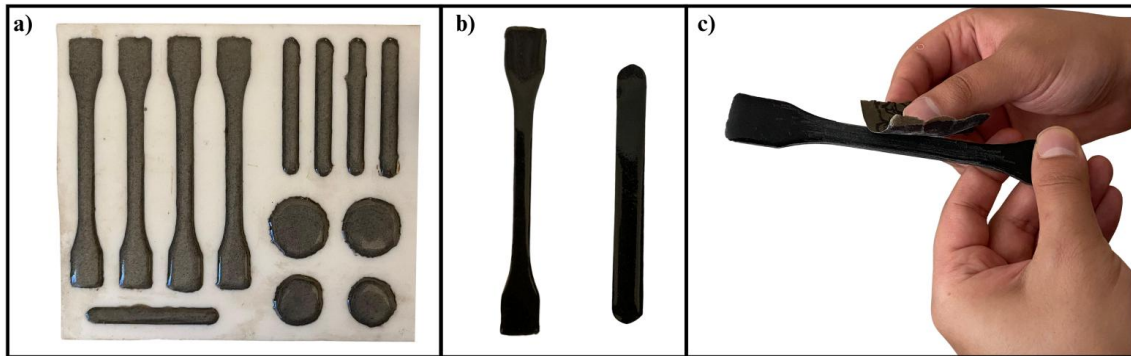
4.2.2 Karışım içeriği ve açık kalıba döküm

Kalsit ve çörek otu posası tozu, epoksi reçine ve kürleyici madde ile belirli oranlarda karıştırılmıştır. Karışım, dolgu maddelerinin epoksi reçineye göre ağırlıkça farklı oranlarda dahil edilmesi ile hazırlanmıştır. Kompozit numuneleri, içinde bulundurdıkları dolgu oranları ve türlerine göre isimlendirilmiştir. Bu isimlendirmede çörek otu posası “Ç”, kalsit ise “K” harfiyle gösterilmiş olup, oranları harflerin başına yazılmıştır. Hazırlanan numunelerin karışım oranları ve isimleri, tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 1 Dolgu maddelerinin epoksi reçineye göre ağırlıkça oranları ve numune isimleri

Numune İsimleri	Kalsit Oranı (% ağırlıkça)	Çörek Otu Posası Oranı (% ağırlıkça)
Saf Epoksi	0	0
20Ç	0	20
5K15Ç	5	15
10K10Ç	10	10
15K5Ç	15	5
20K	20	0

Karışımlar hazırlandıktan sonra şekillendirme işlemi için teflon kalıba açık döküm yapılmıştır. 1 gün sonra sıvı formdaki karışımlar sertleşmiştir ve numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Kullanılan numuneler dog bone ve darbe testi numuneleridir. Numunelerin kenarlarında oluşan çapakların giderilmesi için zımparalama yapılmıştır. Açık kalıba yapılan döküm, örnek numune görselleri ve zımparalama, şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 5 a) Açık kalıba yapılan döküm, b) kalıptan alınan dog bone ve darbe testi numuneleri ve c) numunenin zımparalanması

4.3 Karakterizasyon Yöntemleri

Hazırlanan numunelerin karakterizasyonu için çekme, darbe, sertlik ve su absorplama testi yapılmıştır. Ayrıca mikroyapıyı incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM)

kullanılmıştır.

4.3.1 Çekme testi

Çekme testini gerçekleştirmek için Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Zwick marka çekme test cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihaz şekil 4.6’da gösterilmektedir. Test, ISO 527 standardına göre dog bone numuneleriyle gerçekleştirilmiş olup çekme hızı 5 mm/dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 6 Çekme test cihazı

4.3.2 Darbe testi

Darbe testini gerçekleştirmek için Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Zwick marka darbe test cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihaz şekil 4.7’de gösterilmiştir. Darbe testi numuneleriyle gerçekleştirilen testte 5.4 J Izod çekiç kullanılmıştır.



Şekil 4. 7 Darbe test cihazı

4.3.3 Sertlik testi

Sertlik testini gerçekleştirmek için Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Zwick marka Shore D sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan cihaz şekil 4.8’de gösterilmiştir. Sertlik ölçümünün başlangıcından itibaren ibrenin 15. saniyede gösterdiği değerler her numune için kaydedilmiştir.



Şekil 4. 8 Sertlik ölçüm cihazı

4.3.4 Su absorplama testi

Su absorplama oranlarını belirlemek için numuneler 25 gün su içinde bekletilmiştir. Her numune türü için 5 adet numune kullanılmıştır ve ortalamaları alınmıştır. Test öncesi de dahil olmak üzere 1, 3, 5, 7, 10, 15, 20 ve 25. günlerde numunelerin ağırlık ölçümleri hassas teraziyle gerçekleştirilmiş olup çizgi grafiği kullanılarak gün bazında artan numune ağırlığı gösterilmiştir. Su absorplama testine tabi tutulan numuneler, şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4. 9 Su absorplama testi sürecinden bir görüntü

4.3.5 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Numunelerin kırık yüzey SEM görüntülerini elde etmek için Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan ZEISS EVO MA10 cihazı kullanılmıştır. SEM incelemesinden önce numuneler 10 Å kalınlığında altın/paladyum alaşımı ile kaplanmıştır. Çalışmada kullanılan SEM, şekil 4.10’da gösterilmiştir.

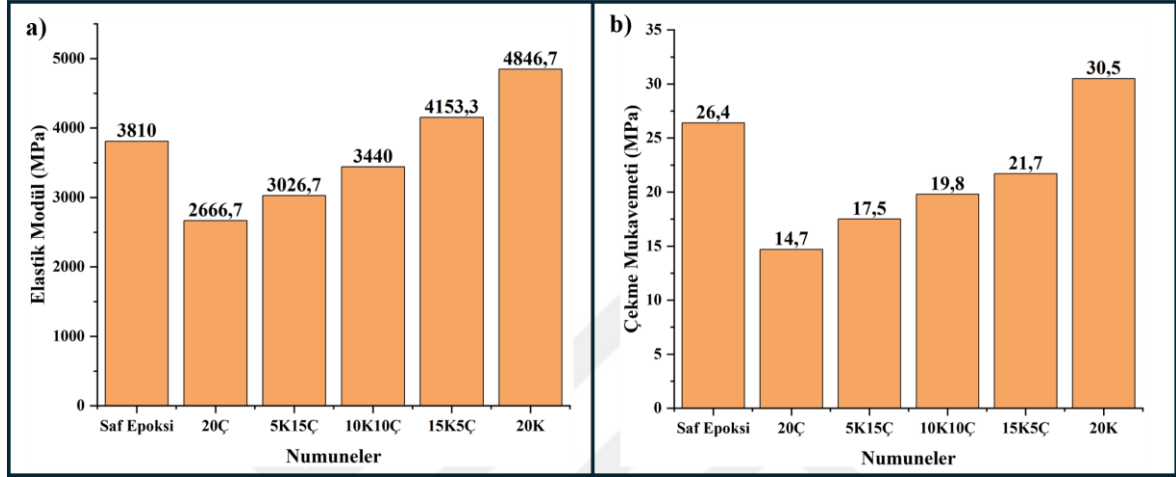


Şekil 4. 10 SEM cihazı

BÖLÜM 5 BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 Çekme Testi Sonuçları

Kompozit numunelerinin elastik modül ve çekme mukavemeti değerleri, sırasıyla şekil 5.1 (a) ve (b)'de çubuk grafiği halinde gösterilmiştir.



Şekil 5. 1 Numunelerin a) elastik modül ve b) çekme mukavemeti değerleri

En yüksek elastik modül değeri 20K kodlu numunede 4846,7 MPa olarak gözlenirken, en düşük değer 20Ç kodlu numunede 2666,7 MPa olarak gözlenmiştir. 15K5Ç ve 20K kodlu numuneler, saf epoksi reçineden daha yüksek elastik modül değeri göstermiştir. Epoksi hibrit kompozitlerde çörek otu posası oranı azalıp kalsit oranı arttıkça, elastik modül değerinin giderek arttığı açık bir şekilde gözlenmektedir. Bu durum, çörek otu posası ilavesinin epoksi sertliğini azaltarak elastik modülü düşürmesi (Kartal ve ark., 2024) ve kalsitin ise epoksiden daha yüksek elastik modüle sahip olmasıyla (Setyawan ve ark., 2019) açıklanabilir.

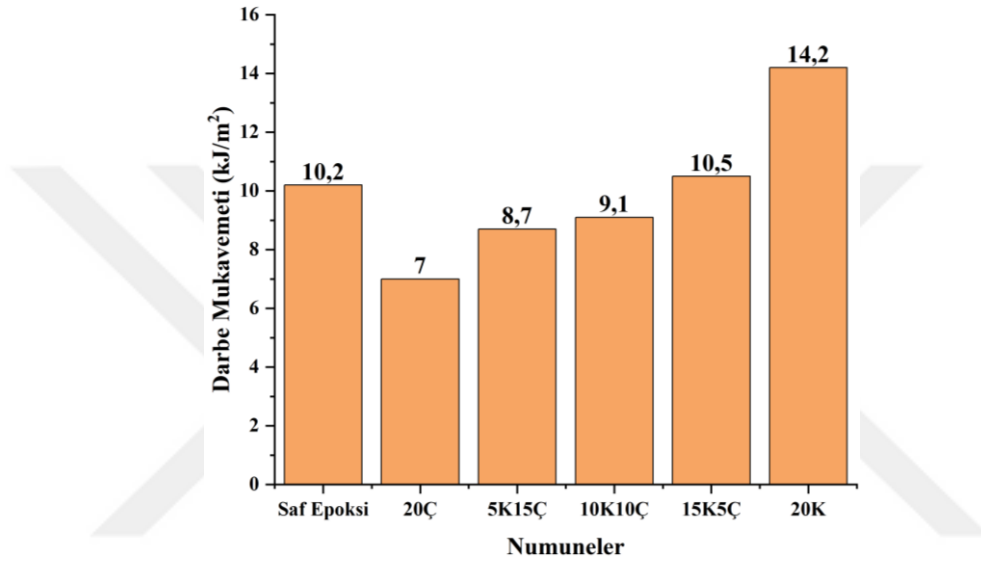
Numunelerin çekme mukavemeti değerleri incelendiğinde en yüksek değer 20K kodlu numunede 30,5 MPa olarak gözlenirken, en düşük değer 20Ç kodlu numunede 14,7 MPa olarak gözlenmiştir.

Çekme mukavemeti sonuçları da elastik modül sonuçlarına benzer şekilde, çörek otu posası oranı azalıp kalsit oranı arttıkça artmaktadır. Çörek otu posası çekme mukavemetini düşürücü bir etkiye sahipken, kalsit artırıcı bir etkiye sahiptir. Çörek otu posasının düşürücü etkisinin sebebi hidrofilik yapıda bir dolgu olmasıyla ilişkilendirilebilir. Polimer matrisin hidrofobik yapısı ve çörek otu posasının hidrofilik

yapısı, yüzey uyumluluk sorunlarına yol açmakta ve çekme dayanımı kötü etkilenmektedir. Çörek otu biyokütlesi ve termoplastik poliüretan ile kompozit hazırlanan bir başka çalışmada da benzer bir durum ifade edilmiştir (Sismanoglu ve ark., 2023).

5.2 Darbe Testi Sonuçları

Kompozit numunelerine uygulanan Izod darbe testi sonucu elde edilen darbe mukavemeti değerleri, şekil 5.2’de çubuk grafiği halinde gösterilmiştir.



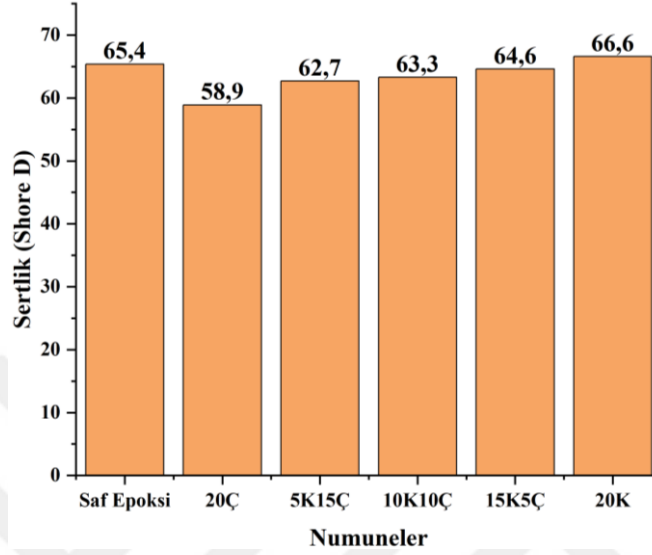
Şekil 5. 2 Numunelerin darbe mukavemeti değerleri

En düşük darbe mukavemeti değeri 20Ç kodlu numunede 7 kJ/m² olarak gözlenirken, en yüksek değer 14,2 kJ/m² olarak 20K kodlu numunede gözlenmektedir. Çörek otu posası oranı azalıp kalsit oranı arttıkça, darbe mukavemeti değeri artmaktadır. Buna göre hibrit epoksi kompozitlerde çörek otu posasının darbe mukavemetini düşürücü ve kalsitin ise artırıcı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Kalsitin polimer matrise dahil edilmesi durumunda tokluğunun arttığı ve darbe mukavemetinin yükseldiği literatürdeki başka bir çalışmada da ifade edilmiştir (Kartal & Selimoğlu, 2023). Öte yandan çörek otu posasının darbe mukavemetini düşürücü etkide bulunması, matris ve dolgu arasındaki zayıf etkileşimden kaynaklanmış olabilir. Matris ve dolgu arasındaki zayıf etkileşimler, malzemede çatlak başlangıcı ve yayılmasına karşı yeterli direnci sağlayamamış olabilir. Buna benzer yorumlar, literatürdeki benzer çalışmalarda da ifade edilmiştir (Rajan ve ark., 2023; Ranakoti ve ark., 2022; Sismanoglu ve ark., 2023).

5.3 Sertlik Testi Sonuçları

Kompozit numunelerinin Shore D sertlik değerleri şekil 5.3’de çubuk grafiği halinde gösterilmiştir.

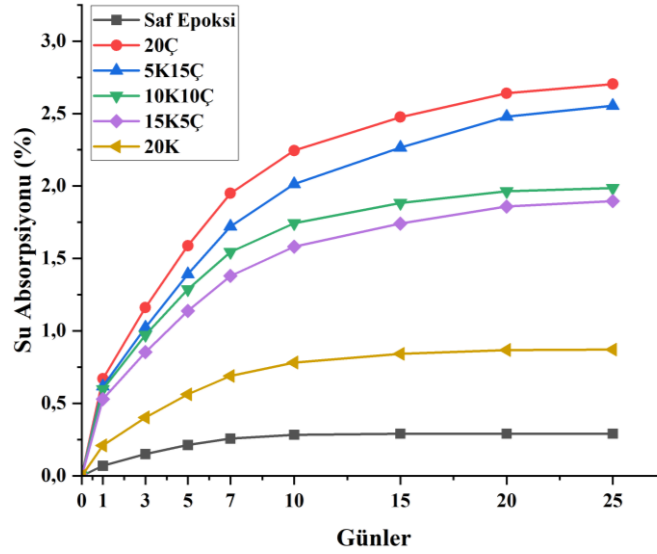


Şekil 5. 3 Numunelerin sertlik değerleri

Sertlik değerleri incelendiğinde, en düşük değere 58,9 ile 20Ç kodlu numunenin sahip olduğu ve en yüksek değere 66,6 ile 20K kodlu numunenin sahip olduğu görülmektedir. Hibrit kompozitteki kalsit oranı artıp çörek otu posası oranı azaldıkça, sertlik değerinde artış gözlenmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, artan kalsit oranının polimer matrisin sertliğini artırdığı (Kartal & Selimoğlu, 2023), çörek otu posası oranının artmasının ise epoksi kompozitin sertliğini azalttığı (Kartal ve ark., 2024) belirtilmiştir. Bu sebeple hibrit kompozitlerdeki bu davranış beklenen bir sonuçtur.

5.4 Su Absorplama Testi Sonuçları

Kompozit numunelerinin su emme testi sonuçlarını gün bazında gösteren bir çizgi grafiği, şekil 5.4’te sunulmuştur.



Şekil 5. 4 Numunelerin su absorpsiyon grafiği

25 günlük periyot boyunca tüm numunelerin su absorplama yüzdelerinde artış gözlenmiş olup eğriler giderek yatay hale gelmiştir. Bu periyodun sonunda en çok su absorpsiyon yüzdesine sahip olan numune, %2,7 değeriyle 20Ç kodlu numune olarak tespit edilmiştir. En düşük değer ise %0,3 ile saf epoksiye aittir.

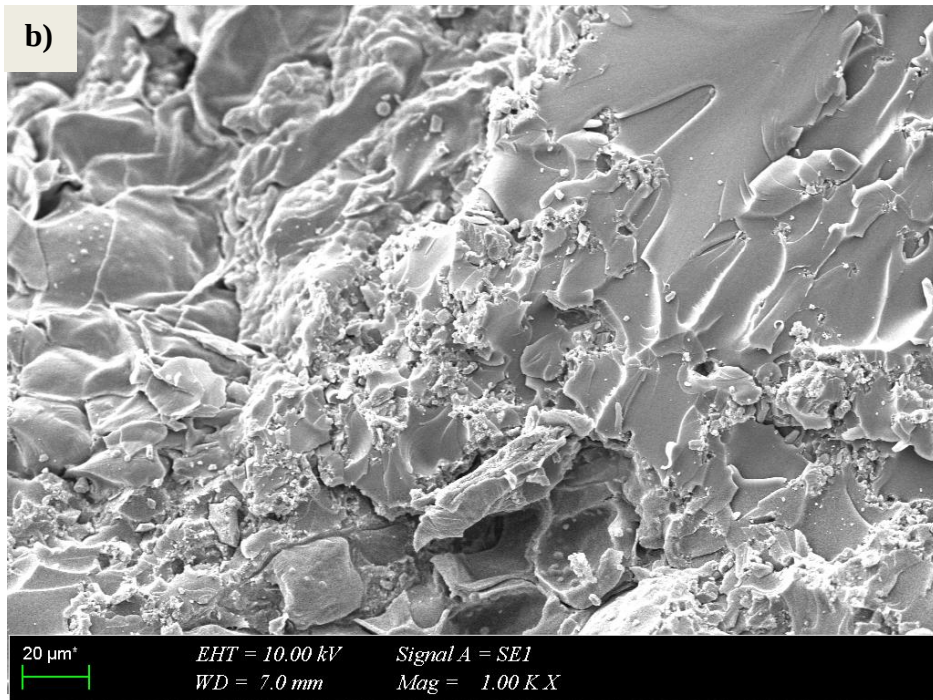
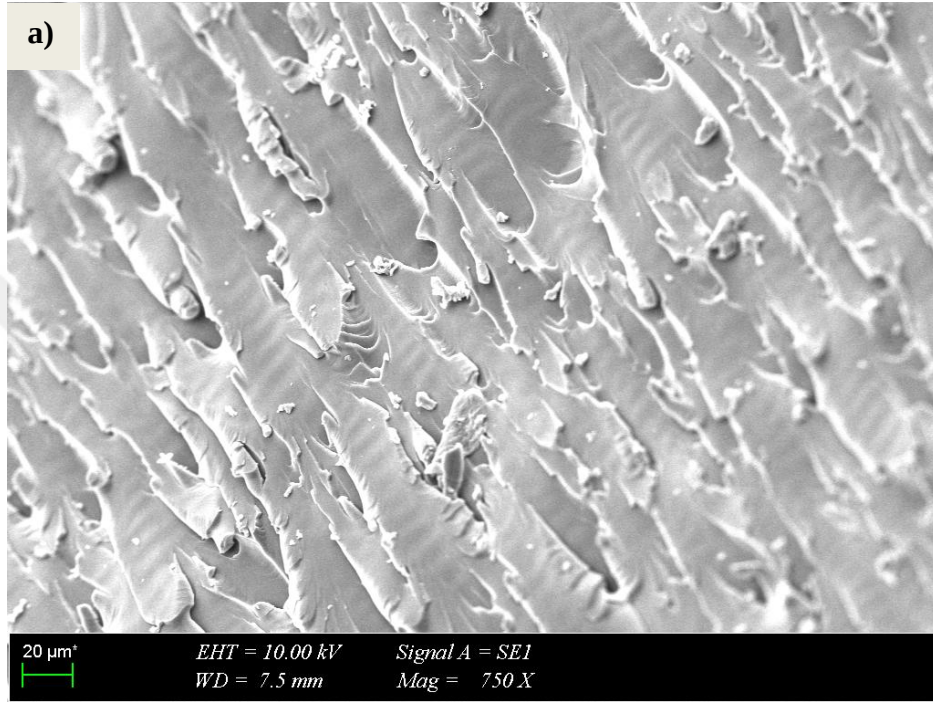
Hibrit kompozitlerde çörek otu posası oranı arttıkça ve kalsit oranı azaldıkça, numunelerin su absorplama yüzdelerinde artış gözlenmiştir. Bu durum, çörek otu posasının kalsitten daha hidrofilik bir özellik göstererek daha fazla su absorpsiyonuna sebep olmasıyla açıklanabilir. Polimer matriste hidrofilik olan çörek otu posası ve biyokütlesinin su absorplama yüzdesini arttırdığıyla ilgili çalışmalar (Kartal ve ark., 2024; Sismanoglu ve ark., 2023) bulunmaktadır. Ayrıca endüstriyel hammadde olarak kullanılan kalsitin kaplama işlemiyle hidrofobik hale getirildiği bilinmektedir (Çayırılı ve ark., 2020).

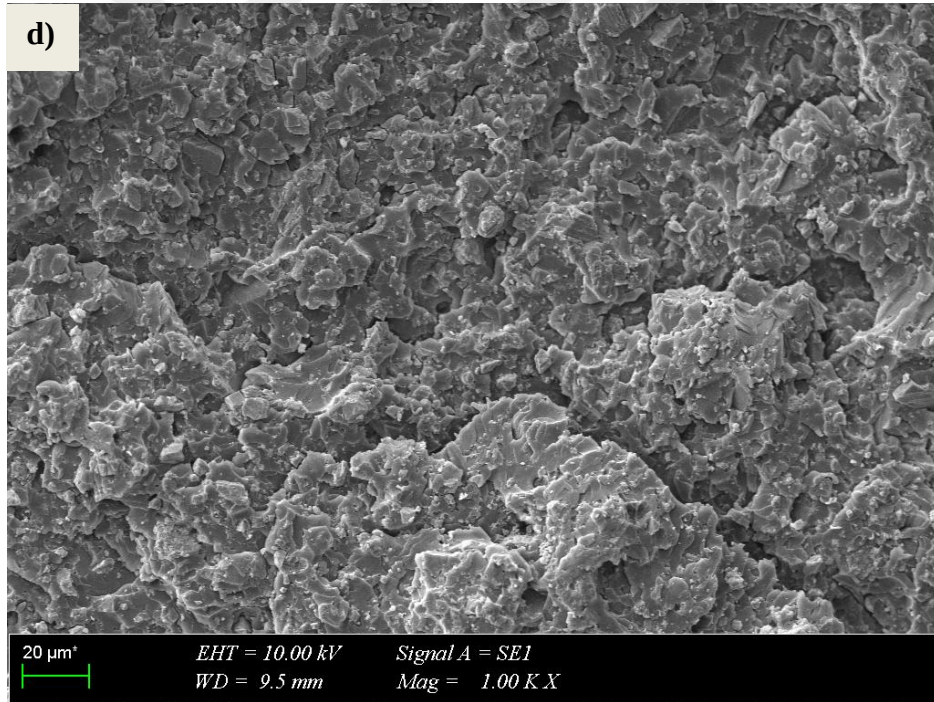
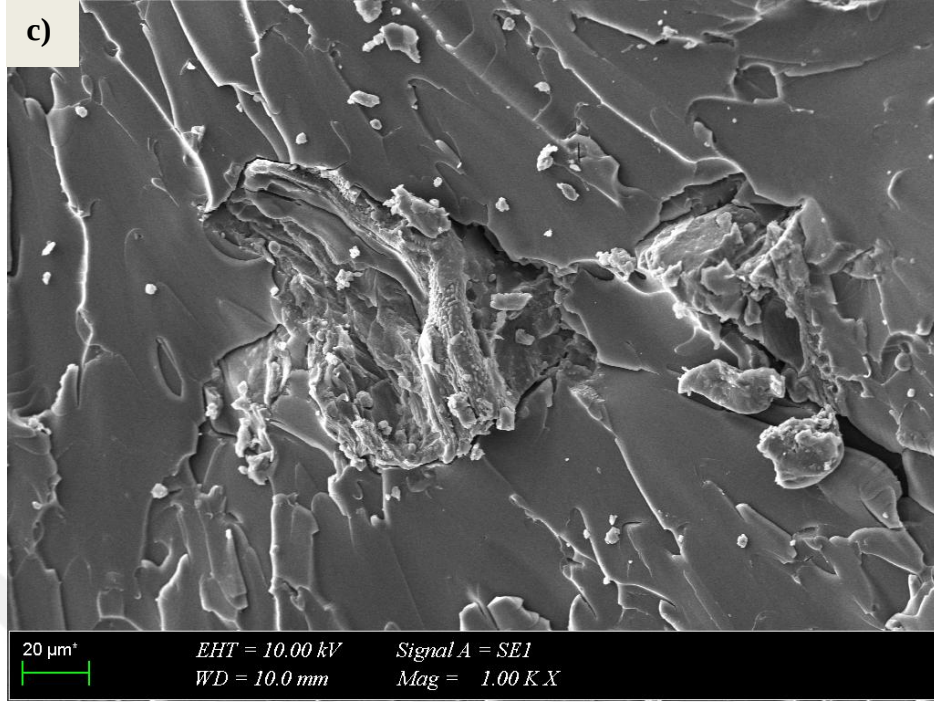
Su absorpsiyonundaki artışa etki eden bir diğer faktör ise kompozit malzemedeki boşluk oranıdır. Bu boşluklarda su molekülleri hapsolmaktadır. Dolgu malzemesi ve matris arasındaki etkileşimin nispeten zayıf olduğu durumlarda, matristeki boşluk oranı artarak su absorpsiyonunun artışına sebep olmaktadır. Çörek otu posasının kalsite göre epoksi matrise daha zayıf bağlandığı düşünüldüğünde, çörek otu posası miktarının artması matris içinde daha fazla boşluk oluşturacak ve bu da su emiliminin artmasına neden olacaktır. Zayıf matris-dolgu etkileşimiyle ve artan dolgu miktarıyla, kompozitin boşluk oranında

ve su absorpsiyonunda artış olduğu literatürdeki başka çalışmalarda da ifade edilmiştir (Ranakoti ve ark., 2022; Soni ve ark., 2023).

5.5 SEM Analizi Sonuçları

Kompozit numunelerinin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 5.5'te sunulmuştur.





Şekil 5. 5 Numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri a) saf epoksi; b) 10K10Ç, c) 20Ç; d) 20K

Şekil 5.5(a) incelendiğinde saf epoksi reçinenin gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlenmektedir. %20 çörek otu posası dolgulu epoksi reçinenin SEM görüntüsü incelendiğinde, 10 – 80 mikron aralığında boyutlara sahip dolgu partikülleri

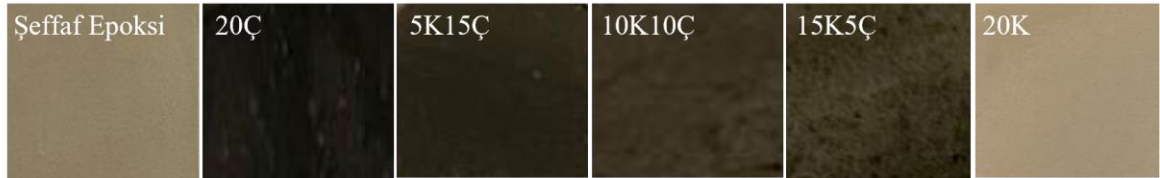
gözlenmektedir. Bu partiküller matrisin içine gömülü durumdadır ve daha uzun boyutlarda da bulunabileceği tahmin edilmektedir. Çörek otu posasının epoksi reçineye orta derecede yapıştığı söylenebilir.

%20 kalsit içeren epoksi kompozitin SEM görüntüsü incelendiğinde, ürün bilgi formunda belirtildiği gibi kalsitin ortalama tane boyutunun 2,67 – 2,95 µm olduğu anlaşılabılır. Kalsitin epoksi reçineye iyi bir şekilde yapıştığı anlaşılmaktadır.

20Ç ve 10K10Ç kodlu numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde boşluk oluşumları gözlenmektedir. Bu oluşumların sebebinin homojen olmayan dolgu dağılımından esaslı bir süreksizlik ve matris-dolgu arası yeterli olmayan etkileşimler olduğu düşünülmüştür. Boşluk oluşumlarının, kompozitin mekanik performansı ve su absorpsiyonu üzerinde negatif etkisi olduğu test verilerinden de anlaşılmaktadır. Boşluk oluşumlarının kompozit performansı üzerine etkisiyle ilgili benzer yorumlar, literatürdeki başka çalışmalarda da yapılmıştır (Patnaik ve ark., 2022; Ranakoti ve ark., 2022; Soni ve ark., 2023).

5.6 Renk Kazanımı

Çörek otu posası ve kalsitin hem ayrı ayrı kullanımı hem de hibrit olarak kullanımı şeffaf epoksi reçineye farklı renkler kazandırmıştır. Bu renkler şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5. 6 Numunelerin renkleri

Kompozit numunelerin dolgu ilavesiyle beraber kazandıkları renkleri incelemek için gün ışığında fotoğrafları çekilmiştir. Epoksi reçineye %20 çörek otu posası eklenmesiyle birlikte, şeffaf renkten çörek otu posasının doğal rengi olan siyah renge geçiş olmuştur. Kompozitte kalsit oranı artıp çörek otu posası oranı azaldıkça, giderek daha açık hale gelen gri renk gözlenmiştir. Son olarak %20 kalsit içeren epoksi reçine, kalsitin kendi rengi olan beyaz rengi kazanmıştır. Kompozit numunelerdeki bu renk kazanımları sayesinde çörek otu posası ve kalsit renklendirici olarak kullanılabilir ve tüketici tercihlerini etkileyebilir.

BÖLÜM 6 SONUÇLAR

Polimer kompozit hazırlanırken doğada bozunabilen dolguların kullanılması, çevresel sürdürülebilirlik adına ve ekonomik açıdan önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, çörek otu posası ve kalsit dolgulu epoksi kompozitler hazırlanmıştır. Elastik modül, çekme mukavemeti, darbe mukavemeti ve sertlik gibi mekanik özelliklerin yanı sıra su absorpsiyonu ve renk gibi malzeme özellikleri karakterize edilmiştir. Bu karakterizasyonların sonucunda;

- Hibrit kompozitlerin elastik modül ve darbe mukavemeti değerleri benzer bir trend göstermiş olup, kalsit oranındaki artış ve çörek otu posasındaki azalışla beraber yükselmiştir. 15K5Ç ve 20K numuneleri saf epoksiden daha iyi elastik modül ve darbe mukavemeti göstermiş olup, en yüksek değerler 20K kodlu numunede gözlenmiştir.
- Hibrit kompozitlerin çekme mukavemeti, çörek otu posası oranındaki azalış ve kalsit oranındaki artış ile giderek artış göstermiştir. Hibrit kompozitlerden hiçbiri saf epoksiden daha iyi çekme mukavemeti göstermemiş olup, 20K kodlu numune en yüksek çekme mukavemetine sahiptir.
- Azalan çörek otu posası ve artan kalsit oranıyla birlikte, kompozitlerin shore D sertlik değerleri artış göstermiştir. Hibrit kompozitlerin tamamı saf epoksiden daha düşük sertlik değerine sahip olup, en yüksek sertlik değeri 20K kodlu numuneye aittir.
- Hibrit kompozitlerde çörek otu posası oranının artışı, kompozitin daha fazla su absorplamasına sebep olmuştur.
- Kompozitlerin SEM görüntülerindeki boşluk oluşumlarıyla malzeme performansı arasında ilişki olduğu düşünülmüştür.
- Başlangıçta şeffaf olan epoksi reçine, çörek otu posası ilavesiyle siyah renk kazanmış olup, kalsitle beraber kullanıldığında gri renk kazanmıştır.

Çalışma sonucunda çörek otu posası ve kalsit'in hibrit dolgu olarak epoksi reçine içinde kullanılabileceği görülmüştür. Çevreye verilen zarar ve epoksi reçine maliyeti, kullanılan dolgularla birlikte azaltılmıştır. Malzeme özelliklerinden bir kısmı, belli oranlardaki dolguların hibrit kullanımıyla gelişmiştir. Gelişmeyen durumlarda bile yüksek performans gerektirmeyen uygulamalarda kullanım için uygundur.

KAYNAKÇA

- Abdelmalik, A. A., Ogbodo, M. O., & Momoh, G. E. (2019). Investigating the mechanical and insulation performance of waste eggshell powder/epoxy polymer for power insulation application. *SN Applied Sciences*, 1, 1238. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1259-9>
- Acikbas, N. C., & Acikbas, G. (2017). Epoxy Matrix Composites Containing Urea Formaldehyde Waste Particulate Filler. *Waste and Biomass Valorization*, 8(3), 669–678. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9651-9>
- Ağcan, A. E., & Kartal, İ. (2025). A review of waste-derived fillers for enhancing the properties of epoxy resins. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 138, 103944. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2025.103944>
- Ageyeva, T., Bárány, T., & Karger-Kocsis, J. (2019). Composites. In *Polypropylene Handbook: Morphology, Blends and Composites* (pp. 481–578). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12903-3_9/FIGURES/3
- Agunsoye, J. O., Isaac, T. S., & Samuel, S. O. (2012). Study of Mechanical Behaviour of Coconut Shell Reinforced Polymer Matrix Composite. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11, 774–779. <http://www.SciRP.org/journal/jmmce>
- Ahmetli, G., Kocaman, S., Ozaytekin, I., & Bozkurt, P. (2013). Epoxy composites based on inexpensive char filler obtained from plastic waste and natural resources. *Polymer Composites*, 34(4), 500–509. <https://doi.org/10.1002/PC.22452>
- Aigbodion, V. S. (2022). Insights in the enhancement of electrical conductivity and dielectric constant of epoxy-carbon nanotubes decorated with CaCO₃-derived from waste eggshell hybrid composites. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(10), 100736. <https://doi.org/10.1016/J.JICS.2022.100736>
- Alojaly, H. M., Hammouda, A., & Benyounis, K. Y. (2023). Review of recent developments on metal matrix composites with particulate reinforcement. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00041-8>
- Anam, A., Gamit, N., Prajapati, V., & Dholakiya, B. Z. (2023). An overview of kaolin and its potential application in thermosetting polymers. *Materials Today Communications*, 36, 106827. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2023.106827>
- Arjmandi, R., Hassan, A., Majeed, K., & Zakaria, Z. (2015). Rice Husk Filled Polymer Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/501471>
- Arumugam, H., Iqbal M, M., Ahn, C. H., Rimdusit, S., & Muthukaruppan, A. (2023). Development of high performance granite fine fly dust particle reinforced epoxy composites: structure, thermal, mechanical, surface and high voltage breakdown strength properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 2795–2811. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.03.199>
- Arunkumar, S., Gladson Varghese, A., & Jayaraman, R. (2023). Evaluation of flexural and hardness properties of waste marble powder filled short banana fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.235>
- Aslan, S. (2021). Çörek Otu Posasının Aktif Karbon Üretiminde Değerlendirilmesi. *Firat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33(1), 193–201.

- Athawale, A. A., & Joshi, A. M. (2016). Electronic Applications of Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber and Its Composites. In *Flexible and Stretchable Electronic Composites* (pp. 305–333). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-23663-6_11
- Atif, M., Kashif, A. U. R., Khaliq, Z., Mahmood, A., Hussain, M. A., & Bongiovanni, R. (2020). Electrochemical evaluation of textile industry waste derived carbon particles for UV-cured epoxy composites. *Diamond and Related Materials*, 105, 107804. <https://doi.org/10.1016/J.DIAMOND.2020.107804>
- Avar, G., Meier-Westhues, U., Casselmann, H., & Achten, D. (2012). Polyurethanes. In *Polymer Science: a Comprehensive Reference* (Vol. 10, pp. 411–441). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00275-2>
- Ayhan, F., & Altınkaynak, D. (2022). ÇÖREK OTU FİZİBİLİTE RAPORU VE YATIRIMCI REHBERİ.
- Azman, M. A., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Petru, M., Ruzaidi, C. M., Sapuan, S. M., Wan Nik, W. B., Ishak, M. R., Ilyas, R. A., & Suriani, M. J. (2021). Natural Fiber Reinforced Composite Material for Product Design: A Short Review. *Polymers*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/POLYM13121917>
- Bakhshabadi, H., Mirzaei, H., Ghodsvai, A., Jafari, S. M., Ziaifar, A. M., & Farzaneh, V. (2017). The effect of microwave pretreatment on some physico-chemical properties and bioactivity of Black cumin seeds' oil. *Industrial Crops and Products*, 97, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.12.005>
- Bansal, N. P., & Lamon, J. (2014). Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology. In *Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology* (Vol. 9781118231166). Wiley Blackwell.
<https://doi.org/10.1002/9781118832998>
- Buaphuen, P., Khunna, D., & Vittayakorn, W. (2021). Utilization of Waste Glass Powder as a Filler in Epoxy Resin Based Composite. *Integrated Ferroelectrics*, 223(1), 58–67. <https://doi.org/10.1080/10584587.2021.1964286>
- Byun, Y., & Kim, Y. T. (2014). Bioplastics for Food Packaging: Chemistry and Physics. *Innovations in Food Packaging: Second Edition*, 353–368.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394601-0.00014-X>
- Cabrera, F. C. (2021). Eco-friendly polymer composites: A review of suitable methods for waste management. *Polymer Composites*, 42(6), 2653–2677.
<https://doi.org/10.1002/PC.26033>
- Case, S. W., & Reifsnider, K. L. (2003). Fatigue of Composite Materials. *Comprehensive Structural Integrity: Nine Volume Set*, 1–9, 405–441.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-043749-4/04100-8>
- Çayırılı, S. (2020). KALSİTİN YÜZEY MODİFİKASYONU: BÖLÜM I. ÜRETİM TEKNOLOJİSİ VE KULLANILAN DONANIMLAR. *Scientific Mining Journal*, 59(1), 51–64. <https://doi.org/10.30797/MADENCILIK.705498>
- Chan, J. X., Wong, J. F., Hassan, A., Mohamad, Z., & Othman, N. (2020). Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review. *Polymer Composites*, 41(2), 395–429. <https://doi.org/10.1002/PC.25403>
- Chandra Dubey, S., Mishra, V., & Sharma, A. (2021). A review on polymer composite with waste material as reinforcement. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2846–2851. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.03.611>
- Chandrasekaran, C. (2017). Rubbers Mostly Used in Process Equipment Lining. In *Anticorrosive Rubber Lining* (pp. 87–101). William Andrew Publishing.

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-44371-5.00012-8>
- Chawla, K. K. (2016). Glass Fibers. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02325-0>
- Chowaniec, A. (2021a). The Effect of the Viscosity and the Contact Angle on the Pull-Off Strength of Epoxy Resin Modified with Waste Granite Powders. *6th International Conference on Adhesive Bonding 2021*, 83–102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87668-5_6
- Chowaniec, A. (2021b). Using Waste Limestone Powder as Filler in a Toxic Epoxy Resin Coating and Its Influence on Adhesive Properties. *Chemical Engineering Transactions*, 88, 1063–1068. <https://doi.org/10.3303/CET2188177>
- Chowaniec, A., Czarnecki, S., & Sadowski, Ł. (2022). The effect of the amount and particle size of the waste quartz powder on the adhesive properties of epoxy resin coatings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 117, 103009. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2021.103009>
- Chowaniec, A., Czarnecki, S., & Sadowski, Ł. (2023). Decreasing the hazardous effect of waste quartz powder and the toxicity of epoxy resin by its synergistic application in industrial coatings. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 25367–25381. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-19772-0>
- Chowaniec, A., & Ostrowski, K. (2018). Epoxy resin coatings modified with waste glass powder for sustainable construction. *Czasopismo Techniczne*, 8(115), 99–109. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.118.8893>
- Chowaniec, A., Sadowski, Ł., & Żak, A. (2020). The chemical and microstructural analysis of the adhesive properties of epoxy resin coatings modified using waste glass powder. *Applied Surface Science*, 504, 144373. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2019.144373>
- Chowaniec-Michalak, A., Czarnecki, S., & Sadowski, Ł. (2022). Waste granite powders as fillers in epoxy coatings: A case study in a car repair workshop. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 238(7), 2583–2591. <https://doi.org/10.1177/09544062221126639>
- Chowaniec-Michalak, A., Czarnecki, S., Sadowski, Ł., & Królicka, A. (2022). Recycling of waste limestone powders for the cleaner production of epoxy coatings: Fundamental understanding of the mechanical and microstructural properties. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133828. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133828>
- Clarson, S. J. (2003). Silicones and Silicone-Modified Materials: A Concise Overview. In *Synthesis and Properties of Silicones and Silicone-Modified Materials* (Vol. 11, pp. 1–10). UTC. <https://doi.org/10.1021/BK-2003-0838.CH001>
- da Silva, A. P., Pereira, M. de P., Passador, F. R., & Montagna, L. S. (2020). PLA/Coffee Grounds Composites: A Study of Photodegradation and Biodegradation in Soil. *Macromolecular Symposia*, 394(1). <https://doi.org/10.1002/MASY.202000091>
- Das, O., Babu, K., Shanmugam, V., Sykam, K., Tebyetekerwa, M., Neisiany, R. E., Försth, M., Sas, G., Gonzalez-Libreros, J., Capezza, A. J., Hedenqvist, M. S., Berto, F., & Ramakrishna, S. (2022). Natural and industrial wastes for sustainable and renewable polymer composites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112054. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.112054>

- Das, S. K., Nath, M. R., Das, R. C., Mondal, M., & Bhowmik, S. (2021). Quartz Reinforced Unsaturated Polyester Resin Composites: Preparation and Characterization. *Asian Journal of Applied Chemistry Research*, 14–25. <https://journalajacr.com/index.php/AJACR/article/view/175/349>
- Datta, A. K., Datta, A. K., Saha, A., Bhattacharya, A., Mandal, A., Paul, R., & Sengupta, S. (2012). Black cumin (*Nigella sativa* L.)-a review. *Journal of Plant Development Sciences*, 4(1), 1–43. <https://www.researchgate.net/publication/268207519>
- Dattatreya, K., Sathees Kumar, S., Prasad, V. V. S. H., & Ranjan Pati, P. (2023). Mechanical properties of waste natural fibers/fillers reinforced epoxy hybrid composites for automotive applications. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.02.001>
- De Souza, F. M., Kahol, P. K., & Gupta, R. K. (2021). Introduction to Polyurethane Chemistry. In *Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates* (Vol. 1380, pp. 1–24). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/BK-2021-1380.CH001/ASSET/IMAGES/LARGE/BK-2020-00517M_G020.JPEG
- DeArmitt, C. (2017). Magnetite. In *Fillers for Polymer Applications* (pp. 245–257). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9_34
- DeArmitt, C., & Rothon, R. (2017). *Particulate Fillers, Selection, and Use in Polymer Composites* (pp. 3–27). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9_1
- Diwedi, R. K., Bhaskar, J., Pandey, P., & Kumar, S. (2017). Characterization Of Non-Metallic Waste Material Reinforced Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5361–5369. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.05.048>
- Dodiuk, H., & Goodman, S. H. (2014). Introduction. In *Handbook of Thermoset Plastics* (pp. 1–12). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00001-4>
- Dromel, P. C., & Singh, D. (2021). Biomanufacturing. In *3D Printing in Medicine and Surgery: Applications in Healthcare* (pp. 137–170). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102542-0.00009-9>
- Elsheikhi, S., & Benyounis, K. Y. (2022). Review of recent developments in polymer matrix composites with fiber reinforcements. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00031-5>
- Emre Sucu, Y., & Dandan Doganci, M. (2024). *Mechanical, Morphological and Thermal Properties of Thermoplastic Copolyester Elastomer Composites Filled with Calcite*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-4007030/V2>
- Ersoy, O., & Köse, H. (2020). Comparison of the effect of reactive and nonreactive treatments on the dispersion characteristics of a calcium carbonate (calcite) filler in a polypropylene matrix composite. *Polymer Composites*, 41(9), 3483–3490. <https://doi.org/10.1002/PC.25634>
- Fahad, B. M., & Naser, A. A. (2018). Enhance Some Insulation Properties of Epoxy by Using Waste Materials. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, 21(2), 259–265. <https://doi.org/10.29194/NJES21020259>
- Fiore, V., Di Bella, G., Scalici, T., & Valenza, A. (2018). Effect of plasma treatment on mechanical and thermal properties of marble powder/epoxy composites. *Polymer Composites*, 39(2), 309–317. <https://doi.org/10.1002/PC.23937>
- Garadimani, K. R., Raju, G. U., & Kodancha, K. G. (2015). Study on Mechanical

- Properties of Corn Cob Particle and E-Glass Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *American Journal of Materials Science*, 5(3C), 86–91. <https://doi.org/10.5923/C.MATERIALS.201502.18>
- Gargol, M., Klepka, T., Klapiszewski, Ł., & Podkościelna, B. (2021). Synthesis and Thermo-Mechanical Study of Epoxy Resin-Based Composites with Waste Fibers of Hemp as an Eco-Friendly Filler. *Polymers*, 13(4), 503. <https://doi.org/10.3390/POLYM13040503>
- Grigore, M. E. (2017). Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling 2017*, Vol. 2, Page 24, 2(4), 24. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING2040024>
- Güngör, A. (2023). The effect of Cumin Black (*Nigella Sativa* L.) as bio-based filler on chemical, rheological and mechanical properties of epdm composites. *Turkish Journal of Engineering-2023*, 7(4), 279–285. <https://doi.org/10.31127/tuje.1180753>
- Gupta, T., Pratibha, K., Garg, T., Shankar, S., Gaurav, S., & Verma, R. (2023). Sustainable Green Composites for Packaging Applications. In *Sustainability of Green and Eco-friendly Composites* (pp. 129–144). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003272625-10/SUSTAINABLE-GREEN-COMPOSITES-PACKAGING-APPLICATIONS-TANIKA-GUPTA-PRATIBHA-TANNU-GARG-SHANKAR-GAURAV-ROHIT-VERMA>
- Hagen, R. (2012). Polylactic Acid. *Polymer Science: A Comprehensive Reference: Volume 1-10*, 1–10, 231–236. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00269-7>
- Haldar, S. K. (2020). Minerals and rocks. In *Introduction to Mineralogy and Petrology* (pp. 1–51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820585-3.00001-6>
- Hanemann, T., & Szabó, D. V. (2010). Polymer-Nanoparticle Composites: From Synthesis to Modern Applications. *Materials*, 3(6), 3468. <https://doi.org/10.3390/MA3063468>
- Hani, F., Firouzi, A., Islam, M. R., & Sumdani, M. G. (2021). Mechanical and thermal properties of fishbone-based epoxy composites: The effects of thermal treatment. *Polymer Composites*, 42(3), 1224–1234. <https://doi.org/10.1002/pc.25895>
- Hassan, T., Jamshaid, H., Mishra, R., Khan, M. Q., Petru, M., Novak, J., Choteborsky, R., & Hromasova, M. (2020). Acoustic, Mechanical and Thermal Properties of Green Composites Reinforced with Natural Fibers Waste. *Polymers*, 12(3), 654. <https://doi.org/10.3390/POLYM12030654>
- Heriyanto, Pahlevani, F., & Sahajwalla, V. (2019). Effect of different waste filler and silane coupling agent on the mechanical properties of powder-resin composite. *Journal of Cleaner Production*, 224, 940–956. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.03.269>
- Hicyilmaz, A. S., & Bedeloglu, A. C. (2021). Applications of polyimide coatings: a review. *SN Applied Sciences*, 3(3), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S42452-021-04362-5/FIGURES/13>
- Higgins, C., Cahill, J., Jolanki, R., & Nixon, R. (2020). Epoxy Resins. In *Kanerva's Occupational Dermatology* (pp. 757–788). https://doi.org/10.1007/978-3-319-68617-2_51
- Huang, X., Su, S., Xu, Z., Miao, Q., Li, W., & Wang, L. (2023). Advanced Composite Materials for Structure Strengthening and Resilience Improvement. *Buildings 2023*, Vol. 13, Page 2406, 13(10), 2406.

- <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13102406>
- Ibrahim, S., Riahi, O., Said, S. M., Sabri, M. F. M., & Rozali, S. (2019). Biopolymers From Crop Plants. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11573-5>
- Immanuel Durai Raj, J., Arun Vasantha Geethan, K., John Rajan, A., & Vijay Ananth, S. (2023). Characterization of epoxy resin based banana fiber reinforced composite with waste CD powder filler. *Materials Today: Proceedings*, 90, 19–23. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.152>
- İşlek Coşkun, Y. (2020). ÇÖREKOTU POSASI KULLANILARAK SULARDAN DEMİR(III) İYONUNUN GİDERİLMESİ. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 25(2), 961–980. <https://doi.org/10.17482/uumfd.715236>
- Jayaraman, R., Karthikeyan, T., & Arunkumar, S. (2023a). Assessment of compressive and wear performance of waste marble powder and short banana fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.233>
- Jayaraman, R., Karthikeyan, T., & Arunkumar, S. (2023b). Assessment of compressive and wear performance of waste marble powder and short banana fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.233>
- Jensin Joshua, J., Venkatanarayanan, P. S., & Singh, D. (2020). A literature review on composite materials filled with and without nanoparticles subjected to high/low velocity impact loads. *Materials Today: Proceedings*, 33, 4635–4641. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.294>
- Jin, F.-L., Li, X., & Park, S.-J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 29, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>
- Joseph, J., Paul, J., & Sidpara, A. (2017). Thermoplastic Composites for EMI Shielding Applications. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10379-0>
- Kadhim, H., Fahad, B., & Hameed, A. (2022). Study The Mechanical Properties of Epoxy Matrix Composite Materials Using Glass Waste Particles. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(131), 963–968. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2022.132301.5836>
- KALSİT KULLANIM ALANLARI. (n.d.). Retrieved June 7, 2024, from <https://esenmikronize.com.tr/Menu/detay/kalsit-kullanım-alanları.html>
- Kampa, Ł., Chowaniec, A., Królicka, A., & Sadowski, Ł. (2022). Adhesive properties of an epoxy resin bonding agent modified with waste granite powder. *Journal of Coatings Technology and Research*, 19(5), 1303–1316. <https://doi.org/10.1007/S11998-022-00620-2>
- Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A. A., Chavali, A., & Hariharan, S. (2023). A comprehensive review on polymer matrix composites: material selection, fabrication, and application. *Polymer Bulletin*, 80(1), 47–87. <https://doi.org/10.1007/S00289-022-04087-4>
- Kanta Mahapatra, T., Satapathy, S., & Kumar Panda, S. (2022). Thermal and acoustic properties evaluation of waste tire and textile reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 62(P10), 5982–5986. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.04.962>
- Kartal, İ., & Ağcan, A. E. (2024). Çörek Otu Posası Dolgulu Epoksi Kompozitlerin

- Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *9th International Biltek Congress on Current Developments in Science, Technology and Social Sciences*, 460–471.
- Kartal, İ., & Özcan, Z. (2023). Investigation of effect of chestnut sawdust on mechanical properties of epoxy matrix composites. *Journal of Innovative Engineering and Natural Science*, 3(2), 67–74. <https://doi.org/10.29228/JIENS.69363>
- Kartal, İ., & Selimoğlu, H. (2023). Usability of Pine Sawdust and Calcite Together as Filler in Polyester Composites. *International Journal of Computational and Experimental Science and ENGINEERING (IJCESEN)*, 9(3), 267–273. <http://dergipark.org.tr/en/pub/ijcesen>
- Karthikeyan, R., Girimurugan, R., Sahoo, G., Maheskumar, P., & Ramesh, A. (2022). Experimental investigations on tensile and flexural properties of epoxy resin matrix waste marble dust and tamarind shell particles reinforced bio-composites. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2215–2219. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.08.435>
- Kausar, A. (2023). Natural rubber-based micro- and nanocomposites. In *Handbook of Natural Polymers, Volume 1: Sources, Synthesis, and Characterization* (pp. 353–367). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99853-6.00014-0>
- Kesarwani, P., Jahan, S., & Kesarwani, K. (2015). *Composites: Classification and its manufacturing process*. 1(9), 352–358. www.allresearchjournal.com
- Kirboga, S., & Öner, M. (2020). Oxygen Barrier and Thermomechanical Properties of Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) Biocomposites Reinforced with Calcium Carbonate Particles. *Acta Chimica Slovenica*, 67(1), 137–150. <https://doi.org/10.17344/ACSI.2019.5291>
- Koerner, G. R., Hsuan, Y. G., & Koerner, R. M. (2007). The durability of geosynthetics. In *Geosynthetics in Civil Engineering* (pp. 36–65). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845692490.1.36>
- Köhler, T., Gutacker, A., & Mejía, E. (2020). Industrial synthesis of reactive silicones: reaction mechanisms and processes. *ORGANIC CHEMISTRY FRONTIERS*, 7, 4108. <https://doi.org/10.1039/d0qo01075h>
- Koşar, İ., & Özel, A. (2018). Çörekotu (*Nigella sativa* L.) Çeşit ve Popülasyonlarının Karakterizasyonu: I. Tarımsal Özellikler. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 22(4), 533–543. <https://doi.org/10.29050/harranziraat.399540>
- Krzywiński, K., Sadowski, Ł., Fedoruk, K., & Sieradzki, A. (2023). Fundamental understanding of the thermal properties of amorphous epoxy resin coatings filled with quartz-feldspar powder sourced from quarry waste. *Applied Surface Science*, 614, 156133. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2022.156133>
- Kumar, N., Ukey, P. D., Francis, V., Singh, R. P., & Sahu, S. (2022). Plastic pellets. In *Polymers for 3D Printing: Methods, Properties, and Characteristics* (pp. 307–323). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818311-3.00019-7>
- Kumar, R., Kumar, K., Sahoo, P., & Bhowmik, S. (2014). Study of Mechanical Properties of Wood Dust Reinforced Epoxy Composite. *Procedia Materials Science*, 6, 551–556. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.070>
- Kumar, S., Krishnan, S., & Mohanty, S. (2022). Applications of elastomer blends and composites. In *Elastomer Blends and Composites: Principles, Characterization, Advances, and Applications* (pp. 305–329). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85832-8.00003-1>

- Kumaran, P., Mohanamurugan, S., Madhu, S., Vijay, R., Lenin Singaravelu, D., Vinod, A., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. (2020). Investigation on thermo-mechanical characteristics of treated/untreated *Portunus sanguinolentus* shell powder-based jute fabrics reinforced epoxy composites. *Journal of Industrial Textiles*, 50(4), 427–459. <https://doi.org/10.1177/1528083719832851>
- Kuvars Tozu 44 Mikron, CAS No. 14808-60-7 - NANOKAR. (n.d.). Retrieved June 7, 2024, from <https://www.nanokar.com.tr/urun/kuvars-tozu-44-mikron>
- Lima de Oliveira, M., Meira De Souza, L. G., Pereira Neto, R. V., & Cardoso de Lima, J. (2020). Obtaining and characterization of a composite with polymer matrix and corn cob waste filler. *Research, Society and Development*, 9(12), 1–16. <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/10849/9973>
- Maluga, R., Sunil Kumar, M., Ranjan Pati, P., & Sathees Kumar, S. (2023). Physical, Mechanical and Wear Characterization of Epoxy Composites reinforced With Granite/Marble powder. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.02.045>
- Mangore, R. V., Ahankari, S. S., Verma, K. D., & Kar, K. K. (2022). Fly ash-reinforced acrylonitrile butadiene styrene composites. In *Handbook of Fly Ash* (pp. 301–334). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817686-3.00026-8>
- Marcio, L. (2015). Composites. In *Carbon Nanotube Reinforced Composites: CNR Polymer Science and Technology* (pp. 37–72). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3195-4.00002-3>
- Mathenulla Shariff, M., Arpitha, G. R., Jain, N., Shankar, U., Verma, A., & Shivakumar, N. D. (2023). A comparative study on the effect of reinforcing boron nitride/alumina in epoxy-based hybrid composite with *Millettia pinnata* leaf powder and glass sheets: Experimental fabrication, mechanical and micro-structural characterization. *Hybrid Advances*, 4, 100095. <https://doi.org/10.1016/J.HYBADV.2023.100095>
- Maxineasa, S. G., & Taranu, N. (2018a). Life cycle analysis of strengthening concrete beams with FRP. *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, 673–721. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00024-1>
- Maxineasa, S. G., & Taranu, N. (2018b). Life cycle analysis of strengthening concrete beams with FRP. In *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* (pp. 673–721). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00024-1>
- Mayana, P., Raviprakash, A. V., Mohamed Ali, S., & Mohammed, R. (2022). Effect of industrial wastes as epoxy modifiers on mechanical characteristics of E-glass fiber reinforced hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 65, 416–422. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.07.200>
- McKeen, L. W. (2017). Polyimides. In *Film Properties of Plastics and Elastomers* (pp. 147–185). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813292-0.00007-1>
- McKeen, L. W. (2023). The effects of temperature, humidity, and other factors on the properties of polyamides (nylons). In *The Effect of Temperature and Other Factors on Plastics and Elastomers* (pp. 327–512). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99555-9.00001-4>
- Mi, X., Liang, N., Xu, H., Wu, J., Jiang, Y., Nie, B., & Zhang, D. (2022). Toughness and its mechanisms in epoxy resins. *Progress in Materials Science*, 130, 100977. <https://doi.org/10.1016/J.PMATSCI.2022.100977>

- Miguel Martín-Martínez, J. (2002). Rubber base adhesives. In *Adhesion Science and Engineering* (pp. 573–675). Elsevier Science B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-044451140-9/50013-5>
- Mohankumararadhya, H. M., Wadappi, P., Chandrashekar, A., & Naik, Y. (2020). Studies on bio waste product particle reinforced polymer composites. *AIP Conference Proceedings*, 2274, 030047. <https://doi.org/10.1063/5.0022746>
- Nadzri, S. N. I. H. A., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Safri, S. N. A., Talib, A. R. A., Jawaidd, M., & Basri, A. A. (2020). A comprehensive review of coconut shell powder composites: Preparation, processing, and characterization. *https://doi.org/10.1177/0892705720930808*, 35(12), 2641–2664. <https://doi.org/10.1177/0892705720930808>
- Naik, P., Acharya, S. K., Sahoo, P., & Pradhan, S. (2021). Abrasive wear behaviour of orange peel (biowaste) particulate reinforced polymer composites. *Journal of Engineering Tribology*, 235(10), 2099–2109. <https://doi.org/10.1177/1350650121991412>
- Negoita, C., Cristache, N., & Bodor, M. (2016). The Epoxy Resin-History and Perspectives. *MATERIALE PLASTICE*, 53(3), 564–571. <http://www.revmaterialeplastice.ro564>
- Oladele IO, & Isola BA. (2016a). Development of bone particulate reinforced epoxy composite for biomedical application. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering, Volume 1*(Issue 1). <https://doi.org/10.15406/JABB.2016.01.00006>
- Oladele IO, & Isola BA. (2016b). Development of Bone Particulate Reinforced Epoxy Composite For Biomedical Application. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 1(1), 35–40. <https://doi.org/10.15406/jabb.2016.01.00006>
- Ouarhim, W., Zari, N., Bouhfid, R., & Qaiss, A. E. K. (2019). Mechanical performance of natural fibers–based thermosetting composites. In *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 43–60). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00003-5>
- Özdemir, T. (2020). Elastomeric micro- and nanocomposites for neutron shielding. In *Micro and Nanostructured Composite Materials for Neutron Shielding Applications* (pp. 125–137). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819459-1.00005-2>
- Özen, M., Demircan, G., Açıkgöz, A., Alptekin, H., & K1sa, M. (2024). A Sustainable Bio-Filler for Epoxy Composites: Use of Pistachio Shell Powder. *Osmaniye Korkut Ata University Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(1), 150–165. <https://doi.org/10.47495/OKUFBED.1289068>
- Parameswaranpillai, J., Midhun Dominic, C. D., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Introduction to elastomers. *Elastomer Blends and Composites: Principles, Characterization, Advances, and Applications*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85832-8.00002-X>
- Patnaik, P. K., Mishra, S. K., Swain, P. T. R., Sameer, & Panda, D. (2022). Effect of Groundnut Shell Particulate Content on Physical and Mechanical Behavior of Jute–Epoxy Hybrid Composite. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, 103(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/S40034-020-00185-Y>
- Patterson, R., Kandelbauer, A., Müller, U., & Lammer, H. (2014). Crosslinked Thermoplastics. In *Handbook of Thermoset Plastics* (pp. 697–737). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00017-8>

- Pham, H. Q., & Marks, M. J. (2005). Epoxy Resins. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd.
https://doi.org/10.1002/14356007.A09_547.PUB2
- Pizzi, A., & Ibeh, C. C. (2014a). Aminos. In *Handbook of Thermoset Plastics* (pp. 75–91). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00004-X>
- Pizzi, A., & Ibeh, C. C. (2014b). Phenol–Formaldehydes. In *Handbook of Thermoset Plastics* (pp. 13–44). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-3107-7.00002-6>
- Prabhakar, M. N., Shah, A. U. R., Rao, K. C., & Song, J. Il. (2015). Mechanical and thermal properties of epoxy composites reinforced with waste peanut shell powder as a bio-filler. *Fibers and Polymers*, 16(5), 1119–1124.
<https://doi.org/10.1007/s12221-015-1119-1>
- Prabhu, L., Krishnaraj, V., Gokulkumar, S., Sathish, S., & Ramesh, M. (2019). Mechanical, Chemical and Acoustical Behavior of Sisal – Tea Waste – Glass Fiber Reinforced Epoxy Based Hybrid Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 16, 653–660. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.05.142>
- Prabhu L, Krishnaraj V, Sathish S, & Ramesh. (2019). *Mechanical, Chemical and Acoustical Behavior of Sisal-Tea Waste-Glass Fiber Reinforced Epoxy Based Hybrid Polymer Composites*. www.sciencedirect.com
- Priyadarshini, S., Soren, S., & Durga, G. (2023). Effect of waste marble dust powder as a filler material on mechanical properties and water uptake capacity of Epoxy/glass fiber composites. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.096>
- Pusch, J., & Wohlmann, B. (2018). Carbon Fibers. In *Inorganic and Composite Fibers: Production, Properties, and Applications* (pp. 31–51). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102228-3.00002-5>
- Quberk Jeeva Singh, C., Rajamurugan, G., & Krishnasamy, P. (2021). Impact of E-waste on the mechanical and machining characteristics of epoxy-based hemp fibre composite. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7143–7152.
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.11.285>
- Quirino, R. L., Monroe, K., Fleischer, C. H., Biswas, E., & Kessler, M. R. (2021). Thermosetting polymers from renewable sources. *Polymer International*, 70(2), 167–180. <https://doi.org/10.1002/PI.6132>
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I. (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354–6374.
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2019.09.068>
- Rajan, S. T. K., Nagarajan, K. J., Balasubramani, V., Sathickbasha, K., Sanjay, M. R., Siengchin, S., & Balaji, A. N. (2023). Investigation of mechanical and thermo-mechanical characteristics of silane-treated cellulose nanofibers from agricultural waste reinforced epoxy adhesive composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 126, 103492. <https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2023.103492>
- Ramadan, M. F. (2016). Black Cumin (*Nigella sativa*) Oils. *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*, 269–275. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416641-7.00030-4>
- Ramos, R. R. F., Siqueira, D. D., Wellen, R. M. R., Leite, I. F., Glenn, G. M., & Medeiros, E. S. (2019). Development of Green Composites Based on

- Polypropylene and Corncob Agricultural Residue. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(8), 1677–1685. <https://doi.org/10.1007/S10924-019-01462-7/TABLES/4>
- Ranakoti, L., Gangil, B., Rajesh, P. K., Singh, T., Sharma, S., Li, C., Ilyas, R. A., & Mahmoud, O. (2022). Effect of surface treatment and fiber loading on the physical, mechanical, sliding wear, and morphological characteristics of tasar silk fiber waste-epoxy composites for multifaceted biomedical and engineering applications: fabrication and characterizations. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 2863–2876. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.06.024>
- Reddy Nagavally, R. (2016). *COMPOSITE MATERIALS-HISTORY, TYPES, FABRICATION TECHNIQUES, ADVANTAGES, AND APPLICATIONS*.
- Robert J. Young, & Peter A. Lovell. (2011). *Introduction to Polymers*. https://books.google.com.tr/books?id=ImQg2MK8NtkC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Rödelheimer, M. T., & d’Almeida, J. R. M. (2001). Analysis of the use of an industrial waste as reinforcement in epoxy composites. *Macromolecular Symposia*, 169(1), 229–235. [https://doi.org/10.1002/1521-3900\(200105\)169:1<229::AID-MASY229>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1521-3900(200105)169:1<229::AID-MASY229>3.0.CO;2-I)
- Ronca, S. (2017). Polyethylene. In *Brydson’s Plastics Materials: Eighth Edition* (pp. 247–278). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00010-4>
- Rothon, R. (2017a). Fillers for Polymer Applications. In S. Palsule (Ed.), *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>
- Rothon, R. (2017b). Precipitated and Fumed Silicas and Related Products. In *Fillers for Polymer Applications* (pp. 293–311). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9_10
- Russo, P., Acierno, D., Vignali, A., & Lavorgna, M. (2014). Poly(lactic acid)-based systems filled with talc microparticles: Thermal, structural, and morphological issues. *Polymer Composites*, 35(6), 1093–1103. <https://doi.org/10.1002/PC.22757>
- Saçak, M. (1998). *POLİMER KİMYASINA GİRİŞ*. <https://www.nadirkıtap.com/polimer-kimyasina-giris-1998-ilk-baskidir-prof-dr-mehmet-sacak-kitap20175138.html>
- Saikumar Reddy, R. V., Jeeru, L. R., Venkateshwar Reddy, P., & Swamy, K. (2022). Mechanical Properties Evaluation of Pomegranate Peel Powder Filled Jute Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Materials Today: Proceedings*, 62(P13), 6923–6926. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.12.043>
- Sastri, V. R. (2022). Materials Used in Medical Devices. In *Plastics in Medical Devices* (pp. 41–64). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85126-8.00015-1>
- Sathees Babu, J., Krishnamoorthi, T., Vijayasharathi, N., Vignesh, S., Yasminebegum, A., & Anusha, M. (2023). Wear performance and surface roughness measurement of epoxy based bio composites reinforced with date seed powder and coconut shell powder. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.236>
- Seçme, H., & Savci, S. (2018). Dye Removal Using Pulp (*Nigella sativa*) by Adsorption 148 Ç. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 33(4), 147–154.
- Senthilkumar, K., Chandrasekar, M., Alothman, O. Y., Fouad, H., Jawaid, M., & Azeem, M. A. (2022). Flexural, impact and dynamic mechanical analysis of hybrid

- composites: Olive tree leaves powder/ pineapple leaf fibre/epoxy matrix. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 4241–4252. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2022.11.036>
- Setyawan, P. D., Martadinata, W., Sugiman, S., Salman, S., Catur, A. D., & Zainuri, A. (2019). Water absorption and tensile properties of the hybrid of fly ash-CaCO₃/epoxy composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 694(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/694/1/012037>
- Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskiene, R. (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1559–1562. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.11.086>
- Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimašauskiene, R., & Pinca-Bretotean, C. (2020). A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2419–2424. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.02.516>
- Sharma, H., Singh, I., & Misra, J. P. (2019). Mechanical and thermal behaviour of food waste (Citrus limetta peel) fillers-based novel epoxy composites. *Polymers and Polymer Composites*, 27(9), 527–535. <https://doi.org/10.1177/0967391119851012>
- Shit, S. C., & Shah, P. (2013). A review on silicone rubber. *National Academy Science Letters*, 36(4), 355–365. <https://doi.org/10.1007/S40009-013-0150-2/METRICS>
- Shivamurthy, B., Doreswamy, D., Shiva Prasad, H. C., & Nishanth, J. (2018). Physical and Tribo-Mechanical Properties of Waste Rubber Tyre/Epoxy Composites. *Materials Research Express*, 6(9). <https://doi.org/10.2139/SSRN.3465724>
- Sienkiewicz, N., Dominic, M., & Parameswaranpillai, J. (2022). Natural Fillers as Potential Modifying Agents for Epoxy Composition: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 2, p. 265). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14020265>
- Singh, L., Singh, B., & Saxena, K. K. (2020). Manufacturing techniques for metal matrix composites (MMC): an overview. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6(2), 224–240. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1729603>
- Sismanoglu, S., Tayfun, Ü., Gradinariu, P., Popescu, C. M., & Kanbur, Y. (2023). Reuse of black cumin biomass into beneficial additive for thermoplastic polyurethane-based green composites with silane modifiers. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(15), 14169–14184. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03023-w>
- Somashekhar, T. M., Naik, P., Nayak, V., Mallikappa, & Rahul, S. (2018). Study of Mechanical Properties of Coconut Shell Powder and Tamarind Shell Powder Reinforced with Epoxy Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 376(1), 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012105>
- Soni, C., Kumar Patnaik, P., Kumar Mishra, S., Shekhar Panda, S., & Charan Rath, K. (2023). Sisal fiber and groundnut shell particulate reinforced hybrid epoxy composites: A study on mechanical and tribological properties. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.11.041>
- Subhash, C., Krishna, M. R., Raj, M. S., Sai, B. H., & Rao, S. R. (2018). Development of granite powder reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 13010–13014. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.02.286>
- Sun, M., Xiao, Y., Liu, K., Yang, X., Liu, P., Jie, S., Hu, J., Shi, S., Wang, Q., Lim, K. H., Liu, Z., Li, B. G., & Wang, W. J. (2023). Synthesis and characterization of polyolefin thermoplastic elastomers: A review. *Canadian Journal of Chemical*

- Engineering*, 101(9), 4886–4906. <https://doi.org/10.1002/CJCE.24825>
- Tanzi, M. C., Farè, S., & Candiani, G. (2019). Organization, Structure, and Properties of Materials. In *Foundations of Biomaterials Engineering* (pp. 3–103). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101034-1.00001-3>
- Temiz, M., Kocaman, S., & Ahmetli, G. (2023). Evaluation of EPDM waste in environmentally friendly epoxy hybrid composites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 126, 224–238. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2023.06.012>
- Teymur, Y. A., Güzel, F., & İnal, I. G. (2023). High surface area mesoporous carbon from black cumin (*Nigella sativa*) processing industry solid residues via single-stage K₂CO₃ assisted carbonization method: Production optimization, characterization and its some water pollutants removal and supercapacitor performance. *Diamond and Related Materials*, 135, 109815. <https://doi.org/10.1016/J.DIAMOND.2023.109815>
- Thomas, C., Borges, P. H. R., Panzera, T. H., Cimentada, A., & Lombillo, I. (2014). Epoxy composites containing CFRP powder wastes. *Composites Part B: Engineering*, 59, 260–268. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.12.013>
- Turkben, M. (2019). *Using of Tire and EPDM Rubber Wastes in Composite Materials* [Postgraduate, Konya Technical University]. <https://hdl.handle.net/20.500.13091/1436>
- Turkben, M., Kocaman, S., Özmeral, N., Soydal, U., Cerit, A., & Ahmetli, G. (2023). Sustainable production of recycled rubber waste composites with various epoxy systems: A comparative study on mechanical and thermal properties. *Industrial Crops and Products*, 195, 116490. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.116490>
- Valente, M., Rossitti, I., & Sambucci, M. (2023). Different Production Processes for Thermoplastic Composite Materials: Sustainability versus Mechanical Properties and Processes Parameter. *Polymers 2023, Vol. 15, Page 242, 15(1)*, 242. <https://doi.org/10.3390/POLYM15010242>
- Venkatakrishnan, R., Pabhakaran, R., & Narmadadevi, N. (2020). The effect of e-waste particle on mechanical behavior of particulate reinforced epoxy matrix composite. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 573, 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/573/1/012013>
- Verma, D., Gope, P. C., Maheshwari, M. K., & Sharma, R. K. (2012). Bagasse Fiber Composites-A Review. *J. Mater. Environ. Sci*, 3(6), 1079–1092.
- Vinod, A., Sanjay, M. R., Siengchin, S., & Fischer, S. (2021). Fully bio-based agro-waste soy stem fiber reinforced bio-epoxy composites for lightweight structural applications: Influence of surface modification techniques. *Construction and Building Materials*, 303, 124509. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124509>
- Wypych, G. (2013). DATA ON SPECIFIC POLYMERS. In *Handbook of Material Weathering* (pp. 351–546). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-62-1.50017-2>
- Xavier, S. F. (2022). Thermoplastic polymer composites: Processing, properties, performance, applications and recyclability. In *Thermoplastic Polymer Composites: Processing, Properties, Performance, Applications and Recyclability*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119865544>
- Yang, W., Chang, W., Zhang, J., Yeoh, G. H., Boyer, C., & Wang, C. H. (2022a). Effects of waste coffee grounds on the mechanical properties, flame retardancy and

- toxic gas production of epoxy composites. *Materials & Design*, 224, 111347. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2022.111347>
- Yang, W., Chang, W., Zhang, J., Yeoh, G. H., Boyer, C., & Wang, C. H. (2022b). Effects of waste coffee grounds on the mechanical properties, flame retardancy and toxic gas production of epoxy composites. *Materials & Design*, 224, 111347. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2022.111347>
- Yao, J., Zhou, Z., & Zhou, H. (2019). Introduction to Composite Materials. *Highway Engineering Composite Material and Its Application*, 1–23. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6068-8_1
- Yasim-Anuar, T. A. T., Ariffin, H., Padzil, F. N. M., Sharip, N. S., Yee-Foong, L. N., Shazleen, S. S., Megashah, L. N., Abd-Rahim, N. F., & Hassan, M. A. (2022). Nanocellulose applications in packaging materials. In *Industrial Applications of Nanocellulose and its Nanocomposites* (pp. 289–310). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89909-3.00003-1>
- Yaşlak, Salih. (2008). *Organik sinai kimya*. Dahi Yayınları.
- Yogeshwaran, S., Natrayan, L., Udhayakumar, G., Godwin, G., & Yuvaraj, L. (2021). Effect of waste tyre particles reinforcement on mechanical properties of jute and abaca fiber- epoxy hybrid composites with pre-treatment. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 1377–1380. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.06.584>
- Zhang, C. (2014). Understanding the wear and tribological properties of ceramic matrix composites. In *Advances in Ceramic Matrix Composites* (pp. 312–339). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098825.2.312>
- Zilles, J. U. (2017). Micas. In *Fillers for Polymer Applications* (pp. 177–194). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9_14

ÖZGEÇMİŞ

ARİF EMRE AĞCAN

EĞİTİM BİLGİLERİ

2023-2025 **Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Polimer Bilimi ve Teknolojisi, Tezli Yüksek Lisans (İstanbul)**

2016-2021 **Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği, Lisans (Bursa)**

İŞ DENEYİMİ

10/2024 – 02/2025 **Kalite Sorumlusu, İz Baskı Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İstanbul)**

02/2023 – 09/2023 **Proje Stajyeri, Şişecam Bilim ve Teknoloji Merkezi (Kocaeli)**

11/2022 – 02/2023 **Kalite Mühendisi, Takosan Otomobil Göstergeleri San. ve Tic. A.Ş. (İstanbul)**

07/2021 – 01/2022 **Ar-Ge Mühendisi, Siberetik Makina Otomasyon (Bursa)**

10/2020 – 02/2021 **Stajyer, Demmerg Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş. (İstanbul)**

07/2019 – 07/2019 **Stajyer, BODO PROLAST Profil Lastik San. ve Tic. A.Ş. (Bursa)**

YAYINLAR

03/2025 **A Review of Waste-Derived Fillers for Enhancing the Properties of Epoxy Resin**, International Journal of Adhesion and Adhesives

06/2024 **Investigation of Mechanical Properties of Cumin Black Pulp Filled Epoxy Composites**, BİLTEK-IX 9. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Güncel Gelişmeler Kongresi

12/2021 **Enhancement of Mechanical and Piezoresistive Properties of MWCNTs/TPU Composites by Electrical Field Induced Nanoparticle Alignment**, EurasianSciEnTech 3. Uluslararası Avrasya Bilim, Mühendislik ve Teknoloji Konferansı

PROJELER

07/2024 Araştırmacı, **Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri**,
Çörek Otu Posası ve Kalsit Dolgulu Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin
İncelenmesi

02/2023 Proje Stajyeri, **Şişecam**, Cam Elyaf Yüzeyine Kaplama

07/2021 Araştırmacı, **KOSGEB**, Polimer Esaslı Kompozitler Kullanılarak
Piezorezistif Yük Hücresi Geliştirilmesi

