



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EPOKSİTLENMİŞ KETEN TOHUMU YAĞ İÇERİKLİ
BİYOPOLİMER FİLMLEİN HAZIRLANMASI VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Osman Berat TELLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Osman Berat TELLİ tarafından hazırlanan “**Epoksitlenmiş Keten Tohumu Yağ İçerikli Biyopolimer Filmlerin Hazırlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışması 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ

.....

Danışman

Doç. Dr. Ülkü SOYDAL

.....

Üye

Doç. Dr. Gülsüm AYDIN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan AYDOĞAN

Bu tez çalışması BAP tarafından 24201027 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Osman Berat TELLİ

11.06.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EPOKSİTLENMİŞ KETEN TOHUMU YAĞ İÇERİKLİ BİYOPOLİMER FİLMLERİN HAZIRLANMASI VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Osman Berat TELLİ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ülkü SOYDAL

2. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Aysun ORAÇ

2025, 81 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Ülkü SOYDAL
Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ
Doç. Dr. Gülsüm AYDIN

Epoksi reçine ince filmleri, kaplama malzemeleri ve yalıtkan filmler gibi çeşitli uygulamalarda giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bitkisel yağlardan elde edilen biyoreçineler, petrol içerikli termoset reçinelere sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Bu nedenle, biyobazlı içeriğe sahip yeni film veya kaplama materyallerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, keten tohumu yağından (LO) epoksidasyon yoluyla epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) sentezlenmiş ve bisfenol A tipi epoksi reçine (ER) ile 3:2 ağırlık oranında karıştırılarak biyo içerikli bir matris elde edilmiştir. ELO, FTIR analizleri ile karakterize edilmiş ve iyot sayısı ile epoksit grubu tayinleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan filmler, farklı oranlarda (%1, 3, 5, 7, 10 ve 15 ağırlıkça) ilave edilen Aynısefa çiçeği yağı (CldO) ile oluşturulmuş ve bu filmler; antibakteriyel, mekanik, termal, şişme davranışı, su içeriği, su buharı geçirgenliği, kimyasal dayanım ve biyobozunabilirlik özellikleri açısından incelenmiştir. Aynısefa çiçeği yağı ilavesi ile özellikle %10 CldO oranına kadar filmlerin çekme mukavemetinde dikkate değer bir artış gözlemlenmiştir. ELO ve CldO katkısı, film kalınlığında azalmaya yol açmıştır. Tüm film örneklerinin pH değerleri 7.1 ile 7.2 arasında bulunmuş ve bu değerlerin cilt pH'ı ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Filmlerin su buharı geçirgenlik oranları (WVTR) oldukça düşük olup 0.0082–0.0661 g/(m²·gün) aralığında ölçülmüştür. Ayrıca, CldO içeren filmler bazı patojen bakterilere karşı antibakteriyel aktivite göstermiştir. Biyobozunabilirlik performansı da CldO oranındaki artışla birlikte yükselmiş ve %15 CldO içeren filmde 42 gün sonunda biyolojik bozunma oranı %15.34 olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aynısefa yağı, Biyo içerikli film, Epoksi reçine, Keten tohumu yağı

ABSTRACT

MS THESIS

PREPARATION AND PROPERTIES INVESTIGATION OF EPOXIDIZED LINSEED OIL BASED BIOPOLYMER FILMS

Osman Berat TELLİ

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN
BIOTECHNOLOGY**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ulku SOYDAL

2nd Advisor: Asst. Prof. Dr. Aysun ORAÇ

2025,81 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr.Ülkü SOYDAL
Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ
Assoc. Prof. Dr.Gülsüm AYDIN**

Epoxy resin thin films are increasingly used in applications such as coating materials and insulating films. Bioresins produced from vegetable oils are a sustainable alternative to petroleum-based thermoset resins. Therefore, developing new films or coatings with bio-based content is essential.

In this study, epoxidized linseed oil (ELO) was synthesized from linseed oil (LO) and blended with epoxy resin (ER) at a 3:2 wt ratio to obtain a bio-based matrix. The ELO was characterized by FTIR and determination of iodine and epoxide groups. The films formed by adding calendula oil (CldO) at various concentrations (1-3-5-7-10-15 wt%) were characterized for their antibacterial, mechanical, thermal, swelling, water content, water vapor permeability, chemical resistance, and biodegradation properties. A remarkable enhancement in the film's tensile strength was noted, including up to 10 wt% CldO. The thickness of the film samples was reduced due to ELO and CldO. The pH values of all film samples ranged from 7.1 to 7.2, which is compatible with the skin's pH. The film's water vapor permeability ratio (WVTR) was relatively low, ranging from 0.0082 to 0.0661 g/(m²*d). Films with CldO showed antibacterial activity against some pathogenic bacteria. The biodegradation also increased with the increase in the CldO ratio, which was 15.34% for the 15 wt% CldO film over the 42 days.

Keywords: Biobased film, Calendula oil, Epoxy resin, Linseed oil

ÖNSÖZ

Hem lisans hem de yüksek lisans eğitimim boyunca bana yol gösteren eksik olduğum her konuda bana yardım eden tez çalışmam boyunca ister teorik ister uygulama alanlarında bana destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ülkü SOYDAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Bakteriyel analizler boyunca bana yardımcı olan ve bu aşamayı başarıyla geçmemde en büyük katkısı olan 2. Danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Aysun ORAÇ'a şükranlarımı sunuyorum.

Tez çalışmamın laboratuvar aşamasında bana teknik bilgiler öğreten Sayın hocalarım Prof. Dr. Gülnare AHMETLİ ve Doç. Dr. Süheyla KOCAMAN'a minnetlerimi sunuyorum.

Laboratuvara alışmamı ve eksik olduğum konularda bana yardımcı olan ve laboratuvarında tecrübelerinden yararlandığım Nimet ÖZMERAL'e teşekkürlerimi iletiyorum.

Tez çalışmamı destekleyen ve ihtiyacım olan bütçeyi ayıran Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne,

Benim için emeklerini esirgemeyen ve tez aşamam boyunca beni motive eden hayatta en büyük destekçilerim annem, babam ve kardeşime teşekkür ediyorum.

Osman Berat TELLİ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Polimerler	3
1.2. Biyopolimer	4
1.3. Epoksitlenmiş Ketan Tohumu Yağı (ELO)	5
1.4. <i>Calendula officinalis</i> L. (Aynısefa bitkisi)	8
1.5. Biyobozunma	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	12
2.1. Epoksitlenmiş Ketan Tohumu Yağı (ELO) ile Yapılan Çalışmalar	12
2.2. <i>Calendula officinalis</i> L. (Aynısefa Bitkisi) Esansiyel Yağı ile İlgili Çalışmalar	14
2.3. Bisfenol-A (BPA) Epoksi Reçine ile Yapılan Çalışmalar	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. Materyaller	21
3.2. Yöntem	22
3.2.1. Epoksitlenmiş Ketan Tohumu Yağı (ELO) Sentezi	22
3.2.2. Filmlerin hazırlanması	23
3.2.3. İyot sayısı (İ.V.) ve epoksi grup (E.G.) tayini	23
3.3. Analiz ve Testler	25
3.3.1. Film kalınlıkları	25
3.3.2. Filmlerin mekanik testleri	25
3.3.3. Termal gravimetrik analiz (TGA)	25
3.3.4. Filmlerin fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) analizi	26
3.3.5. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi	26
3.3.6. Antibakteriyel aktivite testi	26
3.3.7. Gaz kromatografi-kütle spektrometrisi (GC-MS) analizi	27
3.3.8. Su buharı geçirgenliği testi	27
3.3.9. Çözünürlük-şişme-su içeriği ve opaklık testi	28
3.3.10. Filmlerin kimyasal direnç testleri	29

3.3.11. pH testleri.....	29
3.3.12. Biyobozunurluk testi.....	30
3.3.13. İstatistik analizleri.....	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	31
4.1. İyot Sayısı ve Epoksi Grubu Tayin Testleri	31
4.2. Kürlenme Mekanizması.....	33
4.3. Film Kalınlıkları	33
4.4. Filmlerin Mekanik Testleri.....	35
4.5. Termal Gravimetrik Analiz (TGA)	36
4.6. Filmlerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopi Analizi	38
4.7. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntüleri.....	41
4.8. Antibakteriyel Test	43
4.9. Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS) Analizi	45
4.10. Su Buharı Geçirgenliği Testi	46
4.11. Filmlerin Çözünürlük-Şişme-Nem İçeriği ve Optik Özellik Testleri.....	47
4.12. Filmlerin Kimyasal Direnç Testleri	50
4.13. pH Ölçümleri	53
4.14. Biyobozunurluk Testi	54
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR	58
EKLER	68
EK-1 Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS) analiz raporu	68
ÖZGEÇMİŞ	69

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Bir gliserol merkeziyle birleştirilmiş üç yağ asidi zinciri içeren trigliserit zinciri Sharma ve Kundu (2006)	5
Şekil 1.2. Keten tohumu yağında bulunabilecek bir trigliserit örneği Orlova ve ark. (2021)	6
Şekil 1.3. H ₂ O ₂ ve perasit ile epoksidasyon mekanizması Marriam ve ark. (2023).....	7
Şekil 1.4. Keten tohumu yağının epoksitlenmesi.....	7
Şekil 1.5. <i>Calendula officinalis</i> L. bitkisi Jarić ve ark. (2018)	8
Şekil 1.6. Aynısefa çiçeğinde bulunan temel aktif bileşiklerin yapısı Ejiohuo ve ark. (2024).....	9
Şekil 3.1. Epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) sentezi.....	22
Şekil 3.2. Biyopolimer film yapım aşamaları	23
Şekil 3.3. Çekme testi cihazı.....	25
Şekil 3.4. Antibakteriyel test için kullanılan filmler.....	27
Şekil 3.5. Su buharı geçirgenliği testi	28
Şekil 3.6. pH testi.....	30
Şekil 3.7. Simüle toprak karışımı.....	30
Şekil 4.1. LO ve ELO iyot sayısı tayini.....	32
Şekil 4.2. Amin tipi kürleştirici ile kürlenme şeması.....	33
Şekil 4.3. Filmlerin mekanik test değerleri: a) ER ve ER/ELO filmlerin çekme dayanımı, b) ER ve ER/ELO filmlerinin çekme uzaması, c) ER/ELO (Küt. 2:3 oranında) ve ER/ELO/CldO filmlerinin çekme dayanımı, d) ER/ELO (Küt. 2:3 oranında) ve ER/ELO/CldO filmlerinin çekme uzaması	35
Şekil 4.4. ER, ELO, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin termogramları: a) ER ve ELO, b) ER/ELO ve ER/ELO/(%5 ve 15) CldO	36
Şekil 4.5. Keten tohumu yağı (LO) ve epoksitlenmiş keten tohumu yağının (ELO) FTIR spektrumları	39
Şekil 4.6. ER/ELO matrisi ve CldO katkılı ER/ELO filmlerine ait FTIR spektrumları: a) kürleşmiş ve kürleşmemiş ER/ELO matrisi b) CldO katkılı(%5 ve %15) ER/ELO filmler	40
Şekil 4.7. ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin SEM görüntüleri: a) ER/ELO, b) ER/ELO/%5 CldO (c) ER/ELO/%10 CldO (d) ER/ELO/%15 CldO	42
Şekil 4.8. ER/ELO/(%5,7,10,15) CldO filmlerinin (a) <i>S. typhimurium</i> , (b) <i>K. pneumoniae</i> , (c) <i>S. Aureus</i> ve (d) <i>B. cereus</i> bakterilere karşı inhibisyon alan görüntüleri	44
Şekil 4.9. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin nem içeriği, şişme,çözünürlük ve opaklık değerleri test sonuçları	48
Şekil 4.10. ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin polarize mikroskop görüntüleri: a): ER/ELO (a1: koşullandırılmamış, a2: %5 NaCl içinde, a3: %3 NaOH içinde, a4: %3 HCl içinde, a5: %50 aseton içinde, a6: %50 etanol içinde), b): ER/ELO/%15 CldO (b1: koşullandırılmamış, b b2: %5 NaCl içinde, b3: %3 NaOH içinde, b4: %3 HCl içinde, b5: %50 aseton içinde, b6: %50 etanol içinde).....	52
Şekil 4.11. ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin biyolojik bozunma oranı	55
Şekil 4.12. ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerinin biyobozunma fotoğrafları: a) öncesi ve b) sonrası.....	56

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO film kalınlıkları	34
Çizelge 4.2. ER, ELO, ER/ELO, ER/ELO/CldO filmlerin termal verileri	37
Çizelge 4.3. ER/ELO/CldO filmlerinde CldO oranına bağlı olarak inhibisyon bölgesi çapındaki değişim tablosu	43
Çizelge 4.4. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin su buharı geçirgenliği	46
Çizelge 4.5. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin kimyasal direnci	50
Çizelge 4.6. ER, ELO ve ER/ELO/CldO filmleri pH değerleri	54



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

W:	Ağırlık
%:	Yüzde
=:	Eşittir
>:	Büyüktür
<:	Küçüktür
(-):	Negatif
(+):	Pozitif
°C:	Santigrat derece
g:	Gram
Cm:	Sabtimetre
CO ₂ :	Karbondioksit
CH ₃ COOH:	Asetik asit
Ca:	Kalsiyum
C:	Karbon
CO ₂ :	Karbondioksit
HCl:	Hidroklorik asit
H ₂ O:	Su
H ₂ O ₂ :	Hidrojen peroksit
kPa:	Kilopaskal
KOH:	Potasyum hidroksit
MPa:	Megapaskal
µm:	Mikrometre
mm:	Milimetre
nm:	Nanometre
NaOH:	Sodyum hidroksit
NaCl:	Sodyum klorür

Kısaltmalar

CldO:	Aynısefa çiçeği
E.G.:	Epoksi grup
ELO:	Epokstlenmiş keten tohumu yağı
GC-MS:	Gaz kromatografisi-kütle spektrometresi
LO:	Keten tohumu yağı
İ.V. :	İyon sayısı
VO:	Bitkisel yağlar
Tg:	Camsı geçiş sıcaklığı
TS:	Çekme mukavemeti

1. GİRİŞ

Epoksi reçineler, kimyasal ve mekanik direnç, termal kararlılık, mükemmel yapışma özelliği, iletkenlik, elektrik yalıtımı, yüksek aşınma direnci, düşük büzülme, düşük toksisite ve düşük fiyat gibi benzersiz özelliklere sahiptir Hasan ve ark. (2022). Bu özellikleri onu otomotiv, havacılık, inşaat, elektronik, gıda vb. alanlardaki çeşitli endüstriyel uygulamalarda yapıştırıcı, kaplama, ambalaj ve yapısal parça olarak çeşitli polimerlerden en yaygın kullanılan matris malzemeleri yapar Pappa ve ark. (2022). Bununla birlikte, kürlleme sırasında oluşan yüksek çapraz bağlanma yoğunluğu nedeniyle doğası gereği kırılmalıdır Yim ve ark. (2017). Çapraz bağlı oluşu stres, darbe ve aşınma gibi durumlarda yapısı içinde yayılan ve döküntü şeklinde bir kopmaya neden olan mikro çatlaklara neden olur Maleki ve ark. (2024). Ayrıca geleneksel petrol türevi epoksi formülasyonları, ambalaj sektöründe ilişkili toksisiteleri nedeniyle son derece ciddi çevre ve sağlık endişeleri oluşturmaktadır Buss ve ark. (2025). Fosil hammaddelerin yenilenememesiyle birlikte yüksek performanslı epoksi reçineler geliştirmek için fosil hammaddelerin yerine yenilenebilir kaynakların kullanılması, dünya çapında endüstri ve akademinin ilgisini çekmektedir Li ve ark. (2024).

Bitkisel yağlar, bulunabilirliği, yenilenebilir doğası, biyolojik olarak parçalanabilirliği, çok çeşitli kimyasal modifikasyonlar yapma olanağı ve geniş uygulanabilirliği nedeniyle polimer kimyacıları tarafından geleneksel epoksi reçinelere alternatif olarak tercih edilmeye başlanmıştır Malachovskienė ve ark. (2023). Bitkisel yağlar genellikle farklı yağ asitlerinin değişen doymamışlık derecelerine sahip trigliseritlerdir Lligadas ve ark. (2013). Birden fazla C=C bağının varlığı, biyolojik yağları bir dizi yararlı polimerik malzemenin hazırlanması için ideal, doğal yapı taşları yapar ve yeni yapıların oluşturulması için çeşitli olasılıklar sunar Andjelkovic ve ark. (2005).

Epoksitlenmiş bitkisel yağlar, %100'e kadar biyolojik olarak yenilenebilir içeriğe sahip, ekonomik, yaygın olarak bulunabilen ve çevre dostu monomerler olarak iyi bilinmektedir Hubmann ve ark. (2021). Epoksitlenmiş yağlar, nispeten düşük viskoziteleri ve daha iyi işlenebilirlikleri nedeniyle çok sayıda mühendislik uygulaması için biyo içerikli filmlerin hazırlanmasında yenilenebilir hammaddeler olarak kabul edilir Khandelwal ve ark. (2018). Epoksitlenmiş bitkisel yağlar, geleneksel epoksi kürlleme maddeleriyle (anhidrit, aminler, amitler gibi) reaksiyona girebilir ve kürlenebilir Mazzon

ve ark. (2015). Ayrıca epoksitlenmiş bitkisel yağlar, bitkisel yağdaki doymamış yağ asitlerinin karbon-karbon çift bağları ile bir oksidan arasındaki epoksidasyonla üretilebilir Liu ve ark. (2025).

Keten tohumu yağı, çevre dostu ve yenilenebilir özelliklere sahip tipik bir bitkisel yağdır Su ve ark. (2020). Keten tohumu yağı, perasitler gibi malzemelerle çift bağların reaksiyonunun bir sonucu olarak oksiran halkaları oluşturmak için bir epoksidasyon işlemiyle fonksiyonelleştirilebilir. Keten tohumu yağının epoksidasyon işlemi, petrol içerikli epoksi reçinelerine benzer özelliklere sahip epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) verir Samper ve ark. (2015). Epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO), yüksek çekme mukavemeti, iyi termal kararlılığı ve üstün sönümleme özelliği sayesinde yapışma ve kaplama özelliklerini artıran, ayrıca polimer matrisini modifiye etmek için biyo içerikli bir reçine olarak yaygın olarak kullanılmaktadır Madhusudhana ve ark. (2022).

Genellikle tarımsal-endüstriyel atıklardan ve biyokütleden türetilen biyodolgu maddeleri, polimerlerin çevresel ayak izlerini azaltırken Muhammad ve ark. (2025) azalmış yoğunluk, düşük maliyet ve geliştirilmiş özgül mukavemet, yenilenebilirlik ve ayrışabilirlik özellikleri gibi bazı avantajlarından dolayı Kumar ve ark. (2022) epoksi reçine matrislerine eklenerek biyopolimer film özelliklerinin geliştirilmesine yol açar Balavairavan ve ark. (2025). Terpenoid, fenolik ve aromatik yapılara dayanan karmaşık, uçucu karışımlara ait bitkisel yağlar ise katkı maddelerine örnek olarak verilebilir Pleva ve ark. (2025).

Calendula officinalis L. (Aynısefa bitkisi), parlak sarı ve turuncu bir çiçektir, halk dilinde yaygın olarak kadife çiçeği veya kültür kadife çiçeği olarak bilinir Danielski ve ark. (2007). Triterpenoidler, flavonoidler, kumarinler, kinonlar, uçucu yağlar, karotenoidler ve amino asitler de dâhil olmak üzere biyoaktif bileşiklerin zengin bileşimi Helfenstein ve ark. (2024) ona anti-inflamatuar, antiseptik, antibakteriyel, antikanser ve antioksidan kabiliyetleri gibi terapötik nitelikler kazandırır Tavallali ve ark. (2024). Ayrıca tıbbi bitki özleri, insanlar için önemli bir kaynak olarak kabul edilir ve bu nedenle özlere ilaç, tarım ve gıda endüstrileri gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılır Tubay-Bermudez ve ark. (2024).

Tez çalışmamızda, keten tohumu yağı endüstriyel olarak daha işlevsel kullanmak için epoksitlendirilmiştir. Dahası, ticari epoksi reçine ile harmanlanarak yeni bir matris elde edilmiş ve daha ucuz maliyetli, biyolojik olarak parçalanabilir, mekanik ve bariyer özelliklerinin ticari epoksi reçinelerle karşılaştırılabilir hale getirmek amaçlanmıştır.

Biyoiçerikli filme antibakteriyel etki kazandırmak için Aynısefa bitkisi yağı (CldO) katkı maddesi olarak eklenerek modifiye edilmiştir.

1.1. Polimerler

Çağdaş toplumda, yaygın olarak "plastikler" olarak adlandırılan polimerik malzemeler, modern medeniyette önemli bir rol oynar. Bu malzemeler yeni değildir, uzun yıllardır bilmeden kullanılmıştır. "Polimer" terimi, "çok" anlamına gelen klasik Yunanca "poly" ve "parçalar" anlamına gelen "mers" köklerinden türemiştir. Bu, polimerlerin uzun zincirler oluşturmak üzere birbirine bağlanan monomer adı verilen çok sayıda küçük molekülden oluştuğunu ve bunun tipik olarak $10.000 \text{ g mol}^{-1}$ ile $1.000.000 \text{ g mol}^{-1}$ arasında değişen yüksek molekül ağırlıklı moleküllerle sonuçlandığını ima eder Salas ve ark. (2025). Polimerler, hafifliği, şekillendirilebilir yapısı, tasarım esnekliği ve maliyet etkinliği gibi diğer kullanışlı özellikleriyle modern yaşamda devrim yaratmış Caicho-Caranqui ve ark. (2024) ve bu malzemeler tıp, elektronik, paketleme, inşaat, otomobil alanlarında ve daha fazlasında vazgeçilmez hale gelmiştir Wan ve Xu (2024).

Yaygın olarak kullanılan polimer matrisleri arasında poliüretan, epoksi ve akrilikler bulunur ve her biri farklı avantajlar ve sınırlamalar sunar. Epoksi reçineler, yüksek mekanik mukavemetleri, kimyasal dirençleri ve çeşitli yüzeylere güçlü yapışmaları ile karakterize edilir. Ancak, doğal kırılgenlikleri bir sınırlama olabilir Vinodhini ve ark. (2025). Polimer özellikleri diğer malzemelerle birleştirilerek ayarlanabilir ve bunun sonucunda daha gelişmiş polimerik malzemeler elde edilir Franz ve ark. (2024). Son otuz yılda iki veya daha fazla polimerin karışımlarına dayanan yeni malzemelere olan ilginin arttığı gözlemlenmiştir. Sentetik ve doğal polimerlerin karışımları, tek bileşenlere kıyasla geliştirilmiş mekanik özelliklere ve biyouyumluluğa sahip yeni bir malzeme sınıfı oluşturabilir Sionkowska (2011).

Polimerler plastiğin temel yapı taşlarıdır ve fosil karbon içerikli polimerlerin yıllık küresel üretim hacmi 2019 yılında 457 milyon metrik tonun üzerine çıkmış olup bu rakamın 2060 yılına kadar üç katına çıkması beklenmektedir Seewoo ve ark. (2024).

Ayrıca, küresel toplumun gezegenin karşı karşıya olduğu çeşitli kirlilik biçimleri ve doğal kaynakların tükenmesi gibi çevresel tehditleri ele alması için acil bir ihtiyaç duyulmaktadır. Bu zorluklar, kaynak verimliliğini artırmayı amaçlayan çevre düzenlemeleri ve politikaları tarafından motive edilen sürdürülebilir kalkınmaya doğru

büyüyen bir harekete yol açmıştır Ajayi ve ark. (2025). Artan kamu bilinci ve biyoteknolojilerin ilerlemesi, biyo içerikli polimerlerin yüksek teknolojiye emtiya kadar çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır Mamay ve ark. (2025).

1.2. Biyopolimer

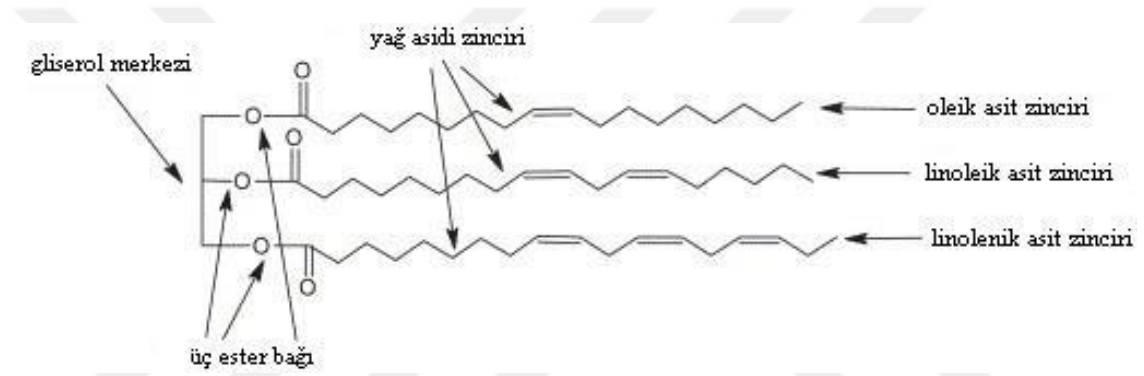
Biyopolimerler, kimyasal işlemler veya canlı organizmalar tarafından biyosentez yoluyla hayvanlar, mikroorganizmalar ve bitkiler gibi farklı doğal kaynaklardan üretilen polimerlerdir Getahun ve ark. (2024). Biyopolimerler, biyolojik olarak parçalanabilir, toksik olmayan, yenilenebilir, bol miktarda mevcut ve çevre dostu oldukları için dünya çapında geniş kabul görmüş ve modern yaşamın birçok alanında yerini almıştır. Baishya ve Kumar (2025). Ek olarak, bu malzemeler günlük hayatımızda kullandığımız yüzlerce farklı ürünün üretiminin temelini oluşturur Singh ve ark. (2023). Kullanım alanları farmakoloji, tıp, elektronik, paketleme, kozmetik, su arıtma, giyim tekstili, plastikler ve farklı endüstrilere kadar uzanırlar, ayrıca biyosensörler dahil olmak üzere çeşitli uygulamaları vardır Parvez ve ark. (2025).

Biyopolimerler, doğal ve sentetik kategorilere ayrılabilir. Doğal biyopolimerler doğrudan biyolojik kaynaklardan elde edilirken, sentetik biyopolimerler biyo içerikli monomerlerin polimerizasyonu yoluyla üretilir Edo ve ark. (2025). Doğal biyopolimerlere proteinler, polisakkaritler, reçineler, doğal kauçuk ve ribonükleik asit (RNA) örnek verilebilir Liang ve ark. (2024). Kimyasal olarak sentezlenen polimerler arasında poli(laktik asit) (PLA), polikaprolakton (PCL), poli(vinil alkol) (PVA), poli(glikolik asit) (PGA), poli(bütlen süksinat) (PBS) ve poli(bütlen adipat)-kotereftalat (PBAT) örnek olarak verilebilir Babaremu ve ark. (2023).

Ayrıca, biyo içerikli polimerler, filmin baskın matris bileşenini oluşturmak için homojen olarak karışma yeteneğine sahip bir veya daha fazla biyopolimer içerebilir Shanmugasundram ve ark. (2025). Hem sentetik hem de biyo içerikli polimerlerin bir kombinasyonunu oluşturabilir. Bu iki polimer türünün bir arada kullanılması, daha geniş bir özellik yelpazesi sergileyen ve potansiyel uygulamalarını genişleten yeni malzemelerle sonuçlanır Gonçalves ve ark. (2025).

1.3. Epoksitlenmiş Keten Tohumu Yağı (ELO)

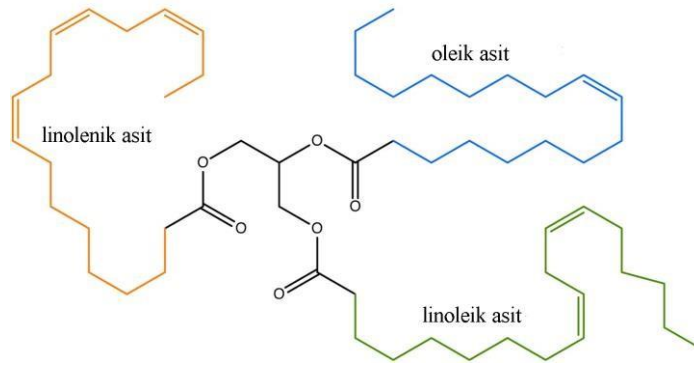
Bitkilerden elde edilen bitkisel yağlar (VO), gliserol ve yağ asidi içerikli esterlerden oluşan trigliseritlerdir. Genel yapısı Şekil 1.1’de gösterilen, yağ asitlerinin trigliserit esterleridir. Trigliseritler, bir gliserol çekirdeğine bağlı üç yağ asidinden oluşmaktadır. Doymamış yağ asitleri, çeşitli fonksiyonel gruplara ekonomik olarak dönüştürülebilen çift bağlar içerir. Bu fonksiyonel grupların varlığı, VO'ların plastik endüstrisinde monomerik hammadde olarak kullanılması için fırsatlar yaratır. Bitkisel yağ epoksidasyona uğrayabilir ve daha sonra kürlleme maddesiyle çapraz bağlanarak biyoçerikli ve sürdürülebilir bir epoksi reçinesi üretilebilir Chong ve ark. (2022).



Şekil 1.1. Bir gliserol merkeziyle birleştirilmiş üç yağ asidi zinciri içeren trigliserit zinciri Sharma ve Kundu (2006)

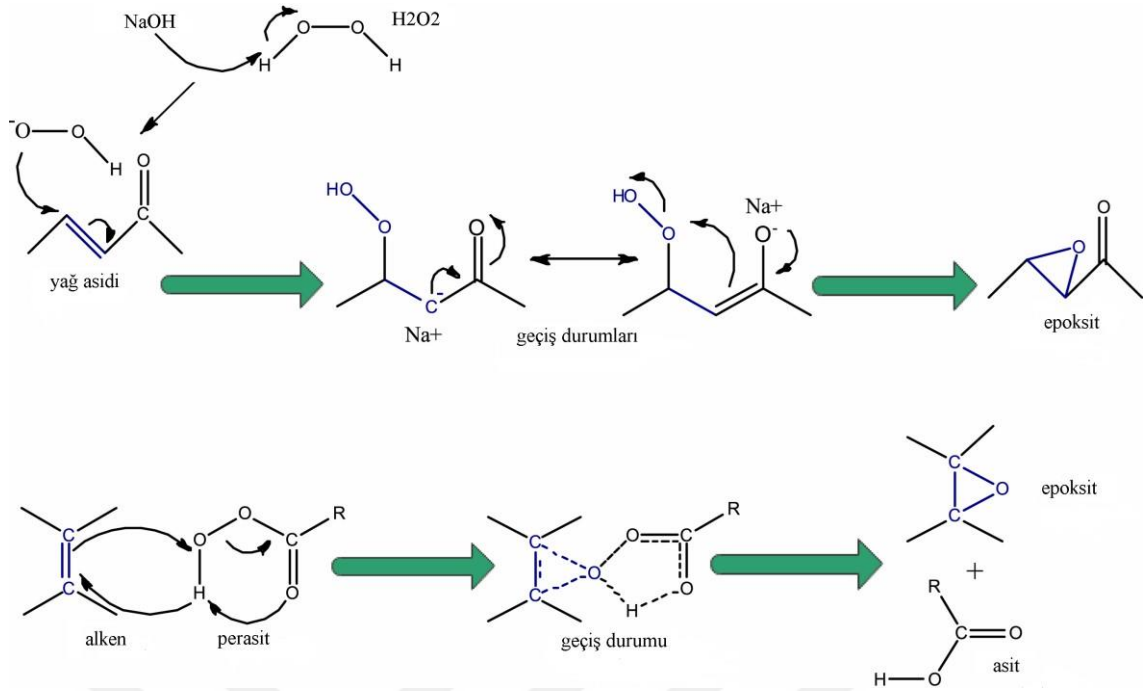
Keten tohumu yağı esas olarak merkezi bir gliserol kısmına ester bağlarıyla bağlanan üç ana yağ asidi zincirinden oluşan trigliserit moleküllerinden oluşur Addis ve ark. (2020). Bu ana yağ asitleri, Şekil 1.2’de görüldüğü üzere; %57 linolenik asit, %15 linoleik asit, %19 oleik asitten oluşur ve yüksek doymamışlık derecesine sahiptir Pfister ve Larock (2010). Bu nedenle, bu yağlar oda sıcaklığında viskoz bir sıvının kıvamını alır Riaz ve ark. (2010).

Keten tohumu yağına ait triasilgliserit bileşiği



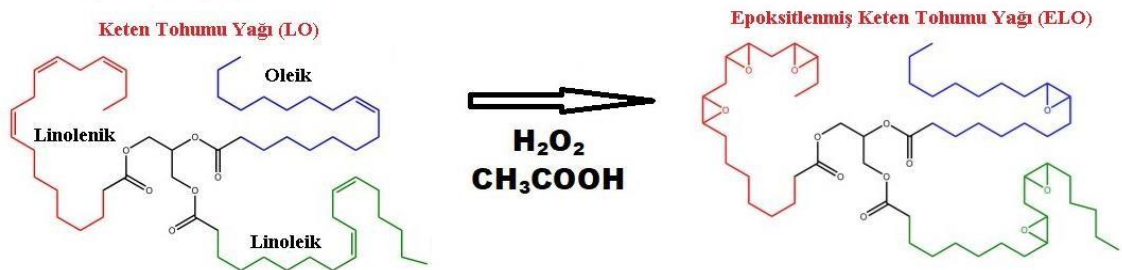
Şekil 1.2. Keten tohumu yağında bulunabilecek bir trigliserit örneği Orlova ve ark. (2021)

Epoksidasyon, alkenlerin eş zamanlı oksidasyonu sonucu nispeten kararlı olan üç üyeli bir halka, yani oksiran halkasının oluştuğu bir tepkimedir. Bu süreç, Şekil 1.3'te görüldüğü gibi hidrojen peroksit (H_2O_2), perasitler gibi reaktiflerle gerçekleşen ve tüm bağlanabilir moleküler bağlantı noktalarının geçiş durumu aracılığıyla bir araya geldiği kabul edilen bir oksidatif tepkimedir. Uygun bir çözücü varlığında gerçekleşir. Çoğunlukla, oksiran halkasını hidrolize ettikleri için sulu çözücüler yerine eter, dioksan, kloroform veya aseton gibi susuz çözücüler tercih edilir. Ancak, hidrojen peroksit ile yapılan epoksidasyon, çözücü olarak suya ihtiyaç duyar ve bu durum halka açılmasını da teşvik eder Marriam ve ark. (2023).



Şekil 1.3. H₂O₂ ve perasit ile epoksidasyon mekanizması Marriam ve ark. (2023)

Keten tohumu yağının yapısında bulunan oleik, linoleik ve linolenik yağ asitlerindeki karbon-karbon çift bağı, peroksi asitler, dioksiran veya hidrojen peroksit ile reaksiyona sokularak epoksitlenebilir. Bu epoksitler, epoksi-amin çapraz bağlama reaksiyonu yoluyla amin içeren monomerlerle reaksiyona sokulabilir Chen ve ark. (2002). Böylece keten tohumu yağından epoksitlenmiş keten tohumu yağı elde edilebilir. Şekil 1.4, keten tohumu yağının epoksitlendikten sonra yapısal değişimini göstermektedir.



Şekil 1.4. Keten tohumu yağının epoksitlenmesi

Valente ve ark. (2023) bitkisel yağ türevlerinin selüloz kompozitler üzerindeki potansiyelini araştırmışlar ve sürdürülebilir, toksik olmayan ve nispeten ucuz bir molekül olan ELO'nun, tüm selüloz kompozitlerin işlenebilirliğini, kopma uzamasını ve

esnekliğini, darbe dayanımını ve akışkanlığını termal kararlılığından ödün vermeden önemli ölçüde iyileştiren etkili bir plastikleştirici olduğuna dair bulgular saptamışlardır.

Sangaletti ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada, epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) ve diboronik ester ditiol dinamik çapraz bağlayıcı (DBEDT) arasındaki basit bir reaksiyonla vitrimer reçinesi elde edilmiştir. Vitrimerin bitkisel yağdan yapılmış olması dikkate alındığında, vitrimer üzerindeki çekme ve bükme testi ticari bir epoksi reçinesine kıyasla tatmin edici sonuçlar göstermiştir.

1.4. *Calendula officinalis* L. (Aynısefa bitkisi)

Calendula officinalis L. (Aynısefa), Akdeniz kökenli yıllık bir bitkidir. 13.yy'da İngiltere'ye getirildiği ve daha sonra kültür bitkisi olarak Avrupa'ya yayıldığı söylenmektedir. Terapötik kullanımının 13. yüzyıldan itibaren özellikle yara iyileşmesinde en yaygın olduğu görülmektedir. Kuzey Amerika İç Savaşı ve Birinci Dünya Savaşı sırasında merhem ve krem olarak ve antiseptik ve antiinflamatuvar ajan olarak kullanılmıştır Abdelwahab ve ark. (2022). Ayrıca Akdeniz bölgesinde geleneksel olarak yanıklara, kardiyovasküler rahatsızlıklara, sinirlilik ve uykusuzluğa, karaciğer ve sarılık sorunlarına, göz iltihabına, ülserlere ve sindirim sorunlarına, cilt nasırlarına ve siğillere karşı bitkisel ilaç olarak kullanılmıştır Zournatzis ve ark. (2024). Şekil 1.5'te Aynısefa bitkisine yer verilmiştir.

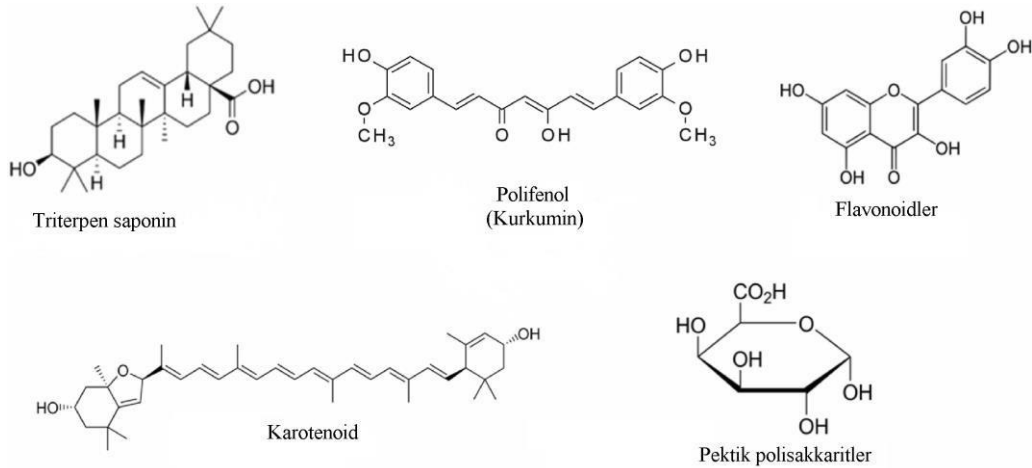


Şekil 1.5. *Calendula officinalis* L. bitkisi Jarić ve ark. (2018)

Aynısefa bitkisi flavonoidler, saponinler, polisakkaritler, alkaloidler, uçucu yağ ve terpenoidler vb. içerir. Rutin, kuersetin, kampferol, kurkumin, α - terpineol vb. gibi aktif bileşenleri, iltihabı azaltmaya, temizleyici aktiviteye sahip olmaya ve ağrıyı hafifletmeye

yardımcı olan yara iyileşmesinin farklı aşamalarında etki eder Agrawal ve ark. (2024). Aynısefa bitkisindeki temel aktif bileşiklerden bazıları polifenoller, flavonoidler, karotenoidler, triterpenoid saponinler ve pektik polisakkaritlerdir.

Bunlardan polifenol bileşenleri, nekroz veya apoptozis indüksiyonu yoluyla tümör hücrelerinin çoğalmasını önlerken Raut ve Karuppayil (2014) flavonoidler, bitkinin antiparkinson, anti-inflamatuar etkisinden sorumlu bileşenler olarak belirlenmiştir Kapoor ve ark. (2023). Ayrıca flavonoidler ve antosiyaninler gibi çok çeşitli bileşenler içeren aynısefa bitkisi doğal antioksidanlar bakımından zengin bir kaynaktır Chitrakar ve ark. (2019). Karotenoidlerin ise insan sağlığı üzerinde antioksidan, antianjiyojenik, antidiyabetik, antiobezite, antiinflamatuar, antimalaryal ve pro-vitamin A etkileri gibi birçok özelliğini gösteren bol miktarda kanıt vardır Gholipour-Varnami ve ark. (2025). Doğada, triterpenoid saponinler bitkiler tarafından öncelikle çeşitli biyotik ve abiyotik streslere karşı savunma amacıyla kullanılır. Ayrıca, bildirilen anti-inflamatuar, antikanser ve diğer aktivitelerle insan sağlığında da önemli bir rol oynarlar Liu ve ark. (2024). Pektik polisakkaritlerin en önemli potansiyel uygulaması anti-inflamatuar aktivitedir. Pektik polisakkarit bileşimi ve yapısı oldukça karmaşıktır ve çeşitli anti-inflamatuar mekanizmaları vardır Jin ve ark. (2021). Şekil 1.6'da Aynısefa bitkisinde bulunan temel aktif bileşiklerin yapısı verilmiştir.



Şekil 1.6. Aynısefa çiçeğinde bulunan temel aktif bileşiklerin yapısı Ejiohuo ve ark. (2024)

Bitkilerden elde edilen ve bakteri, mantar ve virüslerin zararlı etkilerini önleyebilen antimikrobiyal ajanlar olarak popüler olan belirli biyoaktif bileşikler vardır. Amino asitler, terpenoidler, flavonoidler, polifenoller ve tanenler en yaygın olanlarıdır ve

iyi biyouyumluluk ve biyolojik olarak parçalanabilirlikle birlikte önemli biyolojik aktiviteye sahiptir ve bu da onları oldukça ilgi çekici hale getirir Ghosal ve Ghosh (2023). Bitkisel yağlar, kokulu ve yüksek uçucu özelliğe sahip olduklarından, geleneksel ambalajlamada kullanılmaları zordur Skendi ve ark. (2022). Ancak son yıllarda, karanfil, tarçın, çay ağacı, biberiye ve lavanta gibi bitkisel yağlar biyopolimerlerle birleştirilerek biyoaktif molekül taşıyıcı sistemlerin üretilmesi sürekli olarak artmaktadır. Bitkisel yağların polimerik formülasyonlarda iletilmesine yönelik bu yaklaşım, düşük maliyeti, çok yönlülüğü ve yüksek verimi nedeniyle bilim dünyasında önemli ilgi görmüştür. Bitkisel yağların dâhil edilmesi ile filmlerin antibakteriyel, bariyer ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir Borges ve ark. (2024).

1.5. Biyobozunma

Biyolojik olarak parçalanabilirlik, bir malzemenin bakteri ve mantar gibi mikroorganizmalar tarafından su, karbondioksit ve biyokütle gibi doğal maddelere parçalanabilme yeteneğini ifade eder Kim ve Chung (2024).

Biyolojik olarak parçalanabilir malzemeler fosil kaynaklardan elde edilebilir, çünkü biyolojik olarak parçalanma yeteneği malzemenin kökeninde değil, kendisinde bulunur Katnic ve Gupta (2025). Biyolojik olarak parçalanabilirliği ile mekanik olarak tercih edilen özellikleri arasında sıklıkla bir denge vardır, çünkü daha güçlü mekanik özellikler genellikle plastiğin biyolojik olarak parçalanabilirliğinin pahasına gelir. Bu durumlarda, endüstrinin gerekli mekanik özelliklere sahip ve biyolojik olarak parçalanabilir olan modifiye polimerler arayışına itiyor Polman ve ark. (2021).

İki farklı polimer harmanlanması yerine matris olarak bu biyopolimerlere dayalı biyokompozitler de akademi için büyük ilgi görmüştür. Polimer matris içindeki lokalizasyonlarına ve polimerlerle etkileşimlerine büyük ölçüde bağlı olan bu tür malzemeler reolojik ve mekanik performansını değiştirme konusunda büyük bir potansiyel göstermiştir Pesaranhajiabbas ve ark. (2023). Bazı durumlarda, bu elde edilen yeni matrislere nanoselüloz gibi biyolojik kaynaklı dolgu maddelerinin eklenmesi, biyolojik olarak parçalanabilir polimerlerin bozunmasını arttırabilir Kerton (2024).

Biyobozunurluk CO_2 oluşumu veya O_2 tüketimi ile ilişkilendirilmektedir. Biyobozunurluk testlerinde bu sınıflandırma göz önünde bulundurularak iki farklı sınıflandırma yapılmaktadır. Bunlar aerobik ve anaerobik bozunmadır. Aerobik biyobozunma oluşması için ortamda oksijen olması bunun sonucunda karbondioksit

üretildiğini eğer anaerobik bozunma gerçekleşirse karbondioksit yerine metan üretildiğini bunun sebebi ise ortamda oksijen olmadığı tespit etmişlerdir Devrim (2019).

Aerobik biyobozunma: $\text{Polimer} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{biyokütle} + \text{kalıntı (k)}$

Anaerobik biyobozunma: $\text{Polimer} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{biyokütle} + \text{kalıntı (k)}$



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Farklı oranlarda CldO katkı maddesi içeren ER/ELO matrisiyle hazırlanan ER/ELO/CldO filmlerinin sentezi sırasında yapılan kaynak araştırmasına bu bölümde yer verilmiştir.

2.1. Epoksitlenmiş Keten Tohumu Yağı (ELO) ile Yapılan Çalışmalar

Biyolojik polimer olan epoksi keten tohumu yağı çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir yapısından dolayı petrol içerikli polimerlere kıyasla daha avantajlıdır. Bu nedenle, epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) gibi biyolojik polimerler petrol yağından türetilen sentetik polimerlerin alternatifi olarak kullanılır Alam ve ark. (2014).

Reinhardt ve ark. (2022) epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) ve tannik asit (TA) içerikli tamamen biyo içerikli bir epoksi termoset üretmişlerdir. TA, ELO için bir kürlleme maddesi olarak yüksek derecede işlevselliği ve aromatik yapısı ile yüksek camsı geçiş sıcaklığına (T_g), yüksek sertliğe ve yüksek mukavemete sahip tamamen biyo içerikli bir polimer ağı oluşturmaya olanak tanımıştır. 146 °C'lik maksimum T_g , 2986 MPa'lık eğilme modülü ve 72 MPa'lık eğilme mukavemeti elde edilip, TA/ELO termosetinin güçlü malzeme özellikleri, yüksek performanslı uygulamalar için petrokimyasal içerikli epoksi reçineleri için biyo içerikli bir ikame olarak potansiyelini ortaya koymuşlardır.

Bergoglio ve ark. (2024), biyolojik olarak türetilmiş epoksi reçinelerinin çok malzemeli baskısı için kuvvetlerin otomatik olarak değiştirilmesini içeren çift kuvvetli DLP 3B baskı konsepti üzerine araştırma yapmışlardır. Epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) ve vanilin alkolü diglisidil eter (DGEVA) biyolojik olarak türetilmiş epoksi monomerleri kullanılarak çok katmanlı nesneleri ve numuneleri farklı mekanik özelliklerle basmışlardır. Kürlleme süreci araştırılıp, 3B yazdırılan nesne tamamen karakterize edilmiştir. Talep üzerine çeşitli özellikler sergileyebilen çok katmanlı epoksi termosetler elde etme olasılığı olduğunu göstermişlerdir.

Başka bir çalışmada, epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO), undesilenik asit (UA) ile reaksiyona sokulmuş ve yeni aşılınmış kısımlardan terminal çift bağlara sahip, polimerize edilebilir grupları bağlamak için uygun, ELO/UA (undesilenik keten tohumu yağı) olarak adlandırılan fonksiyonelleştirilmiş bir yağ elde edilmiştir. Epoksi halkalarını metakrilik asit (MA) ile açarak reaktivitesini artırmak için daha da uyarlanmış ve iki farklı

türev elde edilmiştir: kısmen metakrilat olan (metakrilat epoksitlenmiş ELO/UA) ve tamamen metakrilat olan (metakrilat ELO/UA). İçerdikleri reaktif gruplara bağlı olarak, tüm bu reaktif keten tohumu yağı (LO) içerikli monomerler UV-vis ışık yardımıyla fotopolimerizasyona tabi tutularak farklı özelliklere ve potansiyel uygulamalara sahip yeni malzemeler elde etmişlerdir Slabu ve ark. (2024).

Komartin ve ark. (2021) ise epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) ve kraft lignini (LnK), dolgu maddesinin lignin tortulaşmasının yarattığı olumsuzluğun üstesinden gelmek ve homojen dağılımını sağlamak için ultraviyole (UV) radyasyonu ve termal kürlemeyi içeren çift kürleme prosedürü yoluyla korozyon koruma katmanları olarak yeni sürdürülebilir kompozitler elde etmek için kullanmıştır. Elde edilen tüm kompozitler karbon çeliği korozyon koruma kaplamaları olarak test edilmiş ve %140380'lik önemli bir korozyon önleme verimliliği artışıyla sonuçlanmıştır.

Başka bir çalışmada, bakteriyel fermentasyondan elde edilen biyolojik olarak parçalanabilir bir alifatik polyester olan poli(3-hidroksibutirat) (PHB), yüksek sertlik ve kırılabilirlik gibi dezavantajlarından dolayı farklı oranlardaki epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) ve epoksitlenmiş soya fasulyesi yağı (ESBO) ile eriyik ekstrüzyon ve bileşikleme ve ardından enjeksiyon kalıplama ile plastikleştirilmiştir. ELO tarafından sağlanan plastikleştirme etkisinin, ELO konsantrasyonunun da dengeli özelliklerle ESBO'dan daha etkili olduğunu göstermiştir. ELO ilavesi, kopmada uzama ve darbe emilim enerjisinde gözle görülür bir artışla mekanik sünek özelliklerde bir iyileşmeye yol açtığı görülmüştür. Termal özellikler açısından, hem ELO hem de ESBO'nun eklenmesi, PHB'nin termal kararlılığında belirgin bir artışa yol açmıştır Garcia-Garcia ve ark. (2016).

Liu ve ark. (2025) yaptıkları çalışmada, epoksitlenmiş keten tohumu yağı ve polikaprolaktondan (PCL) türetilen biyolojik olarak parçalanabilir yeni bir polimer sınıfı olan EL/PCL elde etmişler. Poli(vinil klorür) (PVC) reçinesiyle harmanlandı. UVvis, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) çalışmaları, ELO-PCL'nin PVC ile iyi uyumlu olduğunu doğrulamıştır. ELO-PCL PVC'yi etkili bir şekilde plastikleştirebilmiştir. Yaygın olarak kullanılan plastikleştirici DOP ile doğrudan karşılaştırıldığında, ELO-PCL karşılaştırılabilir plastikleştirme verimliliği göstermiştir. Çekme testleri, ELO-PCL/PVC'nin mekanik özelliklerinin DOP/PVC'den daha iyi olduğunu göstermiştir. Elde edilen PVC plastikleri yalnızca üstün termal

kararlılığa sahip olmakla kalmadı, aynı zamanda yüksek sıcaklık veya güçlü alkali koşullar altında renk bozulmasına karşı direnç göstermiştir.

Khandelwal ve ark. (2018) yaptığı bu çalışmada, epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) matrisi ile polianilin (PANI) kullanılarak biyotabanlı iletken kompozitler geliştirilmiştir. Kompozitler, PANI içeriğine bağlı olarak artan iletkenlik göstermiş; %15 PANI yüklemesiyle $6,18 \times 10^{-6}$ S/cm değerine ulaşılmıştır. Dinamik kütleme analizleri, yüksek PANI içeriğinde kütleme tepkisini sınırlı ölçüde geciktirdiğini; %5 PANI'da ise bu etkinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir. Termomekanik özelliklerde iyileşme gözlemlenmiş; %15 PANI ile cam geçiş sıcaklığı 63 °C'ye ulaşmıştır. Termal Gravimetrik Analiz (TGA) sonuçlarına göre PANI ilavesi termal bozunma davranışını değiştirmemiştir. SEM görüntüleri, homojen PANI dağılımını ve faz ayrımı olmadığını ortaya koymuştur. Mekanik testler, PANI içeriğiyle birlikte çekme dayanımı ve elastik modülde artış, kopma uzamasında ise hafif azalma göstermiştir. Bu bulgular, ELO/PANI kompozitlerinin antistatik kaplama ve elektrostatik deşarj (ESD) uygulamaları için çevre dostu ve işlevsel bir alternatif sunduğunu göstermiştir.

2.2. *Calendula officinalis* L. (Aynısefa Bitkisi) Esansiyel Yağı ile İlgili Çalışmalar

Gedik ve ark. (2024) bu çalışma, *Calendula officinalis* L. dahil olmak üzere üç bitkinin uçucu yağlarının *Escherichia coli* üzerinde antibiyofilm ve anti-bakteriler arası etkilerini araştırmıştır. *Calendula officinalis* L. uçucu yağı, GC/MS analizi ile karakterize edilmiştir ve ana bileşenleri arasında α -cadinol, γ -cadinene ve δ -cadinene gibi seskiterpenoidler bulunmuştur. *Calendula officinalis* L. yağı, *Escherichia coli* gibi patojen bakterilerin biyofilm oluşturmalarını önlemede etkili bulunmuştur. Bu etkinin, içerdiği fenolik bileşikler ve flavonoidlerle bağlantılı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bitkinin bakteriler arası haberleşmeyi baskılayarak bakterilerin organize hareketini ve enfeksiyon oluşturma potansiyelini azalttığı vurgulanmıştır. Antioksidan aktivite ise 2,2-difenil-1-pikrilhidrazil (DPPH) radikal süpürme testi ile ölçülmüş ve yüksek kapasite saptanmıştır.

El-Ganiny ve ark. (2017); Bergoglio ve ark. (2024) bu çalışmada *Calendula officinalis* L. özütünün, yumuşak kontakt lens yüzeylerinde bakterilerin yapışarak biyofilm önlemedeki etkinliği araştırılmıştır. Özüt, 100 μ g/mL konsantrasyonda uygulandığında: *Staphylococcus aureus* biyofilm oluşumunu %70 oranında,

Pseudomonas aeruginosa biyofilm oluşumunu ise %65 oranında azaltmıştır. Kristal violet boyama yöntemiyle biyofilm miktarı kantitatif olarak belirlenmiş, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) ile bakteriyel yapışmanın ve yüzey morfolojisinin gözle görülür şekilde azaldığı tespit edilmiştir. *Calendula officinalis* L., içerdiği flavonoidler, triterpenoidler ve uçucu yağlar sayesinde bakteri hücre zarını destabilize ederek yapışmayı azaltır, aynı zamanda antioksidan ve anti-inflamatuvar etkiler göstererek göz çevresinde iyileştirici bir mikroçevre oluşturur. Yapılan biouyumluluk testlerinde ise kontakt lens materyaline karşı toksik bir etki gözlenmemiştir. Bu veriler, *Calendula officinalis* L.'in doğal, güvenli ve etkili bir biyofilm inhibitörü olarak oftalmik uygulamalarda kullanılabileceğini desteklemektedir.

Bu derlemede, *Calendula officinalis* L. (aynısefa) bitkisinin su ve uçucu yağ ekstraktlarının antibakteriyel, antibiyofilm ve antioksidan etkileri farklı çalışmalardan elde edilen bilimsel verilerle değerlendirilmiştir. 100 µg/mL konsantrasyonda *S. sonnei* üzerine 23 mm'lik inhibisyon zonu oluşturmuştur. Ayrıca *Salmonella*, *Shigella* ve *E. coli* gibi enterik patojenlere karşı da güçlü antibakteriyel etki göstermiştir. Bitkinin içerdiği flavonoid, saponin ve triterpenoidler hücre zarını zayıflatıp bakteri çoğalmasını baskılar. Mikroplak testlerinde, aynısefa bitkisi ekstraktı biyofilm oluşumunu anlamlı düzeyde engellemiştir. Bakterilerin yüzeye yapışması ve organize koloni oluşturması bu ekstraktla azaltılmıştır. DPPH testi ile belirlenen yüksek antioksidan kapasitesi serbest radikal hasarını önler ve bu sayede hem mikrobiyal enfeksiyonlara karşı koruma sağlar hem de iyileşmeyi destekler. Aynısefa bitkisi doğal, güvenli ve etkili bir antimikrobiyal ajan olarak değerlendirilmektedir. Yüzey koruyucu, yara iyileştirici ve anti-enflamatuvar özellikleri birleşik etki sağlar. Çalışma, bitkinin hem klinik hem kozmetik uygulamalar için potansiyelini göstermektedir Ghaima ve ark. (2013).

Faria ve ark. (2011) çalışmasında, *Calendula officinalis* L, *Camellia sinensis* (yeşil çay) ve klorheksidin içeren ağız gargaralarının, gömülü üçüncü molar (akıl dişi) çekimi sonrası kullanılan dikiş materyallerine mikroorganizma yapışması üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. *Calendula officinalis* L. içeren gargara, dikiş materyalleri üzerinde mikroorganizma yapışmasını azaltma eğilimi göstermiştir. Klorheksidin grubu en yüksek antimikrobiyal etkiyi gösterirken, *Calendula officinalis* L. grubu anlamlı ancak daha düşük düzeyde etki sağlamıştır. Aynısefa yağının etkisi özellikle Gram pozitif bakteriler üzerinde daha belirgin olmuştur. *Calendula officinalis*

L. içeren gargara, dikiş üzerinde mikrobiyal yapışmayı azaltmada doğal bir alternatif olarak potansiyel taşımaktadır. Sentetik antiseptiklerin yerine veya onlarla birlikte kullanılabilecek, daha az yan etki riski olan bitkisel bir seçenektir.

Mishra ve ark. (2018) *Calendula officinalis* L. (CO) yağının toksisitesini belirlemek için Wister sıçanlarında aynı yağın akut ve subkronik dermal toksisitelerini üzerine çalışma yapılmıştır. Akut ve subkronik toksisite çalışması sırasında CO ile tedavi edilen hayvanlarda ölüm görülmemiştir. Deri, kürk, gözler, mukoza zarında anormallik belirtisi kaydedilmemiştir. Ayrıca hiperaktivite, göz seğirmesi, katalepsi , konvülsiyon, titreme ve katatoni de CO yağı tedavisinden sonra oluşmamıştır. CO yağının uygulanması 48 saate kadar herhangi bir eritem ve ödem belirtisi üretmemiştir. Bu, CO yağının cilt yüzeyinde tahriş edici olmayan doğasını göstermektedir. Ayrıca, erkek ve dişi sıçanlarda CO yağı tedavisi nedeniyle vücut ağırlığında bir değişiklik olmamıştır. 2,5 mL/kg vücut ağırlığı CO yağı ile tedavi edilen hayvanlardaki biyokimyasal değişiklikler kontrol grubu ile karşılaştırıldığında önemsizdi ($p < 0,01$). Mevcut çalışmada olduğu gibi, daha yüksek dozda CO yağı kullanılmıştır; bu, önemsiz değişiklikler üretildiğini ve toksik olmayan davranışlar gözlemlendiğini göstermektedir. Bu nedenle, CO esansiyel yağı topikal kullanım ve diğer amaçlanan kozmetik uygulamalar için güvenli kabul edilebileceğine ulaşılmıştır.

Davoudabadi ve ark. (2023) tarafından iyileşmeyi hızlandıran antibakteriyel yara örtüsü üretmek amacıyla, *Calendula officinalis* L. (CO) ve Propolis etanol (PR) ekstraktları da dâhil olmak üzere farklı elektroğrılmış poliüretan (PU) içerikli nanofiberler üretildi. Metisiline dirençli *Staphylococcus aureus*'a (MRSA) karşı minimum inhibitör konsantrasyonlarının (MİK) ölçümü yapılmıştır. *C. officinalis* ve propolis ekstraktlarının MRSA'ya karşı minimum bakterisidal konsantrasyonları sırasıyla 37.500 ve 375 µg/mL olmuştur. *C. officinalis* ve Propolis özütlerinin tek başına MİK değerleri MRSA bakterilerine karşı 9375 µg/mL ve 93,75 µg/mL'dir ve bu değer dama tahtası yöntemi ile belirlendiğinde sırasıyla 4687,5 ve 46,875 µg/mL'dir. Elektroğrılmış PU/CO/PR nanofiber, yüksek derecede antibakteriyel, antioksidan ve hücre çoğalması verimliliğini göstermiştir. PU/CO/PR ile tedavi edilen MRSA enfeksiyonlu yaralarda tam, iyi organize edilmiş yara iyileşme sürecinde önemli bir iyileşme olduğunu doğrulanmıştır.

Sui ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, demir nanopartikülleri indirgeyici madde olarak *Calendula officinalis* L. özütü kullanılarak sulu ortamda sentezlenmiştir.

Sentezlenen nanopartiküller (FeNP'ler), farklı teknikler kullanılarak karakterize edilmiştir. XRD analizine göre, FeNPs kristal boyutu için 34,29 nm ölçülmüştür. SEM görüntüleri, biyosentezlenen nanopartiküller için 46,30 nm boyutunda düzgün küresel bir morfoloji sergilemiştir. Apoptoz ve DNA parçalanmasını göstermek için TUNEL testi kullanılmıştır. Mitokondriyal membran potansiyeli, Rhodamine123 floresan boyası ile incelenmiştir. Demir nanopartikülleriyle işlenmiş hücre kesiciler, DNA parçalanmasını azaltmıştır. Kardiyovasküler koruyucu özelliklerin en iyi sonucu, yüksek dozda demir nanopartiküllerinde, yani 4 µg'da görüldü. Yukarıdaki bulgulara göre, *Calendula officinalis* L. yaprağı sulu özütü içeren demir nanopartikülleri, insanlarda klinik deneme çalışmalarında onaylandıktan sonra kardiyovasküler hastalıkları tedavi etmek için kardiyovasküler koruyucu bir takviye olarak uygulanabileceğini önerilmiştir.

Bu çalışmada, biyomedikal uygulamalar için *Calendula officinalis* L. (CO) özütü içeren bir karboksimetil selüloz (CMC)/polivinil alkol (PVA) kompozit filmi rapor edilmektedir. Çeşitli CO konsantrasyonlarına sahip (%0,1, %1, %2,5, %4 ve %5) CMC/PVA kompozit filmlerinin morfolojik, fiziksel, mekanik, hidrofilik, biyolojik ve antibakteriyel özellikleri farklı deneyler kullanılarak tam olarak araştırılmıştır. CO eklendikten sonra, filmlerin kopması üzerine çekme mukavemeti ve uzaması önemli ölçüde azalmaktadır. CO ilavesi, kompozit filmlerin nihai çekme mukavemetini 42,8'den 13,2 MPa'ya önemli ölçüde düşürmektedir. Dikkat çekici bir şekilde, %2,5 ve %4 CO katılımı, CMC/PVA kompozit filmlerinin *Staphylococcus aureus* ve *Escherichia coli*'ye karşı inhibisyon yeteneğini önemli ölçüde artırmaktadır. Özetle, %2,5 CO içeren CMC/PVA kompozit filmler yara iyileşmesi ve biyomedikal mühendislik uygulamaları için işlevsel özellikler göstermektedir Huang ve ark. (2023).

Mevcut çalışmada, Kitosan (CS)/ polietilen oksit (PEO) nanofiberlerine elektrospinning yoluyla *Calendula officinalis* L. (CO) ilave edilmiştir. SEM görüntüleri sonrasında CO özütü yüklenen tüm gruplar, belirgin boncuklar, kusurlar veya eğrilmemiş damlacıklar olmaksızın pürüzsüz bir yüzey ve düzgün morfoloji göstermiştir. CS/PEO ve CS/PEO/CO çözeltileri incelendiğinde viskozitenin sırasıyla 5069 cP'den 3467 cP'ye düştüğü, iletkenliğin ise 1,278 ms/cm'den 2,17 ms/cm'ye arttığı gösterilmiştir. Bu sonuçlar, çözelti viskozitesinde bir azalmaya ve iletkenlikte bir artışa katkıda bulunan ve elektrospinning çözeltisinin yüzey geriliminde bir azalmaya yol açan CO özütü moleküllerinin varlığıyla ilişkilendirilebilir. CS/PEO'nun su alımı yaklaşık %78,5 ± %13,5 olup, bu oran CO özütü eklenerek keskin bir şekilde artmıştır. CS/PEO/CO tabakalarının su alımı %151,6 ± %9,6'dır. CO özütüne sahip nanofiberlerin şişme

derecesindeki artış, daha yüksek hidrojen bağı yapma potansiyeline yol açan daha fazla hidroksil grubunun varlığına bağlanabilir Dahası, CO özütlerinin nanofiberlere dâhil edilmesi, hem *E. coli* hem de *S. aureus*'a karşı antibakteriyel etkilerini arttırdı (Kharat ve ark. (2021).

2.3. Bisfenol-A (BPA) Epoksi Reçine ile Yapılan Çalışmalar

Özen ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Antep fıstığı kabukları 75 µm boyutuna kadar öğütülmüş ve eş zamanlı karıştırma yöntemiyle epoksi matrise %1 ve %2 oranlarında ilave edilmiştir. Saf epoksi 22,3 HV sertlik değerine sahipken, %2 oranında takviye içeren kompozitte bu değer 24,2 HV olarak ölçülmüş ve %8'lik belirgin bir artış elde edilmiştir. Saf epoksinin yoğunluğu 1,113 g/cm³ iken, %2 katkı içeren numunenin yoğunluğu 1,133 g/cm³ olarak belirlenmiş ve %1,7 oranında bir artış elde edilmiştir. Mikroyapı analizleri sonucunda, yapıda hava boşluklarına rastlanmadığı ve kabuk tozunun matris malzeme içinde homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen veriler, Antep fıstığı kabuklarının biyolojik dolgu malzemesi olarak uygun olduğunu ve endüstriyel atık olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Başka çalışmada, magnololden türetilen biyoçerik bir tetrafonksiyonel epoksi öncüsü (MTEP), yaygın olarak kullanılan petrol içerikli bisfenol A epoksi öncüsünün (E51) performansını kürlleme maddesi olarak 4,4'-diaminodifenil sülfon (DDS) ile kapsamlı bir şekilde iyileştirmek için harmanlanmıştır. MTEP'in dâhil edilmesi ile epoksi reçinesinin eğilme modülü ve eğilme dayanımı sırasıyla %10,8 ve %24,7'lik bir artış göstermiştir. MTEP (50%)/E51/DDS'nin Young (elastik) modülü ve sertlikte sırasıyla E51/DDS'ye kıyasla sırasıyla %12,8 ve %15,8'lik bir iyileşme ortaya koymuştur. Harmanlanmış sistemin darbe dayanımı, %5 MTEP eklenmesiyle E51/DDS'nin 24,5 kJ/m² değerinden artan bir eğilim göstermiş ve 37,8 kJ/m²'ye ulaşmıştır. E51/DDS kopma anındaki uzaması, %5 MTEP ilavesiyle %11,3'lük maksimum değere ulaşmış olup, bu değer E51/DDS sisteminin (%9,0) değerinden %25,6 daha yüksektir. Bu çalışma, termal kararlılık, alev geciktiricilik ve mekanik özellikler dâhil olmak üzere epoksi reçinesinin kapsamlı özelliklerini geliştirmek için yeni bir modifikasyon stratejisi önermektedir Gu ve ark. (2023).

Bisfenol-A (BPA) içerikli epoksi reçinesinin mekanik ve elektriksel özelliklerini geliştirmek amacıyla alisiklik epoksi reçinesi (2021P) ve sertleştirilmiş dimerik asit

(EPD-172) ile modifikasyon yapılmıştır. %10 oranında katkı maddesi içeren 2021P karışımı, yaşlanmadan önce en iyi yalıtım performansını gösterirken; yaşlanma sonrası ise %10 katkı içeren EPD karışımı en kararlı elektriksel performansı sergilemiştir. Genel olarak, %10–20 katkılı 2021P ve %10 katkılı EPD reçineleri yüksek performans ve yaşlanma direnci sunarak, zorlu çevresel koşullara uygun yalıtım malzemeleri olarak öne çıkmaktadır Fu ve ark. (2023).

Park ve Lee (2025) tarafından petrol kökenli bisfenol A'nın diglisidil eteri (DGEBA) epoksi ve epoksitlenmiş soya fasulyesi yağı (ESBO) karıştırılarak 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 ve 50/50 oranlarında biyolojik olarak parçalanabilir, yüksek elektriksel ve mekanik özellikleri sahip filmler üretilmiştir. Toprak gömme deneyinde, ESBO içeriğinin DGEBA/ESBO filmlerinin biyobozunurluğunu arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, 4-6 ayda daha küçük parçalara parçalandıkları, ancak herhangi bir ESBO içermeyen DGEBA termosetinin 8 ay boyunca bozunma çalışması boyunca geometrisini koruduğu bulunmuştur. Çapraz bağ yoğunluğu değeri %100 ağırlıkça DGEBA 2272 mol/m³ iken ESBO eklenmesi bu değeri 2394 mol/m³ olarak arttırmıştır. Bu sonuçlardan, DGEBA/ESBO epoksi termosetinin çevre dostu bir yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceğini saptamışlardır.

Diğer çalışmada kaju fıstığı kabuğu sıvısından (CNSL) türetilen yeni bir diglisidil eter (BCNDGE), iki aşamalı bir epoksidasyon reaksiyonuyla sentezlenmiş ve ticari bisfenol A diglisidil eter (BPADGE) ile asit anhidrit sertleştirici kullanılarak epoksi filmler hazırlanmıştır. BCNDGE içeren filmler, BPADGE'ye kıyasla daha yüksek termal ayrışma sıcaklıkları göstermiştir; bu durum, BCNDGE'nin uzun alkil zincirlerinin piroliz sırasında reaktif türlere karşı koruyucu etkisine bağlanmıştır. BCNDGE (100) filminin camsı geçiş sıcaklığı 5,3 °C iken BPADGE (100) için bu değer 123 °C olmuştur; BCNDGE oranı arttıkça bu sıcaklık azalmış ve plastikleştirici etkisi belirginleşmiştir. BCNDGE (100) filminin çekme dayanımı BPADGE'ye göre 30 kat düşük, ancak kopma uzaması 60 kat fazla bulunmuştur. Bu, BCNDGE'nin esnekliği artıran uzun alkil yan zincirlerinden kaynaklanmıştır. BPADGE'deki glisidil eter içeriği, BCNDGE'ye göre yaklaşık 1,6 kat daha fazla olmuştur. BCNDGE oranı arttıkça sistemin termal kararlılığı da yükselmiştir. Sonuç olarak, BCNDGE, yüksek biyokütle içeriğiyle fosil içerikli bileşiklere çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır Yokoyama ve ark. (2023).

Başka çalışmada, biyo içerikli epoksi vitrimerler (BEV), resorsinol diglisidil eter (DGER), vanilin (VAN) ve 1,10-diaminodekan (DDA) kullanılarak sentezlenmiştir.

DGER ve dinamik imin çapraz bağlayıcı (DIC) arasında çözücüsüz ve katalizörsüz eriyik kürleme ile BEV üretilmiştir. Bisfenol A diglisidil eter (DGEBA)/DIC karşılaştırmasında, BEV'nin kürleme aktivasyon enerjisi $62,43 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ bulunmuş, DGEBA'da ise $67,71 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ölçülmüştür. BEV'nin çekme dayanımı $69,23 \text{ MPa}$, Young modülü ise $1,91 \text{ GPa}$ olarak belirlenmiştir. BEV, $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ üzerinde termal kararlılığa sahip olup, $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de hızlı gerilim gevşemesi ve mükemmel yeniden işlenebilirlik sunmaktadır. BEV, çoklu termal işlem döngülerinden sonra çekme dayanımının %90'ını geri kazanmıştır. Ek olarak, $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat iyileştirme sonrası %80'in üzerinde çizik iyileşme kapasitesine sahiptir. DGER türevi epoksi vitrimerlerin geleneksel epoksi termosetlere alternatif olarak potansiyelini göstermiştir Zhan ve ark. (2025).

Diğer bir çalışmada, glukozdan türetilen hidroksimetilfurfural (HMF) ile fenolün asit katalizli reaksiyonu ile fenol-hidroksimetilfurfural (PHMF) adlı sürdürülebilir bir novolak tipi biyoçerikli reçine sentezlenmiştir. Geleneksel formaldehit yerine bisfenol A diglisidil eter (DGEBA), PHMF reçinesini kürlemek için çapraz bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım formaldehit içermeyen bir sistem sunarken aynı zamanda boşluksuz bir matris oluşumunu da sağlamıştır. Kürleme $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de başlamış, $155 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de pik yapmıştır. Kürleme aktivasyon enerjisi Kissinger ve FWO yöntemleriyle yaklaşık 114 kJ/mol , diğer izokonversiyonel yöntemlerle 110 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. DSC ve Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizleriyle desteklenen kürleme mekanizması, DGEBA ile PHMF hidroksil grupları arasında gerçekleşen halka açma reaksiyonuna dayanır. Elde edilen kürlenmiş kompozit, 105 MPa çekme dayanımı ve $174 \text{ }^{\circ}\text{C}$ cam geçiş sıcaklığı ile yüksek mekanik ve termal performans göstermiştir. Bu bulgular, DGEBA ile kürlenen PHMF reçinesinin formaldehitsiz, çevre dostu ve endüstriyel açıdan uygulanabilir bir biyokompozit matrisi olabileceğini göstermektedir Zhang ve ark. (2017).

Literatür taramasından da anlaşıldığı üzere yapılan tez çalışmasında keten tohumu yağının epoksitlenmesi sonucu elde edilen ELO ile epoksi reçineden yeni bir matris eldesine ve aynısefa yağı ile yapılmış bir modifikasyona rastlanmamıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

ER/ELO ve ER/ELO/CldO biyoıçerikli filmlerin elde edilmesinde kullanılan yöntem ve materyaller bu bölümde verilmiştir.

3.1. Materyaller

Film hazırlığında modifiye edici olarak Bisfenol A tipi epoksi reçinesi (ER; Epokukdo YD114E) kullanılmış olup, Sar Chemical Co. (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Kürleştirici olarak sikloalifatik amin tipi bir kürleme ajanı (Epokukdo KH 816) yine aynı firmadan sağlanmıştır. Epoksi kür hızlandırıcısı olarak 2,4,6-tris(dimetilaminometil) fenol kullanılmıştır. Keten tohumu yağı (LO), Tabia Pure Nature (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. LO, herhangi bir sentetik madde veya katkı içermeksizin, Süper Kritik Karbon Dioksit (SC-CO₂) Ekstraksiyon yöntemiyle üretilmiştir. LO'nun yağ asidi içeriği şu şekildedir: palmitik asit (%4,4), stearik asit (%5,2), üçlü doymamış α -linolenik asit (%51,9–55,2) ve çiftli doymamış linoleik asit (%14,2–17). Epoksidasyon işleminde kullanılan kimyasallar: buzul asetik asit (CH₃COOH), hidrojen peroksit (H₂O₂), sodyum bikarbonat (NaHCO₃), karbon tetraklorür (CCl₄), hidroklorik asit (HCl), potasyum iyodür (KI), sodyum tiyosülfat (Na₂S₂O₃) ve iyon değıştirici katalizör Amberlite IR 120H olup, tamamı Sigma-Aldrich (Darmstadt, Almanya) firmasından temin edilmiştir. *Calendula officinalis* L. Yağı (CldO), CSK Farma Pazarlama ve Bilgilendirme Hizmetleri Ltd. Şti. (Türkiye) tarafından sağlanmıştır. İyot monoklorür çözeltisi (Wijs çözeltisi), DERİL Kimya Laboratuvar Malzemeleri ve Dış Ticaret Ltd. Şti. (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Potasyum hidroksit (KOH), Akbel Kimya (Türkiye) ürünüdür.

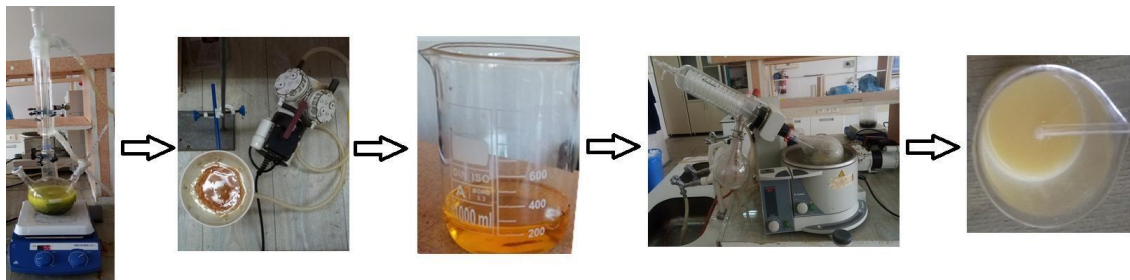
3 adet Gram (+) (*Listeria monocytogenes* ATCC 7644, *Staphylococcus carnosus*, *Bacillus cereus*) bakteri ve 3 adet Gram (-) (*Salmonella typhimurium* ATCC 14028, *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli* ATCC 25922) bakteri antibakteriyel testler için kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Epoksitlenmiş Keten Tohumu Yağı (ELO) Sentezi

Epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO), modifiye edilmiş klasik bir *in situ* epoksidasyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Bu işlemde, süper kritik CO₂ ekstraksiyonu ile elde edilmiş saf keten tohumu yağı (LO) kullanılmıştır. Epoksidasyon reaksiyonunda, yağdaki doymamış bağlar hedef alınarak epoksi halkalar oluşturulmuştur. Reaksiyon ortamında perasetik asit, hidrojen peroksit (H₂O₂) ve buzul asetik asit (CH₃COOH) kullanılarak sentezlenmiştir. Amberlite IR 120H, iyon değiştirici katyonik reçine olarak katalizör görevini üstlenmiştir.

Tipik bir deneysel prosedür şu şekilde gerçekleştirilmiştir: belirli bir miktarda LO, üç ağızlı balon jojeye alınarak, ısıtma mantosu eşliğinde manyetik karıştırıcı altında karıştırılmıştır. Sistem ısıtılarak 50–60 °C sıcaklık aralığında sabit tutulmuştur. Ardından, belirli oranlarda CH₃COOH ve H₂O₂ yavaşça sisteme eklenmiştir. Amberlite IR 120H reçinesi, reaksiyonun başında ortamda yer alacak şekilde ilave edilmiştir. Reaksiyon, yaklaşık 6–8 saat boyunca kontrollü sıcaklık ve karıştırma altında sürdürülmüştür. Reaksiyon sonunda sistem soğutulmuş ve karışım, sodyum bikarbonat (NaHCO₃) çözeltisi ile yıkanarak asidik safsızlıklardan arındırılmıştır. Organik faz, daha sonra distile su ile birkaç kez yıkanarak nötral hale getirilmiştir. Elde edilen ürün, vakum altında kurutularak saf ELO elde edilmiştir.



Şekil 3.1. Epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) sentezi

3.2.2. Filmlerin hazırlanması

Tez çalışması iki ana aşamada gerçekleşmiştir. İlk aşamada biyotabanlı film matrisi, Bisfenol A tipi epoksi reçinesine (ER) kütlece %50, %60 ve %70 oranlarında epoksida keten tohumu yağı (ELO) ilave edilerek hazırlanmıştır. Karışım, kütlece %40 oranında sikloalifatik amin türü kürleme ajanı ile 40 °C’de 24 saat boyunca kürlenmiştir. Elde edilen filmler arasında en uygun esnekliğe sahip film oranı %60 ELO-%40 ER içeren sistem olarak belirlenmiştir.

İkinci aşamada ise, antibakteriyel özellik kazandırmak amacıyla, ER/ELO (kütlece 2:3 oranında) karışımına %1, %3, %5, %7, %10 ve %15 oranlarında *Calendula officinalis* L. yağı (CldO) eklenerek modifiye edilmiş filmler hazırlanmıştır. Bu karışımlar, yine %40 oranında kürleme ajanı ve %1 oranında epoksi kür hızlandırıcısı içerecek şekilde, 40 °C’de 24 saat süresince kürlenmiştir.



Şekil 3.2. Biyopolimer film yapım aşamaları

3.2.3. İyot sayısı (İ.V.) ve epoksi grup (E.G.) tayini

İyot sayısı (İ.V.), yağlar ve yağ asitlerinin doymamışlık derecesini belirlemek amacıyla kullanılan bir ölçümdür. Keten tohumu yağı (LO) ve epoksitlenmiş keten tohumu yağı (ELO) örneklerindeki çift bağların miktarı, titrasyon esasına dayanan Wijs yöntemi ile belirlenmiştir. Epoksi reçinelerdeki epoksit grup (E.G.) tayini de titrimetrik yöntemle gerçekleştirilmiştir Cerit ve ark. (2016).

LO ve ELO’nun çift bağ sayısı (iyot değeri), titrasyon yöntemiyle (Wijs yöntemi) belirlenmesinde yaklaşık 0,2 g örnek, 10 mL karbon tetraklorür (CCl₄) içerisinde çözülmüş ve ardından 20 mL Wijs çözeltisi ilave edilmiştir. Reaksiyonun tamamlanmasının ardından, fazla miktarda iyot monoklorür (ICl), 10 mL sulu %15 potasyum iyodür (KI) çözeltisi içerisine eklenmiş ve ayrılan iyot, 0.1 N sodyum tiosülfat çözeltisi (Na₂S₂O₃) ile titre edilmiştir (Şekil 4.1). Aynı prosedür, LO veya ELO içermeyen

kontrol numunesi ile de gerçekleştirilmiştir. İyot değeri, Denklem 3.1'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$I.V. = \frac{(V_1 - V_2) \times 0.012697}{m} \times 100 \quad (3.1)$$

V_1 = kontrol titrasyonu için kullanılan 0,1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ çözeltisinin hacmi (mL),

V_2 = numune ile yapılan titrasyonda kullanılan 0,1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ çözeltisinin hacmi (mL),
0,012697 – 1 mL 0,1 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ çözeltisine karşılık gelen iyot miktarı (g), m – numune miktarı (g) olarak tanımlanmaktadır.

Epoksi reçinelerde epoksit grubu yüzdesinin titrasyon yöntemiyle belirlenmesinde, numune öncelikle hidroklorik asit (HCl) fazlalığı içeren bir organik çözücü (örneğin, aseton veya izopropanol) içerisinde çözülür ve epoksit grubu HCl ile reaksiyona girer. Reaksiyona girmemiş olan HCl, potasyum hidroksit (KOH) ile geri titrasyon yoluyla belirlenir (Şekil 4.1.). 250 mL'lik bir balon joje içerisine yerleştirilen 0,2 g ELO örneğine, 25 mL çözücü karışımı (60 mL aseton + 1,5 mL derişik HCl) ilave edilmiş ve oda sıcaklığında 2 saat süreyle karıştırılmıştır. Aynı prosedür, ELO içermeyen kontrol numunesi ile de gerçekleştirilmiştir. Reaksiyondan arta kalan HCl, bir indikatör eşliğinde 0,1 N KOH çözeltisi ile geri titrasyon yöntemiyle belirlenmiş ve epoksit grubu (E.G.) değeri Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E.G. (\%) = (V_1 - V_2) \times 0,0043 \times F \times 100 / m \quad (3.2)$$

V_1 = kontrol numunesinin titrasyonu için kullanılan 0,1 N KOH çözeltisinin hacmi (mL),

V_2 = ELO numunesinin titrasyonu için kullanılan 0,1 N KOH çözeltisinin hacmi

(mL), F = 0,1 N KOH çözeltisi için titrasyon faktörü, m = analiz edilen numune miktarı (g),

0,0043 – 1 mL 0,1 N KOH çözeltisine karşılık gelen epoksit grubu sayısı olarak tanımlanmaktadır.

3.3. Analiz ve Testler

ER/ELO ve ER/ELO/CIdO filmler üzerine yapılan analiz ve testlere bu kısımda yer verilmiştir.

3.3.1. Film kalınlıkları

Farklı oranlarda üretilen biyo içerikli filmlerin kalınlıkları 5 ayrı noktadan dijital mikrometre (Mitutoyo, MDC-25SX, Japonya) kullanılarak ölçülmüş elde edilen ölçümlerin ortalaması(mm) belirlenmiştir.

3.3.2. Filmlerin mekanik testleri

Filmlerin kopmada uzama yüzdesinin (%E) ve gerilme mukavemetini (TS) hesaplanmasında Shimadzu AGS-X (Japan) mekanik test cihazı kullanılmıştır. 50 mm x 10 mm ebatlarında kesilen film şeritleri 15 mm/dk hızla çekme işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.3. Çekme testi cihazı

3.3.3. Termal gravimetrik analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA), malzemelerin sıcaklık karşısındaki kütle değişimlerini değerlendirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, numunenin kütle kaybı; zaman ve sıcaklık parametreleri esas alınarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada analiz edilen TGA deneyleri, Setaram marka Termogravimetrik Analiz Cihazı yardımıyla yapılmıştır. Numuneler analiz öncesinde toz hale getirilmiş ve inert atmosfer sağlamak

maksadıyla azot gazı ortamında test edilmiştir. Numuneler, 50 °C'den başlanmış ve 800 °C'ye gelene kadar, sabit 10 °C/dk'lık ısıtma hızıyla ısıtılmıştır. Isıtma sürecinde oluşan kütle kayıpları kaydedilmiş ve bu veriler, malzemelerin termal bozunma davranışlarını anlaşılması amacıyla kullanılmıştır.

3.3.4. Filmlerin fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) analizi

Numunelerin Thermo Scientific Nicoletti 550 cihazında ve oda sıcaklığında 4000-400 cm^{-1} dalga sayısı aralıkta ve 4 cm^{-1} spektral çözünürlükte analizi yapılmıştır.

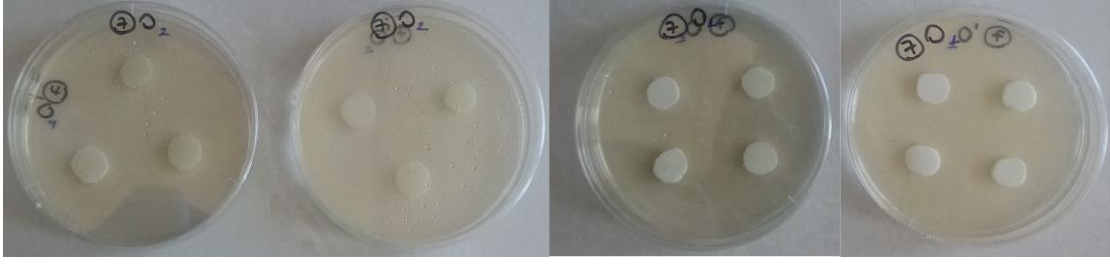
3.3.5. Taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizi

ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerinin yüzey morfolojilerini Philips XL30 SFEG SEM cihazı vasıtasıyla incelenmiştir.

3.3.6. Antibakteriyel aktivite testi

Agar disk-difüzyon yöntemi kullanılarak ER/ELO (kütlece 2:3 oranında) ve %1, %3, %5, %7, %10, %15 CldO içeren ER/ELO/CldO filmlerin antibakteriyel özellikleri incelenmiştir. Aktiviteyi belirlemek için 3 adet Gram (-) (*Klebsiella pneumoniae*, *Salmonella typhimurium* ATCC 14028, *Escherichia coli* ATCC 25922) bakteri ve 3 adet Gram (+) (*Staphylococcus carnosus* ATCC 25923, *Listeria monocytogenes* ATCC 7644, *Bacillus cereus*,) bakteri kullanılmıştır.

Test 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada mikroorganizmalar BHI Broth'da 18 saat inkübe edilmiştir. İkinci aşamada suşlar için 100 μL (1×10^6 kob/ mL) kültür alınmış ve agar besiyeri plakları (Mueller Hinton) üzerine heterojenlikten uzak eşit bir şekilde ekim yapılmıştır. Üçüncü aşamada çapı 10mm olacak şekilde filmler kesilmiş ve 15 dk UV ışığı altında steril hale getirilmiştir. Son aşamada sterize edilmiş filmler agar plakları üzerine saat yönünde yerleştirilmiş ve bakteri ekimi yapılmıştır. Oda sıcaklığında 1 saat bekletildikten sonra 24 saat 37 °C'de inkübasyona bırakılmışlardır. 1 gün sonra kesitlerin zon çapları ölçülmüştür. Kontrol örneği olarak gram negatif bakteriler için siproflaksin (CIP-5), gentamisin (CN-10), netilmisin (NET30); gram pozitif bakteriler için ise ampisilin (AM-10), penisilin (P10)ve vankomisin (VA-30) antibiyotik test kesitleri kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Antibakteriyel test için kullanılan filmler

3.3.7. Gaz kromatografi-kütle spektrometrisi (GC-MS) analizi

CldO bileşenlerinin nitel (kalitatif) tayini için Agilent/7890B model Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS) cihazı kullanılmış ve CldO'nun hangi bileşiklerden oluştuğunun tespiti yapılmıştır.

3.3.8. Su buharı geçirgenliği testi

Yüzey alanı $2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ olacak şekilde ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmleri 9 mm çapında dairesel şekilde kesilmiştir. 9 mm çapında olan silindir şeklinde cam kabı hazırlanmış ve $1 \pm \%1$ bağıl nem sağlayan, silika jel ile doldurulmuştur. Kestiğimiz filmleri üzerine yerleştirilmiştir. Filmlerin etrafı para film ile sarılıp hava ile teması önlenmiştir. Silindirik cam kabı iç sıcaklığı $25 \pm 1^\circ\text{C}$ olan desikatöre yerleştirilmiş içine doymuş NaCl çözeltisi ilave edilmiş ve bağıl nem değeri $\% 75 \pm 1$ ulaşmayı amaçlanmıştır. Kurutma metodu STM E96 esas alınarak belirlenmiştir. Film örnekleri 1 saat aralıklarla kütle değişimleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler aşağıdaki formüller ile su buharı geçirgenlikleri (SBG) analiz edilmiştir.

$$\text{SBG} = w/t * L / \Delta P / A \quad (3.3)$$

w/t = Kararlı durumda kütlelerin zamana karşı grafiğinden elde edilen regresyon katsayısı

A = film alanı (m^2)

L = ortalama film kalınlığı (m)

ΔP = filmin her iki yüzü arasındaki kısmi su buharı basınç farkı (Pa)



Şekil 3.5. Su buharı geçirgenliği testi

3.3.9. Çözünürlük-şişme-su içeriği ve opaklık testi

Numunelerin çözünürlük-su içeriği ve şişme değerlerini belirlemek için 4 aşamalı bir yöntem belirlenmiştir. Testlere başlamadan önce ER/ELO ve farklı oranlarda hazırlanan ER/ELO/CldO filmleri çapı 1,5 cm olacak şekilde kesitler alınmış ve analize başlanmıştır.

İlk aşamada hazırladığımız numuneler ilk ağırlıkları tartılmıştır (W_1). İkinci aşamada ağırlıkları belirlenen kesitler etüvde 24 saat boyunca 70 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. 24 saatin sonunda 10 dakika soğutulduktan sonra tartılmıştır (W_2). Üçüncü aşamada numuneler içinde 20 mL saf su bulunan kaplarda 24 saat bekletilmiş ve 1 gün sonra yaş ağırlıkları tartılmıştır (W_3). Son aşamada ise ikinci aşamaya benzer bir işlem uygulanarak yaş numuneler etüvde 70 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutulmuş ve 10 dakika soğutulduktan sonra ağırlıkları tartılmıştır (W_4). Elde edilen tartım sonuçları aşağıdaki formüller kullanılarak çözünürlük-su içeriği ve şişme değerleri belirlenmiştir.

$$\% \text{ Su içeriği} = (W_1 - W_2) / (W_1) \times 100 \quad (3.4)$$

$$\% \text{ Şişme} = (W_3 - W_2) / (W_2) \times 100 \quad (3.5)$$

$$\% \text{ Çözünürlük} = (W_2 - W_4) / (W_2) \times 100 \quad (3.6)$$

Opaklık testi ise UV-vis spektrofotometre (Optima SP-3000 Nano, Tokyo, Japonya) ile belirlenmiştir. Filmlerin absorbans değerleri 400-800 nm dalga boyları arasında tespit edilmiştir. Opaklık değerleri, elde edilen absorbans değerlerinin filmlerin kalınlıklarına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Opaklık değerleri 600 nm dalga boyundaki absorbans değerleri ile hesaplanmıştır. Referans olarak kör numune kullanılmıştır.

3.3.10. Filmlerin kimyasal direnç testleri

ER, ER/ELO (kütlece 2:3 oranında) ve farklı Cl₂O oranlarında hazırlanmış ER/ELO/Cl₂O filmlerin kimyasal dirençlerini test etmek için oda sıcaklığında 15 gün boyunca baz (%5'lik NaOH), asit (%3'lük HCl), tuz (%3'lük NaCl), %50'lik etil alkol ve %50'lik aseton çözeltilerinde bekletilmiştir. Beşer günlük periyotlarla tartımları alınmadan önce kağıt peçetelerle kurutulmuş, daha sonra tartımları yapılmıştır. Numunelerin kütle artışı veya kaybı aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır:

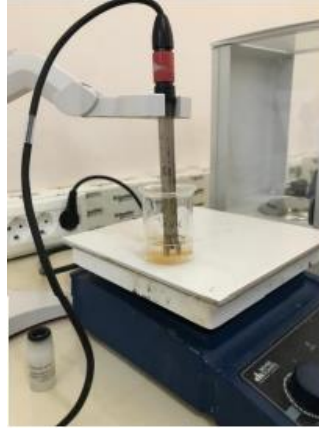
$$\text{Kütle artış ya da azalışı (\%)} = (W_t - W_0 / W_0) \times 100 \quad (3.7)$$

W_0 = testten önceki numunenin kütlesi

W_t = belirli bir test anında numunenin kütlesi

3.3.11. pH testleri

ER, ER/ELO ve ER/ELO/Cl₂O filmlerinden yüzey alanı 25mm² olan film örnekleri kesilmiştir. Örnekler 20 mL %0,9 NaCl'de 24 saat arayla 72 saat boyunca pH ölçümleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.6. pH testi

3.3.12. Biyobozunurluk testi

Biyobozunurluk özelliklerini belirlemek için ER/ELO (kütlece 2:3 oranında) ve %1, %3, %5, %7, %10 ve %15 CldO içeren ER/ELO/CldO filmler 25x10 mm ebatlarında kesilmiştir. Belirlenen aralıklarda tartımları hesaplanan numuneler 180 gün boyunca %23 yarı yanmış yarı taze inek gübresi, %31 distile su, %23 kum ve %23 tını karışımından oluşan toprak içinde simüle edilmiştir.



Şekil 3.7. Simüle toprak karışımı

3.3.13. İstatistik analizleri

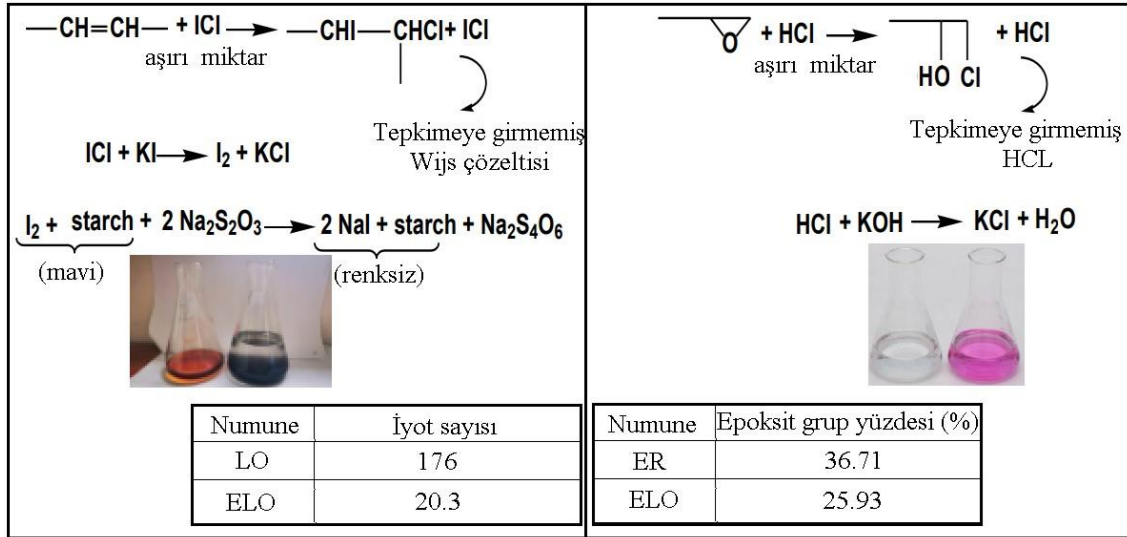
Veriler, MINITAB® release 16,0 programında tek yönlü ANOVA kullanılarak analiz edilmiştir ve elde edilen ortalama analitik değerler, $p < 0,05$ 'te Tukey çoklu aralık testi kullanılarak anlamlı farklılıklar açısından karşılaştırılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının temel amacı yenilenebilir doğal bitkisel yağ olan keten tohumu yağını epoksitlendirerek ve bisfenol-A tipi bir reçine ile harmanlayarak bir matris haine getirmektir. Sırasıyla 2:3 oranında hazırladığımız ER/ELO matrisini antibakteriyel özelliği olan biyoçerikli bir film haline getirmek için *Calendula officinalis* L. (Aynısefa bitkisi) katkı maddesi ilave edilmiştir. Aynısefa bikisi yağından birçok oranla hazırlanan (%1, 3, 5, 7, 10, 15) ER/ELO/CldO biyoçerikli filmini, fonksiyonel grupların olası etkileşimleri FTIR ile, kompozit filmlerin morfolojisi Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile, termal davranışları TGA ile karakterize edilmiştir. Ayrıca biyobozunurluk testi, pH testi, mekanik özellikleri incelenmiş, antibakteriyel testi, su buharı geçirgenliği testi son olarak da kimyasal dayanıklılık testi yapılmıştır. Test sonuçları elde edilen veriler bu bölümde özetlenmiştir.

4.1. İyot Sayısı ve Epoksi Grubu Tayin Testleri

Bitkisel yağlardaki doymamışlık derecesi, iyot sayısı (İ.V.) ile ifade edilmekte olup, bu parametre oldukça önemli bir yapısal özelliktir. Yüksek oranda doymamış linoleik (%15–16), oleik (%16–21) ve linolenik (%48–57) asit içerikleri nedeniyle, keten tohumu yağı (LO) en yaygın kullanılan kuruyan yağlardan biridir ve iyot sayısı yaklaşık 130–195 aralığındadır Zhang ve ark. (2011); Khandelwal ve ark. (2018); Todorovic ve ark. (2021). Daha yüksek bir iyot sayısı, yağın daha fazla linolenik asit içerdiğini göstermektedir. LO ve sentezlenen ELO için iyot sayısı (100 g LO veya ELO tarafından absorbe edilen iyot miktarı) belirlenmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 4.1’de sunulmuştur.



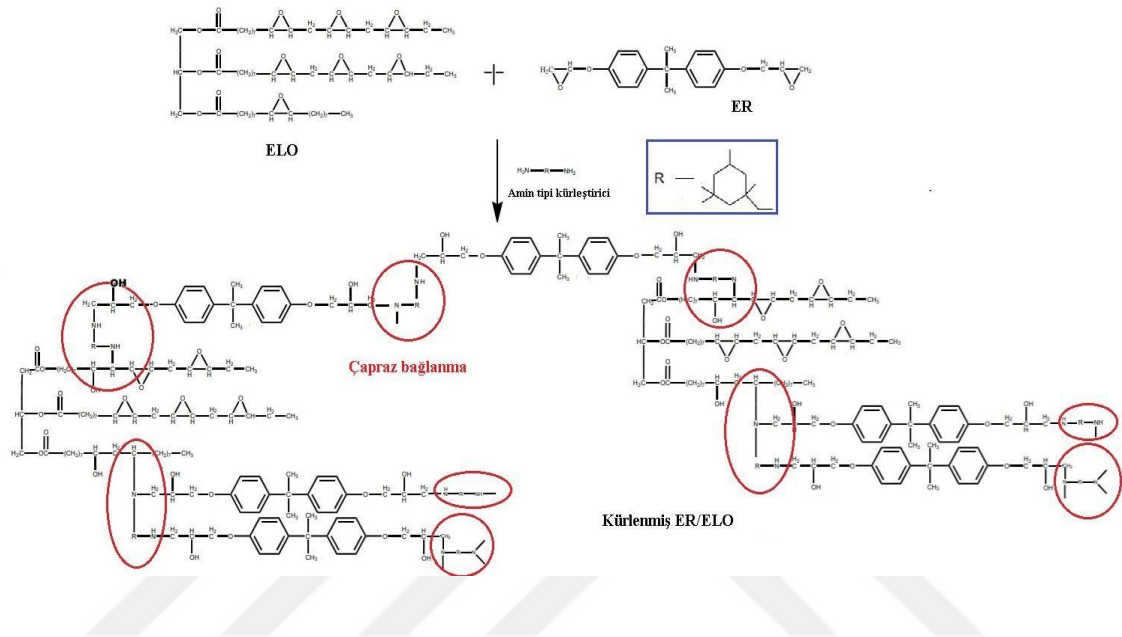
Şekil 4.1. LO ve ELO iyot sayısı tayini

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, LO ve ELO için iyot sayısı sırasıyla 176 ve 20,3 olarak belirlenmiş, epoksidasyon işlemi sonrasında iyot sayısı 155,7 birim azalmıştır. Bu sonuç, epoksidasyon reaksiyonunun başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir. Khandelwal ve ark. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada da LO’nun iyot sayısının epoksidasyon sonrası 160’tan 27’ye düştüğü rapor edilmiştir. Epoksidasyon reaksiyonunun gerçekleştiğine dair bir diğer kanıt ise epoksi grup sayısıdır. Epoksi grup yüzdesi, reçinenin 100 gramında bulunan epoksi grubu yüzdesi olarak tanımlanmaktadır. Bu analiz ayrıca, ticari bir epoksi reçine olan ER için de gerçekleştirilmiş ve ELO sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.1’de ER ve ELO için epoksit % değerleri sırasıyla %36,71 ve %25,93 olarak belirlenmiş, ELO için hesaplanan epoksi değeri makul seviyede bulunmuştur. Bu durum, LO içinde bulunan doymamış çift bağların büyük oranda oksiran gruplarına dönüştüğünü doğrulamaktadır. Kocaman ve ark. (2024) sitrik asit ve epiklorohidrin kullanarak sentezledikleri epoksi reçine yapısında asit titrasyonu ile %29 oranında epoksit grup varlığını kanıtlamışlardır.

4.2. Kürlenme Mekanizması

Epoksi reçinelerini karmaşık, çözünmeyen termoset ağlarına dönüştürmek için bir çapraz bağlama maddesi gereklidir. ELO'nun ER ile kürlenmesinde gerçekleşen olası kimyasal bağlanma Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Amin tipi kürleştirici ile kürlenme şeması

Kürleme işlemi iki yöntemle gerçekleştirilebilir: imidazol gibi katalitik kürleme maddeleri tarafından başlatılan homopolimerizasyon veya çok işlevli kürleme maddeleri, örneğin çok işlevli aminler, polibazik karboksilik asitler, polimerkaptanlar ve anhidritler tarafından tetiklenen bir poliadişyon/kopolimerizasyon reaksiyonu Ashcroft (1993). Şekil 4.2’de görüldüğü üzere hem ER hem de ELO epoksi grupları içerdiğinden, çapraz bağlanma amin tipi kürleme maddesiyle kolayca reaksiyona girerek gerçekleştirilebilir.

4.3. Film Kalınlıkları

Film kalınlığı, bariyer, optik ve mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyebileceğinden, filmler için kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir Ghamari ve ark. (2022). ER, ER/ELO (kütlece 2:3 oranında) ve farklı oranlarda hazırlanan ER/ELO/CldO biyoicerikli filmlerden dijital mikrometre cihazı vasıtasıyla

birbirinden farklı 5 noktadan ölçüm alınmıştır. Ölçüm sonrası elde edilen verilerden ortalama değerlere Çizelge 4.1’de yer verilmiştir.

Çizelge 4.1. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO film kalınlıkları

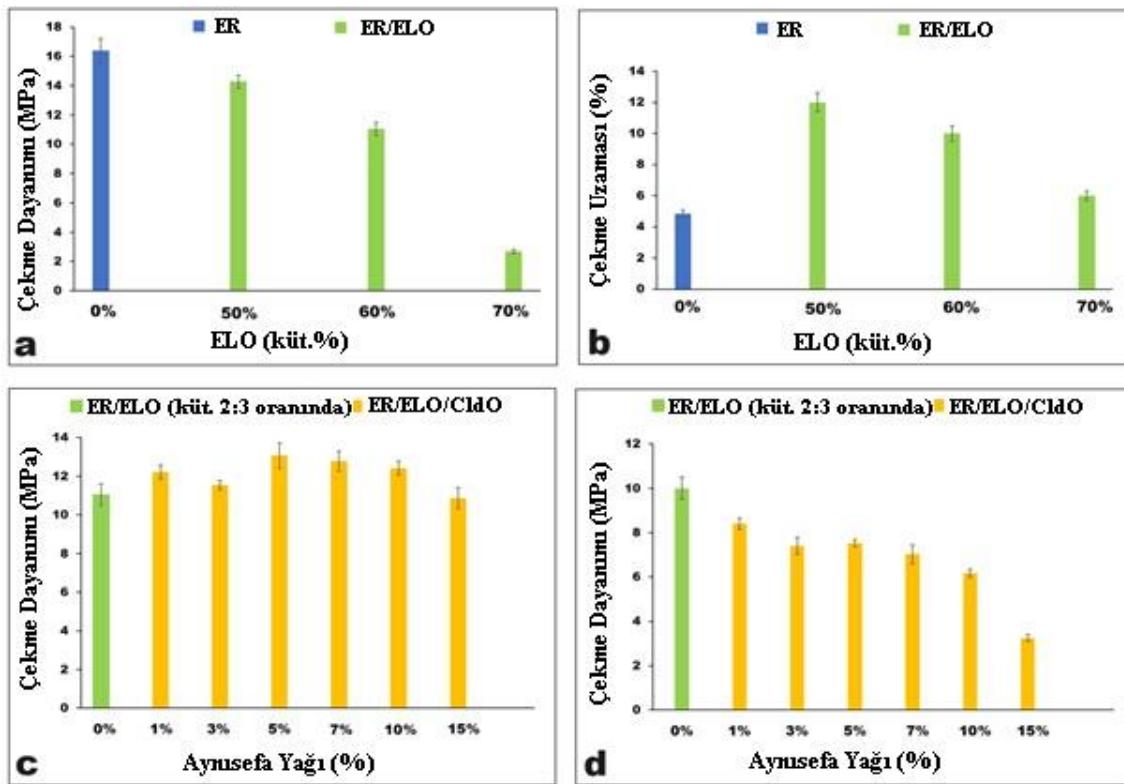
CldO (küt. %)	Kalınlık (mm)
Saf ER filmi	
-	1.13±0.04
ER/ELO (kütlece 2:3 oranında)	
-	1.00±0.09
ER/ELO/CldO filmleri	
1	0.98±0.05
3	0.92±0.03
5	0.76±0.02
7	0.62±0.07
10	0.48±0.04
15	0.21±0.06

Not: + kütle artışı; - kütle azalımı

Çizelge 4.1’den elde edilen sonuçlara göre, ELO ve CldO’nun ilavesi film kalınlığında azalmaya neden olmuştur. Özellikle %15’e kadar CldO uçucu yağı ilavesi, biyoçerikli film kalınlığı üzerinde belirgin bir etki göstermiş ve kalınlık değerleri 0,98 mm ile 0,21 mm arasında değişmiştir. Teixeira ve ark. (2014) çalışmalarında uçucu yağların film yapısına dahil edilmesinin film kalınlığını önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir. Çizelge 4.1’de verilen kalınlık değerleri mekanik testlerde ve su buharı geçirgenlik analizinde kullanılmıştır.

4.4. Filmlerin Mekanik Testleri

Bir malzemenin uygulanan kuvvete karşı şekil değişimine uğramadan önce gösterdiği direnç, onun çekme özelliklerini belirler. Bu bağlamda, film yapılarında meydana gelebilecek uzama miktarı ve gösterdikleri dayanım, dış etkenlere karşı direnci ile ambalaj malzemesi olarak kullanıldıklarında film bütünlüğünün korunması açısından temel parametrelerdir Riaz ve ark. (2024). Yapılan bu çalışmada ER/ELO ve ER/ELO/CldO biyoçerikli filmlerden farklı oranda hazırlanmış ve bu oranlardaki biyoçerikli filmlerin mekanik test sonuçları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Filmlerin mekanik test değerleri: a) ER ve ER/ELO filmlerin çekme dayanımı, b) ER ve ER/ELO filmlerinin çekme uzaması, c) ER/ELO (Küt. 2:3 oranında) ve ER/ELO/CldO filmlerinin çekme dayanımı, d) ER/ELO (Küt. 2:3 oranında) ve ER/ELO/CldO filmlerinin çekme uzaması

Tez çalışmasında yüksek biyoçerikli içerikli filmler oluşturmak için ELO oranı %50 ve üzeri tutulmuştur. Şekil 4.3'te görüldüğü üzere, saf ER filminin çekme dayanımı (gerilme mukavemeti) 16,39 MPa iken, ER/ELO filmlerinde bu değer 2,69–14,28 MPa arasında değişmiştir. Ayrıca, ELO oranının %50'den %70'e artırılması, özellikle %60'tan sonra belirgin olmak üzere, filmin çekme dayanımında düşüşe neden olmuştur. Benzer

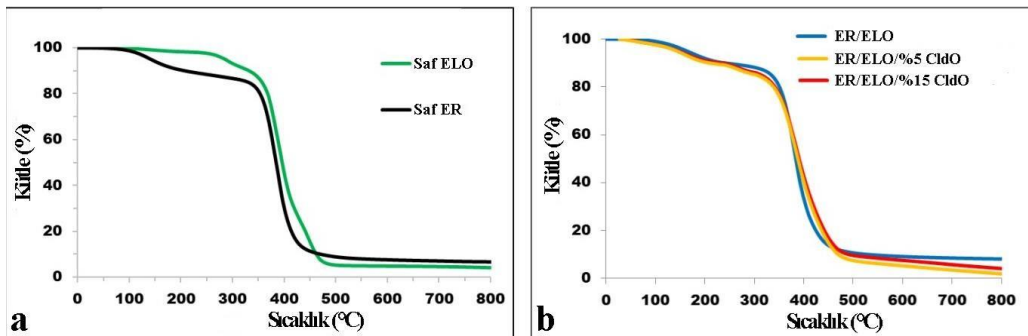
sonuçlar, bisfenol A tipi reçine (DGEBA)/epoksitlenmiş hint yağı (ECO) karışımları içinde rapor edilmiştir Paluvai ve ark. (2015). ELO ile modifiye edilmiş filmlerdeki çekme dayanımının azalması, epoksi matrisinde faz ayrımı sonucu oluşan düşük modüllü elastomerik fazlara bağlanabilir Ratna (2001).

ER'nin ELO ile modifikasyonu çekme uzamasını artırmış olsa da ELO oranının %50'nin üzerine çıkması çekme dayanımında olduğu gibi aynı sebepten dolayı bu değerde azalmaya yol açmıştır. Kütlece %50 ELO içeren filmin çekme dayanımı daha yüksek olmasına rağmen, %60 ELO içeren ER/ELO filmi buna kıyasla çok daha esnek özellikler sergilemiştir. Bu nedenle, film üretiminde matris olarak kütlece %40 ER/%60 ELO karışımı (2:3 oranında) tercih edilmiştir. Bu ER/ELO matrisinin çekme dayanımı 11,05 MPa olarak kaydedilmiştir.

Dikkat çekici şekilde, %5'e kadar CldO içeren biyo içerikli filmler, çekme dayanımında önemli bir artış göstermiş ve %18,28 oranında kayda değer bir iyileşme sergilemiştir (Şekil 4.3). Bu oranın üzerindeki CldO ilavelerinde (kütlece %10'a kadar) ise hafif bir düşüş gözlemlenmiştir. Ancak bu durumda dahi çekme dayanımı değerleri, matris filmden yüksek kalmıştır. %10 CldO içeren filmin çekme dayanımı 12,41 MPa olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, %5'in üzerindeki CldO oranlarında film yapılarında çekme uzamasında da azalma gözlenmiştir (Şekil 4.3).

4.5. Termal Gravimetrik Analiz (TGA)

Saf epoksilerin (ER ve ELO), ER-ELO karışımının (2:3 kütle oranında) ve farklı oranlarda hazırlanan ER/ELO/CldO filmlerin TGA eğrileri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. TGA eğrilerinden belirlenen termal veriler Çizelge 4.2de özetlenmiştir.



Şekil 4.4. ER, ELO, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin termogramları: a) ER ve ELO, b) ER/ELO ve ER/ELO/(%5 ve 15) CldO

Çizelge 4.2. ER, ELO, ER/ELO, ER/ELO/CldO filmlerin termal verileri

CldO (küt.%)	T ₅ (°C)	T ₁₀ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _{mak.} (°C)	800 °C'deki kalıntı (%)
Saf ER					
-	142	207	384	438	6.67
Saf ELO					
-	286	332	396	482	4.86
ER/ELO (kütlece 2:3 oranında)					
-	161	243	386	467	7.90
ER/ELO/%5 CldO					
5	147	232	391	481	7.49
ER/ELO/%15 CldO					
15	143	210	388	479	5.24

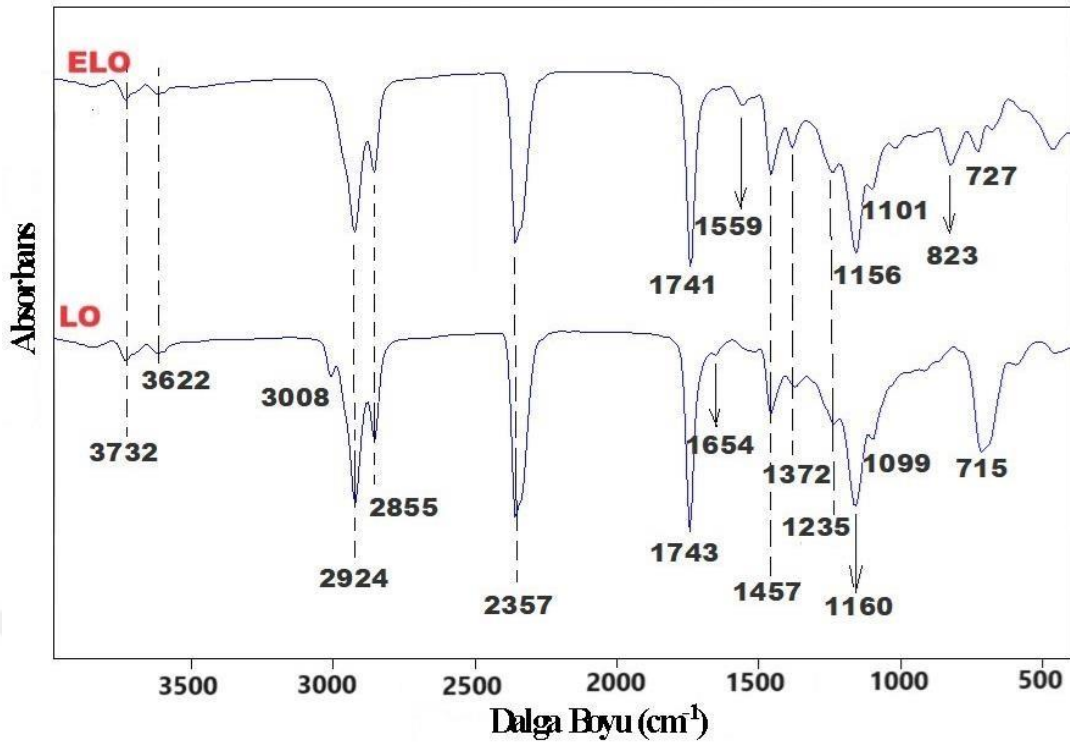
Şekil 4.4(a)'da görüldüğü gibi, sentezlenen ELO, ER'den daha yüksek termal kararlılığa sahiptir. ELO'nun daha fazla epoksit grubu içermesi ve ER'den daha kapsamlı bir şekilde çapraz bağlanabilmesi bunu açıklayabilir. Literatürdeki çalışmalar, ELO'nun termal direncinin ayrıca kütleme maddesinin türüne de bağlı olduğunu göstermektedir Ding ve ark. (2015); Necolau ve ark. (2022). Örneğin, epoksi-amin çapraz bağlanmasının karakteristiği olan polieter zincirlerine kıyasla sitrik asit çapraz bağlı ELO sisteminin daha düşük termal kararlılığı, termal olarak parçalanabilen ester bağları ile birlikte doğrusal alifatik kısımların yüksek içeriğinden kaynaklanıyor olabilir Slabu ve ark. (2024).

Bu çalışmada, amin tipi bir kütleme maddesi kullanılmış olup, bu durum, literatürde verilen termal verilerle karşılaştırıldığında, ELO-amin sistemi için biraz daha yüksek TGA verilerinin (T₅, T₁₀ ve T₅₀, %5, 10 ve 50 bozunmaya karşılık gelen sıcaklıklar) açıklanması olabilir Dinu ve Mija (2020). Kürlenmiş ER/ELO karışımında epoksi grubunun bandının 913 cm⁻¹'de tamamen yok olması bunu doğrulamaktadır (bkz. Şekil 4.4). Şekil 4.4(b), ER/ELO filminin ve CldO içeren biyo içerikli filmlerin TGA eğrilerini göstermektedir. CldO'nun yalnızca T₅ ve T₁₀'u azalttığı ancak biyo içerikli filmlerin T₅₀ değerini etkilemediği belirlenmiştir. 800 °C'deki kalıntı değerleri CldO oranına bağlı olarak hafifçe düşmüştür.

Biyoiçerikli filmler 2 aşamalı bir termal bozunma süreci sergilemiştir. Bozunmanın ilk aşaması, 110 °C ile 200 °C arasındaki sıcaklıklarda meydana gelir. Bu aşamada kürlleme sistemlerinde bulunan kalıntı çözücülerin termal ayrışmaya uğrar. Ana bozunma fazı ise yaklaşık 300 °C ile 480 °C arasında meydana gelir. Bu aşamada ise esterler ve hidroksil gibi ELO'nun fonksiyonel gruplarının ayrışmasına neden olur. Daha yüksek sıcaklıklarda, çapraz bağ kırma reaksiyonlarının gerçekleşmesi muhtemeldir. Sıcaklık 500 °C'yi aştığında, ELO içerikli malzemelerin neredeyse tamamen bozulduğu ve bunun sonucunda %5,24 ila %7,49 arasında düşük kalıntı içeriğinin ortaya çıktığı gözlemlenmektedir Ding ve ark. (2015). Bu veriler, CldO ilavesinin film matrislerinin ilk bozunma sıcaklıklarını sınırlı düzeyde azalttığını, ancak genel termal dayanımı (T₅₀) önemli ölçüde etkilemediğini ve sistemin yüksek sıcaklıklarda da yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir.

4.6. Filmlerin Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopi Analizi

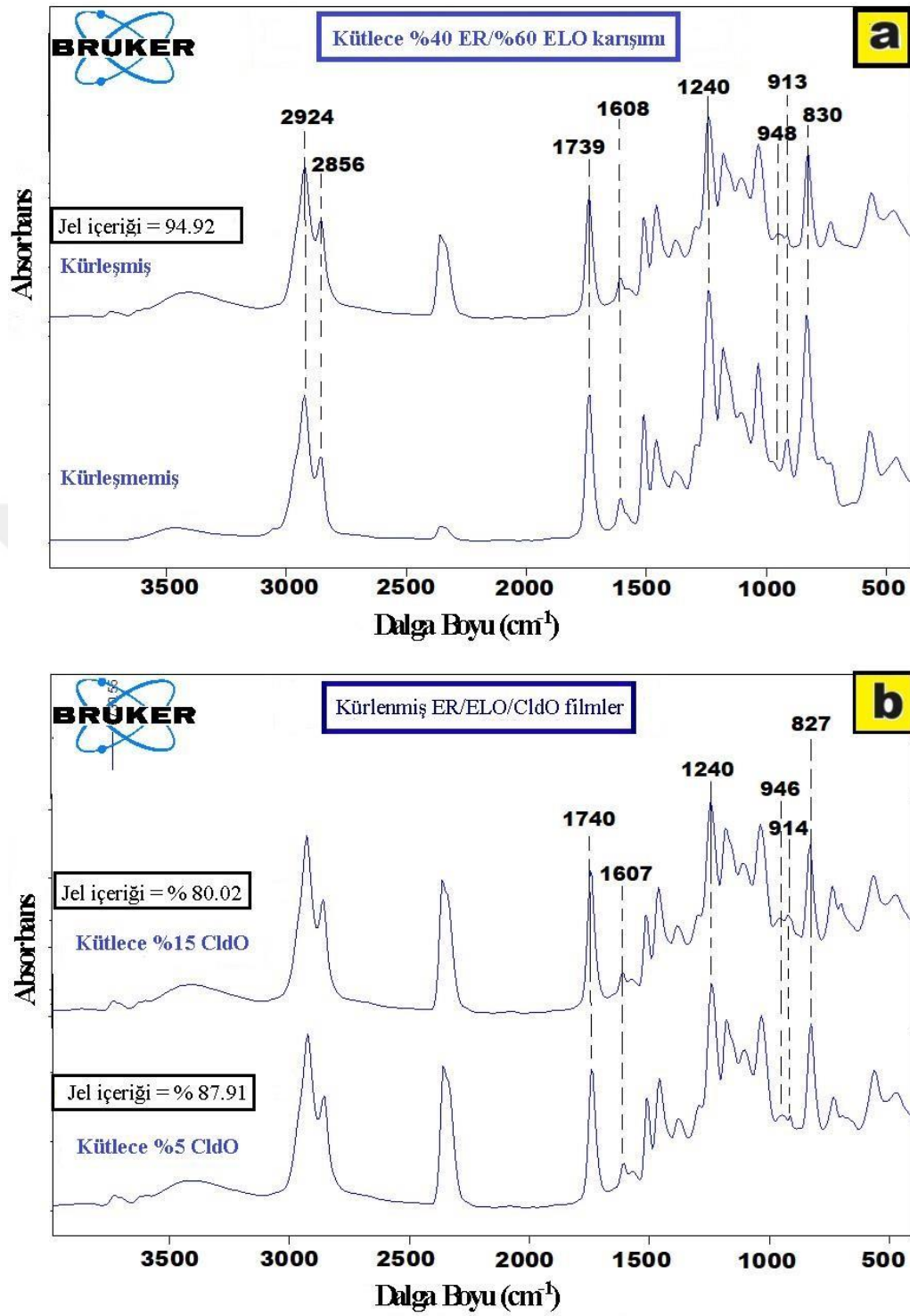
Yapılan bu çalışmada numunede oluşan kimyasal bağların ve ana fonksiyonel grupların açığa çıkarılmasını için FTIR spektrometresi kullanılmıştır. Film yapısı hakkında bilgi edinilmiştir. Keten tohumu yağı (LO) ve epoksitlenmiş keten tohumu yağına (ELO) ait FTIR spektrumları Şekil 4.5'te gösterilmektedir. ER/ELO matrisi ve aynısefa yağı (CldO) katkılı ER/ELO filmlerine ait FTIR spektrumları Şekil 4.6'da sunulmuştur.



Şekil 4.5. Keten tohumu yağı (LO) ve epoksitlenmiş keten tohumu yağının (ELO) FTIR spektrumları

Şekil 4.5'teki LO ve ELO'nun FTIR spektrumları, oksidasyon reaksiyonunun gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. LO'nun kimyasal yapısında bulunan çift bağa ait $=C-H$ ve $C=C$ gerilme titreşimleri sırasıyla 3008 cm^{-1} ve 1654 cm^{-1} dalga sayılarında gözlemlenmiştir. LO'nun FTIR spektrumu ile karşılaştırıldığında, ELO'da çift bağlara ait bantların kaybolduğu ve 823 cm^{-1} dalga sayısında epoksi gruplarının oluştuğu gözlemlenmiştir Nieto-Alarcón ve ark. (2023). Buda oksidasyon reaksiyonu sonucunda, $C=C$ bağları epoksi gruplarına dönüşmektedir. Bu dönüşüm oksidasyon reaksiyonunun başarıyla gerçekleştiğini kanıtlamaktadır.

Ayrıca 3622 cm^{-1} dalga sayılarına karşılık gelen pikler, alkol $O-H$ gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır Ahmetli ve ark. (2024). 2924 ve 2855 cm^{-1} 'de gözlemlenen pik çifti, metilen (CH_2) gruplarına aittir Soydal ve ark. (2024). 1743 cm^{-1} 'deki pik ise $C=O$ gerilme titreşimine karşılık gelmektedir. Ayrıca, 1743 ($C=O$), 1457 (CH_2), 1372 (CH_3), 1235 ($C-C-O$), 1160 ($C-O$), 1099 ($O-CH_2-C$) ve 715 cm^{-1} (yağ asidi $-(CH_2)_n$; $n>3$) bantları da tespit edilmiştir Lazzari ve Chiantore (1999); Santana ve Tavares (2022). Ayrıca, 1741 ($C=O$), 1457 (CH_2), 1372 (CH_3), 1235 ($C-C-O$), 1156 ($C-O$), 1101 ($O-CH_2-C$) ve 727 cm^{-1} (yağ asidi $-(CH_2)_n$; $n>3$) dalga sayılarına ait diğer bantlar da tespit edilmiştir Lazzari ve Chiantore (1999).



Şekil 4.6. ER/ELO matrisi ve CldO katkılı ER/ELO filmlerine ait FTIR spektrumları: a) kürleşmiş ve kürleşmemiş ER/ELO matrisi b) CldO katkılı(%5 ve %15) ER/ELO filmler

Şekil 4.6’da, kürleşmemiş ve kürleşmiş ER/ELO matrisine ait FTIR spektrumları ile %5 ve %15 CldO içeren ER/ELO filmlerin FTIR spektrumları verilmiştir. Epoksiye

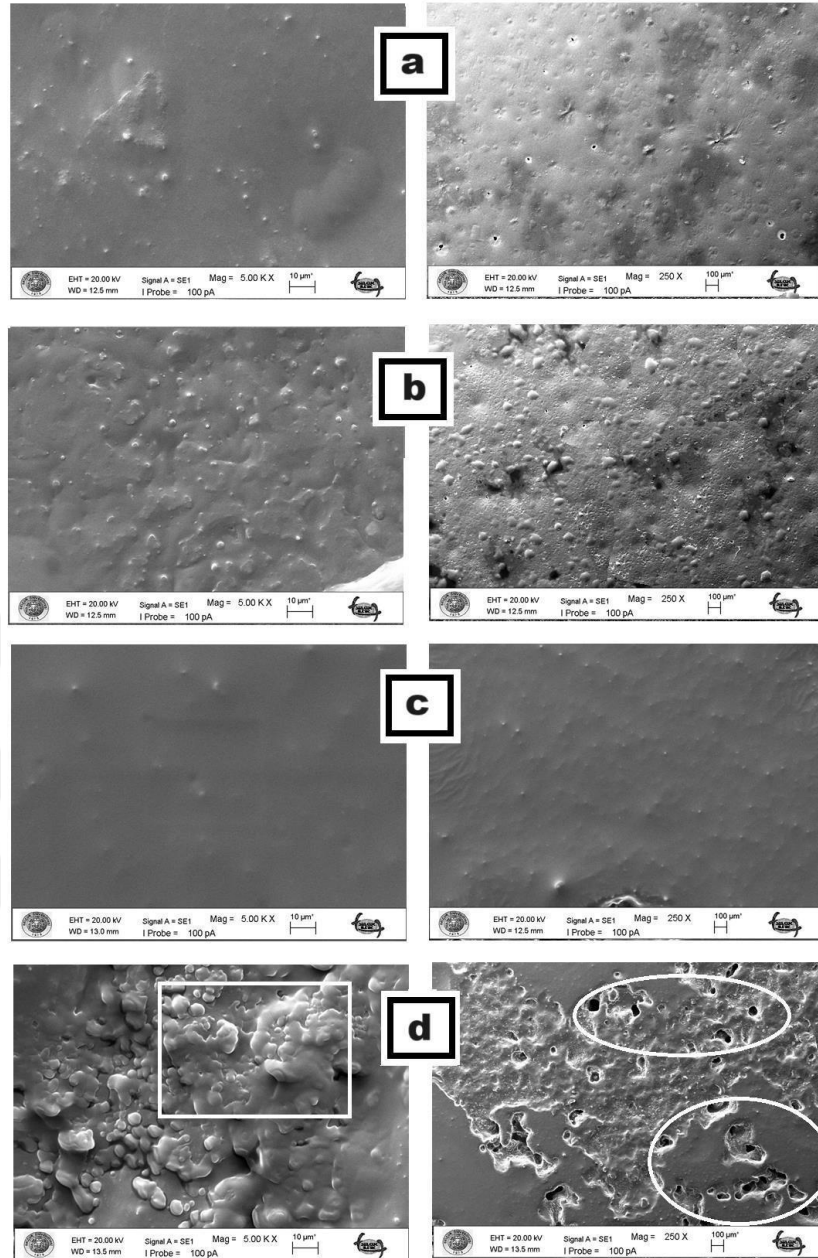
ait asimetrik C–O–C gerilme titreşim bandı $950\text{--}810\text{ cm}^{-1}$ aralığında, C–O gerilme titreşimi ise $1280\text{--}1230\text{ cm}^{-1}$ arasında gözlemlenmektedir Kocaman ve ark. 82024).

Şekil 4.6(a)'da kürlenmemiş ve kürlenmiş ER/ELO matrislerinin FTIR spektrumları yer almaktadır. Şekil 4.6(a)'da görüldüğü üzere, kürlenmemiş ER/ELO matrisinde epoksi grubuna ait pikler 1240 , 913 ve 830 cm^{-1} dalga sayılarında tespit edilmiştir. Kürlenmiş matriste ise bu pikler 1240 ve 830 cm^{-1} 'de gözlemlenmiştir. Kürleme işlemi sonucunda 913 cm^{-1} bandında belirgin bir azalma meydana gelmiş, 830 cm^{-1} bandının şiddeti ise düşmüştür. Diğer karakteristik bantlarda ise anlamlı bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Epoksiye ait 828 cm^{-1} bandı, benzen halkasına ait iki komşu hidrojen atomunun titreşim bandıyla örtüşebilir. Bu nedenle, epoksi grubundaki değişimlere duyarlı olan ve kürleşme derecesi arttıkça şiddeti azalan 913 cm^{-1} bandı dikkate alınmaktadır.

FTIR spektrumlarından elde edilen özel bir formül aracılığıyla kürleşme derecesi hassas bir şekilde belirlenebilir. Özellikle, 913 cm^{-1} bandının tamamen kaybolması, tam kürleşmenin sağlandığını göstermektedir Özmeral ve ark. (2023). Benzer şekilde Şekil 4.6(b)'de, %5 CldO içeren ER/ELO filmde epoksi grubuna ait bantlar yalnızca 1240 ve 827 cm^{-1} dalga boylarında tespit edilmiştir. Bu bulgular, söz konusu oranda CldO'nun kürleşme süreci üzerinde önemli bir etkisi olmadığını ve nispeten yüksek bir kürleşmenin sağlandığını ortaya koymaktadır. Ancak Şekil 4.6(b)'de, %15 CldO içeren ER/ELO filmin FTIR spektrumunda 914 cm^{-1} 'de zayıf bir bant gözlemlenmiştir. Ayrıca, %5 ve %15 CldO içeren ER/ELO film spektrumlarında neredeyse aynı bantlar ve pikler gözlemlenmiş olup, ER/ELO ile CldO arasında anlamlı bir kimyasal bağ oluşmadığı belirlenmiştir Riaz ve ark. (2024).

4.7. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntüleri

CldO içeren ve içermeyen biyo içerikli filmlerdeki yapısal değişiklikleri göstermek için farklı büyütme ölçeklerinde ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin morfolojisini SEM ile incelenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin SEM görüntüleri: a) ER/ELO, b) ER/ELO/%5 CldO (c) ER/ELO/%10 CldO (d) ER/ELO/%15 CldO

Şekil 4.7(a)'dan görüldüğü gibi, ER/ELO (küt. 2:3 oranında) filmi homojen bir şekilde karışmıştır. Ayrıca birkaç tepe noktası olan pürüzsüz bir yüzey sergilemiş ve önemli boşluklar veya şişmeler gözlenmemiştir. Şekil 4.7(b)'de kütlece %5 CldO ilavesinin matriste homojen bir dağılım sağladığı ve boşluklar ve çukurlar gibi istenmeyen durumların oluşmadığı gözlemlenmiştir; ancak yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Şekil 4.7(c)'de CldO ilavesinin kütlece %5'den %10 çıkarılmasıyla film morfolojisinde önemli bir değişiklik olmadığı incelenmiştir. Şekil 4.7(d)'de CldO oranı kütlece %15 kadar artırıldığında çok sayıda boşluğa, büyük boyutlu aglomera oluşumuna

ve CldO'nun matristeki heterojen dağılımına yol açmıştır. Bu nedenle, bu film oldukça pürüzlü ve çukurlu bir görünüm sergilemiştir. Biyo içerikli filmlerin morfolojik yapılarının mekanik özellikler üzerinde etkisinin olduğu saptanmıştır. Şekil 4.7(c)'de çekme dayanımı değerlerinin kütlece %10 CldO'ya kadar matrsten daha yüksek olması morfolojik yapısındaki homojen ve pürüzsüz bir yüzey sergilemesindendir.

4.8. Antibakteriyel Test

ER/ELO/CldO filmleri üç adet gram pozitif (*Listeria monocytogenes* ATCC 7644, *Staphylococcus carnosus*, *Bacillus cereus*) ve üç gram negatif (*Salmonella typhimurium* ATCC 14028, *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli* ATCC 25922) bakteriye karşı antibakteriyel aktivite etkileri üzerine araştırma yapılmıştır. Antibakteriyel etkinin gözlemlendiği bakteriler ve petri kabında oluşan zone çapları Çizelge 4,3'te verilmiş, ER/ELO/CldO filmleri içerisindeki aynısefa yağı (CldO) oranı ile oluşan alan görüntüleri Şekil 4.8'da verilmiştir.

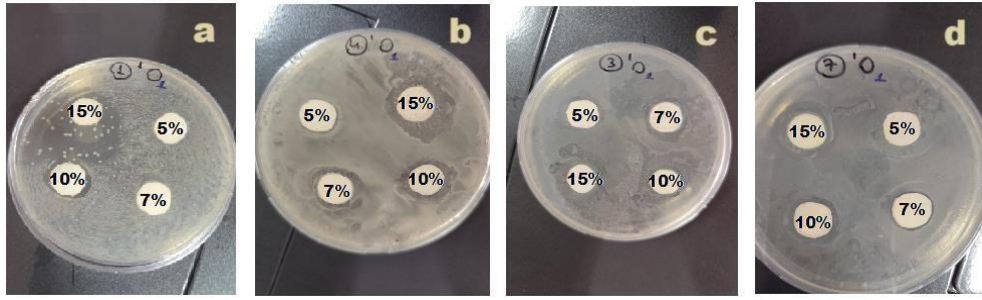
Çizelge 4.3. ER/ELO/CldO filmlerinde CldO oranına bağlı olarak inhibisyon bölgesi çapındaki değişim tablosu

inhibisyon zon çapı (mm) ₁						
CldO (küt.%)	<i>Salmonella</i> <i>typhimurium</i> Gram(-)	<i>Klebsiella</i> <i>pneumoniae</i> Gram(-)	<i>Escherichia</i> <i>coli</i> Gram(-)	<i>Staphylococcus</i> <i>aureus</i> Gram(+)	<i>Bacillus</i> <i>cereus</i> Gram(+)	<i>Listeria</i> <i>monocytogenes</i> Gram(+)
0	10.00 ± 0,00 _c	10.00 ± 0.00 ^d	10.00 ± 0.00 ^a	10.00 ± 0.00 ^e	10.00 ± 0.00 _d	10.00 ± 0.00 ^a
1	10.00 ± 0,00 _c	10.00 ± 0.00 ^d	10.00 ± 0.00 ^a	10.00 ± 0.00 ^e	10.00 ± 0.00 _d	10.00 ± 0.00 ^a
3	10.00 ± 0,00 _c	10.00 ± 0.00 ^d	10.00 ± 0.00 ^a	11.50 ± 0.70 ^{de}	10.00 ± 0.00 ^d	10.00 ± 0.00 ^a
5	10.00 ± 0,00 _c	10.00 ± 0.00 ^d	10.00 ± 0.00 ^a	12.25 ± 0.35 ^{cd}	10.00 ± 0.00 ^d	10.00 ± 0.00 ^a
7	10.00 ± 0,00 _c	12.50 ± 0.70 ^c	10.00 ± 0.00 ^a	13.50 ± 0.70 ^c	12.00 ± 0.00 _c	10.00 ± 0.00 ^a
10	12.50 ± 0.70 ^b	14.00 ± 0.35 ^b	10.00 ± 0.00 ^a	19.50 ± 0.70 ^b	13.75 ± 0.35 ^b	10.00 ± 0.00 ^a
15	23.00 ± 1.41 ^a	20.00 ± 0.00 ^a	10.00 ± 0.00 ^a	24.25 ± 0.35 ^a	18.50 ± 0.70 ^a	10.00 ± 0.00 ^a

₁ Aynı sütundaki farklı harfler, örnekler arasındaki istatistiksel farklılıkları göstermektedir (p>0,05);

Analizde kullanılan ER-ELO/CldO filmlerinin çapı 10 mm'dir.

Not: + kütle artışı; - kütle azalımı



Şekil 4.8. ER/ELO/(%5,7,10,15) CldO filmlerinin (a) *S. typhimurium*, (b) *K. pneumoniae*, (c) *S. Aureus* ve (d) *B. cereus* bakterilere karşı inhibisyon alan görüntüleri

Çizelge 4.3 incelendiğinde, ER/ELO yapısına CldO ilavesinin bazı patojen bakterilerde düşük CldO oranlarında zon oluşumu gözlemlenmiştir. Filmlerdeki CldO oranının artmasıyla birlikte alan çaplarının arttığı ve buna bağlı olarak antibakteriyel aktivitenin de yükseldiği belirlenmiştir. CldO miktarındaki artışın antibakteriyel aktivite üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Belirtilen patojen bakterilere karşı en yüksek inhibitör etki, kütlece %15 CldO içeren örneklerde elde edilmiştir. ER/ELO/CldO filmlerindeki antimikrobiyal etki CldO'nun yapısındaki yüksek oranda bulunan fenolik bileşikler (fenolik asitler ve flavonoidler) ile triterpenlerden kaynaklanmaktadır Chaleshtori ve ark. (2016).

Bazı çalışmalarda, *Calendula officinalis* L. bitkisinden elde edilen esansiyel yağın söz konusu bakteriye karşı etkisiz olduğu Boy ve ark. (2023) veya özütün düşük dozlarda etkili olmadığı bildirilmiştir Ghaima ve ark. (2013). Bu çalışmada da, tüm CldO içeren film örneklerinde *Escherichia coli* ve *Listeria monocytogenes* bakterilerine karşı herhangi bir zon oluşumu gözlemlenmemiştir. Kütlece %5 CldO içeren filmlerde yalnızca Gram (+) *Staphylococcus aureus* bakterisi üzerinde etkili olurken, kütlece %10 CldO içeren filmlerde 2 Gram (+) (*Staphylococcus aureus* ve *Bacillus cereus*) ve 2 Gram (–) bakteri (*Salmonella typhimurium* ve *Klebsiella pneumoniae*) üzerinde antibakteriyel etki göstermiştir. Kütlece %10 CldO içeren film örneklerinde bu bakterilere karşı oluşan inhibisyon zonu çapları 12,5 mm ile 19,5 mm arasında değişmiştir. Benzer şekilde, kütlece %15 CldO içeren film de aynı dört bakteri üzerinde etkili olmuş ve inhibisyon alan çapları 18,5 mm ile 24,25 mm aralığında gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan, CldO oranının %10 ve üzeri olduğu durumlarda, ER/ELO esaslı filmlerin antibakteriyel özelliklerinin belirgin şekilde arttığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada incelenen bazı bakterilerde elde edilen zon çapları ile benzer çalışmalarda tespit edilen saf aynısefa yağı

ve özütü için raporlanan zon çaplarının, *Escherichia coli* bakterisi hariç olmak üzere, genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir Chakraborty (2008); Efstratiou ve ark. (2012); Criste ve ark. (2014); Chaleshtori ve ark. (2016); Sahingil (2019); Karnwal (2022); Huang ve ark. (2023).

4.9. Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS) Analizi

Aynısefa bitkisi yağının bileşiklerinin tespiti için GC-MS analizi yapılmıştır. Analiz sonucu verileri EK-1’de yer almaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen GC-MS analizleri sonucu, CldO’nun başlıca olarak aldehit ve karboksil grupları içeren çeşitli bileşiklerden oluştuğunu ortaya koymuştur. EK-1’de gösterildiği üzere bu bileşikler arasında (E,E)-2,4-dekadienal, (E)2-dekenal, 2,4-dekadienal, 2-undekenal, 2,4-nonadienal, 6-oktadekenoik asit, (E)-9oktadekenoik asit, oleik asit, n-heksadekanoik asit, cis-vassenik asit ve trans-13oktadekenoik asit yer almaktadır.

Zi ve ark. (2018) tarafından bildirildiği üzere, aldehit grubunun bakteriyel hücre zarlarına zarar vererek antibakteriyel aktiviteye katkı sağladığı, karboksil grubunun ise aldehit grubu ile sinerjik bir etki oluşturduğu belirtilmiştir. Trombetta ve ark. (2002) ise alifatik α,β -doymamış aldehitlerin antimikrobiyal etkilerinin mekanizmasını ortaya koymuş ve bu kapsamda (E)-2-heksenal (1), (E)-2-heptenal (2), (E)-2-oktenal (3), (E)2-nonenal (4), (E)-2-dekenal (5) ve (E,E)-2,4-dekadienal bileşiklerini incelemişlerdir.

Benzer çalışmalarda ise CldO’nun antimikrobiyal etkisi, (del Mar Ruíz-Posadas ve ark., 2023) tarafından da incelenmiş ve GC-MS analizleri sonucunda CldO’nun %95,85’inin seskiterpenlerden, %4,15’inin ise diğer hidrokarbonlardan oluştuğu tespit edilmiştir. Seskiterpenler arasında en baskın bileşikler germakren, kadinen ve kübebendir. Çalışma sonunda CldO’nun çoklu ilaç direnci gösteren *E. coli* suşuna karşı yüksek düzeyde etkili olduğu belirlenmiştir. Moghtader ve ark. (2016), CldO’nun başlıca bileşenlerinin δ -kadinen, γ -kadinen, Epi- α -muurolol ve α -kadinol olduğunu tespit etmiş ve bu bileşiklerin *Staphylococcus epidermidis*, *Klebsiella pneumoniae* ve *E. coli*’ye karşı antibakteriyel aktivite gösterdiğini bildirmiştir. Diğer çalışmalarda ise seskiterpenlerin, özellikle kadinen Salomé-Abarca ve ark. (2015), germakren, karyofillen Lima ve ark. (2010) ve kübebenin Sharifi-Rad ve ark. (2015) çeşitli mikroorganizmalar üzerinde antimikrobiyal etkileri gözlemlenmiştir.

4.10. Su Buharı Geçirgenliği Testi

Bir film malzemesinin su buharı geçirgenliği kullanım alanını belirler. Özellikle ambalaj malzemesi olarak kullanılacaksa su buharı geçirgenliğinin düşük olması istenir. Tez aşamasında elde edilen ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerinin su buharı geçirgenlik (WVP) analiz değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin su buharı geçirgenliği

CldO (küt. %)	WVP		WVTR g/(m ² *d)
	Geçirgenlik g.mm/(m ² *kPa*d)	Kalıcılık (Perm)	
Saf ER			
-	1.2180±0.045	0.3216±0.006	0.0082±0.000
ER/ELO (kütlece 2:3 oranında)			
-	2.0025±0.013	0.5666±0.004	0.0136±0.005
ER/ELO/CldO			
3	2.2595±0.333	0.5967±0.007	0.0153±0.004
5	2.8120±0.023	0.7425±0.004	0.0190±0.001
7	6.6971±0.006	1.7685±0.009	0.0453±0.003
10	7.0393±0.036	1.8589±0.013	0.0476±0.001
15	9.7717±0.002	2.5804±0.006	0.0661±0.006

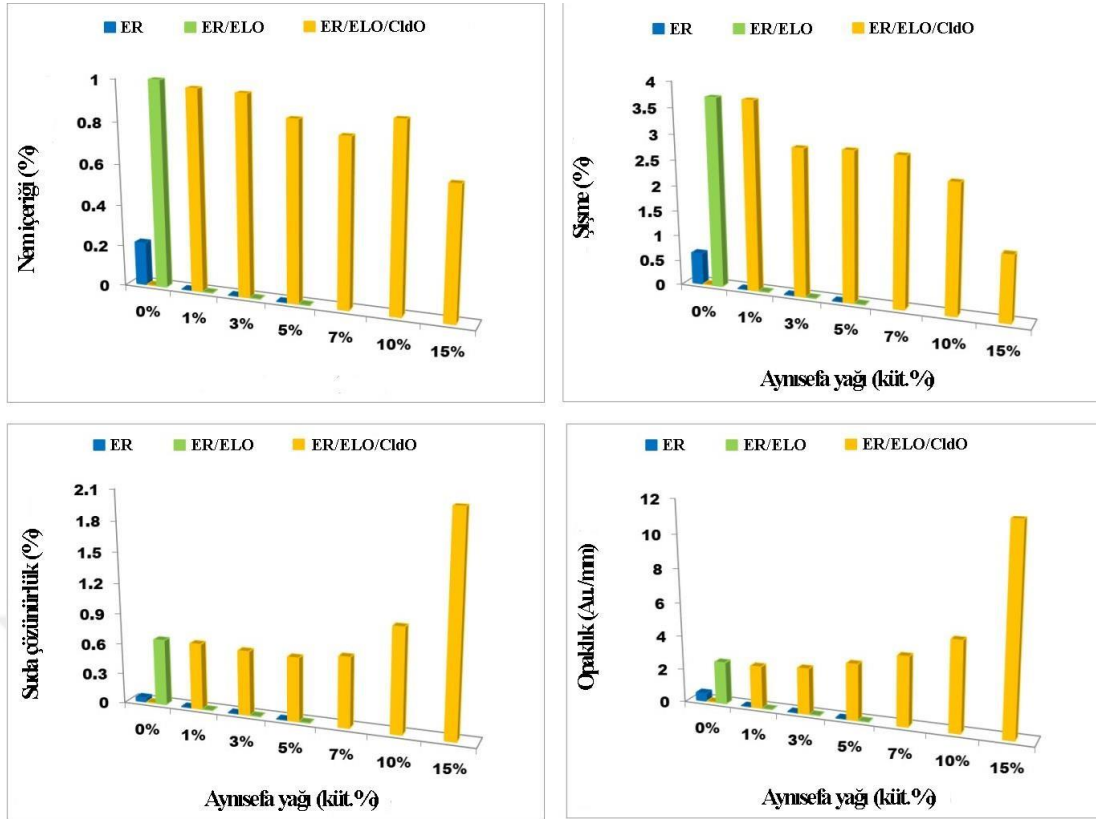
Not: + kütle artışı; - kütle azalımı

Çizelge 4.4'teki verilere göre, saf ER'nin ve %60 oranında ELO içeren ER/ELO karışımının su buharı geçirgenlik değerleri sırasıyla 1,2180 g·mm/(m²·kPa·gün) ve 2,0025 g·mm/(m²·kPa·gün) olarak ölçülmüştür. ER/ELO matrisine %5'e kadar CldO ilave edilmesi, WVP üzerinde anlamlı bir değişime neden olmamıştır. Ancak, CldO oranının %15'e çıkarılması durumunda WVP değeri önemli ölçüde artarak 9,7717 g·mm/(m²·kPa·gün) seviyesine ulaşmıştır. Şekil 4.7(d)'ki SEM görüntülerine bakıldığında %15 CldO içeren film örneğinde katkı maddesinin yüksek oranlarda olmasından dolayı matris içerisinde homojen olmayan bir dağılım göstermesinden kaynaklanmaktadır. Çoğu plastik filmin su buharı geçirgenlik hızı (WVTR) 1 ile 100 g/(m²·gün) aralığındadır Keller ve Kouzes (2017).

Çizelge 4.4'e göre, çalışmada elde edilen film örneklerinin WVTR değerlerinin oldukça düşük olduğu ve 0,0082 ile 0,0661 g/(m²·gün) aralığında değiştiği görülmektedir. Öte yandan, su buharı geçirgenliği hakkında fikir veren bir diğer parametre de Perm sayısıdır. Perm sayısı 0,1'in altında ise, film malzemesinin su buharı geçirgenliği nispeten düşüktür. 0,1 ile 1 arasındaki değerler buhar geciktirici olarak kabul edilirken, 1 ile 10 arasındaki değerler yarı geçirgen yapıyı, 10'un üzerindeki değerler ise geçirgen bir yapıyı işaret etmektedir. Bu çalışmada, CldO içeriği %5'e kadar olan filmlerde Perm sayısı 1'in altında kalmış, ancak %7 ve üzeri katkı oranlarında Perm sayısı 1'in üzerine çıkmıştır.

4.11. Filmlerin Çözünürlük-Şişme-Nem İçeriği ve Optik Özellik Testleri

Düşük nem içeriğine, uygun şişme indeksine ve en elverişli çözünürlük değerlerine sahip filmler, gıda ambalajı için ideal hale getiren parametrelerdir Riaz ve ark. (2024). Bu nedenle, ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin sudaki davranışını belirlemek çok önemlidir. Sudaki davranış, çözünürlük, şişme ve nem içeriği ve opaklık testleri ile belirlenmiştir. Testlerden elde edilen veriler Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin nem içeriği, şişme, çözünürlük ve opaklık değerleri test sonuçları

Şekil 4.9'daki veriler incelendiğinde, ER'nin nem içeriği %0,21 iken, ER/ELO (küt. 2:3 oranında) filmi için %1,27 olarak belirlenmiştir. ELO'nun filme eklenmesinin nem absorpsiyonunu artırdığı gözlemlenmiştir. Literatürde, oda sıcaklığında epoksi reçinesinde nem emilimi işlemi sırasında minimum veya hiç hidrojen bağı olmadığı ve bunun serbest hacimle ilişkili olduğu bildirilmiştir Gupta ve ark. (1985). ER/ELO filminin nem emilimi düşük olarak kabul edilse de ER'ye kıyasla daha yüksek değere sahip olması buna atfedilebilir. CldO ilavesiyle filmlerin nem emilim değerleri azalmış ve bu oran %0,63 ile %0,97 arasında olmuştur. Srivastava ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada da esansiyel yağın hidrofobik bileşenlerinin biyokompozit filmin nem içeriğini ve çözünürlüğü önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Aynısefa yağının (CldO) yapısındaki hidrofobik bileşenlerin varlığı da nem emiliminin azalmasıdaki etkindir.

Şekil 4.9'da ER'nin %0,62 şişme değeri kütlece %60 ELO modifikasyonu ile %3,71'e kadar artmıştır. Şekil 4.10'da da görüldüğü üzere, %1'in üzerinde CldO ilavesiyle birlikte şişme değerleri %2,87'den %1,27'ye kadar azalmıştır. Bu durum, esansiyel yağların hidrofobik yapısından kaynaklanmaktadır Yammine ve ark. (2024).

Tüm örneklerin suda çözünürlük yüzdelere ilişkin veriler Şekil 4.9'da sunulmuştur. Esansiyel yağların düşük su çözünürlüğüne sahip oldukları bilinmektedir Yammine ve ark. (2024). Epoksi reçineleri çoğunlukla viskoz sıvı formda olmakla birlikte, kütleme işlemi sırasında yapıları çapraz bağlı ve çözünmeyen katı hâle dönüşmektedir Rudawska ve ark. (2022). Bu nedenle, ER örneğinin su çözünürlüğü oldukça düşük olup %0,04 olarak bulunmuştur. ER/ELO karışımının çözünürlük değeri ise %0,65 olarak belirlenmiştir. Filmlerin çözünürlük değerleri birbirine oldukça yakın olup, %7'ye kadar CldO içeren örneklerde değişiklik gözlenmemiştir. Ancak, %10 CldO oranında bu değer %1,01'e ulaşmış, %15 oranında ise çözünürlük değeri yaklaşık iki kat artmıştır.

Genel olarak, filmlerin çözünürlük değerleri katkı maddelerinin doğasına, konsantrasyonuna ve bu maddelerin hidrofilik/hidrofobik karakterlerine bağlı olarak değişmektedir Ghasemlou ve ark. (2013). Ayrıca, esansiyel yağlar düşük miktarda da olsa suyla çözünebilen bileşenler içerebilmektedir Chen ve ark. (2014). Bu nedenle, yüksek CldO içeriğine sahip filmlerde su çözünürlüğünün artması olasıdır.

Şekil 4.9'da elde edilen sonuçlara göre, ELO ilavesi ER filminin opaklığını hafifçe artırmış ve opaklık değeri 2,50 olarak belirlenmiştir. CldO ilavesiyle birlikte filmlerin opaklık değerleri artış göstermiş, bu değerler %10'a kadar olan katkı oranlarında 2,51 ile 5,26 arasında değişmiştir. CldO oranı %15'e çıkarıldığında ise opaklıkta belirgin bir artış gözlenmiş ve bu değer 11,85 olarak ölçülmüştür. Teixeira ve ark. (2014), filmlerin şeffaflığının, filme katılan esansiyel yağların türü ve miktarının yanı sıra film kalınlığından da etkilendiğini belirtmiştir. Ayrıca, sarımsak, karanfil ve kekik esansiyel yağlarının protein içerikli filmlerin opaklık değerini hafifçe artırdığı ve bu değerlerin 15,9 ile 16 arasında değiştiği bildirilmiştir.

Guzman-Puyol ve ark. (2022) tarafından yapılan tanımlamaya göre, ışığı geçiren filmler şeffaf, geçirmeyenler ise opak olarak kabul edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre; ER, ER/ELO ve %1–7 oranında CldO içeren filmler şeffaf; %10 CldO içeren film yarı opak veya yarı saydam; %15 CldO içeren film ise opak olarak değerlendirilebilir.

4.12. Filmlerin Kimyasal Direnç Testleri

ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin farklı kimyasal çözeltilerdeki kütle değişimleri incelenmiş olup sonuçlar Çizelge 4.5'te sunulmuştur. ER/ELO ile ER/ELO/(küt. %15) CldO içeren biyoçerikli filminlerinin kimyasal dayanıklılık testi öncesi ve sonrasında mikroskop görüntülerini Şekil 4.10'de yer verilmiştir.

Çizelge 4.5. ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin kimyasal direnci

CldO (küt. %)	Maruz kalma süresi (gün)	5% NaCl Çözeltisi	3% NaOH Çözeltisi	3% HCl Çözeltisi	50%Aseton çözeltisi	50% etanol çözeltisi
Saf ER						
-	5.	+0.11±0.01	+0.23±0.02	+0.07±0.01	+3.02±0.07	+3.26±0.1
	10.	+0.37±0.01	+0.46±0.03	+0.62±0.03	+2.20±0.04	+4.72±0.1
	15.	+0.77±0.07	+0.71±0.03	+0.98±0.01	+2.66±0.02	+5.17±0.1
ER/ELO (kütlece 2:3 oranında)						
-	5.	+2.78±0.01	+0.08±0.00	+0.67±0.06	+4.13±0.05	+2.10±0.01
	10.	+2.56±0.04	+3.02±0.06	+0.61±0.01	+6.17±0.05	+4.31±0.01
	15.	+3.44±0.03	+6.04±0.03	+1.04±0.04	+5.54±0.06	+8.86±0.01
ER/ELO/CldO						
5	5.	+3.99±0.04	-2.33±0.03	+0.90±0.01	-4.80±0.03	+0.02±0.00
	10.	+4.98±0.06	-2.55±0.03	+1.32±0.01	-5.81±0.03	+3.64±0.01
	15.	+5.2±0.07	-2.62±0.07	+1.62±0.01	-9.01±0.02	+3.74±0.01

7	5.	+2.32±0.01	-6.30±0.03	+3.29±0.07	-6.73±0.03	+3.43±0.01
	10.	+2.81±0.04	-6.08±0.04	+3.76±0.07	-7.56±0.04	+3.65±0.00
	15.	+3.54±0.03	-7.74±0.02	+3.93±0.02	-9.53±0.03	+3.94±0.01
15	5.	+1.37±0.01	-2.81±0.04	+1.91±0.06	-16.3±0.02	+0.21±0.00
	10.	+1.87±0.08	-8.60±0.06	+2.27±0.01	-16.6±0.02	+3.26±0.01
	15.	+1.81±0.07	-9.13±0.01	+5.13±0.03	-21.3±0.01	+3.65±0.01

Not: + kütle artışı; - kütle azalımı

Çizelge 4.5 incelendiğinde, saf ER'nin asit, baz ve tuz çözeltilerine karşı yüksek direnç gösterdiği ve kütle artış oranlarının oldukça düşük olduğu (<%1) görülmektedir. Ancak, aseton ve alkol ortamlarında bu değerler daha yüksek bulunmuş ve sırasıyla %2,66 ve %5,17 olarak ölçülmüştür. ER'nin %60 ELO ile modifikasyonu, tüm kimyasal çözeltilerde kütle artışına neden olmuş; bu artışın en fazla olduğu ortam etil alkol çözeltisi olmuştur. Bu durum, Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, ELO'nun yapıya kazandırdığı ilave polar gruplar nedeniyle ER/ELO karışımının artan polaritesi ile ilişkilendirilebilir.

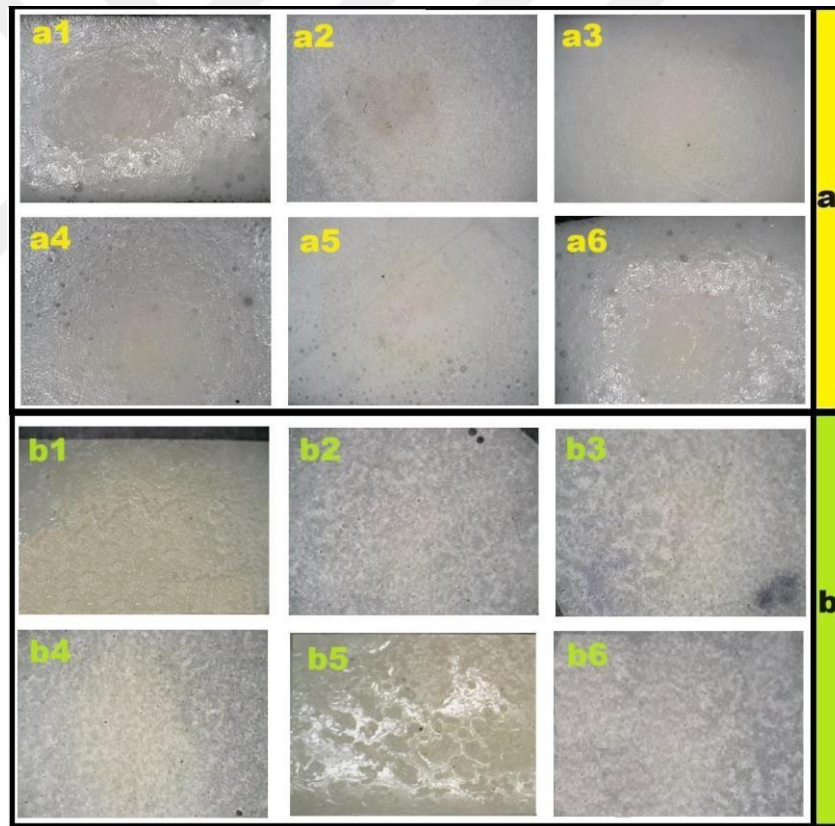
Yağlar, apolar bileşikler olduklarından apolar çözücülerde çözünürler. Oksijen atomunun merkezi konumu nedeniyle aseton, apolar özellik gösteren bir çözücü olup, bitkisel yağlar gibi apolar bileşikler etkin biçimde çözebilir. Buna karşın, etanol hidrojen bağları sayesinde asetona kıyasla daha yüksek polariteye sahiptir. Ayrıca, bitkisel yağların sulu etanoldaki çözünürlüğü hem alkol derişimine hem de sistemin sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Standart sıcaklıklarda, saf alkol dahi bitkisel yağlar için etkili bir çözücü olamamaktadır Kaparathi ve Chari (1959).

Çizelge 4.5'te görüldüğü üzere, CldO içeren filmler bazik ortam ve aseton çözeltisine karşı kararsız bir yapı sergilemiştir. Kütle kaybı, maruz kalma süresi ve CldO oranı ile doğru orantılı olarak artmış; en belirgin kütle kaybı aseton çözeltisinde gözlenmiştir. ER ve ER/ELO karışımı aseton çözeltisinde kütle artışı gösterirken, CldO içeren filmlerde kütle kaybı tespit edilmiş; bu kayıp CldO oranı arttıkça daha da belirgin hale gelmiştir. Tuzlu ortamda CldO oranının artırılması genel olarak kimyasal dayanımı

artırmış; asidik ortamda ise kütle artışı gözlemlenmiş fakat etil alkol çözeltisinde önemli bir değişiklik meydana gelmemiştir.

Şekil 4.10(a)'da görüldüğü gibi, ER/ELO karışımı film, tuz ve baz çözeltilerine karşı mükemmel direnç göstermiş ve görünümde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Asit (%3 HCl), aseton ve etanol çözeltilerinde minimal değişiklikler gözlenmekle birlikte, bu çözeltilere karşı direnç yüksek olarak değerlendirilebilir.

Şekil 4.10(b)'de yer alan, kütlece %15 CldO içeren biyo içerikli filmin çeşitli kimyasal çözeltilere maruz kalmadan önceki görünümü ile karşılaştırıldığında; tuz, asit (%3 HCl) ve etanol çözeltilerinde belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. Buna karşın, bazik çözeltide (%3 NaOH) bazı bölgelerde yüzey aşınmaları ve renk değişiklikleri tespit edilmiş; aseton çözeltisinde ise daha belirgin ve yaygın aşınmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4.10. ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin polarize mikroskop görüntüleri: a): ER/ELO (a1: koşullandırılmamış, a2: %5 NaCl içinde, a3: %3 NaOH içinde, a4: %3 HCl içinde, a5: %50 aseton içinde, a6: %50 etanol içinde), b): ER/ELO/%15 CldO (b1: koşullandırılmamış, b2: %5 NaCl içinde, b3: %3 NaOH içinde, b4: %3 HCl içinde, b5: %50 aseton içinde, b6: %50 etanol içinde)

4.13. pH Ölçümleri

0,9 M NaCl su çözeltisinde (izotonik çözelti) 72 saat bekletilen ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO biyopolimer film örneklerinin pH değerleri Çizelge 4.6'de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, ER-ELO/CldO biyopolimer film örneklerinin 0,9 M NaCl içeren izotonik çözelti içerisinde 72 saat süreyle bekletilmesinden sonra ölçülen pH değerlerinin 7,1 ile 7,2 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, biyopolimer filmlerin ortam pH'ına karşı kimyasal olarak oldukça stabil bir yapı sergilediğini ortaya koymaktadır. Söz konusu değerler, test süresi boyunca yalnızca minimal değişiklikler göstermiştir ve bu durum, malzemenin izotonik ortamlarda çözünür bileşen salınımı açısından düşük reaktiviteye sahip olduğunu ve bu yönüyle kontrollü etkileşim sunduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, literatürde yer alan bilgiler ışığında değerlendirildiğinde, bir malzemenin pH değerleri 5,25 ile 7,90 arasında olması, o malzemenin insan cildi ile temas ettiğinde potansiyel tahriş riski taşımadığını ve dermatolojik açıdan güvenli olduğunu göstermektedir Devi ve Dutta (2017).

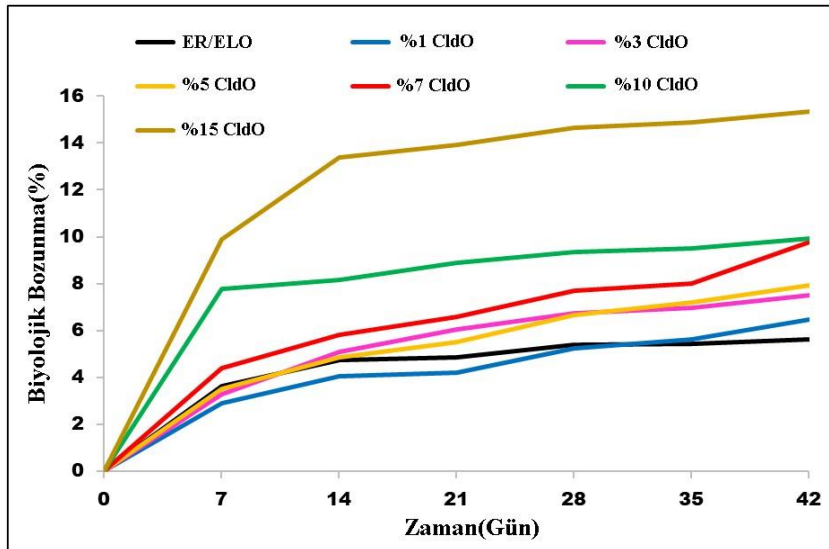
Elde edilen veriler doğrultusunda, çalışmada geliştirilen biyopolimer filmlerin pH açısından insan cildiyle uyumlu olduğu ve potansiyel tıbbi ya da dermal uygulamalar için uygunluk gösterebileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, bu bulgu biyobozunur filmlerin ambalaj, yara örtüsü ya da benzeri biyomedikal alanlardaki kullanım potansiyelini desteklemektedir.

Çizelge 4.6. ER, ELO ve ER/ELO/CldO filmleri pH değerleri

CldO (küt. %)	pH değerleri			
	0. saat	24. saat	48. saat	72. saat
Saf ER				
-	7.10±0.04	7.10±0.05	7.10±0.04	7.10±0.02
ER/ELO (kütlece 2:3 oranında)				
-	7.10±0.03	7.10±0.05	7.10±0.03	7.10±0.02
ER/ELO/CldO				
1	7.10±0.07	7.10±0.01	7.12±0.02	7.11±0.02
3	7.10±0.01	7.10±0.05	7.12±0.06	7.10±0.07
5	7.10±0.02	7.11±0.04	7.11±0.06	7.12±0.04
7	7.10±0.08	7.12±0.01	7.18±0.02	7.18±0.04
10	7.10±0.04	7.12±0.03	7.02±0.02	7.15±0.03
15	7.10±0.04	7.13±0.04	7.07±0.04	7.20±0.03

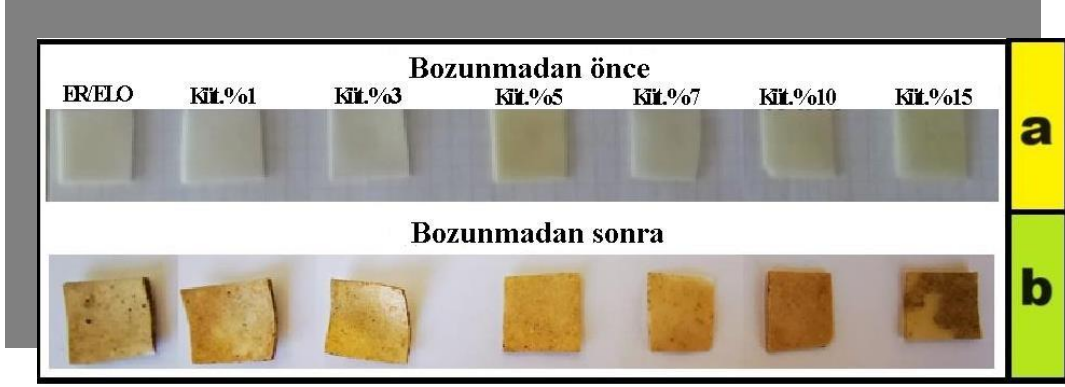
4.14. Biyobozunurluk Testi

Biyobozunabilirliği belirlemek amacıyla biyo içerikli filmlere hem niteliksel hem de niceliksel analizler uygulanmıştır. Saf ER, ER/ELO ve ER/ELO/CldO içeren biyo içerikli filmlerin biyobozunabilirliği 42 gün boyunca toprakta incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.11’de sunulmuştur. Ayrıca biyo içerikli filmlerin biyobozunma öncesi ve sonrası fotoğrafları ile mikroskop görüntüleri Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. ER/ELO ve ER/ELO/CldO filmlerin biyolojik bozunma oranı

Şekil 4.11'den de görüleceği üzere, tüm örneklerde biyobozunma ilk 14 gün içinde daha hızlı gerçekleşmiş, sonraki günlerde bozunma hızı yavaşlamış olsa da bozunma devam etmiştir. ER/ELO (küt. 2:3 oranında) filminin biyobozunabilirliği, test süresinin sonunda %5,63'e ulaşmıştır. Test edilen filmlerin ağırlıkları her hafta ölçülerek 42 günlük maruziyet süresince kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Test edilen tüm biyo içerikli filmler arasında en yüksek kütle kaybı, %15 CldO içeren filmde gözlenmiş ve bu oran %15,34 olarak belirlenmiştir. Biyofilmlerin yavaş bozunmasının bileşimlerinde bulunan %40 oranındaki ER'den kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, ELO ve CldO katkıları filmin biyobozunabilirliğini artırmıştır.



Şekil 4.12. ER/ELO ve ER/ELO/Cldo filmlerinin biyobozunma fotoğrafları: a) öncesi ve b) sonrası

Şekil 4.12(a) ve (b), sırasıyla ER/ELO ve tüm CldO içeren filmlerin biyobozunma testinden önceki ve sonraki fotoğraflarını göstermektedir. Testin ardından, toprakta gömülü kalan tüm biyoiçerikli filmlerin daha kırılgan hâle geldiği ve renklerinde değişim meydana geldiği gözlemlenmiştir. 42 gün sonra, görünür delik içermeyen ancak daha ince ve renkli bir dış tabaka oluşmuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, CldO ve bitkisel yağ içerikli epoksi reçine olan ELO kullanılarak çevre dostu bir gıda ambalajı veya kaplama filmi geliştirme potansiyelini ortaya koymuştur. Bu amaçla, keten tohumundan sentezlenen ELO ve ticari ER kullanılarak epoksi karışımları hazırlanmıştır.

İyot sayısı ve epoksi grubu tayini, ELO'nun başarıyla sentezlendiğini doğrulamaktadır. CldO'nun ilavesiyle yeni biyoçerikli filmler elde edilmiştir. %10'a kadar CldO içeren biyoçerikli filmler, matris yapıya kıyasla daha yüksek çekme dayanımı göstermiştir. ELO, ER'ye göre daha yüksek termal stabiliteye sahiptir. Ayrıca, ELO ve CldO, film örneklerinin kalınlığını azaltmıştır. Tüm film örneklerinin pH değerleri, cilt pH'ı ile uyumludur. ER/ELO matrisinde, ER'ye kıyasla nem içeriği, şişme ve çözünürlük değerlerinde hafif bir artış gözlemlenmiştir. CldO içeren filmler, bazı patojenik bakterilere karşı antibakteriyel aktivite göstermiştir. Ayrıca, ELO ve CldO, filmlerin biyobozunurluğunu artırmıştır. Bunun yanı sıra, filmler tuzlu, asidik ve alkollü ortamlara karşı direnç göstermiştir.

Biyolojik olarak parçalanamayan plastik ambalajların çevre atığına neden olmasıyla ilgili artan endişeler, yenilenebilir doğal biyopolimerlerden üretilen biyobozunur alternatiflerin geliştirilmesine yönelik yoğun bir ilgi doğurmuştur. Bu dönüşüm, ekolojik sorunlara çözüm sunmakta ve ambalajlamada sürdürülebilir bir geleceğin önünü açmaktadır. Kaplamalar, ambalajlara antibakteriyel veya antimikrobiyal özellikler gibi yeni işlevler kazandırabilir. Ancak, konserve gıda kaplarının kaplanması için kullanılan bisfenol A tipi epoksi reçineler geri dönüştürülemez olup insan sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, ELO ve CldO içerikli filmlerin artan sürdürülebilir biyolojik içerikli ambalaj taleplerini karşılayabileceğini ya da kaplama malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelwahab, S. I., Taha, M. M. E., Taha, S. M. E. ve Alsayegh, A. A., 2022, Fifty-year of global research in *Calendula officinalis* L.(1971– 2021): A bibliometric study, *Clinical complementary medicine and pharmacology*, 2 (4), 100059.
- Addis, C. C., Koh, R. S. ve Gordon, M. B., 2020, Preparation and characterization of a bio-based polymeric wood adhesive derived from linseed oil, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102, 102655.
- Agrawal, D., Pal, S. M. ve Sharma, G. K., 2024, Pharmacodynamic Approaches of Phytoconstituents In Wound Healing Mechanisms, *Pharmacological Research Natural Products*, 100119.
- Ahmetli, G., Soydal, U., Kocaman, S., Özmeral, N. ve Musayev, N., 2024, New biobased chitosan-modified peach kernel shell composites and examining their behavior in different environmental conditions, *International Journal of Biological Macromolecules*, 280, 135832.
- Ajayi, N. E., Rusnakova, S., Ajayi, A. E., Ogunleye, R. O., Agu, S. O. ve Amenaghawon, A. N., 2025, A comprehensive review of natural fiber reinforced Polymer composites as emerging materials for sustainable applications, *Applied Materials Today*, 43, 102666.
- Alam, J., Alam, M., Raja, M., Abduljaleel, Z. ve Dass, L. A., 2014, MWCNTsreinforced epoxidized linseed oil plasticized polylactic acid nanocomposite and its electroactive shape memory behaviour, *International journal of molecular sciences*, 15 (11), 19924-19937.
- Andjelkovic, D. D., Valverde, M., Henna, P., Li, F. ve Larock, R. C., 2005, Novel thermosets prepared by cationic copolymerization of various vegetable oils— synthesis and their structure–property relationships, *Polymer*, 46 (23), 96749685.
- Ashcroft, W., 1993, Curing agents for epoxy resins, In: Chemistry and technology of epoxy resins, Eds: Springer, p. 37-71.
- Babaremu, K., Oladijo, O. P. ve Akinlabi, E., 2023, Biopolymers: A suitable replacement for plastics in product packaging, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 6 (4), 333-340.
- Baishya, H. ve Kumar, S., 2025, Natural functional agents reinforced biopolymer composites for active food packaging applications: a review, *Trends in Food Science & Technology*, 105042.
- Balavairavan, B., 2025, Effective utilization of bio-fillers/plasticizers for biofilm preparation, In: Sustainable Fillers/Plasticizers for Polymer Composites, Eds: Elsevier, p. 385-413.
- Bergoglio, M., Rossegger, E., Schlögl, S., Griesser, T., Waly, C., Arbeiter, F. ve Sangermano, M., 2024, Multi-material 3D printing of biobased epoxy resins, *Polymers*, 16 (11), 1510.
- Borges, J. C., de Almeida Campos, L. A., Kretzschmar, E. A. M. ve Cavalcanti, I. M. F., 2024, Incorporation of essential oils in polymeric films for biomedical applications, *International Journal of Biological Macromolecules*, 132108.
- Boy, F. R., Benito, M. J., Córdoba, M. d. G., Rodríguez, A. ve Casquete, R., 2023, Antimicrobial properties of essential oils obtained from autochthonous aromatic plants, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20 (3), 1657.
- Buss, R., Platnieks, O., Kumpiņš, V., Mieriņa, I., Turks, M., Leitans, A., Kirpluks, M. ve Gaidukovs, S., 2025, Synthesis of betulin dioleate epoxide as a bio-based

- building block for epoxy resin formulations with modified rapeseed oil, *Reactive and Functional Polymers*, 214, 106285.
- Caicho-Caranqui, J., Taípe, L. A., Mena, K. A., Ponce, S., Mora, J. R., NegreteBologay, D., Zamora-Mendoza, L., Guerrero, V. H., Bravo, P. I. P. ve Pasquel, D., 2024, Towards sustainable bioplasticizers from biomass to polymers applications: A review, *Sustainable Materials and Technologies*, e01194.
- Cerit, A., Marti, M. E., Soydal, U., Kocaman, S. ve Ahmetli, G., 2016, Effect of modification with various epoxide compounds on mechanical, thermal, and coating properties of epoxy resin, *International Journal of Polymer Science*, 2016 (1), 4968365.
- Chakraborty, G., 2008, Antimicrobial activity of the leaf extracts of *Calendula officinalis* (Linn), *J Herb Med Toxicol*, 2 (2), 65-66.
- Chaleshtori, S. H., Kachoie, M. A. ve Pirbalouti, A. G., 2016, Phytochemical analysis and antibacterial effects of *Calendula officinalis* essential oil, *Biosci. Biotechnol. Res. Commun*, 9 (3), 517-522.
- Chen, H., Davidson, P. M. ve Zhong, Q., 2014, Impacts of sample preparation methods on solubility and antilisterial characteristics of essential oil components in milk, *Applied and Environmental Microbiology*, 80 (3), 907-916.
- Chen, J., Soucek, M. D., Simonsick, W. J. ve Celikay, R. W., 2002, Synthesis and photopolymerization of norbornyl epoxidized linseed oil, *Polymer*, 43 (20), 5379-5389.
- Chitrakar, B., Zhang, M. ve Bhandari, B., 2019, Edible flowers with the common name “marigold”: Their therapeutic values and processing, *Trends in Food Science & Technology*, 89, 76-87.
- Chong, K., Lai, J., Rahman, R., Adrus, N., Al-Saffar, Z., Hassan, A., Lim, T. ve Wahit, M., 2022, A review on recent approaches to sustainable bio-based epoxy vitrimer from epoxidized vegetable oils, *Industrial Crops and Products*, 189, 115857.
- Criste, A., Giuburuncă, M., Negrea, O. ve Fit, N., 2014, Research concerning antimicrobial activities of some essential oils extracted from plants, *SCIENTIFIC PAPERS ANIMAL SCIENCE AND BIOTECHNOLOGIES*, 47 (2), 67-67.
- Danielski, L., Campos, L. M., Bresciani, L. F., Hense, H., Yunes, R. A. ve Ferreira, S. R., 2007, Marigold (*Calendula officinalis* L.) oleoresin: Solubility in SC-CO₂ and composition profile, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46 (2), 99-106.
- Davoudabadi, M., Fahimirad, S., Ganji, A. ve Abtahi, H., 2023, Wound healing and antibacterial capability of electrospun polyurethane nanofibers incorporating *Calendula officinalis* and Propolis extracts, *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 34 (11), 1491-1516.
- del Mar Ruíz-Posadas, L., Rodríguez-López, V. A., Cadena-Iñíguez, J., DelgadilloMartínez, J., San Miguel-Chávez, R., Salazar-Aguilar, S. ve Valdez-Carrasco, J., 2023, Antibacterial activity of the *Calendula officinalis* L. essential oil on *Escherichia coli*, *Agro Productividad*.
- Devi, N. ve Dutta, J., 2017, Preparation and characterization of chitosan-bentonite nanocomposite films for wound healing application, *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 1897-1904.
- Devrim, G., 2019, Farklı liflerden üretilmiş kumaşların kullanım ve biyobozunurluk performansının incelenmesi, *Dokuz Eylul Üniversitesi (Turkey)*.

- Ding, C., Shuttleworth, P. S., Makin, S., Clark, J. H. ve Matharu, A. S., 2015, New insights into the curing of epoxidized linseed oil with dicarboxylic acids, *Green Chemistry*, 17 (7), 4000-4008.
- Dinu, R. M. ve Mija, A., 2020, Bio-based epoxy resins and composites from epoxidized linseed oil crosslinked with different cyclic anhydrides and their combination with lignin, *Cellulose Chemistry and Technology*, 54 (9-10), 935-948.
- Edo, G. I., Mafe, A. N., Ali, A. B., Akpogheli, P. O., Yousif, E., Isoje, E. F., Igbuku, U. A., Zainulabdeen, K., Owheruo, J. O. ve Essaghah, A. E. A., 2025, Life cycle and environmental impact assessment of biopolymer-based packaging vs. conventional plastics in the food industry, *Materials Today Communications*, 46, 112806.
- Efstratiou, E., Hussain, A. I., Nigam, P. S., Moore, J. E., Ayub, M. A. ve Rao, J. R., 2012, Antimicrobial activity of *Calendula officinalis* petal extracts against fungi, as well as Gram-negative and Gram-positive clinical pathogens, *Complementary Therapies in Clinical Practice*, 18 (3), 173-176.
- El-Ganiny, A. M., Shaker, G. H., Aboelazm, A. A. ve El-Dash, H. A., 2017, Prevention of bacterial biofilm formation on soft contact lenses using natural compounds, *Journal of Ophthalmic Inflammation and Infection*, 7, 1-7.
- Faria, R. L., Cardoso, L. M. L., Akisue, G., Pereira, C. A., Junqueira, J. C., Jorge, A. O. C. ve Santos Júnior, P. V., 2011, Antimicrobial activity of *Calendula officinalis*, *Camellia sinensis* and chlorhexidine against the adherence of microorganisms to sutures after extraction of unerupted third molars, *Journal of Applied Oral Science*, 19, 476-482.
- Franz, A. W., Buchholz, S., Albach, R. W. ve Schmid, R., 2024, Towards greener polymers: Trends in the German chemical industry, *Green Carbon*.
- Fu, X., Ma, L., Chen, L., Zhang, C., Chen, X., Li, X., Fu, F., Fu, C., Lin, T. ve Mao, W., 2023, Study on Blending Modification of Bisphenol A Epoxy, *Polymers*, 15 (15), 3263.
- Garcia-Garcia, D., Ferri, J. M., Montanes, N., Lopez-Martinez, J. ve Balart, R., 2016, Plasticization effects of epoxidized vegetable oils on mechanical properties of poly (3-hydroxybutyrate), *Polymer International*, 65 (10), 1157-1164.
- Gedik, B., Akkoyunlu, A. ve Dulger, G., 2024, Antibiofilm, antiquorum sensing and antioxidant activities of *Calendula officinalis* L., *Hypericum perforatum* L. and *Trachystemon orientalis* (L.) G. Don essential oils.
- Getahun, M. J., Kassie, B. B. ve Alemu, T. S., 2024, Recent advances in biopolymer synthesis, properties, & commercial applications: A review, *Process Biochemistry*.
- Ghaima, K. K., Rasheed, S. F. ve Ahmed, E. F., 2013, Antibiofilm, antibacterial and antioxidant activities of water extract of *Calendula officinalis* flowers, *International Journal of Biological & Pharmaceutical Research*, 4 (7), 465-470.
- Ghamari, M. A., Amiri, S., Rezazadeh-Bari, M. ve Rezazad-Bari, L., 2022, Physical, mechanical, and antimicrobial properties of active edible film based on milk proteins incorporated with *Nigella sativa* essential oil, *Polymer Bulletin*, 79 (2), 1097-1117.
- Ghasemlou, M., Aliheidari, N., Fahmi, R., Shojaaee-Aliabadi, S., Keshavarz, B., Cran, M. J. ve Khaksar, R., 2013, Physical, mechanical and barrier properties of corn starch films incorporated with plant essential oils, *Carbohydrate polymers*, 98 (1), 1117-1126.

- Gholipour-Varnami, K., Mohamadnia, S., Tavakoli, O. ve Faramarzi, M. A., 2025, A Review on the Biological Activities of Key Carotenoids: Structures, Sources, Market, Economical Features, and Stability, *Food Bioscience*, 106529.
- Ghosal, K. ve Ghosh, S., 2023, Biodegradable polymers from lignocellulosic biomass and synthetic plastic waste: an emerging alternative for biomedical applications, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 156, 100761.
- Giray, B. G., Piren Otu Yağı, Tüylü Adaçayı Yağı, Aynisafa Yağı, Zerdeçal Yağı ve Argan Yağının in Vitro Antibakteriyal ve Antifungal Özelliklerinin Belirlenmesi, *Black Sea Journal of Health Science*, 6 (4), 579-583.
- Gonçalves, R., Serra, J., Reizabal, A., Correia, D., Fernandes, L., Brito-Pereira, R., Lizundia, E., Costa, C. ve Lanceros-Méndez, S., 2025, Biobased polymers for advanced applications: Towards a sustainable future, *Progress in polymer science*, 101934.
- Gu, H., Cao, Q., Li, J., Zhao, J., Zhang, S., Jian, X. ve Weng, Z., 2023, Enhancing the comprehensive performance of bisphenol A epoxy resin via blending with a biobased counterpart, *Polymer*, 280, 126038.
- Gupta, V., Drzal, L. T. ve Rich, M. J., 1985, The physical basis of moisture transport in a cured epoxy resin system, *Journal of Applied Polymer Science*, 30 (11), 44674493.
- Guzman-Puyol, S., Benítez, J. J. ve Heredia-Guerrero, J. A., 2022, Transparency of polymeric food packaging materials, *Food Research International*, 161, 111792.
- Hasan, S. O. H. ve Bircan, I. B., 2022, Preparation of bionanocomposite coatings from tung oil treated with a diamine and a triamine as alternatives for bisphenol A (BPA), *Progress in Organic Coatings*, 168, 106887.
- Helfenstein, A. A., Dias, Ê. R., Reis, I. M. A., Freitas, E. E. S., Biondi, I. B., Branco, C. R. C., da Silva Almeida, J. R. G., Cruz, R. S., Branco, A. ve Camilloto, G. P., 2024, Mucoadhesive oral film based on high methoxyl pectin and phosphated cassava starch incorporated with Calendula officinalis extract, *Journal of drug delivery science and technology*, 102, 106428.
- Huang, W.-H., Hung, C.-Y., Chiang, P.-C., Lee, H., Lin, I.-T., Lai, P.-C., Chan, Y.-H. ve Feng, S.-W., 2023, Physicochemical characterization, biocompatibility, and antibacterial properties of CMC/PVA/Calendula officinalis films for biomedical applications, *Polymers*, 15 (6), 1454.
- Hubmann, M., von Gunten, K., Alessi, D. S. ve Curtis, J. M., 2021, Epoxidized linseed lipids as a durable and fast-curing alternative to drying oils, *Progress in Organic Coatings*, 159, 106406.
- Jarić, S., Kostić, O., Mataruga, Z., Pavlović, D., Pavlović, M., Mitrović, M. ve Pavlović, P., 2018, Traditional wound-healing plants used in the Balkan region (Southeast Europe), *Journal of ethnopharmacology*, 211, 311-328.
- Jin, M.-Y., Li, M.-Y., Huang, R.-M., Wu, X.-Y., Sun, Y.-M. ve Xu, Z.-L., 2021, Structural features and anti-inflammatory properties of pectic polysaccharides: A review, *Trends in Food Science & Technology*, 107, 284-298.
- Kaparthi, R. ve Chari, K., 1959, Solubilities of vegetable oils in aqueous ethanol and ethanol-hexane mixtures, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 36 (2), 77-80.
- Kapoor, S., Chandel, R., Kaur, R., Kumar, S., Kumar, R., Janghu, S., Kaur, A. ve Kumar, V., 2023, The flower of *Hypericum perforatum* L.: A traditional source of bioactives for new food and pharmaceutical applications, *Biochemical Systematics and Ecology*, 110, 104702.

- Karnwal, A., 2022, In vitro antibacterial activity of Hibiscus rosa sinensis, Chrysanthemum indicum, and Calendula officinalis flower extracts against Gram negative and Gram positive food poisoning bacteria, *Advances in Traditional Medicine*, 22 (3), 607-619.
- Katnic, S. P. ve Gupta, R. K., 2025, From biofilms to biocatalysts: Innovations in plastic biodegradation for environmental sustainability, *Journal of Environmental Management*, 374, 124192.
- Keller, P. E. ve Kouzes, R. T., 2017, Water vapor permeation in plastics, *Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States)*.
- Kerton, F. M., 2024, Applying the principles of green chemistry to achieve a more sustainable polymer life cycle, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 100996.
- Khandelwal, V., Sahoo, S. K., Kumar, A. ve Manik, G., 2018, Electrically conductive green composites based on epoxidized linseed oil and polyaniline: An insight into electrical, thermal and mechanical properties, *Composites Part B: Engineering*, 136, 149-157.
- Kharat, Z., Goushki, M. A., Sarvian, N., Asad, S., Dehghan, M. M. ve Kabiri, M., 2021, Chitosan/PEO nanofibers containing Calendula officinalis extract: Preparation, characterization, in vitro and in vivo evaluation for wound healing applications, *International Journal of Pharmaceutics*, 609, 121132.
- Kim, S. ve Chung, H., 2024, Biodegradable polymers: From synthesis methods to applications of lignin-graft-polyester, *Green Chemistry*, 26 (21), 10774-10803.
- Kocaman, S., Ahmetli, G. ve Temiz, M., 2024, Newly epoxy resin synthesis from citric acid and the effects of modified almond shell waste with different natural acids on the creation of bio-based composites, *Industrial Crops and Products*, 220, 119106.
- Komartin, R. S., Balanuca, B., Necolau, M. I., Cojocaru, A. ve Stan, R., 2021, Composite materials from renewable resources as sustainable corrosion protection coatings, *Polymers*, 13 (21), 3792.
- Kumar, P. ve Kumar, M., 2022, Natural nano-fillers materials for the bio-composites: a review, *Journal of the Indian Chemical Society*, 99 (10), 100715.
- Lazzari, M. ve Chiantore, O., 1999, Drying and oxidative degradation of linseed oil, *Polymer degradation and stability*, 65 (2), 303-313.
- Li, J., Tang, S., Lyu, M., Zhu, H., Luo, Y. ve Zhang, C., 2024, A dual cross-linking strategy enables fully bio-based epoxy thermosets with superior low dielectric properties and mechanical properties, *Industrial Crops and Products*, 220, 119117.
- Liang, X., Guo, S., Kuang, X., Wan, X., Liu, L., Zhang, F., Jiang, G., Cong, H., He, H. ve Tan, S. C., 2024, Recent advancements and perspectives on processable natural biopolymers: Cellulose, chitosan, eggshell membrane, and silk fibroin, *Science Bulletin*.
- Lima, S. G. D., Citó, A. M., Lopes, J. A., Neto, J. M., Chaves, M. H. ve Silveira, E. R., 2010, Fixed and volatile constituents of genus Croton plants: C. adenocalyx Baill-Euphorbiaceae, *Revista latinoamericana de química*, 38 (3), 133-144.
- Liu, J., Yin, X., Kou, C., Thimmappa, R., Hua, X. ve Xue, Z., 2024, Classification, biosynthesis, and biological functions of triterpene esters in plants, *Plant communications*, 5 (4).
- Liu, L.-J., Chen, F.-Y., Zhu, S., Yan, L., Zhao, R.-X., Chen, P.-Y. ve Wang, B., 2025,

- Multi-functional polyvinyl chloride plastic additive based on epoxidized linseed oil-polycaprolactone: Preparation and application performance study, *Reactive and Functional Polymers*, 213, 106270.
- Lligadas, G., Ronda, J. C., Galia, M. ve Cadiz, V., 2013, Renewable polymeric materials from vegetable oils: a perspective, *Materials today*, 16 (9), 337-343.
- Madhusudhana, A. M., Mohana, K. N. S., Hegde, M. B., Nayak, S. R., Rajitha, K. ve Kumar, M. C. S., 2022, Functionalized graphene oxide dispersed polyvinyl alcohol-epoxidized linseed oil composite: An eco-friendly and promising anticorrosion coating material, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 650, 129382.
- Malachovskienė, E., Bridžiuviene, D., Ostrauskaitė, J., Vaičekauskaitė, J. ve Žalūdienė, G., 2023, A comparative investigation of the biodegradation behaviour of linseed oil-based cross-linked composites filled with industrial waste materials in two different soils, *Journal of renewable materials.*, 11 (3), 1255-1269.
- Maleki, A., Vafaenezhad, H. ve Eslami-Farsani, R., 2024, Polystyrene microcapsules containing linseed oil and SiC nanoparticles as a lubricant additive for boosting the self-healing and self-lubricating efficiency of epoxy coatings, *Tribology International*, 193, 109428.
- Mamay, T., Birlie, B. ve Flatie, D., 2025, A shift from synthetic to bio-based polymer for functionalization of textile materials: A review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 141637.
- Marriam, F., Irshad, A., Umer, I., Asghar, M. A. ve Atif, M., 2023, Vegetable oils as bio-based precursors for epoxies, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 31, 100935.
- Mazzon, E., Habas-Ulloa, A. ve Habas, J.-P., 2015, Lightweight rigid foams from highly reactive epoxy resins derived from vegetable oil for automotive applications, *European Polymer Journal*, 68, 546-557.
- Mishra, A. K., Mishra, A. ve Chattopadhyay, P., 2018, Screening of acute and subchronic dermal toxicity of Calendula officinalis L essential oil, *Regulatory toxicology and pharmacology*, 98, 184-189.
- Moghtader, M., Salari, H., Mozafari, H. ve Farahmand, A., 2016, Evaluation the qualitative and quantitative essential oil of Calendula officinalis and its antibacterial effects, *Cellular and Molecular Research (Iranian Journal of Biology)*, 29 (3), 331-339.
- Muhammad, S., Bairwan, R. D., Khalil, H. A., Marwan, M., Ahmad, M. I. ve Abdullah, C., 2025, Comparative study of lignin from patchouli waste fibers and spent coffee grounds as biofillers in poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)based biodegradable packaging materials, *Bioresource Technology Reports*, 102138.
- Necolau, M. I., Damian, C. M., Olaret, E., Iovu, H. ve Balanuca, B., 2022, Comparative thermo-mechanical properties of sustainable epoxy polymer networks derived from linseed oil, *Polymers*, 14 (19), 4212.
- Nieto-Alarcón, J. F., González, D. A., Viguera-Santiago, E. ve Hernández-López, S., 2023, Carbonation Reaction of Epoxidized Linseed Oil: Comparative Performance of TBABr and TBAI as Catalysts, *Journal of Chemistry*, 2023 (1), 3169663.
- Özen, M., Demircan, G., Açıkgöz, A., Alptekin, H. ve Kısa, M., 2024, A Sustainable Bio-Filler for Epoxy Composites: Use of Pistachio Shell Powder, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (1), 150-165.

- Özmeral, N., Soydal, U., Kocaman, S. ve Ahmetli, G., 2023, Red mud waste/nanoclay/polystyrene-modified epoxy hybrid composites: Mechanical, thermal, and flammability properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 140 (31), e54218.
- Paluvai, N. R., Mohanty, S. ve Nayak, S., 2015, Synthesis and characterization of acrylated epoxidized castor oil nanocomposites, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 20 (4), 298-306.
- Pappa, C., Feghali, E., Vanbroekhoven, K. ve Triantafyllidis, K. S., 2022, Recent advances in epoxy resins and composites derived from lignin and related biooils, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38, 100687.
- Park, J. J. ve Lee, S., 2025, Biodegradable Epoxy Thermosets Prepared by Mixing Diglycidyl Ether of Bisphenol A and Epoxidized Soybean Oil and Their Electrical and Mechanical Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, e56739.
- Parvez, A. K., Jubyda, F. T., Karmakar, J., Jahan, A., Ayaz, M., Kabir, T., Akter, S. ve Huq, M. A., 2025, Antimicrobial potential of biopolymers against foodborne pathogens: An updated review, *Microbial Pathogenesis*, 107583.
- Pesaranhajiabbas, E., Misra, M. ve Mohanty, A. K., 2023, Recent progress on biodegradable polylactic acid based blends and their biocomposites: A comprehensive review, *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 126231.
- Pfister, D. P. ve Larock, R. C., 2010, Green composites from a conjugated linseed oilbased resin and wheat straw, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41 (9), 1279-1288.
- Pleva, P., Bartošová, L., Janalíková, M., Polášková, M., Šišková, A. O., Matošková, L., Krejčí, O. ve Sedlářiková, J., 2025, Biodegradable zein/PEG nanofibers incorporated with natural antimicrobial compounds for eco-friendly food packaging, *New Biotechnology*, 88, 12-21.
- Polman, E. M., Gruter, G.-J. M., Parsons, J. R. ve Tietema, A., 2021, Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review, *Science of the Total Environment*, 753, 141953.
- Ratna, D., 2001, Mechanical properties and morphology of epoxidized soyabean-oil-modified epoxy resin, *Polymer International*, 50 (2), 179-184.
- Raut, J. S. ve Karuppayil, S. M., 2014, A status review on the medicinal properties of essential oils, *Industrial Crops and Products*, 62, 250-264.
- Reinhardt, N., Breitsameter, J. M., Drechsler, K. ve Rieger, B., 2022, Fully Bio-Based Epoxy Thermoset Based on Epoxidized Linseed Oil and Tannic Acid, *Macromolecular Materials and Engineering*, 307 (12), 2200455.
- Riaz, S., Maan, A. A., Butt, M. S. ve Khan, M. K. I., 2024, Valorization of agricultural residues in the development of biodegradable active packaging films, *Industrial Crops and Products*, 215, 118587.
- Riaz, U., Vashist, A., Ahmad, S. A., Ahmad, S. ve Ashraf, S., 2010, Compatibility and biodegradability studies of linseed oil epoxy and PVC blends, *biomass and bioenergy*, 34 (3), 396-401.
- Rudawska, A., Sarna-Boś, K., Rudawska, A., Olewnik-Kruszkowska, E. ve Frigione, M., 2022, Biological effects and toxicity of compounds based on cured epoxy resins, *Polymers*, 14 (22), 4915.
- Sahingil, D., 2019, GC/MS-olfactometric characterization of the volatile compounds, determination antimicrobial and antioxidant activity of essential oil from

- flowers of calendula (*Calendula officinalis* L.), *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 22 (6), 1571-1580.
- Salas, R., Villa, R., Velasco, F., Cirujano, F. G., Nieto, S., Martin, N., Garcia-Verdugo, E., Dupont, J. ve Lozano, P., 2025, Ionic liquids in polymer technology, *Green Chemistry*.
- Salomé-Abarca, L. F., Soto-Hernández, R. M., Cruz-Huerta, N. ve GonzálezHernández, V. A., 2015, Chemical composition of scented extracts obtained from *Calendula officinalis* by three extraction methods, *Botanical sciences*, 93 (3), 633-638.
- Samper, M., Petrucci, R., Sánchez-Nacher, L., Balart, R. ve Kenny, J., 2015, New environmentally friendly composite laminates with epoxidized linseed oil (ELO) and slate fiber fabrics, *Composites Part B: Engineering*, 71, 203-209.
- Sangaletti, D., Ceseracciu, L., Marini, L., Athanassiou, A. ve Zych, A., 2023, Biobased boronic ester vitrimer resin from epoxidized linseed oil for recyclable carbon fiber composites, *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107205.
- Santana, K. D. S. ve Tavares, M. I. B., 2022, Characterization of flaxseed oil for nuclear magnetic resonance and its encapsulation, *Materials Sciences and Applications*, 13 (5), 279-299.
- Seewoo, B. J., Wong, E. V., Mulders, Y. R., Goodes, L. M., Eroglu, E., Brunner, M., Gozt, A., Toshniwal, P., Symeonides, C. ve Dunlop, S. A., 2024, Impacts associated with the plastic polymers polycarbonate, polystyrene, polyvinyl chloride, and polybutadiene across their life cycle: A review, *Heliyon*, 10 (12).
- Shanmugasundram, H. P. P. V., Jayamani, E. ve Soon, K. H., 2025, Classification, theories, and methodologies concerning bio-based polymer dielectric composites, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 209, 115026.
- Sharifi-Rad, J., Hoseini-Alfatemi, S. M., Sharifi-Rad, M. ve Setzer, W. N., 2015, Chemical Composition, Antifungal and Antibacterial Activities of Essential Oil from *L. allemantia* Royleana (B enth. in W all.) B enth, *Journal of Food Safety*, 35 (1), 19-25.
- Sharma, V. ve Kundu, P. P., 2006, Addition polymers from natural oils—A review, *Progress in polymer science*, 31 (11), 983-1008.
- Singh, N. K., Baranwal, J., Pati, S., Barse, B., Khan, R. H. ve Kumar, A., 2023, Application of plant products in the synthesis and functionalisation of biopolymers, *International Journal of Biological Macromolecules*, 237, 124174.
- Sionkowska, A., 2011, Current research on the blends of natural and synthetic polymers as new biomaterials, *Progress in polymer science*, 36 (9), 1254-1276.
- Skendi, A., Irakli, M., Chatzopoulou, P., Bouloumpasi, E. ve Biliaderis, C. G., 2022, Phenolic extracts from solid wastes of the aromatic plant essential oil industry: Potential uses in food applications, *Food Chemistry Advances*, 1, 100065.
- Slabu, A. I., Stan, R., Miu, L., Necolau, M. I., Balanuca, B. ve Teodorescu, F., 2024, Sustainable strategy for the synthesis of novel vegetable oil derived polymeric materials, *Polymers for Advanced Technologies*, 35 (8), e6532.
- Soydal, U., Kocaman, S., Ahmetli, G. ve Avşar, S., 2024, Methylene blue sorption performance of lignocellulosic peach kernel shells modified with cellulose derivative chitosan as a new bioadsorbent, *International Journal of Biological Macromolecules*, 280, 135646.
- Srivastava, V., Singh, S. ve Das, D., 2024, Development and characterization of peppermint essential oil/rice husk fibre/corn starch active biocomposite film and its performance on bread preservation, *Industrial Crops and Products*, 208, 117765.

- Su, Y., Zhang, S., Chen, Y., Yuan, T. ve Yang, Z., 2020, One-step synthesis of novel renewable multi-functional linseed oil-based acrylate prepolymers and its application in UV-curable coatings, *Progress in Organic Coatings*, 148, 105820.
- Sui, Y., Xie, L., Meng, D., Ruan, Y., Zhong, Z. ve Huang, L., 2022, Cardiovascular protective properties of green synthesised iron nanoparticles from *Calendula officinalis* leaf aqueous extract on Mitoxantrone-induced DNA fragmentation and apoptosis in HDMVECn, HUVEC, HAEC, HCAEC, HCASMC and HPAEC cells, *Journal of Experimental Nanoscience*, 17 (1), 126-137.
- Tavallali, V., Rahmati, S., Bahmanzadegan, A. ve Lasibi, M. J. M., 2024, Variation in developmental and phytochemical characteristics of *Calendula officinalis* L. using foliar application of iron nanoparticles formed on hyaluronic acid, *Scientia Horticulturae*, 323, 112539.
- Teixeira, B., Marques, A., Pires, C., Ramos, C., Batista, I., Saraiva, J. A. ve Nunes, M. L., 2014, Characterization of fish protein films incorporated with essential oils of clove, garlic and origanum: Physical, antioxidant and antibacterial properties, *LWT-Food Science and Technology*, 59 (1), 533-539.
- Todorovic, A., Resch-Fauster, K., Mahendran, A. R., Oreski, G. ve Kern, W., 2021, Curing of epoxidized linseed oil: Investigation of the curing reaction with different hardener types, *Journal of Applied Polymer Science*, 138 (16), 50239.
- Trombetta, D., Saija, A., Bisignano, G., Arena, S., Caruso, S., Mazzanti, G., Uccella, N. ve Castelli, F., 2002, Study on the mechanisms of the antibacterial action of some plant α , β -unsaturated aldehydes, *Letters in Applied Microbiology*, 35 (4), 285-290.
- Tubay-Bermúdez, C., Neves, C. A., Dueñas-Rivadeneira, A. A., Peña, A. M., Mendoza, L. A. Z., Escobar, K. R., Rivas-Navia, D. M. ve Maddela, N. R., 2024, Physicalchemical characterization and biological activities of the essential oil of *Lippia alba* (MILL) NE Br ex Britton obtained in Ecuador, *Journal of Herbal Medicine*, 100951.
- Valente, B. F., Karamysheva, A., Silvestre, A. J., Neto, C. P., Vilela, C. ve Freire, C. S., 2023, Epoxidized linseed oil as a plasticizer for All-Cellulose Composites based on cellulose acetate butyrate and micronized pulp fibers, *Industrial Crops and Products*, 202, 116980.
- Vinodhini, S., Xavier, J. R. ve Priyadharshini, A., 2025, A review on flame retardant, anticorrosion, and mechanical properties of multifunctional polymer nanocomposite coatings for industrial applications, *Progress in Organic Coatings*, 206, 109361.
- Wan, X. ve Xu, T., 2024, Water-assisted self-healing of polymeric materials, *European Polymer Journal*, 113310.
- Yamine, J., Chihib, N.-E., Gharsallaoui, A., Ismail, A. ve Karam, L., 2024, Advances in essential oils encapsulation: Development, characterization and release mechanisms, *Polymer Bulletin*, 81 (5), 3837-3882.
- Yim, Y.-J., Rhee, K. Y. ve Park, S.-J., 2017, Fracture toughness and ductile characteristics of diglycidyl ether of bisphenol-A resins modified with biodegradable epoxidized linseed oil, *Composites Part B: Engineering*, 131, 144-152.
- Yokoyama, Y., Yasui, T., Takeda, A., Ogino, K. ve Kanehashi, S., 2023, Novel biobased flexible bisphenol epoxy resin derived from cashew nut shell liquid, *Polymer Journal*, 55 (8), 859-867.

- Zhan, L.-Y., Li, P., Li, Y.-D., Ran, Y. ve Zeng, J.-B., 2025, Fully biobased epoxy vitrimer from resorcinol diglyceryl ether, vanillin, and 1, 10-diaminodecane, *European Polymer Journal*, 113749.
- Zhang, Y., Ferdosian, F., Yuan, Z. ve Xu, C. C., 2017, Sustainable glucose-based phenolic resin and its curing with a DGEBA epoxy resin, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 381-387.
- Zhang, Z.-S., Wang, L.-J., Li, D., Li, S.-J. ve Özkan, N., 2011, Characteristics of flaxseed oil from two different flax plants, *International Journal of Food Properties*, 14 (6), 1286-1296.
- Zi, Y., Zhu, M., Li, X., Xu, Y., Wei, H., Li, D. ve Mu, C., 2018, Effects of carboxyl and aldehyde groups on the antibacterial activity of oxidized amylose, *Carbohydrate polymers*, 192, 118-125.
- Zournatzis, I., Liakos, V., Papadopoulos, S. ve Wogiatzi, E., 2024, Calendula officinalis-A comprehensive review, *Pharmacological Research-Natural Products*, 100140.



EKLER

EK-1 Gaz Kromatografi-Kütle Spektrometrisi (GC-MS) analiz raporu

Library Search Report

Data Path : C:\GC_FID_2025\Data\FT25-0361_Ulku Soydal\
 Data File : Bitkisel yag_dil_2.D
 Acq On : 06 May 2025 13:53
 Operator :
 Sample : Bitkisel yag_dil_2
 Misc :
 ALS Vial : 2 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST14.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - DCM_04.e

k#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	21.851	0.40	C:\Database\NIST14.L 2-Decenal, (E)- 2-Undecenal Cyclopropane, 1-(1,2-dimethylpropyl)-1-methyl-2-nonyl-	7	46.591 0.54	C:\Database\NIST14.L 10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester 9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester 9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester
2	23.050	0.32	C:\Database\NIST14.L 2,4-Decadienal, (E,E)- 2,4-Decadienal, (E,E)- 2,4-Decadienal, (E,E)-	8	46.727 2.43	C:\Database\NIST14.L 8-Octadecenoic acid, methyl ester 9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester 9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-
3	23.875	0.62	C:\Database\NIST14.L 2,4-Decadienal, (E,E)- 2,4-Decadienal 2,4-Nonadienal	9	47.993 78.06	C:\Database\NIST14.L HPMSMS_LiqIn...EVECI_SCAN.M Tue May 06 16:05:47 2025 6-Octadecenoic acid 6-Octadecenoic acid, (Z)- Oleic Acid
4	37.599	0.55	C:\Database\NIST14.L 1-((1S,3aR,4R,7S,7aS)-4-Hydroxy-7-isopropyl-4-methyloctahydro-1H-inden-1-yl)ethanone 7-Acetyl-2-hydroxy-2-methyl-5-isopropylbicyclo[4.3.0]nonane N-[1-Adamantyl]aziridine	10	48.177 2.08	C:\Database\NIST14.L Oleic Acid cis-Vaccenic acid trans-13-Octadecenoic acid
5	42.351	0.65	C:\Database\NIST14.L Hexadecanoic acid, methyl ester Hexadecanoic acid, methyl ester Hexadecanoic acid, methyl ester	11	48.329 8.14	C:\Database\NIST14.L Octadecanoic acid Oleic Acid Oleic Acid
6	43.412	6.21	C:\Database\NIST14.L n-Hexadecanoic acid n-Hexadecanoic acid n-Hexadecanoic acid			144272 000057-11-4 99 142071 000112-80-1 87 142072 000112-80-1 84