



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT MALZEMELERDE ŞEKER
ÜRETİMİ ATIKLARININ
DEĞERLENDİRİLMESİ

Musa KARA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2025

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Musa KARA tarafından hazırlanan “Kompozit Malzemelerde Şeker Üretimi Atıklarının Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Ülkü SOYDAL

.....

Danışman

Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ

.....

Üye

Doç. Dr. Süheyla KOCAMAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN

Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 231016054 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Musa KARA

01.28.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOMPOZİT MALZEMELERDE ŞEKER ÜRETİMİ ATIKLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Musa KARA

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ

2024, 60 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ

Doç. Dr. Ülkü SOYDAL

Doç. Dr. Süheyla KOCAMAN

Endüstride ham maddeler belli bir amaca göre işlenirken geriye kullanılmayan atık maddeler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan biri de şeker fabrikalarının atık maddesi olan küspe ve karbonatlama çamuru (KK) atıklarıdır ve bunların farklı ürünlerde değerlendirilmesi çevre sorununun çözümüne de yardımcı olacaktır. Bu çalışmada dolgu maddesi olarak şeker üretimi atıkları: kireçleme aşaması çöktürme olan kalsiyum karbonat atığı ve şeker pancarı küspesi, kompozit malzemelerin hazırlanması için kullanılarak kompozit yapımında değerlendirilmiştir. Kompozitlerin hazırlanmasında fenolik epoksi reçine (FER) matris olarak, anhidrit ve amin türü bileşikler ise 2 farklı kürleştirici olarak kullanılmıştır. Kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerine, farklı dolgu maddelerinin ve kürleştiricilerin etkisi incelenmiştir. Kompozitlerin morfolojik yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile, termal özellikleri TGA ile karakterize edilmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde çekme ve sertlik testleri uygulanmıştır. Her 2 tür kompozit için de en uygun dolgu oranı %20 olarak belirlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı değerleri KK kompozitlerinde görülmüştür. Benzer şekilde, KK kompozitleri daha yüksek termal dayanım sergilemişlerdir. KK kompozitlerinin çekme dayanımları %20 dolgu oranı ve MNA kürleştiricisi durumunda 96 MPa, KH 816 kürleştiricisi durumunda ise 84 MPa olarak bulunmuştur. Küspe kompozitlerinin çekme dayanımları ise %20 dolgu oranında MNA ve KH 816 kürleştiricileri durumunda sırasıyla 79 MPa ve 75 MPa olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: fenolik epoksi reçine, karbonatlama atığı, küspe, kompozit

ABSTRACT

MS THESIS

EVALUATION OF SUGAR PRODUCTION WASTES IN COMPOSITE MATERIALS

Musa KARA

**Konya Technical University Institute of Graduate Studies
Department of Chemical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Gulnare AHMETLI

2024, 60 Pages

Jury

Prof. Dr. Gulnare AHMETLI

Assoc. Prof. Dr. Ulku SOYDAL

Assoc. Prof. Dr. Suheyla KOCAMAN

In the industry, unused waste materials emerge when raw materials are processed for a certain purpose. One of these is the waste material of sugar factories, pulp and carbonation sludge (CC), and their evaluation in different products will also help solve the environmental problem. In this study, sugar production wastes as filler material: calcium carbonate waste, which is the calcination stage sediment, and sugar beet pulp were used to prepare composite materials and evaluated in composite production. Phenolic epoxy resin (FER) was used as a matrix in the preparation of composites, and anhydride and amine-type compounds were used as 2 different curatives. The effects of different fillers and curing agents on the mechanical and thermal properties of the composites were investigated. The morphological structures of the composites were characterized by scanning electron microscopy (SEM), and their thermal properties were characterized by TGA. Tensile and hardness tests were applied to determine the mechanical properties. The most suitable filler ratio for both types of composites was determined as 20%. The highest tensile strength values were seen in CC composites. Similarly, KK composites exhibited higher thermal resistance. The tensile strengths of KK composites were found to be 96 MPa in the case of 20% filler ratio and MNA curing agent and 84 MPa in the case of KH 816 curing agent. The tensile strengths of bagasse composites were determined to be 79 MPa and 75 MPa in the case of 20% filler ratio and MNA and KH 816 curing agents, respectively.

Keywords: phenolic epoxy resin, carbonization waste, pressmud, composite

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında ve tamamlanmasında değerli katkılarını esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ'ye en derin teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez çalışmamın yürütülmesi için finansal destek sağlayan Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Musa KARA
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kompozitler	1
1.1.1. Polimer matris.....	2
1.1.1. Takviyeler	3
1.1.2. Kompozit uygulamaları	5
1.2. Şeker Üretimi ve Atıkları.....	8
1.2.1. Şeker endüstrisinde atık türleri	9
1.3. Karbonatlama Atığı.....	16
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	19
2.1. Şeker üretimi atıklarıyla yapılan çalışmalar	19
2.2. Diğer doğal veya sanayi atıklarıyla yapılan çalışmalar	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Kullanılan Kimyasallar	28
3.1.1. Epoksi Reçine (ER)	28
3.1.2. Kürleştirici	28
3.2. Dolgu Maddeleri	29
3.2.1. Karbonatlama atığı (kireç atığı) (KK)	29
3.2.2. Şeker üretimi atığı küspe	29
3.3. Kompozitlerin Hazırlanması	30
3.4. Analizler ve Testler.....	30
3.4.1. TGA	30

3.4.2. SEM	30
3.4.3. XRD	31
3.4.4. Mekanik karakterizasyon	31
3.4.4.1. Çekme Testi	31
3.4.4.2. Sertlik Testi	32
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	33
4.1. Karbonatlama Atığı (kireç atığı) (KK) Kompozitlerinin Karakterizasyonu.....	33
4.2. Köspe Atığı Kompozitlerinin Karakterizasyonu	39
4.2.1. SEM	39
4.2.2. Mekanik özellikler	40
4.2.3. Termal özellikler	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	43
5.1. Sonuçlar	43
5.2. Öneriler	43
KAYNAKLAR	55

Simgeler

T_g: Camı geçiş sıcaklığı

g: Gram

E-modül: Young modülü

°C: Santigrat
derece

Kısaltmalar

FER: Fenolik epoksi reçine

KK: Karbonatlama atığı kalsiyum karbonat

TGA: Termogravimetrik analiz

SEM: Taramalı elektron mikriskopo

XRD: X-ışını difraksiyon spektroskopisi

T₅, T₁₀, T₅₀: Malzemedeki %5, %10, %50 kütle kaybına karşılık gelen sıcaklıklar

MNA: Metil nadik anhidrit

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Endüstriyel düzeyde şeker üretim aşamaları	9
Şekil 1.2. Şeker endüstrisinden kaynaklanan başlıca atıkların özeti	10
Şekil 1.3. Şeker fabrikasında küspe atığının oluşum aşamaları.....	11
Şekil 1.4. Küspe'un güneş ışığında kurutulması	13
Şekil 1.5. Öğütülmüş küспенin görünümü.....	13
Şekil 1.6. Şeker kamışı atıklarından elde edilen faydalı ürünler	14
Şekil 1.7. Şurup üretimi için şeker kamışı suyunun temizlenmesi	17
Şekil 1.8. Kalsiyum karbonat çamuru depolama alanı	17
Şekil 3.1. Fenolik novalak epoksi reçine (FER) kimyasal formülü.....	28
Şekil 3.2. Metil-5-norbornen-2,3-dikarboksilik anhidrit (MNA) kimyasal formülü.....	28
Şekil 3.3. Karbonatlama atığı (kireç atığı).....	29
Şekil 3.4. Küspe atığı.....	29
Şekil 3.5. Kompozit numunelerin boyutları.....	30
Şekil 3.6. Çekme testi cihazı ve çekme testi yapılan numune görüntüsü	31
Şekil 3.7. Sertlik test cihaz.....	32
Şekil 4.1. MNA ve KH 816 ile kürleştirilmiş saf fenolik novalak epoksi reçinenin SEM görüntüleri.....	33
Şekil 4.2. FER ve KK'nin XRD eğrileri	34
Şekil 4.3. KK kompozitlerinin XRD eğrileri	35
Şekil 4.4. Saf KK'nin TGA eğrisi.....	37
Şekil 4.5. MNA ile kürleştirilmiş KK kompozitlerinin TGA eğrileri	38
Şekil 4.6. MNA ve KH 816 ile kürleştirilmiş saf fenolik novalak epoksi reçinenin SEM görüntüleri.....	39
Şekil 4.7. MNA ve KH 816 ile kürleştirilmiş %10-30-50 küspe kompozitlerinin SEM görüntüleri.....	40
Şekil 4.8. Saf FER ve MNA ile kürleştirilmiş küspe kompozitlerinin TGA eğrileri	42

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Bazı polimerlerin özellikleri.....	4
Tablo 1.2. Bazı doğal liflerin ve yaygın olarak kullanılan sentetik liflerin özellikleri.....	4
Tablo 1.3. Küspenin yüzde bileşimi (Diaz, 2016).	11
Tablo 1.4. Küspenin ana besin öğeleri (Diaz, 2016)	12
Tablo 1.5. Şeker kamışı atıklarının kimyasal bileşimi.....	15
Tablo 1.6. CaCO ₃ çamurunun kimyasal bileşimi (Jantasuto ve diğ., 2020)	17
Tablo 4.1. FER/KK kompozitlerinin çekme ve sertlik testi sonuçları.....	36
Tablo 4.2. KK kompozitlerinin termal değerleri	38
Tablo 4.3. Küspe kompozitlerinin çekme ve sertlik testi sonuçları.....	41
Tablo 4.4. Küspe kompozitlerinin termal değerleri	42

1. GİRİŞ

1.1. Kompozitler

Kompozit malzemeler, insanlık tarihinin erken dönemlerinden itibaren önemli bir rol oynamış ve gelecekteki yeniliklerin önünü açmıştır. Kompozitler, korozyon direnci, tasarım esnekliği, dayanıklılık, hafiflik ve mukavemet gibi birçok avantaj sunmaktadır. Kompozitler, inşaat, tıp uygulamaları, petrol ve gaz, ulaşım, spor, havacılık ve daha pek çok alanda günlük hayatımıza girmiştir. Bazı uygulamalar, örneğin roketler, muhtemelen kompozit malzemeler olmadan havalanamayacaklardır. Bu bölüm, kompozit malzemelerinin avantajlarını, temel etkilerini, ürün geliştirmeyi ve fiber kompozitlerinin malzeme kimyası, tasarımı, üretimi, özellikleri ve çeşitli uygulamalarda kullanımı gibi konuları ele almaktadır. Kompozit malzemeler doğada da bulunmaktadır. Örneğin, bir odun parçası, uzun selüloz liflerinin lignin adı verilen bir maddeyle birbirine bağlandığı bir kompozit yapıdır. Kompozit malzemeler, birbirinden farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle elde edilir ve bu malzemeler, birbirine çözünmeden veya karışmadan bir arada bulunurlar. Kompozitteki her bir malzeme, kompozite özgü özelliklerin ortaya çıkmasını sağlamak amacıyla birlikte çalışır. İnsanlar, farklı alanlarda binlerce yıl boyunca kompozit malzemeleri kullanmışlardır. Kompozit malzemeler, savaşın ardından hızla gelişmiş ve 1950'ler boyunca önemli bir büyüme göstermiştir. Kompozit yenilikçileri, kompozitleri havacılık, inşaat ve ulaşım gibi diğer sektörlerle tanıtmak için kararlı bir şekilde çalışmalarını sürdürmüşlerdir. 1970'lerin sonları ve 1980'lerin başlarında, kompozit malzemeler ilk kez Asya ve Avrupa'da altyapı uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemeler günümüzde de çeşitli uygulamalarda kullanılmaya devam etmektedir (Johnson, 2018; Ngo, 2020). Nanomalzemeler, yeni kompozitlerde kullanılan geliştirilmiş lifler ve reçinelerle entegre edilmektedir. Nanoteknoloji, 2000'li yılların başında ticari ürünlerde kullanılmaya başlanmıştır. Karbon nanotüpleri, polimerlerde kompozit takviyesi olarak kullanılarak, nihai ürünün mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini geliştirmektedir (Ngo, 2020).

Bu tez çalışmasında şeker üretimi atıklarından küspe ve karbonatlama atıkları ilk kez epoksi reçinede dolgu olarak kullanılarak karşılaştırmalı olarak kompozit özellikleri incelenmiştir.

1.1.1. Polimer matris

Genel olarak, bir kompozit malzeme üç ana bileşenden oluşmaktadır: (i) sürekli faz olarak işlev gören matris, (ii) kesikli veya dağılmış faz olarak takviyeler, bu takviyeler lifler veya parçacıkları içermektedir ve (iii) matris ile takviyeler arasındaki etkileşimi sağlayan ince ara faz bölgesi, diğer bir ifadeyle arayüz (Kalpakjian ve diğ., 2013; Cantwell ve Morton, 1991). Herhangi bir malzeme, kompozitler için matris malzemesi olarak kullanılabilir. Ancak, matris malzemeleri genellikle seramikler, metaller ve polimerlerden oluşmaktadır. Gerçekte, kompozitler pazarında mevcut olan matris malzemelerinin büyük bir kısmı polimerlerden oluşmaktadır. Kompozit malzemelerde kullanılabilecek birçok farklı polimer matrisi bulunmaktadır. Polimer matris kompozitleri arasında termoset matris kompozitleri, termosplastik kompozitlere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoset ve termosplastik terimleri benzer görünse de bu iki malzeme tipi farklı özelliklere ve uygulama alanlarına sahiptir. Bu malzemelerin performans farklılıklarını anlamak, daha etkili tedarik kararları almayı ve kompozit ürün tasarımlarının geliştirilmesini sağlamayı mümkün kılmaktadır (Williams, 2019).

Termosetler, kimyasal bir reaksiyon veya kurlenme süreci sonucu genellikle sıvıdan katı hale dönüşen malzemelerdir. Kurlenmemiş durumda, bu malzeme küçük, bağlanmamış moleküller olan monomerlerden oluşur. İkinci bir malzemenin (bağlayıcı, kurlenme ajanı, katalizör vb.) eklenmesi veya ısı gibi başka bir aktive edici faktörün etkisiyle kimyasal reaksiyon başlar. Bu reaksiyon sırasında, moleküller birbirine bağlanarak çok daha uzun moleküler zincirler ve çapraz bağlı ağ yapıları oluşturur, bu da malzemenin katılaşmasına yol açar. Termosetlerin bu yapısal dönüşümü kalıcı ve geri döndürülemezdir. Katılaştıktan sonra yüksek ısılara maruz kalan termosetler, erimezler; aksine bozulurlar. Bunun nedeni, bu malzemelerin genellikle erime noktasına ulaşmadan önce bozulmaya başlamalarıdır (Kelly ve Zweben, 2000).

Termoplastikler ise eriyebilen plastiklerdir. Termoplastik malzemeler, ısı ile işlenebilir. Yeterli ısı uygulandığında, plastiğin sıcaklığı erime noktasının üzerine çıkar ve malzeme sıvı hale gelir veya yeterince yumuşayarak işlenebilir duruma gelir. Isı kaynağı kaldırıldığında ve sıcaklık düşerse, plastik tekrar cam benzeri katı bir hale gelir. Bu işlem, plastik her ısıtıldığında eriyip tekrar katılaştığında tekrarlanabilir. Ancak, erimiş haldeki malzeme, işlem sırasında giderek bozulmaya daha yatkın hale gelir, bu nedenle bu yeniden işleme işleminin sayısı sınırlıdır ve malzemenin özellikleri zamanla zarar görmeye başlar. Birçok termoplastik polimer, eklemeli türde olup, uzun moleküler zincirler veya yüksek moleküler ağırlıklar oluşturabilir (Ngo, 2020). Hem termoset hem de termoplastik malzemelerin pazarda kendine özgü bir yeri bulunmaktadır. Genel olarak, termosetler uzun süredir kullanılan malzemeler olup, pazarda köklü bir konuma

sahiptir. Ayrıca, termosetler genellikle daha düşük hammadde maliyetlerine sahip olup, takviye liflerinin ıslanmasını ve nihai parça geometrilerine kolayca şekil verilmesini sağlar. Diğer bir deyişle, termosetler genellikle termoplastiklere kıyasla daha kolay işlenebilir. Termoplastikler ise termosetlere göre daha dayanıklı ve kırılğan olmayan bir yapıya sahiptir. Kimyasal dirençleri daha iyi olabilir, ayrıca termosetlerin aksine, soğutma gereksinimi yoktur (örneğin, prepreg malzemeleri) ve daha kolay geri dönüştürülebilir ve onarılabirler. Termoset malzemeler, poliester reçineleri, epoksi reçineleri, vinil ester reçineleri, fenolik reçineler, poliüretanlar ve diğer yüksek sıcaklık dayanımlı reçineler (örneğin, siyanat esterleri) gibi farklı türlere ayrılmaktadır. Bu reçineler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda, özellikle yüksek performans ve dayanıklılık gereksinimlerinin bulunduğu alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Kelly ve Zweben, 2000). Bazı polimerlerin özellikleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

1.1.1. Takviyeler

Kompozit takviyeleri, lifler, pul, parçacıklar gibi çeşitli formlar halinde bulunabilir. Her bir takviye formu, kompozit malzemenin özelliklerine katkıda bulunan kendine özgü niteliklere sahiptir ve bu nedenle farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bu formlar arasında, lifler kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan takviye elemanlarıdır ve kompozitlerin mekanik, termal ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde en belirgin etkiye sahip olanlardır. Liflerin kompozitlerdeki rolü, malzemenin genel performansını önemli ölçüde artırmakta ve bu nedenle özellikle mühendislik ve ileri teknoloji uygulamalarında tercih edilmektedir. Birçok doğal lifin ve yaygın olarak kullanılan sentetik liflerin özellikleri Tablo 1.2’de gösterilmiştir (Li ve diğ., 2007; Latif ve diğ., 2019).

Tablo 1.1. Bazı polimerlerin özellikleri

Polimer	Yoğunluk (g/cm³)	Uzama (%)	Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)
Epoksi (EP)	1.2–1.3	1.3	55.0– 130.0	2.7–4.1
Melamin formaldehit (MF)	1.5–1.6	0.6	65.0	12.0
Fenolik formaldehit (PF)	1.2	1.2	45.0–60.0	4.0–7.0
Sert poliüretan (RPU)	1.2	90.0	60.0	2.2
Doymamış polyester (UPE)	1.1	2.0	34.0– 105.0	2.1–3.5
Üre formaldehit (UF)	1.5–1.6	0.8	65.0	9.0
Poliüretan kauçuk	1.2–1.3	300.0– 580.0	39.0	2.0–10.0
Vinil ester (VE)	1.23	2.0–12.0	73.0–81.0	3.0–3.5

Tablo 1.2. Bazı doğal liflerin ve yaygın olarak kullanılan sentetik liflerin özellikleri

Lif	Yoğunluk (g/cm³)	Uzama (%)	Çekme dayanımı (MPa)	Young modülü (GPa)
Abaka	1.5	-	511.0-1051.0	13.5-29.8
Alfa	0.89	-	350.0	22.0
Bagas	1.2	1.1	20.0-290.0	19.7-27-1
Muz	1.3-1.4	2.0-7.0	54.0-789.0	3.4-32.0
Bambu	1.5	-	575.0	27.0
Hindistance	1.4-3.8	-	120.0-200.0	19.0-26.0
Koir	1.2	15.0- 30.0	175.0-220.0	4.0-6.0
Pamuk	1.5-1.6	3.0- 10.0	287.0-597.0	5.5-12.6

Curaua	1.4	-	825.0	9.0
Flaks	1.4-1.5	1.2-3.2	345.0-1500.0	27.6-80.0
Kenevir	1.4-1.5	1.6	550.0-900.0	70.0
Henequen	1.4	3.0	430.0-580.0	-
Isora	1.2	-	550.0	-
Jüt	1.3-1.5	1.5-1.8	393.0-800.0	10.0-30.0
Kapok	0.4	-	93.3	41.0
Kenaf	1.2	2.7-6.9	295.0	-
Palf	1.4	3.0	170.0-635.0	6.2-24.6
Piassava	1.4	-	138.5	2.8
Ananas	1.5	1.0-3.0	170.0-1672.0	82.0
Ramie	1.5	2.0-3.8	220.0-938.0	44.0-128.0
İpek	1.3-1.4	-	650.0-750.0	16.0
Sisal	1.3-1.5	2.0-	400.0-700.0	9.0-38.0
		14.0		
Yumuşak	1.5	-	1000.0	40.0
Ağaç Kraft				
Yün	-	120.0-	5.0-10.9	-
		174.0		

1.1.2. Kompozit uygulamaları

Lif takviyeli polimerlerin en yaygın kullanılan formu, istenilen kalınlık elde edilene kadar lif ve polimerin ince katmanlarının istiflenip bağlanarak oluşturulan laminar yapılardır. Laminer yapılar arasındaki katmanlarda lif yönelimlerinin değiştirilmesi, kompozit özelliklerinde belirli bir düzeyde anizotropi sağlanmasına olanak tanır. Kompozitler, korozyon direnci, hafiflik, mukavemet, düşük malzeme maliyetleri, artırılmış verimlilik, tasarım esnekliği ve dayanıklılık gibi birçok avantaj sunar. Bu nedenle, çok çeşitli endüstriler kompozit malzemeleri kullanmakta olup, bunların bazı yaygın uygulamaları bulunmaktadır (Ngo, 2020).

Havacılık

Büyük orijinal ekipman üreticileri (OEM'ler) olan Airbus ve Boeing, kompozit malzemelerin havacılıktaki büyük ölçekli uygulamalarda kullanılma potansiyelini göstermiştir.

NASA, roketler ve diğer uzay araçları için yenilikçi çözümler ve uzay çözümleri konusunda sürekli olarak kompozit üreticilerine başvurmaktadır. Termoset kompozitler, ticari, sivil ve askeri havacılık uygulamalarında bulkhead'ler, gövde, kanatlar ve diğer uygulamalar için belirlenmiştir. Ayrıca kompozitlerin, hava kanadı yüzeyleri, anten yapıları, kompresör kanatları, motor bölmesi kapakları, fan kanatları, çarklar, helikopter tahrik yapıları, jet motorları, radar, roket motorları, güneş yansıtıcıları, uydu yapıları, türbin kanatları, türbin milleri, helikopter rotor milleri, kanat kutusu yapıları gibi birçok farklı alanda da kullanımları bulunmaktadır (Hancox, 1981).

Mimarlık

Estetik özellikleri, işlevselliği ve çok yönlülüğü ile kompozit malzemeler, mimari uygulamalar için tercih edilen malzeme haline gelmektedir. Kompozit malzemeler ayrıca tasarım esnekliği sunar ve karmaşık şekillere şekillendirilebilir. Farklı kalınlıklarda, dalgalı, eğimli, kabartmalı veya çeşitli şekillerde form verilerek kullanılabilirler. Ayrıca, bakır, krom veya altın, mermer ve taş gibi geleneksel görünümler, kompozit malzemeler kullanılarak çok daha düşük maliyetle elde edilebilir. Bu nedenle, mimarlık topluluğu, ticari ve konut binalarında kompozitlerin anlaşılması ve kullanımı konusunda önemli bir büyüme yaşamaktadır (Ngo, 2020).

Otomotiv ve taşıma

Otomotiv endüstrisi, kompozit malzemelerin kullanımında önemli bir rol oynamaktadır ve bu sektör, kompozit malzemeler için en büyük pazarlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımının sağladığı en belirgin avantajlardan biri, ağırlık azaltımıdır. Ağırlığı azaltılmış bir araç veya kamyon, daha az yakıt tüketerek daha yüksek bir yakıt verimliliği sağlar. Bu durum, özellikle taşıma sektöründe, daha düşük enerji tüketimi ve çevresel etkilerin azaltılması açısından önemli faydalar sunmaktadır (Hancox, 1981; Ngo, 2020).

İnşaat ve altyapı

İnşaat sektörü, kompozit malzemeler için dünya çapında en büyük pazar alanlarından birini teşkil etmektedir. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet özellikleri ve ideal inşaat malzemesi olma potansiyeli ile dikkat çekmektedir. Özellikle termoset kompozitler, geleneksel inşaat malzemelerinin yerine geçerek, ev ve ofislerin mimari bileşenlerinde kullanılmaktadır. Kapılar, sabit tesisatlar, kalıplama, çatı kaplamaları, duş kabinleri, yüzme havuzları, lavabo, duvar panelleri ve pencere çerçeveleri gibi birçok yapı elemanı, termoset kompozit malzemelerle üretilmektedir. Bu malzemeler, estetik, dayanıklılık ve işlevsellik açısından önemli avantajlar

sunarak inşaat sektöründe giderek daha fazla tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler, dünya genelinde binalardan köprülere, yollardan demir yollarına ve kazıklara kadar geniş bir altyapı uygulamalarının inşaa ve onarımında kullanılmaktadır (Ngo, 2020; Erofeev, 2016).

Korozif ortamlar

Kompozit malzemeler, zorlu kimyasal koşullar ve yüksek sıcaklık ortamlarına karşı uzun vadeli direnç sağlayarak üstün performans sergiler. Bu özellikleri sayesinde, kompozitler kimyasal madde taşıma uygulamaları, korozif ortamlar, dış mekan maruziyeti ve diğer aşırı koşullar altında çalışan tesislerde tercih edilen malzeme olma eğilimindedir. Özellikle kimyasal işleme tesisleri, petrol ve gaz rafinerileri, kağıt ve odun hamuru işleme, su arıtma tesisleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin bu tür uygulamalarda kullanımı, dolaplar, havalandırma kanalları, fanlar, ızgaralar, kapaklar, pompalar ve tanklar gibi çeşitli bileşenlerin üretiminde gözlemlenmektedir (Ngo, 2020; Hu, 2012).

Elektriksel uygulamalar

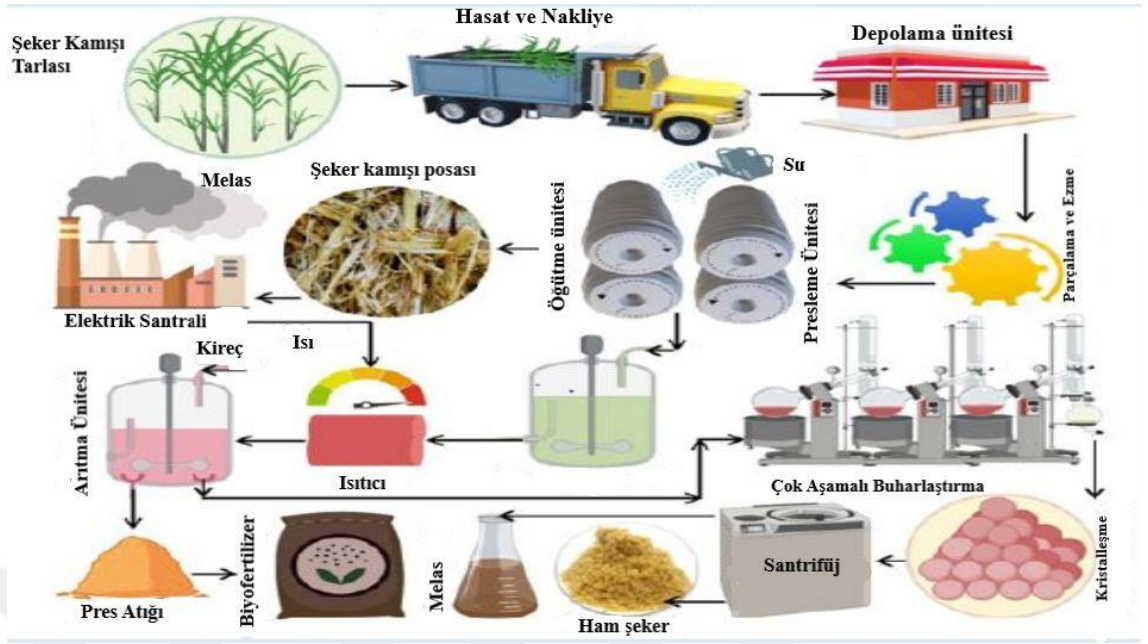
Elektronik endüstrisinin hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte, kompozit malzemeler, üstün dielektrik özellikleri ve özellikle ark ve iz direnci gibi karakteristikleri sayesinde elektronik uygulamalarda giderek daha fazla tercih edilmektedir. Termoset bileşenler, bu güçlü dielektrik özelliklere sahip olup, elektriksel izolasyon ve yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalarda önemli bir rol oynamaktadır. Ark ve iz direnci gibi özellikler, kompozitlerin elektriksel güvenlik ve performans açısından kritik gereksinimleri karşılamasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, kompozit malzemeler, modern elektronik sistemlerde güvenilirlik ve verimlilik sağlamak adına önemli bir potansiyele sahiptir. Kompozit malzemelerin elektriksel uygulamalarındaki bazı yaygın kullanım alanları arasında ark olukları, ark koruyucuları, dağıtım hatları destek elemanları, aydınlatma bileşenleri, sigorta anahtarları, kontrol sistemi bileşenleri, ölçüm cihazları, mikrodalga antenleri, motor kontrol sistemleri, mesafe izolatörleri, direk elemanları, elektrikli hat donanımları ve baskılı devre kartları yer almaktadır. Ayrıca, kompozit malzemeler, trafo merkezi ekipmanları, anahtarlama ekipmanları, terminal blokları ve bağlantı panoları gibi elektriksel altyapı bileşenlerinde de kullanılmaktadır (Ngo, 2020; Chung, 2003).

Denizcilik uygulamaları

Diğer mühendislik alanlarında olduğu gibi, gemi mühendisliğindeki temel zorluk, yapıyı mümkün olduğunca hafif hale getirmektir. Denizcilik endüstrisi, gemi gövdelerinin daha hafif ve daha dayanıklı olmasına yardımcı olmak için kompozit malzemeleri kullanmaktadır. Kompozitlerin korozyon direnci ve hafiflik özellikleri sayesinde, denizcilik uygulamaları arasında tekne gövdeleri, mahmuzlar, güverteler, direkler, pervaneler ve askeri, ticari ve rekreasyonel amaçlı gemiler için diğer bileşenler yer almaktadır. Ayrıca, kompozit malzemeler, süper yatların iç mekanlarında yer alan döşeme, mobilya ve diğer yapısal bileşenlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Sanchez-Heres ve diğ., 2019; Neşer, 2017).

1.2. Şeker Üretimi ve Atıkları

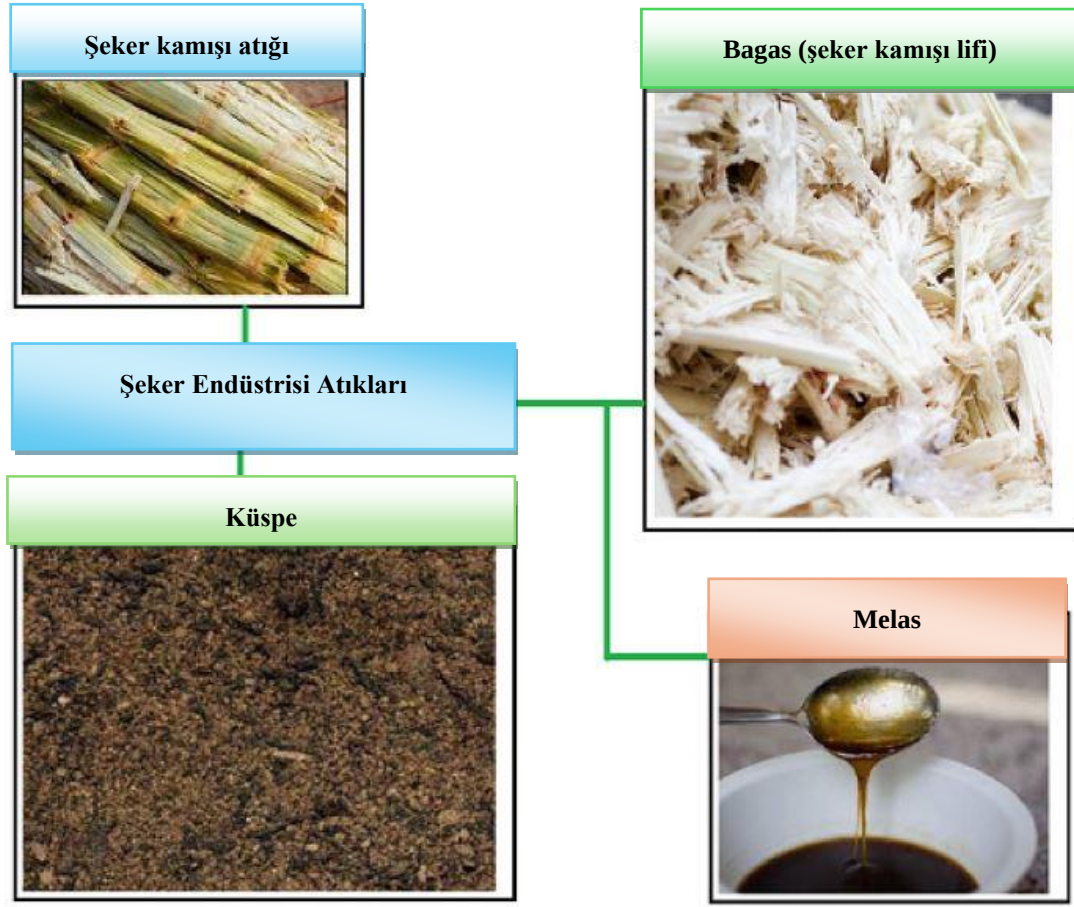
Şeker kamışı üretimindeki artış, şeker endüstrisinin atıklarının orantılı bir şekilde artmasına yol açmaktadır. Bu artan eğilim, atık yönetimi için kalıcı bir çözümün bulunmaması nedeniyle şeker endüstrisinde ciddi çevresel sorunların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla, atık yönetimi konusunda uygun yöntemlerin geliştirilmesi için acil bir müdahale gereklidir. Şeker endüstrisi atıkları ve atık suları, çevresel kirliliğin başlıca kaynaklarını oluşturmakta olup, aynı zamanda çeşitli sağlık riskleri ile ilişkilendirilmektedir. Şeker, şeker kamışından önce ham suya dönüştürülerek üretilir; ardından ısıtma ve kireç ilavesi ile buharlaşma süreçlerinin sonunda madde ham şekere dönüşür. Bu buharlaşma aşamasında melas elde edilmektedir. Ayrıca, klarifikasyon süreci sırasında faydalı bir yan ürün olarak bilinen küspe de ortaya çıkmaktadır. Küspe, genellikle balık yemi olarak ve tarımda gübre olarak kullanılmaktadır. Şeker üretim sürecinde, bagas, küspe, bagas külü ve atıksu gibi çeşitli yan ürünler ve atıklar da üretilmektedir (Amjad ve diğ., 2023). Şeker üretim aşamaları Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Endüstriyel düzeyde şeker üretim aşamaları (Nawaz ve diğ., 2021)

1.2.1. Şeker endüstrisinde atık türleri

Enerji ve kaynak kullanımındaki dünya çapındaki genişleme, kaynak sürdürülebilirliğinin geliştirilmesini ve enerji kullanımında bir azalmayı gerektiren birkaç sürdürülemez yeniliğe yol açmıştır. Endüstriyel atıkların değerlendirilmesi, çevredeki kirleticilerin miktarını azaltmanın yanı sıra endüstriler tarafından üretilen geliri artırmaya odaklanmıştır. Şeker kamışı işleme, çeşitli katma değerli ürünlere dönüştürülebilen büyük miktarda yan ürün, yani kamış çöpü, bagas, pekmez ve pres çamuru üretir (Iwuozor ve diğ., 2022). Şeker endüstrisinden kaynaklı başlıca atıklar Şekil 1.2’de gösterilmiştir.

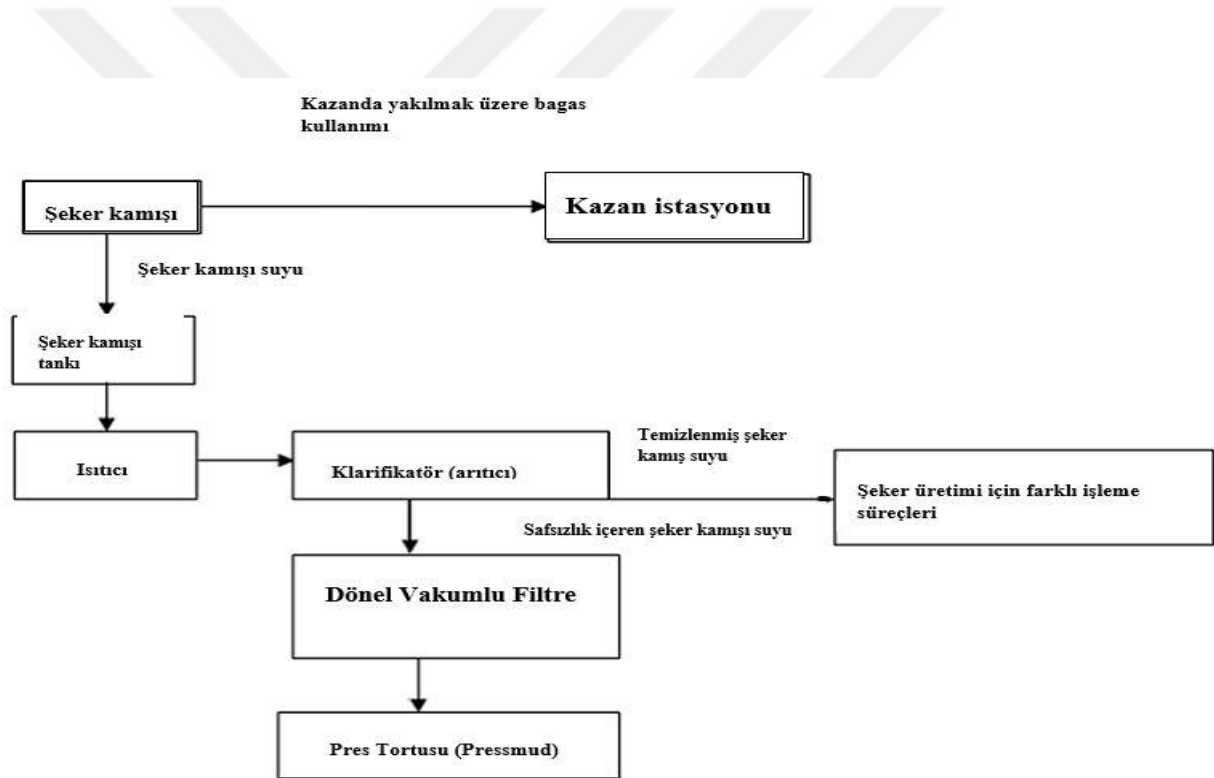


Şekil 1.2. Şeker endüstrisinden kaynaklanan başlıca atıkların özeti (Singh ve diğ., 2021)

1.2.1.1. Şeker endüstrisi tortusu

Şeker kamışı, şeker ve etanol üretiminde en yaygın kullanılan hammaddelerden biridir. Şeker ve alkol üretim süreçleri, dört ana atık ürününü içerir: hasat sonrası tarlada bırakılan kamış kalıntıları, bagas, harcanan atık su ve küspe (Hiloidhari ve diğ., 2020). Bagas, kamışın ezilmesinden sonra geriye kalan kalıntıdır ve endüstriyel bir yakıt kaynağı olarak değerlendirilmektedir (Sindhu ve diğ., 2016). Küspe ise, kamış suyu filtrasyonundan kaynaklanan sıkıştırılmış şeker endüstrisi atığıdır ve yüksek besin değeriyle iyi bir gübre kaynağı olarak kullanılmaktadır. Hindistan'daki şeker fabrikalarında, çift sülfürizasyon işlemlerinden kaynaklanan atık olarak yıllık yaklaşık 12 milyon ton küspe (filtre pastası) üretilmektedir. Küspe genellikle açık alanlarda biriktirilmekte ve çoğunlukla değerlendirilmeden bırakılmaktadır. Bununla birlikte, kuru küspe, içerdiği yüksek yakıt oranı nedeniyle enerji üretiminde kullanılabilir ve bu özelliği, sürdürülebilir enerji kaynakları açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Küspe, şeker kamışından ham suyun çıkarılmasından sonra şeker kamışı arıtma işlemi sırasında aşırı miktarda üretilen, yumuşak, süngersi, amorf ve koyu kahverengi bir madde olup, bu madde, büyük ölçüde organik ve inorganik bileşikler içerir (Lakshmipathi ve diğ., 2019; Raimondi ve diğ., 2020). Bir ton şeker kamışı ezildiğinde yaklaşık 36-40 kg pres mud elde edilmektedir (Patil ve diğ., 2019). Pres mud, N, P, K, Ca, Mg, Fe ve Mn gibi temel inorganik elementleri içermekte olup, kimyasal bileşimi, sığır gübresine benzer (Keshavanath ve diğ., 2006). Pres mud, düşük maliyetli ve kolayca temin edilebilen, tarım sistemleri için uygun bir malzeme olup, balık yemi maliyetlerini azaltabilir. Şeker fabrikasında küspe atığının oluşum aşamaları Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Kimyasal bileşimi ve ana besin öğeleri Tablo 1.3 ve 1.4'de, kurutma şamasından ve öğütülmüş halinden fotoğraflar ise Şekil 1.4 ve 1.5'de verilmiştir.



Şekil 1.3. Şeker fabrikasında küspe atığının oluşum aşamaları (Munde ve diğ., 2015)

Tablo 1.3. Küспенin yüzde bileşimi (Diaz, 2016).

Bileşen		Yüzde aralığı
Ham Protein		% 5 - % 14
SiO ₂		% 4 - % 10
MgO		% 0,5 - % 1,5

PO		% 1 - % 3
CaO		% 1 - % 4
Ham Mum		% 5 - % 14
Lif		% 15 - % 30
Şeker Kamışı		% 5 - % 15
Toplam Kül		% 9 - % 10

Tablo 1.4. Küspenin ana besin öğeleri (Diaz, 2016)

Besin Öğesi	Yüzde
Bakır (Cu)	%0,05
Çinko (Zn)	%0,01
Azot (N)	%1,90
Manganez (Mn)	%0,03
Sodyum (Na)	%0,10
Kükürt (S)	%0,10
Fosfor (P)	%1,80
Potasyum (K)	%0,90
Kalsiyum (Ca)	%4,30
Magnezyum (Mg)	%6,70



Şekil 1.4. Köspe'un güneş ışığında kurutulması (Sharma ve diğ., 2019)



Şekil 1.5. Öğütölmüş küspenin görünümü (Sharma ve diğ., 2019)

1.2.1.2. Atık Su

Bakır (Cu), kurşun (Pb), manganez (Mn), çinko (Zn), yağ, gres ve çeşitli diğeri kimyasal bileşikler, atık sularda bulunan ve bu maddelerin, sucul ekosistemler ile kara canlıları üzerinde önemli derecede toksik etkiler oluşturabilen zehirli maddelerdir. Bu ağır metaller, biyolojik sistemlerde birikerek uzun vadeli sağlık problemlerine yol açabilir ve çevresel dengeyi bozabilir (Sardar ve diğ., 2013).

1.2.1.3. Şeker kamışı yaprakları

Şeker kamışı yaprakları tarlada yakıldığında, bu işlem uçucu kül üretir ve bu kül, toprak mikroorganizma çeşitliliğini ciddi şekilde olumsuz etkileyerek çevresel sorunlara yol açmaktadır. Ayrıca, bu yanma süreci havayı kirleterek çevre üzerinde zararlı etkiler oluşturmakta ve ortaya çıkan kalıntılar, astım gibi solunum yolu hastalıklarının yayılmasına neden olabilmektedir (Chandel ve diğ., 2012).

1.2.1.4. Melas

Melas, şeker kristalleşme süreci sırasında meydana gelen bir yan üründür ve bileşimi, kullanılan şeker kamışı türüne, tarımsal iklim koşullarına, şeker üretim yöntemine, depolama ve taşıma koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Melas, içerdiği şekeri nedeniyle mikroorganizmaların metabolizması için en uygun karbon kaynağını sağladığı için genellikle alkol damıtma tesislerinde kullanılmaktadır (Bhatnagar ve diğ., 2016).

Şeker kamışı atıklarının kimyasal bileşimi Tablo 1.5'te, şeker kamışı atıklarından elde edilen faydalı ürünler ise Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6. Şeker kamışı atıklarından elde edilen faydalı ürünler (Singh ve diğ., 2021)

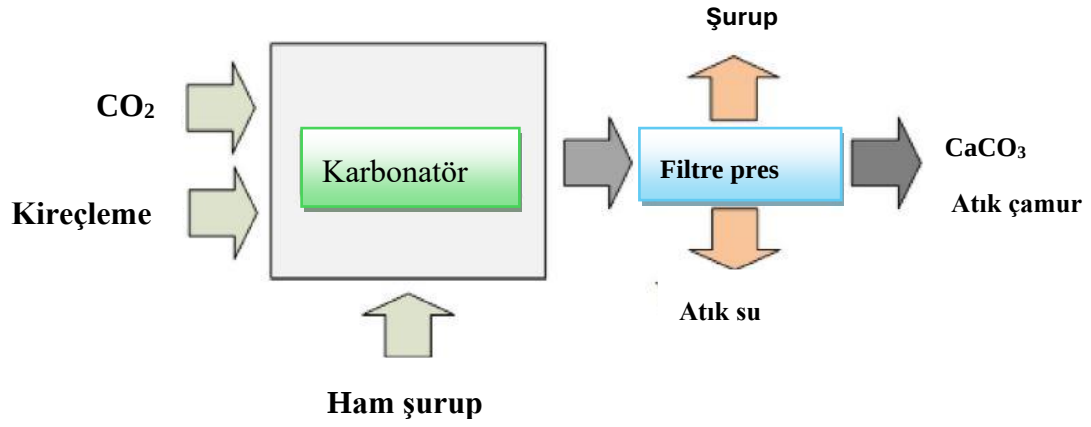
Tablo 1.5. Şeker kamışı atıklarının kimyasal bileşimi

Şeker kamışı yan ürünü	Kimyasal birleşim	Referanslar
Şeker kamışı tepeleri	Kül %4.7 Ekstraktifler %25.7 Lignin:%21.7 Selüloz %39.7 Hemiselüloz %32	Franco ve diğ., 2013
Kuru Yapraklar	Kül %4.7 Ekstraktifler %13.7 Lignin %22.7, Selüloz %40.8, Hemiselüloz %28.7	Franco ve diğ., 2013
Bagas	Selüloz %40 Hemiselüloz %24.4 Lignin %15 Protein %1.8, Yağ ve mumlar %0.6 Kül %5 Sakaroz %14 Glikoz %1.4	Vazquez ve diğ., 1999
Melas	Kimyasal bileşim, non-sakroz ve işleme teknolojisine bağlı olarak değişir. Ancak, şeker kamışı melası için bileşimler şöyle kabul edilir: Toplam katı maddelerin %75-%85'i, Sakaroz: %30-%36, Fruktoz + Glikoz: %10-%17, Kül: %10-%16. Ayrıca daha küçük miktarlarda proteinler, oligosakaritler, polisakaritler, organik asitler ve azot bulunur.	Carioca ve Leal, 2011
	Selüloz %11.4	Agrawal ve diğ.,

Küspe	Hemiselüloz %10 Lignin %9.3 Protein %15.5 Mum %8.4 Şeker %5.7 Na %0.22	2012
Vinasse	Su %93 Katı Maddeler %7	Carrilho ve diğ., 2016
Filtre keki	Mum, lipitler ve reçineler %4-%14 Lif %15-%30 Şeker %1-%15 Protein %5-%15 Toplam kül %9-%20 SiO ₂ %4-%10, CaO: %1-%4 P ₂ O ₅ %1-%3 MgO %0.5-%1.5	Santos ve diğ., 2020

1.3. Karbonatlama Atığı

Kalsiyum karbonat (CaCO_3), şeker kamışı suyunun şurup üretimi için temizlenmesinde kritik bir hammaddedir (Şekil 1.7) (Van der Poel ve diğ., 1998). Bu temizleme işlemi, şeker kamışı suyunun içindeki istenmeyen katı partikülleri gidererek, sıvının saflaştırılmasını sağlar ve böylece şurup üretimi için uygun hale gelmesini temin eder. Şeker kamışı suyu temizleme işleminden sonra, CaCO_3 çamurunun depolandığı alan Şekil 1.8’de gösterilmektedir (Laksameethanasana ve diğ., 2012). Şeker kamışı suyu, şurup üretimi için ısıtılmadan önce, bu işlem sayesinde partiküllerden arındırılır ve istenilen berraklığa ulaşır. CaCO_3 , suda çözünmeyen bir bileşiktir, ancak, su ve karbon dioksit (CO_2) ile reaksiyona girerek çözünür bir form olan kalsiyum bikarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)’yi oluşturur (Patnaik, 2003). Bu reaksiyon, şeker kamışı suyu içinde bulunan bazı çözünmeyen maddelerin çözünür hale gelmesine yardımcı olarak, temizleme işleminin etkinliğini artırır (Wiwattanachang ve diğ., 2023). Tablo 1.6’da ise karbonat çamurunun kimyasal bileşimi verilmiştir.



Şekil 1.7. Şurup üretimi için şeker kamışı suyunun temizlenmesi (Wiwattanachang ve diğ., 2023)

Tablo 1.6. CaCO₃ çamurunun kimyasal bileşimi (Jantasuto ve diğ., 2020)

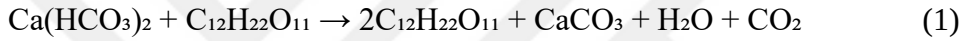
Parametre	CaCO ₃ Çamuru (ağırlık %)
CaO	86.827
MgO	0.380
Al ₂ O ₃	0.127
Fe ₂ O ₃	896 ppm
SiO ₂	0.327



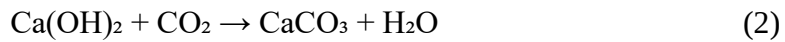
Şekil 1.8. Kalsiyum karbonat çamuru depolama alanı (Wiwattanachang ve diğ., 2023)

Şeker rafinerisinde karbonatlama süreci

Şeker kamışından, topraktan, hasat ve şeker işleme aşamalarından kaynaklanan safsızlıkları ve yan ürünleri giderir. Bu safsızlıklar çoğunlukla asidik özellik gösterir ve kolloidal maddeler oluşturma eğilimindedir. Bu durum, özellikle renk oluşturan safsızlıklar söz konusu olduğunda bir sorun yaratmaktadır. Sükrozun inversiyonunun yan ürünleri, indirgen şekerler olarak bilinir. Bu indirgen şekerler, renk oluşturan safsızlıkları, filtrasyon yoluyla temizlenmesi son derece zor olan birçok küçük fragmansa indirger. İndirgen şekerler, repolimerleşme eğiliminde olup yüksek moleküler ağırlıklı renk maddeleri oluştururlar. Her türlü renk, yüksek kaliteli şeker üretiminde son derece istenmeyen bir durumdur, çünkü hem görünümü hem de son ürünün saflığını olumsuz şekilde etkiler (Alaghbari, 2024). İndirgen şekerlerin ve renk maddelerinin şeker liköründen giderilmesi için kullanılan reaksiyon şu şekildedir (Denklem 1):



Bu, ürünlerin sağa kaymasını destekleyen bir denge reaksiyonudur. Kristalize olabilen kalsiyum karbonat, rafinaj süreci sırasında ısıtılmadıkça oluşmaz. Bunun yerine ince bir çökelti meydana gelir. Bu ince çökelti, şeker kristallerinin büyümesi için bir çekirdek işlevi görür ve renk maddelerinin adsorpsiyonu yoluyla giderilmesine yardımcı olur. Kireç karbonatlama işlemi, şeker rafinaj sürecinin temel bir parçasıdır. Karbonatlama sırasında, kireç (kalsiyum hidroksit), kalsiyum karbonata dönüşür. Reaksiyon şu şekildedir (Denklem 2) (Alaghbari, 2024):



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Şeker üretimi atıklarıyla yapılan çalışmalar

Soydal ve diğ. (2018a) çalışmalarında, şeker pancarı üretiminden elde edilen çöktürülmüş kalsiyum karbonat-kireç atığı (LW), kompozit malzemelerin hazırlanmasında ham madde olarak geri dönüştürülmüştür. Epoksitlenmiş soya fasulyesi yağı (ESO), %50 ağırlıkça bisfenol A tipi epoksi reçinesi (ER) ile birlikte ko-matris olarak kullanılmıştır. Kompozitler, döküm tekniği kullanılarak LW'nin çeşitli yüzde oranlarında (%10–%50) hazırlanmıştır. Kompozitlerin morfolojisi, X-ışını difraksiyonu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. ESO ve LW miktarlarının kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. ESO ile modifikasyon, malzemenin plastisitesini belirgin şekilde artırmış, ancak kürlenme derecesini yaklaşık %2 oranında düşürmüştür. Modifiye epoksi reçinesi, saf epoksi matrise göre kopma noktası uzamasında yaklaşık %13 artış göstermiştir. Saf epoksi matrisi ile karşılaştırıldığında, kompozitlerdeki yoğunluk ve sertliğin LW içeriği ile arttığı gözlemlenmiştir. Tüm kompozitlerin çekme dayanımları, saf epoksi ile elde edilen değerlerden daha yüksektir. Termogravimetrik analizler, ESO ve LW'nin saf ER'nin termal stabilitesini 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. En iyi termal sonuçlar, %40 ve %50 LW içeren kompozitlerde elde edilmiştir. Kompozitlerin kalıntı ağırlıkları, saf ER ve ER-ESO'dan daha yüksek olup, LW miktarının artışıyla birlikte artmıştır. Kompozitlerin T5, T10 ve T50 verileri, saf ER ve ER-ESO'dan daha yüksek olmuştur. ER-ESO matris kompozitlerinin su emilim değerleri, %1.0–%2.9 arasında değişmiştir.

Madhu ve diğ. (2023) çalışmasında, artan kullanıcı bilincinin çevresel kirliliği azaltma yönünde etkisi nedeniyle, doğal elyaf bazlı polimer kompozitlerinin önümüzdeki yıllarda büyük talep görmesinin beklendiğini ortaya koymuşlardır. *Saccharum officinarum* (şeker kamışı posası), şeker kamışı işlenmesinden elde edilen katma değerli bir biyokütledir. Birçok araştırmacı, şeker kamışı posasını, bol bulunabilirliği (yılda yaklaşık 223 milyon ton) nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik ve enerji uygulamalarında kullanmak için incelemiştir. Hindistan'da her yıl 200 milyon tondan fazla şeker kamışı posası elde edilmektedir. Şeker kamışı posası külü, polimer kompozitlerinde dolgu malzemesi olarak kullanıldığında mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Tarımsal bir atık olarak, sentetik matris kompozitlerine eklenen şeker kamışı posası elyafı, özellikle parke levhalar, asma tavanlar ve hafif yapı elemanları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer kompozitler, şeker kamışı posası külünün değişen ağırlık yüzdeleri (0, 5, 10 ağırlıkça %) ile dolgu malzemesi olarak kullanılarak üretilmiştir. Kompozit örneklerin üretiminde el ile yerleştirme (hand layup) yöntemi

kullanılmıştır. Bu araştırma, üretilen cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerinin mekanik karakterizasyonunu, sıkıştırma dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı açısından değerlendirmiştir. Şeker kamışı posası külü ile dolgu yapılan cam elyaf kompozitleri, dolgusuz cam elyaf kompozitleri ile karşılaştırıldığında, %5 şeker kamışı posası külü ile yapılan kompozitlerde çekme dayanımında %11, sıkıştırma dayanımında ise %4 artış sağlanmıştır. %10 şeker kamışı posası külü ile yapılan cam elyaf kompozitleri ise eğilme dayanımını %59 oranında artırmıştır.

Arpitha ve diğ. (2024) çalışmalarında, şeker kamışı bagasının ve alümina mikro dolgu maddelerinin, epoksi polimer kompozitlerinin fiziksel, mekanik ve termal özellikleri üzerindeki pekiştirme etkisi rapor edilmiştir. Deney tasarımı olarak merkezi bileşik tasarımı, yanıt yüzeyi yöntemi ve yapay sinir ağı şeması seçilerek, şeker kamışı bagası ve alümina mikro dolgu maddelerinin optimum etkilerinin %1,38 ile %5,62 ağırlık oranları arasında tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Varyans analizinden elde edilen sonuçlara göre, şeker kamışı bagası ve alümina mikro dolgu maddelerinin mekanik özellikler üzerinde önemli olduğu gözlemlenmiştir. Fleksural özellikleri maksimize etmek için, şeker kamışı bagası ve alümina mikro dolgu maddelerinin optimum oranlarının sırasıyla %3,5 ve %3,5 olduğu belirlenmiştir. Şeker kamışı bagası ve alümina mikro dolgu maddelerinin epoksi reçinesine dahil edilmesi, kompozit malzemenin fiziksel, termal ve mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Epoksi hibrit kompozitinin taramalı elektron mikroskobu incelemesi, şeker kamışı bagası ve alümina mikro dolgu maddelerinin epoksi matrisinde homojen bir şekilde dağıldığını ve bu dağılımın kompozit malzemenin geliştirilmiş mekanik, fiziksel ve termal stabilite özelliklerine etki ettiğini doğrulamıştır.

Jayaraman ve diğ. (2023) çalışmalarında, hibrit biyokompozitlerin sentezinin, son yıllarda farklı doğal malzemelerin takviye ve dolgu maddesi olarak kullanılmasının yanı sıra önemli bir ilerleme kaydettiğini göstermişlerdir. Bu çalışmada, bir kompozitin mekanik ve su emme özelliklerini test etmek amacıyla epoksi reçinesi, toz haline getirilmiş tamarind kabuğu ve kısa, kimyasal olarak işlenmiş şeker kamışı lifleri ile karıştırılmıştır. Toz halindeki tamarind kabuğu ve kısa, kimyasal işleme tabi tutulmuş şeker kamışı lifleri, takviye elemanları olarak kullanılmaktadır. Epoksi reçinesinin oranı değiştirilirken, takviye bileşenlerinin miktarları ayarlanarak hibrit biyokompozit örnekleri üretilmiştir. Hibrit biyokompozit panelleri üretmek için sıcak enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılmıştır. Hibrit biyokompozit örnekleri, su jeti makineleri ile panellerden kesilerek ASTM standartlarına göre çeşitli mekanik ve su emme testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışma, epoksi reçinesi matrisine çok küçük miktarda ince şeker kamışı tozu ve tamarind kabuğu tozu eklenerek hibrit biyokompozitlerin mekanik gerilme direncinin ve su emme kapasitesinin artırılabilirliğini göstermektedir. Deneysel sonuçlar, C4

kompozit örneklerinin maksimum basınç, fleksural, nihai gerilme ve akma dayanımlarının sırasıyla 36,17, 38,53 ve 34,63 MPa olduğunu göstermiştir. Bu örnekler, %50 epoksi reçinesi, %35 işlenmiş şeker kamışı lifi ve %15 tamarind kabuğu parçacığı içermektedir. Benzer şekilde, C4 kompozit örneklerinde maksimum fleksural modül (10,96 GPa), uzama yüzdesi (%3,3), darbe dayanımı (13,51 kJ/m²) ve su emme yüzdesi (%7,15) gözlemlenmiştir.

Ramratan (2020) çalışmasında, atık geri dönüşümü, çevre yönetimi açısından çeşitli bilimsel araştırmaların ana konusu olmuştur. Ananas yaprağı, sisal ve şeker kamışı bagası gibi yenilenebilir tarımsal kaynaklar, biyokütle olarak bilinen agro-atıklar arasında yer almakta olup, son yıllarda polimer malzemelerin takviyesi için kullanılmaktadır. Şeker kamışı bagası lifi kalıntıları, polimerlerin takviyesi için kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve kullanılmaktadır. Bu çalışmada, %35, %45, %55 oranlarında şeker kamışı bagası lifi hamuru ile %50, %40 ve %30 oranlarında epoksi reçinesi karıştırılarak takviye edilmiş bir şeker kamışı bagası lifi ile güçlendirilmiş epoksi kompozit malzeme geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, kompozit levhaların kalınlık, yoğunluk, darbe dayanımı ve çekme dayanımı özelliklerini incelemek amacıyla yapılmıştır. Yapılan analizlere göre, tüm parametrelerin önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar, en yüksek çekme dayanımının, %35 lif hamuru ve %50 epoksi reçinesi bileşimine sahip kompozit levhada elde edildiğini, en yüksek darbe dayanımının ise %55 lif hamuru oranı ve %30 epoksi reçinesi bileşimine sahip kompozit levhada elde edildiğini göstermektedir. Doğal şeker kamışı bagası lifi epoksi reçinesi kompoziti, çevre dostu üretim süreçlerine katkıda bulunabilir ve sürdürülebilir bir yeşil çevre için potansiyel bir çözüm sunmaktadır. Şeker ve alkol endüstrilerinde, şeker kamışı bagası genellikle enerji üretimi için yakılmakta, bu da tonlarca külün oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum ise hava kirliliği ve duman oluşumu gibi ciddi çevresel sorunlara neden olmaktadır.

Monteiro ve diğ. (2016) çalışmalarında, şeker kamışı suyu ekstraksiyonundan elde edilen kalıntıya, şeker ve etanol üretiminde bagas denir. Endüstriyel değirmende bagas, ya buhar ve enerji üretimi için yakılır ya da atık olarak atılır. Bu çalışmada, bagas atığının polimer kompozitlerine dahil edilerek balistik dirençli malzemeler elde edilmesi incelenmiştir. Ham bagas veya ekstrakte edilmiş bagas lifleriyle takviye edilmiş epoksi kompozit levhalar karakterize edilmiştir. %30 hacim oranında bagas içeren kompozitler, 7.62 mm mühimmatına karşı çok katmanlı zırhlarda ön seramiği destekleyen ikinci katman olarak seçilmiştir. Kompozitlerin balistik performansı, ticari çok katmanlı zırh sistemlerinde kullanılan Kevlar™ levhalar ile karşılaştırılmıştır. Balistik test sonuçları, Kevlar™ ve bagas lifi kompozitlerinin bulunduğu çok katmanlı zırhların, Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) normunu karşıladığını ve kil örneği üzerinde benzer derinlikte izler bıraktığını göstermiştir. Buna karşın, ham bagas kompozit içeren zırhlar,

yaklaşık iki kat daha derin izler bırakmış ve bunların bazıları NIJ limitini aşmıştır. Ekonomik analiz, bagas lifi kompoziti içeren zırhın, Kevlar™ içeren karşılık gelen zırhtan yaklaşık %180 daha ucuz olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, şeker kamışı bagasından (dünyada büyük ölçekte üretilen bir atık) elde edilen liflerle takviye edilmiş kompozitlerin, Kevlar™'ı çok katmanlı zırh sistemlerinde ikame edebileceği ve böylece daha ucuz ve sürdürülebilir hale gelebileceği ilk kez gösterilmiştir.

Sapronova ve diğ. (2018) çalışmalarında, polimer betonların ekonomik faaliyetlerde ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Bu betonlar, genellikle bir polimer reçinesi (poliester, fenol-formaldehit, epoksi vb.) ve çeşitli dolgu maddelerinden oluşur; dolgu maddelerinin oranı %85'e kadar çıkabilir. Çalışmalarında, fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından birçok endüstriyel atığın, geleneksel inşaat malzemelerinin yerine kullanılabileceği üzerinde durmuşlardır. Bu atıklardan biri, şeker pancarından şeker üretimi sırasında oluşan karbonatlı doygunluk tortusudur (CCP). Sapronova ve diğ. (2018), CCP'nin polimer beton dolgu maddesi olarak kullanılma potansiyelini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalarda, farklı oranlarda ısı ile modifiye edilmiş CCP ve kuvars kumu içeren numuneler üretilmiştir. Sonuçlar, tortunun karışıma %20'ye kadar eklenmesinin, kompresif ve eğilme dayanımı açısından kuvars kumu esaslı numunelerle benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak, %28 oranına ulaşıldığında dayanım değerlerinde azalma gözlemlenmiş ve bu oran sonrasında kontrol numunelerinden daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu bulgulara dayanarak, çalışma, karışıma %15–20 arasında tortu eklenmesinin rasyonel bir miktar olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Deneysel numunelerin yoğunluğu, modifiye CCP eklenmesiyle yalnızca çok az bir artış göstermekte olup, bunun sebebi, reçinenin CCP içeriğindeki karbonla daha yoğun kimyasal etkileşime girmesi ve saf kuvars kumu kullanıldığında bu etkileşimin daha az gerçekleşmesidir.

Joshi ve diğ. (2024) çalışmalarında, şeker ve gıda işleme sanayilerinden kaynaklanan atıkların, özellikle şeker kamışı posası külü (bagasse ash) ve yumurta kabuğunun, atık areka lifiyle takviye edilmiş epoksi kompozitlerinde dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Bu dolgu maddeleri, lif takviyeli kompozitlerde %5 ile %15 arasında değişen ağırlık yüzdelerinde kullanılmış ve üretilen kompozitlerin statik ve dinamik özellikleri ASTM standartlarına göre değerlendirilmiştir. Dolgu maddelerinin karakterizasyonu için XRD ve SEM/EDX teknikleri kullanılmıştır. Geliştirilen kompozitlerin özellikleri, kullanılan dolgu maddelerinin fiziksel ve kimyasal bileşimi, dolgu oranı ve lif ile reçine arasındaki bağlanma seviyesinden etkilenmiştir. Deneysel yoğunluk, her iki kompozit grubunda da dolgu yüklemesi ile artmıştır. Dolgu yüklemesi arttıkça, şeker kamışı posası takviyeli kompozitlerde boşluk içeriği

artarken, yumurta kabuğu takviyeli kompozitlerde ise bu içerik azalmıştır. Her iki dolgu maddesinin eklenmesi, geliştirilen kompozitlerin çekme, darbe ve dinamik mekanik dayanımlarını olumlu yönde etkilemişken, yumurta kabuğunun eklenmesi, kompozitlerin eğilme dayanımında önemli bir değişiklik yaratmamıştır. %5 şeker kamışı posası ile doldurulmuş kompozitler, sırasıyla 69,4 MPa, 121 MPa ve 34,8 kJ/m² ile maksimum çekme, eğilme ve darbe dayanımına sahip olmuştur. Şeker kamışı posası ile doldurulmuş kompozitler, tüm dolgu takviyeli hibrit kompozitler arasında maksimum depolama ve kayıp modülüne sahip olurken, yumurta kabuğu kompozitleri ise en iyi sönümlleme özelliklerini göstermiştir. Bu çalışma, atıkların kompozitlerdeki potansiyel kullanımını vurgulayarak, bu atıkların çevreyi kirletmesi veya çöp sahalarındaki yükü artırması yerine, yapısal uygulamalarda veya ahşap malzemelerden yapılmış hafif bileşenlerin yerine kullanılabilecek takviye malzemeleri olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Kashyap ve diğ. (2018) çalışmalarında, endüstriyel kireç çamuru atığının çevresel bir tehlike oluşturduğunu ve genellikle döküm sahalarına atılarak kirliliğe yol açtığını belirtmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, kireç çamurunun (LS) hibrit polimer kompozitlerinde dolgu maddesi olarak kullanılarak, kireç çamurunun ekonomik ve çevresel açıdan faydalı bir şekilde değerlendirilmesidir. Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve maleik anhidrit ile graflanmış yüksek yoğunluklu polietilen (MAPE) ile yapılan mekanik özellik incelemeleri, MAPE'nin, dolgu maddesi-matris sınırında maleik anhidrit uyumlaştırıcısının etkili bir ara yüzey bağlanması sağlaması nedeniyle daha iyi özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, LS, kısa boylu hindistancevizi lifi-epoksi hibrit kompozitlerinde de etkili bir takviye dolgu maddesi olarak kullanılmış ve dolgu yüklemesi %9'a kadar arttıkça, bu kompozitlerin çekme dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. LS, LS-hindistancevizi lifi-epoksi hibrit kompozitlerinin termal kararlılığını artırarak, termal bozunabilirlik ve kalan ağırlık yüzdesini iyileştirmiştir. Ancak, hindistancevizi lifi ve LS'nin kompozitlere eklenmesi, kompozitlerin su emme hızını önemli ölçüde artırmıştır. Sonuç olarak, kireç çamuru, polimer kompozitlerinde verimli bir dolgu maddesi olarak potansiyel göstermekte olup, bu kullanım yalnızca çevre kirliliğini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda polimer kompozitlerinin üretim maliyetlerini de düşürmektedir.

2.2. Diğer doğal veya sanayi atıklarıyla yapılan çalışmalar

Sivakumar ve diğ. (2022) çalışmalarında, doğal elyaf kompozitlerinin sentetik elyaf kompozitlerine alternatif bir malzeme olarak giderek daha fazla tercih edilmeye başlandığını ve yumurta kabuğu biyodolgununun polimer kompozitlerinde çevresel koruma amacıyla

kullanılmasının araştırıldığını vurgulamışlardır. Bu çalışmada, jüt, hindistancevizi (coir) ve sisal lifleri kullanılarak doğal elyaflardan kompozitler üretilmiştir. Epoksi reçine ile yapılan polimer kompozitler, farklı oranlarda yumurta kabuğu tozu (ESP) (%2, %4, %6, %8 ve %10 ağırlıkça) ilave edilerek hazırlanmıştır. Üretilen kompozitlerin mekanik ve biyobozunurluk özellikleri incelenmiştir. Test sonuçları, %6 ESP dolgu maddesi oranının tüm üç elyaf türünde mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle, %6 ESP eklenen hindistancevizi lifi kompozitleri, çekme, eğilme, darbe ve sertlik dayanımı açısından sırasıyla %34,64, %48,50, %33,33 ve %35,03 oranında önemli artışlar göstermiştir. Ayrıca, hindistancevizi lifi kompozitlerinin 9 hafta sonunda kaybettiği ağırlık oranı, biyobozunurluk testinde dikkat çekici bir değer sergilemiştir. Bu bulgular, yumurta kabuğu dolgu maddeleri içeren epoksi kompozitlerin, daha iyi mekanik dayanımlar gerektiren uygulamalarda kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Ozmeral ve diğ. (2023) çalışmalarında, bisfenol A tipi epoksi (ER) ve epoksi fenol novolak reçineleri (EPN) ile farklı toplam amin değerlerine sahip iki amin tipi kürleme ajanı (KH 816 ve IPOX EH 2041) seçilmiştir. Yapılan çalışmada, EPN reçinesinin mekanik özelliklerinin ve yoğunluğunun her iki kürleme ajanı için de daha yüksek olduğu bulunmuştur. EPN, polistiren (EPN-PS) ile modifiye edilmiş ve IPOX sertleştirici kullanılarak matris olarak kullanılmıştır. Nano ve hibrit kompozitler, ham ve tetrametilamonyum klorür ile modifiye edilmiş nano montmorillonit (NC ve MNC) ve alüminyum üretim atığı olan kırmızı çamur atığı (RMW) ile hazırlanmıştır. Kimyasal yapı, Fourier dönüşüm kızılötesi (FT-IR) spektroskopisi ile belirlenmiştir. Kompozitler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Uygun PS ve NC oranı sırasıyla %4 ve %2 ağırlıkça kabul edilmiştir. ER, EPN ve EPN-PS reçinelerinin FT-IR spektrumlarından hesaplanan kürleme dereceleri sırasıyla %99,3, %99,9 ve %86,5 bulunmuştur. İki ikili sistemin karşılaştırmalı bir çalışması yapılmıştır; %2 NC-(%15–35) RMW ve %2 MNC-(%15–35) RMW, EPN-PS matrisinin mekanik, termal ve yanıcılık özellikleri üzerinde incelenmiştir. Uygun RMW oranı %30 olarak belirlenmiştir. %25–30 RMW içeren hibrit kompozitler, kendi kendini söndüren malzemeler olarak kabul edilebilir.

Turkben ve diğ. (2023) çalışmalarında, etilen-propilen-dien monomer kauçuğu (EPDM) atığı ve lastik atığı tozu (TW), çeşitli epoksi matrislerini güçlendirmek, kompozit malzeme maliyetlerini düşürmek ve bu atıkları değerli kaynaklara dönüştürmek amacıyla dolgu maddesi olarak seçilmiştir. Çalışmada, iki tür bisfenol-A epoksi reçinesi (ER1 ve ER1diluted) ve ER1diluted, CTBN kauçuğu ile modifiye edilmiş (ER2) ve poliüretan ile modifiye edilmiş (ER3) epoksi sistemlerinden oluşan üç tür epoksi reçinesi karışımı, 1:1 ağırlık oranında matris olarak kullanılmıştır. Kauçuk oranı ve türü ile epoksi matrisinin kompozit özellikleri üzerindeki etkileri

araştırılmıştır. TW kompozitlerinin mekanik ve termal özellikleri, EPDM kompozitlerine göre daha yüksek bulunmuştur. Reçine karışımları için en iyi sonuçlar ER3 ile elde edilmiştir. EPDM ve TW'nin en uygun dolgu oranı, matris türüne bağlı olarak %20 ile %30 arasında değişmiştir. TW eklenmesi, ER1diluted ve ER3-ER1diluted epoksi matrislerinin darbe dayanımını artırmıştır. Mekanik özellikler açısından, düşük ortam sıcaklığının su ortamına göre daha uygun olduğu bulunmuştur.

Kusakli ve diğ. (2021) çalışmalarında, yeni bir alev geciktirici olan amonyum tetrafloroborat (ATFB), borik asit (H_3BO_3) ve amonyum hidrojen difluorür (NH_4HF_2) reaksiyon maddeleri kullanılarak başarılı bir şekilde sentezlenmiştir. ATFB'nin yanı sıra, alüminyum hidroksit ($Al(OH)_3$) alev geciktirici olarak, kırmızı çamur (RM) atığı ise dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Bu malzemelerle, geliştirilmiş yanıcılık özelliklerine sahip epoksi kompozit malzemeler hazırlanmıştır. RM:ATFB: $Al(OH)_3$ oranının, hem yanma hem de mekanik özellikler açısından en uygun oranının %15:%10:%5 olduğu bulunmuştur. Bu orandaki kompozitin çekme dayanımı 112 MPa olarak elde edilirken, saf epoksi reçinesinin (ER) çekme dayanımı 46 MPa olarak ölçülmüştür. Uygun RM:ATFB: $Al(OH)_3$ oranına sahip kompozitin yanma süresi ilk 10 saniyede azalmış ve 32 saniyede sönmüştür. Ayrıca, bu kompozitin yanmış alanı, diğer tüm kompozitler arasında en küçük olmuştur. Bu kompozit için deneysel ve tahmin edilen LOI (Yanma Sınırı İndeksi) değerleri sırasıyla 26 ve 29 olarak bulunmuştur.

Sogancıoğlu ve diğ. (2020) çalışmalarında, polipropilen (PP) plastik atıkları piroliz edilmiştir. Katı piroliz ürünü (kömür), epoksi kompozit hazırlamak için dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Piroliz için nihai sıcaklık olarak 300, 400, 500, 600 ve 700°C seçilmiştir. Katı piroliz ürünü (kömür), elementel analiz, FTIR, SEM, BET ve TGA analizleri ile incelenmiştir. Pirolizden elde edilen kömür ile epoksi kompozit örnekleri hazırlanmıştır. Kompozitlerin mekanik özellikleri, piroliz sıcaklıkları ve kömür dozlarının kompozit özellikleri üzerindeki etkilerini açıklamak amacıyla sertlik, çekme dayanımı, kopma uzaması ve elektriksel iletkenlik testleri ile analiz edilmiştir. Kompozitlerin termogravimetrik özellikleri, TGA analizleri ile belirlenmiştir. Kompozit örneklerinin su emme davranışı, su adsorpsiyon testi ile belirlenmiştir. 300°C'da elde edilen PP kömürü ile üretilen epoksi kompoziti, en ideal davranışı sergilemiştir.

Soydal ve diğ. (2018b) çalışmalarında, andezit (AW) ve mermer tozu atıkları (MW), kompozit hazırlamak amacıyla geri dönüştürülmüştür. Her iki malzeme de yerel endüstriyel kaynaklardan temin edilmiştir. Ticari olarak temin edilebilen epoksi reçinesi (ER) ve polianilin (PANI) ile modifiye edilmiş versiyonu, saf polimer matris olarak kullanılmıştır. Dolgu maddelerinin dağılımı, X-ışını kırınımı ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. PANI ve atık yüklemesinin mekanik, termal, elektriksel, su emme ve korozyon özellikleri

üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kompozitlerde MW veya AW için optimum yükleme seviyesinin %20 ağırlıkça olduğu bulunmuştur. Termogravimetrik analizler kullanılarak, hazırlanan kompozitlerin termal davranışı ve kararlılığı incelenmiştir. PANI ve atık dolgu maddelerinin eklenmesi, saf ER'nin T10 sıcaklığını 10–33°C artırmış ve çekme dayanımını 4–51 MPa arasında yükseltmiştir. %10–30 ağırlıkça AW dolgu maddesi içeren kompozitlerin yarı iletken olduğu ve AW içeriği arttıkça elektriksel iletkenliğin azaldığı gözlemlenmiştir. PANI-ER/kompoziti, korozyona karşı mükemmel direnç göstermiş ve en iyi yapışma özelliklerini sergilemiştir.

Oladele ve diğ. (2020) çalışmalarında, kalsine ve kalsine edilmemiş yumurta kabuğu parçacıkları (ESP) ile sisal lifi (SF) ve bu bileşenlerin yumurta kabuğu parçacıkları/sisal lifi ile takviye edilmiş epoksi kompozitlerinin mekanik ve aşınma özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Yumurtaların kabukları, kalsine ve kalsine edilmemiş yumurta kabuğu parçacıkları (–43 µm) elde etmek amacıyla işlenmiş, sisal lifleri ise toprakla suyla fermente edilerek NaOH ile işlenmiştir. Kompozit, seçilen malzemelerin önceden belirlenmiş oranlarda karıştırılarak el ile yerleştirme yöntemiyle geliştirilmiştir. Yumurtanın kabuğu parçacıkları üzerine SEM/EDS ve XRD analizleri yapılmış, geliştirilen kompozitlerin mekanik ve aşınma özellikleri değerlendirilmiştir. Ayrıca, kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri de incelenmiştir. Sonuçlar, yumurta kabuğu parçacıklarının CaCO_3 içerdiğini ve kalsine edilmemiş ESP/SF takviye edilmiş epoksi kompozitinin, yapılan çoğu testte kalsine ESP/SF kompozitlerine göre daha iyi özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, çoğu testin en iyi sonuçları farklı ağırlık fraksiyonlarında verdiği gözlemlenmiştir. Ancak, %3 ağırlık fraksiyonu optimum değerlerle en iyi sonuçları elde etmiştir.

Sarmin ve diğ. (2023) çalışmalarında, doğal lifler uzun bir süredir polimer matrislerinde kompozitlerin üretimi için takviye dolgu maddesi olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Çevre dostu ve sürdürülebilir lifler, kompozit malzemelerden çeşitli ürünler için sentetik liflere alternatif ve uygulanabilir bir madde sunma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, hurma palmyesi lifi (DP) ve yumurta kabuğu (ES) atıkları kullanılarak yeni bir biyokompozit üretilmiştir. Çalışma, ES parçacıklarının DP/biyo-epoksi kompozitlerinin fiziksel, mekanik ve morfolojik yönler üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Biyokompozitler, 40 ağırlıkça DP lifi yüklemesi ve 5, 10, 15 ve 20 ağırlıkça ES dolgu konsantrasyonlarıyla kapalı kalıp sıcak pres yöntemiyle üretilmiştir. Ayrıca, ES dolgusuz bir DP/biyo-epoksi kompoziti kontrol örneği olarak hazırlanmıştır. Biyokompozitlerin karakterizasyonu, ASTM standardına uygun olarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ES'nin bu yeni malzeme bileşimi ile biyo-epoksi içinde dolgu maddesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Mekanik özellikler, 15 ağırlıkça ES parçacığı dolgu

yüklemesinin iyi bir çekme ve eğilme özellikleri sergilediğini, ayrıca %5 ES'de daha iyi darbe dayanımı sağladığını göstermektedir. DP/biyo-epoksi kompozitinde ES'nin %15'in üzerinde eklenmesi, önemli bir iyileşme göstermemektedir, bu nedenle %15 dolgu maddesi yerine geçiş önerilmektedir. Ayrıca, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kırılmayı matriste göstererek, biyokompozit polimer yapılarının dolgu maddeleriyle değiştiğini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgulardan, ES parçacıklarının polimer kompozitlerinde güçlendirme için potansiyel bir yeşil hammadde kaynağı olarak kullanılabileceği ve nihayetinde yapısal uygulamalarda potansiyelini ortaya çıkarabileceği sonucuna varılmıştır.

Baba Ali ve diğ. (2020) çalışmalarında, tavuk yumurtası kabuğu parçacıklarının (CES) epoksi reçinesine (ER) olan etkileri araştırılmıştır. Kompozitler, el ile yerleştirme tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Farklı oranlarda %10, %20 ve %30 dolgu (CES) yüklemesi, matris (ER) içine ilave edilmiştir. Numuneler 24 saat boyunca koşullandırıldıktan sonra, kompozitlerin mekanik (çekme, eğilme, darbe ve sertlik) ve fiziksel (su emme ve yoğunluk) özellikleri, ASTM standartlarına göre belirlenmiştir. Saf ER'nin çekme gerilmesi 46,65 MPa iken, yumurta kabuğu parçacıkları eklendiğinde, çekme gerilmesi sırasıyla %10, %20 ve %30 CES yüklemelerinde sırasıyla 20,63 MPa, 46,11 MPa ve 38,86 MPa'ya çıkmıştır. Çekme deformasyonu, yüzde uzama ve eğilme dayanımı, dolgu maddesi (CES) yüklemesi arttıkça azalmıştır. Kompozitlerin sertliği, CES içeriği arttıkça artmış ve sırasıyla %10, %20 ve %30 CES içeriği için 5,98 HRF'den 6,53, 7,80 ve 6,00 HRF'ye çıkmıştır. Darbe dayanımı, %10 CES eklenmesiyle azalmış, ancak %20 ve %30 CES eklenmesiyle kademeli olarak artmıştır. Su emme, CES içeriği arttıkça ve ER içeriği azaldıkça, ayrıca gün sayısı arttıkça artmıştır. Kompozitlerin yoğunluğu, dolgu maddesi içeriği arttıkça azalma göstermiştir.

Hamdi ve Habubi (2018) çalışmalarında, epoksi/yumurta kabuğu (ES) kompozitleri hazırlanmıştır. Kompozitin mikro yapısını incelemek amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, epoksi/%3 ES ve epoksi/%4 ES kompozitlerinin kristalin bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, doğal dolgu maddesi olarak tavuk yumurtası kabuğu (ES) tozunun hacim oranının epoksi reçinesinin termal stabilitesi, cam geçiş sıcaklığı ve ısı iletkenliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Epoksi reçinesindeki %4 ES tozunun hacim oranına sahip kompozit, diğer hacim oranlarına göre daha iyi termal yalıtım özellikleri sergilemiştir.

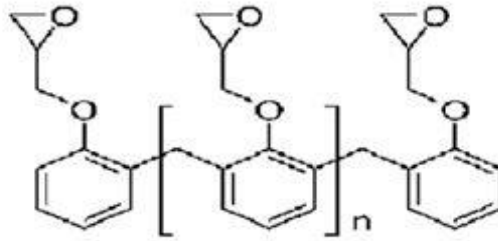
3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında kullanılan kimyasallar ve kompozitlerin hazırlanma yöntemleri, karakterizasyon için yapılan analiz ve testler aşağıda detaylı verilmiştir.

3.1. Kullanılan Kimyasallar

3.1.1. Epoksi Reçine (ER)

Fenolik novalak epoksi reçine (FER) (yoğunluk (gr/ml) : $1,35 \pm 0,1$; alevlenme Noktası : 16°C ; VOC (Uçucu Organik Madde) : 403 gr/lit). Kimyasal formülü Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



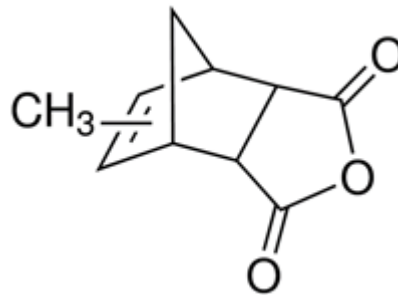
Fenolik novalak epoksi reçine

Şekil 3.1. Fenolik novalak epoksi reçine (FER) kimyasal formülü

3.1.2. Kürleştirici

MNA (Metil nadik anhidrit)

Metil-5-norbornen-2,3-dikarboksilik anhidrit (MNA) (buhar basıncı :5 mmHg (120°C); Kırılma indisi: 20 / D 1.506 (lit); yoğunluk : 25°C 'de 1.232 g/mL) ve sikloalifatik amin (KH 816) (Viskozite : 300-500 cps 25°C de; Parlama noktası : 131°C) kullanılmıştır. MNA’nın kimyasal formülü Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Metil-5-norbornen-2,3-dikarboksilik anhidrit (MNA) kimyasal formülü

Sikloalifatik amin (KH 816)

Özellikleri: Viskozite : 300-500 cps 25°C de; Parlama noktası : 131°C

3.2. Dolgu Maddeleri

3.2.1. Karbonatlama atığı (kireç atığı) (KK)

Şeker üretimi kireçleme ve karbonatlama sonucu oluşup çöken çamurun kurutulmasıyla elde edilen kalsiyum karbonattır. Karbonatlama işleminin amacı, şerbetteki kireç fazlasının CO₂ ile çözünmeyen CaCO₃'a dönüştürüp şerbetten ayrıştırmaktır. Bu işlemde şeker dışı maddeler de CaCO₃ kristallerinin yüzeyine tutunarak CaCO₃ ile birlikte çöker. Kireç atığı $\leq 106 \mu\text{m}$ boyutunda elekten geçirilerek kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Karbonatlama atığı (kireç atığı)

3.2.2. Şeker üretimi atığı küspe

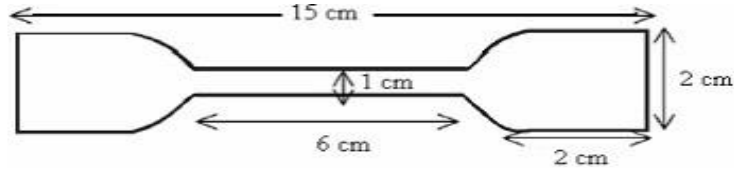
Şekeri alınmış pancar kıyımlarına “küspe” denilir. Şeker prosesinden çıkan küspe kurutma tesisinde kurutularak melaslı kuru küspe haline getirilmiştir. Küspe, içerisinde selüloz, hemiselüloz, lignin gibi önemli lifli maddeler bulunduran bir atıktır. Küspe atığı öğütülmüş, daha sonra $\leq 106 \mu\text{m}$ boyutunda elekten geçirilerek kullanılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Küspe atığı

3.3. Kompozitlerin Hazırlanması

Kompozit numuneler, ASTM D 638 standardına göre hazırlanmış kalıplarda elde edilmiştir. Numune boyutları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Kompozit numunelerin boyutları

Kompozit hazırlığı sırasında, dolgu olarak kireç atığı kullanılmıştır. Dolgular, mekanik karıştırma yöntemiyle epoksi matrisine %10-20-30-40-50 ağırlıkça eklenmiş ve ardından 60°C'de 1 saat boyunca ultrasonik banyoda tutulmuştur. Dolgu maddelerinin homojen bir şekilde dağılması sağlandıktan sonra, sertleştirici (%40 ağırlık) eklenmiştir. Kürleme işlemi, 80°C'de 48 saat boyunca gerçekleştirilmiştir.

3.4. Analizler ve Testler

3.4.1. TGA

Termogravimetrik analiz ile (TGA) bileşiklerin yüksek sıcaklığın sebep olduğu ağırlık değişimi elde edilir (Şekil 3.7). Bileşiklerin kütlesindeki yüzde değişim sıcaklık cinsinden kaydedilir ve termogram olarak adlandırılan eğri ortaya çıkar. Kompozit malzemenin termal özelliklerini belirlemek için Mettler Toledo TGA/DSC 2 yıldız sistemi kullanılmıştır. TGA analizi, azot atmosferi altında 25-800°C aralığında 10°C/dk hızla yapılmıştır.

3.4.2. SEM

Kompozitlerin yüzey morfolojisi, Zeiss EVO LS10 taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında elde edilen görüntülerle incelenmiştir. Kompozit numunelerin SEM analizi altın kaplama yapılarak gerçekleştirilmiştir.

3.4.3. XRD

Toz X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, Cu-K α radyasyonlu bir Bruker D8 Advance Toz Difraktometresi ($\lambda = 1.5406$) kullanılarak yapılmıştır. Tüm XRD analizleri oda sıcaklığında yapılmış ve tarama 0° ile 80° arasında değişmiştir.

3.4.4. Mekanik karakterizasyon

Mekanik testler, bir numunenin sabit bir hızda gerilme, çarpma, sıkışma veya kırılma gibi bir etkiye maruz kaldığında malzemenin verdiği tepkiyi ölçmek için kullanılır. Malzeme üzerinde uygulanan mekanik testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş ve her deney seti için tüm numuneler 3 kez test edilmiştir.

3.4.4.1. Çekme Testi

Çekme testi kompozit malzeme numunelerinin laboratuvar ortamında dik ekseninde belirli bir hızda koparıncaya kadar çekilmesidir. Polimerlerin mekanik özelliklerini belirlemede en sık başvurulan yöntem olup numuneler belli bir standarta göre hazırlanmış ve şekli dikdörtgen veya kaşık numunesi şeklindedir. Çekme modülü ile malzemenin deformasyona ne kadar iyi dayanıklılık gösterdiği anlaşılır. Numunelerin çekme testleri TST-Mares/TS mxe markalı, bilgisayar kontrolündeki cihazda oda şartlarında numunelerin üst ve alt kısmına eşit oranda yük uygulanarak yapılmıştır (Şekil 3.6). Test sonuçları üçer kez tekrarlanarak ortalama değerler elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Çekme testi cihazı ve çekme testi yapılan numune görüntüsü

3.4.4.2. Sertlik Testi

Numuneler Shore Durometer TH 210 sertlik tayini ölçüm cihazına (Şekil 3.7) yerleştirilip ön ve arka yüzeylerden toplamda 5 kez ölçüm alındıktan sonra çıkarılan ortalama değer numunelerin sertlik değerlerini vermiştir.



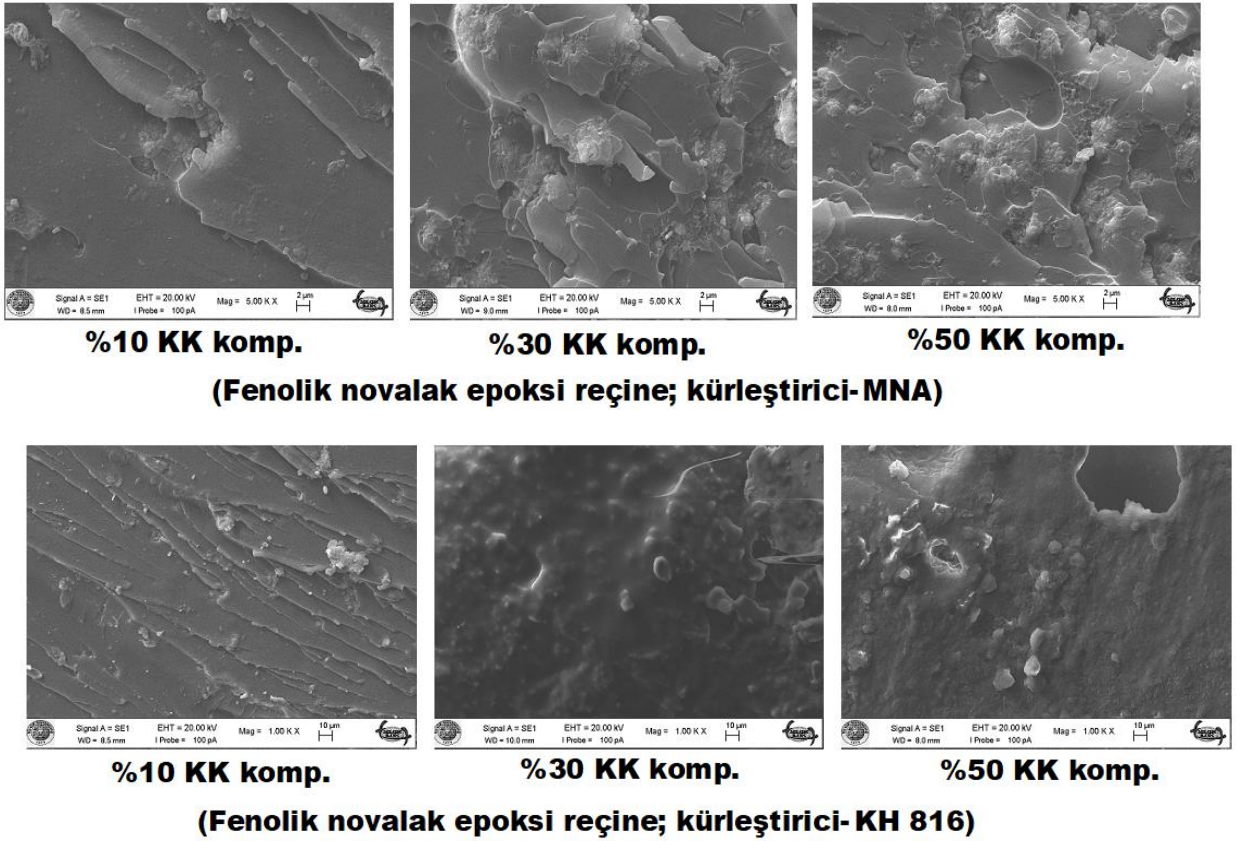
Şekil 3.7. Sertlik test cihaz

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Karbonatlama Atığı (kireç atığı) (KK) Kompozitlerinin Karakterizasyonu

4.1.1. SEM

Anhidrit türü (MNA) ve amin türü (KH 816) kürleştiricilerle kürleştirilen %10, 30 ve 50 dolgu oranındaki KK kompozitlerinin SEM görüntüleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. MNA ve KH 816 ile kürleştirilmiş saf fenolik novalak epoksi reçinenin SEM görüntüleri

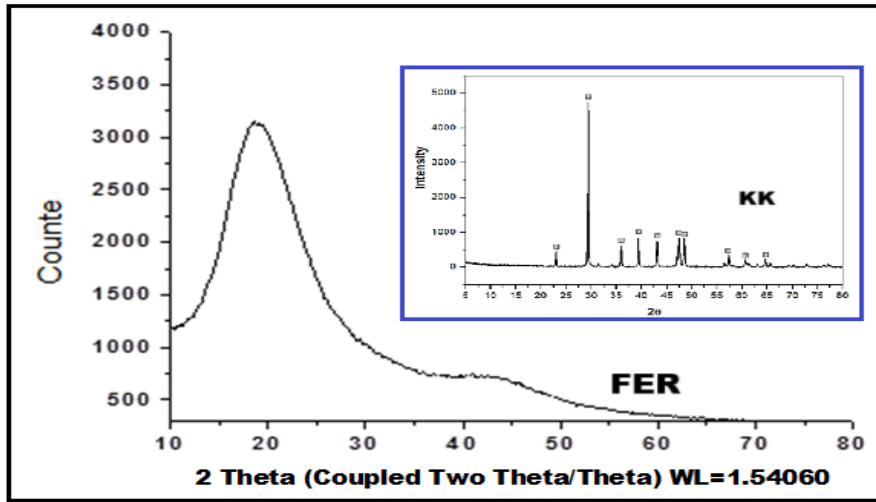
Karbonat atığı (KK) kompozitlerinde KK oranının %30’un üzerinde artması heterojenliği artırmış, fakat topaklanmalar küspe kompozitlerine göre daha az tespit edilmiştir. MNA ile kürleştirilen %10-50 KK kompozitlerinin SEM görüntüleri, amin ile kürleştirilen kütlece %10-50 KK kompozitlerinin SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında, matris-takviye arayüz adezyonunda yine MNA kürleştiricisi daha etkili olmuştur (Şekil 4.1). Her 2 tür kompozitte de %10 dolgu oranı üzerinde heterojenlik artmıştır. %50 KK dolgu oranı durumunda; MNA ile kürleştirilen

kompozitte derin olmayan çukurların oluştuğu gözlemlense de KH 816 kürleştiricisi kullanılması durumunda derin çukur veya boşluk oluştuğu tespit edilmiştir. Bu da mekanik özelliklerde kendini göstermiştir.

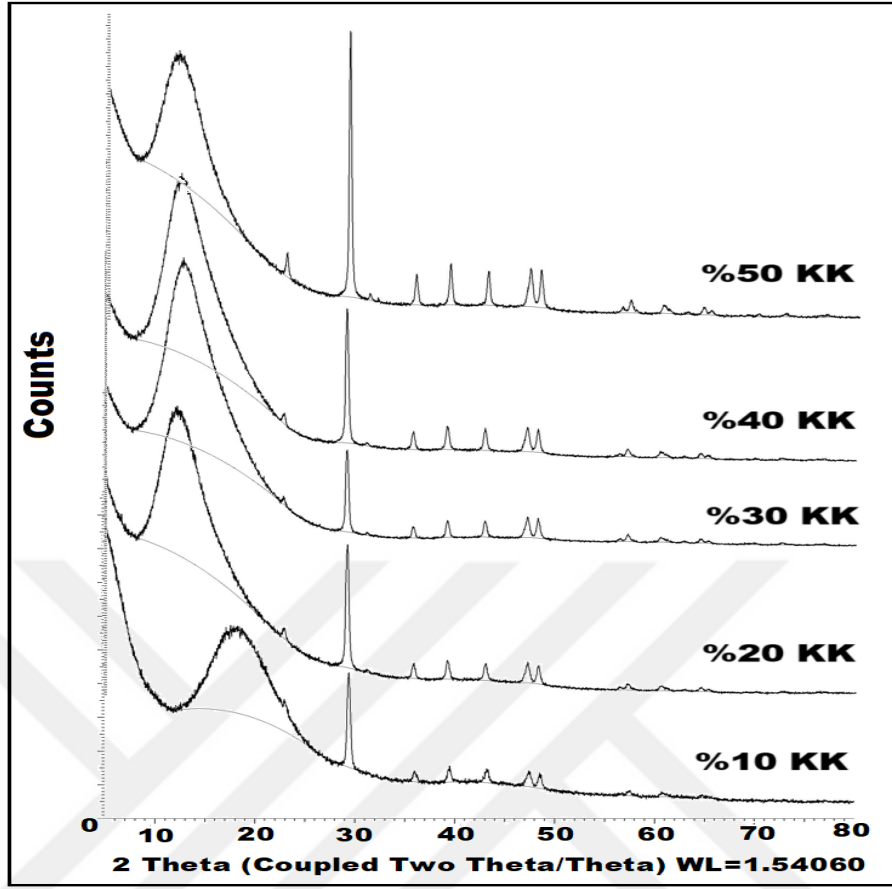
4.1.2. XRD

KK kompozitlerinin mekanik özellikleri küspe atığı kompozitlerine göre daha yüksek olduğu için, XRD analizi örnek olarak bu kompozitler için yapılmıştır. Saf FER ve kalsitin XRD kırının eğrileri Şekil 4.2’te, KK kompozitlerinin XRD kırının eğrileri ise Şekil 4.3’te verilmiştir.

Epoksi reçineler yüksek derecede çapraz bağlanmaya sahip olduğu için kristal yapıya sahip değildirler. Kürleşmiş epoksi matris şeffaf görünümlüdür. Epoksi numunesinin opak olması kristal yapıya bileşik olmadığını göstermektedir. Saf FER matrisin XRD eğrisi $2\theta = 20^\circ$ merkezli güçlü bir pik; 45° ’de ise zayıf bir pik göstermiştir (Kocaman ve diğ., 2020) (Şekil 4.2) KK kompozitlerinin XRD eğrileri yaklaşık $2\theta \approx 15^\circ$ ’de saf reçineye göre daha küçük bir yansıma sunmuştur. $2\theta \approx 30^\circ$ ’de gözlemlenen pik şiddetinin dolgu oranına bağlı olarak artması KK parçacıklarının daha heterojen dağıldığını göstermektedir (Şekil 4.3). $2\theta \approx 30^\circ$ ’deki KK’a ait pik de bunu kanıtlar (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. FER ve KK’nin XRD eğrileri



Şekil 4.3. KK kompozitlerinin XRD eğrileri
(1-%10 KK; 2-%20 KK; 3-%30 KK; 4-%40 KK; 5-%50 KK)

4.1.3. Mekanik özellikler

Kireç atığı (KK) ile oluşturulan fenolik novalak epoksi reçine (FER) kompozitlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme ve sertlik testleri yapılmış, sonuçlar Tablo 4.1’de özetlenmiştir.

Tüm kompozitlerde dolgu oranı arttıkça çekme uzaması azalmıştır. Katı partikül doldu maddesinin matristeki oranı arttıkça çekme uzamasında azalma olması literatürde de rapor edilmiştir (Soydal ve diğ., 2018a; Soydal ve diğ., 2018b; Isam Bakr Albaker ve diğ., 2021). Kürleştirici MNA olması durumunda %20 KK dolgu oranı en uygun oran tespit edilmiştir, çünkü bu orandaki çekme dayanımı en yüksek değer almıştır. KH 816 kürleştiricisi kullanılması durumunda ise kütlece %20 ve %30 dolgu oranında çekme dayanımları çok yakın değerler aldığından, daha fazla atık dolgu kullanarak kompozit maliyetini daha fazla düşürmek adına %30 dolgu oranı daha uygun seçilmiştir.

Tablo 4.1. FER/KK kompozitlerinin çekme ve sertlik testi sonuçları

Dolgu oranı (küt. %)	Çekme uzaması ı (%)	Çekme dayanım ı (MPa)	e- modül (GPa)	Sertlik (Shore D)
Saf FER (kürleştirici MNA)				
-	0.745	88	7.1	85
Saf FER (kürleştirici KH 816)				
-	0.884	82	7.0	80
FER/KK kompozitleri (kürleştirici MNA)				
10	0.673	89	8.8	83.5
20	0.562	96	8.4	84
30	0.520	94	9.6	86
40	0.432	84	8.8	82
50	0.415	79	7.3	82
FER/KK kompozitleri (kürleştirici KH 816)				
10	0.875	82	7.7	82
20	0.763	84	7.8	83
30	0.761	83.6	8.5	84
40	0.642	73	7.9	80
50	0.565	61	7.1	81

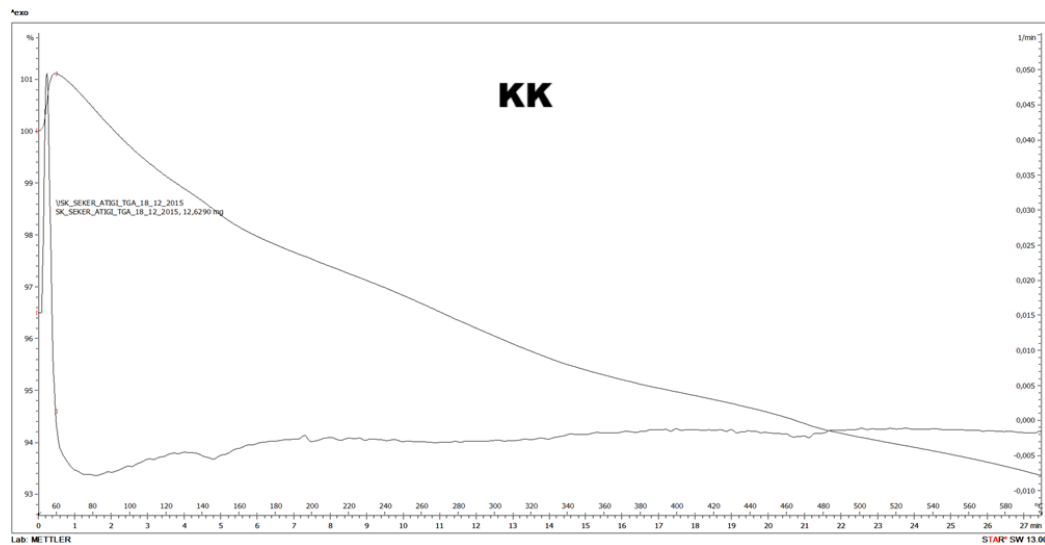
Kürleştirici türleri karşılaştırıldığında; MNA kürleştiricisi ile daha yüksek elastisite modülü, sertlik ve çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. FER/KK kompozitlerinin çekme dayanımları %20 dolgu oranında MNA kürleştiricisi durumunda 96 MPa, KH 816 kürleştiricisi durumunda ise 84 MPa olarak belirlenmiştir. KK atığı kompozitleri küspe kompozitlerine göre daha yüksek mekanik özellikler göstermiştir. Kompozitlerin çekme dayanımları saf FER ile

karşılaştırıldığında, her 2 kompozit türünde de %30 dolgu oranına kadar çekme dayanımı değerleri matristen daha yüksek olmuştur. Bunun aksine, tüm kompozitlerin e-modül değerleri tüm dolgu oranlarında saf FER'e göre yüksek elde edilmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde; her 2 kompozit türünde de %30 dolgu oranına kadar daha yüksek değerler olduğu görülmüştür. Bu oran üzerinde mekanik özelliklerde zayıflama gözlemlenmesi, daha yüksek dolgu oranlarında kompozit yapısındaki heterojenlik, boşluk ve çukur oluşmasına bağlanabilir.

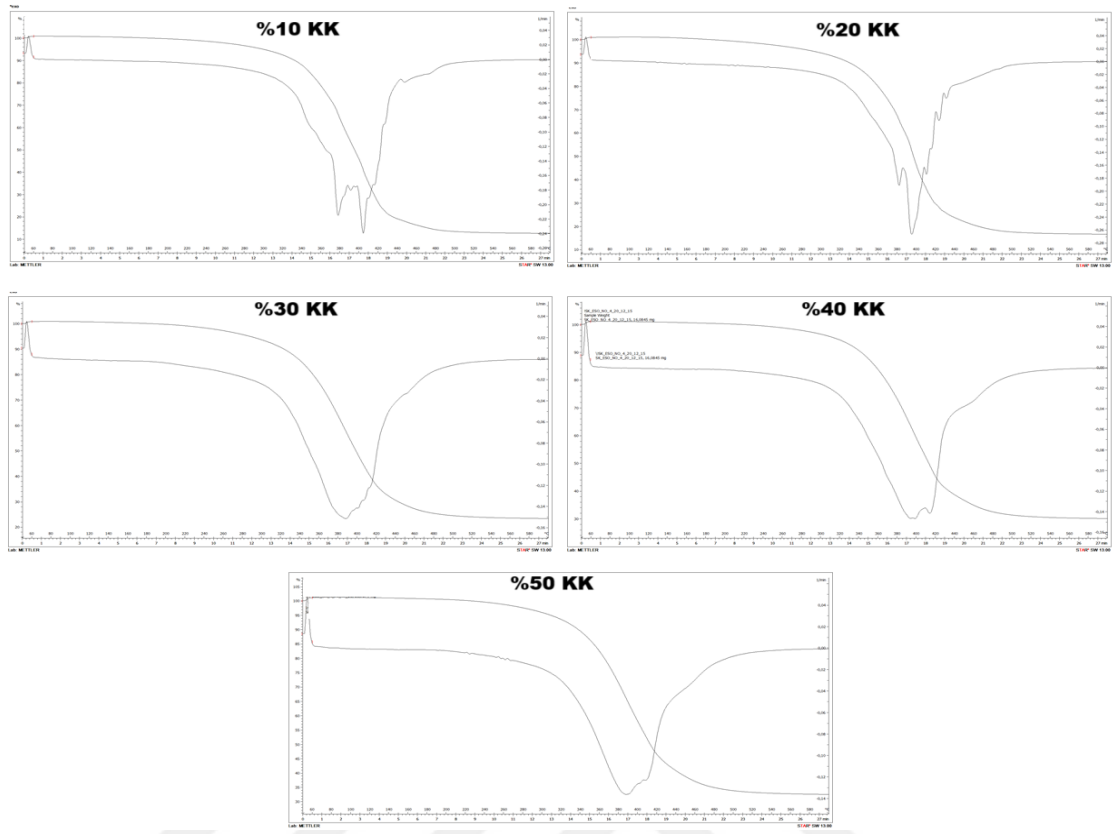
4.1.4. Termal özellikler

KK ve kompozitlerinin (kürleştirici-MNA) termal dayanımları TGA ile incelenmiş ve elde edilen eğriler sırasıyla Şekil 4.4 ve 4.5'te verilmiştir. TGA eğrilerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de özetlenmiştir.

T₅, T₁₀ ve T₅₀ (sırasıyla % 5, % 10 ve % 50 kütle kaybına karşılık gelen bozunma sıcaklıkları) bir kompozitin termal kararlılığını gösteren ana ölçütlerdir. Değerlerin yüksek olması termal kararlılığın da o kadar yüksek olduğunu kanıtlar. KK kompozitlerinin termal değerleri dolgu oranına bağlı olarak artış göstermiştir. Bu, KK'nin yüksek termal dayanıklılığına bağlı olmaktadır (Şekil 4.4). Ayrıca, %10-50 dolgu oranındaki tüm kompozitlerin termal değerleri saf matristen yüksek bulunmuştur (Şekil 4.5). Bu sonuç, KK atığının FER matrisinin termal dayanımını önemli derecede arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, TGA sonuçlarına göre, KK kompozitlerinin termal dayanımı küspe kompozitlerine göre daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 4.4. Saf KK'nin TGA eğrisi



Şekil 4.5. MNA ile kürleştirilmiş KK kompozitlerinin TGA eğrileri

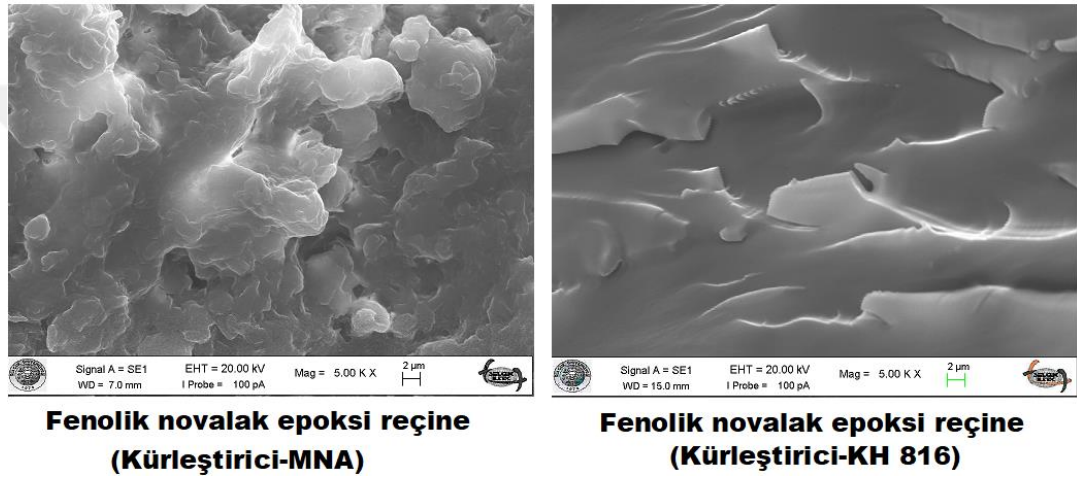
Tablo 4.2. KK kompozitlerinin termal değerleri

KK (küt. %)	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
Saf FER			
-	176	303	375
KK atığı			
100	411	-	-
FER/KK kompozitleri (kürleştirici-MNA)			
10	304	321	401
20	309	329	406
30	317	342	413
40	342	358	417
50	355	366	422

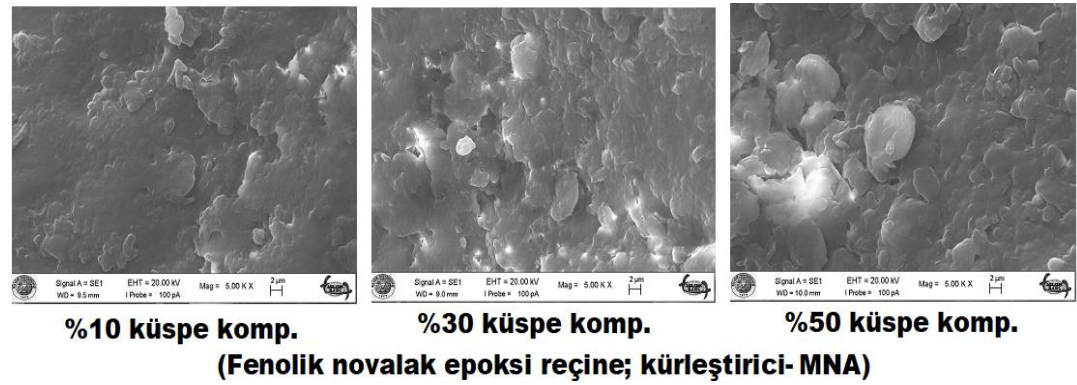
4.2. Küspe Atığı Kompozitlerinin Karakterizasyonu

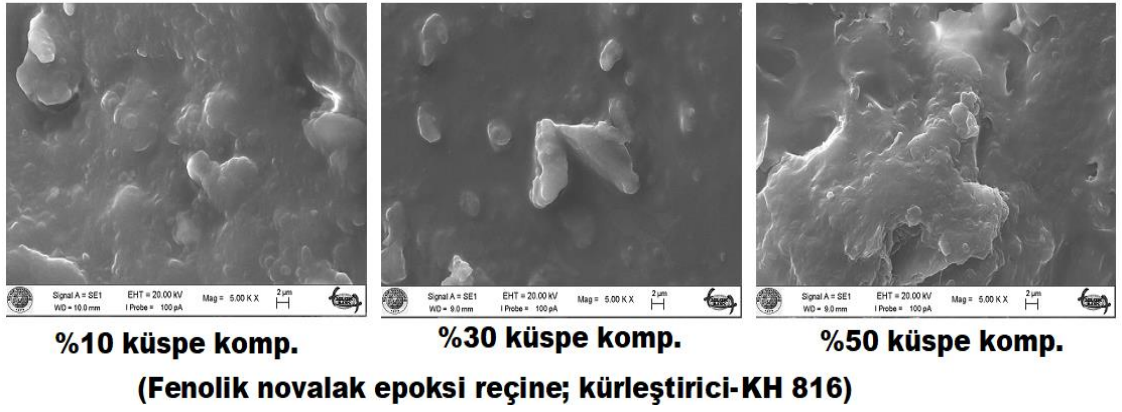
4.2.1. SEM

Anhidrit ve amin türü krleştiricilerle kürleştirilmiş saf fenolik novalak epoksi reçinenin SEM görüntüleri şekil 4.6’da kompozitlerin ise şekil 4.7’de gösterilmiştir. Saf fenolik epoksi reçinenin SEM görüntüleri, krleştiricilerin farklı kimyasal yapılarına bağlıdır. SEM görüntüleri, poliamin türü (KH 816) ile kürleştirilen reçinenin daha kırılğan yapılı olduğunu göstermektedir (şekil 4.6).



şekil 4.6. MNA ve KH 816 ile kürleştirilmiş saf fenolik novalak epoksi reçinenin SEM görüntüleri





Şekil 4.7. MNA ve KH 816 ile k rle tirilmi  %10-30-50 k s   kompozitlerinin SEM görüntüleri

Şekil 4.7'den, tüm kompozitlerde k s   oranı özellikle %30'un üzerinde olduğunda heterojenlik daha çok arttığı tespit edilmiştir. Anhidrit türü (MNA) ile k rle tirilen %10-50 k s   kompozitlerinin SEM görüntüleri, poliamin ile k rle tirilen %10-50 k s   kompozitlerinin SEM görüntüleri ile kar ıla tırıldı ında, MNA k rle tiricisi kullanılması durumunda matris ile dolgunun daha iyi uyum sağladığı g r lm  tir.

4.2.2. Mekanik  zellikler

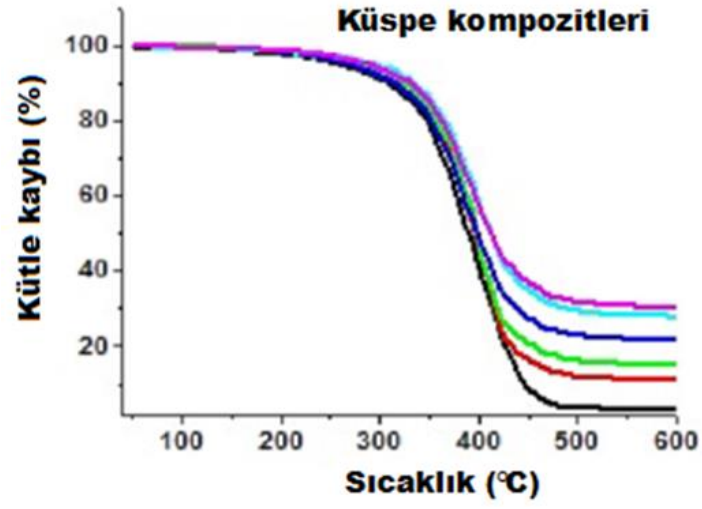
FER/k s   kompozitlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme ve sertlik testleri yapılmış, sonuçlar Tablo 4.3'de özetlenmiştir. Tüm kompozitlerde dolgu oranı arttı a çekme uzaması azalmıştır. Genelde %20 dolgu oranı en uygun oran tespit edilmiştir, çünkü bu orandaki çekme dayanımları en yüksek değer almıştır. K rle tirici türleri kar ıla tırıldı ında; MNA k rle tiricisi ile daha yüksek elastisite modülü, sertlik ve çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. FER/k s   kompozitlerinin çekme dayanımları, %20 dolgu oranında MNA ve KH 816 k rle tirileri durumunda sırasıyla 79 MPa ve 75 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.3. K s pe kompozitlerinin çekme ve sertlik testi sonuçları

Dolgu (k�t. %)	�ekme uzaması (%)	�ekme dayanımı (MPa)	E-mod�l (GPa)	Sertlik (Shore D)
Saf FER				
-	0.745	88	7.1	85
FER/k�s�pe kompozitleri (k�rle�tirici-MNA)				
10	0.733	76	7.3	83
20	0.602	79	6.9	80
30	0.531	65	7.2	79
40	0.444	56	6.5	77
50	0.405	43	6.6	74
FER/k�s�pe kompozitleri (k�rle�tirici-KH 816)				
10	0.580	72	7.3	77
20	0.562	75	7.0	78
30	0.544	64	6.1	78
40	0.501	53	6.5	73
50	0.458	41	6.2	71

4.2.3. Termal  zellikler

Kompozitlerin (k rle tirici-MNA) termal dayanımları TGA ile incelenmiştir. T₅, T₁₀ ve T₅₀ (sırasıyla % 5, % 10 ve % 50 kütle kaybına karşılık gelen bozunma sıcaklıkları) bir kompozitin termal kararlılığını gösteren ana ölçütlerdir. Değerlerin yüksek olması termal kararlılığın da o kadar yüksek olduğunu kanıtlar. TGA eğrilerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.4’de özetlenmiştir. TGA sonuçlarına göre, k s pe kompozitlerinin termal dayanımı saf FER’e göre daha yüksek olmuştur. Kompozitlerde k s pe oranı arttıkça termal değerlerde artış gözlemlenmiş, %40 ve %50 dolgu oranları için ise yakın değerler bulunmuştur.



Şekil 4.8. Saf FER ve MNA ile kürleştirilmiş küspe kompozitlerinin TGA eğrileri

Tablo 4.4. KÜSPE kompozitlerinin termal değerleri

KÜSPE (KÜT. %)	T_5 (°C)	T_{10} (°C)	T_{50} (°C)
SAF FER			
	176	303	375
FER/küspe kompozitleri (kürleştirici-MNA)			
10	303	340	397
20	292	335	400
30	293	330	402
40	311	350	417
50	314	342	415

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, 2 farklı şeker üretimi atığı- karbonatlama atığı ve küspe ilk kez dolgu olarak fenolik epoksi reçinede kullanılmış, hem dolgu türü ve oranının, hem de kürleştirici türünün kompozit özelliklerine etkileri incelenmiştir.

- Kompozitlerin morfolojisi SEM ile incelenmiş, tüm kompozitlerde özellikle %30 dolgu oranından sonra heterojenliğin önemli derecede arttığı SEM görüntülerinden belirlenmiştir.
- Tüm kompozitlerin çekme uzaması değerleri dolgu oranına bağlı olarak azalmıştır.
- Çekme dayanımı için en iyi dolgu oranı kütlece %20 olarak belirlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı KK kompozitleri için tespit edilmiştir.
- Dolgu oranı arttıkça sertlik değerlerinde az bir düşüş olmuştur. En yüksek sertlik değerleri KK kompozitlerinde görülmüştür.
- Tüm kompozitlerin termal değerleri matristen dahayüksek bulunmuştur.
- Anhidrit ve amin türü kürleştiriciler karşılaştırıldıklarında, MNA ile daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

5.2. Öneriler

Kompozit yapımında özellikle atık malzemelerin kullanımı çevre kirliliğini azaltmaya katkıda bulunacağı gibi kompozit maliyetini de düşürmeye yardımcı olmaktadır. Farklı polimer matrislerin farklı hibrit dolgularla takviyelendirilmesi, kompozitlere istenilen özellikleri kazandırmak için yapılacak çalışmaları çeşitlendirecektir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, P., Kaur, H., Bhardwaj, D., 2012, Enhanced bee colony algorithm for solving travelling salesperson problem, *International Journal of Control Theory and Computer Modeling*, 2(4), 37-41.
- Alaghbary, A., 2024, Carbonation Process in Sugar Refinery, *Taiz University Graduate Studies Center*, Yemen, Taiz.
- Amjad, M., Hussain, S., Mubashir, A., 2023, A perspective review on sugar industry wastes, uses and treatment techniques, *Waste Manage Xenobio*, 6(2), e000186.
- Arpitha, G.R., Mohit, H., Madhu, P., Verma, A., 2024, Effect of sugarcane bagasse and alumina reinforcements on physical, mechanical, and thermal characteristics of epoxy composites using artificial neural networks and response surface methodology, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(11), 12539-12557.
- Baba Ali, J., Aboh, O.Z., Danladi, A., 2020, Preparation and characterization of epoxy resin reinforced chicken eggshell particulate composites, *Sule Lamido University Journal of Science and Technology (SLUJST)*, 1(1), 131-138.
- Bhatnagar, A., Kesari, K.K., Shurpali, N., 2016, Multidisciplinary approaches to handling wastes in sugar industries, *Water, Air, Soil Pollution*, 227, 1-30.
- Cantwell, W.J., Morton, J., 1991, The impact resistance of composite materials-a review, *Composites*, 22(5), 347-362.
- Carioca, J.O.B., Leal, M.R.L.V., 2011, Ethanol production from sugar-based feedstocks, in: Moo-Young, M. (Ed), *Comprehensive Biotechnology*, Pergamon Press, Oxford.
- Carrilho, E.N.V.M., Labuto, G., Kamogawa, M.Y., 2016, Destination of vinasse, a residue from alcohol industry: Resource recovery and prevention of pollution, in: Prasad, M.N.V., Shih, K. (Eds), *Environmental Materials and Waste*, Academic Press, Cambridge, Massachusetts.
- Chandel, A.K., da Silva, S.S., Carvalho, W., Singh, O.V., 2012, Sugarcane bagasse and leaves: foreseeable biomass of biofuel and bio-products, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 87(1), 11-20.

- Chung, D.D.L, 2003, Composite materials for electrical applications, in: Chung, D.D.L. (Ed), Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies, Springer, London.
- Diaz, M.P., 2016, Consequences of compost k  pe as fertilizers, *DJ International Journal of Advances in Microbiology, Microbiological Research*, 1, 28-32.
- Erofeev, V., 2016, Frame construction composites for buildings and structures in aggressive environments, *Procedia Engineering*, 165, 1444-1447.
- Franco, H.C.J., Pimenta, M.T.B., Carvalho, J.L.N., Magalh  es, P.S.G., Rossell, C.E.V., Braunbeck, O.A., Rossi Neto, J., 2013, Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil, *Scientia Agricola*, 70, 305-312.
- Hamdi, W.J., Habubi, N.F., 2018, Preparation of epoxy chicken eggshell composite as thermal insulation, *Journal of the Australian Ceramic Society*, 54(2), 231-235.
- Hancox, N.L., 1981, Fibre Composite Hybrid Materials, *Applied Science Publishers*, London.
- Hiloidhari, M., Banerjee, R., Rao, A.B., 2021, Life cycle assessment of sugar and electricity production under different sugarcane cultivation and cogeneration scenarios in India, *Journal of Cleaner Production*, 290, e125170.
- Hu, N., 2012, Composites and Their Applications, *IntechOpen*, London.
- Isam Bakr Albaker, R., Kocaman, S., Marti, M.E., Ahmetli, G., 2021, Application of various carboxylic acids modified walnut shell waste as natural filler for epoxy-based composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 138, e50770.
- Iwuozor, K.O., Emenike, E.C., Ighalo, J.O., Eshiemogie, S., Omuku, P.E., Adeniyi, A.G., 2022, Valorization of sugar industry's by-products: A perspective, *Sugar Technology*, 24, 1052–1078.
- Jantasuto, O., Wiwattanachang, N., 2020, Effects of sugar in calcium carbonate (CaCO₃) sludge on properties of concrete, *ThaiJo*, 14(2), 128-135.
- Jayaraman, R., Viknesh, M., Girimurugan, R., 2023, Experimental investigations on mechanical and water absorption properties of epoxy resin matrix treated sugarcane and tamarind shell powder reinforced bio-composites, *Materials Today: Proceedings*, 74, 636-641.
- Johnson, T., 2018, History of composites. The evolution of lightweight composite materials. <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>

<https://www.opastpublishers.com/journal/journal-of-textile-engineering-and-fashion-technology>

- Joshi, R., Bajpai, P.K., Mukhopadhyay, S., 2024, Effect of reinforcing waste bagasse ash and eggshells as fillers on mechanical and viscoelastic characteristics of areca/epoxy hybrid composites, *Biomass Conversion and Biorefinery*, In Press.
- Kelly, A., Zweben, C., 2000, *Comprehensive Composite Materials*, Pergamon Press, Oxford.
- Keshavanath, P., Gangadhara, B., 2006, Evaluation of sugarcane by-product kúspe as a manure in carp culture, *Bioresource Technology*, 97(4), 628-634.
- Laksameethanasana, P., Somla, N., Janprem, S., Phochuen, N., 2012, Clarification of sugarcane juice for syrup production, *Procedia Engineering*, 32, 141-147.
- Lakshmipathi, R.N., Subramanyam, B., Narotham Prasad, B.D., 2019, Microorganisms, organic matter recycling and plant health, in: Ansari, R.A., Mahmood, I. (Eds), *Plant Health Under Biotic Stress*, vol. 1: Organic Strategies, Springer, Singapore.
- Latif, R., Wakeel, S., Zaman Khan, N., Noor Siddiquee, A., Lal Verma, S., Akhtar Khan, Z., 2019, Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(1), 15-30.
- Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S., 2007, Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review, *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 25-33.
- Madhu, S., Devarajan, Y., Natrayan, L., 2023, Effective utilization of waste sugarcane bagasse filler-reinforced glass fibre epoxy composites on its mechanical properties-waste to sustainable production, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(16), 15111-15118.
- Monteiro, S.N., Candido, V.S., Braga, F.O., Bolzan, L.T., Weber, R.P., Drelich, J.W., 2016, Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor, *European Polymer Journal*, 78, 173-185.
- Munde, D., Sutar, S., Ranveer, M.A.C., 2015, Vermicomposting of kúspe from sugar industry, *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 2(4), 1-10.
- Nawaz, M.Z., Bilal, M., Tariq, A., Iqbal, H.M., Alghamdi, H.A., Cheng, H., 2021, Bio-purification of sugar industry wastewater and production of high-value industrial

- products with a zero-waste concept, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(21), 3537-3554.
- Neşer, G., 2017, Polymer based composites in marine use: History and future trends, *Procedia Engineering*, 194, 19-24.
- Ngo, T.-D., 2020, Composite and Nanocomposite Materials-From Knowledge to Industrial Applications, *IntechOpen*, London.
- Oladele, I.O., Makinde-Isola, B.A., Adediran, A.A., Oladejo, M.O., Owa, A.F., Olayanju, T.M.A., 2020, Mechanical and wear behaviour of pulverised poultry eggshell, sisal fiber hybrid reinforced epoxy composites, *Materials Research Express*, 7(4), 045304.
- Ozmeral, N., Soydal, U., Kocaman, S., Ahmetli, G., 2023, Red mud waste, nanoclay, polystyrene-modified epoxy hybrid composites: Mechanical, thermal, and flammability properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 140(31), e54218.
- Patnaik, P., 2003, Handbook of Inorganic Chemicals, *McGraw-Hill*, NY.
- Patil, C.D., Kadam, R., & Bedis, S.P., 2019, Formulation and evaluation of sugar cane wax based lipstick, *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 3(5), 827-829.
- Raimondi, I.M., Rodrigues, V.G.S., Lima, J.Z., Marques, J.P., Vaz, L.A.A., 2020, The potential use of kűspe as reactive material for Cd²⁺ removal: Adsorption equilibrium, kinetics, desorption, and bioaccessibility, *Water, Air and Soil Pollution*, 231, 1-20.
- Ramratan, K.R., 2020, Chemical treatment for the sodium hydroxide, epoxy resin for produce sugar cane bagasse fibre pulp reinforced epoxy composites material, *Journal of Textile Engineering and Fashion Technology*, 6(1), 22-27.
- Sanchez-Heres, L., Ringsberg, J., Johnson, E., 2019, Effective use of composite marine structures: Reducing weight and acquisition cost, Chapter 6, in: Pemberton, R., Summerscales, J., Graham-Jones, J. (Eds), *Marine Composites*, *Woodhead Publishing*, Cambridge, UK.
- Santos, F., Eichler, P., Machado, G., De Mattia, J., De Souza, G., 2020, By-products of the sugarcane industry, in: Santos, F., De Matos, M., Rabelo, S.C., Eichler, P. (Eds), *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*, *Academic Press*, Cambridge, Massachusetts.

- Sapronova, Z., Sverguzova, S., Fomina, E., Fokina, E., 2018, Carbonate-containing precipitate of sugar production from sugar beet as filler for polymer concrete, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365(3), e032042.
- Sardar, K., Ali, S., Hameed, S., Afzal, S., Fatima, S., Shakoor, M.B., Tauqeer, H.M., 2013, Heavy metals contamination and what are the impacts on living organisms, *Greener Journal of Environmental Management and Public Safety*, 2(4), 172-179.
- Sarmin, S.N., Jawaid, M., Zaki, S.A., Ali, M.R., Fouad, H., Khiari, R., Rahayu, S., Salim, N., 2023, The effect of eggshell fillers on the physical, mechanical, and morphological properties of date palm fibre reinforced bio-epoxy composites, *Journal of Polymers and the Environment*, 31(11), 5015-5027.
- Sogancioglu, M., Yel, E., Ahmetli, G., 2020, Behaviour of waste polypropylene pyrolysis char-based epoxy composite materials, *Environmental Science and Pollution Research*, 27(4), 3871-3884.
- Sharma, N., Hassan, S. S., Ansal, M.D., 2019, Incorporation of kŭspe: A sugar factory byproduct in semi-intensive carp polyculture system and its effect on fish growth and survival, *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 7(4), 192-199.
- Sindhu, R., Gnansounou, E., Binod, P., Pandey, A., 2016, Bioconversion of sugarcane crop residue for value added products: An overview, *Renewable Energy*, 98, 203-215.
- Singh, S.P., Saba, N., Jawaid, M., Siengchin, S., 2021, Sugarcane wastes into commercial products: Processing methods, production optimization and challenges, *Journal of Cleaner Production*, 328, e129453.
- Sivakumar, A.A., Sankarapandian, S., Avudaiappan, S., Flores, E.I.S., 2022, Mechanical behaviour and impact of various fibres embedded with eggshell powder epoxy resin biocomposite, *Materials*, 15(24), e9044.
- Soydal, U., Marti, M.E., Kocaman, S., Ahmetli, G., 2018a, Evaluation of sugar mill lime waste in biobased epoxy composites, *Polymer Composites*, 39(3), 924-935.
- Soydal, U., Kocaman, S., Marti, M.E., Ahmetli, G., 2018b, Study on the reuse of marble and andesite wastes in epoxy-based composites, *Polymer Composites*, 39(9), 3081-3091.
- Turkben, M., Kocaman, S., Ŗzmeral, 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, e116490.
- Kalpakjian, S., Schmid, S.R., Sekar, V., 2013, Manufacturing Engineering and Technology, *Pearson Publications*, Singapore.
- Kashyap, S., Islam, J., Datta, D., 2018, A study of industrial lime sludge waste as filler in hybrid polymeric composites, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377, e012019.
- Kusakli, S., Kocaman, S., Ceyhan, A.A., Ahmetli, G., 2021, Improving the flame retardancy and mechanical properties of epoxy composites using flame retardants with red mud waste, *Journal of Applied Polymer Science*, 138(13), e50106.
- Van der Poel, P., Schiweck, H., Schwartz, T., 1998, Sugar Technology Beet and Cane Sugar Manufacture, *Verlag*, Berlin.
- Van Krevelen, D.W. and Te Nijenhuis, K., 2009, Properties of Polymers, *Elsevier Science*, Amsterdam, Netherlands.
- Vazquez, A., Dominguez, V.A., Kenny, J.M., 1999, Bagasse fiber-polypropylene based composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 12(6), 477-497.
- Williams, J., 2019, The Science and Technology of Composite Materials, *Australian Academy of Science*, Canberra.
- Wiwattanachang, N., Vichalai, C., Giao, P.H., 2023, Influence of calcium carbonate sludge on cement-stabilized subgrade quality as investigated by means of electrical resistivity measurements, *Scientific Reports*, 13(1), e19392.