KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAŞHAŞ KAPSÜLÜ ATIĞI EKLENMİŞ EPOKSİ ZEMİN KAPLAMALARIN KARAKTERİZASYONU VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

EMRE ÇELİK

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAŞHAŞ KAPSÜLÜ ATIĞI EKLENMİŞ EPOKSİ ZEMİN KAPLAMALARIN KARAKTERİZASYONU VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

EMRE ÇELİK

Prof. Dr. Ayşe AYTAÇ
Danışman, Kocaeli Üniversitesi **……...**

Prof. Dr. Başar UYAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi **……..**

Doç. Dr. Ali Sinan DİKE
Jüri Üyesi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Tek. Üniv. **……**

Tezin Savunulduğu Tarih: 30.06.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım program kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi desteği ile desteklenmemiştir.

☐Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ……no'lu proje kapsamında maddi/altyapı desteği maddi desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Emre ÇELİK

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.

☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.

☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Emre ÇELİK

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, epoksi zemin kaplama sistemlerinde kullanılan bisfenol A diglisidil eter epoksi reçine ve biyobazlı epoksi reçineye haşhaş kapsül atıkları ilave edilerek adezyon, mekanik, ısıl, ıslanabilirlik özelliklerinin incelenmesi üzerine çalışma yapılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim süresince bana bilgi, deneyim ve rehberliğiyle yol gösteren, her aşamada desteğini esirmeyen çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Ayşe AYTAÇ'a sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca ders aşamasında bana yol gösteren ve destek olan kıymetli hocam Prof. Dr. Başar UYAR'a teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmalarıma başladığım andan itibaren bıkmadan bilgi ve deneyimlerini paylaşan, vaktini ayırıp her anlamda destek olan hocam Dr.Sema SAMATYA YILMAZ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında sağladıkları teknik imkanlarla testlerimin gerçekleşmesinde büyük rol oynayan Reaksiyon Kimya ailesine ve hammadde temini sağlayan Sar Kimya ailesine şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım sırasında testlerimin gerçekleşmesinde katkısı olan mesai arkadaşlarım Hakan BAYRAK, Betül Gamze ERTEKİN SURAL, Enis Erçin GÜNDÜZ ile desteğini hiç esirgemeyen manevi müdürüm Ezgi KIZILKONCA DURAN ve firmam Polisan Kansai Boya'ya teşekkürlerimi sunarım.

Profesyonel hayata başladığım ilk günden itibaren bana her anlamda rehberlik eden, gelişimime katkı sağlayan ve üzerimde büyük emeği olan ilk yöneticim Mukaddes AYDIN'a müteşekkirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan canım aileme sonsuz şükranlarımı sunarım. Haklarını hiçbir zaman ödeyemem.

Haziran-2025 Emre ÇELİK

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 6
2.1. Polimerler 6
2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması 7
2.2.1. Termoplastikler 7
2.2.2. Termosetler 8
2.3. Epoksi Reçineler 9
2.3.1. Bisfenol A Diglisidil Eter 10
2.3.2. Sikloalifatik Epoksi Reçineler 11
2.3.3. Novolak Epoksi Reçineler 11
2.3.4. Biyobazlı Epoksi Reçine 12
2.4. Çalışmada Kullanılan Malzemeler 13
2.4.1. Epoksi Reçine 13
2.4.2. Biyobazlı Epoksi Reçine 13
2.4.3. Alkil Glisidil Eter (AGE) 14
2.4.4. Amin Türü Sertleştirici 14
2.4.5. Haşhaş Kapsül Atığı 15
2.5. Çalışmada Kullanılan Malzemelerin İşlenme Yöntemleri 16
2.5.1. Presleyerek Kalıplama (Compression Molding) 16
2.5.2. Pultrüzyon (Profil Çekme) 17
2.5.3. Reçine Transfer Kalıplama 18
2.5.4. Otoklav Kalıplama 18
2.5.5. El Yatırması-Elle Tabakalama (Hand Layup) 19
2.5.6. Lif Sarma Yöntemi (Filament Winding) 19
2.6. Çalışmada Kullanılan Testler 19
2.6.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) 19
2.6.2. Çekme Testi 20
2.6.3. Termogravimetrik Analiz 22
2.6.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) 23
2.6.5. Adezyon Testi (Pull Off) 24
2.6.7. Temas Açısı 24
2.6.8. Su Emicilik Testi 25
2.6.9. Taramalı Elektron Mikroskobu 25
2.6.10. Polarize Optik Mikroskop 26
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI 27
4. MALZEME VE YÖNTEM 32
4.1. Malzemeler 32

4.2. Yöntem 33
4.2.1. Haşhaş Kapsüllerinin Tanecik Boyutunun Küçültülmesi 34
4.2.2. Adezyon Testi Öncesi Yüzey Hazırlığı ve Uygulama Süreci 34
4.2.3. Temas Açısı Testi İçin Numune Hazırlığı 35
4.2.4. Çekme Testi İçin Film Numunelerinin Hazırlanması 36
4.2.5. Diğer Testler İçin Numune Hazırlığı 38
4.3. Karakterizasyon Yöntemleri 38
4.3.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) 38
4.3.2. Çekme Testi 38
4.3.3. Termogravimetrik Analiz (TGA) 39
4.3.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre(DSC) 40
4.3.5. Adezyon Testi(Pull Off) 40
4.3.6. Temas Açısı 41
4.3.7. Su Emicilik Testi 41
4.3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 41
4.3.9. Polarize Optik Mikroskop (POM) 42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 43
5.1. EPKR ve BEPKR Kompozit Kaplamaların Karakterizasyon Sonuçları 43
5.1.1. FTIR Sonuçları 43
5.1.2. Çekme Testi 44
5.1.3. Termogravimetrik Analiz (TGA) 50
5.1.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) 54
5.1.5. Adezyon Testi (Pull Off) 56
5.1.6. Temas Açısı 57
5.1.7. Su Emicilik Testi 59
5.1.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) 60
5.1.9. Polarize Optik Mikroskop (POM) 63
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 66
KAYNAKLAR 69
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 76
ÖZGEÇMİŞ 77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Örnek monomer ve polimer 6
Şekil 2.2. Bisfenol A diglisidil eter reçinesinin kimyasal yapısı 10
Şekil 2.3. Sikloalifatik epoksi reçinenin kimyasal yapısı 11
Şekil 2.4. Novolak epoksi reçinenin kimyasal yapısı 12
Şekil 2.5. Amin ve epoksit yapılarının reaksiyonu 15
Şekil 2.6. Haşhaş bitkisinin doğal yapısı 16
Şekil 2.7. Haşhaş kapsül atığının görünümü 16
Şekil 2.8. Presleyerek kalıplama yönteminin şematik gösterimi 17
Şekil 2.9. Pultrüzyon prosesinin genel gösterimi 18
Şekil 2.10. Reçine transfer kalıplama prosesinin genel gösterimi 18
Şekil 2.11. FTIR analizinin aşamaları 20
Şekil 2.12. Çekme testi için kullanılan cihazın genel yapısı 21
Şekil 2.13. Gerilim-gerinim eğrisinde bölgeler 22
Şekil 2.14. Termogravimetrik analiz cihazının genel yapısı 23
Şekil 2.15. DSC eğrisinde yer alan termal geçiş noktaları 23
Şekil 2.16. Hidrofilik ve hidrofobik yüzeylere genel bakış 24
Şekil 2.17. SEM cihazının çalışma mekanizması 25
Şekil 2.18. Polarize optik mikroskobun şematik gösterimi 26
Şekil 4.1. Haşhaş kapsülü atıklarına uygulanan işlemler 34
Şekil 4.2. Metal yüzeye uygulanan işlemler 35
Şekil 4.3. Kaplama uygulama aplikatörü 35
Şekil 4.4. EPKR numunelerinin temas açısı testi amacıyla kaplandığı yüzeyler 36
Şekil 4.5. BEPKR numunelerinin temas açısı testi amacıyla kaplandığı yüzeyler 36
Şekil 4.6. Çekme testi için asetat kağıdına uygulanmış EPKR numunelerinin yüzey görüntüleri. 37
Şekil 4.7. Çekme testi öncesinde asetat kağıdından ayrılarak test numunesi haline getirilen EPKR filmleri 37
Şekil 4.8. Çekme testi öncesinde asetat kağıdından ayrılarak test numunesi haline getirilen BEPKR filmleri 37
Şekil 4.9. Çekme testi için kesilmiş ince filmler 37
Şekil 4.10. FTIR cihazının genel görünümü 38
Şekil 4.11. Çekme testi cihazı 39
Şekil 4.12. Çalışma kapsamında kullanılan TGA cihazı 39
Şekil 4.13. DSC cihazı 40
Şekil 4.14. Adezyon test cihazı 40
Şekil 4.15. Temas açısı test cihazı 41
Şekil 4.16. QUANTA 400F Field Emission SEM cihazı 42
Şekil 4.17. Polarize optik mikroskop 42
Şekil 5.1. BEPKR bazlı kompozit kaplama numunelerinin FTIR grafiği 43
Şekil 5.2. EPKR bazlı kompozit numunelerinin FTIR grafiği 44
Şekil 5.3. BEPKR numunelerinin çekme dayanımı grafiği 45
Şekil 5.4. EPKR numunelerinin çekme dayanımı grafiği 45

Şekil 5.5. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin Young modülü 46
Şekil 5.6. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin modülü..... 47
Şekil 5.7. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin kopmada uzama grafiği..... 47
Şekil 5.8. EPKR numunelerinin kopmada uzama grafiği..... 48
Şekil 5.9. BEPKR kompozit kaplama örneklerinin maksimum yükte çekme gerilmesi 49
Şekil 5.10. EPKR kompozit kaplama örneklerinin maksimum yükte çekme gerilmesi 49
Şekil 5.11. BEPKR numunelerinin TGA grafiği..... 51
Şekil 5.12. BEPKR numunelerinin DTG grafiği..... 52
Şekil 5.13. EPKR numunelerinin DTG grafiği 53
Şekil 5.14. EPKR numunelerinin TGA grafiği 54
Şekil 5.15. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin DSC grafiği..... 55
Şekil 5.16. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin DSC grafiği 55
Şekil 5.17. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin pull off grafiği..... 56
Şekil 5.18. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin pull off grafiği 57
Şekil 5.19. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin temas açısı grafiği..... 58
Şekil 5.20. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin temas açısı grafiği 58
Şekil 5.21. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin su emicilik grafiği..... 59
Şekil 5.22. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin su emicilik değerleri..... 60
Şekil 5.23. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş BEPKR'nin 40 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri 61
Şekil 5.24. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş BEPKR'nin 100 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri 61
Şekil 5.25. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin 40 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri 62
Şekil 5.26. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin100 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri 63
Şekil 5.27. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş BEPKR'nin 50 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri..... 63
Şekil 5.28. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin100 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri..... 64
Şekil 5.29. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin 50 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri..... 64
Şekil 5.30. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin 100 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri..... 65

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Bağ uzunlukları ve enerjileri 6
Tablo 2.2. Termoplastik reçinelerin karakteristik sıcaklıkları 8
Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler 32
Tablo 4.2. Epoksi reçine ve sertleştirici karışımlarının % bileşimleri 33
Tablo 4.3. Hazırlanan kaplama numunelerinin bileşimleri 33
Tablo 5.1. Farklı formülasyonlarla hazırlanan BEPKR numunelerinin TGA analiz değerleri 51
Tablo 5.2. Farklı formülasyonlarla hazırlanan EPKR numunelerinin TGA analiz değerleri 53

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$K_{ıslak}$: Kaplama numunesinin ıslak ağırlığı, (g)
K_{kuru} : Kaplama numunesinin kuru ağırlığı, (g)
T_c : Kristalizasyon sıcaklığı, (°C)
$T_{d,10}$: Ağırlıkça %10'luk ısıl bozunma sıcaklığı, (˚C)
$T_{d,5}$: Ağırlıkça %5'lik ısıl bozunma sıcaklığı, (˚C)
$T_{d,50}$: Ağırlıkça %50'lik ısıl bozunma sıcaklığı, (˚C)
T_g : Camsı geçiş sıcaklığı, (°C)
T_m : Erime sıcaklığı, (°C)
T_{mak} : Maksimum noktadaki ısıl bozunma sıcaklığı, (˚C)

Kısaltmalar

BEPKR : Biyobazlı Epoksi Reçine
DCAP : Deactivated Cement Asbestos Powder (Deaktive edilmiş çimento asbest tozu)
DGEBA : Diglisidil Eter Bisfenol A
DSC : Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)
DTG : Derivative Thermogravimetry (Türev Termogravimetrik Eğrisi)
ECH : Epichlorohydrin (Epiklorohidrin)
EEA : Epoksi Eşdeğer Ağırlığı
EPKR : Epoksi Reçine
ESO : Epoxidized Soybean Oil (Epoksitlenmiş Soya Yağı)
FTIR : Fourier Transform Infrared Spectroscopy (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi)
GG : Green Graphene (Yeşil Grafen)
HOFA : Heavy-Oil Fly Ash (Ağır Yağ Uçucu Külü)
NFA : Natural Fine Aggregate (Doğal İnce Agrega)
PE : Polietilen
POM : Polarized Optical Microscopy (Polarize Optik Mikroskop)
PP : Polipropilen
PS : Polistiren
PTFE : Politetrafloroetilen
PVC : Polyvinyl Chloride (Polivinil Klorür)
QFP : Quartz-Feldspar Powder (Kuvars Feldspat Tozu)
RFA : Recycled Fine Aggregate (Geri Dönüştürülmüş İnce Agrega)
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TETA : Trietilen Tetraamin
TGA : Thermogravimetric Analysis (Termogravimetrik Analiz)

HAŞHAŞ KAPSÜLÜ ATIĞI EKLENMİŞ EPOKSİ ZEMİN KAPLAMALARIN KARAKTERİZASYONU VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yapısal uygulamalarda, yüksek yapışma kabiliyeti, korozyona dayanıklılığı ve güçlü mekanik dayanımı nedeniyle epoksi reçineler tercih edilmektedir. En yaygın türü, bisfenol A ile epiklorohidrin tepkimesiyle elde edilen epoksi reçinelerdir. Ancak, bu tür reçineler insan sağlığı açısından risk taşıyabilir; özellikle endokrin sistem üzerinde bozucu etkiler gösterebilirler. Bu nedenle, daha güvenli ve çevreyle uyumlu alternatifler olarak biyobazlı epoksi reçineler geliştirilmektedir. Doğal kaynaklardan, örneğin soya yağı veya hint yağı gibi bitkisel yağlardan elde edilen bu reçineler, epoksidasyon yöntemiyle modifiye edilir ve geleneksel epoksi reçinelere kıyasla çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir seçenek sunarlar. Günümüzde hem doğal kaynaklı hem de endüstriyel atıkların geri dönüştürülerek değerlendirilmesi, sürdürülebilir üretim anlayışının temel unsurunu oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, epoksi esaslı sistemler üzerinde yapılan araştırmalarda da kendini göstermektedir. Son dönemde gerçekleştirilen çalışmalarda, standart epoksi reçinelerine çeşitli geri kazanılmış ve doğal malzemeler farklı oranlarda ve boyutlarda ilave edilerek adezyon, mekanik ve ısıl özellikler üzerinde etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada da literatürden farklı olarak bisfenol A epoksi ve biyobazlı bir epoksi reçinesine ağırlıkça %0,5, %1, %3, %5 ve %10 oranında haşhaş kapsül atıkları ilave edilerek kaplama malzemeleri üretilmiştir. Üretilen kaplama malzemelerinin adezyon, mekanik, ısıl, ıslanabilirlik, su emicilik ve yüzey özellikleri incelenmiştir. Adezyon, bisfenol A epoksilerde %1 takviyede 8,86 MPa, biyobazlı epoksilerde ise %5 takviyede 7,46 MPa ile en iyi seviyeye ulaştı. Temas açısı, %10 takviye ile standart reçinede 93,24°'den 86,33°'ye, biyobazlı reçinede ise 85,87°'den 47,83°'ye düşerek hidrofilikliği artırmıştır. Elde edilen sonuçlar, haşhaş kapsül atıklarının hem bisfenol A esaslı hem de biyobazlı epoksi reçinelerde, özellikle zemin kaplama astarlarında kullanılmaya uygun olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Adezyon**,** Biyobazlı Epoksi, Epoksi Zemin Kaplama, Haşhaş Kapsül Atığı.

CHARACTERIZATION AND INVESTIGATION OF PERFORMANCE PROPERTIES OF POPPY CAPSULE WASTE ADDED EPOXY FLOOR COATINGS

ABSTRACT

Epoxy resins are generally preferred in structural applications due to their high adhesion, corrosion resistance and mechanical strength. The most common type is epoxy resins obtained by the reaction of bisphenol A with epichlorohydrin. However, such resins can pose risks to human health; they can have disruptive effects especially on the endocrine system. For this reason, bio-based epoxy resins are being developed as safer and more environmentally compatible alternatives. Obtained from natural sources, such as soybean oil or castor oil, these resins are modified by epoxidation and offer a more environmentally sustainable option compared to traditional epoxy resins. Today, recycling and evaluation of both natural and industrial waste constitutes the basic element of sustainable production. This approach also shows itself in research conducted on epoxy-based systems. In recent studies, various recycled and natural materials were added to standard epoxy resins in different proportions and sizes and their effects on adhesion, mechanical and thermal properties were investigated. In this study, unlike literature, coating materials were produced by adding 0.5%, 1%, 3%, 5% and 10% poppy seed capsule waste to bisphenol A epoxy and a bio-based epoxy resin. Adhesion, mechanical, thermal, wettability, water absorbency and surface properties of the produced coating materials were examined. The adhesion reached its highest value at 8.86 MPa for bisphenol A-based epoxy with 1% reinforcement, and 7.46 MPa for bio-based epoxy with 5% reinforcement. With 10% reinforcement, the contact angle has decreased from 93.24° to 86.33° in the standard resin and from 85.87° to 47.83° in the bio-based resin, indicating an increase in hydrophilicity. The results obtained revealed that poppy capsule wastes are suitable for use in both bisphenol A based and biobased epoxy resins, especially in floor coating primers.

Keywords: Adhesion, Bio-Based Epoxy, Epoxy Floor Coating, Poppy Capsule Waste.

1. GİRİŞ

Polimer malzemelerin hafif, ucuz, mekanik özelliklerinin yeterli olması, kolay şekillendirilebilmesi, inert özellik göstermesi ve korozyona uğramamasından dolayı hem kimya alanında hem de makine, tekstil, fizik, tıp, biyokimya ve moleküler biyofizik gibi alanlarda da kullanımı son derece önemlidir. Polimerlerin endüstriyel ölçeklerde üretilmesinden önce giyinme ve dokumada yün, pamuk, keten gibi doğal malzemeler kullanılırken günlük yaşamda eşya üretiminde ise çelik, cam, odun, taş, tuğla vb. malzemeler kullanılmıştır. 1930'lu yıllardan itibaren insan yapımı ürünlerin çeşitliliğinde dikkat çekici bir artış yaşanmıştır. Bu artışın temelinde, polimer kimyasındaki ilerlemeler sonucunda farklı plastik, lif ve elastomer türlerinin sentetik yollarla üretilebilmesi ve yaygın biçimde kullanıma sunulması yatmaktadır. Polimer esaslı bu malzemeler, insan yaşamını kolaylaştıran özellikleri sayesinde günümüzde de çeşitli alanlarda önemini korumakta ve kullanım alanlarını genişletmeye devam etmektedir (Saçak, 2002).

Polimerler genel olarak termoplastik, termoset ve elastomer olmak üzere üç kısımda sınıflandırılır. Termosetler, genel olarak sıvı formdaki bir başlangıç malzemesinin ısı uygulamasıyla geri dönüşümsüz biçimde katı bir yapıya dönüşümüyle oluşan polimerlerdir. Bu sıvıdan katıya geçiş işlemi, sadece ısıyla değil; UV ışını veya elektron ışını gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Bu geçiş işlemine genellikle kürlenme denir (Pascault ve Williams, 2013). Poliester, vinilester, epoksi, fenolik ve bismaleimidler termoset polimerlere örnektir (Üçpınar, 2018). Termoplastikler ise ısıtıldığında çapraz bağ yapmayan, bunun yerine yumuşayan ve eriyerek yeniden şekillendirilmeye hazır hale gelen polimerlerdir. Bu özellikleri sayesinde defalarca işlenebilirler. Polieterimid, poliamid-imid ve polieter-keton gibi malzemeler termoplastiklere örnek verilebilir (Üçpınar, 2018). Bir diğer polimer türü olan elastomerler hem elastik hem de viskoz özellikler gösteren malzemeler olup bu yapıların temelinde, zayıf moleküller arası etkileşimlerle bir arada tutulan uzun polimer zincirleri bulunur (Alarifi, 2023). En dikkat çekici özelliklerinden biri, uygulanan gerilme kuvveti kaldırıldığında eski formlarına geri dönebilmeleridir (Alarifi, 2023). Gerildiğinde, zincirler arasındaki zayıf bağlar nedeniyle önemli ölçüde uzayabilirler ve bu da onlara esneklik ve yapışkanlık kazandırır (Alarifi, 2023).

Günümüzde polimerler; ambalaj, tekstil, tıp, otomotiv, boya ve kaplama gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Boya ve kaplama sektöründe ise, başta reçineler olmak üzere birçok yardımcı maddenin temel bileşeni olarak önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, polimerler söz konusu sektör için vazgeçilmez malzemeler arasında yer almaktadır. Boyalarda akrilik, epoksi, alkid, polyester-melamin ve silikon reçineler olmak üzere farklı türde reçine sistemleri bulunmaktadır.

Alkid reçineleri, yüzey kaplamalarında genellikle bağlayıcı, yapıştırıcı ve plastikleştirici işlevleriyle ön plana çıkarmaktadır. Bu reçineler; polioller ile maleik anhidrit, ftalik anhidrit veya izoftalik asit gibi anhidrit ya da asitlerin, yağ veya yağ asitleriyle gerçekleştirilen kondenzasyon polimerizasyonu yoluyla elde edilir. Uygulama sırasında daha az film kusuru göstermeleri ve düşük maliyetli olmaları, alkid reçinelerini kaplama endüstrisinde cazip bir seçenek haline getirmektedir (Dizman ve Kaçakgil, 2022). Ancak özellikle alkali ortamlarda kimyasal sıçramalara ve dökülmelere karşı sınırlı dayanım göstererek yüzeyin bozulmasına sebep olabilir. Alkid reçinelerde doymamış yağ asidi bölgeleri bulunduğundan kürlenme de bu sayede oto oksidatif mekanizmayla gerçekleşir (Ifijen ve diğ., 2022).

Akrilik reçineler, dış ortam koşullarına ve solventlere karşı yüksek dayanım gösteren, sert film oluşturabilen reçinelerdir. İzosiyanat veya epoksit reaktif gruplarını ihtiva eden polimerlerle, oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklık koşullarında etkileşerek, yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip uzun zincirli film yapıları oluşturabilirler (Yürekli, 1997).

Silikon reçineleri, inorganik ve organik maddeler arasında köprü görevi görerek, inorganik yüzeylerle güçlü bağlar kurabilen, dayanıklı, hidrofobik ve dirençli ağ yapıları oluşturur. Si–C ve Si–O bağları, kimyasal bozunma ve ayrışmaya karşı yüksek enerji gerektiren güçlü yapılar olup, doğada yaygın bulunmadıkları için biyolojik süreçlerde parçalanmaları zordur. Bu özellikleri sayesinde silikon bazlı kaplamalar, kimyasal çözücüler ve çeşitli yakıt türlerine karşı yüksek direnç gösterir. Ayrıca hem kimyasal hem de fiziksel dayanımları oldukça yüksektir (Montazeri ve diğ., 2022).

Epoksi reçineler, yapılarında epoksit grupları bulunduran ve yüksek reaktiviteye sahip özel bir prepolimer ya da polimer sınıfıdır. 'Epoksi' terimi ise genellikle bu maddelerin hem ham hem de kürlenmiş halleri için kullanılmaktadır (Verma ve diğ., 2020). Epoksi

reçineler, düşük kürleme büzülmesi, düşük artık gerilim ve düşük basınç gereksinimi gibi üretim avantajlarıyla öne çıkan termoset polimerlerdir. Uygun kürleme ajanı kullanılarak çapraz bağ yapısı kontrol edilebilir ve geniş bir sıcaklık aralığında uygulanabilir. Piyasada genellikle düşük viskoziteli sıvı ya da toz formda bulunur. Bu reçineler; yapısal yapıştırıcılarda, yüzey kaplamalarında, mühendislik kompozitlerinde ve elektrik yalıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Sukanto ve diğ., 2021).

Hindistan, Çin, Kore ve Japonya gibi Asya ülkeleri, esnek çevre düzenlemeleri ve üretimi destekleyen politikalar sayesinde epoksi reçine pazarında %41,8'lik payla öne çıkmaktadır. Özellikle inşaat sektöründeki ihtiyaçlar nedeniyle bölgede kullanım yaygındır. 2019–2024 döneminde Asya'da %6,9'luk yıllık büyüme kaydedilmiş, küresel üretim kapasitesi ise 4,69 milyon tona ulaşmıştır. Ulaşım, havacılık ve kompozit sektörlerindeki gelişmeler de talebi artırmaktadır (Joo ve diğ., 2025).

Epoksi reçineler bisfenol A, bisfenol F, sikloalifatik, tetraglisidil diaminodifenil metan, novolak, silikon içeren epoksi reçineler ve biyobazlı epoksi reçineler olarak sınıflandırılabilir (Sukanto ve diğ., 2021; Jin ve diğ., 2015). Bisfenol A diglisidil eter epoksi reçinesi, NaOH katalizörü varlığında bisfenol A ile epiklorohidrin arasındaki tepkime ile elde edilir ve bu tür reçinelerin, endüstriyel ve evsel uygulamalarda kullanılan epoksi reçinelerinin yaklaşık %75'ini karşıladığı tahmin edilmektedir (Sukanto ve diğ., 2021). Ancak Bisfenol A'nın hormonal sistemi etkileyen bir madde olması ve potansiyel sağlık riskleri taşıması, sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen alternatif bileşiklere olan talebi artırmaktadır (Xue ve diğ., 2021). Bunlardan en önemlisi biyobazlı epoksi reçinelerdir.

Biyobazlı epoksi reçineler, çevresel etkileri azaltmak ve fosil kaynaklara olan bağımlılığı azaltmak amacıyla geliştirilen sürdürülebilir alternatiflerdir. Bu reçineler, bitkisel yağlar ve şeker türevleri gibi yenilenebilir hammaddelerden elde edilir. Geleneksel epoksi reçinelerine kıyasla daha çevre dostu ve düşük toksisiteye sahip bileşiklerle değiştirilmesi üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Son yıllarda biyobazlı reçine sentezine yönelik çalışmalar artmış olsa da bu malzemelerin mekanik ve termal performanslarının istenen düzeyde tutulabilmesi için uygun doğal bileşiklerin seçimi kritik önem taşımaktadır (Gonçalves ve diğ., 2022).

Epoksi reçineler, esnekliğin yanı sıra iyi mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptir; bu özelliklerin daha da geliştirilmesi için çeşitli dolgu maddeleriyle takviye edilmektedir (Balguri ve diğ., 2020). Bu amaçla, literatürde epoksi kaplama reçinelerine; deaktive edilmiş asbest tozu (Campanele ve diğ., 2023), atık cam tozu (Chowaniec ve diğ., 2022), geri dönüştürülmüş agrega (Krzywiński ve diğ., 2022), Hindistan cevizi lifi (Sadowski ve diğ., 2021), nanosilika (Nikje ve diğ., 2012), geri dönüştürülmüş polimerler (Abden ve diğ., 2014) ve selüloz nanolifler gibi doğal ya da geri kazanılmış takviyeler eklenerek, yapışma, mekanik ve ısıl özelliklerin iyileştirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Gıda ve ilaç uygulamalarında kullanılmak üzere yetiştirilen ve bilimsel adı *Papaver somniferum* olan Afyon haşhaşının kapsülünde başta morfin alkaloidi olmak üzere kodein, tabein ve papaverin gibi alkoloidler olduğu bildirilmiştir. Türkiye, dünya genelinde yasal haşhaş üretiminde önemli bir konuma sahip olup, tıbbi ve bilimsel amaçlarla üretilen Afyon haşhaşının yaklaşık yarısını sağlamaktadır. Hindistan, Avustralya, Fransa, İspanya ve Macaristan da öne çıkan diğer üretici ülkelerdir. Türkiye'de bulunan ve yıllık 25.000 ton kapasiteye sahip Afyon Alkaloit Fabrikası, bu alandaki en büyük işleme tesisidir. Haşhaş kapsülünde alkaloidler işlendikten sonra yaklaşık %30-60 oranında selüloz, %14-40 oranında hemiselüloz ve %7-25 lignin içeren lignoselülozik atık ya tarım alanlarında gübre olarak kullanılır ya da bertaraf edilir (Yağcı ve diğ., 2022).

Bu yüksek lisans tez çalışmasının amacı, sürdürülebilir malzeme kullanımına katkı sağlamak ve endüstriyel atıkların katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesini teşvik etmek amacıyla, mikronize haşhaş kapsülü atıklarının epoksi reçineye ilave edilmesiyle oluşan kompozit kaplamanın yapışma, mekanik dayanım, ısıl kararlılık, ıslanabilirlik gibi temel fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu çalışmada, geleneksel olarak yaygın şekilde kullanılan standart bisfenol A bazlı epoksi reçinenin (DGEBA) yanı sıra, çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir malzeme kullanımını teşvik etmek amacıyla %27 oranında biyokarbon içeren biyobazlı bir epoksi reçine alternatifi de değerlendirilmiş ve DGEBA ile performans özellikleri kıyaslanmıştır. Bu yüksek lisans tez çalışması iki ana bölümden oluşmaktadır.

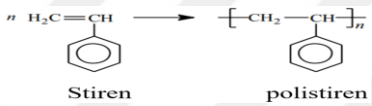
Birinci bölümde; yapışma testi için yüzey hazırlığı ve reçine karışımlarının metale uygulanması, temas açısı testi için alüminyum yüzeyde film oluşturulması, çekme testleri için ince film hazırlanması ve termal analizler için numune üretimi gibi test hazırlıkları gerçekleştirilmiştir.

İkinci bölümde, kompozitlerin karakterizasyonu ve performans değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda; adezyon özelliklerini belirlemek amacıyla pull-off testi, ısıl bozunma davranışını incelemek için termogravimetrik analiz (TGA), camsı geçiş sıcaklığına yönelik diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi, yüzey ıslanabilirliğini değerlendirmek için temas açısı ölçümü, mekanik performansı belirlemek amacıyla çekme testleri ve kimyasal yapı analizleri için FTIR testleri uygulanmıştır. Yüzey morfolojisini incelemek amacıyla Optik mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki farklı reçine matrisi için kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Polimerler

Polimerler, aynı yapıda çok sayıda tekrarlayan birimden oluşan uzun zincirli moleküllerdir. Şekil 2.1'de(Fried, 2014) örnek olarak polistren polimeri ve stiren monomeri gösterilmektedir. Polimer kelime olarak Yunanca'da çok anlamındaki "*poly"* ve parçalar anlamındaki "*meres"* kelimelerinden türetilmiştir. Protein, selüloz ve ipek gibi polimerler doğada doğal olarak bulunan polimerlerdir. Buna karşılık, polistiren, polietilen ve naylon gibi polimerler doğada bulunmaz; bu sebeple sentetik yöntemlerle üretilirler. Bazı durumlarda, doğada bulunan polimerler sentetik yöntemlerle de üretilebilir. Buna örnek olarak doğal kauçuk verilebilir (Fried, 2014).



Şekil 2.1. Örnek monomer ve polimer

Polimer yapılarında, tekrar eden birimlerin atomları birbirine güçlü kovalent bağlarla bağlanır. Tekrar eden birim sayısı birkaç tane olan molekül oligomer olarak adlandırılır. Oligomerlerin fiziksel özellikleri moleküler yapıdan tekrar eden birimlerin eklenmesi ya da çıkarılmasıyla değişmektedir (Ebewele, 2000).

Polimerik yapılarda güçlü kovalent bağların zayıf ikincil bağlarla arasındaki ayrışma enerjisi polimerin özelliklerini belirlemede önemlidir. Erime işleminde kovalent bağlı moleküler yapı çoğunlukla korunur. Tablo 2.1'de kovalent ve ikincil bağların tipik bağ enerjileri ile bağ uzunlukları gösterilmektedir (Ebewele, 2000).

Tablo 2.1. Bağ uzunlukları ve enerjileri

Bağ	**Enerji(kJ mol^{-1})**	**Bağ Uzunluğu(nm)**
Kovalent bağlar	300-500	0,15(C-C, C-N, C-O)
		0,11(C-H)
		0,135(C=C)
Van der Waals bağları	10	0,4
Dipol-dipol bağları	>10	0,4
Hidrojen bağları	10-50	0,3

2.2. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler doğal ve sentetik gibi kökenlerine göre, polimer yapılarına, polimerizasyon mekanizmalarına, hazırlama tekniklerine ve termal davranışlarına göre farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu bölümde termal davranışlarına göre yani termoplastik ve termoset sınıflandırılması açıklanacaktır.

2.2.1. Termoplastikler

Termoplastik terimi latince kökenli olup "ısı ile değiştirilebilen" anlamına gelmektedir. Bu tür malzemeler ısıtıldığında eriyebilir, soğutulduğunda katı forma dönüşebilir. Bu işlem tersinir olduğu için birçok kez tekrarlanabilir. Termoplastikler uygun çözücülerde çözünebilme yeteneğine sahiptir. Polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC), polistiren (PS), florkarbonlar termoplastik polimerler sınıfına dahildir. Dünyada en yaygın olarak kullanılan polimerler termoplastikler olup bu yaklaşık %85 oranındadır. Her termoplastik polimerin kendine özgü özellikleri vardır. Bazı termoplastik polimerler sert ve kırılgan olabilirken, bazıları esnek yapıda olabilir; bazıları ise kırılmadan önce belirli bir deformasyon eğilimindedir. Özellikle II.Dünya Savaşı'ndan sonra plastiklerin gelişimiyle beraber iyileştirmeler ve geliştirmeler polimer işleme makinelerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Günümüzde ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, üflemeli kalıplama ve kalenderleme gibi işleme yöntemleri yaygın olarak termoplastiklerin işlenmesinde kullanılmaktadır (Xanthos, 2010; Karakaya, 2020).

Termoplastikler yarı kristalin ya da amorf yapıda olmaktadır. Ancak çok özel koşullarda yüzde yüz kristalin formları elde edilebilmektedir. Yaygın olarak kullanılan termoplastik polimerlere ait karakteristik camsı geçiş (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve işleme sıcaklıkları Tablo 2.2'de verilmiştir (Berglund, 1998).

Tablo 2.2. Termoplastik reçinelerin karakteristik sıcaklıkları

Polimer	**Kimyasal Adı**	**Yapısı**	**T_g(°C)**	**T_m(°C)**	**İşleme Sıcaklığı(°C)**
Poliolefin	Polipropilen (PP)	Yarı kristal	-10	165	200-240
Poliamid	Poliamid 6,6 (PA6,6)	Yarı kristal	55	265	270-320
Poliamid	Poliamid12 (PA12)	Yarı kristal	35	180	220-260
Poliester	Polietilen tereftalat (PET)	Yarı kristal	70	265	280-310
Poliester	Polibütilen tereftalat (PBT)	Yarı kristal	20	240	260-290
Poliester	Polikarbonat (PC)	Amorf	150	-	280-330
Polisülfon	Polisülfon (PSU)	Amorf	190	-	300-350
Polisülfon	Polietersülfon (PES)	Amorf	220	-	300-320

2.2.2. Termosetler

Termoset reçinelerinde "termo" kürlenmenin ısı enerjisi ile ilerlediğini ve "set" ise makro boyutta geri dönüşü olmayan bir tepkimeyi belirtir (Peng ve Riedl, 1995). Termoset reçineler, başlangıçta genellikle sıvı formda ya da düşük ergime sıcaklığına sahip katı halde bulunur. Son ürün elde edilirken, bu reçineler ısı, katalizör ya da her ikisinin etkisiyle sertleşerek kalıcı bir yapı kazanır. Termoplastik reçinelerde olduğu gibi bir kalıp içerisinde şekillendirilebilir. Termoplastik reçinelerden farklı olarak, kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra katılaşan termoset reçineler eski hallerine geri döndürülemez. Bu malzemeler, termoplastikler gibi bir çözücüde çözünmez; ayrıca kürlendikten sonra ısıtılarak yumuşatılmaları veya eritilmeleri de mümkün değildir. Fakat dayanım sıcaklığının üzerine çıkıldığında polimer zincirlerini tutan bağlar ısıtmaya karşı

koyamayarak tersinmez olarak bozunur. Termoplastik polimerlerle karşılaştırıldığında, termoset reçineler daha sert ve dayanıklı bir yapıya sahiptir (Karakaya, 2020).

Epoksi, fenoller, vinilester, poliester ve poliüretanlar termoset reçinelere örnek olarak gösterilebilir. Termoplastik reçinelerle karşılaştırıldığında maliyetleri daha yüksek olup işlenmesi daha zordur. Sentetik polimerlerin yaklaşık %20 sini oluşturmaktadır. Ahşap kompozit ve havacılık kompozitleri alanlarında kullanımı yaygındır. Tarihsel olarak değerlendirildiğinde termosetlerin yapıştırıcı ve kalıplama işlemlerinde kullanımı termoplastiklere göre daha eskidir. Örnek olarak MÖ 1500 yıllarında Thothmes III dönemindeki Thebes Heykeli'inde ahşap kaplama duvar resmi verilebilir (Peng ve Riedl, 1995).

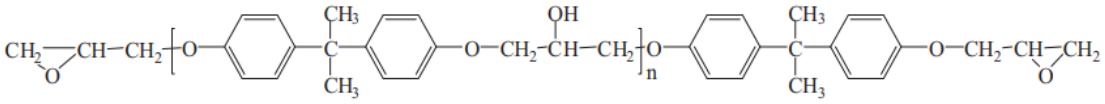
2.3. Epoksi Reçineler

Epoksi reçineler genellikle yapılarında birden fazla reaktif oksiran halkası içeren düşük molekül ağırlıklı prepolimerlerdir. 1909 yılında Prileschajew tarafından keşfedilmiştir (Jin ve diğ., 2015). Epoksi reçineler, mükemmel mekanik özellikleri, yüksek yapışma, yüksek ısı direnci ve mükemmel elektrik direnci nedeniyle kaplamalarda, yapıştırıcılarda, kompozitlerde, havacılık, otomotiv ve elektronik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Jin ve diğ., 2015; Necolau ve diğ., 2024). Epoksi reçineler termoset yapılara sahip sistemlerdir ve farklı kürleme ajanlarının yardımıyla kürlenebilirler. Bu reçinelerin yapısal özellikleri reçine ve kürleme ajanlarının kombinasyonuna bağlıdır (Jin ve diğ., 2015). 1946 yılında Ciba-Geigy Ltd. ilk kez epoksi reçineleri tanıtmıştır. Bu reçineler günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır ve sodyum hidroksit katalizörü varlığında bisfenol A ve epiklorohidrinin kondenzasyon tepkimesi ile sentezlenirler. 1960 yılında Lee ve Neville, diglisidil eter bisfenol A (DGEBA) monomer yapısını elde etmiştir (Paluvai ve diğ., 2014).

Modifiye edilmiş epoksi reçinelerinin yapısını ve özelliklerini tam olarak anlamak için, epoksi reçinelerinin sentezini önceden bilmek gerekir. Bir epoksi reçine sistemi, her iki ucunda reaktif bir epoksit halkası bulunan sıvı bir prepolimer zincirine sahip bir sertleştiriciden kademeli büyüme polimerizasyonuyla oluşturulan bir yapıdır (Mohan, 2013).

2.3.1. Bisfenol A Diglisidil Eter

Bisfenol-A'nın diglisidil eteri (DGEBA), epiklorohidrin ile bisfenol-A'nın bazik bir katalizör eşliğinde gerçekleştirdiği tepkime sonucu elde edilmektedir. Şekil 2.2'de bu bileşiğin kimyasal yapısı yer almaktadır. DGEBA reçinesinin karakteristik özellikleri, yapısındaki tekrar eden birim sayısına göre değişiklik gösterir. Molekül ağırlığı düşük olan yapılar genellikle sıvı formda bulunurken, molekül ağırlığı arttıkça bu maddeler daha viskoz ya da katı hale gelir (Jin ve diğ., 2015). Daha yüksek moleküler ağırlığa sahip diglisidil eterler, bisfenol A ile DGEBA'nın kimyasal tepkimeleri yoluyla sentezlenebilir (Verma ve diğ., 2020).



Şekil 2.2. Bisfenol A diglisidil eter reçinesinin kimyasal yapısı

Epiklorohidrin (ECH) ile bisfenol A'nın kimyasal tepkimeleri sonucunda oluşan ve genellikle BADGE ya da DGEBA olarak bilinen bileşik, bisfenol temelli epoksi reçineler arasında en yaygın olanıdır. Ayrıca, yüksek molekül ağırlığına sahip diglisidil eterler de benzer şekilde DGEBA ve bisfenol A'nın tepkimesiyle sentezlenebilir. Bu iki bileşik arasındaki tepkime süreci genellikle ön polimerizasyon (prepolymerization) olarak tanımlanır (Verma ve diğ., 2020).

Bu ön polimerizasyon ürünler küçük sayıda tekrar eden birimleri içeriyorsa renksiz ve viskoz sıvı formda olur. Çok daha fazla tekrar eden birimler varsa bu durumda epoksi ön polimer ürünleri oda sıcaklığında renksiz ve katı formda olur. Reçinelerin molekül ağırlığında yapılacak bir artış epoksit içeriğinde azalmaya sebep olur ve reçine özellik olarak termoplastiklere yaklaşır (Verma ve diğ., 2020). Günümüzde dünya genelinde kullanılan epoksi reçinelerinin yaklaşık %75'i DGEBA kökenlidir. Bisfenol A tabanlı epoksilerin bu denli yaygın tercih edilmesinin temel nedenleri, maliyetlerinin görece düşük olması ve pek çok uygulamada sağladıkları yeterli ya da yüksek düzeyde performanstır (Pham ve Marks, 2005).

Epoksi Eşdeğer Ağırlığı (EAA), bir mol epoksi fonksiyonel grubunu elde etmek amacıyla gerekli olan reçine miktarını ifade etmekte olup bu değer, kürlenme anında ya da

tepkimeye girme aşamasında epoksi reçinelerin stokiyometrik oranların belirlenmesinde kullanılır. Epoksit ekivalent ağırlığı Denklem 2.1 ile bulunur (Pham ve Marks, 2005).

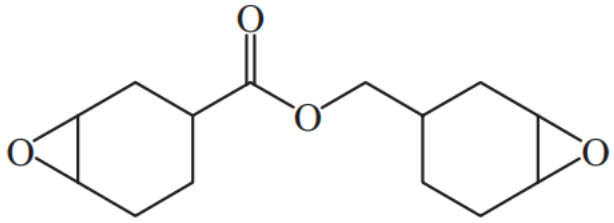
$$EAA = \frac{43,05}{\%Epoksit} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de 43,05 epoksitin mol ağırlıdır.

2.3.2. Sikloalifatik Epoksi Reçineler

1950'li yıllarda, Union Carbide firması tarafından sikloalifatik dienlerin diepoksitlerinden türetilen reçineler ilk kez ticari olarak piyasaya sunulmuştur. Alifatik omurganın yüksek oksiran içeriğiyle birlikte halojen içermemesi, düşük viskoziteye sahip, hava koşullarına karşı dayanıklı, düşük dielektrik sabitli ve kürlendikten sonra yüksek cam geçiş sıcaklığına (Tg) ulaşan reçinelerin elde edilmesini sağlar. Bu tür epoksi reçineleri, otomobil üst kaplamalarından UV dayanımlı kaplamalara, yüksek voltajlı hava koşullarına dayanıklı izolatörlerden asit gidericilere ve ayrıca elektronik ile optoelektronik uygulamalarda kullanılan kapsülleme malzemelerine kadar geniş bir yelpazede tercih edilmektedir (Pham ve Marks, 2005).

Bu reçineler, 3',4'-epoksisiklohekzil metil 3',4'-epoksisiklohekzankarboksilat, 3'-siklohekzenilmetil 3-siklohekzankarboksilat'ın perasetik asit varlığında tepkime vermesi sonucu oluşur (Jin ve diğ., 2015). Şekil 2.3'te sikloalifatik epoksi reçinenin kimyasal yapısı verilmiştir.

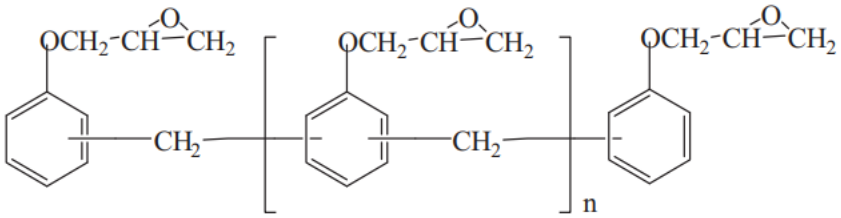


Şekil 2.3. Sikloalifatik epoksi reçinenin kimyasal yapısı

2.3.3. Novolak Epoksi Reçineler

Novolak reçineler formaldehit ve fenollerden sentezlenen polimerdir. Yapısal olarak bakalit ile ilişkili olsa da bakalitten daha fazla çapraz bağlı yapıdadır.

Formaldehit ve p/ m-kresol karışımıyla sentezlenmekte olup polimerizasyonun tamamlanmasından sonra uzaklaştırılan karboksilik asitler oksalik asit, toluen sülfonik asit, hidrolik asit veya sülfürik asit tarafından katalize edilmektedir (Verma ve diğ., 2020). Novolak epoksi reçinenin kimyasal yapısı şekil 2.4'te gösterilmektedir. Burada bulunan çoklu epoksit grupları yüksek çapraz bağ yoğunluğunu arttırarak termal, kimyasal ve solvent dayanımı sağlar (Jin ve diğ., 2015).



Şekil 2.4. Novolak epoksi reçinenin kimyasal yapısı

2.3.4. Biyobazlı Epoksi Reçine

Biyobazlı epoksi reçineleri (BER), bisfenol A'nın diglisidil eterinden, sikloalifatik veya novolak epoksi reçinelerinden elde edilen standart epoksi reçinelerinin aksine, bitkisel yağlar, şekerler, polisakkaritler, lignin ve lipitler gibi daha çevre dostu monomerlerden sentezlenebilir (Baroncini ve diğ., 2016; Mustapha ve diğ., 2019).

Biyobazlı sistemler, petrol türevi epoksi sistemlerine kıyasla sürdürülebilirlikleri, maliyet tasarrufları, rekabetçi ve çevre dostu özellikleri nedeniyle hem bilimsel hem de ticari uygulamalarda ilgi görmektedir (Mustapha ve diğ., 2019). Biyobazlı epoksi modifikasyonunda kullanılan yağlardan biri, yaklaşık %90 risinoleik asit içeren hint yağıdır (Gonçalves ve diğ., 2022). 12. karbon atomunda bir CO bulunması nedeniyle türevleştirmede etkilidir. Malzemelerin esnekliğini artırabilir. Başka bir yağ türü ise epoksitlenmiş soya fasulyesi yağıdır (ESO). ESO ve epoksi reçineleri iyi karıştığı için petrol türevi DGEBA'nın yerini alabilirler. Altuna ve meslektaşları, DGEBA reçinesine benzer özelliklere sahip olan ve metilhekzahidroftalik anhidrit (çapraz bağlayıcı), 1-metilimidazol (1-MI) (başlatıcı) ve ESO'yu %20 ile %100 arasında farklı oranlarda dahil ederek iyi darbe direnci sağlayan bir epoksi reçinesi sentezlemişlerdir (Gonçalves ve diğ., 2022).

2.4. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

2.4.1. Epoksi Reçine

Epoksi reçineler, yapılarında oksiran halkaları bulunduran polimerlerdir. Türkiye'de 1970 yıllarında özellikle petrokimya tesislerinde kullanılmaya başlanmıştır. Epoksi reçineler sıvı halden katı hale katalitik homopolimerizasyonla veya kürlenme ajanlarıyla tepkimeye girerek termoset hale gelmektedir (Özmeral, 2023). Bölüm 2.3'te epoksi reçinelerle ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

2.4.2. Biyobazlı Epoksi Reçine

Günümüzde epiklorohidrin üretiminde daha çevreci yöntemlerin benimsenmesi, DGEBA üretim sürecine belirli ölçüde sürdürülebilirlik kazandırmıştır. Ancak, BPA ve IPDA gibi potansiyel olarak zararlı bileşiklerin yerine daha güvenli monomerler ve kürleme ajanlarının tercih edilmesi, çevresel ve sağlık açısından daha kapsamlı bir iyileşme için gereklidir. Günümüzde ticari olarak kullanılan epoksi reçineler genellikle DGEBA, sikloalifatik epoksiler ya da Novolac temelli diglisidil eter bileşiklerinden üretilmektedir. Öte yandan, bitkisel yağlar ve nişastalar gibi yenilenebilir doğal kaynaklar; düşük maliyetli, çevreyle uyumlu yapıları ve kolay epoksileştirilebilmeleri sayesinde biyobazlı epoksi reçinelerinin sentezinde yapı taşı olarak dikkat çekmektedir (Baroncini ve diğ., 2016).

Epoksi reçinelerinin sentezinde BPA'ya alternatif olarak şeker, itakonik asit, kardanol, lignin, tanenler ve bitkisel yağ kaynaklı özel bileşikler kullanılarak birçok araştırma gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde, kürleme ajanları da modifiye bitkisel yağlar, biyobazlı asitler ve anhidritler, reçine kaynaklı imidoamin bileşikleri ile Tung yağı, lignin, biyobazlı fenoller ve reçine asitleri gibi yenilenebilir hammaddelerden elde edilebilmektedir (Xiang ve diğ., 2019).

Soya yağının epoksitlenebilir özellik göstermesi, bu yağ için yeni kullanım alanlarının ortaya çıkmasına olanak sağlamıştır. Epoksidasyon işlemi sırasında, doymamış soya yağı içerisindeki çift bağlar oksitlenerek oksiran halkaları oluşur. Bu işlem sonucu elde edilen ürün, günümüzde PVC polimerlerinde hem plastikleştirici hem de stabilizatör olarak geniş çapta kullanılmaktadır. Diğer yandan, epoksitlenmiş soya yağı (ESO) gibi bitkisel

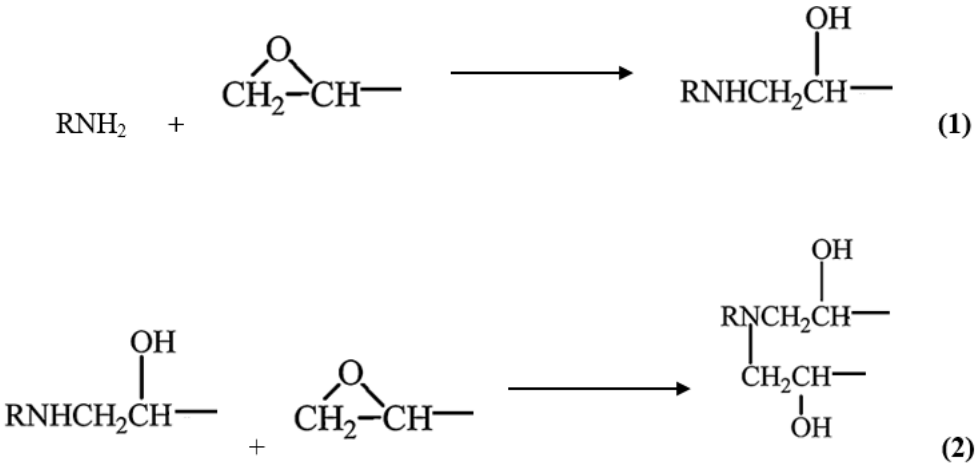
kökenli yağların epoksidasyonu, biyobazlı termoset epoksi reçinelerinin geliştirilmesi açısından önemli bir potansiyel sunar. Ancak, bitkisel yağların alifatik karakteri nedeniyle elde edilen epoksilerin mekanik dayanımı, birçok termoset uygulamasının gereksinimlerini tam olarak karşılayamamakta ve bu durum kullanım alanlarını kısıtlamaktadır (Zhang ve diğ., 2024).

2.4.3. Alkil Glisidil Eter (AGE)

Bisfenol A-epiklorohidrin ve epoksi novolak temelli reçineler genellikle sınırlı esneklik gösterir. Bu eksikliği gidermek amacıyla, darbe dayanımı ve uzama özelliklerini artıran, düşük viskoziteli esnek epoksi reçineler geliştirilmiştir. Bu bileşikler epoksi sistemine tam olarak entegre olur ve kürlenme sonrası yapının kalıcı bir parçası haline gelir. Ancak, maliyet açısından avantaj sağlamazlar. Yine de performans gereklilikleri doğrultusunda epoksi reçine formülasyonunun değiştirilmesi çoğu zaman kaçınılmazdır. Bu dilüentler reçinenin viskozitesini ayarlayarak, daha yüksek oranlarda dolgu malzemesi eklenmesine olanak sağlamak, kap ömrünü uzatmak ve tepkime sırasında oluşan ekzotermik ısıyı sınırlamak, darbe dayanımı ve soyulma direnci gibi belirli mekanik özellikleri geliştirmek, sisteme esneklik kazandırmak, yüzey gerilimini azaltarak ıslatma performansını artırmak gibi önemli işlevleri vardır (Monte, 1998).

2.4.4. Amin Türü Sertleştirici

Genel olarak epoksi reçineler bir amin fonksiyonel grupları yardımıyla kolaylıkla kürlenebilir. Amin kürlenme ajanları sikloalifatik, alifatik ve aromatik olmak üzere üç kısımda incelenir. Amin sertleştiriciler nükleofilik katılma reaksiyonu aracılığıyla epoksi halkalarıyla tepkimeye girerek kürlenme işlemini gerçekleştirir (Jin ve diğ., 2015). Şekil 2.5'te bir amin sertleştiricisinin bir oksiran halkasıyla tepkimesi gösterilmektedir. Aminlerin büyük çoğunluğu cildi tahriş edebildiği, kötü koku oluşturabildiği veya aşındırıcı duman yayabildiği için azaltılmış buhar basıncı veya modifiye edilmiş formlarda satılırlar (Van ve Puomi, 2007).



Şekil 2.5. Amin ve epoksit yapılarının reaksiyonu

2.4.5. Haşhaş Kapsül Atığı

Yapısında özellikle kapsül kısmında morfin, kodein, tebain, noskapin ve papaverin gibi alkoloitler barındıran Afyon haşhaşı (*Papaver somniferum L.*) ilaç ve gıda sektöründe kullanılmak üzere yetiştirilmektedir. Haşhaş yetiştirme yasal bir izne tabi olup Türkiye (%50 pay) başta olmak üzere dünyada Hindistan, Avustralya, Fransa, İspanya ve Macaristan gibi ülkelerde önemli üreticilerdir. Türkiye ve dünyanın en büyük kapasiteli fabrikası Afyonkarahisar'da bulunan Afyon Alkaloitleri Fabrikası yıllık olarak 25000 ton kapasiteyle sektöre hizmet vermektedir. Bu işletmede haşhaş kapsüllerinde bulunan alkaloitler alındıktan ve işlendikten sonra geriye işlenmiş haşhaş kapsül atıkları kalır ve birikir. Bu atıkların içinde kalan çok düşük miktarlardaki alkaloitlerde uzaklaştırılarak atığa ayrılır. Bu oluşan atıklar başta tarımsal gübreler olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu lignoselülozik yapılı atık içerisinde %30 ve %60 arasında selüloz, %14 ve 40 aralığında hemiselüloz ve %7 ve %25 aralığında lignin ile diğer kısımlarda inorganik yapılar bulunur (Yağcı ve diğ., 2021).

Son derece karmaşık ve heterojen bir yapıya sahip olan bu biyokütlede, mikrolifli yapılar oluşur ve hidrojen bağlarıyla selüloz zincirlerini birbirine bağlar. Mibrolifli yapılar ise şeker ve pektin gibi amorf yapıdaki hemiselülozla birbirine bağlanarak dış kısımlar lignin ile sarılır. Hemiselüloz yapılar ilaç, gıda, kozmetik, hidrojel, termoplastik ve kağıt sektöründe kullanılmaktadır. Biyoyakıt, organik asit ve şeker alkollere, hemiselülozun

içindeki şeker yapıları dönüştürülür(Yağcı ve diğ., 2021). Haşhaş bitkisinin ve haşhaş kapsül atıklarının görünümü Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Haşhaş bitkisinin doğal yapısı



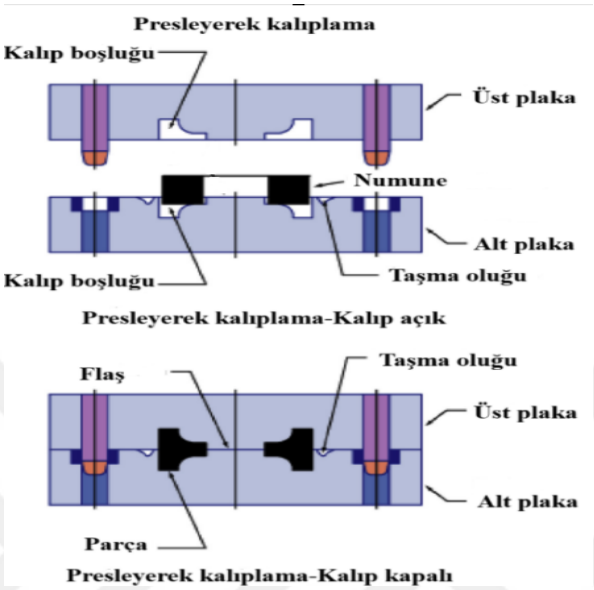
Şekil 2.7. Haşhaş kapsül atığının görünümü

2.5. Çalışmada Kullanılan Malzemelerin İşlenme Yöntemleri

2.5.1. Presleyerek Kalıplama (Compression Molding)

Presleyerek kalıplama işlemi önceden ısıtılmış kalıplama malzemesinin açık ve sıcak bir kalıp boşluğuna yerleştirilmesiyle başlayan bir kalıplama tekniğidir. Kalıbın üstü bir kuvvet ya da tapa ile kapatılarak malzeme ısıtılmış metal kalıp içerisinde tüm yüzeyi kaplayacak şekilde hidrolik pres yardımıyla sıkıştırılır. Malzemenin tamamı kürlenene kadar sıcaklık ve basınç sabit tutulur. Tercih edilmesinin başlıca nedenlerinden biri,

kalıplanan parçalar üzerinde düşük moleküler yönelme yaratmasıdır. Termoset yapılarda güçlü çapraz bağlama olduğu ve operasyon sıcaklığında katılaştığı için soğutmaya gerek yoktur. Şekil 2.8'de presleyerek kalıplama yöntemini gösterilmektedir (Alam ve diğ., 2014).

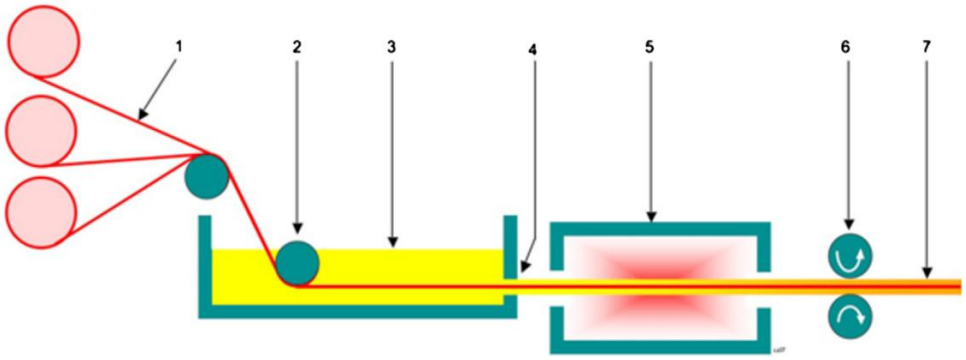


Şekil 2.8. Presleyerek kalıplama yönteminin şematik gösterimi

2.5.2. Pultrüzyon (Profil Çekme)

Pull (Çekme) ve ekstrüzyon kelimelerinin birleşiminden oluşan işleme yöntemine pultrüzyon (Profil çekme) adı verilmektedir. Pultrüzyon, elyaf ve reçine malzemelerinin şekilli bir kalıptan itilmesi işlemidir. Bu işleme yönteminde sabit kesitli bir kompozit malzemelerin sürekli üretimi gerçekleşir. Pultrüzyonda epoksi reçinelerin yanında polyester, poliüretan ve vinilester reçineler de kullanılabilir. Emprenye edilen lifler istenen ürünün kesitine göre şekillendirilmiş bir delikten çekilir.

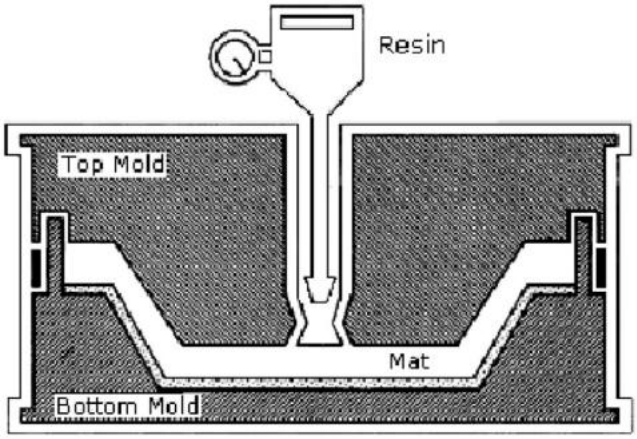
Şekil 2.9'da pultrüzyon prosesi gösterilmektedir. 1 numaralı kısım elyaf ya da dokuma elyaf matının rulosunu, 2 numaralı kısım gerilim rulosunu, 3 numaralı kısım reçine emprenye bölgesini, 4 numaralı kısım reçine emprenye edilen elyafın çıkış noktasını, 5 numaralı kısım kurutma ve ısı kaynağını, 6 numaralı kısım çekme mekanizmasını ve 7 numaralı kısım bitiş noktasını ve dolayısıyla elyafla güçlendirilmiş polimer çıkış noktasını göstermektedir (Alam ve diğ., 2014).



Şekil 2.9. Pultrüzyon prosesinin genel gösterimi

2.5.3. Reçine Transfer Kalıplama

Termoset işleme yöntemlerinden bir tanesi olan reçine transfer kalıplamada lif takviyesi kalıba yerleştirilerek kalıp kapatılır. Kelepçelendikten sonra reçine basınçla beraber kalıba enjekte edilir. Buradaki basınç atmosfer basıncından daha yüksektir. Bu işleme yöntemi iki pürüzsüz bir yüzey istendiğinde ya da düşük basınçlı kalıplama istendiğinde kullanılmaktadır. Burada elyaf takviyeli kumaş kalıba manuel yerleştirildikten sonra reçine karışımı kalıba dökülerek ısı ve basınç altında kürlenir. Şekil 2.10'da reçine transfer kalıplama sisteminin görseli verilmektedir (Alam ve diğ., 2014).



Şekil 2.10. Reçine transfer kalıplama prosesinin genel gösterimi

2.5.4. Otoklav Kalıplama

Otoklav kalıplama, şekillendirilmiş parçanın vakum, ısı ve inert gazların basıncıyla kürlendiği bir yöntemdir. Kalıplanmış parça, bir plastik torbaya konularak vakum

pompası yardımıyla havası atılır. Bu sayede hava ve uçucu ürünler uzaklaştırılarak otoklavda ısı ve inert gaz basıncıyla malzeme kürlendirilir. Bu yöntemde homojenlik çok iyidir ancak pahalıdır. Bu işlemde basınç, kompozit katmanları birbirine bağlayarak yüksek lif yüklerine sahip parçalar üretebildiği için havacılık sektöründe kullanımı yaygındır (Ouarhim ve diğ., 2019).

2.5.5. El Yatırması-Elle Tabakalama (Hand Layup)

El yatırması işlemi açık bir kalıplama olup yavaş ve zahmetli bir yöntemdir. Kaplamanın kalıp yüzeyine yapışmasını engellemek için bir anti yapışkan madde ile kaplanır. Astar tabakası oluşturmak için jel kaplama yapılır. Sonrasında ince elyaf takviye kumaş tabakası oluşturulur. Reçine fırça veya rulo ile uygulanarak elyaflara yerleştirilir. Yüzme havuzu, depolama tankları, tekne gövdeleri, küvet, kanal gibi yüzeyler bu yöntemle kaplanabilir (Ouarhim ve diğ., 2019).

2.5.6. Lif Sarma Yöntemi (Filament Winding)

Lif sarma işlemi reçine emdirilmiş cam, aramid veya karbon elyafların belirlenen desenlerde dönen bir mandrel üzerinde sarılmasıyla oluşan bir tekniktir. Elyaflar düşük viskoziteli bir reçine içinden geçirilir. Katmanların sarılmasının ardından kürleme işlemi tamamlanır ve ardından parça mandrelden ayrılır (Alam ve diğ., 2014).

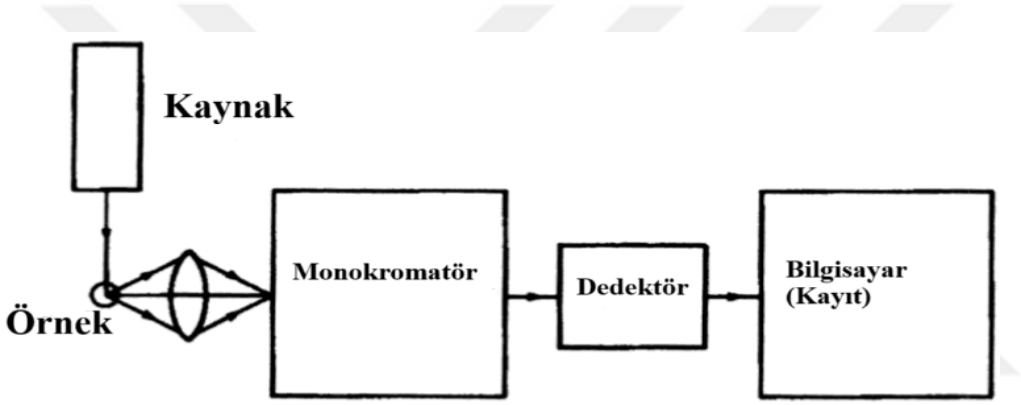
2.6. Çalışmada Kullanılan Testler

2.6.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Malzemenin yapısında bulunan fonksiyonel grupların belirlenmesinde en yaygın ve etkili analiz yöntemlerinden biri Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) yöntemidir. Bu yöntem, moleküller içindeki bağların titreşim enerjilerine dayanarak, belirli atomlar ya da atom gruplarına özgü salınım hareketlerini algılar. Elde edilen FTIR spektrumu, referans spektrumlarla karşılaştırılarak, malzemenin kimyasal bileşimi hakkında bilgi edinilmesini sağlar (Burches, 2005).

FTIR spektrometreleri, 1960'lı yıllarda ticari amaçlarla geliştirilmeye başlanmış ve zamanla teknolojik gelişmelere paralel olarak yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Organik ve inorganik sistemlerin yapısal analizlerinde yaygın olarak kullanılan, hızlı,

kolay ve tahribatsız bir analiz yöntemidir (Çebi, 2018). Şekil 2.11'de (Bower, 2002) FTIR analizinin aşamaları gösterilmektedir. Bu şekle göre FTIR analizinde, numuneden yansıyan kızılötesi dalga boyları eş zamanlı olarak dedektöre ulaşır. Bu sistemde, toplam iletilen ışın şiddetini ölçen dedektör, çift ışınlı bir girişim ölçerin iç yapısındaki aynalardan birinin konumuna bağlı olarak çalışır. Analiz sırasında hem malzeme hem de referans üzerinden geçen ışınların yoğunluğu dedektör tarafından algılanarak işlenir ve sonuçlar transmitans ya da absorbans spektrumu olarak elde edilir. Dedektöre ulaşan sinyallerin dalga boyları, bilgisayar destekli Fourier dönüşümü yardımıyla sayısal olarak çözümlenir (Bower, 2002).



Şekil 2.11. FTIR analizinin aşamaları

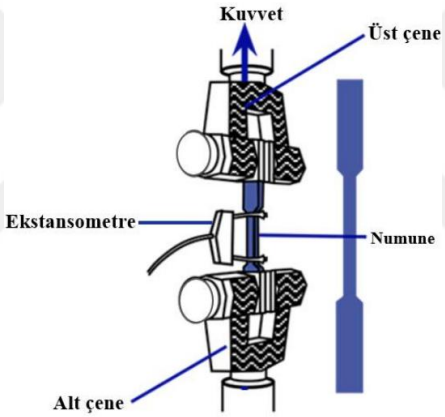
Kızılötesi spektroskopinin temelinde, malzemenin belirli dalga boylarındaki kızılötesi ışınları soğurması yer alır. Cihazdan gönderilen kızılötesi ışın, moleküllerdeki kimyasal bağların titreşim ve rotasyon hareketleriyle rezonansa girebilecek enerjiye sahipse, bu enerji molekül tarafından absorbe edilir. Ancak bu etkileşim, yalnızca dipol momentinde değişiklik gösteren moleküllerle gerçekleşebilir. Soğurulan enerji sonucunda moleküller çeşitli titreşimsel ve dönme hareketlerine girer; bu hareket türleri genellikle gerilme, bükülme, sallanma, makaslama ve salınım olarak sınıflandırılır (Pavia ve diğ.,2008).

2.6.2. Çekme Testi

Polimerik malzemelerin çeşitli dış etkilere karşı gösterdiği mekanik davranışları değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan testlerden bir çekme testidir. Çekme testi, malzemenin elastik ve plastik deformasyon altındaki tepkilerini analiz etmek için

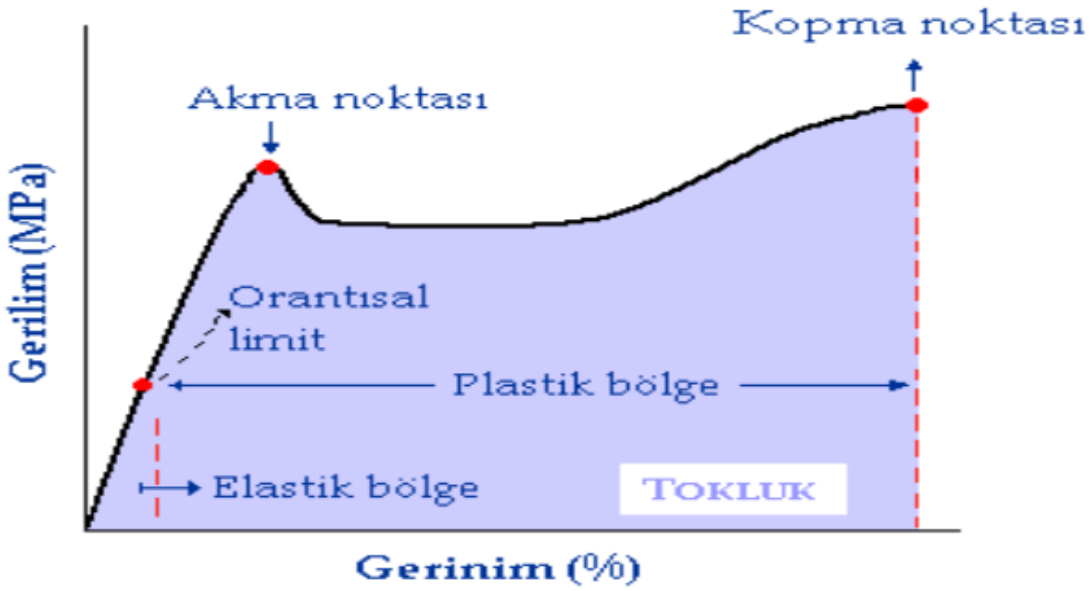
kullan ve “Universal test cihazı" olarak bilinen sistemlerde gerçekleştirilir. Şekil 2.12’de gösterildiği üzere, bu cihaz; sabit bir alt çene, hareket edebilen bir üst çene ve uzama ölçümlerinin yapılmasına olanak tanıyan bir ekstansometreden oluşmaktadır (Durmaz, 2023).

Şekil 2.12’de gösterilen çekme cihazındaki iki çene arasına test edilecek olan polimerik malzeme yerleştirilir. Sabit bir kuvvet yardımıyla tutturulan bu numune gerdirilerek gerilmeye karşı gerinim sonuçları elde edilir (Durmaz, 2023). Çekme testleri sayesinde bir malzemeye ait elastik modül, çekme ve kopma dayanımları ile kopmada uzama değerleri tespit edilebilir. Bunun dışında gerinim ve gerilim verileri grafikleştirilerek elde edilen gerinim-gerilim eğrileri sayesinde malzemenin mekanik özellikleri analiz edilebilir (Yılmaz, 2022).



Şekil 2.12. Çekme testi için kullanılan cihazın genel yapısı

Şekil 2.13'de(Öztürk, 2020) tipik bir gerilim-gerinim eğrisinin bölgeleri ve karakteristik noktaları gösterilmektedir. Elastik bölgedeki eğim dikkate alınarak hesaplanan değer elastisite modülü ya da Young’s modülü olarak adlandırılmaktadır. Bir sonraki bölge akma noktası, polimer zincirlerinin birbirine göre kaymaya başladığı ve kalıcı şekil değişiminin oluştuğu yeri tanımlamaktadır. Çekme testi sırasında elde edilen en yüksek gerilim değeri çekme dayanımı olarak adlandırılırken, malzemenin kopma anında kaydedilen gerilim ve uzama değerleri sırasıyla kopma gerilmesi ve kopma uzaması olarak ifade edilmektedir. Gerilim-gerinim eğrisinin altında kalan renkli alan ise polimerik malzemenin tokluğunu tanımlamaktadır (Nielsen ve Landel, 2020).

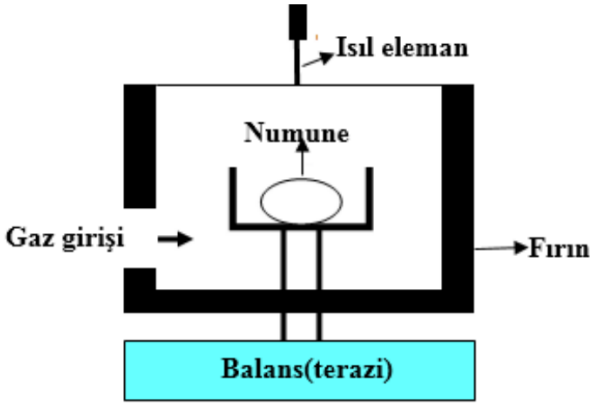


Şekil 2.13. Gerilim-gerinim eğrisinde bölgeler

2.6.3. Termogravimetrik Analiz

Termogravimetrik analiz (TGA), çok çeşitli malzemeleri karakterize etmek için kullanılan ısıl analiz yöntemlerinden biridir. TGA cihazının temel bileşenleri Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Alüminyum bir kroze içindeki numune, cihazın hassas terazine yerleştirilir ve istenilen sıcaklık aralığında analiz gerçekleştirilir. TGA, farklı türdeki malzemelerin ısıl özelliklerini incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılan termal analiz testlerinden biridir. TGA cihazının temel yapısı ve çalışma prensibi şekil 2.14'te gösterilmektedir. Test edilecek numune bir alüminyum kroze üzerine konularak hassas olarak tartılır. Çalışılmak istenen sıcaklık ayarlanarak ve ortam inert gazla doldurularak test gerçekleştirilir (Üçpınar, 2018).

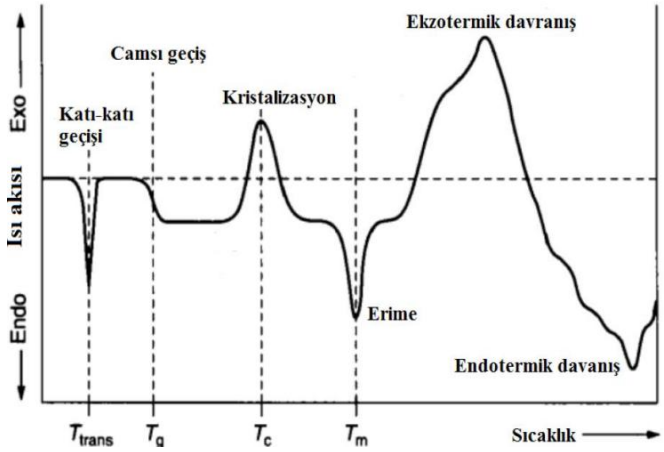
Termogravimetrik analiz ya da diğer adıyla termogravimetri belli bir sıcaklık programı altında ve kontrollü atmosfer koşullarında polimerlerin kütle değişiminin zaman veya sıcaklıkla ilişkili olarak kütle değişiminin belirlenmesini sağlayan bir ısıl analiz yöntemidir. Polimerlerin bileşimlerine ait nicel bilgilerin elde edilmesine olanak sağlayarak düşük moleküler ağırlığa sahip maddeler, polimer ve inorganik maddeler ısıtılarak üç gruba ayrışabilir (Merve Ercan Kalkan,2022) .



Şekil 2.14. Termogravimetrik analiz cihazının genel yapısı

2.6.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

Diferansiyel taramalı kalorimetre testi, edilecek bir numunenin belli bir sıcaklık programıyla kontrollü olarak analiz edildiği bir termal analiz yöntemidir. Bu testte referans ile numune arasında ısı akış farkı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür(Menczel ve Prime, 2009). Analizde prensip olarak numune ve referans sıcaklıklarının aynı tutulması gerekir. Eğer numunenin sıcaklığı referans sıcaklıktan ve bir endotermik durum ortaya çıkıyorsa cihaz pozitif sinyal üretirken, tam tersi durumda numune sıcaklığı referans sıcaklıktan düşük kalır ve cihaz negatif sinyal oluşturur. DSC testleri yapıldıktan sonra Şekil 2.15'de(Biçer, 2023) gösterildiği gibi erime ve kristallenme entalpileri, camsı geçiş, erime ve kristallenme sıcaklıkları ile termal bozunma ve çapraz bağlanma sıcaklıkları belirlenebilir (Nairn, 2003; Chartoff ve Sircar, 2005).



Şekil 2.15. DSC eğrisinde yer alan termal geçiş noktaları

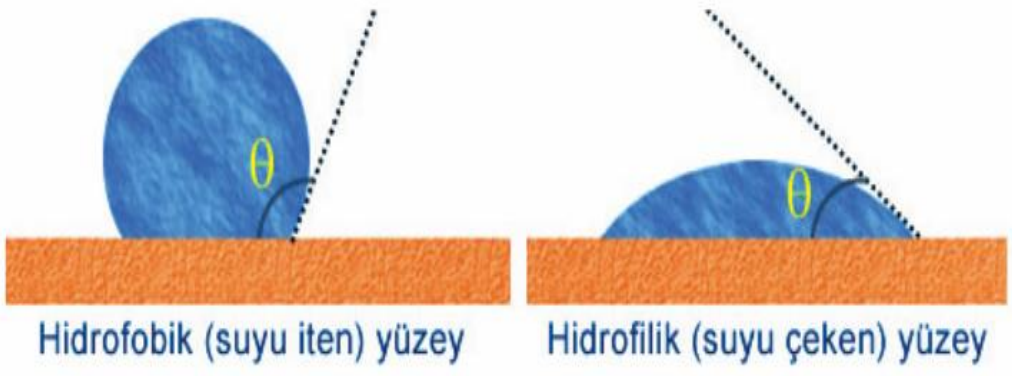
2.6.5. Adezyon Testi (Pull Off)

Bir boya veya kaplamanın metal veya beton bir yüzeye yapışma performansını ölçen bir test yöntemidir. Dolly adı verilen çekme aksları boyalı olan yüzeye kuvvetli bir yapıştırıcı vasıtasıyla yapıştırılır. Belli bir süre kürlendikten sonra hidrolik bir pime çekme kuvveti uygulanmasıyla dolly yüzeyden ayrılır. Bu ayrılma işlemi sonrası çekme dayanımı değeri dijital ekrandan okunur.

2.6.7. Temas Açısı

Temas açısı ölçümü, katı yüzeylerin suya karşı gösterdiği hidrofilik ya da hidrofobik özellikleri belirlemek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Sıvının katı yüzeye temas ettiği noktada oluşturduğu açı temas açısı olarak tanımlanmaktadır. Bu test yönteminde katı bir yüzeye uçucu özellikte olmayan ve viskozitesi düşük bir test sıvısı damlatılır. Bu sıvı damlasının molekülündeki kohezyon kuvveti katı yüzey etkileşim kuvvetinden güçlü ise bu durumda sıvının temas açısı büyük olacak ve ıslanabilirlik azalacaktır (Yılmaz, 2022).

Yüzeye damlatılan su damlası yüzeyde dağılma ve yayılma gösteriyorsa hidrofilik ve yüzeyde dağılmadan küresel bir formda duruyorsa hidrofobik demektedir. Şekil 2.16'da (Bağçeci,2010) hidrofobik ve hidrofilik yüzeylere ait görseller gösterilmektedir. Su damlasının yüzeyle yaptığı açı 5 ° den küçükse yüzeyler süper hidrofilik yapıda 150 ° den büyükse süper hidrofobik yapıdadır (Bağçeci,2010; Nosonovsky ve Bhushan, 2007).



Şekil 2.16. Hidrofilik ve hidrofobik yüzeylere genel bakış

2.6.8. Su Emicilik Testi

Herhangi malzemenin bünyesine sıvı alma yeteneğine emicilik denmektedir. Sıvı absorpsiyon kapasitesi olarak da isimlendirilmektedir. Bir malzemenin sıvı absorpsiyon kapasitesini bulmak için absorpladığı sıvı miktarı kuru ağırlığına oranlanır. Denklem 2.2'de ifade edilmektedir (EDANA, 2002; Çinçik, 2010; Yılmaz, 2022).

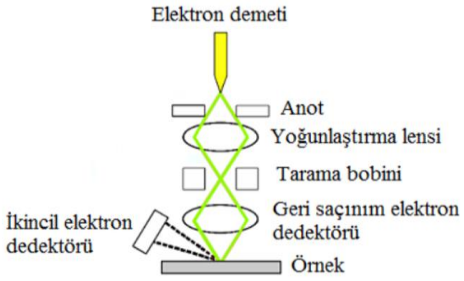
$$Sıvı\ absopsiyon\ kapasitesi(\%) = \frac{(K_{ıslak} - K_{kuru}}{K_{kuru}} X100 \qquad (2.2)$$

Burada; $K_{ıslak}$ kaplama numunesinin ıslak ağırlığını ve K_{kuru} ise kaplama numunenin kuru ağırlığını temsil etmektedir.

2.6.9. Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) bir polimerin morfolojik yapısını ve takviyelerin polimer içinde dağılımlarını incelemek ve mekanik bir olayın oluşturduğu etkiyi görüntülemek için kullanılan yaygın bir yöntemdir.

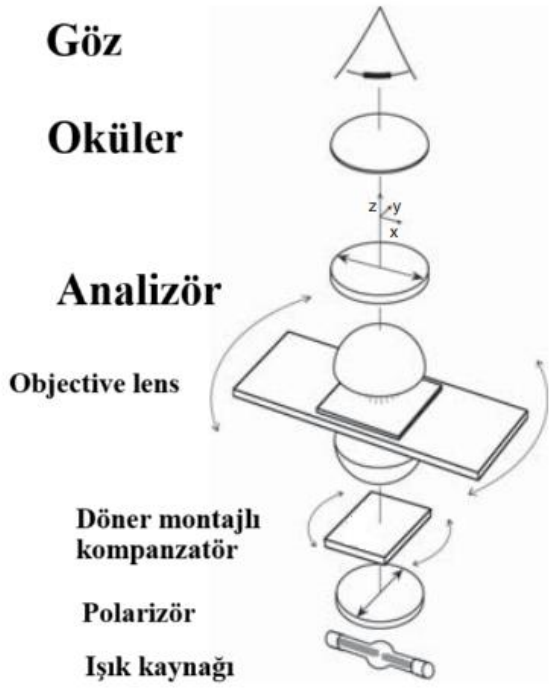
Şekil 2.17'de(Ünügül, 2020) bir SEM cihazının çalışma mekanizması gösterilmektedir. Bu mekanizmada cihazın üst tarafında bulunan elektron tabancası elektron demetlerini üreterek bunların dikey eksende ilerlemesini sağlar. Numuneye ulaşan bu elektron demetleri etkileşim göstererek numune üzerinden elektron ve X ışınlarını kopartır. Yüksek kinetik enerjiye sahip hızlandırılmış elektronlar, katı bir numune ile etkileşime girdiklerinde, ikincil elektron, geri saçılmış elektron, foton, görünür ışık ve ısı etmenler oluşarak gibi farklı sinyallerin ortaya çıkmasına neden olurlar. Dedektörde biriken ikincil elektron ve geri saçılmış elektronlar SEM görüntüsünü oluşmasına katkı sağlar (Reimer, 1998).



Şekil 2.17. SEM cihazının çalışma mekanizması

2.6.10. Polarize Optik Mikroskop

Polarize ışık mikroskobu, bir numunenin optik özelliklerinde gözlenen yerel anizotropileri incelemek amacıyla kullanılır. Kırılma indisindeki yönelime bağlı farklılıklar "çift kırılma", emilim davranışındaki yönelime bağlı değişiklikler ise "dikroizm" olarak tanımlanır. Bu tür yapısal özellikler taşıyan örnekler, çapraz konumlandırılmış doğrusal polarizörler arasında döndürüldüğünde, gözlemlenen ışık yoğunluğunda belirgin değişiklikler meydana gelir. Genellikle kullanılan ışık kaynakları (örneğin halojen lambalar, ark lambaları ya da LED'ler) doğal olarak polarize ışık üretmez. Bu nedenle, ışık demeti numuneye ulaşmadan önce, kondansatör optiklerinin önüne yerleştirilen ilk polarizatör yardımıyla tek düzlemde titreşim yönü belirlenmiş ışık elde edilir. Numuneden geçen bu ışığın polarizasyon durumunu değerlendirmek için yerleştirilen ikinci filtreye ise analizör adı verilir. Çoğu durumda, polarizatör ve analizör birbirine dik konumlandırılır; bu da numuneden geçen ışığın büyük kısmının analizör tarafından engellenmesine neden olur. Bu düzenleme sonucunda, yalnızca çift kırılganlık ya da optik anizotropi gibi özellikler taşıyan bölgeler parlak görünürken, diğer alanlar karanlık bir arka plan üzerinde seçilemez hale gelir. Şekil 2.18'de polarize optik mikroskopun çalışma mekanizması şematik olarak gösterilmektedir (Oldenbourgh,2013).



Şekil 2.18. Polarize optik mikroskobun şematik gösterimi

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Zemin kaplama uygulamalarında, mükemmel yüzey yapışması ve mekanik özellikleri sayesinde tercih edilen epoksi reçinelerle ilgili olarak, özellikle son yıllarda pek çok doğal ve geri dönüştürülmüş atığın bu reçinelere takviye edilerek performans özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar artmıştır. Bu çalışmalarda özellikle yapışma, mekanik ve termal özellikler üzerindeki etkiler araştırılmıştır.

Bu bölümde, tezin amacına uygun olarak yapılan literatür araştırmaları incelenmiştir. DGEBA epoksi reçineler ile biyobazlı epoksi reçinelere yönelik takviye uygulamalarının performans özelliklerini ele alan çalışmalar özetlenmiştir.

Campanale ve arkadaşları, epoksi reçinelerine geri 80 µm tanecik boyutunda geri dönüştürülmüş deaktive edilmiş çimento-asbest (DCAP) tozları ilave ederek, bu takviyenin termal ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, insan sağlığı ve çevre açısından zararlı olan çimento-asbest levhalarının termal işlemlerle deaktive edilmesiyle elde edilen tozların, zemin kaplamalarda kullanılan epoksi reçine sistemine belirli oranlarda eklenmesiyle basınç, çekme ve bükülme dayanımları, sertlik ve termal davranışların incelenmesi ve iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Böylece hem sağlık ve çevre açısından oluşturduğu risklerin azaltılması hem de atık malzemelerin ekonomik döngüye kazandırılması hedeflenmiştir. Çalışmada DGEBA esaslı dolgusuz bir epoksi reçine ve DGEBA esaslı barit dolgusu içeren reçine kullanılmıştır. En yüksek performans, %20 oranında takviye içeren baritsiz epoksi reçine numunesinde gözlemlenmiştir (Campanale ve diğ., 2023).

Chowaniec ve arkadaşları, DGEBA epoksi reçinelere farklı oranlarda ve farklı tanecik boyutlarında atık kuvars tozları ilave ederek, bu takviyelerin pürüzlü ve pürüzsüz zeminler üzerindeki adezyon performansını incelemişlerdir. Çalışmada, üç farklı fraksiyona sahip atık kuvars tozlarının miktarı ve parçacık boyutunun epoksi reçinelerin yapışma özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmış; ayrıca epoksi reçinenin zararlı bileşenlerini ve maliyetini azaltmak hedeflenmiştir. Bunun yanı sıra, atık kuvarsların geri dönüştürülmesiyle döngüsel ekonomiye katkı sağlanmıştır. Araştırma sonucunda, pürüzlü yüzeylerin adezyon performansının pürüzsüz yüzeylere kıyasla daha yüksek

olduğu ve kuvars takviyesinin yapışma performansını artırdığı belirlenmiştir (Chowaniec ve diğ., 2022).

Chowaniec ve arkadaşları, daha önce çimento kompozitlerinde takviye olarak kullanılmış ancak epoksi reçine kaplamalarda kullanılmamış, 63 μm'nin altında tanecik boyutuna sahip atık cam tozlarının epoksi reçinenin pull-off mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmış ve SEM analizleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmayla, atık cam tozlarının epoksi reçine performansı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Uygulamalar hem pürüzlü hem de pürüzsüz beton yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda, pürüzlü yüzeylerin adezyon özelliğinin pürüzsüz yüzeylere göre daha iyi olduğu; eklenen cam tozlarının ise epoksi reçineden substrata nüfuz ederek gözenekleri doldurduğu ve yapışmayı artırdığı gözlemlenmiştir (Chowaniec ve diğ., 2020).

Krzywiński ve arkadaşları, bisfenol A esaslı epoksi kaplama reçinesi ve poliamin sertleştiricisine geri dönüştürülmüş ince agrega (RFA) ile doğal ince agrega (NFA) ilave ederek, bu takviyelerin adezyon ve mikroskobik yapılar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada, hem yüzey ön hazırlık maliyetlerini azaltmak hem de atıkları değerlendirmek amacıyla, geri dönüştürülmüş RFA kullanılarak gelişmiş özelliklere sahip epoksi kaplama elde edilmesi hedeflenmiştir. Tüm reçine uygulamaları zımparalanmış beton yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonucunda, RFA içeren numunelerin pull-off dayanımının, NFA içeren numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Krzywiński ve diğ., 2022).

Krzywinski ve arkadaşları taş ocağı atıklarından çıkan kuvars feldispat tozunu (QFP) farklı oranlarda epoksi reçineye ilave ederek termal, mekanik ve adezyon performans özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada uygun ısıl iletkenliğe sahip kuvars-feldspat taşı kullanılarak termal şokun neden olduğu delaminasyon azaltılmakta ve reçine kaplamanın betona yapışması amaçlanmaktadır. Bu çalışmada bisfenol esaslı bir epoksi reçine, alifatik poliamin sertleştirici, %53,6 silika, %19,9 alümina ve %8,3 kireç içeren kuvars-feldspat tozu ve 100 mm kalınlıktaki bir beton yüzey kullanılmıştır. Tüm numunelerde Tg değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Kuvars-feldspat ile modifikasyondan sonra camsı geçiş ve kauçuksu durumun değişmediği ortaya çıkmıştır. Mekanik analizlerde %15 ve %30 QFP eklenmesiyle mekanik özelliklerinin arttığı görülmüştür.

Pull off dayanımları ER:3,08 mPa, ER-15%:3,59 mPa ve ER-30%:3,55 mPa olarak bulunmuştur (Krzywinski ve diğ., 2023).

Sadowski ve arkadaşları, epoksi zemin kaplama reçinesine farklı oranlarda Hindistan cevizi lifleri ekleyerek, beton yüzeylerdeki adezyon dayanımını ve mikroskobik özellikleri incelemişlerdir. Çalışmada, epoksi bağlayıcı matrisine belirli oranlarda Hindistan cevizi lifleri eklenerek, epoksi reçineli kaplama malzemelerinin beton yüzeylere yapışma dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Epoksi reçine ile fenalkamin sertleştirici 100:33 oranında karıştırılmış ve karışıma sırasıyla %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5 ve %3 oranlarında Hindistan cevizi lifleri ilave edilmiştir. Çimento hamurundan hazırlanmış beton yüzeylerde yapılan pull-off dayanım testlerinde, en iyi sonuç 3 MPa ile %1 Hindistan cevizi lifi takviyesi yapılan numunede elde edilmiştir. Takviye oranı arttıkça dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, çimento harcından hazırlanmış beton yüzeylerde yapılan testlerde en yüksek dayanım 3,48 MPa ile yine %1 oranında Hindistan cevizi lifi içeren numunede elde edilmiştir (Sadowski ve diğ., 2021)

Nikje ve arkadaşları, epoksi zemin kaplama reçinelerine farklı oranlarda nanosilika ilave ederek elde edilen kompozitlerin dinamik mekanik analizini, kopmada uzama, aşınma ve sertlik testlerini gerçekleştirmiş; ayrıca SEM görüntülerini incelemişlerdir. Nanosilikalar, epoksi polimer ile inorganik nanoparçacıklar arasında bağ oluşumunu sağlamak amacıyla aminopropiltrietoksisilan ile yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuştur. Çalışmada, SiO_2 nanoparçacıkları epoksi zemin kaplama formülasyonuna dahil edilerek fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla bisfenol A esaslı epoksi reçine, sikloalifatik poliamin sertleştirici, Amino A-100 (silan ajanı), nanosilika (AEROSIL 200) ve aseton kullanılmıştır. Nanosilika tozları epoksi matrise sırasıyla %0,5, %1, %1,5, %2, %2,5 ve %3 oranlarında eklenmiş; bu numuneler EP0, EP1, EP3, EP4, EP5 ve EP6 olarak adlandırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, nanosilika miktarı arttıkça camsı geçiş sıcaklığı, sertlik ve çekme dayanımı da artmış; buna karşılık Tan-Delta değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir (Nikje, 2012).

Abden ve arkadaşları, epoksi reçinelere geri dönüştürülmüş politetrafloroetilen (PTFE), PVC, PP ve PS polimerleri takviye ederek, bu kompozitlerin sürtünme ve aşınma dayanımlarını incelemişlerdir. Çalışmada, farklı tipte geri dönüştürülmüş termoplastik polimerlerle (PTFE, PVC, PP ve PS) takviye edilmiş epoksi matrislerinin tribolojik

performansını geliştirmek amaçlanmıştır. Geri dönüştürülmüş PP miktarı arttıkça sürtünme katsayısında artış gözlemlenmiş, en iyi sonuç 200 N yük altında, %50 (w/w) PP ilavesiyle elde edilmiştir. PS içeriği arttıkça sürtünme katsayısı artmakta, ancak PP'ye kıyasla daha düşük kalmaktadır. PVC takviyesi de sürtünme katsayısını artırmakla birlikte, bu artış PP ve PS'ye göre daha sınırlıdır. PTFE miktarındaki artış ise sürtünme katsayısında hafif bir artışa neden olmaktadır. Tüm geri kazanılmış polimerlerde aşınma genişliği, %20 oranında katkı ile minimuma inmekte, bu oranın üzerinde ise yeniden artış göstermektedir. Özellikle %20 oranında eklenen PTFE'nin, epoksi ile zayıf bir bağ oluşturması nedeniyle, en düşük aşınma genişliği değerini verdiği belirlenmiştir. Genel olarak PP hem sürtünme hem de aşınma dayanımı açısından en umut vadeden geri dönüştürülmüş katkı malzemesi olarak öne çıkmaktadır (Abden ve diğ., 2014).

Alamri ve arkadaşları, epoksi reçinelere %19, %28, %40 ve %46 oranında geri dönüştürülmüş selüloz ekleyerek eğilme dayanımı, eğilme modülü, kırılma tokluğu ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri araştırdılar. Eğilme dayanımı, eğilme modülü, kırılma tokluğu ve darbe dayanımı özellikleri, takviye miktarı arttıkça arttı. Ayrıca, su emiliminin geri dönüştürülmüş selüloz takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi araştırıldı. Burada, kuru koşullarla karşılaştırıldığında eğilme dayanımı, eğilme modülü ve kırılma tokluğu azalırken, darbe dayanımı değeri su emilimi ile hafifçe arttı (Alamri ve diğ., 2012).

Mayer ve diğerleri, metal yüzeyleri aseton ile temizleyerek, F80 alümina ve GH40 döküm çelik bilye püskürtme ile ön işleme tabi tuttu. Sonrasında bu metal yüzey üzerinde cam, karbon, aramid ve karbon aramid gibi farklı kumaşlara poliüretan ve epoksi matrislerini emdirdiler. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünün, pull-off dayanımını artırdığı gözlemlendi. Metal yüzeyde gerçekleştirilen pull-off testleri sonucunda en yüksek dayanım, poliüretan reçinesinde 5,78 MPa olarak ölçüldü. (Mayer ve diğ., 2022).

Sathish ve diğerleri, jüt, bambu ve hindistan cevizi liflerini epoksi matrislere takviye ederek çekme, eğilme ve termogravimetrik analizler gerçekleştirdiler. Jüt ve bambu lifleri daha yüksek selüloz içeriğine sahiptir ve bu da sırasıyla 129,3 ve 98 MPa çekme ve eğilme dayanım değerleri ile sonuçlanır. Tüm kompozitlerde 200 ila 500 °C arasında ağırlık kayıpları gözlemlendi (Sathish ve diğ., 2022).

Saeed ve arkadaşları, ham petrolün yakılmasıyla oluşan ve yapısında %90 oranında saf karbon bulunan ağır petrol uçucu külünün (HOFA) mekanik ve kimyasal direncini, epoksi kaplamaya %1, %1,6 ve %3,2 ekleyerek araştırdılar. %1,6 takviyeli kompozitler, saf polimere kıyasla sırasıyla %17 ve %11 oranında çekme ve Young's modülünde artış gösterdi. Kompozitler, kimyasal dirençlerini test etmek için 21 gün boyunca sodyum hidroksit, nitrik asit ve sülfürik aside tabi tutuldu. Takviyeli numune, saf epoksiden daha iyi kimyasal direnç gösterdi (Saeed ve diğ., 2023).

Samanta ve arkadaşları, tarımsal atıkların dönüştürülmesiyle üretilen Yeşil Grafan (GG) takviyesinin farklı oranlarda epoksi reçinesine eklenmesiyle oluşturulan epoksi kompozitlerin sertliğini, aşınmasını, sürtünme katsayılarını ve çekme özelliklerini araştırdılar. %0,5 GG takviyesi sertliği %130,15 oranında iyileştirdi ve aşınmada %34,55 oranında azalma gösterdi. Bu çalışmada, biyokütlenin pirolizi ile üretilen GG kullanılarak çevre dostu bir alternatif takviye oluşturulması amaçlandı (Samanta ve diğ., 2024).

Bezerra ve diğerleri, hacimce DGEBA/TETA (Trietilen tetraamin) kompozitlerine %30 arapaima balık pulu eklediler ve dinamik mekanik analiz (DMA), TGA ve DSC testlerini incelediler. DMA ve TGA testlerinde, arapaima balık pulu takviyeli epoksi reçinelerinin termal özellikleri, takviyesiz epoksi reçinelerinden daha iyi özellikler gösterdi. DSC testlerinde ısıl kararlılığı bozmadığı görüldüğünden, balık pullarının epoksi kaplama uygulamalarında kullanılmaya uygun olduğu sonucuna varıldı (Bezerra ve diğ., 2023).

Yapılan literatür araştırması sonucunda yapısında selüloz, hemiselüloz ve lignin içeren işlenmiş haşhaş kapsülü atıklarının epoksi kaplama reçinelerinde takviye malzemesi olarak kullanımına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez kapsamında, söz konusu atıkların hem bilimsel hem de endüstriyel açıdan değerlendirilmesi amacıyla, haşhaş kapsülü atıklarının hem standart DGEBA epoksi hem de biyobazlı epoksi reçineyi takviye edilerek kaplama malzemesinin performans özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez kapsamında kullanılan malzemeler ve bu malzemelere ait özellikler, hazırlanan karışımların formülasyonları ve üretim yöntemleri ile numunelerin karakterizasyonunda kullanılan analiz yöntemleri sunulmuştur.

4.1. Malzemeler

Standart epoksi reçinesi NAN YA Plastic Corporation tarafından NPEK 114 ticari adıyla, biyobazlı epoksi reçinesi KUKDO tarafından YD-128G ticari adıyla, köpük önleyici BYK firmasından (Almanya) BYK A 530 ve BYK 054 ticari adıyla, sikloalifatik amin sertleştirici PO.INT.ER SRL tarafından EPAMINE PC 1566 ticari adı altında tedarik edildi. Haşhaş kapsülü atıkları Afyon Alkaloitleri Fabrikası İşletme Müdürlüğü (Afyonkarahisar) tarafından temin edildi. Malzemelerin özellikleriyle ilgili bilgiler Tablo 4.1' de verilmektedir.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler

Malzeme	Ticari İsim	Tedarik Edilen Firma	Özellikler
DGEBA epoksi reçine	NPEK 114	NAN YA Plastic Corporation	Sıvı Yoğunluk: 1,11 g/ml EEA: 190-210 g/eq Viskozite: 600-1200 cps (25 °C)
Biyobazlı epoksi reçine	YD-128G	KUKDO	Sıvı Yoğunluk: 1,17 g/ml EEA: 184-190 g/eq Viskozite:11500-13500 cps (25°C)
Köpük kesici	BYK A 530	BYK	Sıvı Yoğunluk: 0,84 g/ml Silikonlu ve polimer yapılı
Köpük kesici	BYK 054	BYK	Sıvı Yoğunluk: 0,77 g/ml Silikonsuz ve polimer yapılı
Sikloalifatik amin sertleştirici	EPAMINE PC 1566	PO.INT.SRL	Sıvı Aktif hidrojen ekivalent: 95 g/eq Viskozite: 100-500 cps (25 °C)
Alkil glisidil eter(C12-C14)	-	Reaksiyon Kimya	Sıvı EEA: 340-370 g/eq Viskozite: 5-10 cps (25 °C)
Haşhaş kapsül atıkları	-	Afyon Alkaloitleri Fabrikası İşletme Müdürlüğü	Kırık yapılı

4.2. Yöntem

Bu yüksek lisans tez çalışmasında deneysel süreç dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, Tablo 4.2'de gösterildiği gibi epoksi reçine, köpük kesici ve dilüentler homojen şekilde karıştırılmıştır. Reçine ve sertleştirici karıştırıldıktan sonra sistem yaklaşık 30 ila 40 dakika içinde jelleştiğinden, haşhaş kapsüllerinin bu süreden önce mutlaka karışıma ilave edilmesi gerekmektedir. İkinci aşamada, elde edilen karışımlara belirli oranlarda sertleştirici ilave edilmiştir. Üçüncü aşamada, bu karışımlara mikronize edilmiş haşhaş kapsülü atıkları eklenmiştir. Son aşamada ise kaplama formülasyonlarının test edilebilmesi için numune hazırlıkları yapılmıştır. Tablo 4.2'de çalışmada kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici karışımlarının % bileşimleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Epoksi reçine ve sertleştirici karışımlarının % bileşimleri

Numune Kodu	NPEK 114	YD-128G	BYK A 530	BYK 054	Alkil Glisidil Eter	EPAMINE PC 1566
EPKR	67,32	-	0,34	0,34	-	32,00
BEPKR	-	61,98	0,34	-	4,69	33,00

Tablo 4.2'de yer alan karışımların üzerine Tablo 4.3'de gösterilen miktarlarda haşhaş kapsül atıkları ilave edilerek karıştırılmıştır. Tablo 4.3 hazırlanan kaplama numunelerinin bileşimleri ve kodlarını göstermektedir. Örneğin EPKR10 kodlaması ile standart epoksi reçineye (EPKR) %10 haşhaş kapsülü atığı eklenerek hazırlanan kaplama numunesi gösterilmiştir. BEPKR kısaltması da biyobazlı epoksi reçine kullanılarak hazırlanan kompozit kaplama örneklerinin kodlamasında kullanılmıştır.

Tablo 4.3. Hazırlanan kaplama numunelerinin bileşimleri

Numune Kodu	Haşhaş Kapsül Atığı(%w/w)
EPKR0	-
EPKR05	0,50
EPKR1	1,00
EPKR3	3,00
EPKR5	5,00
EPKR10	10,00
BEPKR0	-
BEPKR05	0,50
BEPKR1	1,00
BEPKR3	3,00
BEPKR5	5,00
BEPKR10	10,00

4.2.1. Haşhaş Kapsüllerinin Tanecik Boyutunun Küçültülmesi

Bu tez çalışması kapsamında Afyon Alkaloidleri Fabrikası İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen işlenmiş haşhaş kapsül atıkları Şekil 4.1'deki gibi kırık formda temin edilmiştir. Bu atıklar, bir öğütücü yardımıyla öğütüldükten sonra, titreşimli elek sistemi kullanılarak 125 µm'nin altındaki tanecik boyutlarına göre ayrılmıştır. Haşhaş kapsülünün nihai formu Şekil 4.1'te gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Haşhaş kapsülü atıklarına uygulanan işlemler

4.2.2. Adezyon Testi Öncesi Yüzey Hazırlığı ve Uygulama Süreci

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında adezyon testleri Şekil 4.2'te gösterilen 30x30 cm boyutlarında ve 3 mm kalınlığındaki bir kara sac yüzeyde gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.3'te formülasyonları verilen epoksi zemin kaplama numuneleri metale uygulanmadan

önce yüzeylere bazı işlemler yapılmıştır. Kara sac yüzey, teknik aseton kullanılarak kir, yağ ve diğer kalıntılardan arındırılmıştır. Ardından, metal yüzey bir P80 zımpara ile pürüzlendirilmiş ve yüzeyde oluşan tozlar dikkatlice temizlenmiştir. Bu yüzey işlemlerinden sonra Tablo 4.3'te hazırlanan kaplama numuneleri bir uygulama ekipmanıyla 1 mm kalınlığında metal yüzeye uygulanmıştır. 7 gün boyunca 25 °C koşullarında kürlenmeye bırakıldı.



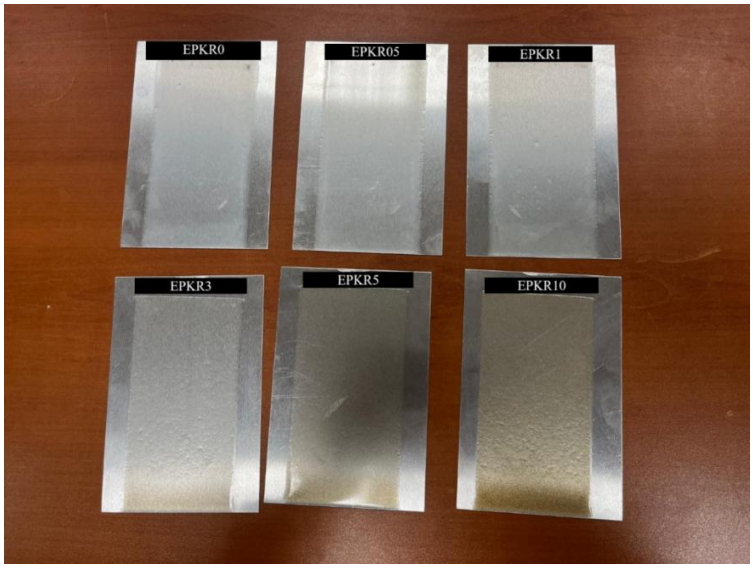
Şekil 4.2. Metal yüzeye uygulanan işlemler

4.2.3. Temas Açısı Testi İçin Numune Hazırlığı

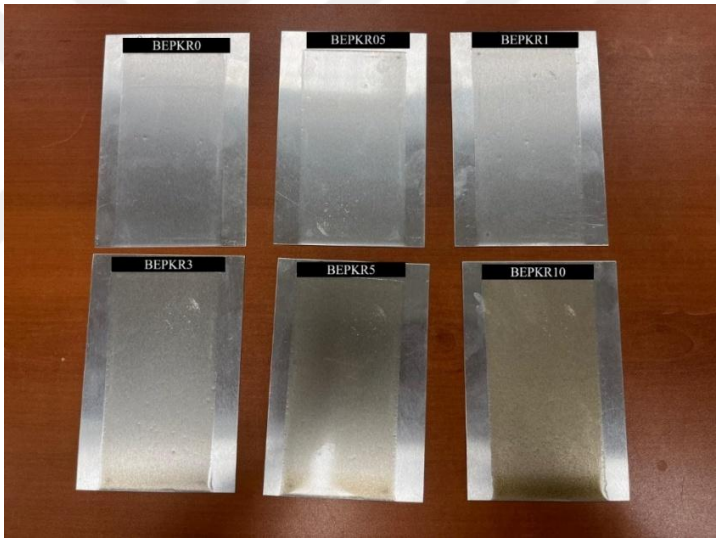
Bu tez çalışması kapsamında temas açısı testleri ince alüminyum yüzeylerde gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.3'te formülasyonları verilen epoksi kaplama numuneleri alüminyum panellere Şekil 4.3'te gösterilen bir kaplama aplikatörü yardımıyla 200 mikron yaş film kalınlığında uygulandı. Uygulanan numuneler 7 gün boyunca 25 °C'de kurumaya bırakıldı. Film uygulaması yapılan yüzeyler Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Kaplama uygulama aplikatörü



Şekil 4.4. EPKR numunelerinin temas açısı testi amacıyla kaplandığı yüzeyler

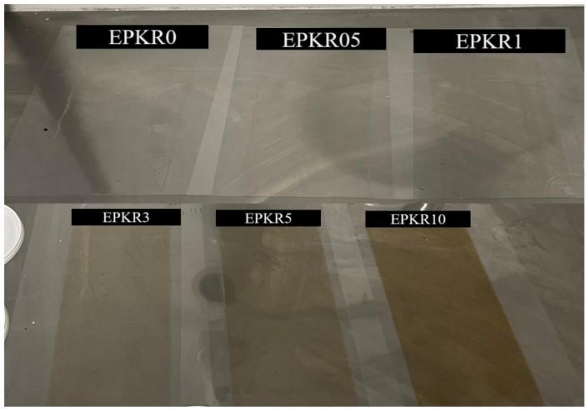


Şekil 4.5. BEPKR numunelerinin temas açısı testi amacıyla kaplandığı yüzeyler

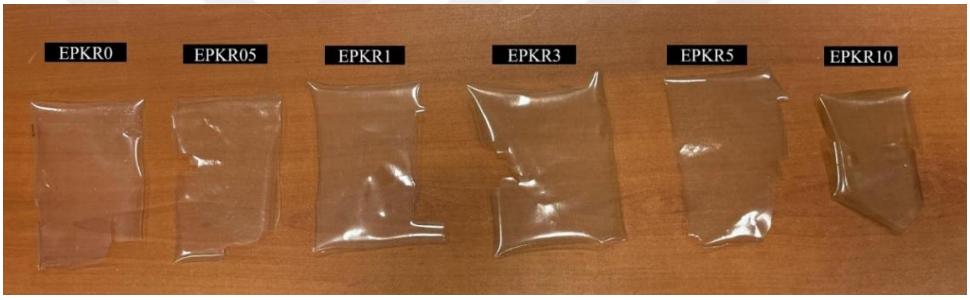
4.2.4. Çekme Testi İçin Film Numunelerinin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında çekme testleri, 200 µm kalınlığında hazırlanan epoksi film numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.3'te kompozisyonları verilen epoksi kaplamalar, Şekil 4.3'te gösterilen kaplama aplikatörü kullanılarak asetat kağıdı üzerine 200 µm yaş film kalınlığında Şekil 4.6'de gösterildiği gibi uygulanmıştır. Uygulamanın ardından numuneler, 25 °C'de 7 gün süreyle kurumaya bırakılmıştır. Kuruma süresi sonunda kaplama tabakaları, film bütünlüğü bozulmadan asetat yüzeyinden çıkarılmıştır.

Elde edilen filmler Şekil 4.7 ve 4.8'de gösterilmektedir. Daha sonra bu filmler 7x1.5 cm boyutlarında kesilerek şekil 4.9'te gösterildiği gibi çekme testine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.6. Çekme testi için asetat kağıdına uygulanmış EPKR numunelerinin yüzey görüntüleri.



Şekil 4.7. Çekme testi öncesinde asetat kağıdından ayrılarak test numunesi haline getirilen EPKR filmleri



Şekil 4.8. Çekme testi öncesinde asetat kağıdından ayrılarak test numunesi haline getirilen BEPKR filmleri



Şekil 4.9. Çekme testi için kesilmiş ince filmler

4.2.5. Diğer Testler İçin Numune Hazırlığı

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında TGA, DSC, SEM, POM, FTIR ve sıvı emicilik testleri çekme testi için hazırlanan filmlerden yapılmıştır.

4.3. Karakterizasyon Yöntemleri

4.3.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

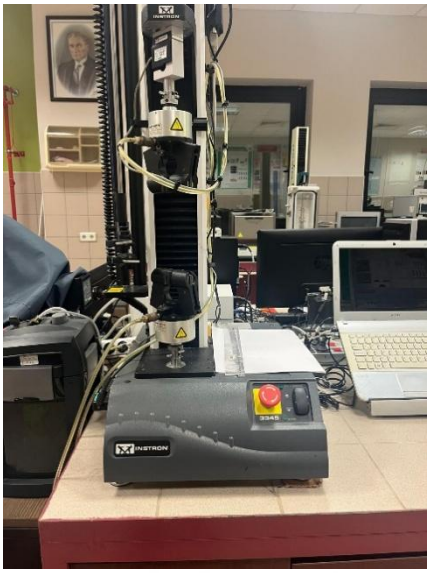
Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında numunelerin kimyasal yapılarında meydana gelen etkileşim ve değişimleri incelemek için Şekil 4.15'te gösterilen Perkin Elmer Spectrum 100 marka cihaz ile FTIR testi yapılmıştır. Takviye edilen malzemenin epoksi kaplama numuneleri üzerinde etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. 600-4000 cm^{-1} dalga boyları arasında FTIR spektrumları elde edilmiştir.



Şekil 4.10. FTIR cihazının genel görünümü

4.3.2. Çekme Testi

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında numunelerin mekanik özelliklerini tespit edebilmek amacıyla Şekil 4.11'da gösterilen Instron markalı evrensel çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme testleri ASTM D882 standardına göre 10 mm/dk çekme hızı ile oda koşullarında yapılmış ve her kompozisyon için 5 numune testi gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçların ortalama değerleri alınarak çekme gerilmesi, kopmada uzama, Young modülü ve gerilim-gerinim değerleri raporlanmıştır.



Şekil 4.11. Çekme testi cihazı

4.3.3. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Elde edilen kaplama numunelerinin ısıl bozunma sıcaklıklarını belirlemek amacıyla Şekil 4.12'de gösterilen Mettler Toledo TGA 1 Star System cihazı kullanılmıştır. Hazırlanan kompozit kaplamaların TGA analizleri, 25 ila 700 °C aralığında 10 °C /dk ısıtma hızıyla gerçekleştirildi. Termal testler sırasında, ortamı inert hale getirmek için 30 ml/dk azot gazı beslenmiştir. TGA eğrisinden örneklerin %5, %10 ve %50 bozunma sıcaklıkları bulunmuştur. 700 °C'de bıraktığı kalıntı yüzdesi belirlenmiştir. Türev eğrilerinden maksimum bozunma sıcaklıkları tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Çalışma kapsamında kullanılan TGA cihazı

4.3.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre(DSC)

Elde edilen kaplama numunelerin ısıl özelliklerini belirlemek amacıyla Şekil 4.13'te gösterilen Mettler Toledo DSC 1 Star System cihazı kullanılmıştır. DSC testi -20 ile 100 °C aralığında, azot atmosferi altında ve 10 °C/dk ısıtma hızıyla yapıldı. T_g değerleri belirlendi.



Şekil 4.13. DSC cihazı

4.3.5. Adezyon Testi(Pull Off)

Yüzeye uygulanmış epoksi kaplama numunelerinin yapışma performansını incelemek için Şekil 4.14'te gösterilen PosiTest AT-A cihazı kullanılmıştır. ASTM 4541-22 standardına göre yapılmıştır. Kaplama ile alt tabaka arasında yapışma dayanımını belirlemek için 20 mm çapındaki silindirik dolly parçalar kullanılmıştır. Hazırlanan yüzeylerde 5 farklı tekrar yapılmıştır.



Şekil 4.14. Adezyon test cihazı

4.3.6. Temas Açısı

Alüminyum yüzeye uygulanmış kaplama örneklerinin ıslanabilirlik özellikleri, damla yöntemi kullanılarak Şekil 4.15'te gösterilen Attention Theta Lite markalı temas açısı cihazı kullanılarak belirlendi. Test sıvısı olarak damıtılmış su kullanıldı. Ortalama bir temas açısı değeri elde etmek için her örnekte farklı lokasyonlarda en az 10 ölçüm yapıldı.



Şekil 4.15. Temas açısı test cihazı

4.3.7. Su Emicilik Testi

Takviyeli epoksi filmlerin içinde bulunan haşhaş kapsül atıklarının ve takviyesiz epoksi filmlerinin su emme performansını değerlendirmek için su absorpsiyon testleri yapıldı. 1 cm x 1 cm boyutlarında kesilen ince filmlerin kuru ağırlığı ölçüldü. Sonrasında bir cımbız yardımıyla beher içinde bulunan saf suya daldırıldı ve 1 dk boyunca bekletildi. Saf sudan çıkarılan numunelerin her iki tarafı 2 ve 3 saniye arası çevrilerek üzerindeki su alınmıştır. Sonrasında ıslak ağırlığı tartılmıştır. Yaş ağırlık ve kuru ağırlık değerlerine göre su absorpsiyon kapasitesi % olarak hesaplanmıştır.

4.3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Bu tez çalışması kapsamında, standart epoksi ve biyobazlı epoksi reçineler içindeki takviyelerin dağılımını incelemek amacıyla, ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda bulunan QUANTA 400F model alan emisyonlu (Field Emission) SEM cihazı kullanılmıştır. Kullanılan SEM cihazının görüntüsü Şekil 4.16'de verilmektedir.



Şekil 4.16. QUANTA 400F Field Emission SEM cihazı

4.3.9. Polarize Optik Mikroskop (POM)

Işığın polarizasyon özelliğiyle oluşturulan ince filmlerin morfolojik yapısını incelemek için Şekil 4.17'de gösterilen Nikon DS-Fi2 marka polarize optik mikroskop (POM) kullanılmıştır. Hazırlanan her kaplama numunesi için 50 ve 100 µm olmak üzere iki büyütme oranlarında görüntü alınmıştır.



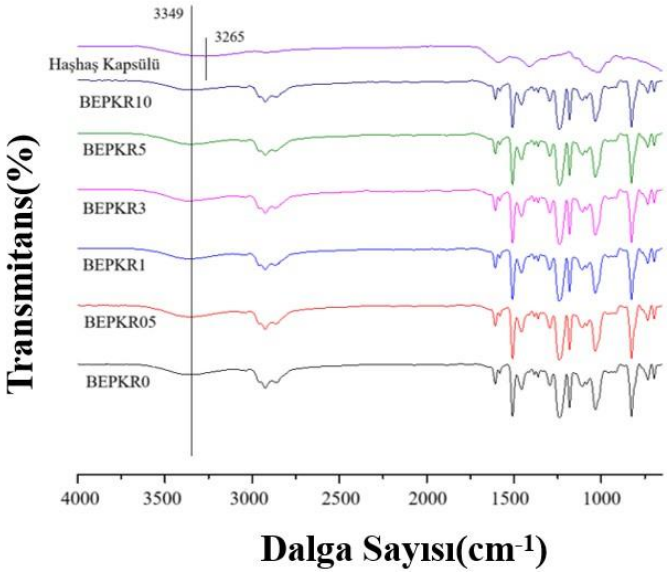
Şekil 4.17. Polarize optik mikroskop

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

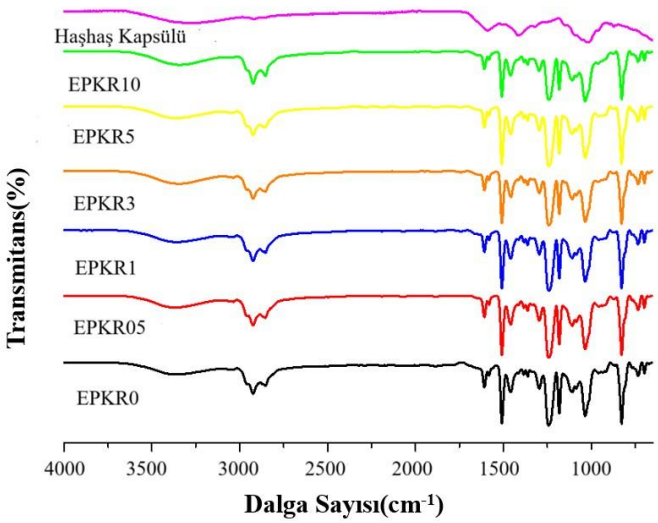
5.1. EPKR ve BEPKR Kompozit Kaplamaların Karakterizasyon Sonuçları

5.1.1. FTIR Sonuçları

Haşhaş kapsülü atığı içeren BEPKR ve EPKR numunelerinin FTIR spektrumları Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 'de verilmiştir. 1450-1400 cm^{-1} dalga sayısı arasında 1412 cm^{-1}'de gözlenen tepe noktasının selüloz ve hemiselülozu gösterdiği ve bunun -CH_2 bağlarının bükülme titreşimlerinden kaynaklanabileceği bulunmuştur (Hospodarova ve diğ., 2018). Takviyesiz ve haşhaş kapsülü takviyeli biyobazlı epoksi reçine numunelerinin FTIR tepe noktaları incelendiğinde, haşhaş kapsülü atığı ve epoksi reçineler arasında herhangi bir kimyasal etkileşim gözlenmemiştir. BEPKR0 numunesinde 3500-3200 cm^{-1} dalga boyu arasında 3349 cm^{-1}'de gözlenen tepe noktasının -OH gerilmesini ve dolayısıyla epoksi halkalarının açılmasını gösterdiği belirlenmiştir (Saba ve diğ., 2017). Aromatik halkadaki karbon-karbon çift bağlarının gerilme titreşimlerine karşılık gelen 1508 cm^{-1} dalga sayısındaki tepe, sikloalifatik kürleme maddesinde NH_2 grubunun varlığını gösterir (Hosur ve diğ., 2017). BEPKR örnekleri ayrıca 1238, 1028 ve 824 cm-1 dalga boylarında C-O, C-O-N ve CH2 gruplarını ifade eden karakteristik tepeler verir. BEPKR 0 örneğinde gözlemlenen tüm karakteristik tepeler, tüm haşhaş kapsülü takviyeli epoksi reçinelerinde de gözlemlendi.



Şekil 5.1. BEPKR bazlı kompozit kaplama numunelerinin FTIR grafiği



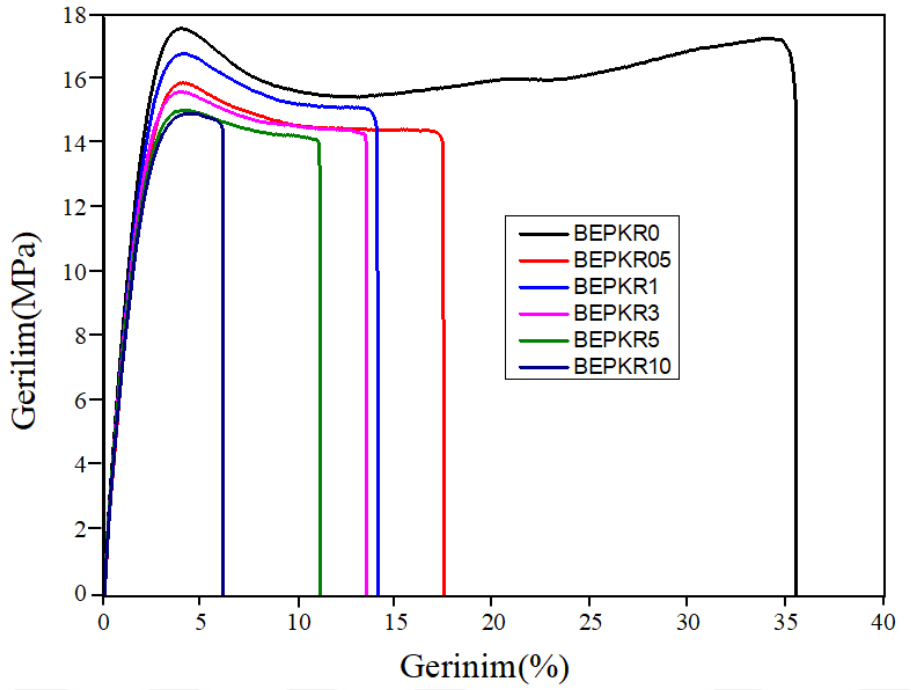
Şekil 5.2. EPKR bazlı kompozit numunelerinin FTIR grafiği

5.1.2. Çekme Testi

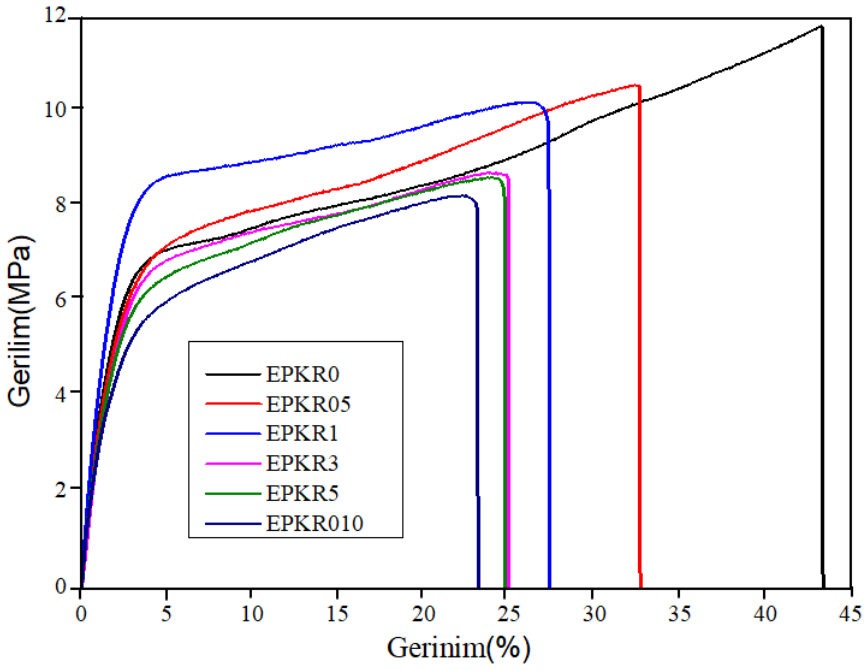
Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sırasıyla farklı miktarlarda haşhaş kapsülü takviyesi içeren BEPKR ve EPKR kompozit kaplama numunelerinin gerinim-gerilim eğrileri gösterilmektedir. Şekil 5.3'te gösterildiği gibi takviyesiz BEPKR numunesi, haşhaş kapsülü atığı ile takviye edilmiş numunelere kıyasla daha sünek bir davranış ve daha düşük kırılganlık sergilemiştir. Haşhaş kapsülü atığı eklenmiş BEPKR numunelerinde maksimum yükte çekme dayanımı değerlerinin önemli ölçüde değişmediği görülmüştür. %0,5 haşhaş kapsülü takviyesi uygulandığında, gerinim değeri neredeyse yarı yarıya azalmış ve buna bağlı olarak malzemenin kırılganlığı artmıştır. Bu seviyeden sonra %1, %3 ve %5 takviyeli BEPKR1, BEPKR3 ve BEPKR5 numunelerinin gerinim değerlerinde kademeli bir azalma görülmüştür. En düşük gerinim değeri %10 haşhaş kapsülü takviyesi içeren BEPKR10 numunesinde ölçülmüştür; dolayısıyla bu numune en yüksek kırılganlığı göstermiştir.

Şekil 5.4'te görüldüğü üzere, takviyesiz EPKR numunesi, haşhaş kapsülü atığı içeren EPKR numunelerine kıyasla biyobazlı epoksi matris içinde daha düşük kırılganlık davranışı sergilemiştir. Gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, en yüksek gerilme değeri %0,5 haşhaş kapsülü takviyesi içeren EPKR05 numunesinde elde edilmiştir. En yüksek gerinim değeri, katkısız numune hariç tutulduğunda, %0,5 haşhaş kapsülü takviyesi içeren EPKR05 numunesinde gözlemlenmiştir.

Çekme deneyinde gözlenen belirli düzeydeki performans düşüşünün, takviye malzemesinin parçacık boyut dağılımının homojen olmamasından, parçacıklar arasındaki selüloz konsantrasyonlarındaki farklılıklardan ve selülozik olmayan kısımların varlığından kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Pandurangan ve diğ., 2020).



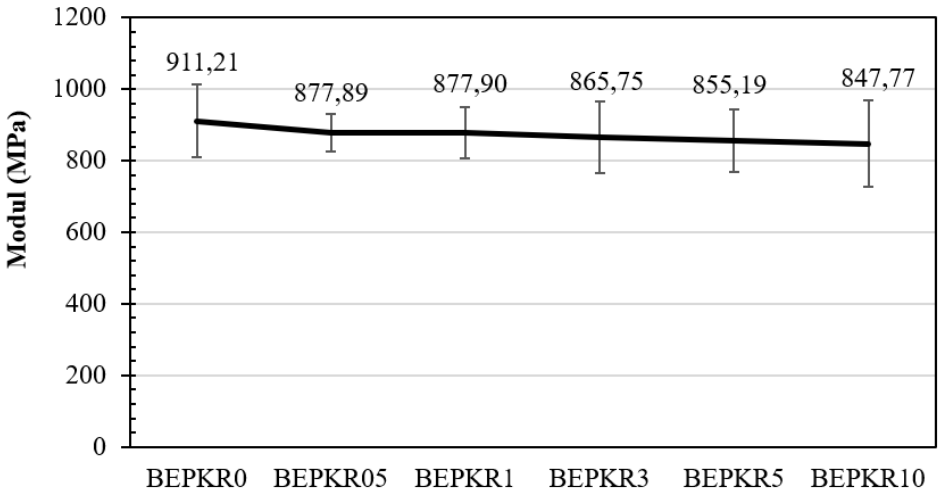
Şekil 5.3. BEPKR numunelerinin çekme dayanımı grafiği



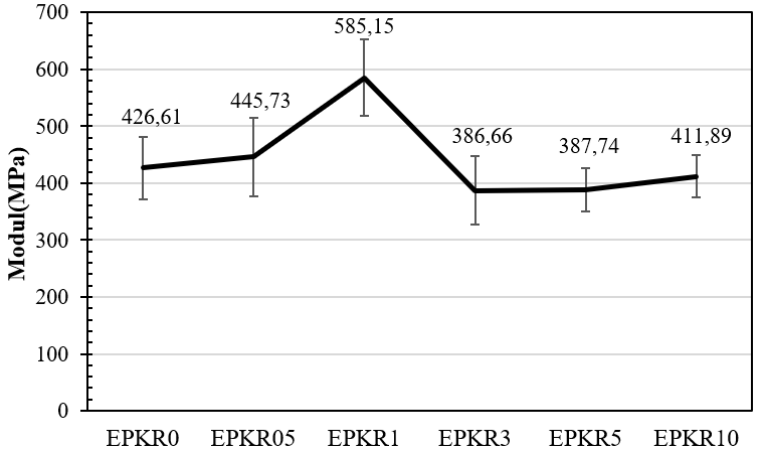
Şekil 5.4. EPKR numunelerinin çekme dayanımı grafiği

Şekil 5.5'te ortalama Youngs modülü değerleri incelendiğinde, BEPKR matrisine haşhaş kapsülü atığı eklendiğinde takviye miktarının artmasıyla Young modülü değerlerinin bir miktar azaldığı görülmektedir. Saf biyobazlı epoksi reçinesinin Young modülü değeri 911,21 MPa iken, %0,5 ve %1 haşhaş kapsülü takviyesi ile elde edilen numunelerin Young modülü sırasıyla 877,89 MPa ve 877,90 MPa olarak ölçülmüştür. Takviye oranı arttıkça bu değer %3 takviye ile 865,75 MPa'a düşerken, %5 takviyeli numunede 855,19 MPa olarak belirlenmiştir. %10 haşhaş kapsülü takviyesi ile elde edilen numunede Young modülü 847,77 MPa olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.6'da standart epoksi reçinenin ortalama modül değerlerine bakıldığında, standart epoksi reçineye haşhaş kapsül atığı ilave edildiğinde modül değerlerinin yaklaşık olarak stabil kaldığı gözlemlenmiştir. Standart sapma dahilinde katkısız epoksi reçinenin modülü 419,03 MPa iken bu epoksi numunesine %0,5 katkı ilave edildiğinde 405,21 MPa değerine gerilemiştir. %3, %5 ve %10 haşhaş kapsülü ilave edildiğinde modül değerleri sırasıyla 369,98 MPa, 348,38 MPa ve 391,37 MPa bulunmuştur. Haşhaş kapsülü atıkları mekanik dayanımda bir miktar azalmaya neden olsa da bu etkinin uygulamada belirleyici olmadığı değerlendirilmektedir. %1 haşhaş kapsülü takviyesinde diğerlerine göre belirgin artışın sebebi numune içerisinde taneciklerin homojen dağılmasına bağlanmıştır. BEPKR ile EPKR bazlı kompozit kaplamaların ortalama Young modülü değerleri karşılaştırıldığında BEPKR bazlı kompozitler ve saf reçine daha yüksek Young modülü değerleri sergilemiştir.

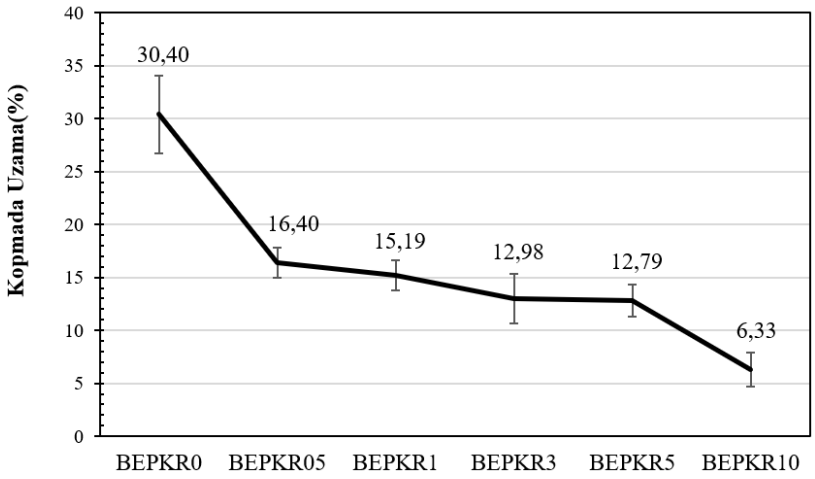


Şekil 5.5. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin Young modülü



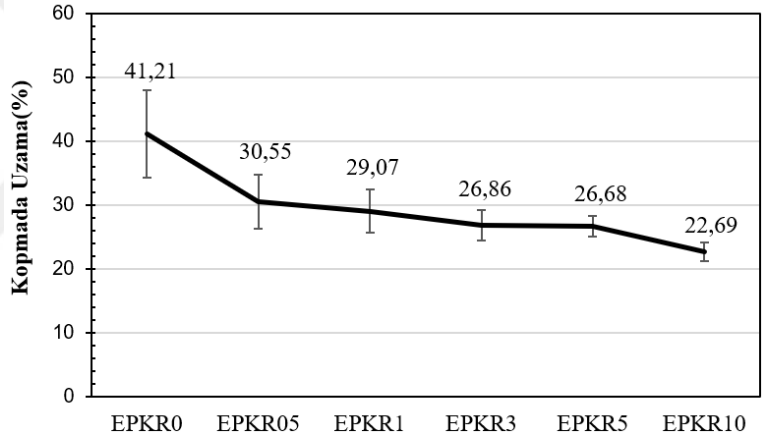
Şekil 5.6. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin modülü

Şekil 5.7'de BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin ortalama kopma uzaması değerleri verilmiştir. Haşhaş kapsülü miktarı reçine içerisinde arttıkça kopma uzaması değerinin belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Standart sapma dahilinde takviyesiz biyobazlı epoksi reçine numunesinin kopma uzaması değeri %30,40'dır. Reçineye %0,5 oranında haşhaş kapsülü atığı eklendiğinde bu değer %16,40 değerine düşmüştür. %1 takviye ile basınç dayanımı %15,19 , %3 takviye ile %12,98 ve %5 takviye ile %12,79 olarak belirlenmiştir. %10 haşhaş kapsülü takviyesi ile kopmada uzama değeri daha da düşerek %6,33 düzeyine gerilemiştir. Özetle, haşhaş kapsülü ilavesi reçinenin uzama performansını düşürmekte ve özellikle yüksek oranda kullanımı yapısal bütünlük açısından dezavantaj yaratmaktadır.



Şekil 5.7. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin kopmada uzama grafiği

Şekil 5.8’de standart epoksi reçine ve haşhaş kapsül atıkları ilave edilmiş epoksi reçinelerin ortalama kopma uzamasına bakıldığında, haşhaş kapsülü miktarı arttıkça kopma çekme gerilmesi değerinin azaldığı görülmektedir. Standart sapma dahilinde takviyesiz epoksi reçine numunesinin kopmada uzama değeri %41,21 ’dır. Reçineye %0,5 oranında haşhaş kapsülü atığı eklendiğinde bu değer %30,55’e düşmüştür. %1 takviye ile basınç dayanımı %29,07, %3 takviye ile %26,86 ve %5 takviye ile %26,68 olarak belirlenmiştir. %10 haşhaş kapsülü takviyesi ile kopmada uzama değeri daha da düşerek %22,69 düzeyine gerilemiştir. Haşhaş kapsülü ilavesi reçinenin uzama performansını düşürmekte ve özellikle yüksek oranda kullanımı yapısal bütünlük açısından dezavantaj yaratmaktadır. Katkısız biyobazlı ve katkısız standart epoksi reçine kendi içinde karşılaştırıldığında standart epoksi reçinenin daha daha fazla kopmada uzama değerine sahip olduğu görülmüştür.

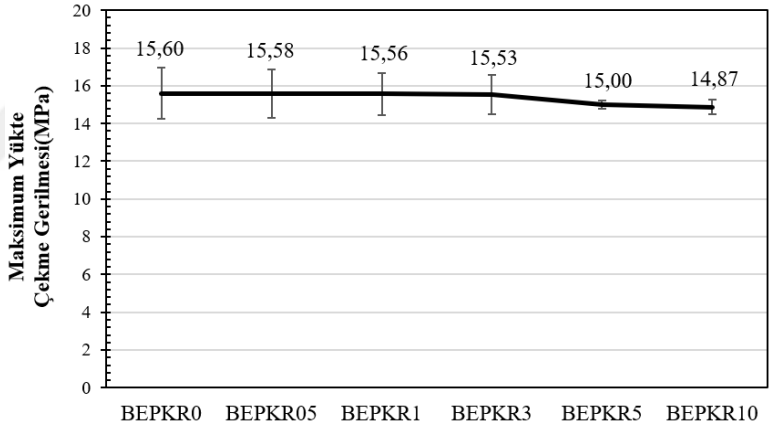


Şekil 5.8. EPKR numunelerinin kopmada uzama grafiği

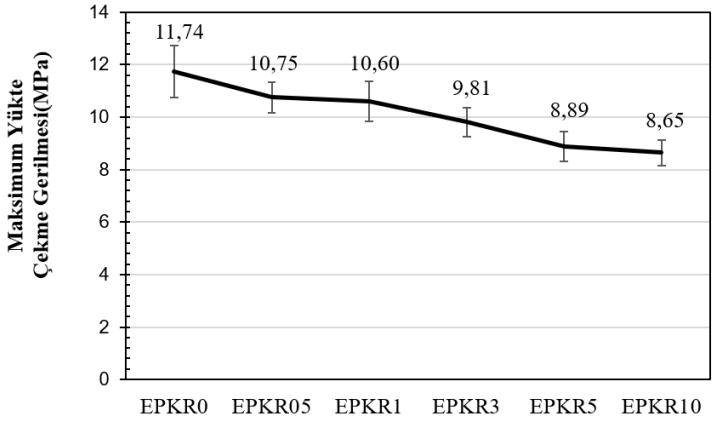
Saf biyobazlı epoksi reçinesi ve farklı miktarlarda haşhaş kapsülü atığı eklenmiş biyobazlı epoksi reçinelerinin ortalama maksimum yükte çekme gerilmesi değerleri Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, biyobazlı epoksi reçinesine haşhaş kapsülü atığı eklenmesiyle mekanik özelliklerde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Standart sapmaya göre maksimum yük altında çekme sonuçları incelendiğinde, saf biyobazlı epoksi numunesinin değeri 15,60 MPa iken, %10 haşhaş kapsülü atığı içeren numunede yaklaşık %5’lik bir azalma ile 14,87 MPa'ya düşmüştür. Epoksi reçinesinde takviye miktarı arttıkça bir azalma gözlenmiş ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeyde olmuştur. Bu azalmanın, lignoselülozik takviyenin

matrisle yeterince güçlü bir arayüz etkileşimi sağlamamasına bağlanabileceği düşünülmektedir. Özellikle doğal elyaf bazlı dolgu malzemelerinde elyaf ve matris uyumluluğu, elyaf yönelimi ve arayüz yapışması çekme dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir (Mahmud ve diğ., 2025).

Standart epoksi reçinesi ve farklı miktarlarda haşhaş kapsülü atığı eklenmiş epoksi reçinelerinin ortalama maksimum yükte çekme gerilmesi değerleri Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, epoksi reçinesine haşhaş kapsülü atığı eklenmesiyle mekanik özelliklerde önemli oranlarda bir azalma gözlenmiştir. Standart sapma çerçevesinde maksimum yük altında çekme sonuçları incelendiğinde, saf epoksi numunesinin değeri 11,74 MPa iken, %10 haşhaş kapsülü atığı içeren numunede yaklaşık %27 azalma ile 8,65 MPa'ya düşmüştür. Epoksi reçinesinde takviye miktarı arttıkça bir azalma gözlenmiş ve bu azalma biyobazlı epoksi reçine sistemi ile kıyaslandığında daha fazla olmuştur.



Şekil 5.9. BEPKR kompozit kaplama örneklerinin maksimum yükte çekme gerilmesi



Şekil 5.10. EPKR kompozit kaplama örneklerinin maksimum yükte çekme gerilmesi

5.1.3. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Saf biyo-bazlı epoksi reçine ve haşhaş kapsülü atığı takviyeli biyo-bazlı epoksi reçine örneklerinin TGA ve DTG eğrileri sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 5.12' de verilmiştir. Numunelerin termal özelliklerini gösteren değerler Tablo 5.1'de verilmiştir.

BEPKR0 örneğinin $T_{d,5}$, $T_{d,10}$ ve $T_{d,50}$ ayrışma sıcaklıkları incelendiğinde sırasıyla 149,07, 178,12 ve 373,58 °C olduğu bulunmuştur. Haşhaş kapsülü atığı eklendikten sonra özellikle biyo-bazlı epoksi reçine örneklerinin $T_{d,5}$ ve $T_{d,10}$ ayrışma sıcaklıklarında belirgin bir artış görülmüştür. %5 takviye oranına kadar $T_{d,5}$ sıcaklıklarında doğrusal bir artış gözlemlenirken, %10 takviyeli epoksi reçinesinde $T_{d,5}$ sıcaklığında bir azalma gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, katkı maddelerinin oranı arttıkça biyobazlı epoksilerin $T_{d,10}$ sıcaklıklarında bir iyileşme gözlendi. Ayrıca, BEPKR10 örneğinin $T_{d,10}$ sıcaklığı, BEPKR0'a kıyasla yaklaşık %10 arttı. Ancak, BEPKRR5 ve BEPKRR10 örneklerinin $T_{d,10}$ sıcaklıklarının neredeyse aynı olduğu belirlendi. BEPKR5 örneğinden sonra $T_{d,5}$ ve $T_{d,10}$ sıcaklıklarında gözlenen farklılıklar nedeniyle, biyobazlı epoksi matrisi için %5 haşhaş kapsülü ilavesinin enuygun oran olduğu görüldü. Örneklerin %50 bozunma sıcaklıklarının ($T_{d,50}$) birbirine benzer ve ortalama 374 °C olduğu bulundu. $T_{d,50}$ sıcaklığından sonra kütle kaybındaki yavaşlama, haşhaş kapsülü atığıyla ilişkilendirildi. Bunun, haşhaş kapsülü yapısında selüloz bulunmasından kaynaklandığı düşünüldü (Hopa ve diğ., 2016).

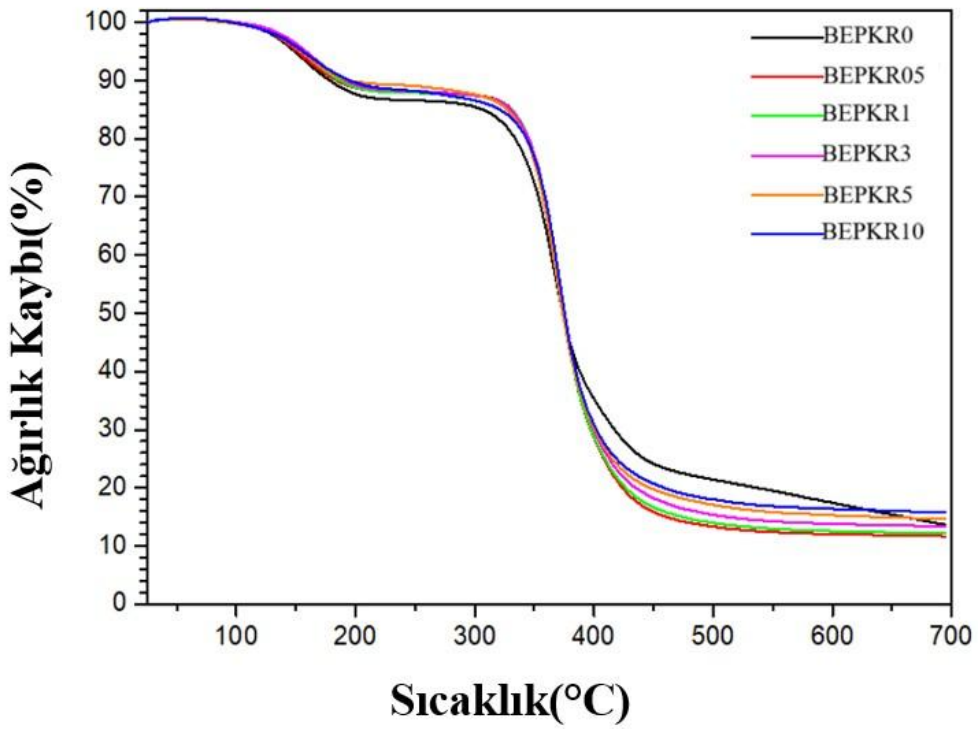
Türev eğrilerinden, biyobazlı epoksi reçinelerinin iki aşamalı bozunma gösterdiği belirlendi. Saf biyo-bazlı epoksi reçinesinin (BEPKR0) T_{mak} sıcaklıkları sırasıyla 155,47 °C ve 366,68 °C olarak bildirilmiştir. Haşhaş kapsülü takviyeli biyo-bazlı epoksi reçinelerinin $T_{mak,1}$ ve $T_{mak,2}$ sıcaklıkları, BEPKR0 örneğine kıyasla hafif bir artışla benzer değerler göstermiştir. Sadece BEPKR05 örneğinin $T_{mak,1}$ sıcaklığının BEPKR0'ın altında kaldığı, ancak önemli bir azalma olmadığı gözlemlenmiştir.

BEPKR bazlı örneklerde haşhaş kapsülü takviye oranı arttıkça, örneklerin 700 °C'deki kalıntı miktarı takviyesiz EPKR bazlı örneklere kıyasla artmıştır. Hopa ve arkadaşları, haşhaş kapsülü kalıntısının miktarını 800 °C'de %30 olarak bulmuşlardır (Hopa ve diğ., 2016). Bu çalışmada, en yüksek katkı oranına sahip %10 haşhaş kapsülü takviyeli

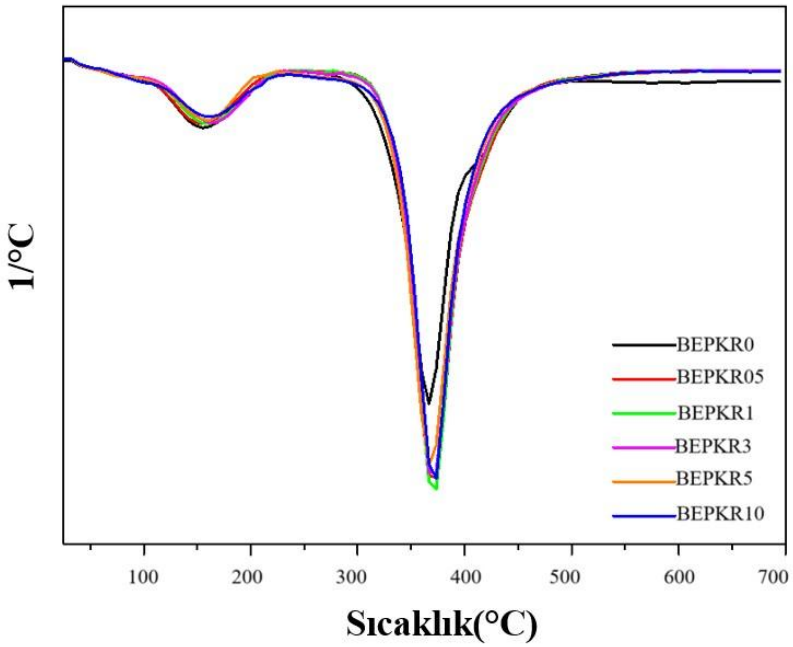
biyobazlı epoksi reçinesinin kömür içeriği 700°C'de BEPR0'a göre yaklaşık %3 artmıştır. Bulunan sonuç literatürle uyumlu bulunmuştur.

Tablo 5.1. Farklı formülasyonlarla hazırlanan BEPKR numunelerinin TGA analiz değerleri

Numune Adı	$T_{mak,1}$ (°C)	$T_{mak,2}$ (°C)	$T_{d,5}$ (°C)	$T_{d,10}$ (°C)	$T_{d,50}$ (°C)	Kalıntı Miktarı 700 °C (%)
BEPKR0	155,47	366,68	149,07	178,12	373,58	13,45
BEPKR05	152,52	370,13	150,55	184,03	374,42	11,66
BEPKR1	159,90	370,62	153,99	186,98	374,37	12,12
BEPKR3	163,84	370,62	157,44	191,41	374,86	13,32
BEPKR5	159,41	368,16	159,99	194,37	373,58	14,59
BEPKR10	160,39	371,61	155,47	194,86	375,05	15,70



Şekil 5.11. BEPKR numunelerinin TGA grafiği



Şekil 5.12. BEPKR numunelerinin DTG grafiği

EPKR ve haşhaş kapsülü atığı takviyeli EPKR örneklerinin TGA ve DTG eğrileri sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' de verilmiştir. Numunelerin termal özelliklerini gösteren değerler Tablo 5.2'de verilmiştir.

EPKR0 örneğinin $T_{d,5}$, $T_{d,10}$ ve $T_{d,50}$ ayrışma sıcaklıkları bakıldığında sırasıyla 164,82 °C, 314,5 °C ve 373,84 °C olduğu bulunmuştur. TGA analiz sonuçlarına göre, %5 kütle kaybına karşılık gelen bozunma sıcaklığı takviyesiz epoksi reçinesi için 162,82 °C olarak belirlenmiştir. Haşhaş kapsülü takviyesiyle bu sıcaklık EPKR05, EPKR1, EPKR3, EPKR5 ve EPKR10 numunelerinde sırasıyla 163,35 °C, 155,47 °C, 166,79 °C, 157,93 °C ve 164,82 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, takviye oranına bağlı olarak bozunma sıcaklığında dalgalı bir değişim olduğunu ve özellikle %3 oranındaki haşhaş kapsülü takviyesinin termal kararlılığı artırıcı etkisinin belirgin olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, haşhaş kapsülü takviye oranı arttıkça biyobazlı epoksilerin $T_{d,10}$ sıcaklıklarında belirgin bir düşüş görüldü. Numunelerin $T_{d,50}$ ayrışma sıcaklıklarının biyobazlı epoksi reçine sisteminde olduğu gibi birbirine benzer olduğu bulundu.

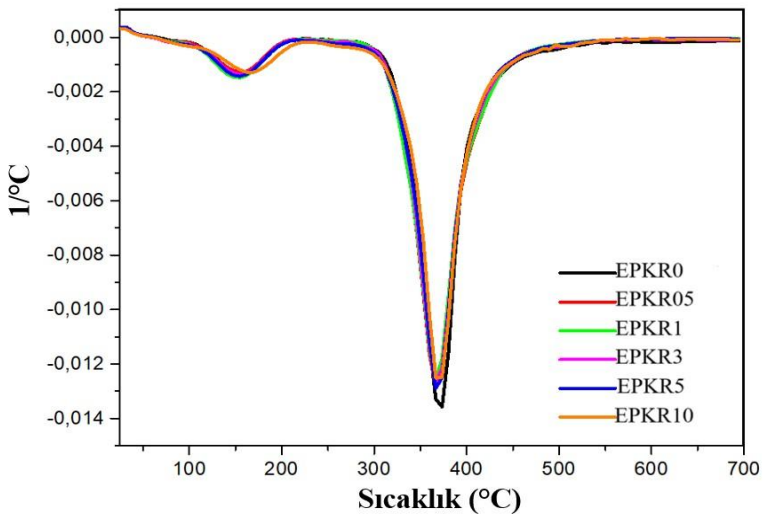
TGA analizleri sonucunda, haşhaş kapsülü takviyesinin epoksi reçinenin termal kararlılığı üzerinde doğrusal olmayan bir etki yarattığı gözlemlenmiştir. Takviyesiz numunede (EPKR0) birinci ve ikinci maksimum bozunma sıcaklıkları sırasıyla 156,46 °C

ve 372,59 °C iken, %3 (%167,78 °C) ve %10 (%166,30 °C) takviye oranlarında $T_{mak,1}$ değerlerinde belirgin artışlar görülmüştür. Diğer oranlarda ise bu sıcaklıklar daha düşük seviyelerde kalmıştır. Bu durumun, takviye oranına bağlı olarak malzeme içinde homojen dağılma sağlanamaması ve ara yüzey etkileşimlerinin yetersizliğiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

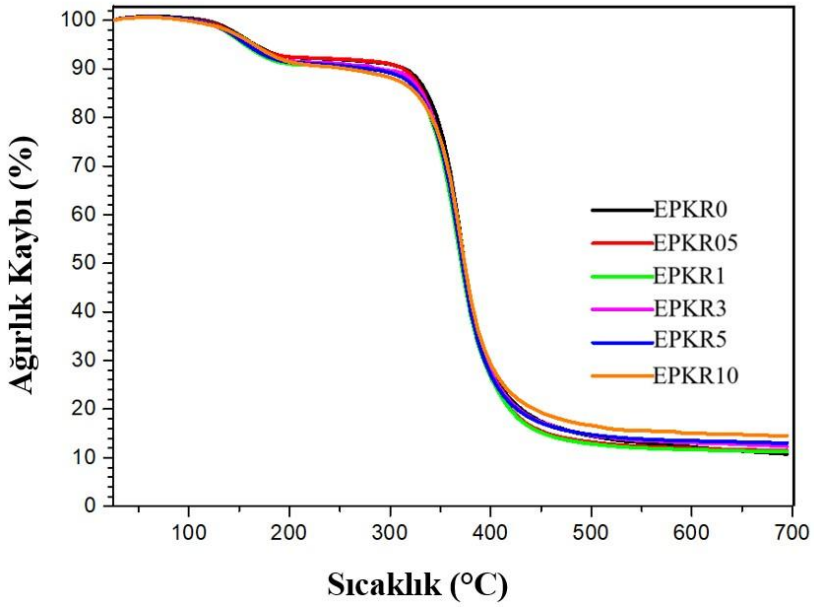
EPKR numunelerinde haşhaş kapsül oranı arttıkça 700 °C'deki kalıntı miktarı BEPKR numunelerinde olduğu gibi belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Bu sonuçlarda literatürle uyumludur (Hopa ve diğ., 2016).

Tablo 5.2. Farklı formülasyonlarla hazırlanan EPKR numunelerinin TGA analiz değerleri

Numune Adı	$T_{mak,1}$ (°C)	$T_{mak,2}$ (°C)	$T_{d,5}$ (°C)	$T_{d,10}$ (°C)	$T_{d,50}$ (°C)	Kalıntı Miktarı 700 °C (%)
EPKR0	156,46	372,59	164,82	314,50	373,84	10,69
EPKR05	154,49	367,67	163,35	313,51	371,61	11,39
EPKR1	152,52	367,67	155,47	283,48	370,62	11,18
EPKR3	167,78	370,13	166,79	261,32	372,59	12,12
EPKR5	154,49	368,65	157,93	277,57	371,88	12,96
EPKR10	166,30	369,64	164,82	259,85	373,87	14,37



Şekil 5.13. EPKR numunelerinin DTG grafiği



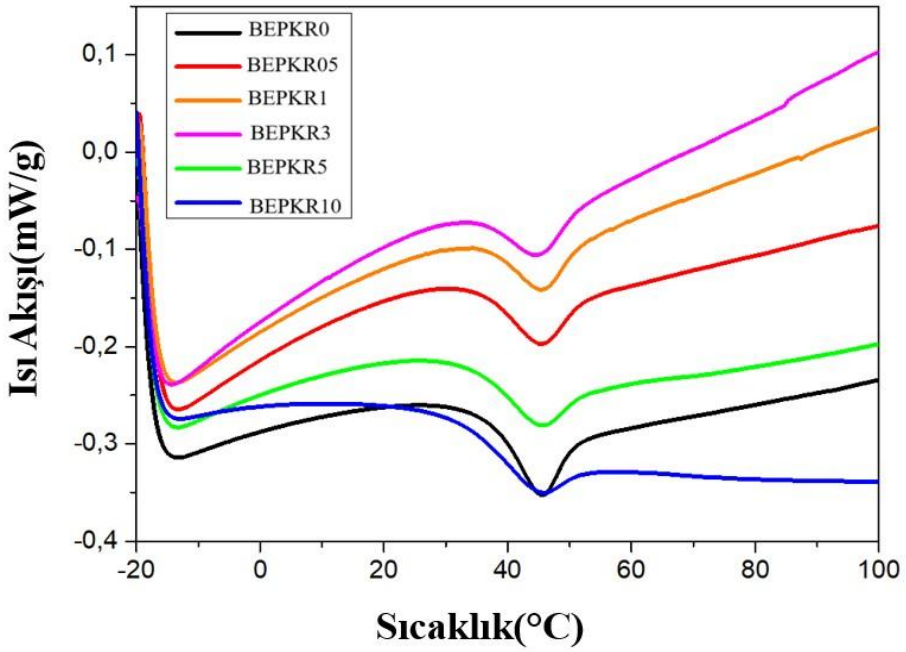
Şekil 5.14. EPKR numunelerinin TGA grafiği

5.1.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

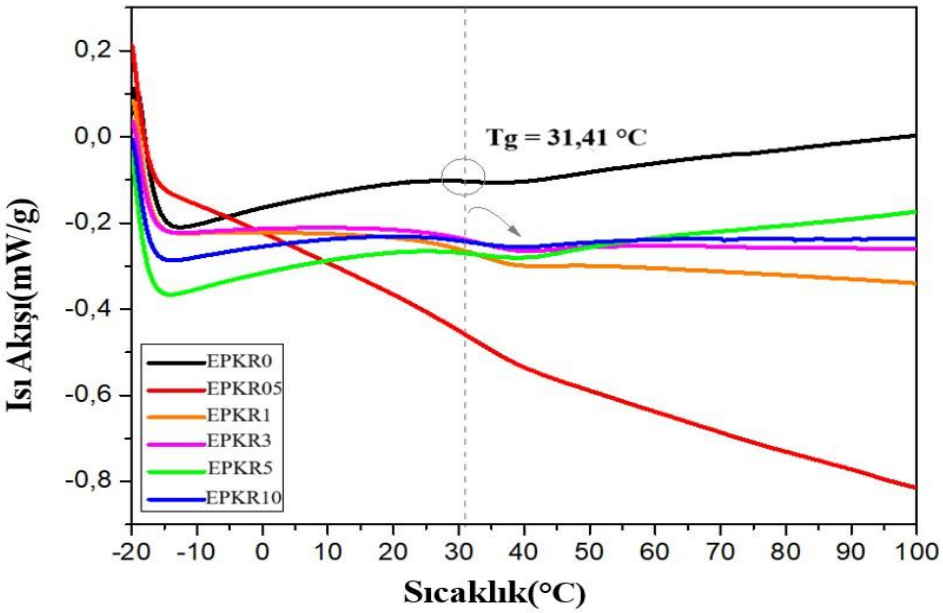
Saf biyo-bazlı epoksi reçine ve haşhaş kapsülü atığı takviyeli biyo-bazlı epoksi reçine örneklerinin DSC eğrileri Şekil 5.15'te verilmiştir. Takviyesiz biyobazlı epoksi numunesinin (BEPKR0) Tg değeri 42,35 °C olarak bulunmuştur. BEPKR05, BEPKR 1, BEPKR 3, BEPKR5 ve BEPKR10 numunelerinin camsı geçiş sıcaklığı sırasıyla 41,81 °C, 42,18 °C, 42,07 °C, 42,01 °C ve 42,70 °C olarak bulunmuştur. Haşhaş kapsülü atığının eklenmesinin biyo-bazlı epoksi numunesinin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Buna sebep olarak haşhaş kapsül taneciklerinin matris içerisinde rastgele dağılarak zincir hareketlerini kısıtlaması belirtilebilir (Lascano ve diğ., 2020). Pandurangan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da epoksi matrisine farklı oranlarda selüloz nanolifleri eklendiğinde benzer Tg değerleri bulmuştur (Pandurangan ve Kanny, 2020).

Standart epoksi reçine ve haşhaş kapsülü atığı takviyeli epoksi reçine örneklerinin DSC eğrileri Şekil 5.16'da verilmiştir. Takviyesiz epoksi numunesinin (EPKR0) Tg değeri 31,41 °C olarak bulunmuştur. Literatürle karşılaştırıldığında, Campanale ve arkadaşları takviyesiz epoksi reçinesinin cam geçiş sıcaklığını 58 °C olarak bulurken, Krzywinski ve arkadaşları 34,3 °C olarak bulmuştur (Krzywinski ve diğ., 2023). EPKR05, EPKR 1, EPKR 3, EPKR5 ve EPKR10 numunelerinin camsı geçiş sıcaklığı ise sırasıyla 38,24 °C,

37,03 °C, 36,18 °C, 35,17 °C ve 34,96 °C olarak bulunmuştur. Haşhaş kapsülü atığının eklenmesinin epoksi numunesinin camsı geçiş sıcaklığı üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda, Tg değerinin %0,5 takviye oranında maksimuma ulaştığı, daha yüksek takviye oranlarında ise kademeli olarak azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.15. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin DSC grafiği

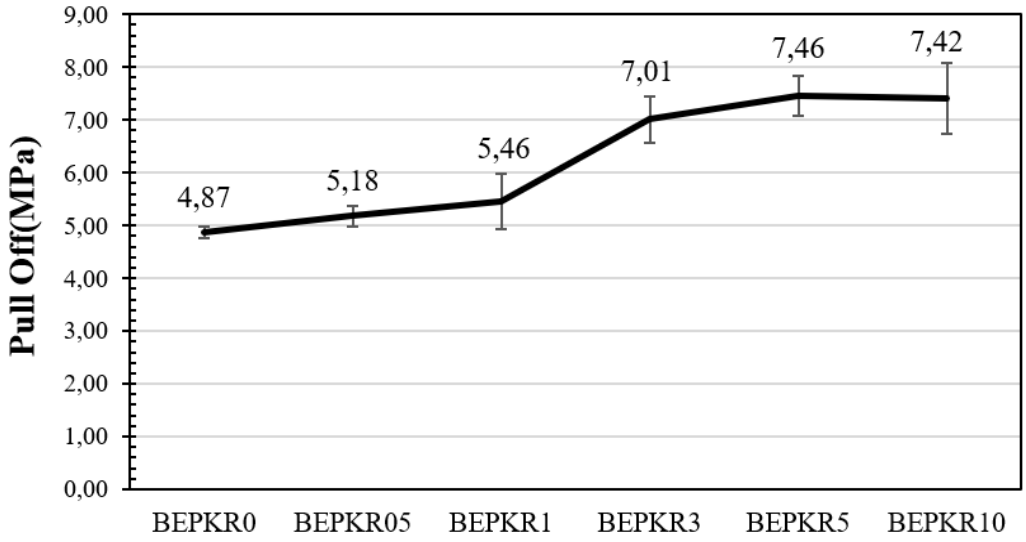


Şekil 5.16. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin DSC grafiği

5.1.5. Adezyon Testi (Pull Off)

Saf biyobazlı epoksi reçine ve farklı miktarlarda haşhaş kapsülü atığı eklenmiş epoksi reçinelerin metal yüzeyler üzerindeki pull off dayanımları Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Ayrıca, testin uygulaması Şekil 5.18'de görsel olarak verilmiştir.

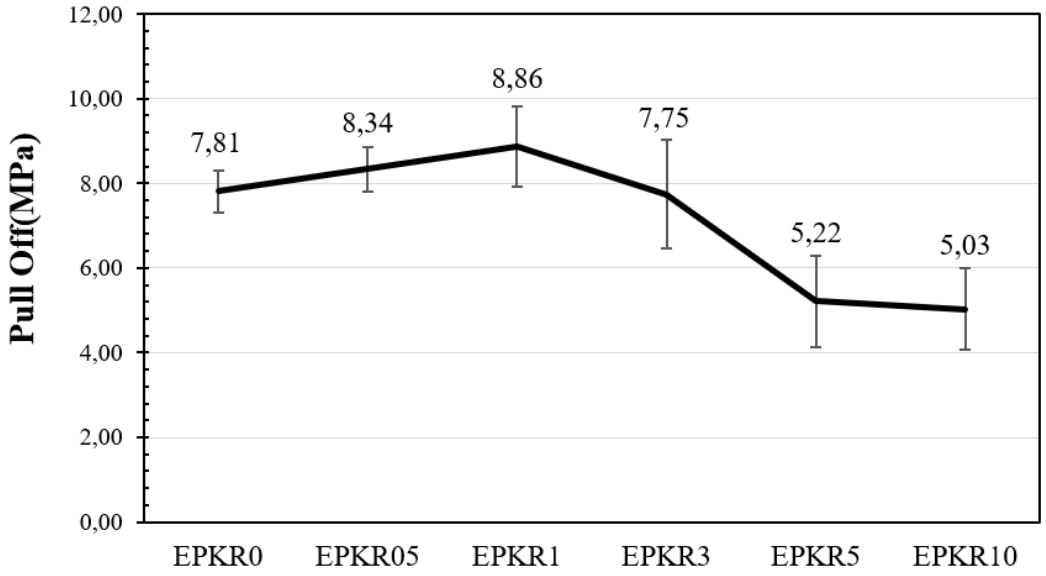
Standart sapma çerçevesinde burada BEPKR0 numunesi en düşük yapışma değerini 4,87 MPa olarak vermiştir. Takviye miktarı arttıkça çekme dayanımının arttığı görülmektedir. BEPKR5 numunesi 7,46 MPa değeri ile en iyi performansı vermiştir. %10 haşhaş kapsülü takviyesinden sonra hafif bir azalma görülmüştür. Bunun nedeni katkı maddesi miktarındaki artışın epoksi matriste aglomerasyonlar oluşturması ve yüzeydeki boşlukları dolduramaması olabilir. Sadowski tarafından yapılan bir çalışmada, doğal bir lif türü olan hindistan cevizi lifleri epoksi reçinesine farklı oranlarda eklendiğinde, katkı maddesi miktarı arttıkça beton yüzeyindeki çekme dayanımının arttığını gözlemlemiştir (Sadowski ve diğ., 2021).



Şekil 5.17. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin pull off grafiği

Yapılan mekanik testler sonucunda, haşhaş kapsülü atığı ilavesinin EPKR sisteminin pull off mukavemeti üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Belirtilen standart sapma dahilinde takviyesiz EPKR0 numunesi 7,81 MPa pull off dayanımına sahipken, %0,5 ve %1 oranlarında haşhaş kapsülü atığı ilavesiyle bu değer sırasıyla 8,34 MPa ve 8,86 MPa'ya yükselmiştir. Bu artış, düşük oranlardaki takviyenin matrisle iyi bir ara yüzey etkileşimi sağladığını göstermektedir. Ancak takviye oranı %3'e çıkarıldığında

çekme dayanımı 7,75 MPa'ya düşmüş ve bu noktadan itibaren artan takviye oranlarıyla birlikte mekanik özelliklerde daha belirgin bir azalma gözlemlenmiştir (%5 için 5,22 MPa, %10 için 5,03 MPa). Bu düşüş, biyobazlı epoksi reçine numunelerinde olduğu gibi yüksek miktarda takviyenin reçine matrisinde aglomerasyon oluşturmasına ve homojenliğin bozulmasına bağlanabilir. Sonuç olarak, haşhaş kapsülü atığı takviyesi düşük oranlarda (özellikle %1) EPKR kompozitlerinin mekanik özelliklerini iyileştirirken, yüksek oranlarda bu etkinin tersine döndüğü görülmektedir.



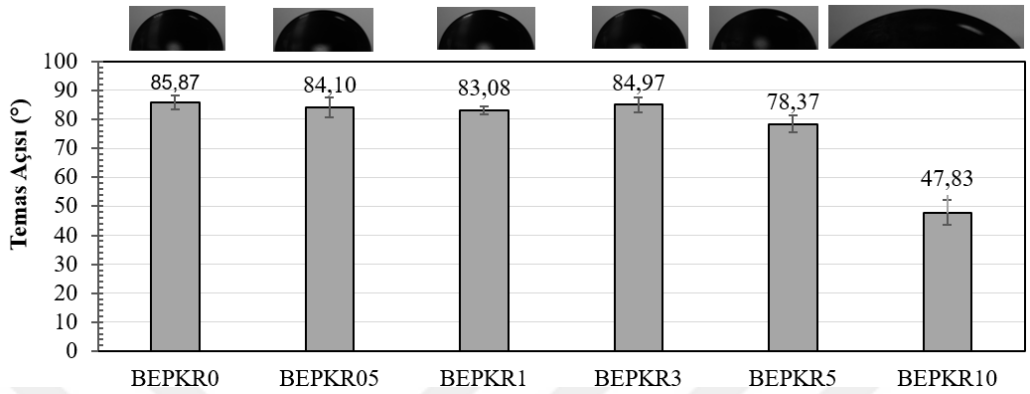
Şekil 5.18. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin pull off grafiği

5.1.6. Temas Açısı

Saf biyobazlı epoksi reçinesi ile haşhaş kapsülü atığı takviyesi içeren biyobazlı ve konvansiyonel epoksi reçine numunelerinin ıslanabilirlik değerleri Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 'de sunulmuştur.

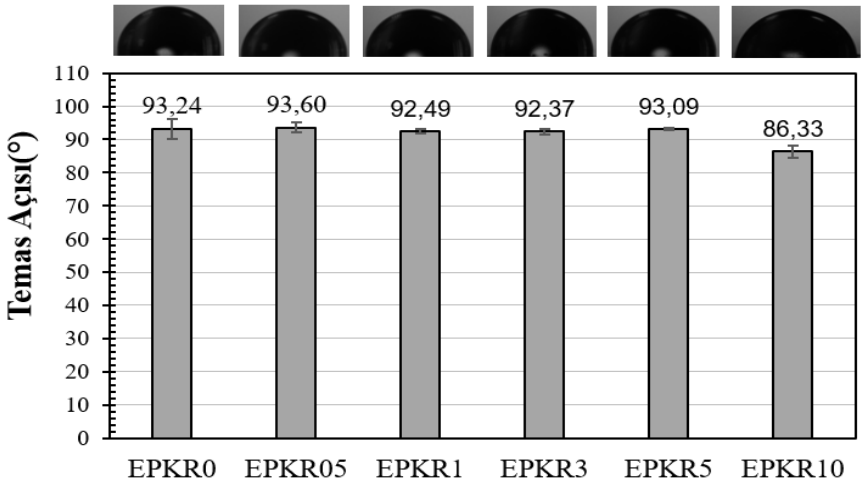
Yüzey temas açısı değeri 90°'den büyük olduğunda hidrofobik, 90°'den küçük olduğunda ise hidrofiliktir (Atmakuri ve diğ., 2020). BEPKR0 numunesinin temas açısı belirtilen standart sapma çerçevesinde 85,87° olarak bulunmuştur. Bu değerle hidrofobik özellik gösterme eğilimindedir. Ancak reçine yapısındaki selülozik bazlı haşhaş kapsülü atığı miktarı arttıkça hidrofilikliğin arttığı, temas açısının azaldığı ve hidrofilik özelliğin arttığı gözlenmiştir. En önemli azalma 47,83° temas açısı değerine sahip %10 haşhaş kapsülü takviyeli epoksi reçinesinde görülmüştür. Atmakuri ve arkadaşları epoksi reçinelerine kenevir, keten, muz ve ananas liflerini takviye ederek temas açılarını incelemişlerdir. Test

sonuçlarına göre, muz ve ananas lifi takviyeli kompozitler 55 ila 75° arasında sonuçlar verdi; bu, muz ve ananas liflerinin yüksek selüloz içeriğine bağlanmıştır (Atmakuri ve diğ., 2020).



Şekil 5.19. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin temas açısı grafiği

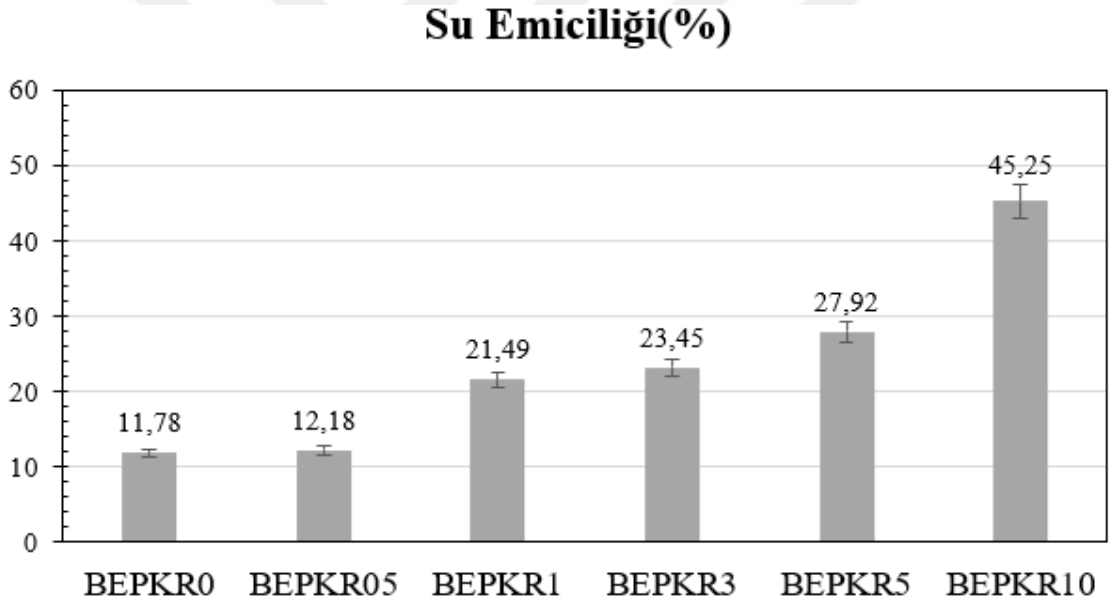
EPKR0 bazlı kompozit kaplama örneklerinin temas açısı standart sapma dahilinde 93,24° olarak belirlenmiş olup, bu değer numunenin hidrofobik özellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Reçine matrisine selülozik bazlı haşhaş kapsülü atığı ilave edildikçe temas açısında kademeli bir azalma gözlenmiş ve bu durum yüzeyin hidrofilik karakterinin arttığını göstermiştir. En dikkat çekici düşüş, temas açısının 86,33°'ye gerilediği %10 takviyeli numunede meydana gelmiştir. Bunun nedeni lignoselülozik malzemenin gözenekli yapılara sahip olması ve yüksek hidrofilik yüzeyleri sayesinde suyu emmesidir (Rodriguez ve diğ., 2022).



Şekil 5.20. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin temas açısı grafiği

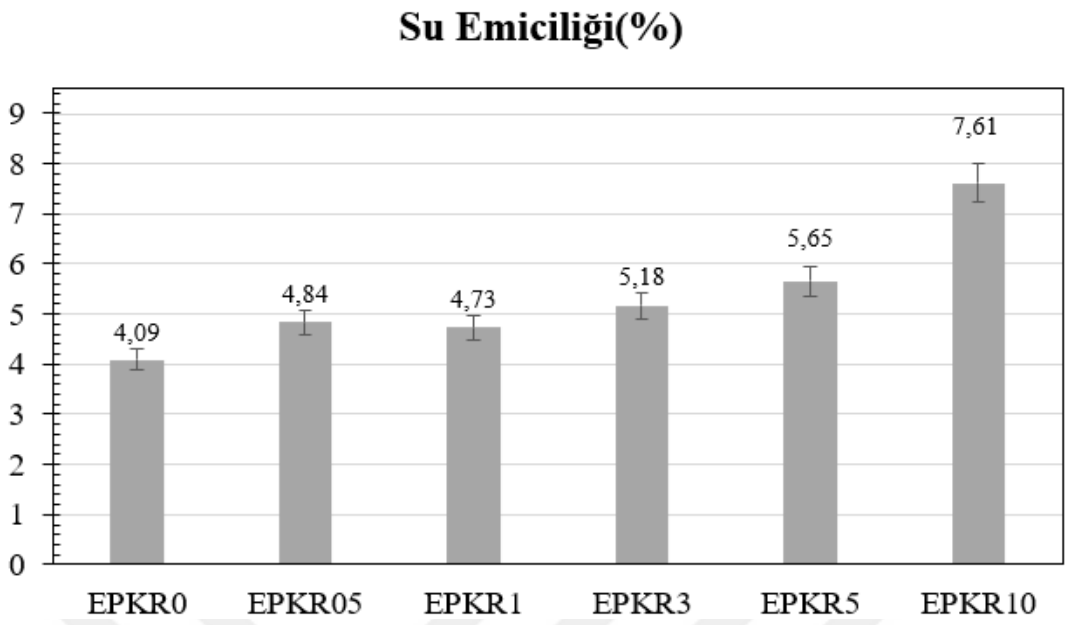
5.1.7. Su Emicilik Testi

Şekil 5.21'deki su emilim testlerinin sonuçları, haşhaş kapsülü atığının eklenmesinin biyobazlı epoksi reçinesinin su direncini olumsuz etkilediğini göstermiştir. Saf biyobazlı epoksi reçinesinin su emilim oranı standart sapma çerçevesinde %11,78 olarak ölçülürken, sırasıyla %0,5, %1, %3, %5 ve %10 haşhaş kapsülü eklenmesiyle %12,18, %21,49, %23,45, %27,92 ve %45,25'e çıkmıştır. Daha yüksek takviye içeriğiyle gözlenen su tutulumunda artış, haşhaş kapsülünün lignoselülozik yapısına bağlanabilir. Selüloz, hemiselüloz ve lignin gibi bileşenler, su molekülleriyle hidrojen bağları oluşturan ve böylece polimer matris içinde su tutulumunu artıran hidroksil grupları içerir. Bu bulgular temas açısı ölçümleriyle de desteklenmiştir. Haşhaş kapsülü miktarı arttıkça temas açısı azalmıştır ve bu da daha hidrofilik bir yüzey karakterine işaret etmektedir.



Şekil 5.21. BEPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin su emicilik grafiği

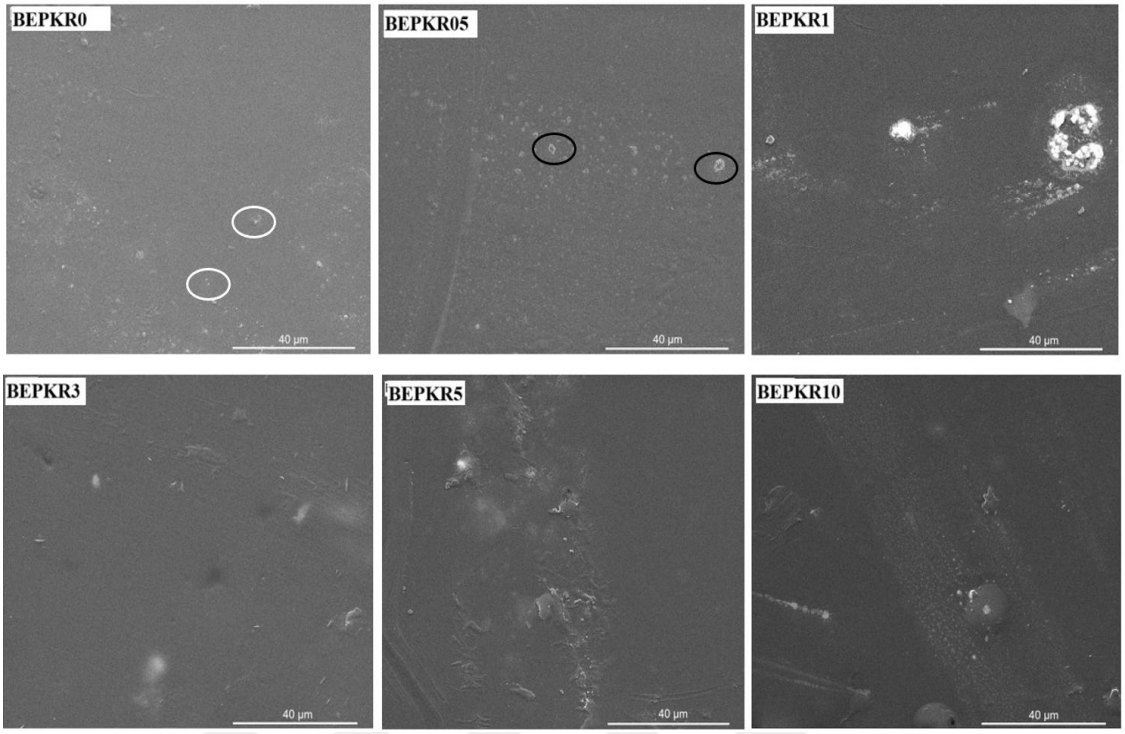
Şekil 5.22'deki EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin su emilim testlerinin sonuçları verilmiştir. Haşhaş kapsülü atığının eklenmesinin standart epoksi reçinesinin su emiciliğini çok etkilemediği görülmüştür. Standart sapma dahilinde saf epoksi reçinenin emilim oranı %4,09 iken %0,5, %1, %3, %5 ve %10 takviyeli EPKR numunelerinin su emiciliği sırasıyla %4,84, %4,73, %5,18, %5,65 ve %7,61 olarak bulunmuştur. Biyobazlı epoksi matrisine göre su emicilik değerleri EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinde son derece düşüktür.



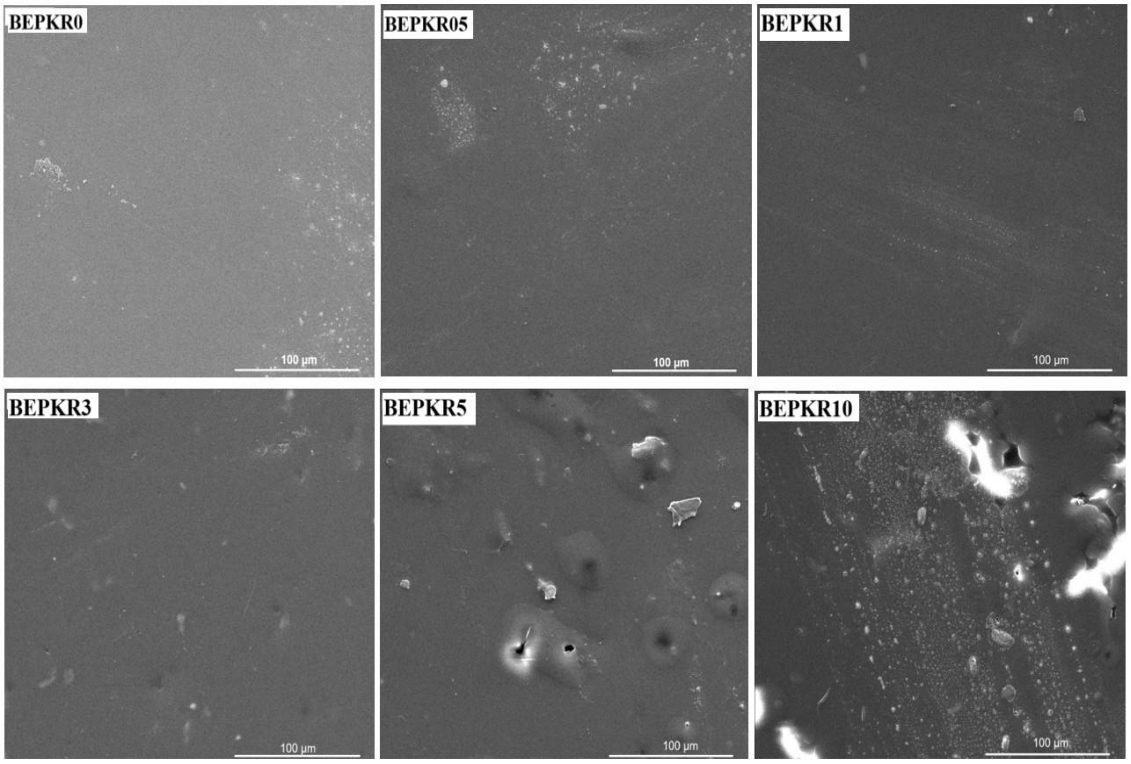
Şekil 5.22. EPKR bazlı kompozit kaplama örneklerinin su emicilik değerleri

5.1.8. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Saf BEPKR ve farklı miktarlarda haşhaş kapsülü atığı eklenmiş BEPKR'lerin 40 ve 100 µm ölçekte morfolojik özellikleri Şekil 5.23 ve 5.24'te verilmiştir. BEPKR0 numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde film yapısında kısmen mikro boyutta köpükler olduğu fark edilmiştir. Ancak film yüzeyinin genel olarak düzgün olduğu gözlenmiştir. BEPKR05 numunesinde haşhaş kapsülü parçacıklarının yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. BEPKR1 numunesinin SEM görüntüsünde ise parçacıkların belirginleştiği ve homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. BEPKR3 numunesinde ise haşhaş kapsülü atığının dağılımı daha da belirginleşmiş ve parçacıklar iğne benzeri bir yapıda öne çıkmıştır. Siyah halka içerisinde görülen kısımlar haşhaş kapsülü atığını, beyaz halka içerisinde işaretlenen kısımlar ise köpük olarak belirtilmiştir. Takviye oranı %3'ü aştıktan sonra BEPKR5 ve BEPKR10 numunelerinin yüzeyinde bölgesel aglomerasyonlar gözlenmiştir. BEPKR5 ve BEPKR10 numunelerinin yüzey uygulamasıyla film üretimi sırasında, takviye miktarının yüksek olması nedeniyle parçacıklar birbirine yaklaşma eğilimindeydi. Bu nedenle, parçacıkların BEPKR10 filminin SEM görüntüsünde bir yol oluşturduğu gözlemlendi. BEPKR5 filminin BEPKR10'a kıyasla daha düzgün dağılmış bir yüzey oluşturduğu görüldü.

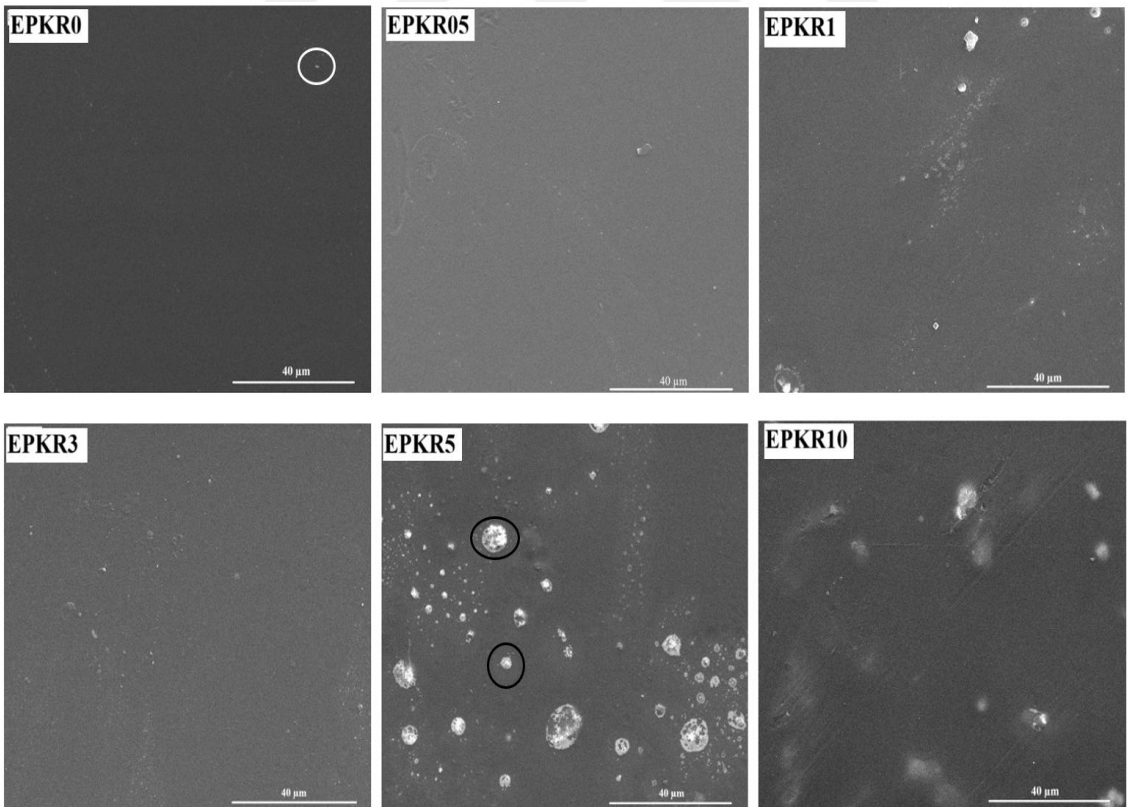


Şekil 5.23. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş BEPKR'nin 40 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri

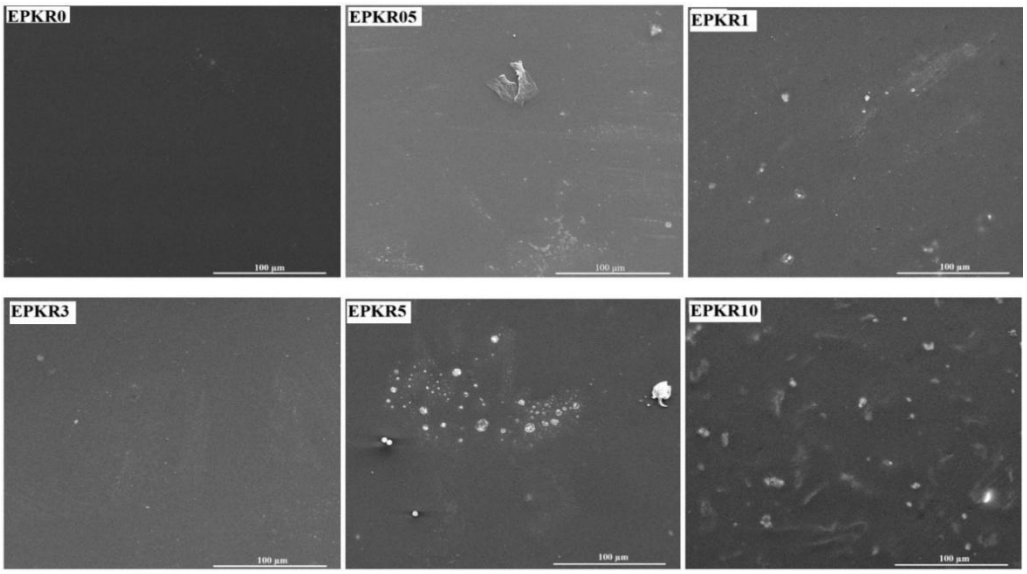


Şekil 5.24. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş BEPKR'nin 100 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri

Takviyesiz EPKR ve farklı miktarlarda haşhaş kapsülü atığı eklenmiş EPKR'lerin 40 ve 100 µm ölçekte morfolojik özellikleri Şekil 5.25 ve 5.26'te verilmiştir. EPKR0 numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde film yapısında kısmen mikro boyutta köpükler olduğu fark edilmiş ve BEPKR0 ile karşılaştırıldığında daha az köpük oluşumları izlenmiştir. Beyaz halka içinde gösterilmiştir. EPKR05 numunesinde haşhaş kapsülü parçacıklarının matris içerisinde homojen bir şekilde dağılım göstermiştir. EPKR1 ve EPKR3 numunesinin SEM görüntüsünde ise parçacıkların daha da belirgin olduğu ve homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. BEPKR'de olduğu gibi takviye oranı %3'ü aştıktan sonra BEPKR5 ve BEPKR10 numunelerinin yüzeyinde bölgesel aglomerasyonlar gözlenmiştir. BEPKR5 ve BEPKR10 numunelerinin takviye miktarının yüksek olması nedeniyle ve dolayısıyla karıştırması sırasında parçacıklar birbirine yaklaşma eğilimindedir. BEPKR10 yüzey morfolojisinin BEPKR5'e kıyasla daha düzgün dağılmış bir yüzey oluşturduğu görüldü. Haşhaş kapsülleri siyah halka içerisinde gösterilmiştir.



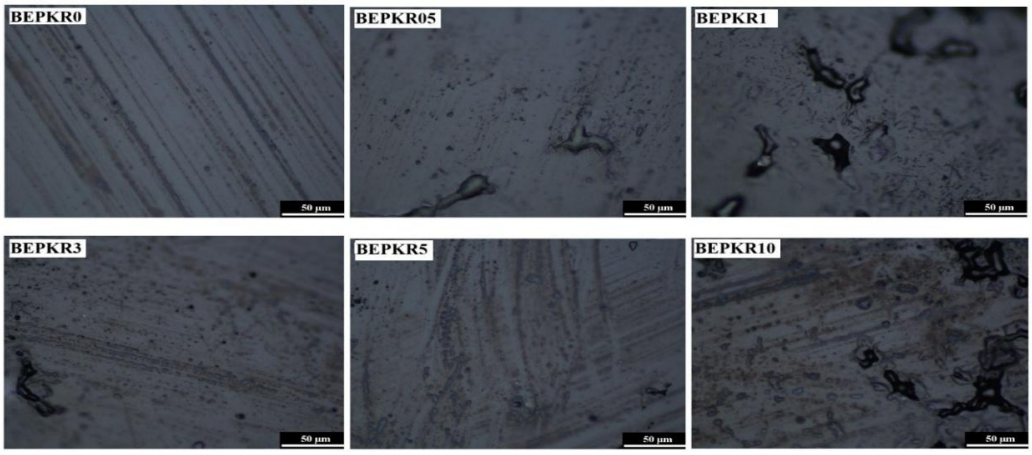
Şekil 5.25. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin 40 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri



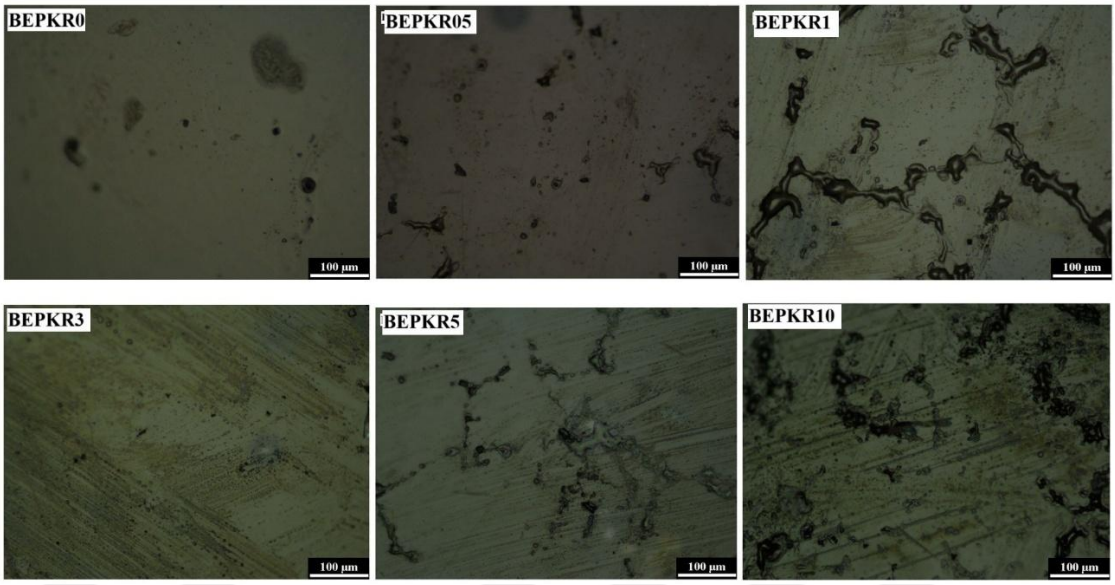
Şekil 5.26. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin100 µm ölçeğinde SEM yüzey görüntüleri

5.1.9. Polarize Optik Mikroskop (POM)

Takviyesiz BEPKR ve farklı miktarlarda haşhaş kapsülü atığı eklenmiş BEPKR'lerin 50 ve 100 µm ölçekte polarize optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.27 ve 5.28'te verilmiştir. BEPKR0 numunesinin POM görüntüsü incelendiğinde film yapısında kısmi olarak yuvarlak şekilli mikro boyutta köpükler olduğu fark edilmiştir. EPKR05 numunesinde haşhaş kapsülü parçacıklarının matris içerisinde homojen bir şekilde dağılım göstermiştir. %3 takviyeyle birlikte özellikle Şekil 5.28'deki 100 µm görseller incelendiğinde lokal olarak birikimler görülebilmektedir.

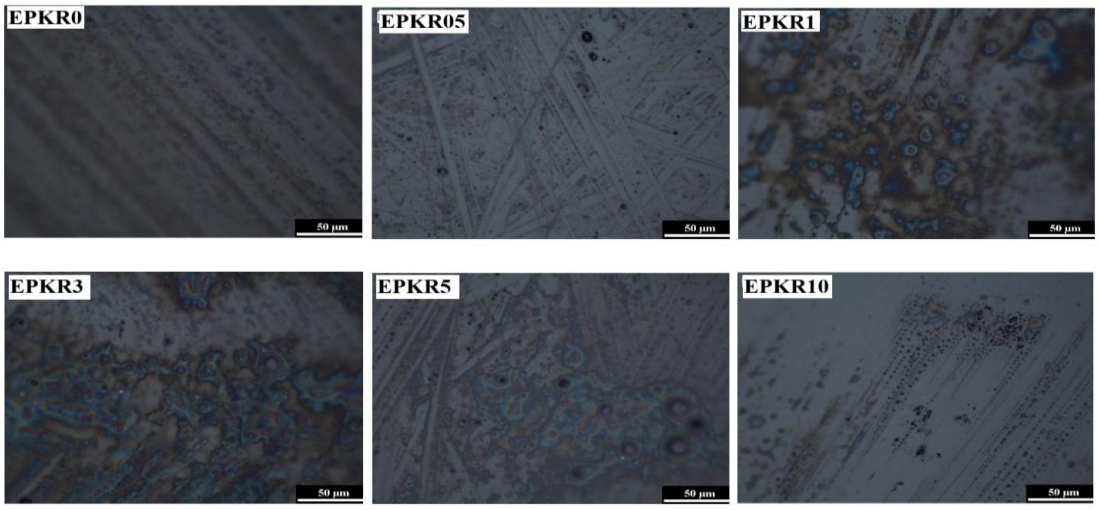


Şekil 5.27. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş BEPKR'nin 50 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri

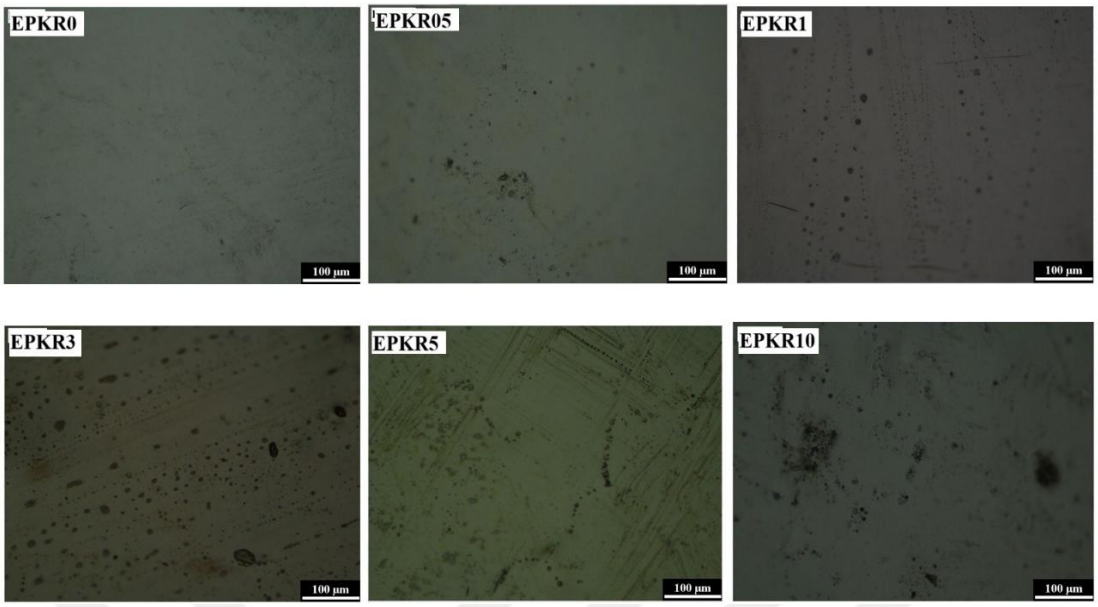


Şekil 5.28. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin100 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri

Takviyesiz EPKR ve farklı miktarlarda haşhaş kapsülü atığı eklenmiş EPKR'lerin 50 ve 100 µm ölçekte polarize optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.29 ve 5.30'da verilmiştir. EPKR0 numunesinin POM görüntüsü incelendiğinde film yapısında kısmi mikro boyutta köpükler olduğu fark edilmiş ancak BEPKR0 ile karşılaştırıldığında daha düzgün bir yüzey yapısına sahip olduğu gözlemlendi. EPKR3, EPKR5 ve EPKR10 numunelerinin tanecik dağılımları BEPKR3, BEPKR5 ve BEPKR10 numunelerinin dağılımlarına göre daha homojen olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.29. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin 50 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri



Şekil 5.30. Farklı oranlarda haşhaş kapsülü eklenmiş EPKR'nin 100 µm ölçeğinde POM yüzey görüntüleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans çalışması iki bölümden oluşur. Birinci bölümde yapışma testi için yüzey hazırlığı, reçine karışımlarının metal yüzeylere uygulanması, temas açısı testleri için alüminyum yüzeye film oluşturma, çekme testleri için ince filmlerin üretilmesi ve diğer termal testler için numune üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci bölümde ise kaplamaların karakterizasyonu ve performans özelliklerinin değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Adezyon testi için metal yüzeyler zımparalanarak temizlendi. Sonrasında standart ve biyobazlı epoksi reçinelerin içerisine ağırlıkça %0, %0,5, %1, %3, %5 ve %10 oranlarında 125 μm altında tanecik boyutuna sahip haşhaş kapsül atıkları ilave edilmiştir. Homojen olana kadar karıştırıldıktan sonra adezyon testleri için metal yüzeylere uygulama yapıldı. Ayrıca çekme testi için asetat kağıdına ve temas açısı testi için alüminyum panellere 200 μm kuru film kalınlığında uygulama yapıldı. Oda sıcaklığında 7 gün kürlenmeye bırakıldı. 7 günün sonunda pull off ve temas açısı bitirildi. Çekme testi için oluşturulan filmler belirtilen boyutlarda ince film haline getirildi.

Biyobazlı ve standart epoksi reçinenin haşhaş kapsül atıklarıyla olan kimyasal etkileşimleri FTIR analizlerinden değerlendirilmiştir. Her iki reçinede haşhaş kapsül atıklarıyla kimyasal etkileşim göstermemektedir. Takviyesiz ve takviyeli numunelerin pikleri birbiriyle aynıdır.

Biyobazlı epoksi ve standart epoksi reçinelerinin yapışma (pull off) dayanımları haşhaş kapsül miktarı arttıkça arttığı gözlemlendi. Biyobazlı epoksi reçinede en optimum sonucu 7,46 MPa değeriyle BEPKR5 numunesini göstermiştir. Bu miktardan itibaren hafif düşüş görülmüştür. Standart epoksi reçinenin en optimum sonucu 8,86 MPa değeriyle EPKR1'de görülmüştür. Bu orandan itibaren takviye artışıyla birlikte yapışma dayanımı düşmektedir.

Biyobazlı epoksi reçinelerin TGA analizleri incelenmiştir. BEPKR0 numunesinin $T_{d,5}$, $T_{d,10}$ ve $T_{d,50}$ ayrışma sıcaklıkları sırasıyla 149,07, 178,12 ve 373,58 °C bulunmuştur. Haşhaş kapsül atığı miktarı arttırıldığında bu ayrışma sıcaklığının arttığı görülmüştür. BEPKR5 ve BEPKR10 örneklerinin yaklaşık olarak aynı olduğu belirtilebilir. Türev eğrilerinden iki aşamalı bozunma sıcaklığı incelendiğinde BEPKR0 numunesinin T_{mak1},

$T_{mak2\ değerleri}$ sırasıyla 155,47 °C ve 366,68 °C bulunmuştur. Matris içinde katkı miktarı arttırıldığında hafif bir artış görüldü. 700 °C de bıraktığı kalıntı miktarı takviye oranı arttıkça arttığı görülmüştür.

Standart epoksi reçinelerin TGA analizleri incelenmiştir. EPKR0 numunesinin $T_{d,5}$, $T_{d,10}$ ve $T_{d,50}$ ayrışma sıcaklıkları sırasıyla 164,82 °C, 314,5 °C ve 373,84 °C bulunmuştur. Haşhaş kapsül atığı miktarı arttırıldığında bu ayrışma sıcaklığının dalgalı bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. EPKR05, EPKR1, EPKR3, EPKR5 ve EPKR10 numunelerinin sırasıyla 163,35 °C, 155,47 °C, 166,79 °C, 157,93 °C ve 164,82 °C olduğu çıkmıştır. Türev eğrilerinden iki aşamalı bozunma sıcaklığı incelendiğinde EPKR0 numunesinin T_{mak1}, $T_{mak2\ değerleri}$ sırasıyla 156,46 °C ve 372,59 °C bulunmuştur. BEPKR numunelerinin aksine matris içinde katkı miktarı arttırıldığında hafif bir artış düşüş görüldü. 700 °C de bıraktığı kalıntı miktarı takviye oranı arttıkça belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür.

Biyobazlı ve standart epoksi reçinelerin DSC'de T_g değerleri incelenmiştir. BEPKR0 örneğinin camsı geçiş sıcaklığı 42,35 °C ve EPKR0 örneğinin 31,41 °C olarak bulunmuştur. BEPKR örneklerinde haşhaş kapsül atığı takviyesi arttıkça T_g değerlerinin yaklaşık olarak aynı kaldığı bulunmuştur. EPKR numunelerinde ise takviye artışıyla birlikte T_g değerinde belli bir oranda artış olsa da kabul sınırları içerisinde değerlendirilebilir.

BEPKR VE EPKR numunelerinin çekme testleri incelenmiştir. Bu testte gerilim-gerinim, modül, kopmada uzama(%) ve maksimum yükte çekme gerilmesi(MPa) değerleri incelenmiştir. Her iki numunede de haşhaş kapsül atığı miktarı arttırıldığında bu mekanik değerlerin tanecik boyutu veya matris içerisinde partiküllerin dağılımından dolayı genel olarak belli bir miktar düşüş görülmüştür.

BEPKR ve EPKR numunelerinin temas açısı testleri yapılmıştır. BEPKR0 numunesinin temas açısı 85,87° iken BEPKR5 numunesinde bu değer 78,37 ve BEPKR10'da belirgin bir düşüş göstererek 47,83° değerine gerilemiştir. EPKR0 numunesinde 93,24°, EPKR5'de 93,09° ve EPKR10'da 86,33° değerine düşmüştür. Her iki matrisin hidrofobikliği karşılaştırıldığında biyobazlı epoksi sisteminin standart epoksi matrisine göre daha hidrofilik olduğu ve haşhaş kapsüllerinin de yapısında bulunan hidroksilden dolayı hidrofobikliği arttırdığı görülmüştür. Özellikle nemli ortamda sonkat zemin

kaplama sistemlerinde haşhaş kapsül atığı takviyeli standart epoksi matris reçinenin kullanımı daha uygun olacaktır. Zemin kaplama astarlarında biyobazlı epoksi reçinenin kullanımı daha uygun olacaktır.

BEPKR ve EPKR numunelerinin su emicilik testi gerçekleştirilmiştir. BEPKR0 numunesinin su emicilik değeri %11,78 dir. Haşhaş kapsül atığı eklendiğinde BEPKR10 numunesinin su emicilik değeri %45,25 değerine çıkarak belirgin bir artış göstermiştir. EPKR0 numunesinde ise su emicilik değeri %4,09 ve EPKR10 numunesinde bu değer %7,61'e yükselmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde standart epoksi reçinenin su emicilik değeri biyobazlı epoksi reçineye göre düşüktür.

Haşhaş kapsül atıklarının matris içindeki dağılımını incelemek amacıyla polarize optik mikroskop ve SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Takviyesiz numunelerde yer yer mikro köpük oluşumları gözlemlenmiş, ancak bu durum kabul edilebilir düzeydedir. Haşhaş kapsülleri %0,5, %1 ve %3 oranlarında eklendiğinde, %5 ve %10 katkı oranlarına kıyasla daha homojen bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir. Öte yandan, %5 ve %10 takviyelerde etkili ve yeterli karıştırma sağlanmadığında, yapıda aglomerasyon oluşma olasılığı artmaktadır.

Literatür araştırmalarında da görüldüğü üzere, günümüzde endüstriyel atıkların geri dönüştürülerek çeşitli endüstriyel uygulamalarda değerlendirilmesi oldukça yaygın bir yaklaşımdır. Sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu doğrultuda, lignin, selüloz ve hemiselüloz gibi yapılar içeren haşhaş kapsül atıklarının epoksi zemin kaplama astarlarında kullanımı, deneysel çalışmaların da gösterdiği üzere, umut vaat etmektedir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda epoksi reçinesi ile haşhaş kapsülü atıklarının uyumlaştırılması için reçine içinde farklı uyumlaştırıcıların kullanılması, selülozik liflerin yüzey modifikasyonu ve farklı bitkisel atıkların epoksi reçinede kullanılarak değerlendirilmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR

Abden, S. Z. E., Wafa, A. E., Shanawany, M.M., Shanawany, W.M. (2014). Friction and Wear of Epoxy Flooring Filled by Recycled Polymers. *International Journal of Scientific & Engineering Research, 5*(9), 116-121.

Alam, M. M., Maniruzzaman, M., & Morshed, M. M. (2014). Application and Advances in Microprocessing of Natural Fiber (Jute)–Based Composites. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00714-7

Alamri, H., & Low, I. M. (2012). Mechanical Properties and Water Absorption Behaviour of Recycled Cellulose Fibre Reinforced Epoxy Composites. *Polymer Testing*, *31*(5), 620-628. DOI:10.1016/j.polymertesting.2012.04.002

Alarifi, İ.M.(2023). A Comprehensive Review on Advancements of Elastomers for Engineering Applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, *6*(4),451-464. DOI:10.1016/j.aiepr.2023.05.001

Atmakuri, A., Palevicius, A., Siddabathula, M., Vilkauskas, A., Janusas, G.(2020). Analysis of Mechanical and Wettability Properties of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *Polymers*, *12*, 2827-2842. DOI: 10.3390/polym12122827

Bağçeci İnam, B. (2010). Nano Partikül Yüzey Kaplama. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 269938.

Balguri, P.K., Samuel, D.G.H., Thumu, U.(2020). A Review on Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, *44*(1), 346-355. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.742

Baroncini, E. A., Kumar Yadav, S., Palmese, G. R., Stanzione III, J. F. (2016). Recent Advances in Bio-Based Epoxy Resins and Bio-Based Epoxy Curing Agents. *Journal of Applied Polymer Science*, *133*(45). DOI: 10.1002/app.44103

Berglund, L.A. (1998). Thermoplastic Resins. Peters, S.T. (Ed.), *Handbook of Composites*(115-130). Boston, MA: Springer.

Bezerra, W. B. A., Costa, U. O., Rodrigues, J. G. P., Lazarus, B. S., Tavares, S. S., da Luz, F. S., & Monteiro, S. N. (2023). Influence of Arapaima Gigas Fish Scales as Reinforcement in DGEBA/TETA Epoxy Composite for Flooring Applications: Mechanical and Thermal Behavior. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 20. DOI: 10.4322/2176-1523.20222761

Bower, D. I. (2002). *An Introduction to Polymer Physics* (1st ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Burches, B. J. (2005). *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (1st ed.). Chichester: John Wiley and Sons Inc.

Campanale, F., Vergani F., Marian, N.M., Viti, C., Bianchi A., Ferrario, S., Mauri, M.,Capitani, G. (2023). Epoxy Resins for Flooring Applications, an Optimal Host for Recycling Deactivated Cement Asbestos. *Polymers*, *15*(6),1410. DOI: 10.3390/polym15061410

Çebi, N. (2018). Helal Gıda Kapsamında Yumuşak Şekerlemelerde Jelatin Kökeninin Tespitinde Spektroskopik Ve Kromatografik Yöntemlerin Geliştirilmesi Ve Metot Validasyonu. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 515888.

Chartoff, R. P., Sircar, A. K. (2005). Thermal Analysis of Polymers, Mark H. F., (Ed.), *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (2nd ed.) (1-86). New York: John Wiley and Sons Inc.

Chowaniec, A., Czarnecki, S., & Sadowski, Ł. (2022). The Effect of The Amount and Particle Size of The Waste Quartz Powder on The Adhesive Properties of Epoxy Resin Coatings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *117*, 103009. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.103009

Chowaniec, A., Sadowski, Ł., Żak, A. (2022). The Chemical and Microstructural Analysis of The Adhesive Properties of Epoxy Resin Coatings Modified Using Waste Glass Powder. *Applied Surface Science*, *504*, 144373. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144373

Çinçik, E. (2010). İğneleme Yöntemiyle Üretilen Polyester/Viskon Karışımlı Dokusuz Yüzey Özelliklerinin Deneysel ve İstatistiksel Analizi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, 266151.

Dizman, C., Kaçakgil, E.C.(2022). Alkyd Resins Produced from Bio-Based Resources for More Sustainable and Environmentally Friendly Coating Applications. *Turkish Journal of Chemistry*, *47*(1), 1-23. DOI: 10.55730/1300-0527.3511

Durmaz, B.Ü.(2023). Karbon Katkılı İletken Polimer Kompozitlerin Üretimi, Karakterizasyonu ve Elektromanyetik Dalga Kalkanlamada Kullanımlarının Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 790194.

Ebewele, R. O. (2000). *Polymer Science and Technology* (1st ed.). Boca Raton: CRC Press.

Fried, J. R. (2014). *Polymer Science and Technology(*1st ed.). Pearson Education

Gonçalves, F.A.M.M., Santos, M., Cernadas, T., Ferreira, P., Alves, P.(2022). Advances in The Development of Biobased Epoxy Resins: Insight into More Sustainable Materials and Future Applications. *International Materials Reviews, 67*(2), 119-149. DOI: 10.1080/09506608.2021.1915936

Hopa, D.Y., Yılmaz, N., Alagöz, O., Dilek, M., Helvacı, A., Durupınar, Ü.(2016). Pyrolysis of Poppy Capsule Pulp for Bio-Oil Production. *Waste Management & Research, 34*(12), 1316-1321. DOI: 10.1177/0734242X16671800

Hospodarova, V., Singovszka, E., Stevulova, N. (2018). Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials. *American Journal of Analytical Chemistry, 9*(6), 303-310. DOI: 10.4236/ajac.2018.96023

Hosur, M., Mahdi T.H., Islam, M.E., Jeelani, S. (2017). Mechanical and Viscoelastic Properties of Epoxy Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotubes, Nanoclay, and Binary Nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 36*(9), 667-684. DOI: 10.1177/0731684417691365

Ifijen, I.H., Udokpoh, N.U., Onaiwu, G.E., Ikhuoria, E.U., Ikhuoria, E.(2022). Coating Properties of Alkyd Resin, Epoxy Resins and Polyurethane Based Nanocomposites: A Review. *Momona Ethiopian Journal of Science, 14*(1), 1-31. DOI: 10.4314/mejs.v1 4i1.1

Jin, F.L., Li, X., Park S.J.(2015). Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 29*, 1-11. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.03.026

Joo, J.H., Jeong, J.R., Yim, Y.J., Kim, S.H., Bae, J.S.(2025). Recent Advances in Epoxy Resin Applications. *COJ Technical & Scientific Research, 5*(3). DOI**:** 10.31031/COJTS.202.05.000612

Kalkan, M.E. (2022). Doğal Kauçuk/Bütadien Kauçuk Harmanlarının Fonksiyonel Hibrit Nanoparçacıklar ile Takviye Edilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 746489.

Karakaya, N. (2020). Üzerine Kalıplama ile Üretilmiş Termoset Kompozit – Termoplastik Yapılarda Arayüzeyin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 647244.

Krzywiński, K., Sadowski, Ł., Fedoruk, K., & Sieradzki, A. (2023). Fundamental Understanding of The Thermal Properties of Amorphous Epoxy Resin Coatings Filled with Quartz-Feldspar Powder Sourced from Quarry Waste. *Applied Surface Science, 614*, 156133. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.156133

Krzywiński, K., Sadowski, Ł., Stefaniuk, D., Obrosov, A., Weiß, S. (2022). Engineering and Manufacturing Technology of Green Epoxy Resin Coatings Modifed with Recycled Fine Aggregates. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9*, 253-271. DOI: 10.1007/s40684-021-00377-w

Lascano, D., Garcia-Garcia, D., Rojas-Lema, S., Quiles-Carrillo, L., Balart, R., & Boronat, T. (2020). Manufacturing and Characterization of Green Composites with Partially Biobased Epoxy Resin and Flaxseed Flour Wastes. *Applied Sciences*, *10*(11), 3688. DOI: 10.3390/app10113688

Mahmud, M. Z. A., Rabbi, S. F., Islam, M. D., & Hossain, N. (2025). Synthesis and Applications of Natural Fiber-Reinforced Epoxy Composites: A Comprehensive Review. *SPE Polymers*, *6*(1), e10161. DOI: 10.1002/pls2.10161

Mayer, P., Dmitruk, A., Leja, N., & Pakiet, E. (2020). Pull-Off Strength of Fibre-Reinforced Composite Polymer Coatings on Steel Substrate. *The Journal of Adhesion*, *98*(3), 286–304. DOI: 10.1080/00218464.2020.1831478

Menczel, J. D., Prime, R. B. (2008). *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*.(1st ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Mohan, P. (2013). A Critical Review: The Modification, Properties, and Applications of Epoxy Resins. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, *52*(2), 107-125. DOI: 10.1080/03602559.2012.727057

Montazeri, S., Ranjbar, Z., Osati, M., Asadi, S.(2022). Preparation and Characterization of a Thermal Barrier HeatResistant Silicone Coating. *Progress In Color, Colorants and Coatings*, *15*, 65-73. DOI: 10.30509/PCCC.2022.81667

Monte, S. J. (1998). Diluents and Viscosity Modifiers for Epoxy Resins. Pritchard, G.,(Ed.), *Plastics Additives: An AZ reference* (211-216). Dordrecht: Springer Netherlands.

Mustapha, R., Rahmat, A.R., Majid, R.A., Mustapha, S.N.H.(2019). Vegetable Oil-Based Epoxy Resins and Their Composites with Bio-Based Hardener: A Short Review. *Polymer-Plastics Technology And Materials*, *58*, 1311-1326. DOI: 10.1080/25740881.2018.1563119

Nairn, J. A. (2003). Polymer Structure and Characterization (1st ed.). *Oregon State University*, Oregon.

Necolau, M.I., Balanuca, B., Frone A.N., Radu, I.N., Pircalabioru G.G., Damian C.M.(2024). Combined Thermomechanical Effect of Graphene Oxide and Montmorillonite on Biobased Epoxy Network Formation for Coatings. *ACS Omega, 9*, 8297-8307. DOI: 10.1021/acsomega.3c09059

Nielsen L. E., Landel R. F.(1994). *Mechanical Properties of Polymers and Composites*(2nd ed.). CRC Press.

Nikje, M.M.A., Khanmohammadi, M.R., Garmarudi, A.B., Haghshenas, M.(2012). Nanosilica Reinforced Epoxy Floor Coating Composites: Preparation and Thermophysical Characterization. *Current Chemistry Letters*, *1*(1), 13-20. DOI: 10.5267/j.ccl.2011.12.002

Nosonovsky, M., Bhushan, B. (2007). Hierarchical Roughness Optimization for Biomimetic Superhydrophobic Surfaces. *Ultramicroscopy*, *107*(10–11), 969-979. DOI: 10.1016/j.ultramic.2007.04.011

Oldenbourg, R. (2013). Polarized Light Microscopy: Principles and Practice. *Cold Spring Harbor Protocols*, *2013*(11). DOI: 10.1101/pdb.top078600

Ouarhim, W., Zari, N., Bouhfid, R., El Kacem Qaiss, A. (2019). Mechanical Performance of Natural Fibers–Based Thermosetting Composites. Jawaid, M., Thariq, M., Saba, N.,(Ed.), *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (43-60). Woodhead Publishing.

Paluvai, N. R., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2014). Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, *53*(16), 1723-1758. DOI: 10.1080/03602559.2014.919658

Pandurangan, M. T., Kanny, K. (2020). Study of Curing Characteristics of Cellulose Nanofiber-Filled Epoxy Nanocomposites. *Catalysts*, *10*(8), 831. doi: 10.3390/catal10080831

Pascault, J.P., Williams, R. J. J. (2013). Thermosetting Polymers. Guerra, E. S, Lima, E.V.(Ed.), *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*(1st ed.)(519-533). John Wiley & Sons, Inc.

Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., & Vyvyan, J. A. (2008). *Introduction to Spectroscopy* (3rd ed.). United States of America: Brooks/Cole Thomson Learning.

Peng, W., Riedl, B. (1995). Thermosetting Resins. *Journal of Chemical Education*, *72*(7), 587-592. DOI: 10.1021/ed072p587

Pham, H.Q., Marks, M. J. Epoxy Resins.(2005). *In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*(3rd ed.). New York: Wiley Online Library.

Recommended Test Methods EDANA. (2002). *Sıvı Absorblama Testi* (10.3.99). Belçika.

Reimer, L. (2000). Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis. *Measurement Science and Technology*, *11*(12), 1826-1826. DOI: 10.1088/0957-0233/11/12/703

Rodriguez-Fabia, S., Torstensen, J., Johansson, L., & Syverud, K. (2022). Hydrophobisation of Lignocellulosic Materials Part I: Physical Modification. *Cellulose*, *29*(10), 5375-5393. DOI: 10.1007/s10570-022-04620-8

Saba, N., Mohammad, F., Pervaiz, M., Jawaid, M., Alothman, O.Y., Sain, M.(2017). Mechanical, Morphological and Structural Properties of Cellulose Nanofibers Reinforced Epoxy Composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, *97*, 190-200. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.029

Saçak**,** M.(2002).*Polimer Kimyası*(9th ed.).Ankara: Gazi Kitabevi.

Sadowski, Ł., Kampa, Ł., Chowaniec, A., Królicka, A., Zak, A., Abdoulpour, H., Vantadori, S. (2021). Enhanced Adhesive Performance of Epoxy Resin Coating by A Novel Bonding Agent. *Construction and Building Materials*, *301,* 124078. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124078.

Saeed, A., Banoqitah, E., Alaqab, A., Alshahrie, A., Saleh, M. A., Alhawsawi, A. M., Salah, N. (2022). Epoxy Flooring/Oil Fly Ash as A Multifunctional Composite with Enhanced Mechanical Performance for Neutron Shielding and Chemical-Resistance Applications. *ACS Omega*, *8*(1), 747-760. DOI: 10.1021/acsomega.2c06105

Samanta, M., Verma, A., Singh, H., Katiyar, N.K., Bandyopadhyay R., Das, B.K., Tiwary C.S., Bhattacharya, J. (2024). Positive Changes in The Mechanical and Optical Properties of The Floor Epoxy Reinforced with Green Graphene. *Polymer Composites*, *45*(16), 14672-14686. DOI: 10.1002/pc.28791

Sathish, T., Jagadeesh, P., Rangappa, S.M., Siengchin, S. (2022). Studies on Mechanical and Thermal Properties of Cellulosic Fiber Fillers Reinforced Epoxy Composites. *Polymer Composites*, *43,* 4297-4305. DOI: 10.1002/pc.26690

Sukanto, H., Raharjo, W.W., Ariawan, D., Triyono, J., Kaavesina, M.(2021). Epoxy Resins Thermosetting for Mechanical Engineering. *Open Engineering*, *11*, 797-814. DOI: 10.1515/eng-2021-0078

Üçpınar, B. (2018). Karbon Elyaf Kaplama Türlerinin ve Uyumlaştırıcıların Karbon Elyaf Takviyeli Poli(Fenilen Sülfid) Kompozitlerinin Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 494772

Van O. W. J., Puomi, P. (2007). Environmental and Solubility Issues Related to Novel Corrosion Control. Letcher, M.,(Ed.), *Thermodynamics*. *Solubility and Environmental Issues* (113-136). Elsevier.

Verma, C., Olasunkanmi, L.O., Akpan, E.D., Quraishi, M.A., Dagdag, O., Gouri, M.E., Sherif, E.S.M., Ebenso, E.E.(2020). Epoxy Resins as Anticorrosive Polymeric Materials: A review. *Reactive&Functional Polymers*, *156*, 104741. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104741

Xanthos, M. (2010). Polymers and Fillers. Xanthos, M. (Ed.), *Functional Fillers for Plastics* (2nd ed.)(3-18). Federal Republic of Germany: John Wiley & Sons.

Xiang, Q., Xiao, F. (2020). Applications of Epoxy Materials in Pavement Engineering. *Construction and Building Materials*, *235*, 117529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117529

Xue, B., Tang, R., Xue, D., Guan, Y., Sun, Y., Zhao W., Tan, J., Li, X.(2021). Sustainable Alternative for Bisphenol A Epoxy Resin High-Performance and Recyclable Lignin-Based Epoxy Vitrimers. *Industrial Crops & Products, 168*,113583. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113583

Yağcı, S., Kocabaş, D.S., Köle, M., Özbek, H.N.(2022). Controlled Instant Pressure Drop (DIC) Pretreatment to Enhance Fractionation and Enzymatic Saccharification of Poppy Capsule Waste. *Bioenerg. Res., 15*(1), 426–438. DOI: 10.1007/s12155-021-10288-y

Yılmaz, S.S. (2022). Elektroçekim Yöntemiyle Gözenekli Lif Üretimi, Karakterizasyonu ve Uygulama Alanlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 743491.

Yürekli Ş.(1997). *Reçine ve Boya Teknolojisi* (Cilt-1). İstanbul: Marshall Boya Yayınları.

Zhang, Y., Liu, X., Wan, M., Zhu, Y., & Zhang, K. (2024). Recent Development of Functional Bio-based Epoxy Resins. *Molecules*, *29*(18), 4428. DOI: 10.3390/molecules29184428

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çelik, E., Samatya Yılmaz, S., Aytac, A. (2025). Haşhaş Kapsülleri İle Biyobazlı Kompozitlerin Geliştirilmesi. *International Yıldırım Bayezid Scientific Research And Innovation Symposium-I*, Bursa, Türkiye, 9-10 Mayıs 2025.

Çelik, E., Samatya Yılmaz, S., Uyar, B., Aytac, A. (2025). Investigation of The Properties of Epoxy and Biobase Epoxy Matrices Containing A Natural Waste. *10th International Paint İstanbul Turkcoat Congress*, İstanbul, Türkiye, 27-28 Mayıs 2025.

ÖZGEÇMİŞ

2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'ne başladı ve 2019 yılında bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. 2020 yılında Polisan Kansai Boya'da Ar-Ge Araştırmacısı olarak profesyonel çalışma hayatına adım attı. 2022 yılında sanayi ve deniz boyalarından sorumlu Ar-Ge Uzmanı pozisyonuna terfi etti. Bu görevini 2024 yılının Eylül ayına kadar sürdürdü. Ardından, sanayi boyalarından sorumlu Teknik Satış Uzmanı olarak görev yapmaya başladı. Kariyerine aynı şirkette, Pazarlama bölümünde Kategori Uzmanı olarak devam etmektedir. 2023 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başlamış olup, eğitimine devam etmektedir. Ana çalışma alanları genel sanayi boyaları, deniz boyaları ve polimer teknolojisidir.