

T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



UÇUCU KÜL EPOKSİ KOMPOZİTLERİN
HAZIRLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Hatice Hesna TUTAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hatice Hesna TUTAR tarafından hazırlanan “Uçucu Kül Epoksi Kompozitlerin Hazırlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi” adlı tez çalışması **27/3/2018** 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

Başkan

Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ

Danışman

Doç. Dr. Hüseyin DEVECİ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Necdet ŞEN

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 17201036 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.

Hatice Hesna TUTAR

Tarih: 27.09.18

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇUCU KÜL EPOKSİ KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hatice Hesna TUTAR

**Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin DEVECİ

2018, 79 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Hüseyin DEVECİ
Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ
Dr. Öğr. Üyesi Necdet ŞEN**

Bu çalışmada termik santral atığı olan saf uçucu kül epoksi matrisli kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan uçucu kül hem saf haliyle hem de quaterner amonyum tuzlarıyla modifiye edilerek kullanılmıştır. Dolgu maddesinin türü, miktarı ve polietilen glikol (PEG) ilavesinin kompozit malzemelerin fiziko-mekanik ve termal özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Kompozit malzemelerin özellikleri X-ışını kırınım (XRD) analizi, Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) analizi, Termogravimetrik Analizi (TGA), çekme dayanımı, sertlik değeri, korozyon direnci, % adhezyon testi ve su sorpsiyon testi ile belirlenmiştir. Elde edilen ürünlerin analiz sonuçları birbiri ile ve saf epoksi reçinesi ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda çekme dayanımı en yüksek %20 saf uçucu kül ve %20 modifiye uçucu kül içeren kompozit malzemelerde sırasıyla 32,88 MPa ve 41,63 MPa olarak belirlenmiştir. %20 uçucu kül ve %20 modifiye uçucu kül içeren kompozit malzemelere PEG ilavesiyle en yüksek çekme dayanımı %5 uçucu kül ve %5 modifiye uçucu kül içeren kompozit malzemelerde sırasıyla 29,59 MPa ve 22,02 MPa olarak belirlenmiştir. Sertlik değeri en yüksek %20 uçucu kül ve modifiye uçucu kül içeren kompozit malzemelerde 89 Shore D, en düşük ise PEG ilaveli %15 modifiye uçucu kül içeren kompozit malzemede 78 Shore D olarak belirlenmiştir. Kompozit malzemelerin tamamının korozyona karşı dirençli oldukları tespit edilmiştir. Adhezyon test sonuçları ise %100 çıkmıştır. %20 uçucu kül içeren kompozit malzeme ile saf epoksi reçinenin su sorpsiyonu %0,7 çıkmıştır. Dolgu maddesinin modifikasyonu kompozit malzemelerin % su sorpsiyonunun azaldığı görülmüştür. SEM görüntülerinde dolgu maddesi ve PEG'in epoksi reçine içerisinde homojen dağılım göstermemesinden dolayı yüzey görüntüleri pürüzlü olarak görülmüştür. Kompozit malzemeye ilave edilen uçucu kül malzemenin %50 bozunma sıcaklığına kadar azda olsa olumsuz bir etki göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi reçine, kompozit, polimer, uçucu kül

ABSTRACT

MS

PREPARATION OF FLY ASH-EPOXY COMPOSITES AND INVESTIGATION OF PROPERTIES

Hatice Hesna TUTAR

**KONYA TECHNICAL UNIVERSITY GRADUATE EDUCATION
INSTITUTE**

DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING

Advisor: Assos. Doç. Dr. Hüseyin DEVECİ

2018, 79 Pages

Jury

Assos. Doç. Dr. Hüseyin DEVECİ

Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ

Dr. Lecturer Necdet ŞEN

Thermal power plant waste, pure volatile ash was used as filling material at epoxy matrix composite materials in this study. Volatile ash, used at the study was used both as pure case and modified with quaternary ammonium salts. Affect of type, quantity of filling material, adding of polyethylene glycol (PEG) material to physic-mechanic and thermal features of composite materials was examined. Features of composite materials, X-Ray Diffraction (XRD) analysis, Scanned Electron Microscope (SEM) Analysis, Thermo Gravimetric Analysis (TGA), tensile strength, hardness value, and corrosion resistance were determined through adhesion test %, water sorption test. Analysis results of obtained products were compared with each other and pure epoxy resin.

At the end of performed study, highest tensile strength was found at composite materials including 20% pure volatile ash and 20% modified volatile ash respectively 32,88 MPa and 41,63 MPa. With PEG adding to composite materials including 20% pure volatile ash and 20% modified volatile ash, the highest tensile strength was determined as 29,59 MPa and 22,02 MPa at composite materials including 5% pure volatile ash and 5% modified volatile ash. The hardness value was determined as 89 Shore D at composite materials including 20% volatile ash and modified volatile ash; the lowest value was determined as 78 Shore D at composite materials including 15% volatile ash with PEG adding and modified volatile ash. It was determined that all of composite materials were resistant against to corrosion. Adhesion test results were 100%. Water sorption of composite material including 20% volatile ash and pure epoxy resin was found 0,7%. It was seen that % water sorption of composite materials were decreased at modification of filling material. SEM images don't show filling material and homogeny diffusion of PEG in epoxy resin therefore surface images were seen rough. Added volatile ash material into composite material showed negative affect even in the less quantity to 50% disintegration temperature.

Key words: Epoxy resin, composite, polymer, fly ash

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerinden Doç. Dr. Hüseyin DEVECİ yönetiminde hazırlanarak, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Tez çalışmalarım esnasında bilgi, öneri ve yardımlarıyla destek olan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Hüseyin DEVECİ' ye saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Gülcihan GÜZEL KAYA ve Elif YILMAZ' a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi destekleriyle yanımda olan yüksek lisans öğrenimimde de tüm kalbiyle destekleyen bana güvenen değerli annem, babam ve kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmama maddi destek veren Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne, ayrıca çalışmalarımı yapmam için tüm laboratuvar imkanlarını sunan Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümüne ve Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Uygulama Merkezi Müdürlüğüne çok teşekkür ederim.

Hatice Hesna TUTAR
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEME	3
2.1. Matris Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	3
2.1.1. Metal matrisli kompozitler.....	3
2.1.2. Seramik matrisli kompozitler.....	4
2.1.3. Polimer matrisli kompozitler	4
2.1.3.1. Termoplastikler	4
2.1.3.2. Elastomerler	5
2.1.3.3. Termosetler	5
2.1.4. Epoksi reçinesi	5
2.2. Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	10
2.2.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....	10
2.2.2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler.....	11
2.2.3. Tabakalı kompozit malzemeler	12
2.3. Uçucu Kül	12
2.3.1. Uçucu külün sınıflandırılması.....	13
2.3.2. Uçucu külün özellikleri	15
2.3.2.1. Fiziksel özellikleri.....	15
2.3.2.2. Kimyasal özellikleri	16
2.3.2.3. Minerolojik özellikleri.....	17
2.3.2.4. Puzzolanik özellikleri	17
2.3.3. Uçucu küllerin üretilmesi ve taşınması	18
2.3.4. Uçucu küllerin çevresel etkileri	18
2.3.5. Türkiye’deki termik santraller ve özellikleri	19
3. KAYNAK ARAŞTIRMASI	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
4.1. Kullanılan Kimyasallar	31
4.2. Kullanılan Cihazlar	33
4.3. Kompozit Malzemelerin Hazırlanması.....	34
4.3.1. Uçucu kül/epoksi kompozitlerinin hazırlanması.....	34
4.3.2. Modifiye uçucu kül / epoksi kompozitlerinin hazırlanması	35
4.3.3. Polietilen glikol ilaveli uçucu kül / epoksi kompozitlerinin hazırlanması	36

4.3.4. Polietilen glikol ilaveli modifiye uçucu kül / epoksi kompozitlerinin hazırlanması.....	37
4.4. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu	38
4.4.1. Çekme testi.....	38
4.4.2. Sertlik testi	39
4.4.3. Korozyon direnci testi	39
4.4.4. Adhezyon testi.....	39
4.4.5. Su sorpsiyon testi	40
4.4.6. XRD analizi	41
4.4.7. SEM görüntüleri.....	41
4.4.8. TGA analizi.....	41
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR.....	42
5.1. Çekme Testi Sonuçları.....	42
5.2. Sertlik Testi Sonuçları.....	44
5.3. Korozyon Testi Sonuçları	46
5.4. Adhezyon Testi Sonuçları.....	47
5.5. Su Sorpsiyon Testi Sonuçları	48
5.6. XRD Analizi Sonuçları	52
5.7. SEM Görüntü Sonuçları.....	53
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	56
KAYNAKLAR	59
EKLER	63
ÖZGEÇMİŞ.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ρ:	Yoğunluk
E:	Young modülü
ϵ:	Kopmada uzama (%)
σ:	Çekme dayanımı (MPa)
E:	Young modülü (GPa)

Kısaltmalar

BPA:	Bisfenol A
BPF:	Bisfenol F
ER:	Epoksi reçinesi
UK:	Uçucu kül
MUK:	Modifiye uçucu kül
M1:	Modifiye uçucu kül katkılı 1. numune
M2:	Modifiye uçucu kül katkılı 2. numune
M3:	Modifiye uçucu kül katkılı 3. numune
M4:	Modifiye uçucu kül katkılı 4. numune
M5:	Modifiye uçucu kül katkılı 5. numune
PEG:	Polietilen glikol
PEG1:	Polietilen glikol ilaveli 1.numune
PEG2:	Polietilen glikol ilaveli 2.numune
PEG3:	Polietilen glikol ilaveli 3.numune
MPEG1:	Modifiye uçucu kül katkılı polietilen glikol içeren 1.numune
MPEG2:	Modifiye uçucu kül katkılı polietilen glikol içeren 2.numune
MPEG3:	Modifiye uçucu kül katkılı polietilen glikol içeren 3.numune
SEM:	Taramalı elektron mikroskobu
T₅:	%5 ağırlık kaybının görüldüğü sıcaklık
T₁₀:	%10 ağırlık kaybının görüldüğü sıcaklık
T₅₀:	%50 ağırlık kaybının görüldüğü sıcaklık
TGA:	Termogravimetrik analiz
TMAC:	Tetrametil amonyum klorür
XRD:	X-ışını kırınımı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Epoksit fonksiyel grubu	6
Şekil 2.2. Bisfenol A sentez oluşumu	7
Şekil 2.3. Epiklorhidrin bileşiğinin kimyasal yapısı	8
Şekil 2.4. Epoksit ön polimerinin oluşumu	8
Şekil 2.5. Uçucu kül resmi	12
Şekil 2.6. Uçucu külün mikroskopik görüntüsü	13
Şekil 4.1. Epamine PC 17 molekül yapısı	31
Şekil 4.2. Hızlandırıcının molekül yapısı	32
Şekil 4.3. PEG'in molekül yapısı	32
Şekil 4.4. TMAC'nin molekül yapısı	32
Şekil 4.5. Çekme-kopma test sistemi	34
Şekil 4.6. Kompozit malzemenin görünümü	38
Şekil 4.7. Kaplamaların (a) adhezyon testi öncesi (b) adhezyon testi sonrası görüntüsü	40
Şekil 5.1. UK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği	48
Şekil 5.2. MUK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği	49
Şekil 5.3. PEG ilaveli UK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği	50
Şekil 5.4. PEG ilaveli MUK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği	51
Şekil 5.5. XRD grafiği	48
Şekil 5.6. Saf epoksi reçinesinin SEM görüntüsü	53
Şekil 5.7. 5, M5, PEG1 ve MPEG1 kodlu kompozitlerin SEM görüntüleri	53
Şekil 5.8. TGA grafiği	54

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1. ASTM'ye göre uçucu kül sınıfları (ASTM 1998).....	13
Çizelge 2.2. Türkiye'deki Bazı Uçucu Küllerin Kimyasal Kompozisyonları	16
Çizelge 2.3. Türkiye'deki kömürle çalışan termik santraller	20
Çizelge 2.4. Türkiye'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri	20
Çizelge 2.5. Türkiye'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....	21
Çizelge 2.6. Türkiye'deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları.....	21
Çizelge 4.1. Saf epoksi reçinesinin kimyasal özellikleri.....	31
Çizelge 4.2. Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal bileşimi.....	31
Çizelge 4.3. UK / ER kompozit malzemelerinin adlandırılması	35
Çizelge 4.4. MUK / ER kompozit malzemelerinin adlandırılması.....	36
Çizelge 4.5. PEG ilaveli UK / ER kompozit malzemelerinin adlandırılması	37
Çizelge 4.6. PEG ilaveli MUK / ER kompozit malzemelerinin adlandırılması	38
Çizelge 4.7. Kompozit malzemelerin boyutları.....	39
Çizelge 5.1. UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri.....	42
Çizelge 5.2. PEG ilaveli UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri.....	43
Çizelge 5.3. Hazırlanan tüm kompozit malzemelerin sertlik değerleri.....	44
Çizelge 5.4. UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin korozyon testi sonuçları..	46
Çizelge 5.5. PEG ilaveli UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin korozyon testi sonuçları	47
Çizelge 5.6. Saf ER, 5, PEG1, M5, MPEG1 kompozitlerinin termal özellikleri	55

1. GİRİŞ

Günümüzde insanların ihtiyaçlarının artması ve teknolojinin ilerlemesiyle birlikte havacılık, uzay, savunma, otomotiv, enerji, yapı ve inşaat, elektrik-elektronik gibi birçok sanayi kollarında büyük atılımlar gerçekleştirilmiştir. Sürekli olarak yeni ve nitelikli malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Malzeme teknolojisinde de yeni gelişmelere uyum sağlayan üstün özellikli malzemelerin üretilmesi için farklı malzemelerin uygun özellikleri biraraya getirilerek tek bir malzeme toplaması önem kazanmıştır. Son dönemlerde metaller, seramikler ve polimerler gibi geleneksel malzemeler teknolojinin gerekliliklerini yeterince karşılayamamasından dolayı daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretilmesine ihtiyaç doğmuştur. Kompozit malzeme, birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı iki ya da daha fazla bileşenin karışımından oluşan malzemeye denir. Kompozit malzemelerde matris olarak adlandırılan ana faz ile onun içine dağılmış bir takviye fazı bulunur. Matris fazının görevi dolgu maddelerini bir arada tutarak onların malzeme üzerine gelen gerilmelere karşı koymaları için yerleşimlerini sağlamaktır. Takviye malzemesinin görevi ise matris içinde homojen olarak dağılarak matrisin maruz kaldığı gerilmeleri destekleyerek kompozit malzemenin mukavemetini arttırmaktır.

Kompozit malzemelerin üstün özelliklerinden bazıları yüksek dayanım, yüksek rijitlik, yüksek yorulma dayanımı, mükemmel aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve ısı iletkenliği, düşük yoğunluk ve maliyet, şekillendirilebilirlik ve çevre dostu olmalarıdır. Bu avantajlarından dolayı tercih edilmektedirler.

Uçucu kül, termik santrallerde kömürün öğütülüp toz haline getirilerek yakılması sonucu bacadan gazla birlikte çıkan çok küçük boyutlu kül parçacıklarıdır. Termik santrallerden atık olarak çıkan uçucu kül çevreyi olumsuz etkilediğinden dolayı farklı alanlardaki kullanımı araştırılmaktadır. Bunların başında çimento, beton ve tuğla üretiminde katkı maddesi olarak kullanılması gelmektedir. Uçucu külün çeşitli alanlarda kullanılmasıyla çevre kirliliği ve depolama sorunları azaltılarak düşük maliyetli çevre dostu malzemelerin üretilmesi amaçlanmıştır.

Ülkemizin farklı yörelerinde bulunan düşük kömürleşme derecesine sahip kömürler linyit olarak adlandırılmaktadır. Ülkemizdeki linyit rezervi yaklaşık olarak 8,4 milyar ton, taşkömürü rezervi ise 1,1 milyar ton civarındadır. Yaklaşık olarak 3,3 milyar tonluk rezerve sahip düşük ısı değerli linyit yatağı Afşin-Elbistanda bulunmaktadır.

Termik santrallerde düşük ısı değerli kömürlerin yakılması sonucunda önemli ölçüde katı atıklar oluşmaktadır. Amerika ve Avrupa ülkelerinde kömür yakan santrallerde yaklaşık olarak 115 milyon ton katı atık ortaya çıkmaktadır. Dünyada ortaya çıkan uçucu kül miktarının ise yaklaşık olarak yılda 600 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Açığa çıkan katı atıklar çevre sorunlarını meydana getirmektedir. Termik santrallerde yanan kömürlerin yaklaşık %30-50'si küldür. Termik santrallerde 1kWh'lık enerji üretimi sonucunda yaklaşık olarak 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. Bu durumda 1000 MW'lık santralden yaklaşık 650.000 ton katı atık oluşmaktadır. Ülkemizde uçucu kül ve taban külü miktarı yıllık 19 milyon tona ulaştığı bunun da 13 milyon tonunu uçucu külün oluşturduğu Zeyrek (2009) tarafından belirtilmektedir.

Bu çalışmanın amacı ise termik santral atığı olan uçucu külü yeni bir polimer matrisli kompozit malzemelerde kullanarak düşük maliyetli, çevre dostu kompozit malzemeler üretmek ve kullanım alanlarını genişletmektir. Yapılan çalışmada matris olarak epoksi reçine, dolgu maddesi olarak da uçucu kül kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan dolgu maddesi türü, miktarı ve polietilen glikol ilavesinin elde edilen kompozit malzeme üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen epoksi kompozitlerin fiziko-mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEME

Kompozit malzeme makro/mikro/nano ölçüde birbirinden farklı iki ya da daha fazla bileşenin ara yüzey boyunca bir araya gelmesiyle oluşan malzemeye denir. Genellikle kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenler özelliklerini korumaktadırlar. Geleneksel malzemelerin mukavemet, korozyon dayanımı, termal dayanımı, elektrik iletkenliği, görünüş ve maliyet gibi bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla üretilmektedirler. Yapısında matris ana fazı ve ana faz içine dağılmış takviye elemanları bulunmaktadır. Genellikle takviye ve ana malzeme olarak cam, seramik, plastik ve metaller kullanılmaktadır. Takviye elemanlarının kompozit malzemedeki fonksiyonlarını yerine getirmelerinde matris malzemelerinin mekanik özellikleri de önemlidir. Takviye fazı ise matris fazının tane büyüklüğünü kontrol ederek yükleri paylaşarak kuvvete karşı koyar. Matris yapısı ile takviye elemanları arasındaki ara yüzey bağı kırılma özelliği göstermesine rağmen her türlü kuvveti kırılmaya uğramaksızın takviye fazına iletir. Ara yüzey bağının olduğu alan malzemenin elastikiyet modülünü etkileyen en önemli alandır. Bu sebeple kompozit malzemenin dayanıklılığı ara yüzey bağının istenen şekilde olmasına bağlıdır. Kompozit malzemelerin en yaygın sınıflandırılma şekli yapısında bulunan matris ve takviye türüne göre yapılmaktadır (Kaya, 2016).

2.1. Matris Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler kullanım amacı ve üretim tekniğine göre genel olarak metal, seramik ve polimer matrisli malzemelerdir.

2.1.1. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemeler, ana malzemesi metal ve metal alaşımı olan kompozitlerdir. Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, yorulma direnci, düşük termal genleşme katsayısı, aşınma ve korozyon direnci, metal matrisli kompozit malzemelerin metal malzemelere olan üstün özellikleridir. Yöntemin pahalı olması, üretim zorluğu ve geri dönüşümün olmaması da dezavantajlarıdır. Alüminyum alaşımlarının hafif olması, üretim kolaylığı sağlaması ve takviye elemanlarıyla birlikte kullanıldığında mekanik özellikleri iyileştirmesi özelliğinden dolayı otomotiv sektöründe çok fazla kullanılmaktadır (Yakınlar, 2011).

2.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, sermetler olarak adlandırılan ve seramik matris malzemelerinin (Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC) takviye malzemeleriyle oluşturulan üstün ısı özelliklere ve mukavemete sahip malzemelerdir. Yüksek sıcaklık ve aşırı korozyif ortamlarda uygun olmalarının yanında, yük altında gevrek davranış göstermelerinden dolayı kullanım alanları sınırlıdır. Nükleer uygulamalarda, uzay sanayinde, gaz türbünlerinde ve havacılık sanayinde kullanılmaktadır (Korçak, 2005).

2.1.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisler kompozit malzemeler arasında en çok çalışmaya sahip ve en yaygın kullanılan matris türüdür. Hammaddenin ucuz olması ve kolay üretilmesi başlıca sebepleridir. Takviye malzemesi polimer kompozit malzemeye mukavemet ve rijitlik sağlar. Matris malzeme ise korozyon dayanımını arttırarak malzemeye gelen yükü dağıtır ve yapının bütünlüğünü korur. Özellikle polimer matrisli kompozitlerde mukavemet ve takviye malzemesi birbiriyle doğrudan bağlantılıdır (Sönmez, 2009).

Polimer zincir şekilleri polimerlerin özelliklerini etkilemektedir. Polimerler doğrusal, dallanmış veya çapraz bağlı yapılarda olmaktadır. Çapraz bağ oranının fazla olmasıyla ağ yapılı polimer oluşmaktadır. Doğrusal ve dallanmış yapıdaki polimerler eritilebilir ve uygun çözücülerde çözünürler. Ağ yapılı polimerlerde bu durum geçerli olmamaktadır. Polimerlerdeki bu zincirlerin bağlanma şekillerinin farklılığından dolayı polimerler kendi içlerinde termoplastikler, elastomerler ve termosetler olarak üç gruba ayrılmaktadır.

2.1.3.1. Termoplastikler

Termoplastikler günlük hayatta en çok kullanılan polimerler içerisinde yer almaktadırlar. Zincirleri doğrusal veya dallanmış yapıda olabilir, zincirler arasında ise çapraz bağ gözlenmemektedir. Polimer zincirlerini polar etkileşimler, London kuvvetleri ve hidrojen bağları gibi ikincil etkileşimler bir arada tutmaktadır. Termoplastikler ısıtıldıklarında erimekte ve uygun çözücülerde çözünmektedirler. Isı etkisiyle de eritilerek tekrar şekillendirilebilmektedirler. Erime sıcaklıklarının yüksek olmasından dolayı işlenmeleri sırasında erime sıcaklıklarının üzerine çıkılarak ısıtılmaktadırlar. Isı enerjisi mekanik ve fiziksel özelliklerini belli derecelerde etkileyerek zayıflatmaktadır (Aktaş, 2014).

Termoplastik grubunu oluşturan başlıca polimerler; akrilonitril bütadien stiren (ABS), stiren akrilonitril (SAN), akrilikler, selülozikler, floroplastikler (PTFE), sıvı kristal polimerler, naylon (poliamid), polimid, polikarbonat, polietereterketon, polieterimid, poliolefinler (polietilen, polipropilen), polistiren, poli(vinilklorür)lerdir (Demirci, 2009).

2.1.3.2. Elastomerler

Elastomerler, uzun zincirli ve çapraz bağlı yapıya sahiptirler. Küçük gerilme maruziyetlerinde bile büyük oranda elastik deformasyona uğrarlar. Bazıları ise ilk boyutunun %500 ve fazlası kadar uzama göstererek eski boyutlarına geri dönebilirler. Polimer zincirlerinin birbirleriyle zayıf çapraz bağ yapmalarından dolayı yüksek elastik şekil değiştirme kabiliyetine sahiptirler. Kauçuk en iyi bilinen elastomerdir. Yapısındaki çapraz bağların sayısının arttırılmasıyla elastomer daha dayanıklı ve rijit bir hale gelir (Ekşi, 2007).

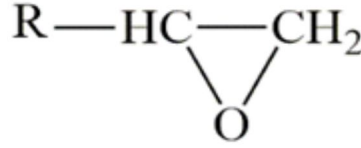
2.1.3.3. Termosetler

Termosetler, ısı işlemleri sonunda verilen şekle göre sertleşerek katılaştıran malzemelerdir. Malzemenin molekül zincirleri arasında kalıcı bağlantı oluşması sonucu geri dönüşümü olmayan işleme “sertleşme işlemi” denilir . Molekül zincirleri arasındaki çapraz bağlanma polimere yüksek rijitlik sağlamaktadır. Termosetler, tekrardan eritilemeyen ve geri dönüşümü olmayan malzemelere denir. Termoplastiklere göre mekanik özellik, kimyasal direnç ve ısı kararlılık yönünden üstünlük göstermektedirler. Bu özelliklerinin yanı sıra kırılma malzemelerdir. Başlıca termosetler epoksi reçinesi, poliüretanlar, vulkanize kauçuk ve bakalittir (Uçar, 2013).

2.1.4. Epoksi reçinesi

Epoksi reçinesi, birden fazla epoksi grubu içeren ve termoset hale gelebilen ön polimerdir. Epoksi reçine sertleştirilmemiş haliyle viskoz sıvı halde veya katı kırılma formda bulunan ve ısıtıldığında tekrar sıvı hale gelen polimerdir.

Şekil 2.1’de epoksit fonksiyonel grubu gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Epoksit fonksiyel grubu (Güzel, 2016).

Kürleşmemiş sıvı haldeki epoksi reçinesi, epoksi içeriği, viskozitesi, rengi, hidroliz olabilen klor ve uçucu madde miktarlarıyla karakterize edilmekte iken katı formda bulunan epoksi reçinesi, katı maddenin erime sıcaklığı, renk ve uçucu madde miktarı ile karakterize edilmektedir. Tek başına epoksi reçineleri kullanılmamaktadır. Epoksi reçineler formülasyon bileşimine katılan farklı maddelerle polimerize olarak veya çapraz bağlanarak farklı özelliklerde termoset yapıda madde meydana getirmektedirler. Kimyasal reaksiyon işlemi sonucunda geri dönüşümü olmayan, sert ve aşağıdaki özelliklere sahip reçine meydana gelmektedir:

- Farklı yüzeylere mükemmel yapışma
- Aşınmaya karşı dayanıklılık
- İyi elektriksel özellikler
- Pişerek sertleşme işlemi sırasında yan ürünlerin oluşmaması
- Pişme sonunda büzülmenin gerçekleşmemesi
- Asit, alkali ve çözücülere karşı dayanıklılık
- Neme karşı dayanıklılık
- Düşük sıcaklıklarda yük altında uzun süre kullanılması

Epoksi reçineyle yapılan yapıştırıcılar, metallere, cam, ahşap ve seramiklere kolayca yapışmaktadırlar. Çok asitli ortam olmadıkça kimyasallara karşı oldukça dayanıklıdırlar (Özenç, 2007).

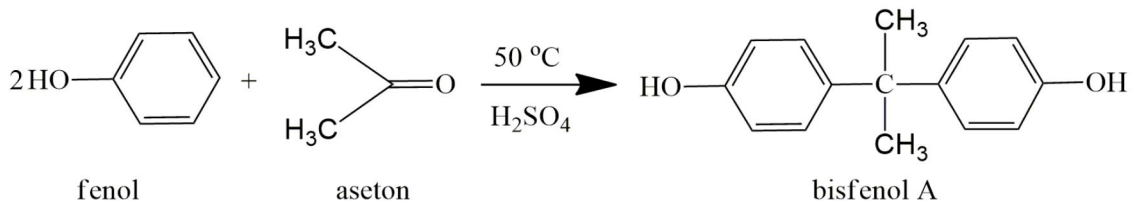
Epoksi reçineler farklı endüstri uygulamalarında yüksek mukavemetleri, iyi ısısal kararlılıkları, pürüzsüz yüzey oluşturmaları ve mükemmel yapışma özelliklerinden dolayı birçok alanda tercih edilmektedir. Ayrıca yüksek kırılgenliklerinin giderilmesi için termoplastik ve kauçukların özelliklerini iyileştirmek için katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır. Diğer reçinelere göre elektriksel ve mekanik özellikleri de mükemmel düzeydedir.

Endüstrideki başlıca kullanım alanları aşağıda verilmiştir:

- İnşaat sektöründe korozyona karşı
- Polimerik harç ve beton üretiminde
- Elektronik sanayinde kaplama malzemesi olarak
- Yapıştırma sektöründe
- Zemin ve yüzey kaplanmasında
- Boya sektöründe
- Elektrik sektöründe
- Otomobil sanayisinde

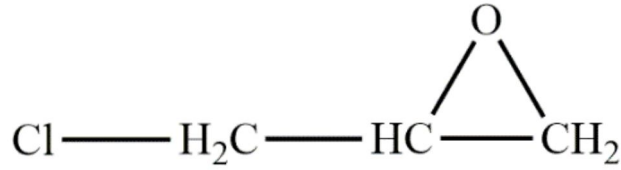
Epoksi reçineler çoğunlukla polihidroksi bileşiklerin epiklorhidrin ile reaksiyonundan sentezlenmekte olup birden çok sentezlenme mekanizmaları bulunmaktadır. Polihidroksi bileşiği olarak genellikle difenil propan (bisfenol A) kullanılır. Bisfenol A'nın mol oranı epiklorhidrine göre yüksek tutularak yüksek molekül ağırlıklı epoksi reçineler sentezlenir. Epoksi reçinesinde bulunan epoksit grubu lineer yapı özelliği gösterirken, hidroksil grupları (-OH) polimer içinde dallanma ve çapraz bağlanma özelliği gösterir (Can, 2008).

Bisfenol A (2,2'-bis(p-hidroksifenil)propan); Şekil 2.2'de gösterildiği gibi H_2SO_4 veya HCl gibi asit katalizörlerinin varlığında aseton ve fenolün reaksiyona girmesiyle sentezlenmektedir (Güzel, 2016).



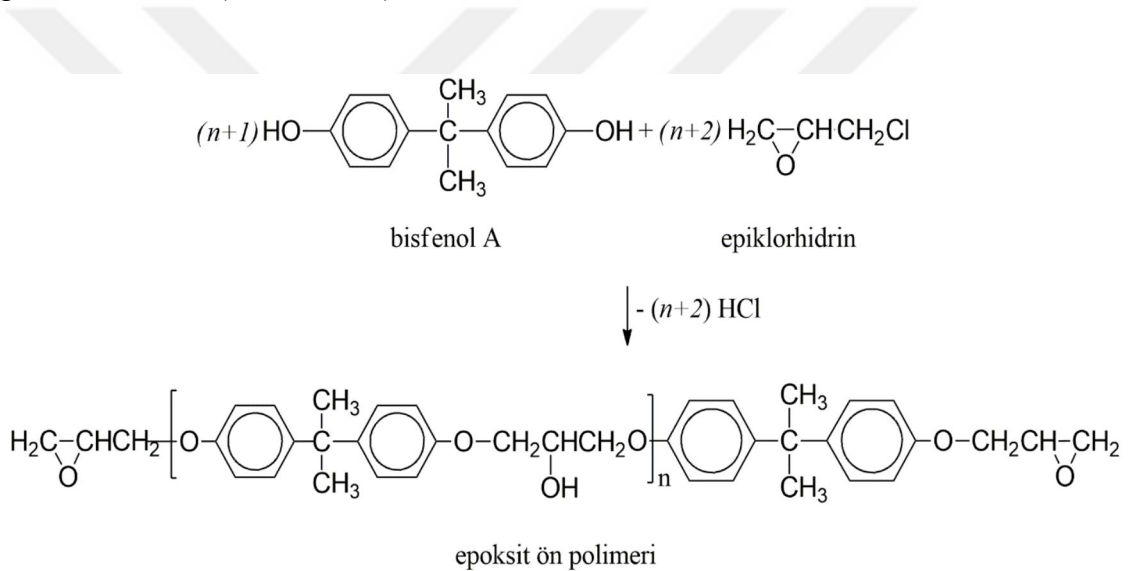
Şekil 2.2.Bisfenol A sentez oluşumu

Kimyasal yapısı Şekil 2.3’de gösterilen epiklorhidrin bileşiği gliserin prosesinin ara ürünüdür ve propilenden sentezlenmektedir.



Şekil 2.3. Epiklorhidrin bileşiğinin kimyasal yapısı

Üretimin başlangıcında bisfenol A epiklorhidrinin fazlası ile tepkimeye girerek düşük mol kütleli ön polimer elde edilir. Şekil 2.4’de epoksit ön polimerinin oluşumu gösterilmektedir (Güzel, 2016).



Şekil 2.4. Epoksit ön polimerinin oluşumu

Epoksi reçinenin yapısındaki hidroksil ve epoksit grupları sertleşme ajanlarıyla reaksiyon verirler. Polimer zincirinin dayanıklılığını kararlı halde karbon-karbon, karbon-oksijen, karbon-azot bağları oluşturarak arttırmaktadırlar. Kararlı bağ, reçinenin kimyasal ve çözücü dayanımını mükemmel göstermesini sağlayarak fiziksel özelliklerini arttırmaktadır. Çapraz bağın oluşumunu sağlayan epoksi reçine ile reaksiyona girecek aktif grupların doğru seçilmesi, reçine film özelliklerini ve performansını yükselterek çeşitli yerlerde kullanılmalarını sağlamaktadır.

Asit anhidrit (ftalik anhidrit) ile gerçekleşen reaksiyonda epoksi reçineleri sertleştirmek için asit anhidrit veya karboksil fonksiyonlu sertleştiriciler kullanılır. Reaksiyon üç basamakta gerçekleşir. Birinci basamakta asit anhidritin anhidrit halkasını açmak için, anhidrit kökü ile epoksi reçinesindeki hidroksil grupları reaksiyona girerek mono esterleri oluştururlar. İkinci basamakta oluşan karboksil grupları, hidroksi di esterleri oluşturmak için epoksi grupları ile tekrar reaksiyona girer ve en son basamakta oluşan hidroksil grubu, başka bir asit anhidrit grubu ile reaksiyon gerçekleştirerek epoksinin kürleşmesi sağlanmış olur. Epoksi esterleri ile asit anhidrit arasındaki reaksiyon, katalizör ilavesi olmadığı durumda reaksiyon çok yavaş gerçekleşir.

Metilol ve metilol eter grupları ile reaksiyon işleminde metilol ve metilol eter gruplarını içeren reçineler, epoksi reçinelerin hidroksil ve epoksit grupları ile reaksiyon gerçekleştirirler. Bu nedenle epoksi reçineler, amino ve fenol formaldehit reçineler ile reaksiyona girerek performansları çok yüksek ürünler meydana getirirler. Bu reaksiyon asidik katalizör eşliğinde veya 100 °C'ın üzerinde ısı verilerek gerçekleştirilir. Amino ve fenol formaldehit reçineleri ısı ile kendiliğinden reaksiyon gerçekleştirirler. Epoksi reçine ile oluşturdukları filmin çapraz bağ yoğunluğu çok fazla artar. Epoksi reçineler oda sıcaklığında fenolik reçineler ve amino ile çok yavaş reaksiyon gerçekleştirmelerinden dolayı genellikle tek bileşenli epoksi sistemlerinde kullanılmaktadırlar.

Primer ve sekonder aminler ile gerçekleşen reaksiyon işleminde de primer alifatik aminler, epoksi reçineler ile oda sıcaklığında reaksiyon vermektedirler. Aminler epoksi reçine molekülündeki epoksit grupları arasında tersiyer bağ oluşumunu sağlamak için iki epoksit grubu ile reaksiyona gerçekleştirmektedirler. Reaksiyon sonunda, sonrasında çapraz bağların oluşumunu sağlayacak hidroksil (-OH) grupları meydana gelmektedir. Polimer zincirinde oluşan hidroksil grupları daha sonra reaksiyona girmektedirler. Ortamdaki sekonder ve primer aminlerin varlığı, epoksit grupları ile hidroksil grupları arasındaki reaksiyonu durdurmaktadır. Ortamda sekonder ve primer amin kaldığında tersiyer amin katalizör gibi davranarak hidroksil grupları ile epoksit grupları arasındaki reaksiyonu başlatmaktadır. Bu sebeple epoksi reçinelerin sertleştirilmesi iki aşamadan oluşmaktadır. İkinci aşamada çapraz bağların oluşması filmin performansını daha da arttırır. Her bir primer amin, epoksi reçinesine göre difonksiyoneldir. Etilen diamin gibi primer diaminler kullanıldığında epoksi reçinesi çok fazla çapraz bağ içeren yapıya sahip olur. Primer alifatik aminler sertleştirici olarak kullanıldığı zaman buharlaşma özelliklerinden dolayı epoksi reçinedeki işlevini

yapamadan ortamdan uzaklaşırlar ve bu nedenle tercih edilmemektedirler. Bunun yerine daha yüksek molekül ağırlıklı poliamin ve poliamid gibi sertleştiriciler kullanılmaktadır. Buharlaşma hızlarının düşük olmalarından dolayı işlevlerini tam olarak yerine getirirler ve oluşan filmin de performansı yükselir. Genellikle iki komponentli sistemlerde, poliaminlerin dimer asit ile oluşturdukları ürünler sertleştirici olarak kullanılmaktadır.

Epoksi reçinelerde sertleştirici ajan olarak poliamin, poliamino-amid, poliamid gibi alifatik bileşikler kullanılmaktadır. Alifatik aminler aromatik aminlerden daha reaktiftirler. Aromatik aminler epoksi reçine ile 200 °C'da reaksiyona girerek sertleşirler. Bu nedenle oda sıcaklığında epoksi reçine ile reaksiyona girmeyeceğinden tek komponentli epoksi reçinelerin hazırlanmasında kullanılmaktadır.

Epoksi reçinelerin sertleştirme yöntemleri ise oda sıcaklığında sertleşme, ısı ile sertleşme ve elektromanyetik ışıma (mikro dalga yayını) ile sertleştirir. Termal kürleşme yaygın olarak kullanılan güvenli bir yöntemdir. Ancak viskozitesi yüksek reçinelerde uzun kürleşme zamanına ve yüksek sertleşme ısılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Daha uzun raf ömrüne sahiptirler. Elektromanyetik ışıma ise mikrodalga frekans aralığı, ısıyı doğrudan numunenin içerisinde oluşturmaktadır. Böylelikle kür edilme hızlanarak çapraz bağlı moleküler yapı oluşturarak düşük kür edilme ısılarına ihtiyaç duyulur. Böylelikle yüksek verimlilik ve düşük maliyetle daha hızlı ürün elde edilmektedir. Aynı zamanda daha iyi üniform yapıda kür ve geliştirilmiş fiziksel ve mekanik özellikler sağlamaktadır (Can, 2008).

2.2. Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler takviye türüne göre üç ana gruba ayrılmaktadırlar. Bunlar;

1. Elyaf takviyeli kompozitler
2. Parçacık takviyeli kompozitler
3. Tabakalı kompozitler

2.2.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, elastisite modülü ve dayanımı düşük matris malzemenin içine yüksek rijitlik ve büzülmezlik değerlerine sahip elyafların ilave edilmesiyle oluşturulmaktadır. Elyafların matrise ilave edilmesiyle kompozit malzemelerin çekme ve yorulma dayanımı, rijitlik ve büzülmezlik özelliklerinde olumlu artış

gözlenmektedir. Elyaf yoğunluğu kompozit malzemenin özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzeme yüke maruz kaldığında matris malzemesi yükü takviye malzemesine ileterek yükün büyük bir kısmının takviye malzemesi tarafından karşılanması sağlamış olmaktadır. Elyaf malzemeler, kompozit malzemenin çalışma sıcaklığında da iyileştirme sağlamaktadır. Elyafların malzeme içerisinde yönlendirmeleri kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Elyaf lar örme, şerit, fitil ve tabakalar halinde kullanılmaktadır. Mekanik özelliklerinde gelişme göstermesiyle en çok kullanılan kompozit malzemeler, elyaf takviyeli olanlardır. Elyaf lar sürekli veya süreksiz olmaktadır. Cam, karbon, aramid, bor, SiC, Al₂O₃ ve metal malzemeler elyaf olarak kullanılmaktadır. En çok kullanılanlar cam, aramid ve karbon elyaf larıdır.

Cam elyaf lar en çok polimer kompozitlerde kullanılmaktadır. Termoset reçinelerle birlikte kullanılan takviye liflerinin 2/3'ünden fazlasını cam elyaf lar oluşturmaktadır. Cam elyaf ların erime noktası yaklaşık olarak 840 °C'dır. Silika cam elyaf ın ana maddesidir. Elyaf içinde SiO₂ şeklinde bulunur. Cam elyaf lar çok fazla ve kolay bulunmalarının yanında aramid ve karbon elyaf larına göre oldukça da ucuzdurlar. En çok kullanılan 3 tür vardır. Bunlar E-cam, C cam, S-cam ve S2-cam'dır.

E tipi cam en iyi mekanik özelliklere ve ısı dirence sahip olmasından dolayı birçok sanayi alanında en çok kullanılmaktadır.

C camları kimyasal korozyona karşı oldukça direnç göstermektedirler. Mekanik özellikleri E camına göre daha kötü ve maliyeti de yüksektir.

S camı, E ve C camından daha yüksek maliyetli olmasına rağmen çok daha yüksek elastik modül ve mukavemet özelliğine sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda bile mukavemetini korumaktadır.

2.2.2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Parçacık takviyeli kompozitler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküller ile sıfır boyutlu kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemelerdir. Parçacık boyutu 1µm'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'ten fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılanlar Al₂O₃ ve SiC'den oluşan seramiklerdir.

Kompozitin dayanımı matrisin özelliklerine, parçacıkların özelliklerine, büyüklüğüne, dağılımına ve parçacıklar arası uzaklığa bağlı olarak değişmektedir.

2.2.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Temel malzeme eksenleri doğrultusunda yönlendirilmiş elyaf ve diğer takviye malzemeleri ilave edilmiş, değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konulmasıyla meydana gelen kompozitlerdir. Matris malzemesi içerisinde rastgele, tek yönde ve farklı yönlerde yönlendirilmiş elyaf tabakalarından oluşmaktadırlar (Uluşen, 2008).

2.3. Uçucu Kül

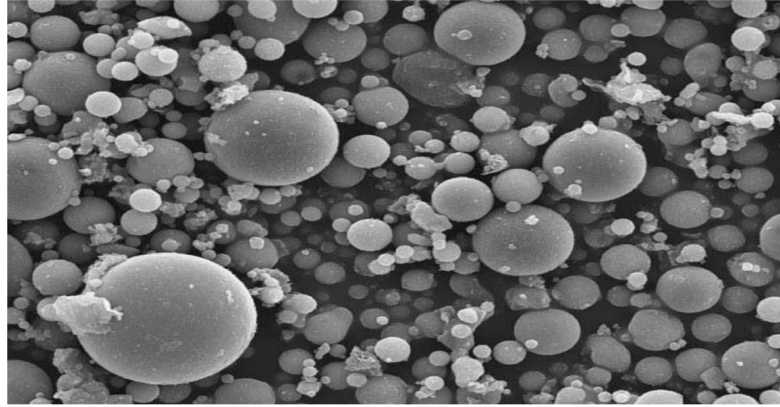
Endüstride yakıt olarak kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin, toz haline getirilip yakılması sonucu baca gazlarıyla birlikte sürüklenen çok ince kül parçacıklarına “uçucu kül” denir. Bacanın üst kısmında elektrofiltre veya siklon adı verilen toz tutucularla tutularak tutucuların alt kısmında bulunan bunkerlerde depolanır ve belli periyotlarda santral dışına alınırlar. Baca gazlarıyla sürüklenip hava ile temas ederek ani soğuma ile puzzolanik özellik kazanmaktadırlar. Yaklaşık olarak boyutları 1-100 μm arasında olup küresel tanecikli yapıya sahiptirler (Özdemir, 2007).

Şekil 2.5’de saf haldeki uçucu kül gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Uçucu kül resmi (Ünver, 2015)

Şekil 2.6’da saf uçucu külün mikroskobik görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Uçucu külün mikroskobik görüntüsü (Ünver, 2015)

2.3.1. Uçucu külün sınıflandırılması

Uçucu küldə başlıca SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO gibi bileşenler bulunmaktadır. Bu bileşenlerin miktarları uçucu külün tipine göre değişkenlik göstermektedir. MgO , SO_3 gibi minör bileşenler de yer almaktadır. Ayrıca C (çok ince taneli yanmamış kömür) de bulunmaktadır.

Uçucu küllerin birçok ülke standardında sınıflandırılmaları mevcuttur. ASTM C 618 standardında uçucu küller F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma aşağıdaki Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Yapısında %10’dan daha az CaO bulunan küllere ‘düşük kireçli uçucu küller’, %10’dan daha fazla CaO bulunanlara ise ‘yüksek kireçli uçucu küller’ denilerek adlandırma yapılmıştır.

ASTM C 618 (ASTM, 2003) ve TS EN 197-1 standartlarına göre yapılan sınıflandırmada uçucu küllerin kimyasal bileşen yüzdesi esas olarak alınmaktadır.

Çizelge 2.1. ASTM’ye göre uçucu kül sınıfları (Kozak, 2010)

Sınıfı	Tanımı
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \% 70$; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilir ve puzzolanik özelliğe sahiptir.
C	$\% 70 > \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \% 50$; linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilir ve puzzolanik özelliğinin yanında kendiliğinden bağlayıcılık özelliğine de sahiptir.

F sınıfı uçucu küller CaO oranı %10'un altında olduğu için 'düşük kireçli uçucu kül', C sınıfı uçucu küller ise CaO oranı %10'dan fazla olduğu için 'yüksek kireçli uçucu kül' olarak da adlandırma yapılmıştır.

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada ise uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

V sınıfı uçucu küller: Puzzolanik özelliklere sahip ince toz halinde küresel taneciklerden oluşan toz halinde, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içerir geriye kalan kısmı ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenlerden oluşan küllerdir. Reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının ise %25'den fazla olması gerekmektedir.

W sınıfı uçucu küller: Hidrolik ve/veya puzzolanik özellikte ince toz halinde, esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 içerir, geriye kalan kısmı ise Fe_2O_3 ve diğer bileşenlerden oluşan küllerdir. Reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının ise %25'den fazla olması gerekmektedir.

Uçucu küller yapısındaki SO_3 ve kireç miktarına göre üç gruba ayrılırlar.

Siliko alüminalı uçucu kül: Esas yapı itibarıyla siliko alüminatlardan oluşan, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı %70'in üstünde olan ve genellikle taş kömüründen elde edilen uçucu küle denir.

Siliko kalsik uçucu kül: Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamının %50 ile %70 arasında olan yüksek miktarda kireç ve silika içeren uçucu küle denir.

Sülfo kalsik uçucu kül: Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamının %50'nin üzerinde olan diğerlerine göre daha fazla miktarda SO_3 ve CaO içeren uçucu küllere denir (Kozak, 2010).

Siliko alüminalı uçucu küller F sınıfında yer almaktadır. Siliko kalsik uçucu küllerin bazıları F sınıfına bazıları da C sınıfı uçucu küller sınıfında yer almaktadır.

Uçucu küller elde edildikleri kömürün türüne göre linyit uçucu külü ve taş kömürü uçucu külü olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Linyit uçucu külü: Uçucu maddesi fazla olan genellikle esmer renkte bulunan küle denir. Su absorpsiyonu, yoğunluk ve spesifik yüzey etkili fiziksel özellikleridir.

Taş kömürü uçucu külü: 200 μ elekten %16-20 oranında 3-1000 mikron inceliğinde kalacak şekilde tamamen kuru halde elde edilmektedir (Ünver, 2015).

2.3.2.Uçucu külün özellikleri

2.3.2.1. Fiziksel özellikleri

Tanecik şekli ve boyutu: Genellikle katı halde, boşluklu ve küresel şekle sahip taneciklerdir. Boşluklu taneciklere cenosphere denilir ve %5 ile %20 arasındadır. Boyutları ise 1 ile 150 μm arasında değişir. 45 μ elekten %75'ten fazlası geçmektedir.

İncelik: Uçucu külün inceliği puzzolanik aktivitesini ve taze betonun işlenebilirliğini etkilemektedir.

Yoğunluk: Uçucu külün yoğunluğu ise 2,1 ile 2,7 gr/cm^3 arasındadır. Yoğunluğun yüksek olması uçucu külün inceliği ile bağlantılıdır. İnce küller daha fazla yoğundurlar.

Renk: Uçucu küller değişik renklerde olmakla birlikte genellikle gri renktedirler. Renk, kullanılan fırınların işletilmesine ve kömürün kalitesine bağlıdır. Uçucu külün içerisindeki yanmamış karbon oranının artması rengin koyulaşmasına neden olmaktadır. Bunun yanında demiroksit de uçucu külün rengini etkiler. Yüksek demiroksit içeriğine sahip uçucu küller siyaha yakın renktedirler.

Dayanım aktivite indisi: Uçucu külün puzzolanik reaksiyon ve dayanım kapasitesini gösterir. Dayanım aktivite indisi ASTM C 311'e göre belirlenmektedir. Bu değer 28 günde %75'ten daha az olmamalıdır.

Su ihtiyacı: Uçucu külün su ihtiyacı inceliğinden etkilenmektedir. Çok ince küllerle yapılan çimento hamurunun su ihtiyacı kaba küllerle yapılan çimento hamurunun su ihtiyacından oldukça fazladır.

Genleşme: Uçucu küllerde hacim genişlemeleri ve büzülme istenmeyen özelliklerdir. ASTM C 618 (1994) de hacim genişlemesi ve büzülme yüzdesini 0,8 olarak sınırlandırmış ve deneylerde ise ASTM C 311 (1994)'e göre yapılmasının gerektiğini belirtmiştir.

Üniformluluk (Homojenlilik): Uçucu kül taneciklerinin boyutları ve dağılımı belli bir üniforma sahip olması gerektiğinden dolayı yoğunluğun belirlenmesi ile kontrol edilmektedir.

2.3.2.2. Kimyasal özellikleri

Uçucu külün %85'ten fazlası SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO , geri kalanı ise düşük oranlarda MgO , SO_3 ve alkalilerden oluşmaktadır. Uçucu külün bazı yanmamış karbon partikülleri de önemli bir bileşenini oluşturur. Çizelge 2.2'de kimyasal bileşenlerin yüzdelерinin sınır değerleri gösterilmektedir.

Uçucu külün kimyasal bileşeni kömürün türüne ve kömür içinde bulunan yanıcı olmayan maddelerin miktarına, yanmanın etkisine ve sürekliliğine bağlıdır. Genellikle linyit kömürünün yanmasıyla elde edilen külün CaO bileşeni fazla iken taşkömürünün yanmasıyla elde edilen külün Fe_2O_3 bileşeni fazladır. Linyitten elde edilen uçucu külün ise yanmamış karbon içeriği çok az miktardadır (Öksüz, 2006).

Türkiye'de elde edilen bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri TS 639 ve ASTM C 618 sınır değerleri ile birlikte aşağıda Çizelge 2.2'de gösterilmektedir. Afşin-Elbistan uçucu külü dışında diğerlerinin genel olarak TS 639'da belirtilen sınır değerlere uyduğu, ASTM C 618'e göre Afşin-Elbistan uçucu külünün C sınıfı diğerlerinin F sınıfı olduğu görülmektedir (Şahin, 2010).

Çizelge 2.2. Türkiye'deki Bazı Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşimleri (Şahin, 2010)

Bileşim (%)	Afşin-Elbistan	Seyitömer	Çatalağzı	Tunçbilek	Çayırhan	TS639 sınırları	ASTMC 618 sınırları	
							F	C
SiO_2	27.4	56.9	56.8	58.59	49.13	-	-	-
Al_2O_3	12.8	17.25	24.1	21.89	15.04	-	-	-
Fe_2O_3	5.5	10.63	6.8	9.31	8.25	-	-	-
S+A+F	45.7	84.78	87.7	89.79	72.42	>70	>70	>50
CaO	47.0	4.32	1.4	4.43	13.2	-	-	-
MgO	2.5	5.14	2.4	1.41	4.76	<5	<5	<5
Na_2O	(N+K) 0.3	0.31	(N+K) 3.0	0.24	2.2	-	<1.5	
K_2O	-	1.55	-	1.81	1.76	-	-	-
SO_3	6.2	2.40	2.9	0.41	3.84	<5	<5	<5
Kız.Kay.	2.4	1.5	0.6	1.39	0.72	<10	<12	<6

2.3.2.3. Minerolojik özellikleri

Uçucu küllerin reaktivitesi minerolojik yapıları ile ilgidir. Düşük kireçli uçucu küllerdeki camı faz miktarı, yüksek kireçli uçucu küllerden daha fazla bulunmaktadır. Düşük kireçli uçucu küllerde mineral faz olarak, camı faz, mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_2O_4), kuvars (SiO_2) bileşenleri bulunmaktadır. Yüksek kireçli uçucu küllerde ise ek olarak serbest kireç (CaO), anhidrit (CaSO_4), trikalsiyum alüminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), plajiyoklaz, gehlenit ve feldispat gibi kalsiyum silikatlar bulunmaktadır.

Uçucu küller gözenekli veya dolu camı küresel tanecikler ile yanmamış mineralleri içeren süngerimsi ve köşeli aglomere tanelerden meydana gelmiştir. Uçucu küllerde en çok bulunan mineraller silikat (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), kalsit (CaCO_3) ve gipsittir (anhidrit(CaSO_4)).

Minerolojik analizlerde uçucu kül içerisindeki silisyumun kuvars kristal, alüminat ile birleşip mullit ve camı yapıda olduğu görülmüştür. Uçucu küllerin %66-88'i camı yapıdadır. %70-88'i Al_2O_3 ve SiO_2 camı bileşiklerden, geri kalanı ise demir, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve titanyum gibi elementlerden meydana gelmiştir (Kaya, 2010).

2.3.2.4. Puzzolanik özellikleri

Siliko alüminöz uçucu külün kireç ile sulu ortamda reaksiyona girme özelliğine “puzzolanik özellik” denir. Kireç-uçucu kül-su belli oranlarda birleşerek belirli bir zaman sonra su altında dayanım kazanırlar. Uçucu külün kireç olmadan bağlayıcı özelliği olamamaktadır. Puzzolanik özellik çok yavaş ortaya çıkmaktadır. Oda sıcaklığında kül-kireç-kum karışımı 2-3 gün süre sonunda belirli mekanik dayanıma ulaşmaktadırlar. Fakat aynı şartlarda kireç- kum karışımı sıfır dayanım göstermektedir.

Uçucu kül varlığında ise belli dayanım sağlamak için belli sürelerde beklemek gerekmektedir. Uçucu külün sıcaklığı ve inceliği reaksiyon hızına pozitif yönde etki etmektedir. Beton yapımında çimento yerine uçucu kül kullanıldığında yüksek mukavemet elde edilerek hidrolik yapılarda faydalanılmaktadır.

Uçucu kül kullanmadan önce fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanında puzzolanik özelliğini de tespit etmek için TS 639'a uygun olarak puzzolanik aktivite deneyi yapılmalıdır. Bu aktivite çimento ve uçucu küle harç dökülerek tayin edilmektedir. Uçucu külün puzzolanik özelliğinin var olması için uçucu küllü karışımının yalnız

çimento ile yapılan karışımının verdiği dayanımın en az %70'ini göstermesi gerekmektedir.

2.3.3. Uçucu küllerin üretilmesi ve taşınması

Uçucu külün tam süspansiyon halinde taşınması için kompresörlü yüksek basınç sistemleri gerekmektedir. Bu sistemlerin pahalı olmasından dolayı uçucu kül alçak basınçlı hava ile kabartılarak pompalanması geliştirilmiştir. Düşük yoğunluğa sahip olmalarından dolayı depolanmasında güçlükler çekilmektedir. Depolanan kül sıkıştırarak toplanmaktadır. Bu nedenle depolarda akmaya yardımcı yöntemler kullanılmalıdır. Çimento sistemlerindeki gibi boşaltma sistemleri de bulunmalıdır. Külün ticari olarak kullanılması için kuru olarak elde edilmesi gerekmektedir. Santrallerin yakınına büyük tüketim merkezlerinin bulunması durumunda uçucu kül pnömatik olarak taşınabilmektedir. Uzak tüketim yerlerine kara ve demiryolu aracılığıyla özel tankerlerle, küçük tüketim alanlarına ise torbalama yoluyla taşınmaktadır.

Türkiye'deki termik santrallerden oldukça büyük oranlarda uçucu kül elde edilmekte ve yeni kurulmakta olanlarla ise bu değerlerin daha artacağı düşünülmektedir (Öksüz, 2006).

2.3.4. Uçucu küllerin çevresel etkileri

Kömürün yanması sonucu açığa çıkan As, Cd, Ga, Ge, Pb, Sb, Se, Sn, Mo, Ti ve Zn gibi iz elementler atıklara (cüruf, uçucu kül ve gaz) transfer olmaktadır. Uçucu küller, kil yapısı, yüksek yüzey alanı/hacim ve yüksek ısıya sahip olduklarından sıvı ve gaz ortamlarında, elementlerin yüzeylerinde tutabileceği uygun ortamlar oluşturmaktadırlar. Uçucu küllerin bertaraf edilme yöntemlerinde küllerin su ile teması söz konusu olmaktadır. Çeşitli kül liçi deneysel çalışmalarına göre, uçucu küllerde bulunan toksik eser elementler, külün suyla temas etmesi sonucu suya geçmektedirler. Uçucu küller toprak örtüsü yüzeyinin ve yer altı sularının kirlenmesinin yanında atmosfere karışan 10 µm'den küçük uçucu kül parçacıklarının insanların solunum sistemine ulaşarak sağlık açısından tehdit edici sonuçlar doğurmuşlardır.

Birden çok toksik element içeren uçucu küller güvenli yöntemlerle yok edilmektedir. Yanma artığı olan bu küller genelde geniş hacimli havuzlar veya düzenli depolama sahalarında yok edilmektedir.

Döküm alanlarındaki atıkların yeryüzünü etkilemesi, toprak, doğal direnaj konturlarının bozulmasına ve sonucunda toprak erozyonu, seller ve kara parçalarının çökmesi şeklinde gerçekleşirken, sulu ortamların etkilenmesiyle yeraltı ve yerüstü sularının kalitelerinin de düşmesine neden olmaktadır. Atmosferin etkilenmesi ise, partikül ve gaz yayılmaları nedeniyle hava kalitesinin düşmesine ve iklimin değişmesine neden olmaktadır. Hava, kara ve su kirliliği canlıları, yaşadıkları ortamı etkileyerek ekosistemlerin değişmesine ve yok olmasına, yiyecek kaynaklarının zarar görmesine ve çevresel değişimlere neden olmaktadır.

Kömürle çalışan termik santrallerin deniz kenarında işletilmeleri halinde, NaCl içerikli deniz sularının santralden çıkan dumanla teması sonucunda HCl meydana gelmektedir. Asit depolanmasının ormanların ve ekosistemlerin bozulmasına yol açmaktadır (Kantürk, 2006).

2.3.5. Türkiye’deki termik santraller ve özellikleri

Elektrik enerjisi, hidroelektrik enerjisi sağlayan barajlar ile yakıt olarak pulverize kömürün kullanıldığı termik santrallerden karşılanmaktadır. Türkiye’deki toplam elektrik enerjisinin yarıdan fazlası termik santrallerden sağlanmaktadır. Yaşanan elektrik krizleri, endüstrinin gelişmesiyle birlikte artan elektrik ihtiyacı Türkiye’deki yeni enerji santrallerine ihtiyaç olduğunu ortaya çıkarmıştır. Türkiye hidroelektrik potansiyel yönünden Norveç’den sonra Avrupada ikinci sırada yer almıştır ancak bir kısmı değerlendirilebilmektedir. Hidroelektrik santrallerinin yapımının uzun sürmesi ve maliyetli olmasına karşılık, termik santraller çok daha kısa sürelerde inşaa edilmektedirler. Türkiye’de elektrik enerjisinin yarısı 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürünün termik santrallerde yakılması sonucu 15 milyon ton/yıl uçucu kül elde edilmektedir.

Ülkemizde yaygın olarak linyit yatakları yer almakta ve linyit rezervinin yarısına yakın kısmı Kahramanmaraş-Elbistan yöresinde bulunmaktadır. Linyitin Türkiye’nin enerji üretimindeki payı 1975’de %9,5 iken, 1985’de %19,1’e çıkmıştır. Ülkemizdeki linyit düşük kalite ve yüksek kül oranına sahiptir. Son yıllarda da yapılan termik santrallerden düşük kaliteli kömürlerin değerlendirilmesi yönünde çalışmalar yapılmaktadır.

Türkiye’de kömürle çalışan termik santraller Çizelge 2.3’de gösterilmektedir. Bu termik santrallerde açığa çıkan küllerin kimyasal bileşimleri Çizelge 2.4’de, fiziksel özellikleri Çizelge 2.5’de, minerolojik özellikleri ise Çizelge 2.6’da gösterilmektedir (Kaya, 2010).

Çizelge 2.3. Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller (Kaya, 2010)

	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç(MW)	Bulunduğu il
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-İskenderun	İthal kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Çizelge 2.4. Türkiye’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Kaya, 2010)

Uçucu Kül Oksit(%)	Çatalağzı	Soma B	Orhaneli	Yatağan	TS639 Limitleri	ASTM C 618	
						F	C
SiO ₂	56,8	39,8	48,8	51,2	-	-	-
Al ₂ O ₃	24,1	22,3	19,6	22,9	-	-	-
Fe ₂ O ₃	6,8	4,4	6,5	7,8	-	-	-
Si+Al+F	87,7	66,5	68,4	81,9	>70	>70	>50
CaO	1,4	25,4	10,1	13	-	-	-
MgO	2,4	1,9	4	2,8	<5	<5	<5
SO ₃	2,9	4,8	4,2	0,3	<5	<5	<5
Alkali	3	0,4	1,7	2,9	-	-	<1,5
Ti	1,1	0,6		0,9	-	-	-
Kız.Kaybı	0,6	0,4		0,4	<10	<12	<6

Çizelge 2.5. Türkiye’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Kaya, 2010)

Özellik		Afşin Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
İncelik (%)	200µm elek 90µm elek	3,30 14,9	2,7 11,5	1,0 3,0	3,0 19,0	4,5 13,5	1,9 12,8
Özgül ağırlık kN/m ³		26,3	19,7	24,6	24,2	19,9	21,5
Su ihtiyacı (% kontrol)		111,8	102,7	112,4	110,0	104,2	106,5

Çizelge 2.6. Türkiye’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin mineralojik kompozisyonları (Kaya, 2010)

Mineral (%)	Uçucu Kül					
	Afşin Elbistan	Çatalağzı	Seyitömer	Soma-B	Tunçbilek	Yatağan
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuvartz	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Serbest CaO	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Plajiyoklaz	~28	-	~15	~20	-	~25
Camsı ve amorf faz	~30	~70	~50	~50	~70	~35

3. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Uçucu kül ve polipropilen atıklarını kullanarak üretilen yeni yapı malzemesinin ısı iletim özelliği ve yalıtım malzeme olarak kullanılabilirliği üzerine Yıldız (1998) çalışma yapmıştır. Çalışmasında $>75.10^{-6}$ m çaplı numunelerde kullanılan küllerin içi boş ve gözeneklilik oranlarının fazla olmasından dolayı ısı iletim katsayıları daha küçük bulunmuştur. Afşin Elbistan Termik santral uçucu küllü numunelerin ısı iletim katsayısı 0.338 W/mK, Soma Termik santralinden elde edilen uçucu küllü numunelerin ısı iletim katsayısı ise 0.333 W/mK olarak ölçülmüştür. Polipropilen ile uçucu kül kombinasyonlarında ise kül oranının artmasıyla ısı iletim katsayısının düştüğü söylenmektedir. Numunelerin su emme oranı ise %4-%10 arasında değiştiği, TSE 704 ve 705’de verilen %30’luk üst limit değerinden düşük çıkmasından dolayı 0 °C’ın altındaki sıcaklıklarda su ile direk temasın olduğu yerlerde kullanılabileceği görülmüştür.

Orhaneli uçucu külünün geoteknik özelliklerini ve uçucu kül-çimento-köpük karışımının dolgu maddesi olarak kullanımı yönünde Haşal (2000) araştırma yapmıştır. C sınıfı Orhaneli uçucu külünün kireç ve çimento ile stabilizasyona gerek olmadan bağlayıcılık özellik gösterdiğini ve yapısındaki yüksek CaO bulunmasının, uçucu külün hidrolik bağlayıcılığını arttırdığını belirtilmiştir. SO₃ miktarının ağırlıkça %5’i geçmesi halinde çimentoya katılmaması, katılması halinde ise betonda Candlot tuzu (Etrejrit) oluşumuna neden olacağı belirtilmiştir. Hacmin artması nedeniyle Candlot tuzu betonda çatlaklar oluşmasına neden olmasından dolayı üstyapı inşaatlarında tehlike meydana getireceğinden zemin stabilizasyonunda ve zemin yapılarında dolgu malzemesi olarak kullanımın daha uygun olacağı belirtilmiştir. C sınıfı uçucu küllerin zemin iyileştirilmesinde katkı olmadan kullanılabileceği, F sınıfı küllerin ise kireç veya çimento katılarak kullanılacağı belirlenmiştir.

Seyitömer Termik Santralinde pulverize kömürün yakılması sonucu açığa çıkan uçucu küllerin ve taban küllerinin yapı malzemeleri üretiminde kullanılabilirliği Kara (2008) tarafından araştırma yapılmıştır. Elektrofiltrelerle baca çıkışında tutulan ve tane boyutları 0-200 µm arasında değişen ham kül ve ham külün elenmesiyle yaklaşık %98’inin 90 µm altında indirilmesiyle oluşan sepere küller denilmiştir. İri taneli, özgül ağırlığı daha fazla olan ve bu nedenle kazana çöken küllere ise taban külü denilmiştir. Uçucu kül ve taban küllerinin inşaat sektöründe kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla 7 farklı yapı malzemesi üretilmiştir. En iyi sonuçlara betonda

sepere külün %20 oranında kullanılmasıyla C 25/30 betonu, öğütölmüş taban külünün %10 oranında çimento kullanılmasıyla ise CEM II/ A-V Portland uçucu küllü çimento üretimi sağlanmıştır. Gaz betonda kuvars kumu yerine %75 oranında taban külü kullanılarak TS 453'e uygun G4/0.7 sınıfı gazbeton üretilmiştir. Taban külü ve taban cürufunun kullanılmasıyla üretilen flyblok ve gazblokların ısı yalıtımlarının yüksek olması, işçiliklerinin kolay ve düşük maliyetli olmalarından dolayı alternatif duvar elemanları olarak kullanılabileceği uygun görölmüştür. Seramik yapıştırıcısında da en ideal sonuçlara %10 oranında uçucu kül ilave edilerek ulaşılmıştır.

Türk linyitinin akışkan yatakta yakılması sonucu oluşan uçucu küllerin özelliklerini inceleyerek bu küllerin çimento harcında ve pastası yapımında çimentoya katkı olarak kullanılması yönünde Kürkçü (2006) çalışmalar yapmıştır. Hazırlanan uçucu kül numunelerine uygulanan fiziksel ve kimyasal testler sonucunda yüksek oksit içeriği sayesinde EN 197-1, EN-450 ve ASTM C 618 standartlarındaki, CaO ve SO₃ içeriği dışındaki koşulları sağladıkları görölmüştür. Portland çimentosunun da %10, 20 ve 30 oranında uçucu kül ilavesiyle hazırlanan pasta ve harçların su ihtiyacı, basınç dayanımı, priz süreleri ve hacim genleşmeleri de incelenmiştir. Sonuç olarak uçucu kül-çimento karışımlarının ASTM C 595 standardının basınç dayanımı, priz süreleri ve hacim sabitliği koşullarını, herhangi bir ön hidrasyon işlemine gerek duyulmaksızın sağlamasıyla katkılı çimento üretiminde değerlendirilmesinin önemli bir potansiyele sahip olduğu söylenmiştir.

Görhan (2006) çalışmasında ana materyal olarak uçucu külü çimento ve kireç ile birlikte kullanarak hafif yapı bloklarının üretilmesini amaçlamıştır. Bu çalışmanın esas önemi atığın geri dönüşümünü üzerine kurulmuştur. Farklı karışım oranlarında numuneler hazırlanmış ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Optimum kür süresini belirlemek amacıyla su kürü ve basınçlı buhar kürü uygulanmıştır. Endüstriyel üretim için uygun kür şartları belirlenmiştir. Üretilen numunelerin birim hacim ağırlık değerleri; 1058,76-1203,21 kg/m³ arasında olduğu tespit edilmiş ve hafif blokların birim ağırlık değerlerini verdiği görölmüştür. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde üretilen numunelerin hafif yapı bloğu olarak, gaz betonun, bims blokların kullanıldığı yerlerde ve yalıtım blokları olarak kullanılabileceği görölmüştür.

Mermer tozları ve uçucu kül ile polimer esaslı kompozit malzeme üretiminde Akın (2007) matris malzeme olarak polyeater, takviye malzemesi olarak da mermer tozları ve puzzolanik yapıdaki uçucu kül ilavesinin mukavemet üzerine etkisini incelemiştir. Sertleştirici olarak metil etil keton peroksit ve kürleşmede reaksiyon hızlandırıcı olarak da kobalt naftanat kullanılmıştır. Elde edilen malzemeler kalıplanmış, kalıptan çıkarılan malzemeler önce havada daha sonra etüvde kürleştirilmiştir. En iyi değer uçucu kül/mermer oranı 0,33'te üç noktadan eğme kuvveti $30,42 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlenmiş ve uçucu külün belli oranlardaki artışı gerilme gerinme kuvvetinde artışa neden olduğu görülmüştür. Kül/mermer oranının 0,33'e kadar arttırıldıkça sertlik değerinin de yükseldiği ve bu noktada uçucu külün puzzolanik etkisi sonucu mukavemet artışlarının olduğu düşünülmüştür. Mukavemet ile sertlik paralel olarak artış göstermiştir. Sonuç olarak uçucu külün kompozit malzeme yapımında katkı olarak kullanılıp, değerlendirilebileceği ve kompozit malzemelerin özelliklerinin iyi yönde arttırıcı etkisinin belirtilmiştir.

İskenderun Sugözü, Çayırhan, Tunçbilek ve Seyitömer uçucu kül agregalı dört farklı türde beton numuneleri hazırlanmıştır. Deney sonucunda Lkhagva (2006) teorik değerlere en yakın çökme değerine ve birim ağırlıklarına ulaşmıştır. Uçucu kül agregalı beton numuneleri 28 günlük kür sonunda basınç dayanım testine tabi tutmuştur. $38,38 \text{ N/mm}^2$ değeri ile en yüksek basınç dayanımını İskenderun Sugözü betonundan, orta basınç dayanımını $27,88 \text{ N/mm}^2$ Çayırhan betonu ve $20,89 \text{ N/mm}^2$ değerindeki Tunçbilek betonundan elde edilmiştir. $13,81 \text{ N/mm}^2$ değeri ile en küçük basınç dayanımını Seyitömer betonundan sağlanmıştır. Çekme dayanımı sonuçlarına göre ise en yüksek çekme dayanımı $1,61 \text{ N/mm}^2$ değeri ile İskenderun sugözü betonunda, orta çekme dayanımı $1,46 \text{ N/mm}^2$ değeri ile Çayırhan betonu ve $1,37 \text{ N/mm}^2$ değeri ile Tunçbilek betonunda, en küçük çekme dayanımı ise Seyitömer betonunda verdiği çıkmıştır. Sonuç olarak uçucu küllerin sinterleme ve peletleme işlemi ile agrega üretilmesi ve bu agregaların beton üretiminde kullanıldığı görülmüştür.

Uçucu külün yapı malzemelerinde bağlayıcılığa etkisini incelemek için Özdemir (2007) çalışmalar yapmıştır. Deneysel çalışmalarda puzzolanik özelliği ve yüksek kireç oranına sahip Yatağan Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ boyutlarında uçucu kül, kil ve kireç karışımı içeren numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere basınç ve eğilme deneyleri yapılmış ve mekanik dayanım sonuçları elde edilmiştir. Uçucu kül miktarının %59,5 ve kireç oranının %15 değerinde kullanılmasıyla en yüksek eğilme dayanımı $2,39 \text{ MPa}$, uçucu kül oranının %68 ve kireç

oranının %15 değerinde kullanılmasıyla da en yüksek basınç dayanımı 10,01 MPa bulunmuştur. Uçucu kül oranına bağlı olarak mekanik dayanımda artış gözlenmiştir. Bu nedenle puzzolanik özelliğe sahip uçucu küllerin bağlayıcı olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Geopolimerizasyon yöntemini araştıracak, C ve F sınıfı uçucu küllerinin yüksek dayanımlı yapı tuğlası üretilmesinde kullanılması yönünde Zeybek (2009) alışma yapmıştır. Jeolojik kaynak malzemelerinden alkalınasyon ve polikondensasyon ile sentezlenmesi sonucu oluşan polimere geopolimer denilmiştir. Uçucu kül katkılı geopolimer malzemelerin de fırınlama işlemi gerektirmemesinden dolayı enerji tasarrufu sağlayan ürünler arasında yer almıştır. Uçucu küllerin mineral kompozisyonlarının geopolimer sentezine uygunluğu araştırılmış ve en uygun kompozisyonda olanın F sınıfı uçucu kül olduğunu, C sınıfı uçucu küllerin ise en uygunsuz kompozisyona sahip olduğu belirtilmiştir. 30 MPa basınç altında şekillendirilerek 40-60-80-100  C sıcaklıklarda 2-4-6-24-48-72 saat aralıklarında ısıl işlemden geçirerek üretilen geopolimer tuğlaların basınç dayanımı, yoğunluk değerleri, su tutma ve donma çözülme dirençleri değerlendirilmiştir. F sınıfı uçucu külden üretilen geopolimer tuğlalarının Si/Al molar oranının 2 olduğu, 60  C sıcaklıkta etüvde 24 saat ısıl işlem uygulanması sonucunda optimum basınç dayanım değerinin 45 MPa olduğu grlmştir. Suda zme, kurutma ve öğütme işlemleri sonrasında C sınıfı uçucu küllerle üretilen geopolimer tuğlaların malzeme standartlarına ulaşılmıştır.

Kaya (2010) tras ve kalker karışımına farklı oranlarda uçucu kül ilavesiyle çimentolar hazırlamış ve bu imento ile hazırlanan harçların dayanım özelliklerinin araştırılması ve kimyasal katkı ile dayanımlarının artırılması için çalışmalar yapmıştır. Klinker miktarının azaltılıp uçucu kül miktarını arttırarak çimentoların fiziksel ve kimyasal özellikleri tayin edilmiştir. Bunun için %5'ten %15'e kadar uçucu kül kullanılarak farklı inceliklerde harçlar hazırlanmış ve 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. %1 incelikte %8 uçucu kül kullanımında 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında artış, %8 ve fazlası oranında uçucu kül miktarındaki artışla 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Basınç dayanımındaki bu düşüşün sebebini, klinker yerine kullanılan uçucu küldeki CaO miktarının düşük olmasından kaynaklandığını belirtilmiştir. Yüksek oranda uçucu kül kullanılarak hazırlanan çimentoların dayanımının artırılması için tras, kalker ve yüksek miktarda uçucu kül içeren karışıma Ca(OH)_2 ve CaCO_3 tuzları ilave edilerek çimentolar hazırlanmış ve bu

çimentoların dayanımları test edilmiştir. İlave edilen tuzların uçucu kül içerikli çimentonun dayanımını arttırdığı belirtilmiştir.

Uçucu küllerin PVC plastisoller içerisinde alternatif dolgu malzemesi olarak kullanılmasını Sayhan (2010) yılında araştırılmıştır. 38 µm Soma uçucu külü kullanılarak çıkan sonuçlar dolgu maddesi kalsit kullanılan malzemeler ile karşılaştırılmıştır. Malzemenin etkisinin sıcaklık, karıştırma hızı ve konsantrasyona göre değiştiği görülmüş ve PVC malzemesinin mekanik özelliklerinin pozitif yönde etkilenebilmesiyle daha iyi malzeme elde edilmiştir. PVC plastisollerin reolojik özelliklerinde ve PVC malzemesinin mekanik özelliklerinde gerçekleşen tüm değişikliklerin uçucu külün yapısındaki ve tane şeklinde farklılıklardan meydana geldiği açıklanmıştır. Sonuç olarak uçucu külün PVC plastisollerde alternatif dolgu malzemesi olabileceği önerilmiştir.

Deneysel çalışmasında Şahin (2010) tarafından Termik Santral uçucu külü ve atık cam kullanarak hammaddelerin X-ışınları difraksiyon (XRD), X-ışınları floresans (XRF) ve diferansiyel termal analiz (DTA) ile karakterizasyonları belirlenmiştir. Hammaddelerin tane boyutu ölçülmüş ve uçucu külün taramalı elektron mikroskobu ile tane yapısı incelenmiştir. Uçucu kül içerisine ağırlıkça %50-60-70-80-90 oranlarında cam tozu ilave edilerek homojen karışım sağlamak için silindirik döner karıştırıcıda 60 dakika karıştırılmış ve karışımlar ağırlıkça %10 oranında nemlendirilerek 500 µm boyutunda elekten geçirilerek granül haline getirilmiştir. Hazırlanan granüller kuru preste 800 kg/cm² basınç altında şekillendirilmiş, şekillendirilen numuneler 700-1150 °C sıcaklık aralıklarında 1 saat sinterleştirilmiştir. 900 °C’de sinterlene numunelerin %44 porozite değerine sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre %90 oranında atık pencere camı ve %10 uçucu kül içeren karışımlarda köpük yapıcı ilavesi olmadan da camsı köpük malzemelerin üretilebileceği görülmüştür.

Vatansever (2011) kriyojenik öğütme işleminin, değişen talaş ağırlık oranı ve boyutunun, uçucu kül ağırlık oranının kompozit malzemenin korozyon davranışı ve mekanik özelliklerine etkisi üzerine çalışma yapmıştır. Hazırlanan numunelerin mekanik özellik karakterizasyonu ve korozyon deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre uçucu kül oranının artması ile yoğunluk ve elektrik iletkenliğinin düştüğü, boşluk hacim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Kriyo öğütme işlemi ve öğütmedeki öğütücü bilya/karışım ağırlık oranının artmasıyla kompozit malzeme üzerindeki boşluk hacim oranındaki artışın daha az olduğu görülmüştür. Öğütme işleminde yüksek bilya/toz ağırlık oranına sahip numunelerin akma, basma ve sertlik

değerlerinin diğer numunelerden daha yüksek çıktığı ve bu numunelerde, ağırlıkça %5 oranında uçucu kül takviye edildiğinde mekanik özelliklerin en yüksek değerde olduğu görülmüş, artan uçucu kül ilavesiyle ise düşmüştür.

Atık sularda bulunan fosfat iyonunu mikrofiltrasyon membranlar ile uçucu kül kullanarak sulu ortamdan uzaklaştırılması üzerine yapılan çalışmada uçucu külün fosfat iyonlarını uzaklaştırabilme kapasitesini belirlemek için (Yalvaç Can, 2002) kesikli deneyler yapmıştır. Optimum pH'ın 5-6 aralığında, 25 mg/L ve 100 mg/L fosfat konsantrasyonları için sırayla 2 g/L ve 4 g/L uçucu kül kullanıldığında yaklaşık %100 fosfat giderim verimi elde edilmiştir. Membran filtrasyonunda çapraz akış tekniği kullanılarak fosfat iyonları sulu ortamdan uzaklaştırılmıştır.

Fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı uçucu külleri (Afşin-Elbistan, Seyitömer ve Soma) kullanarak As(V)'in sulu çözeltilerden adsorpsiyonuna ortam pH'ının, çalkalama süresinin, adsorban miktarının ve uçucu kül türünün etkilerini incelemek için İbiş(2010) çalışmalar yapmıştır. Uçucu kül etkinliği ile ticari adsorban olarak kullanılan aktif karbonun etkinliği karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular sonucunda optimum arsenik adsorpsiyonu için gerekli ortam başlangıç pH değeri Afşin-Elbistan, Soma ve toz aktif karbon için 6, Seyitömer uçucu külü için 5, adsorbans miktarının 20 g/L, temas süresinin 420 dk. olarak tespit edilmiştir. Afşin-Elbistan uçucu külü kullanıldığında %71, Soma uçucu külü kullanıldığında %74, Seyitömer uçucu külü kullanıldığında %80 ve toz aktif karbon kullanımı için %87 arsenik giderim verimleri bulunmuştur.

Öksüz (2006) Afşin-Elbistan Termik Santrali uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini incelemiştir. Zemine ilave edilen uçucu külün mukavemete etkisini belirlemek için serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Uçucu külün kuru ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında zemine ilave edilmesiyle mukavemet değişimi araştırılmıştır. Değişimin zaman ile bağımlılığı belirlemek için deneyler 7, 14, 28 ve 56 günlük kür sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak uçucu külün zemine katılmasıyla mukavemette artış meydana geldiği, %5 oranında uçucu kül ilavesiyle serbest basınç mukavemetinin %100 artışı görülmüştür. Aynı zamanda kül içeriği ve süresinin artmasıyla göçme deformasyonunda da artışlar gözlemlenmiştir.

Oda sıcaklığında üretilen asit-baz fosfat seramikleri ile Afşin-Elbistan termik santralinden elde edilen uçucu külün mekanik ve mikro yapılarını Mahyar (2014) inceleyerek endüstriyel atık için yeni bir uygulama alanı sunmak için çalışmalar yapmıştır. Uçucu külün aktivasyonu için iki fosfat kaynağı, fosforik asit çözeltisi veya

fosforik asit tuzu (monopotasyum dihidrojen fosfat) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı konsantrasyonlarda fosforik asit çözeltisi ve çözelti-toz oranları da kullanılmıştır. Kütlece %60 fosforik asit çözeltisi ve 1,0 çözelti-toz oranı ile en iyi performans sağlanmıştır. %10 soda kireç camı ve kütlece %60 fosforik asit çözeltisi ile 1,0 çözelti toz oranıyla hazırlanan uçucu kül hamurları 30 MPa 28. Gün basınç dayanımına ulaşmıştır. Sonuç olarak kimyasal olarak bağlanmış fosfat seramiklerin portland çimentolu ürünlere göre üstün mekanik özellikler, daha yüksek dayanıklılık ve kısa priz süresi göstermiştir. Uçucu külün kimyasal kompozisyonu ise kimyasal olarak bağlanmış fosfat seramiklerin üretiminde kullanılabileceği görülmüştür.

Portland çimentosu, agrega ve polimer katkısının birlikte kullanılmasıyla elde edilen polimer modifiye harçların özellikleri Özmen (2015) tarafından araştırılmıştır. Katkı olarak kullanılan polimer türünün, kür koşullarının, uçucu kül ve cüruf gibi mineral katkılarının polimer modifiye harçların özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Harç özelliklerinin polimer katkısının tipine ve kür koşullarına göre değiştiği görülmüştür. Polimer katkıların eğilme dayanımlarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Artışın nedeni olarak polimer film tabakasının harç tabakasını güçlendirdiği belirtilmiştir. Polimer katkıları aynı zamanda basınç dayanımı da azaltmıştır. Bunun nedeni ise harç içerisindeki yumuşak polimer davranışının beton içindeki boşlukların davranışına benzer olduğu söylenmiştir. Polimer katkıların harçların durabilite özelliklerini ise iyileştirdiği belirlenmiştir. Polimer katkının kullanılmasıyla malzemedeki kılcallık da azalmıştır.

Ham madde olarak Seyitömer termik santralinden elde edilen uçucu külün gaz beton üretiminde kullanılabilirliği üzerine çalışma yapan Kozak (2010) tarafından bağlayıcı olarak TS EN 197-1 CEM I 42,5 R çimentosu, alüminyum tozu, sönmemiş kireç ve Silis kumu yerine silika kaynağı olarak uçucu kül kullanılmıştır. Numuneler 1,15 Bar basıncında kürlenmiştir. Uygulanan düşük otoklav basıncından dolayı numunelerin mikro yapılarında mukavemete katkı sağlayan kalsiyum silika hidrat fazlarının yeterli miktarda gelişmediği belirlenmiştir. Birim hacim değerleri benzer ticari gaz beton numuneleri ile uyum sağlamıştır. Yüksek buhar basınç değerlerinde otoklav kürü uygulanmasının basınç dayanımını artıracaklığı belirtilmiştir.

Uçucu külün sulardan Cu (II), Ni (II) ve Zn (II) metallerinin uzaklaştırılmasında kullanılabilirliğini ve adsorban etkinliğini belirlemek için Çetin (2004) tarafından çalışma yapılmıştır. Freundlich ve Langmuir sorpsiyon izotermi kullanılmıştır. Uçucu kül için Freundlich izoterminin bakır ve nikel adsorpsiyonuna, Langmuir izoterminin de

çinko adsorpsiyonuna uyduğu belirlenmiştir. Metal iyonlarının optimum adsorpsiyonu için gerekli zaman 1 saat olarak belirlenmiştir. Maksimum adsorpsiyondaki optimum pH üç metal için de 5 olarak bulunmuş ve uçucu külün adsorban olarak etkinliğinin Al, Fe, Ca ve Si ile alakalı olduğu belirlenmiştir. Uçucu külün aktif karbona göre kolay elde edilmesi ve ucuz olmasından dolayı tercih edilmiştir.

Geleneksel termal ve mikrodalga kürleme yöntemlerini Chaowasakoo ve Sombatsompop (2007) kullanarak uçucu kül/epoksi kompozitlerinin mekanik ve morfolojik özelliklerini değerlendirmiştir. Termal kürleme 70°C'da 80 dk. süre, mikrodalga kürleme ise optimum kürlenme sağlamak için 240 W'da 18 dk. süre ile gerçekleştirilmiştir. Termal kürleme ile daha yüksek gerilme ve eğilme modüllerine sahip kompozitlerin elde edildiği görülmüştür. Sonuç olarak uçucu kül miktarının artmasıyla kompozitlerin gerilme ve eğilme modüllerinin arttığı görülmüştür.

Epoksi polimer matris kompozitlerde uçucu kül ve cam elyaf dolgu maddelerinin etkilerini incelemek amacıyla Purohit ve ark. (2017) tarafından bir takım deneysel çalışmalar yapılmıştır. Epoksi matris sisteminde uçucu kül parçacıklarının yüzdesi ağırlıkça %4-10 arasında değişmiştir. En yüksek gerilme kuvveti 6 g uçucu kül içeren kompozitte, en yüksek elastikiyet modülü 8 g uçucu kül içeren kompozitte, en yüksek bükülme kuvveti ise 4 g uçucu kül içeren kompozitte görülmüştür. Uçucu kül ilavesiyle çekme mukavemetinin azaldığı, darbe mukavemetinin arttığı belirtilmiştir.

Katı atık yakma külünün epoksi kompozitte dolgu olarak kullanımı araştırılarak mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mekanik testlerden elde edilen sonuçlara göre yakma külünün %10, %20 ve %30 oranlarında eklenmesiyle epoksi kompozitlerin mukavemetlerinde azalma gözlenmiştir. Yakma külünde bulunan ağır metaller polimer matrisine immobilize edilerek yok edilmiştir. Ağır metalleri etkisiz hale getirdiğinden bu atık maddelerin kompozitlerde dolgu olarak kullanılmasının avantaj sağlayacağı Keong ve ark. (2017) tarafından belirtilmiştir.

Epoksi kompozit laminatlarında aseton ve etil alkol solvent kullanımının yanında, ahşap-uçucu kül-epoksi reçine elyafının esnekliği üzerine sertleştiricinin etkilerini incelemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kumar N. ve ark (2018) tarafından polimerlerdeki mekanik özelliklerin sadece reçinenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olmadığı aynı zamanda kullanılan sertleştirici ve çözücüye bağlı olduğu belirtilmiştir. Takviye olarak da ağaç tozu ve uçucu kül kullanılmıştır. Etanol ve aseton çözücülerinin yanında sertleştirici ve takviye elemanlarının epoksi reçine üzerindeki etkilerini incelemek için XRD, SEM ve FT-IR testleri yapılmıştır. Epoksi/uçucu kül bileşimlerinin IR spektrumu, aseton ve etilalkol solventleri kullanılarak hazırlanmıştır. IR zirvelerindeki kayma, epoksi/uçucu kül kompozitlerinin kauçuk özelliğini ortaya çıkarmıştır. Uçucu kül kullanılan kompozitlerde mekanik mukavemet artmıştır.

Kaynak araştırmasından da görüldüğü üzere uçucu kül en çok inşaat sektörü ve yapı malzemelerinde kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada ise dolgu maddesi olarak termik santral atığı olan uçucu külü polimer matrisli kompozit malzemelerde kullanarak düşük maliyetli, çevre dostu kompozit malzemeler üretmek ve kullanım alanlarını genişletmek hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada epoksi reçinesi, dolgu maddesi, sertleştirici ve polietilen glikol ilavesinin kompozit malzemelerin fiziko-mekanik ve termal özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Kullanılan Kimyasallar

Matris malzeme

Kompozit malzemelerin hazırlanmasında matris malzeme olarak saf NPEF 170 (Bisfenol F bazlı) epoksi reçine (ER) kullanılmıştır. Çizelge 4.1’de saf epoksi reçinesinin kimyasal özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge4.1. Saf epoksi reçinesinin kimyasal özellikleri

Reçine tipi	EEW (g/eq)	Viskozite (cps/25°C)	Yoğunluk (g/cm ³ , 25°C)
NPEF 170	160-180	2000-5000	1.16

Dolgu maddesi

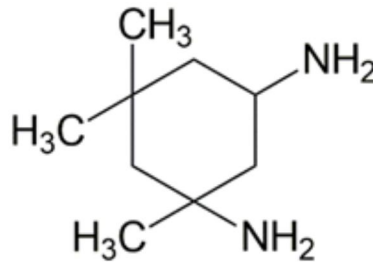
Bu çalışmada dolgu maddesi olarak Afşin-Elbistan termik santral atığı olan uçucu kül (UK) kullanıldı. Çizelge 4.2’de Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal bileşimi gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Afşin-Elbistan uçucu külünün kimyasal bileşimi (Bayat ve ark.)

Oksit	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Kızdırma Kaybı (%)
Kül	15,14	7,54	3,30	23,66	4,50	0,28	13,22	0,57	1,03	2,31

Sertleştirici

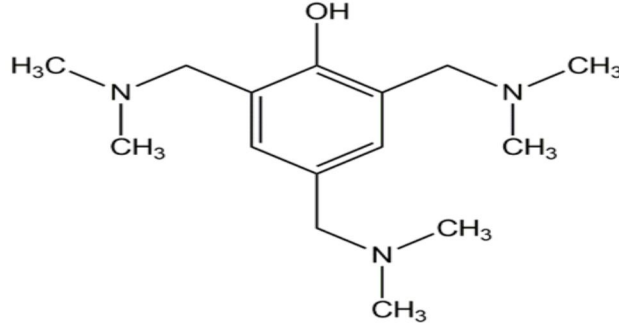
Sertleştirme işlemi için Epamine PC 17 amin grubu içeren sikloalifatik yapıda ticari bir sertleştirici kullanıldı. 25°C’da yoğunluğu 0.97 g/cm³ ve viskozite değeri ise 20-50 cps olan Epamine PC 17’nin molekül yapısı Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Epamine PC 17 molekül yapısı

Hızlandırıcı

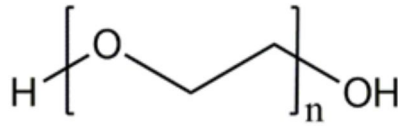
2,4,6 - tri(dimetil amino metil) fenol hızlandırıcı kullanıldı. Yoğunluğu 25 °C'ta 0.969 g/cm³'tür. Molekül formülü C₁₅H₂₇N₃O olan hızlandırıcının molekül yapısı Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Hızlandırıcının molekül yapısı

Plastikleştirici

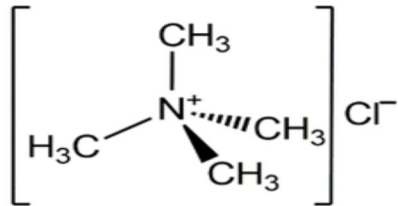
Plastikleştirici olarak HO(CH₂CH₂O)_nH molekül formülüne sahip polietilen glikol (PEG) kullanıldı. Molekül yapısı Şekil 4.3'de gösterilen PEG'in molekül ağırlığı 380-420 g/mol ağırlığındadır. Yoğunluğu ve viskozitesi sırayla 1.3 g/cm³ (20°C) ve 6.9-8.0 cps (99°C)'tır.



Şekil 4.3. PEG'in molekül yapısı

Tetrametilamonyum klorür

Uçucu külün modifikasyonunda kuaterner amonyum tuzu olan tetrametil amonyum klorür (TMAC) kullanıldı. TMAC'ın molekül ağırlığı 109.6 g/mol, özgül ağırlığı 1.17'dir. Molekül yapısı Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.4. TMAC'nin molekül yapısı

4.2. Kullanılan Cihazlar

Ultrasonik Banyo

Polimer zincirleri ile dolgu maddesinin daha iyi etkileşimini sağlamak amacıyla kullanıldı.

Etüv

Dolgu maddesinin bünyesinde bulunan nemin giderilmesinde ve kompozit malzemeleri sertleştirme işleminde kullanıldı.

Analitik Terazı

Kompozit malzemeleri hazırlama aşamasında ve su sorpsiyon testi için numunelerin hassas tartımlarının alınması sırasında kullanıldı.

Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı

Uçucu külün modifikasyon işlemi sırasında dolgu maddesi ile TMAC arasında daha iyi etkileşimi sağlamak ve kompozit malzeme hazırlarken etkili karışım hazırlamak için kullanıldı.

Termogravimetrik Analiz Cihazı (TGA)

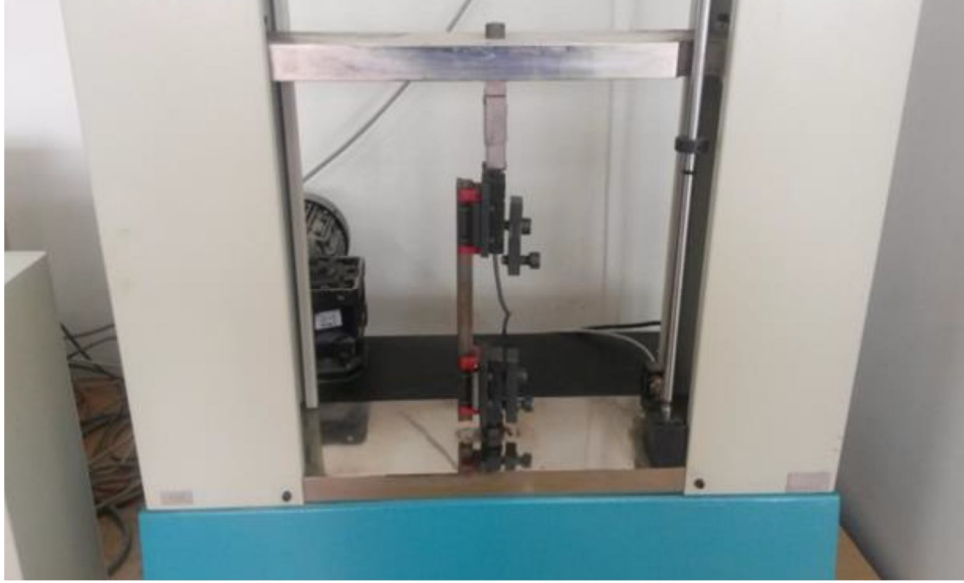
Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Lab. METTLER STAR SW cihazı, kompozit malzemelerin termal dayanımlarının belirlenmesi amacıyla kullanıldı.

X-Işını Kırınım Cihazı (XRD)

Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Bruker Advance D8 cihazı ile XRD cihazı, dolgu maddesinin ve kompozit malzemelerin kırınım şekillerinin elde edilmesinde kullanıldı.

Çekme-Kopma Testi Sistemi

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Şekil 4.5'de gösterilen TST MARES/TS-mxe çekme-kopma test sistemi kullanıldı.



Şekil 4.5. Çekme-kopma test sistemi

Sertlik Tayin Cihazı

Kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin belirlenmesinde Shore D TH 210 sertlik cihazı kullanıldı.

4.3. Kompozit Malzemelerin Hazırlanması

4.3.1. Uçucu kül (UK)/epoksi kompozitlerinin hazırlanması

UK/ER kompozit malzemelerini hazırlarken öncelikle dolgu maddesini etüvde bırakarak bünyesindeki nemin uzaklaştırılması sağlandı. Daha sonra saf ER üzerine kompozit malzemenin ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 oranında uçucu kül eklendi. UK ve ER zincirleri arasındaki etkileşimi sağlamak amacıyla ultrasonik banyoda 15dk. karıştırıldı. Ultrasonik banyodan alınan karışımlara kompozit malzemenin ağırlıkça %25'i oranında Epamine PC 17 sertleştirici eklendi. Karışımlar tekrar ultrasonik banyoda 15 dk. karıştırıldıktan sonra her bir karışıma 8 damla hızlandırıcı eklendi. Hazırlanan karışımlar ASTM D 638 standardına uygun olarak hazırlanmış kalıplara döküldü. Kalıplara döktüğümüz karışımlar üzerinde hava kabarcıkları olmaması için bir süre oda sıcaklığında bekletildi. Kompozit malzemenin içinde bulunduğu kalıp post-kür işlemi için 40 °C'da 3 saat ve ardından 80 °C'ta 3 saat etüvde bekletilerek kompozit malzemeler elde edildi.

Çizelge 4.3’de UK/ER kompozit malzemelerinin adlandırılması gösterilmektedir. Çizelge ve şekillerde saf NPEF 170 epoksi reçinesi, Epamine PC 17, Polietilen glikol, Uçucu kül ve Modifiye edilmiş uçucu kül sırasıyla ER, S, PEG, UK, MUK şeklinde kısaltmaları kullanıldı.

Çizelge 4.3. UK / ER kompozit malzemelerinin adlandırılması

Numune	ER (g)	UK (%)	UK (g)	S (g)	Toplam (g)
1 (ER)	13.5	0	0	4.5	18
2 (ER+%5 UK)	12.8	5	0.9	4.3	18
3 (ER+%10 UK)	12.2	10	1.8	4.0	18
4 (ER+%15 UK)	11.5	15	2.7	3.8	18
5 (ER+%20 UK)	10.8	20	3.6	3.6	18

Adhezyon testi için metal yüzeylerin her iki yüzeyi ince film halinde aynı kompozit malzeme ile kaplandı. Filmle kaplanan metal levhalar post-kür işlemi için 40 °C’da 3 saat ve ardından 80 °C’da 3 saat etüvde bekletildi.

4.3.2. Modifiye uçucu kül (MUK)/epoksi kompozitlerinin hazırlanması

Uçucu külün modifikasyonu için önce bir behere 50 g uçucu kül alınarak üzerine 750 mL su; etanol (hacimce 4:1 oranında) çözelti ilavesiyle elde edilen karışım manyetik karıştırıcıda 12 saat boyunca karıştırıldı (Seyidoğlu ve Yilmazer, 2013). Sonrasında TMAC ve 20 mL su:etanol çözeltisi ile yeni bir karışım hazırlanarak beherdeki uçucu kül-su:etanol karışımının üzerine eklendi. Manyetik karıştırıcıda elde ettiğimiz karışım iki gün karıştırıldı. Daha sonra modifiye edilmiş olan uçucu kül (MUK) dinlenmeye bırakıldı. Çöken kısım süzgeç kağıdı kullanılarak süzülerek ayrıldı. Çökeleğe birkaç kez saf su ile yıkama işlemi yapılarak Cl⁻ iyonlarının uzaklaştırılması sağlandı. Ortamda Cl⁻ iyonunun olup olmadığını tespit etmek için ise saat camına birkaç damla çözelti alınarak üzerine 0.1 N AgNO₃ çözeltisi damlatılarak kontrol işlemi gerçekleştirildi. Yıkama işleminden sonra Cl⁻ iyonları içermediği tespit edilen MUK etüvde 100 °C da kurutulduktan sonra toz haline getirildi. Toz haline getirilen MUK 106 mikron elekten geçirildi. Daha sonra MUK’dan kompozit malzemenin ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20’si oranında alınıp ER ile karıştırıldı. MUK hazırlamada da uçucu kül ve saf

epoksi reçine kullanılarak kompozit malzeme hazırlamadaki aynı işlemler tekrarlandı. Çizelge 4.4’de MUK/ER kompozit malzemelerinin adlandırılması gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. MUK / ER kompozit malzemelerinin adlandırılması

Numune	ER (g)	MUK (%)	MUK (g)	S (g)	Toplam (g)
M1 (ER)	13.5	0	0	4.5	18
M2 (ER+%5 MUK)	12.8	5	0.9	4.3	18
M3 (ER+%10 MUK)	12.2	10	1.8	4.0	18
M4 (ER+%15 MUK)	11.5	15	2.7	3.8	18
M5 (ER+%20 MUK)	10.8	20	3.6	3.6	18

Adhezyon testi için metal yüzeylerin her iki yüzeyi ince film halinde aynı kompozit malzeme ile kaplandı. Filmle kaplanan metal levhalar post-kür işlemi için 40 °C’da 3 saat ve ardından 80 °C’da 3 saat etüvde bekletildi.

4.3.3. Polietilen glikol ilaveli (PEG) uçucu kül/epoksi kompozitlerinin hazırlanması

PEG’in etkisini incelemek için PEG ilaveli UK/ER kompozit malzemeleri hazırlarken öncelikle dolgu maddesini etüvde bırakarak bünyesindeki nemin uzaklaştırması sağlandı. UK/ER kompozitleri ile MUK/ER kompozitlerinin çekme testi sonuçları kıyaslandı ve en iyi çekme mukavemetinin olduğu kompozit ile çalışmaya devam edildi. Her iki kompozitte de %20 dolgu maddesi içeren kompozit karışımına %5, 10, 15 oranlarında PEG eklendi. PEG ve ER zincirleri arasındaki etkileşimi sağlamak amacıyla ultrasonik banyoda 15 dk. karıştırıldı. Ultrasonik banyodan alınan karışımlara kompozit malzemenin ağırlıkça %25’i oranında Epamine PC 17 sertleştirici eklendi. Karışımlar tekrar ultrasonik banyoda 15 dk. karıştırıldıktan sonra her bir karışıma 8 damla hızlandırıcı eklendi. Hazırlanan karışımlar ASTM D 638 standardına uygun olarak hazırlanmış kalıplara döküldü. Kalıplara döktüğümüz karışımlar üzerinde hava kabarcıkları olmaması için bir süre oda sıcaklığında bekletildi. Kompozit malzemenin içinde bulunduğu kalıp post-kür işlemi için 40 °C’da 3 saat ve ardından 80 °C’ta 3 saat etüvde bekletilerek kompozit malzemeler elde edildi.

Çizelge 4.5’de PEG ilaveli UK/ER kompozit malzeme bileşimindeki malzemelerin miktarları gösterildi.

Çizelge 4.5. PEG ilaveli UK/ ER kompozit malzemelerinin adlandırılması

Numune	PEG (%)	UK (%)	UK (g)	ER (g)	S (g)	Toplam (g)
PEG1(ER+%20 UK+%5 PEG)	5	20	4	11.3	3.7	20
PEG2(ER+%20UK+%10PEG)	10	20	4	10.5	3.5	20
PEG3(ER+%20UK+%15PEG)	15	20	4	9.7	3.3	20

Adhezyon testi için metal yüzeylerin her iki yüzeyi ince film halinde aynı kompozit malzeme ile kaplandı. Filmle kaplanan metal levhalar post-kür işlemi için 40 °C’da 3 saat ve ardından 80 °C’da 3 saat etüvde bekletildi.

4.3.4. Polietilen glikol ilaveli modifiye uçucu kül / epoksi kompozitlerinin hazırlanması

PEG’in etkisini incelemek için PEG ilaveli MUK/ER kompozit malzemeleri hazırlarken öncelikle dolgu maddesini etüvde bırakarak bünyesindeki nemin uzaklaştırması sağlandı. UK/ER kompozitleri ile MUK/ER kompozitlerinin çekme testi sonuçları kıyaslandı ve en iyi çekme mukavemetinin olduğu kompozit ile çalışmaya devam edildi. Her iki kompozitte de %20 dolgu maddesi içeren kompozit karışımına %5, 10, 15 oranlarında PEG eklendi. PEG ve ER zincirleri arasındaki etkileşimi sağlamak amacıyla ultrasonik banyoda 15 dk. karıştırıldı. Ultrasonik banyodan alınan karışımlara ER’nin ağırlıkça %25’i oranında Epamine PC 17 sertleştirici eklendi. Karışımlar tekrar ultrasonik banyoda 15 dk. karıştırıldıktan sonra her bir karışıma 8 damla hızlandırıcı eklendi. Hazırlanan karışımlar ASTM D 638 standardına uygun olarak hazırlanmış kalıplara döküldü. Kalıplara döktüğümüz karışımlar üzerinde hava kabarcıkları olmaması için bir süre oda sıcaklığında bekletildi. Kompozit malzemenin içinde bulunduğu kalıp post-kür işlemi için 40 °C’da 3 saat ve ardından 80 °C’da 3 saat etüvde bekletilerek kompozit malzemeler elde edildi.

Çizelge 4.6’da PEG ilaveli MUK/ER kompozit malzemelerinin adlandırılması gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. PEG ilaveli MUK / ER kompozit malzemelerinin adlandırılması

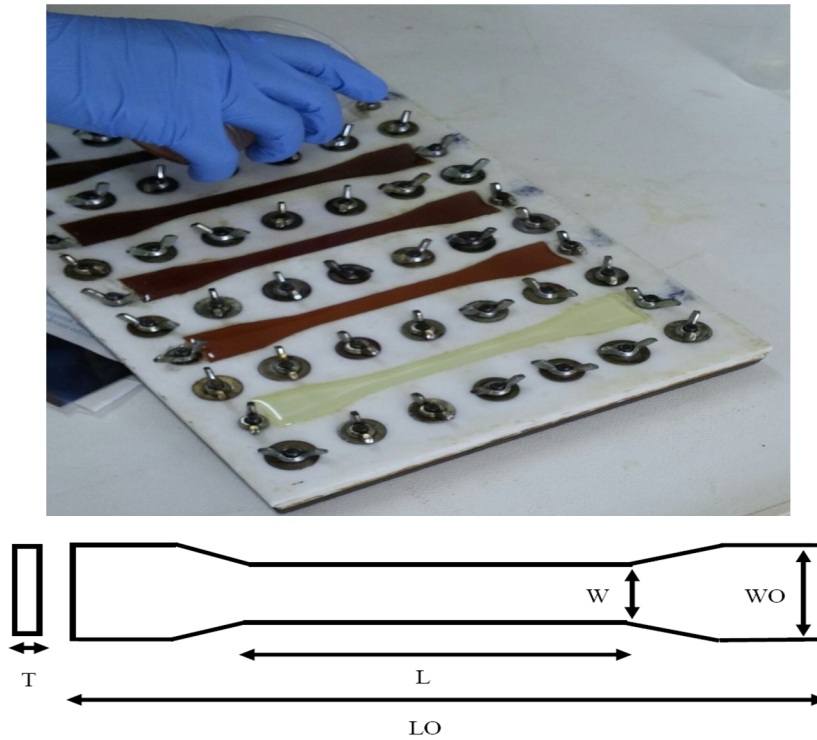
Numune	PEG (%)	MUK (%)	MUK (g)	ER (g)	S (g)	Toplam (g)
MPEG1 (ER+%20MUK+%5PEG)	5	20	4	11.3	3.7	20
MPEG2 (ER+%20MUK+%10PEG)	10	20	4	10.5	3.5	20
MPEG3 (ER+%20MUK+%15PEG)	15	20	4	9.7	3.3	20

Adhezyon testi için metal yüzeylerin her iki yüzeyi ince film halinde aynı kompozit malzeme ile kaplandı. Filmle kaplanan metal levhalar post-kür işlemi için 40 °C’da 3 saat ve ardından 80 °C’da 3 saat etüvde bekletildi.

4.4. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu

4.4.1. Çekme testi

Çekme testi için ASTM D 638 (ASTM, 2002) Standardına göre kompozit numuneler hazırlandı. TST MARES/TS-mxe cihazı ile malzemenin alt ve üst kısmına eşit oranda yük uygulanarak 5 mm/dakika hızla çekme testi yapıldı. Şekil 4.6’da kompozit malzemenin görünümü verilmektedir.



Şekil 4.6. Kompozit malzemenin görünümü

Çizelge 4.7’de kalıptan çıkartılan kompozit malzemelerin boyutları verilmektedir.

Çizelge 4.7. Kompozit malzemelerin boyutları

Özellik	Kısaltma	Boyut (mm)
Kalınlık	T	4 ± 0.2
Tüm uzunluk	LO	150
Dar kısım uzunluğu	L	80 ± 2.0
Tüm genişlik	WO	20 ± 0.2
Dar kısım genişliği	W	10 ± 0.2

4.4.2. Sertlik testi

Kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin ölçülmesinde Shore D TH 210 sertlik cihazı kullanılarak numunelerin ön ve arka yüzeylerinden 6 adet ölçüm alındı. Bu ölçümlerin ortalaması Shore D sertliği olarak kaydedildi.

4.4.3. Korozyon direnci testi

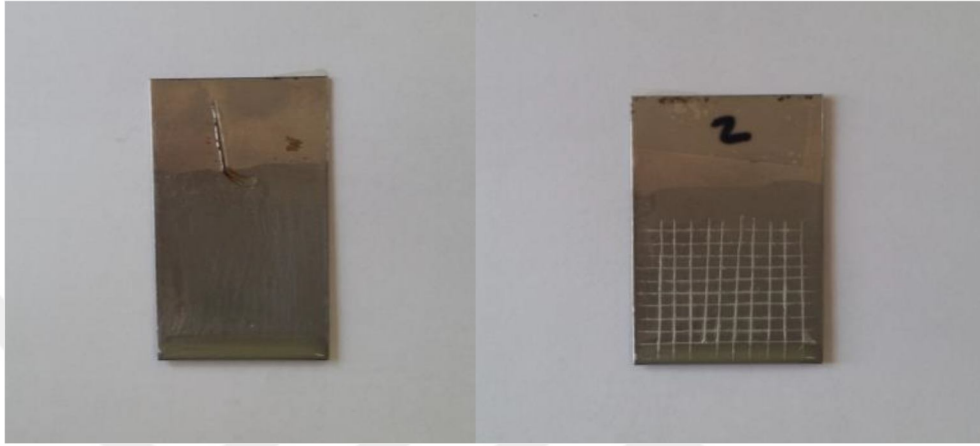
Kompozit malzemelerin farklı ortamlardaki korozyon dirençlerini gözlemlemek için %10 NaCl, %10 H₂SO₄, %10 NaOH çözeltileri ve saf su kullanıldı. Kompozit malzemelerden alınan parçalar tuz, asit, baz ve su çözeltilerinde bir ay bekletildi. Saf suya bırakılan numuneler bir hafta boyunca her gün, daha sonra iki günde bir tartıldı. Asit, baz ve tuzdaki numuneler ise bir hafta boyunca her gün, daha sonra haftada bir tartıldı. Çözeltilerin renk değişimi ve malzemelerin görünüşü gözlemlendi. Tartım sonunda kütle kaybının olup olmadığı hesaplandı.

4.4.4. Adhezyon testi

Epoksi kompozitlerin adhezyon özelliklerinin belirlenmesinde “Lattice notch method” kullanıldı. Bu methoda göre uçucu kül/epoksi reçine karışımının adhezyon kapasitesini belirlemek için metal yüzey kullanıldı. Metal yüzeyinde pas, kir, pürüzlülük olmaması için zımparalanarak sonrasında aseton ile temizleme işlemi yapıldı. Karışımlar metal yüzeylere ince film halinde kaplandı. Post-kür işlemi için 40°C’da 3 saat 80°C’da 3 saat etüvde bekletildi. Etüvden alınan sertleştirilmiş numunelerin yüzeyindeki film tabakası maket bıçağı ile 1 mm x 1 mm boyutunda eşit parçalara

ayrıldı. Parçaların üzerine kuvvetli bir bant yapıştırılarak hızlı bir şekilde geri çekilerek kare parçaların yüzeyden ayrılıp ayrılmadığı gözlemlendi. % Adhezyon değeri belirlendi.

Kaplamaların adhezyon testinden önce ve sonraki görüntüleri Şekil 4.7’de gösterildi.



Şekil 4.7. Kaplamaların (a) adhezyon testi öncesi (b) adhezyon testi sonrası görüntüsü

% Adhezyon = $((a-b) / a) \times 100$ eşitliği ile adhezyon yüzdesi hesaplandı.

a: Başlangıçta yüzeydeki toplam parça sayısı

b: Yüzeyden ayrılan parça sayısı

4.4.5. Su sorpsiyon testi

Kompozit malzemelerin su sorpsiyon özelliklerini incelemek amacıyla alınan küçük parçalar bir ay boyunca saf su içerisinde bekletildi. Su sorpsiyon için numuneler bir hafta boyunca hergün sonrasında iki günde bir sudan çıkarılıp filtre kağıdı ile kurutulup analitik terazide tartıldı. Kompozit malzemelerin % su sorpsiyon değerleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$\% \text{ Su sorpsiyonu} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_2)} \times 100$$

m_1 : Malzemenin herhangi bir zamandaki kütlesi

m_2 : Malzemenin başlangıçtaki kütlesi

4.4.6. XRD analizi

Uçucu külün morfolojisini incelemek ve epoksi reçine içerisinde dağılımını yorumlamak amacıyla XRD analizi yapıldı. Analizlerde Bruker Advance D8 cihazı kullanılarak 40 kv ve 40 mA altında 10° - 80° ($\lambda=1.54060 \text{ \AA}$) arasında 2° / dakika tarama hızıyla ölçüm alındı.

4.4.7. SEM görüntüleri

Farklı oranlarda hazırlanan numunelerin yüzeylerine bakmak için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı.

4.4.8. TGA analizi

Termal özelliklerini belirlemek amacıyla kompozit malzemeler belirli sıcaklıkta dengeye getirildikten sonra Lab. METTLER STAR SW cihazı kullanılarak yüksek saflıkta azot atmosferi altında 10°C / dakika ısıtma hızı ile sıcaklık 25°C 'tan 650°C ' a çıkarılarak TGA analizi yapıldı.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE YORUMLAR

5.1. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi sonucu malzemenin çekme dayanımı, kopmada uzama, Young modülü, elastiklik sınırı ve akma gerilmesi gibi mekanik özellikleri belirlenmektedir.

Çekme dayanımı (σ): Uygulanan kuvvet altında malzemenin kopmadan dayanabileceği maksimum gerilmedir. Birimi MPa'dır.

Kopmada uzama (ϵ): Kopma anında malzemedeki boyut değişimidir. Birimi mm'dir.

Young modülü (E): Elastik şekil değişimine karşı malzemenin gösterdiği dirençtir. Birimi Gpa'dır.

Epoksi kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak saf uçucu kül ve modifiye uçucu kül kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri

Numune	σ (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)
1	23,74	1,701	129,960
2	19,56	1,283	122,638
3	20,05	1,218	125,562
4	20,91	1,139	138,503
5	32,88	1,130	176,322
M1	23,74	1,701	129,960
M2	16,19	1,326	90,259
M3	25,12	0,903	136,973
M4	23,88	0,895	128,128
M5	41,63	0,851	180,015

Çizelge 5.1'de verilen değerlere göre uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozitlerde saf ER'ye %5, 10, 15, 20 UK ilavesiyle en yüksek çekme dayanımı %20 UK içeren 5 nolu kompozit malzemede 32,88 MPa bulunmuştur.

Kompozit malzeme içerisindeki UK miktarının artmasıyla kopmada uzama değeri azalarak 1,701 mm'den 1,130 mm'ye düşmüştür. Malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç ise en yüksek %20 UK içeren 5 nolu kompozit malzemede 176,322 MPa bulunmuştur.

Modifiye uçucu kül kullanılarak hazırlanan kompozitlerde de saf ER'ye %5, 10, 15, 20 MUK ilavesiyle en yüksek çekme dayanımı %20 MUK içeren M5 nolu kompozit malzemede 41,63 MPa bulunmuştur. Kompozit malzeme içerisindeki MUK miktarının artmasıyla kopmada uzama değeri azalarak 1,701 mm'den 0,851 mm'ye düşmüştür. Malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç ise en yüksek %20 MUK içeren M5 nolu kompozit malzemede 180,015 MPa bulunmuştur. σ değeri malzemeye mukavemetlik kazandırırken, ϵ değerinin azalması malzemenin kırılabilirliğinin artması anlamına gelmektedir. E değerindeki artışın ise malzemeye elastikiyet kazandırdığı görülmüştür. Sonuç olarak modifiye uçucu kül-saf epoksi ile hazırlanan kompozitlerin 41,63 MPa değeriyle en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

PEG ilaveli UK/ER ve MUK/ER kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. PEG ilaveli UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin mekanik özellikleri

Numune	σ (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)
PEG1	29,59	1,657	129,960
PEG2	25,00	1,082	128,128
PEG3	21,75	2,652	107,387
MPEG1	22,02	5,783	76,706
MPEG2	17,18	0,923	178,161
MPEG3	13,28	0,864	134,839

Çizelge 5.2'de verilen değerlere göre uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozitlerde %20 UK içeren kompozit malzemeye %5, 10, 15 PEG ilavesiyle çekme dayanımları sırasıyla 29,59 MPa, 25,00 MPa ve 21,75 MPa bulunmuştur. En yüksek çekme dayanımı ise %5 PEG içeren PEG1 nolu kompozit malzemede 29,59 MPa bulunmuştur.

Kompozit malzeme içerisindeki PEG miktarının artmasıyla kopmada uzama değeri 1,657 mm'den 1,082 mm'ye azalmış daha sonra 1,082 mm'den 2,652 mm'ye çıkmıştır. Malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç ise en yüksek %5 PEG içeren PEG1 nolu kompozit malzemede 129,960 MPa bulunmuştur.

Modifiye uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozitlerde %20 MUK içeren kompozit malzemeye %5, 10, 15 PEG ilavesiyle çekme dayanımları sırasıyla 22,02 MPa, 17,18 MPa ve 13,28 MPa bulunmuştur. En yüksek çekme dayanımı ise %5 PEG içeren PEG1 nolu kompozit malzemede tespit edilmiştir. Kompozit malzeme içerisindeki PEG miktarının artmasıyla kopmada uzama değeri azalarak 5,783 mm'den 0,864 mm'ye düşmüştür. Malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç ise en yüksek %10 PEG içeren PEG2 nolu kompozit malzemede 178,161 MPa bulunmuştur.

Afşin-Elbistan uçucu külünün zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini inceleyen Öksüz (2006) uçucu külün kuru ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında zemine ilave edilmesiyle mukavemet değişimini araştırmıştır. Uçucu külün zemine katılmasıyla mukavemette artış meydana getirdiği, %5 oranında uçucu kül ilavesiyle serbest basınç mukavemetinin %100 arttığını gözlemlemiştir.

5.2. Sertlik Testi Sonuçları

Çizelge 5.3'de Shore Drometer sertlik cihazında ölçülen kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin ortalaması gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Hazırlanan tüm kompozit malzemelerin sertlik değerleri

Numune	Sertlik (Shore D)	Numune	Sertlik (Shore D)
1	83	M1	82
2	85	M2	86
3	86	M3	87
4	88	M4	88
5	89	M5	89
PEG1	86	MPEG1	85
PEG2	84	MPEG2	83
PEG3	81	MPEG3	78

Çizelge 5.3’de verilen değerlere göre uçucu kül miktarının artmasıyla birlikte uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozitler ile modifiye uçucu kül-saf epoksi kullanılarak hazırlanan kompozitlerin sertlik değerleri artmıştır.

Uçucu külün modifiye edilmesiyle de sertlik değerlerinde önemli ölçüde değişiklik olmadığı görülmüştür. En yüksek sertlik değeri %20 UK ve MUK içeren 5 ve M5 nolu kompozit malzemelerde 89 Shore D çıkmıştır.

Akın (2007) matris malzeme olarak polyester, takviye malzemesi olarak da mermer tozları ve puzzolanik yapıdaki uçucu kül ilavesinin mukavemet üzerine etkisini üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmasında sertleştirici olarak metil etil keton peroksit kullanarak kül/mermer oranının 0,33’e kadar arttırıldıkça sertlik değerinin de artış gösterdiğini ve bu noktada uçucu külün puzzolanik etkisi sonucu mukavemet artışlarının oluştuğunu belirtmiştir. Mukavemet ile sertliğin paralel artış gösterdiğini uçucu külün kompozit malzeme yapımında katkı olarak kullanılabileceğini ve kompozit malzeme özelliklerini iyi yönde etkileyeceğini belirtmiştir.

%20 uçucu kül içeren kompozit malzemeye PEG ilavesinin yapılmasıyla ise PEG’in plastikleştirici etkisinden dolayı kompozit numunelerinin sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. En düşük sertlik değeri %15 PEG içeren MPEG3 nolu kompozit malzemede 78 Shore D bulunmuştur.

5.3. Korozyon Testi Sonuçları

Epoksi kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak saf uçucu kül ve modifiye uçucu külün kullanıldığı kompozit malzemelerde kütle kaybını kontrol etmek için kompozit parçalar farklı ortamlara bırakılmıştır. Çizelge 5.4’de UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin korozyon testi sonuçları gösterilmektedir.

Çizelge 5.4. UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin korozyon testi sonuçları

Numune	% 10 HCl	%10 NaOH	%10 NaCl	Su
1	++	++	++	++
2	++	++	++	++
3	++	++	++	++
4	++	++	++	++
5	++	++	++	++
M1	++	++	++	++
M2	++	++	++	++
M3	++	++	++	++
M4	++	++	++	++
M5	++	++	++	++

++ : Dayanıklı

+ - : Dayanıksız

Çizelge 5.4’de uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit malzemeler ile modifiye uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerin tamamında şişme, çatlama ve parçalanma gözlemlenmemiş, çözeltilerin renginde de herhangi bir değişiklik olmadığından korozyona karşı dirençli oldukları görülmüştür. Çizelgelerde korozyona dayanıklılık ++ şeklinde, korozyona dayanıksızlık ise + - şeklinde gösterilmiştir.

Epoksi kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak saf uçucu kül ve modifiye uçucu kül ile birlikte PEG'in kullanıldığı kompozit malzemelerin farklı ortamlara karşı korozyon test sonuçları Çizelge 5.5'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.5. PEG ilaveli UK/ER ile MUK/ER kompozit malzemelerinin korozyon testi sonuçları

Numune	% 10 HCl	%10 NaOH	%10 NaCl	Su
PEG1	++	++	++	++
PEG2	++	++	++	++
PEG3	++	++	++	++
MPEG1	++	++	++	++
MPEG2	++	++	++	++
MPEG3	++	++	++	++

++ : Dayanıklı

+ - : Dayanıksız

Çizelge 5.5'de PEG ilavesi kompozit malzemelerin görünümünde ve çözeltilerin rengine herhangi bir değişiklik meydana getirmemiştir. Sonuç olarak kompozit malzemelerin koroziif ortamlara karşı dayanıklı olduğu görülmüştür.

Çimento ve beton üretiminde genellikle düşük kireçli uçucu kül kullanılmakla birlikte betonlarda yüksek kireçli uçucu küllerin kullanılmasında yüksek CaO oranı betonların durabilitesini ve stabilitesini bozduğu, içerisinde bulundurdıkları karbon ve sülfürden dolayı çimentoyla reaksiyona girerek beton içerisinde alkali oranını arttırarak korozyonu hızlandırdığı görülmüştür. Yapılan bu çalışma sonucunda ise %20-30 oranında uçucu kül kullanımının malzemenin korozyon direnci ve beton dayanımını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir (Görhan ve ark., 2008).

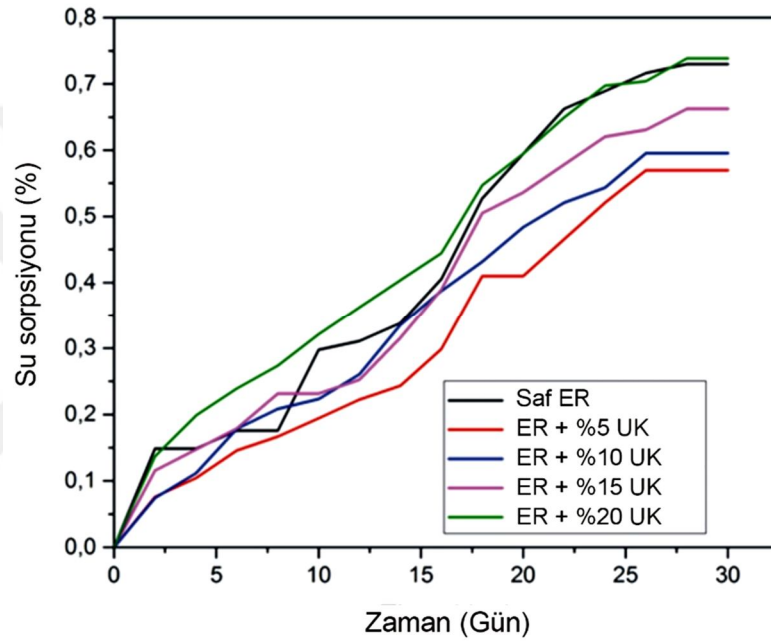
5.4. Adhezyon Testi Sonuçları

Hazırlanan tüm kompozit malzemelerin adhezyon testi sonucu %100 olarak hesaplanmıştır. Kompozit malzemelerin temiz metal yüzeylere iyi yapıştığını ve kaplamaların yüzeyinin bozulmadığı görülmüştür. Sonuç olarak saf epoksi reçinesine uçucu kül, modifiye uçucu kül ve polietilen glikol ilavesinin epoksi reçinenin adhezyon özelliğini olumsuz yönde etkilemediği görülmüştür.

Kara (2008) Seyitömer Termik Santralinde pulverize kömürün yakılması sonucu açığa çıkan uçucu küllerin ve taban küllerin yapı malzemeleri üretiminde kullanılabilirliği araştırdığı çalışmasında da seramik yapıştırıcısında en ideal sonuçlara %10 oranında uçucu kül ilave ederek ulaşmıştır.

5.5. Su Sorpsiyon Testi Sonuçları

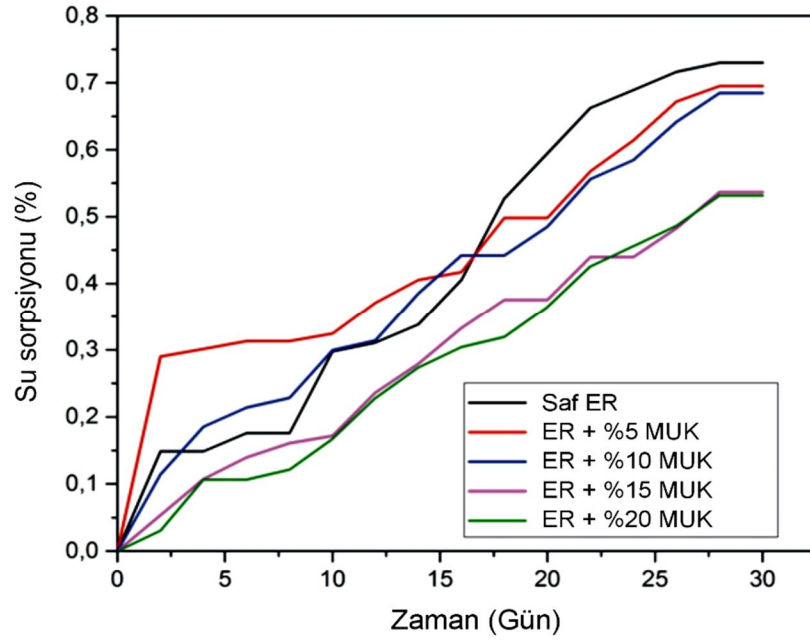
Şekil 5.1’de uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerinin su sorpsiyon grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.1. UK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği

Şekil 5.1’de verilen grafiğe göre saf epoksi reçine ile epoksi reçineye ilave edilen uçucu kül ile hazırlanmış kompozit malzemelerin % su sorpsiyonlarının başlangıçta birbirine yakın olduğu ve zamanla belirgin şekilde ayrıldığı görülmüştür. Saf epoksi reçineye %20 UK ilavesiyle % su sorpsiyonunu %0,7 bulunmuştur.

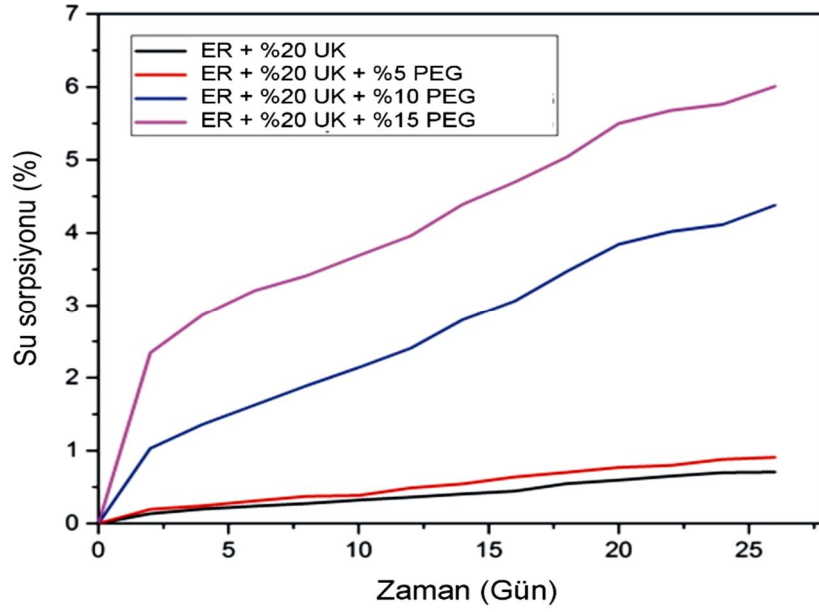
Şekil 5.2’de modifiye uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak kompozit malzemelerinin su sorpsiyon grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.2. MUK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği

Şekil 5.2’de verilen grafiğe göre saf epoksi reçine ile epoksi reçineye ilave edilen modifiye uçucu kül ile hazırlanmış kompozit malzemelere %5, 10, 15 ve 20 UK ilavesiyle % su sorpsiyonunun azaldığı görülmektedir. %20 MUK ilavesiyle % su sorpsiyonu %0,7’den %0,5’e düşmüştür.

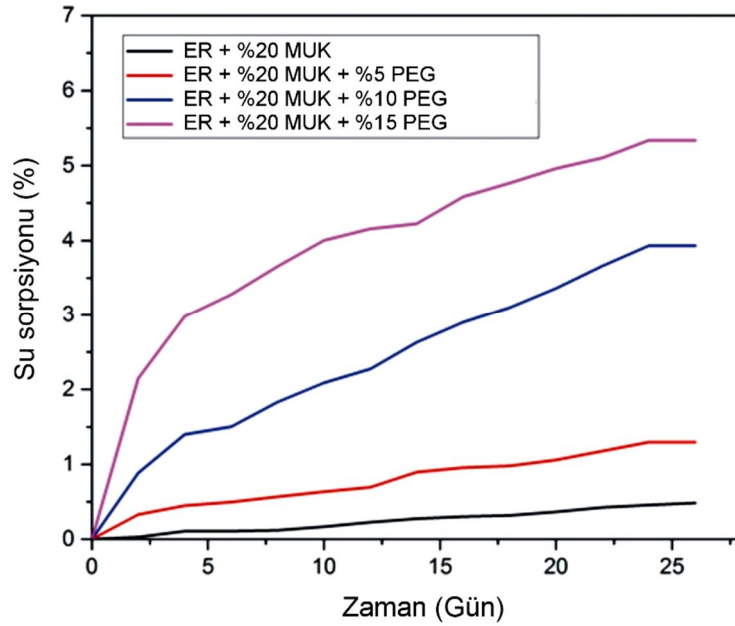
Şekil 5.3’de PEG ilaveli uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozitlerin su sorpsiyon grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.3. PEG ilaveli UK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği

Şekil 5.3’de verilen grafiğe göre PEG ilaveli uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerin % su sorpsiyonunun PEG ilavesiyle önemli ölçüde arttığı görülmektedir. PEG’in yapısında bulunan hidrofilik hidroksil grupları suda bulunan hidrojen ile birleşme eğilimi göstermesinden dolayı malzemelerin su emilimini arttırmıştır. %20 UK ve %15 PEG içeren kompozitin su sorpsiyonu %6 bulunmuştur.

Şekil 5.4’de PEG ilaveli modifiye uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozitlerin su sorpsiyon grafiği gösterilmektedir.



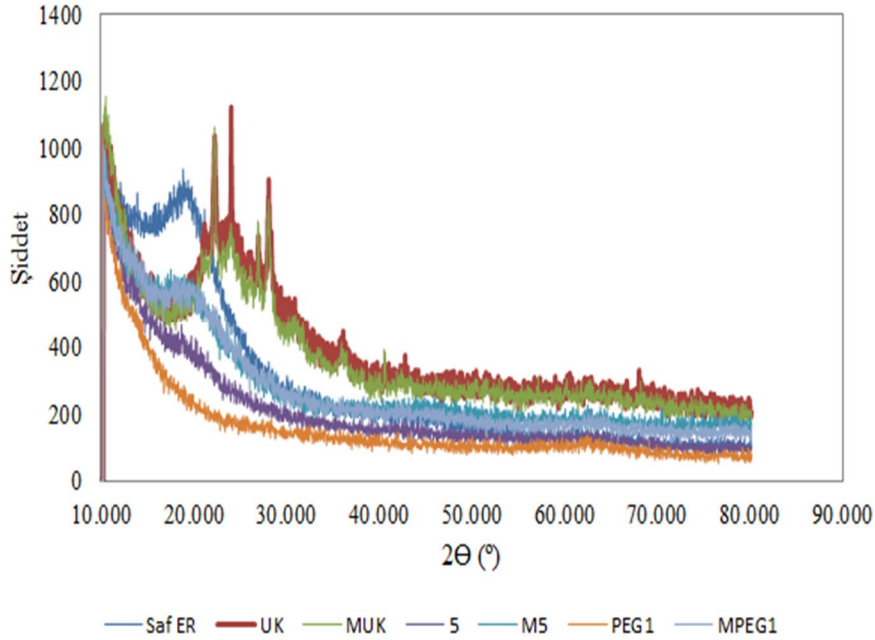
Şekil 5.4. PEG ilaveli MUK/ER kompozitlerinin su sorpsiyon grafiği

Şekil 5.4’de verilen grafiğe göre PEG ilaveli modifiye uçucu kül-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerin su sorpsiyonu PEG ilaveli uçucu kül-saf epoksi içeren kompozitlere göre daha düşük çıkmıştır. Modifikasyon işlemi ile uçucu kül ve saf epoksi reçine arasında kuvvetli etkileşim sağlandığından dolayı malzeme içerisine suyun girişi az da olsa engellenmiştir. %20 MUK ve %15 PEG içeren kompozitin su sorpsiyonu %5’e düşmüştür. Sonuç olarak dolgu maddesinin modifikasyon işleminden geçirilmesi kompozit malzemelerin % su sorpsiyonunu azalmıştır.

Uçucu kül ve polipropilen atıklarının yeni yapı malzemesinin ısı iletim özelliği ve yalıtım malzeme olarak kullanabilirliği ile yapılan çalışmada numunelerin su emme oranının %4-10 arasında değiştiği, TSE 704 ve 705’de verilen %30’luk üst limit değerinden düşük çıkmasından dolayı malzemenin 0 °C’ın altındaki sıcaklıklarda su ile direkt temasın olduğu yerlerde kullanılabileceği görülmüştür (Yıldız, 1998).

5.6. XRD Analizi Sonuçları

Şekil 5.5’de saf ER, UK, MUK, 5, M5, PEG1 ve MPEG1 kompozit malzemelerinin XRD grafiği gösterilmektedir.



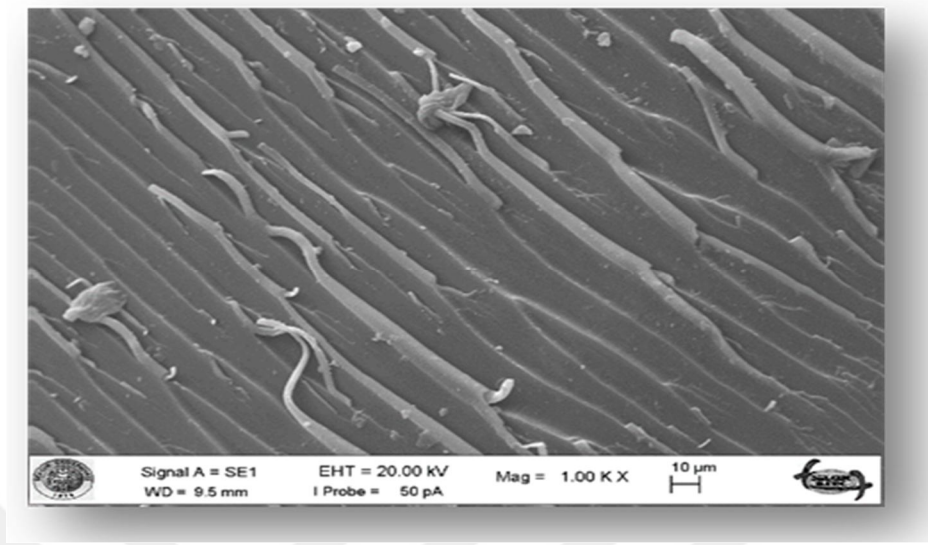
Şekil 5.5. XRD grafiği

Grafiğe göre saf ER’nin karakteristik pikleri $2\theta (^{\circ}) = 15.000-20.000$ de tespit edilmiş ve $2\theta (^{\circ}) = 30.000$ ’den sonra gözlemlenmemektedir. UK ve MUK’un karakteristik pikleri ise $2\theta (^{\circ}) = 20.000-30.000$ aralığında belirlenmiştir. %20 UK içeren 5 nolu kompozit karakteristik piki $2\theta (^{\circ}) = 20.000$ ’de gözlemlenmektedir. Uçucu külün modifiye edilmesiyle pik şiddetinin azaldığı görülmektedir. %20 MUK içeren M5 nolu kompozit ile %20 MUK içeren %5 PEG ilaveli MPEG1 nolu kompozitin pikleri üstüste çakışık halde gözlemlenmektedir. %20 UK içeren %5 PEG ilaveli PEG1 nolu kompozitin 200’ün altında en düşük pik şiddetine sahip olduğu belirlenmiştir. PEG ilavesinin kompozit malzemenin pik şiddetini düşürdüğü tespit edilmiştir.

Ege bölgesindeki termik santrallerden alınan uçucu küllerin liç karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada uçucu külün minerolojik yapısının belirlenmesi için XRD analizleri yapılmış ve analiz sonucunda Seyitömer termik santrali uçucu külünde başlıca illit, kuvars ve hematit mineralleri, Tunçbilek termik santrali uçucu külünde ise, kuvars, mullit, hematit ve manyetit minerallerinin olduğu tespit edilmiştir (Türkmenoğlu ve ark.).

5.7. SEM Görüntü Sonuçları

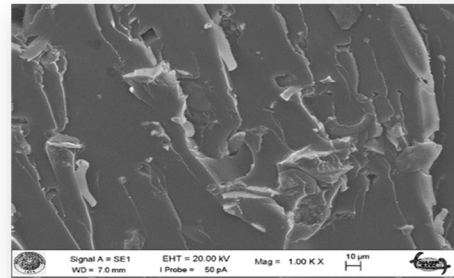
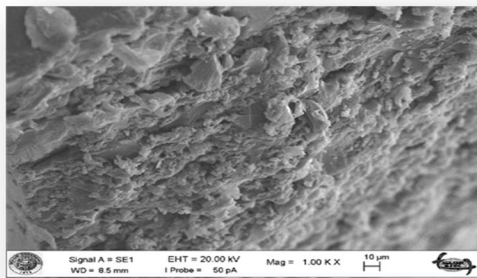
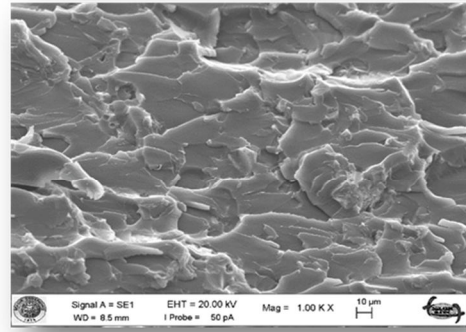
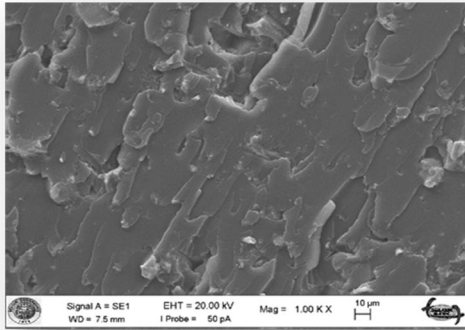
Şekil 5.6'da saf epoksi reçinesinin SEM görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Saf epoksi reçinesinin SEM görüntüsü

Şekil 5.6'da saf epoksi reçinesinin pürüzlü yüzeye sahip olduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.7'de farklı oranlarda hazırlanan kompozit malzemelerin SEM görüntüleri gösterilmektedir.



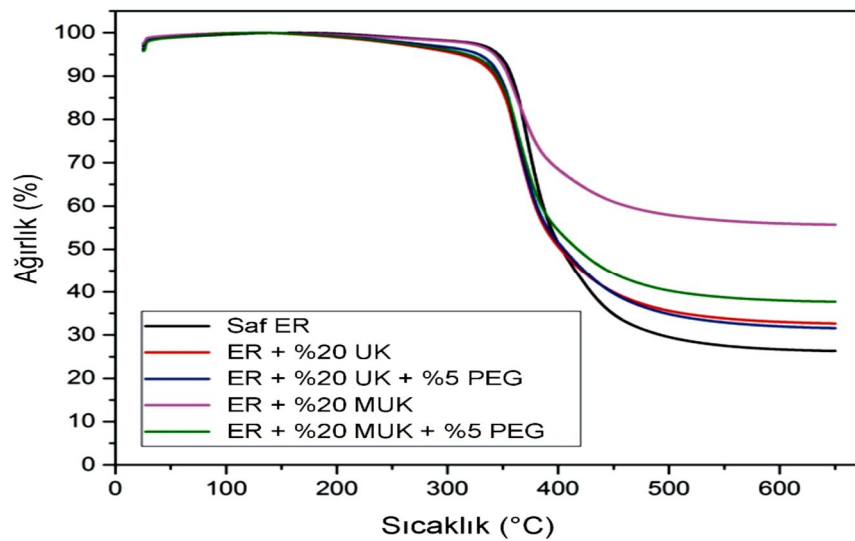
Şekil 5.7. 5, M5, PEG1 ve MPEG1 kodlu kompozitlerin SEM görüntüleri

Şekil 5.7’de epoksi reçineye %20 UK ve MUK ilavesiyle yüzey pürüzlülüğü artarak tabakalaşma meydana gelmiştir. Tabakalaşmanın sebebinin epoksi reçine içerisinde uçucu külün homojen dağılım göstermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Uçucu küle PEG ilavesiyle yüzeyde kabarma gerçekleşerek yer yer topaklanma meydana gelmiştir. Modifiye uçucu küle PEG ilavesiyle ise yüzey daha düzgün hale gelmiştir.

Farklı bölgelerden alınan uçucu küllerin ağır metal iyonlarının adsorbansında kullanımının geliştirilmesi amacıyla yapılan çalışmada Orhaneli uçucu külünün SEM görüntüsü incelendiğinde yuvarlak, opak ve farklı büyüklükte taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Taneciklerin dış yüzeyinin pürüzsüz olmasının kalsiyum oksit oranının yüksek olmasından kaynaklandığı, tane boyutu dağılımlarının da 1,12-18,30 μm arasında değiştiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada kullanılan Çatalağzı uçucu külünün SEM görüntüsü incelendiğinde ise şekilsiz ve opak taneciklerden oluştuğu görülmüştür. Taneciklerin dış yüzeyinin pürüzsüz olmasının kalsiyum oksit oranının düşük olmasından kaynaklandığı söylenmiştir. Tane boyutu dağılımlarının ise 1,46-5,67 μm arasında değiştiği belirtilmiştir (Kölemen, 2012).

5.8. TGA Analizi Sonuçları

TGA grafiği Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Grafik’ten elde edilen veriler Çizelge 5.6’da gösterilmiştir. TGA grafikleri ayrıca EK-1, EK-2, EK-3, EK-4, EK-5’ de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.8. TGA grafiği

Çizelge 5.6. Saf ER, 5, PEG1, M5, MPEG1 kompozitlerinin termal özellikleri

Numune	İlk bozunma sıcaklığı (IDT) (°C)	%5 Bozunma Sıcaklığı (°C)	%10 Bozunma Sıcaklığı (°C)	%50 Bozunma Sıcaklığı (°C)	650 °C Kalıntı (%)
Saf ER	251	345	357	403	26.31
5	211	328	347	405	31.58
PEG1	199	310	342	403	32.64
M5	241	342	355	650 <	55.69
MPEG1	207	318	345	417	37.68

Saf epoksi reçinesine %20 uçucu kül ilavesiyle kompozitin ilk bozunma sıcaklığı 251 °C'dan 211 °C'a düşmüş, % kalıntı değeri ise %26,31'den %31,58'e çıkmıştır. Modifikasyon işlemiyle de kompozitlerin ilk bozunma sıcaklığı 211 °C'dan 241 °C'a çıkmış ve % kalıntı değeri ise %31,58'den %55,69'a çıkmıştır. %20 UK içeren kompozite %5 PEG ilavesiyle kompozitin bozunma sıcaklığının 199 °C'a düştüğü, %kalıntı değerinin ise %32,64'e çıktığı görülmüştür. %20 MUK içeren kompozite %5 PEG ilavesiyle ise kompozitin bozunma sıcaklığının 207 °C'a çıktığı, % kalıntı değerinin ise %37,68'e çıktığı görülmüştür. 650 °C'da bozunmadan kalan en yüksek kalıntı değeri ise %55,69 olarak %20 MUK içeren kompozitte görülmektedir.

Epoksi reçine/çar kompozitlerinin hazırlanması ve karakterizasyonu çalışmasında çarın takviye olarak kullanılmasıyla saf epoksi reçinesinin termal özelliklerinde artış meydana gelmiştir. Saf epoksi reçinesi 650 °C'da % 0 kalıntı kütlesi göstermiştir. Plastik atık çarı ve çam kozalak kompozitlerinin kalıntı kütleleri ise sırasıyla %13-69 ve %14-37 aralığında görülmüştür. Sonuç olarak çarların kompozitlerde alev geciktirici mekanizmaya sahip olduğu görülmüştür (Bozkurt, 2014).

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmanın sonucunda termik santrallerin atık maddesi olan uçucu kül ve bu uçucu külün modifikasyon işleminden geçirilmesiyle elde edilen modifiye uçucu külünün epoksi matris sistemi içerisinde dolgu maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Dolgu maddesi türü, miktarı ve PEG ilavesi farklı kompozit malzemeler hazırlanmıştır. Hazırlanan kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemek amacıyla çekme, sertlik, korozyon, adhezyon, su sorpsiyon testleri, XRD, TGA ve SEM görüntü analizleri yapılmıştır. Dolgu maddesi türü, miktarı ve PEG ilavesi farklı kompozit malzemelerinin fiziko-mekanik ve termal özellikleri birbirleri ile ve saf epoksi reçinesiyle karşılaştırılmıştır.

Elde edilen kompozit malzemelerin %20 UK ve MUK ilavesiyle ise en yüksek çekme dayanımları sırasıyla 32,88 MPa ve 41,63 MPa bulunmuştur. UK ve MUK miktarı arttırıldığında kopmada uzama değerleri azalmış, malzemenin şekil değişimine karşı gösterdiği direnç en yüksek %20 UK ve MUK içeren kompozitlerde tespit edilmiştir. Çalışmada %20 MUK içeren kompozitlerin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Uçucu küle yapılan modifikasyon işleminin kompozit malzemenin mukavemetini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. %20 UK ve MUK içeren en iyi çekme dayanımına sahip kompozit malzemelerde PEG etkisini belirlemek için %5, 10, 15 PEG ilave edilmiş ve en düşük çekme dayanımını %15 PEG içeren kompozitlerde sırasıyla 21,75 MPa ve 13,28 MPa bulunmuştur. Modifiye edilmiş uçucu kül içeren kompozitlere PEG ilavesiyle kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri daha da azalmıştır. PEG kullanılmadan uçucu kül ilavesiyle hazırlanan kompozit malzemelerin yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılabileceği, PEG kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerin ise esnekliğin istendiği yerlerde kullanılabileceği belirlenmiştir.

Sertlik testi sonuçlarına göre %20 UK ve MUK ilavesiyle en yüksek sertlik değeri 89 Shore D bulunmuştur. %20 UK ve MUK içeren en iyi çekme dayanımına sahip kompozit malzemelere %5, 10, 15 PEG ilave edilmesiyle en düşük sertlik değerleri %15 PEG içeren kompozitlerde sırasıyla 81 ve 78 Shore D bulunmuştur. MUK içeren kompozitlere PEG ilavesiyle ise kompozit malzemelerin sertlik değeri daha da azalmıştır. PEG'in kompozit malzemeler üzerindeki plastikleştirici etkisinden dolayı sertlik değerlerini azalttığı düşünülmüştür. Sertlik değerlerinin azalmasıyla malzemelerin kırılabilirliği da azalmıştır. UK ve MUK içeren kompozitlerin yüksek

sertliğe karşı dayanıklı yerlerde kullanılmasının uygun olabileceği düşünülmüştür. Örneğin havacılık ve uzay sanayisinde, kara ve havayolu taşımacılığında kullanılacak parçaların üretiminde yüksek dayanım avantajından dolayı tercih edilmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir.

Farklı ortamlarda yapılan korozyon testi sonuçlarına göre kompozit malzemelerin yüksek korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür. PEG ilavesi ile de korozyon dirençlerinde değişiklik olmamıştır. Sonuç olarak kompozit malzemelerin asit, baz ve tuz ile temasta bulunduğu ortamlara karşı dayanıklı olmalarından dolayı kaplama maddesi olarak farklı alanlarda kullanılabileceği düşünülmektedir.

% Adhezyon sonuçlarına göre tüm kompozitlerin adhezyon testi sonuçları %100 çıkmıştır. Sonuç olarak saf epoksi reçinesine UK, MUK ve PEG ilavesinin epoksi reçinenin adhezyon özelliğini olumsuz yönde etkilemediği görülmüştür. Kompozit malzemelerin bu özelliğinden dolayı yapıştırıcı ve kaplama maddesi olarak farklı sektörlerde kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir.

Su sorpsiyonu sonuçlarına göre saf epoksi reçineye %20 UK ilavesiyle su sorpsiyonu %0,7 bulunmuştur. MUK ile hazırlanmış kompozit malzemelere %5, 10, 15 ve 20 UK ilavesiyle ise % su sorpsiyonu %0,7'den %0,5'e düşmüştür. PEG ilaveli UK-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerin % su sorpsiyonu PEG ilavesiyle önemli ölçüde artış göstermiştir. PEG'in yapısında bulunan hidrofilik hidroksil grupları suda bulunan hidrojen ile birleşme eğilimi göstermesinden dolayı malzemelerin su emilimini arttırmıştır. %20 UK ve %15 PEG içeren kompozitin su sorpsiyonu %6 bulunmuştur. PEG ilaveli MUK-saf epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit malzemelerin su sorpsiyonu PEG ilaveli UK-saf epoksi içeren kompozitlere göre daha düşük çıkmıştır. Modifikasyon işlemi ile UK ve saf epoksi reçine arasında kuvvetli etkileşim sağlandığından dolayı malzeme içerisine suyun girişi az da olsa engellenmiştir. %20 MUK ve %15 PEG içeren kompozitin su sorpsiyonu %5 bulunmuştur. Sonuç olarak dolgu maddesinin modifikasyon işleminden geçirilmesi kompozit malzemelerin % su sorpsiyonunu azaltmıştır. Kompozit malzemelerin bünyesine su absorplamaları malzemede şişme, çatlama, kırılma meydana getirebileceğinden dolayı istenmeyen özellik olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmamızda ise saf epoksi reçineye dolgu maddesi olarak UK ilave etmemiz durumunda malzeme de herhangi bir istenmeyen sonuç gözlemlenmemektedir. Modifikasyon işlemiyle ise malzeme içerisine suyun girişi az da olsa engellenmiştir. Sonuç olarak dolgu maddesinin modifikasyon işleminden geçirilmesi kompozit

malzemelerin su absorpsiyonunu azaltmasından dolayı MUK ilaveli dolgu maddesinin tercih edilmesinin daha iyi olacağı düşünülmüştür.

XRD analiz sonucuna göre saf ER'nin karakteristik pikleri $2\theta (^{\circ}) = 15.000-20.000$ belirgin şekilde gözlemlenmiş, $2\theta (^{\circ}) = 30.000$ 'den sonra gözlemlenmemiştir. UK ve MUK'un karakteristik pikleri $2\theta (^{\circ}) = 20.000-30.000$ aralığında, %20 UK içeren 5 nolu kompozitin karakteristik piki ise $2\theta (^{\circ}) = 20.000$ 'de görülmüştür. Uçucu külün modifiye edilmesiyle pik şiddetinin azaldığı görülmüştür. %20 MUK içeren M5 nolu kompozit ile %20 MUK içeren %5 PEG ilaveli MPEG1 nolu kompozitin pikleri üstüste çakışık halde görülmüştür. %20 UK içeren %5 PEG ilaveli PEG1 nolu kompozitin 200'ün altında en düşük pik şiddetine sahip olduğu görülmüş ve PEG'in kompozit malzemenin pik şiddetini düşürdüğü tespit edilmiştir.

SEM analiz sonuçlarına göre saf epoksi reçinesinin pürüzlü yüzeye sahip olduğu, epoksi reçineye %20 UK ve MUK ilavesiyle yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve tabakalaşmanın meydana geldiği görülmüştür. Tabakalaşmanın sebebinin epoksi reçine içerisinde uçucu külün homojen dağılım göstermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Uçucu küle PEG ilavesiyle ise yüzeyde yer yer topaklanma meydana gelmiştir. Modifiye uçucu küle PEG ilavesiyle ise yüzey daha düzgün hale gelmiştir.

TGA verilerine göre saf epoksi reçinesine %20 UK ilavesiyle kompozitin ilk bozunma sıcaklığı azalmış, % kalıntı miktarı ise artmıştır. Modifikasyon işlemiyle kompozitlerin ilk bozunma sıcaklığı ve % kalıntı miktarları artmıştır. %20 UK içeren kompozite %5 PEG ilavesiyle kompozitin bozunma sıcaklıkları azalmış ve % kalıntı miktarı artmıştır. %20 MUK içeren kompozite %5 PEG ilavesiyle ise kompozitin bozunma sıcaklıkları ve % kalıntı miktarı artmıştır. 650 °C bozunmadan kalan en yüksek kalıntı miktarı %55,69 olarak %20 MUK içeren kompozitte görülmüştür.

Termik santral atığı olan uçucu külün kompozit malzemelerde katkı maddesi olarak kullanılmasıyla atık birikimi ve depolama sorununun ortadan kalkacağı, çevre kirliliğinin önüne geçileceği ve ekonomik fiyatlarda yeni malzeme üretilbileceği görülmüştür. Yapılan analiz ve test sonuçlarına göre uçucu külün yapı, inşaat, otomotiv, denizcilik, havacılık ve kaplama sektörlerinde kullanılmasının yanında farklı alanlarda da kullanılacağı düşünülmektedir. Elde edilen tüm verilere göre uçucu ve modifiye uçucu külün epoksi kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanılmasının uygun olduğu ve bunun için daha fazla çalışmalar yapılmasının gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

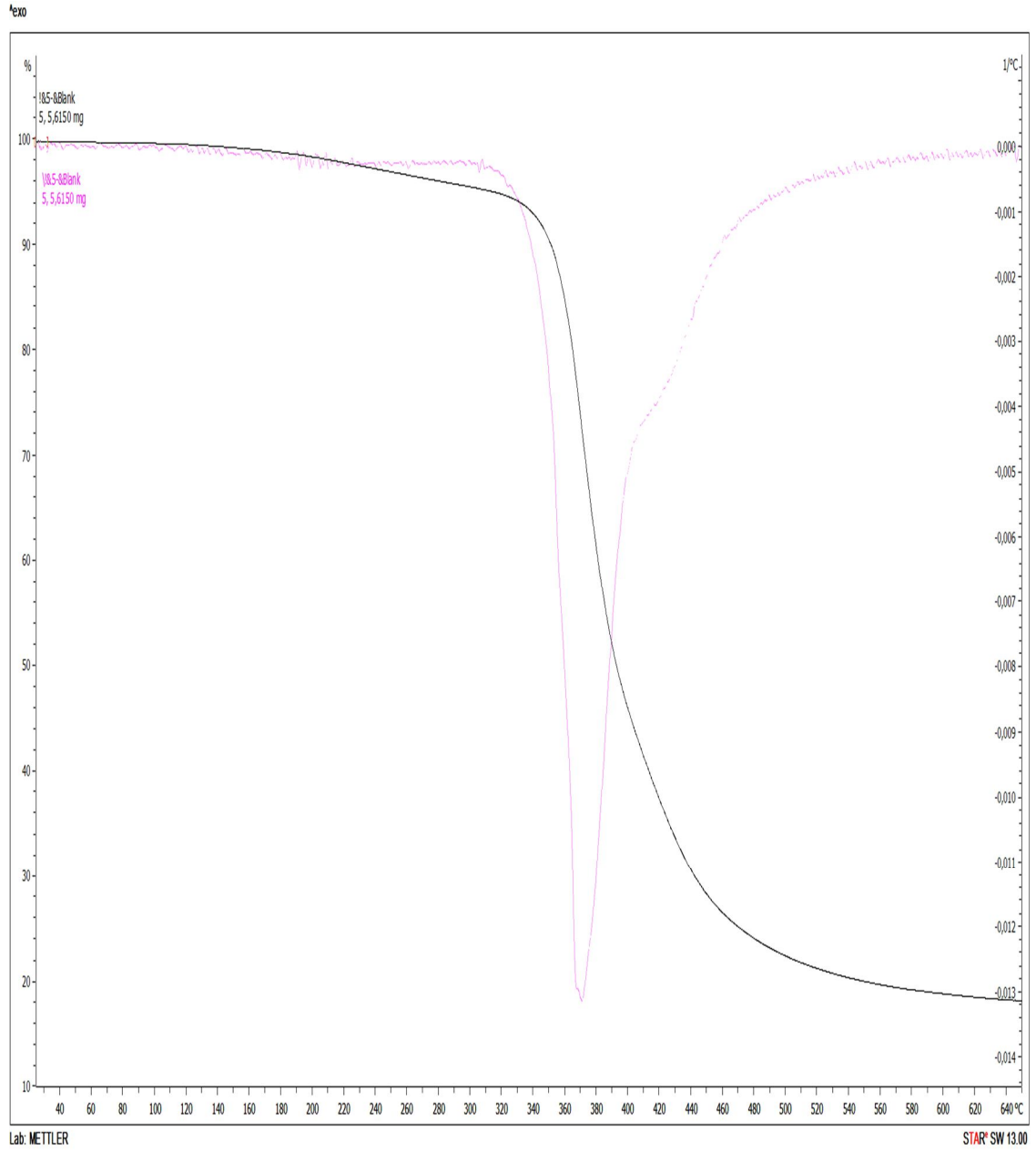
- Akın, E., 2007, Mermer Tozları ve Uçucu Kül ile Polimer Esaslı Kompozit Malzeme Üretimi, *Gazi Üniversitesi*.
- Aktaş, Ö. U., 2014, Polimer katkılı çimento esaslı kaplama malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- ASTM, C., 2003, 618-03, *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*.
- ASTM, D., 2002, 638, *Standard test method for tensile properties of plastics*, 3, 1-16.
- Bayat, O., Bayat, B., Vapur, H., Arslan, V. ve Uçurum, M., Cam Sanayi Atıklarının Uçucu Kül İle Koagülasyonu, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 44 (3), 19-24.
- Bozkurt, P., 2014, Epoksi reçine/çar kompozitlerinin hazırlanması ve karakterizasyonu, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Can, M. F., 2008, Sepiyolit/epoksi Nanokompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Chaowasakoo, T. ve Sombatsompop, N., 2007, Mechanical and morphological properties of fly ash/epoxy composites using conventional thermal and microwave curing methods, *composites science and technology*, 67 (11-12), 2282-2291.
- Çetin, S., 2004, Düşük maliyetli bir sorbent olan uçucu kül ile sulu çözeltilerden ağır metal sorpsiyonu, *Selçuk Üniversitesi*
- Demirci, M. T., 2009, Polimer esaslı kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Ekşi, O., 2007, Plastik esaslı malzemelerin ısıl şekil verme özelliklerinin incelenmesi, *Trakya Üniversitesi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Görhan, G., 2006, Hafif Yapı Blokları Üretiminde Uçucu Külün Kireç ve Çimento ile Birlikte Kullanımının Araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi*.
- Görhan, G., Kahraman, E., Başpınar, M. S. ve Demir, İ., 2008, Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4 (2), 85-94.
- Güzel, G., 2016, Epoksi reçinesi-yüksek fırın cürufu/yer fıstığı kabuğu tozu kompozitlerinin hazırlanması ve özelliklerinin incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.

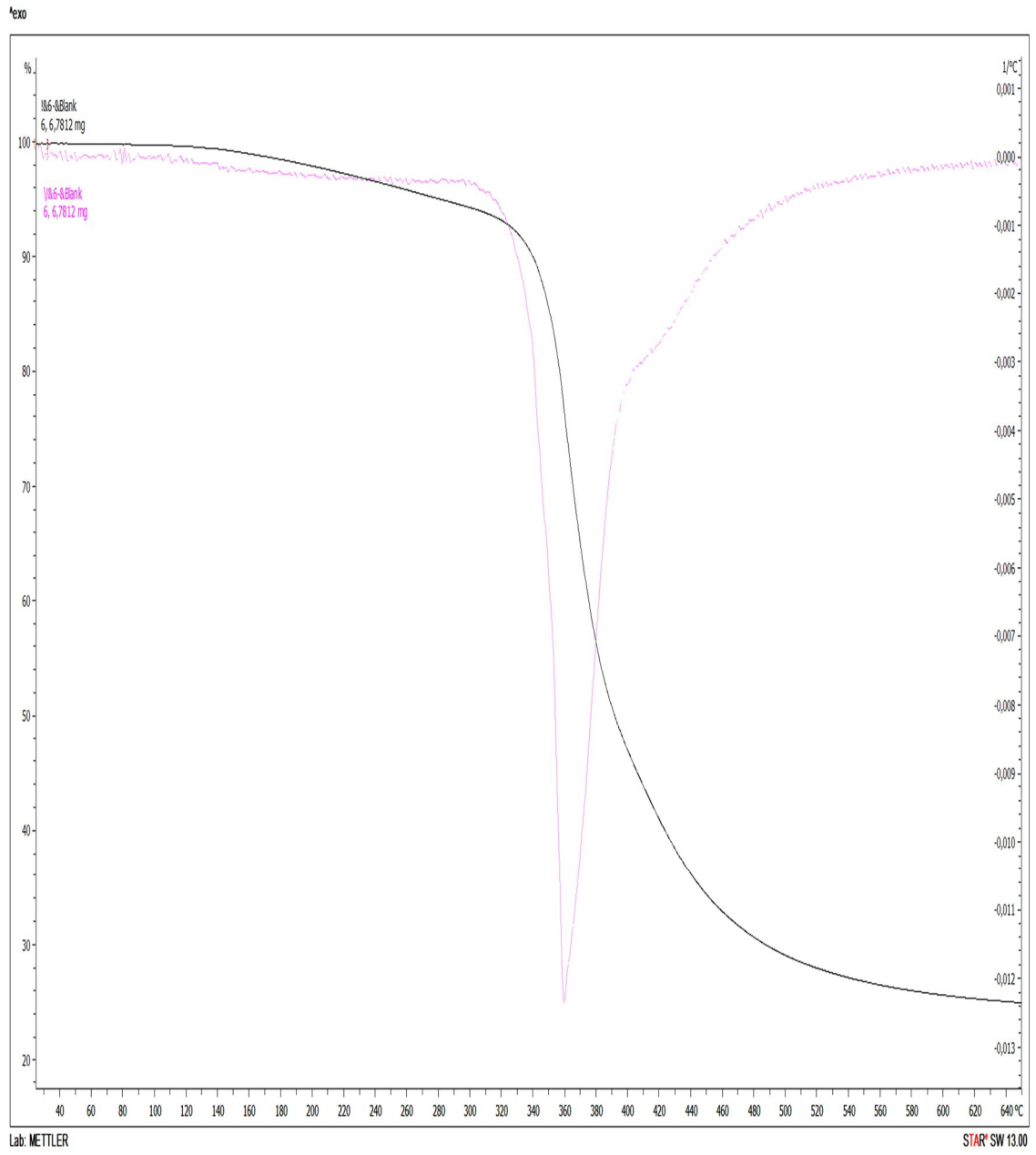
- Haşal, M. E., 2000, Uçucu Kül-Çimento-Köpük Karışımının Hafif Dolgu Malzemesi Olarak Geoteknik Özellikleri, *İstanbul Teknik Üniversitesi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- İbiş, R. Y., 2010, Termik Santral Uçucu Külünün Atıksulardan Arsenik Uzaklaştırmada Etkinliğinin Araştırılması, *Çukurova Üniversitesi*.
- Kantürk, E., 2006, Ege Bölgesi Uçucu Küllerinden Sentetik Zeolit Üretimi Parametrelerinin Araştırılması, *Dokuz Eylül Üniversitesi*.
- Kara, İ., 2008, Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*.
- Kaya, A. İ., 2016, Kompozit malzemeler ve özellikleri, *Putech & Composite Poliüretan Ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kaya, G., 2010, Farklı Konstrasyonlarda Uçucu Kül Kullanımının Çimento Özellikleri Üzerine Etkileri, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi*.
- Keong, G. C., Walad, M. H. B. M., Xiong, O. W., Haikel, M. N., Ling, C. H., Kiang, L. T. ve Hing, T. L., 2017, A Study on Mechanical Properties and Leaching Behaviour of Municipal Solid Waste (MSW) Incineration Ash/Epoxy Composites, *Energy Procedia*, 143, 448-453.
- Korçak, M., 2005, Seramik Takviyeli Çinko Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu, *Gazi Üniversitesi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Kozak, Ş., 2010, Gazbeton Üretiminde Uçucu Külün Hammadde Olarak Kullanımının Araştırılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi*.
- Kölemen, Ş., 2012, Farklı bölgelerden alınan uçucu küllerin ağır metal iyonlarının adsorbansında kullanımının geliştirilmesi.
- Kumar, N. N., Hegde, P. R., Shivagiri, S. ve Revanasiddappa, M., 2018, Synthesis and characterization of Fly ash/Wooden fiber reinforced Epoxy resin polymer composite, *Materials Today: Proceedings*, 5 (1), 501-507.
- Kürkçü, M., 2006, Utilization of Fly Ash From Fluidized Bed Combustion of a Turkish Lignite in Production of Blended Cements, *Middle East Technical University*.
- Lkhagva, T., 2006, Uçucu küllerin agrega olarak beton üretiminde kullanılması, *Yıldız Teknik Üniversitesi*.
- Mahyar, M., 2014, Room-Temperature Phosphate Ceramics Made With Afşin-Elbistan Fly Ash, *Middle East Technical University*.
- Öksüz, K., 2006, Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımında *Çukurova Üniversitesi*.

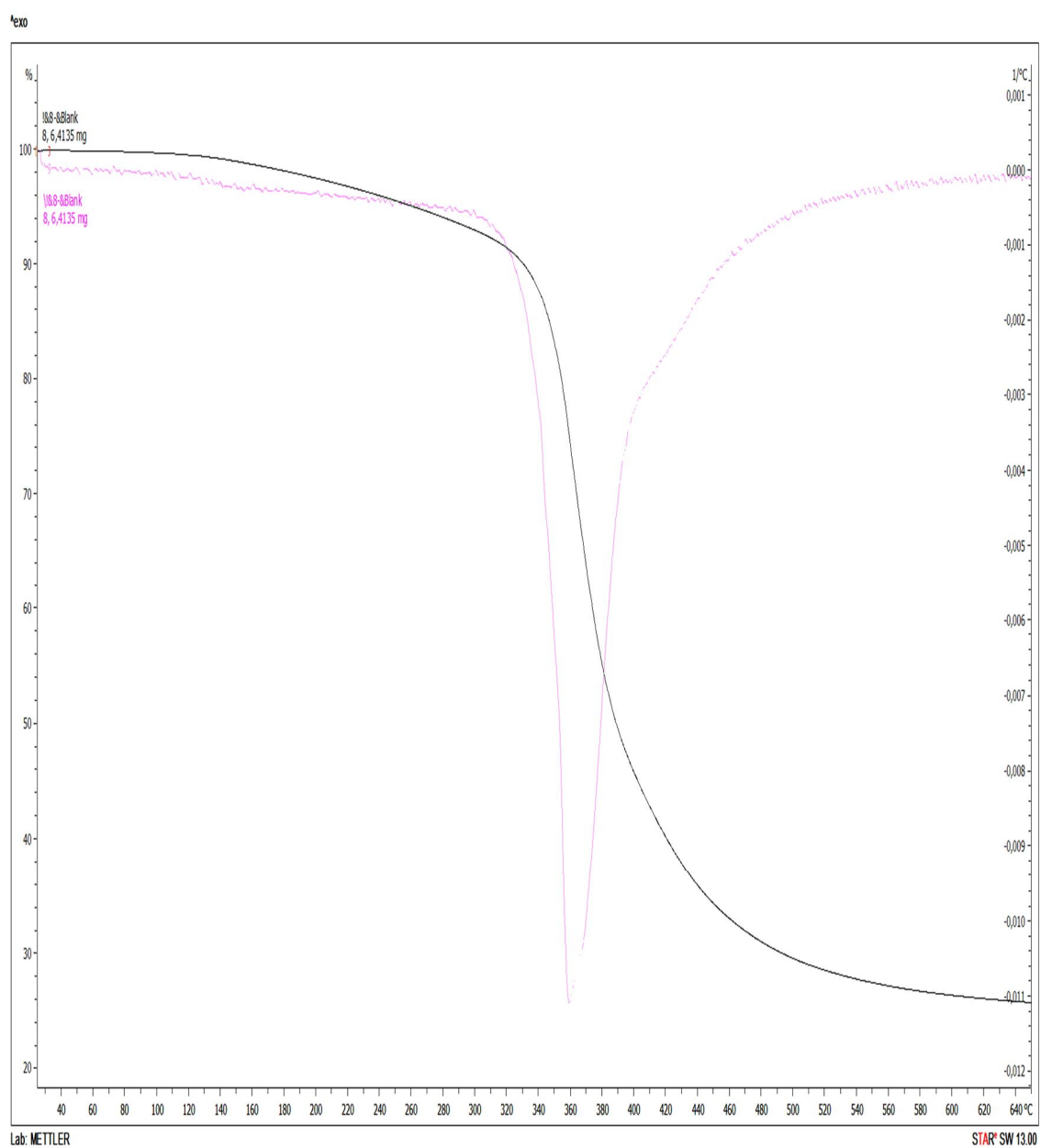
- Özdemir, O., 2007, Uçucu Külün Yapı Malzemelerinde Bağlayıcılığa Etkisinin Araştırılması, *Gazi Üniversitesi*.
- Özenç, M., 2007, Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi*
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Özmen, H. E., 2015, Polimer Modifiye Harçların Özellikleri Ve Uçucu Kül Ve Cüruf Katkısının Etkisi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Purohit, R., Sahu, P., Rana, R., Parashar, V. ve Sharma, S., 2017, Analysis of mechanical properties of fiber glass-epoxy-fly ash composites, *Materials Today: Proceedings*, 4 (2), 3102-3109.
- Sayhan, İ., 2010, Use of fly ash as an alternative filler material in PVC-pastisols, *İzmir Institute of Technology*.
- Seyidoglu, T. ve Yilmazer, U., 2013, Production of modified clays and their use in polypropylene-based nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 127 (2), 1257-1267.
- Sönmez, M., 2009, Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi Ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme, *İstanbul Teknik Üniversitesi*,
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Şahin, A., 2010, Uçucu Kül Katkılı Camı Köpük Malzemelerin Üretim İmkanlarının Araştırılması, *Sakarya Üniversitesi*.
- TSE 197-1, 2002, " Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,"Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkmenoğlu, M., Mesut, A. ve Erkuş, F. Ş., Ege Bölgesindeki Termik Santrallerden Alınan Uçucu Küllerin Liç Karakteristiklerinin Belirlenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29 (2), 131-140.
- Uçar, M., 2013, Yapıştırılmalı ve kaynaklı bağlantıların deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması, *Dokuz Eylül Üniversitesi*,
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Uluşen, T., 2008, Plastik esaslı kompozit malzemelerin kimyasal kaplama işlemlerinin incelenmesi, *Trakya Üniversitesi*,
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Ünver, E., 2015, Problemlili kil zeminlerin uçucu kül ile iyileştirilmesi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*.
- Vatansever, R., 2011, Alüminyum Talaşının Geri Kazanımı Ve Uçucu Kül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, *İstanbul Üniversitesi*.

- Yakınlar, O., 2011, Uçucu Kül Dolgulu Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Otomotiv Sektöründe Kullanımı, *Yıldız Teknik Üniversitesi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Yalvaç Can, M., 2002, Mikrofiltrasyonla Uçucu Kül Kullanılarak Atıksulardan Fosfat Giderimi *Atatürk Üniversitesi*.
- Yıldız, T., 1998, Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Değişik Kombinasyonlarda Kompozit Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi *Fırat Üniversitesi*, <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Zeybek, O., 2009, Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, *Anadolu Üniversitesi*.
- Zeyrek , C., 2009, Termik Santral Katı Atıklarından Zeolit Üretim Potansiyelinin Araştırılması, *Hacettepe Üniversitesi*.

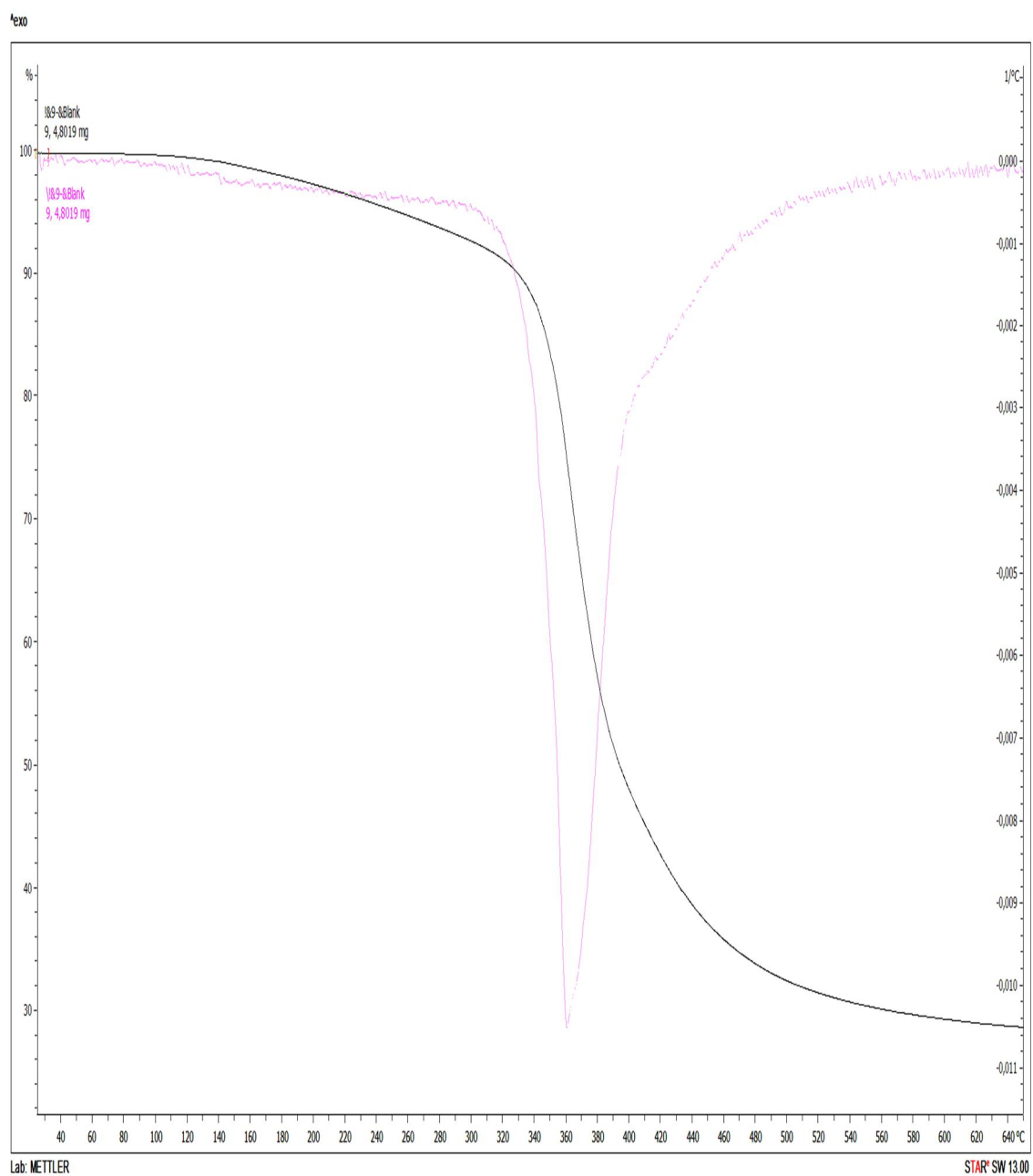


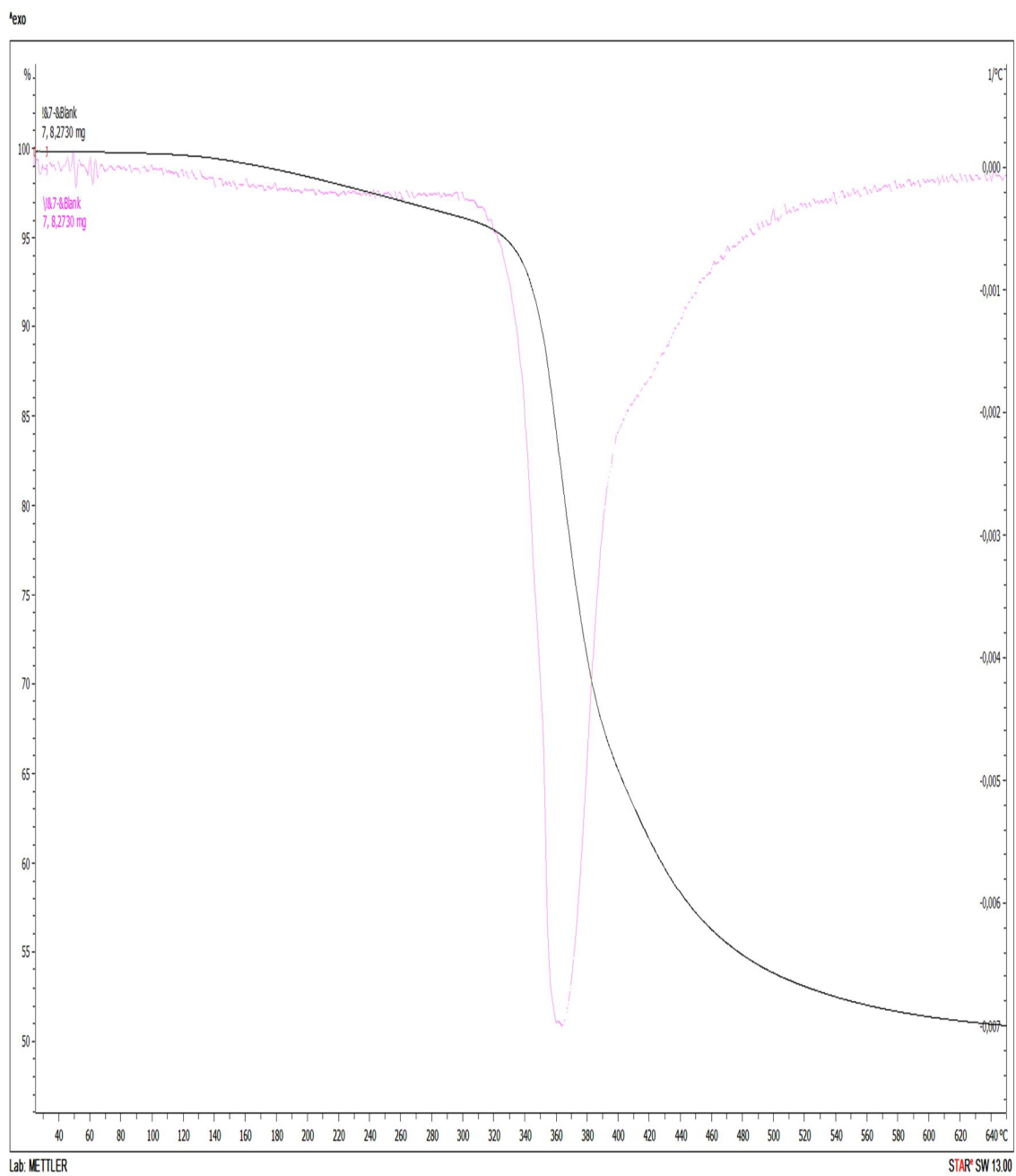
EKLER**EK-1** Saf ER'nin TGA grafiği

EK-2 5 numaralı kompozitin TGA grafiği

EK-3 PEG1 kompozitin TGA grafiği

EK-4 MPEG1 kompozitin TGA grafiği



EK-5 M5 kompozitin TGA grafiği

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hatice Hesna TUTAR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : KONYA 14.06.1989

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Cumhuriyet Üniversitesi, SİVAS	2015
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, KONYA	

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Bildiri

Güzel Kaya, G., Yilmaz, E., Tutar Demir, H., Deveci, H. “Epoxy composites including fly ash: mechanical, water sorption, adhesion, corrosion and thermal properties”, PhoBiA Annual Nanophotonics International Conference, Wrocław Poland, 24-26 April, 2017.