

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL OLARAK ÜRETİLEN POLİMER ENDÜSTRİSİ KATKISI
ORGANİK SIVILARDA RENK GİDERİMİ İÇİN OZON VE FARKLI
ADSORBAN KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre SARI

Kimya Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yunus ÖNAL

MART 2026

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL OLARAK ÜRETİLEN POLİMER ENDÜSTRİSİ KATKISI
ORGANİK SIVILARDA RENK GİDERİMİ İÇİN OZON VE FARKLI
ADSORBAN KULLANIMI

YÜKSEK LİSANS

EMRE SARI
(36223613939)

Kimya Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç Dr. Yunus ÖNAL

MART 2026

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**Endüstriyel Olarak Üretilen Polimer Endüstrisi Katkısı Organik Sıvılarda
Renk Giderimi İçin Ozon Ve Farklı Adsorban Kullanımı**

Tezi Hazırlayan: Emre SARI
Yüksek Lisans Tezi

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Yunus Önal'a,

Desteğini esirgemeyen hayat arkadaşına ,

4,5 yıldır görev yaptığım işyerim Plastay Kimya A.Ş'ye,

Her sorunumda bana yardımcı olan İnönü Üniversitesi'ne

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Endüstriyel Olarak Üretilen Polimer Endüstrisi Katkısı Organik Sıvılarda Renk Giderimi İçin Ozon Ve Farklı Adsorban Kullanımı”başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Emre SARI

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL VE KURAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. Plastikleştirici Kavramı ve Endüstriyel Önemi	3
2.2. Plastikleştirici Çeşitleri	4
2.2.1. Dioctyl Terephthalate (DOTP) ve özellikleri	4
2.2.2. Dioctyl Adipate (DOA) ve özellikleri	6
2.2.3. Dioctyl Phthalate (DOP) ve özellikleri.....	8
2.2.4. Trioctyl Trimellitate (TOTM) ve özellikleri	10
2.2.5. Diisononyl Phthalate (DINP) ve özellikleri	12
2.2.6. Plastikleştirici seçim kriterleri ve karşılaştırmalı değerlendirme	14
2.3. Ozon ve Aktif Karbonun Kimyasal Özellikleri	17
2.4. Endüstriyel Üretim Süreçlerinde Renklenme Sorunu.....	18
2.5. Ozonlama Yöntemi	19
2.6. Adsorpsiyon Yöntemi ve Farklı Adsorbanlar	21
2.7. Ozonlama ve Adsorpsiyonun Kombinasyonu	22
2.8. Çevresel ve Endüstriyel Perspektif	23
2.9. Literatür Araştırmaları	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Kullanılan Malzemeler	26
3.1.1 D.O.T.P. (Di-oktil teraftalat)	26
3.1.2. Aktif karbon.....	27
3.1.3. Ozon	27
3.2. Kullanılan cihazlar.....	28
3.3. DeneySEL Yöntem.....	29
3.3.1 DOTP numunelerin hazırlanması	29
3.3.2. Numunelerin adsorpsiyonu.....	29
3.3.3. Numunelerin filtrasyonu.....	30
3.3.4. Numunelerin ozonlanması.....	31
3.4. DOTP numunelerin renk giderilmesinde kullanılan test cihazları	31
3.4.1 Renk analizi (Pt-Co / Hazen Yöntemi).....	31
3.4.2. Asit değeri analizi.....	32
3.4.3 FTIR analizi.....	32
3.4.4 Gaz kromatografisi (GC) analizi	33
4. BULGULAR	34
4.1 Renk analiz bulguları	34

4.1.1 Aktif karbon uygulaması	34
4.1.2 Ozonlama uygulaması	35
4.1.3 Kombine (ozon+aktif karbon) uygulama	37
4.1.4 FTIR analizi	38
4.1.5 Gaz kromatografisi (GC) analizleri	39
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	44
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	52



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: Plastifiyanların özelliklerine göre karşılaştırılması	16
Çizelge 3.1: Kullanılan malzemeler ve kullanım amacı	26
Çizelge 3.2. DOTP numunelerine uygulanacak aktif karbon miktarları	29
Çizelge 4.1: DOTP numunelerinin aktif karbon uygulaması sonrası renk değişimleri.	34
Çizelge 4.2: DOTP numunelerinin ozon uygulaması sonrası renk değişimleri.	35
Çizelge 4.3 DOTP numunelerinin Kombine (ozon+aktif karbon) uygulaması sonrası renk değişimleri	37



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Plastikleştirici kavramı ve endüstrideki yeri	4
Şekil 2.2: DOTP'nin kimyasal yapısı.....	5
Şekil 2.3: DOA'nın kimyasal yapısı	7
Şekil 2.4: DOP'un kimyasal yapısı	9
Şekil 2.5: TOTM'nin kimyasal yapısı.....	10
Şekil 2.6: DINP'nin kimyasal yapısı.....	13
Şekil 2.7: Farklı renklerde üretilen DOTP numuneleri.....	18
Şekil 2.5: Ozonlama süresine bağlı renk giderimi.	20
Şekil 3.1: İki farklı renklenme sorunu olan DOTP	26
Şekil 3.2: Aktif karbon	27
Şekil 3.3: Ozon Jenaratörü	28
Şekil 3.3: DOTP numunelerinin aktif karbon ile homojen karıştırılması	30
Şekil 3.5: Lovibond renk ölçüm cihazı	31
Şekil 3.6: Brand marka titrasyon cihazı	32
Şekil 3.7: Bruker Alpha II FTIR cihazı.....	32
Şekil 3.8: Scion 436 marka Gaz Kromatografisi	33
Şekil 4.1: 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi ve sonrası DOTP numunelerine ait FTIR spektrumları	38
Şekil 4.2: PTA bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi ve sonrası DOTP numunelerine ait FTIR spektrumları	39
Şekil 4.3: 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi DOTP numunesine ait GC analizi	40
Şekil 4.4: 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmanın ozonlama sonrası DOTP numunesine ait GC analizi	41
Şekil 4.3: PTA bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi DOTP numunesine ait GC analizi	42
Şekil 4.3: PTA bazlı renk bozulmanın ozonlama sonrası DOTP numunesine ait GC analizi	43

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

PVC	: Polivinil Klorür
2-EH	: 2 Etilheksanol
DOTP	: Di-oktil Teraftalat
DOA	: Di-oktil Adipat
DOP	: Di-oktil Ftalat
TOTM	: Tri-oktil Trimellitat
DINP	: Di-isononil Ftalat
PET	: Polietilen Teraftalat
DEHP	: Di-etilheksil Ftalat
DEP	: Di-etil Ftalat
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GC	: Gaz Kromatografisi

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ENDÜSTRİYEL OLARAK ÜRETİLEN POLİMER ENDÜSTRİSİ KATKISI ORGANİK
SIVILARDA RENK GİDERİMİ İÇİN OZON VE FARKLI ADSORBAN KULLANIMI

Emre SARI

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Anabilim Dalı

52+XII sayfa

2026

Danışman: Doç. Dr. Yunus ÖNAL

Plastikleştirici üretiminde renk, ürünün kalitesini ve hangi sektörlerde kullanılacağını belirleyen en temel teknik ölçüttür. Uluslararası standartlarda plastikleştiriciler için kabul edilen en yüksek renk değerinin 30 Hazen (APHA) olması, bu sorunun endüstriyel ölçekte çözülmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışma; özellikle 2-Etil Heksanol (2-EH) ve Saf Tereftalik Asit (PTA) gibi kritik hammaddelerin kullanımıyla üretilen plastikleştiricilerde karşılaşılan istenmeyen renklenme sorununu kapsamlı bir şekilde incelemektedir.

Hammadde tedarik zincirindeki kalite farklılıkları, depolama koşulları ve üretim esnasındaki ısı değişimlerinin tetiklediği bu sorunu gidermek amacıyla, oksitleme ve adsorpsiyon yöntemlerinin bir arada kullanımı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, güçlü bir oksitleyici olan ozon (O_3) gazı, renk oluşturan bileşiklerin kimyasal bağlarını parçalayarak yapılarını bozmak amacıyla kullanılmıştır. Eş zamanlı olarak, yüksek yüzey alanı ve adsorpsiyon özelliğiyle bilinen aktif karbon, bu parçalanmış atıkların ve diğer kalıntıların ortamdaki uzaklaştırılması için sisteme dahil edilmiştir. Deneysel süreçte, sabit ozonlama süresi altında farklı aktif karbon miktarlarının etkisi ve bu iki yöntemin beraber kullanıldığı hibrit süreçlerin renk giderme verimliliği analiz edilmiştir.

Elde edilen veriler; ozonlama veya aktif karbonun tek başına uygulandığında renk gidermede sınırlı kaldığını, ancak bu iki yöntemin birleştirildiği sistemlerin çok daha yüksek bir saflaştırma performansı sergilediğini kanıtlamaktadır. Sonuç olarak bu çalışma, endüstriyel plastikleştirici üretiminde hedeflenen kalite standartlarını yakalamak için uygulanabilir, verimli ve optimize edilmiş bir yöntem olarak ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: polimer, renk giderimi, ozon, aktif karbon, adsorpsiyon

ABSTRACT

Master Thesis

COLOR REMOVAL OF INDUSTRIALLY PRODUCED ORGANIC LIQUID POLYMER ADDITIVES USING OZONE AND VARIOUS ADSORBENTS

Emre SARI

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of
Department of Chemistry

52+XII pages

2026

Supervisor: Doç. Dr. Yunus ÖNAL

In plasticizer production, color is the most fundamental technical criterion determining the product's quality and the sectors in which it will be used. Since the highest acceptable color value for plasticizers under international standards is 30 Hazen (APHA), this necessitates a solution to this problem on an industrial scale. This study comprehensively examines the undesirable discoloration problem encountered in plasticizers produced using critical raw materials such as 2-Ethylhexanol (2-EH) and Pure Terephthalic Acid (PTA).

To address this issue, triggered by quality variations in the raw material supply chain, storage conditions, and thermal changes during production, the combined use of oxidation and adsorption methods was investigated. Within the scope of the study, ozone (O_3) gas, a strong oxidizing agent, was used to break the chemical bonds of color-forming compounds and disrupt their structures. Concurrently, activated carbon known for its high surface area and adsorption properties was incorporated into the system to remove these broken-down waste products and other residues from the environment. During the experimental process, the effect of varying amounts of activated carbon under a fixed ozonation duration, as well as the color removal efficiency of hybrid processes combining these two methods, was analyzed.

The data obtained demonstrate that while ozonation or activated carbon alone yields limited color removal, systems combining these two methods exhibit significantly higher purification performance. Consequently, this study presents a feasible, efficient, and optimized method for achieving the targeted quality standards in industrial plasticizer production.

Keywords: polymer, color removal, ozone, activated carbon, adsorption

1. GİRİŞ

Plastik malzemeler, günümüz endüstriyel üretim süreçlerinde en yaygın kullanılan hammaddelerden biridir (Çolak, Özsin ve Türkmen, 2024). Hafiflik, dayanıklılık, esneklik ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle ambalaj sanayisinden otomotive, tıptan inşaat sektörüne kadar pek çok alanda kullanılmaktadır (Gözaçan, 2023). Bu geniş kullanım alanının arkasında plastiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştiren katkı maddeleri bulunmaktadır (Paslı, 2022). Bu katkılar arasında en önemli rolü üstlenenlerden biri plastikleştiricilerdir (İşçi, 2023). Plastikleştiriciler, polimer zincirleri arasındaki ikincil bağları zayıflatarak malzemeye esneklik ve işlenebilirlik kazandıran düşük molekül ağırlıklı organik bileşiklerdir (Boyoğlu, 2009). Özellikle polivinil klorür (PVC) gibi sert ve kırılğan polimerlerin işlevselliğini artırmak için plastikleştirici katkılar zorunludur (Zeynelgil, 2024).

Endüstride uzun yıllar boyunca en çok tercih edilen plastikleştiriciler ftalat esaslı bileşikler olmuştur (Evcı, 2022). Bununla birlikte, ftalatların insan sağlığı ve çevre üzerinde yarattığı olumsuz etkiler, alternatif plastikleştiricilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır (Yıldıztekin, Erkekoğlu ve Gümüşel, 2017). Bu bağlamda öne çıkan malzemelerden biri Dioctyl Terephthalate (DOTP)'dir. DOTP, ftalat içermeyen bir plastikleştirici olarak düşük toksisiteye sahip olup, PVC ile yüksek uyumluluk göstermekte ve iyi mekanik özellikler sağlamaktadır. Bu nedenle son yıllarda endüstriyel üretimde ftalatların yerine yaygın olarak tercih edilmektedir (Altun ve Fellah, 2022).

Plastikleştiricilerin endüstriyel üretiminde karşılaşılan önemli sorunlardan biri renklenme olgusudur (Pfaff, 2021). Üretim sırasında kullanılan hammaddeler, katalizör kalıntıları, proses koşulları veya çevresel faktörler ürünün rengini etkileyebilmekte ve istenmeyen görsel farklılıklar ortaya çıkarabilmektedir (Ercan, 2019). Renk, yalnızca estetik bir unsur değil, ürünün saflık derecesi ve kalite algısıyla da ilişkilidir (Gürül, 2019). Bu nedenle renk giderimi, plastikleştirici üretiminde kritik kalite kontrol aşamalarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Renk giderimi için literatürde farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında ozonlama ve adsorpsiyon en etkili ve yaygın kullanılan teknikler arasında yer almaktadır (Namal, 2017). Ozon, güçlü bir oksidant olarak

organik moleküllerin yapısında parçalanmalara neden olmakta ve renkli bileşenlerin kimyasal yapısını bozarak renksiz ürünlere dönüşmesini sağlamaktadır (Eren ve Anış, 2006). Adsorpsiyon yöntemi ise yüzeyi yüksek gözenekliliğe sahip malzemelerin (örneğin aktif karbon) kullanımıyla, renkli bileşiklerin fiziksel veya kimyasal etkileşimlerle yüzeye bağlanması esasına dayanmaktadır (de Oliveira vd., 2011). Her iki yöntemin de ayrı ayrı etkinliği kanıtlanmış olmakla birlikte, ozonlama ile adsorpsiyonun birlikte veya ardışık uygulanması sinerjik bir etki yaratabilmekte, bu sayede renk giderim verimliliği artırılabilir.

Bu çalışma, endüstride yaygın kullanılan plastikleştiricilerden biri olan DOTP'nin üretiminde karşılaşılan renklenme sorununa odaklanmaktadır. Çalışmada, renk giderimi amacıyla ozonlama, aktif karbon adsorpsiyonu ve bu iki yöntemin kombinasyonu laboratuvar ölçeğinde uygulanmıştır. Deneysel süreçte farklı ozonlama süreleri ve farklı aktif karbon dozajları denenmiş, renk ölçümleri uluslararası standartlara uygun cihazlarla yapılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, hem tek başına ozonlamanın hem de adsorpsiyonun etkinliği test edilmiş, ayrıca iki yöntemin birlikte uygulanmasının sağlayabileceği sinerjik etkiler değerlendirilmiştir.

Araştırmanın temel amacı, endüstriyel plastikleştiricilerde karşılaşılan renklenme problemini çözmeye yönelik alternatif bir yöntem geliştirmek ve ozon ile farklı adsorbanların renk giderimindeki potansiyelini ortaya koymaktır. Çalışma, endüstride yaygın kullanılan fakat literatürde sınırlı olarak incelenmiş olan DOTP üzerine odaklanması açısından önem taşımaktadır. Elde edilen sonuçların, plastikleştirici üretiminde kalite kontrol süreçlerine katkı sağlaması, çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir üretim yaklaşımına zemin hazırlaması ve ileride yapılacak araştırmalara yol göstermesi beklenmektedir.

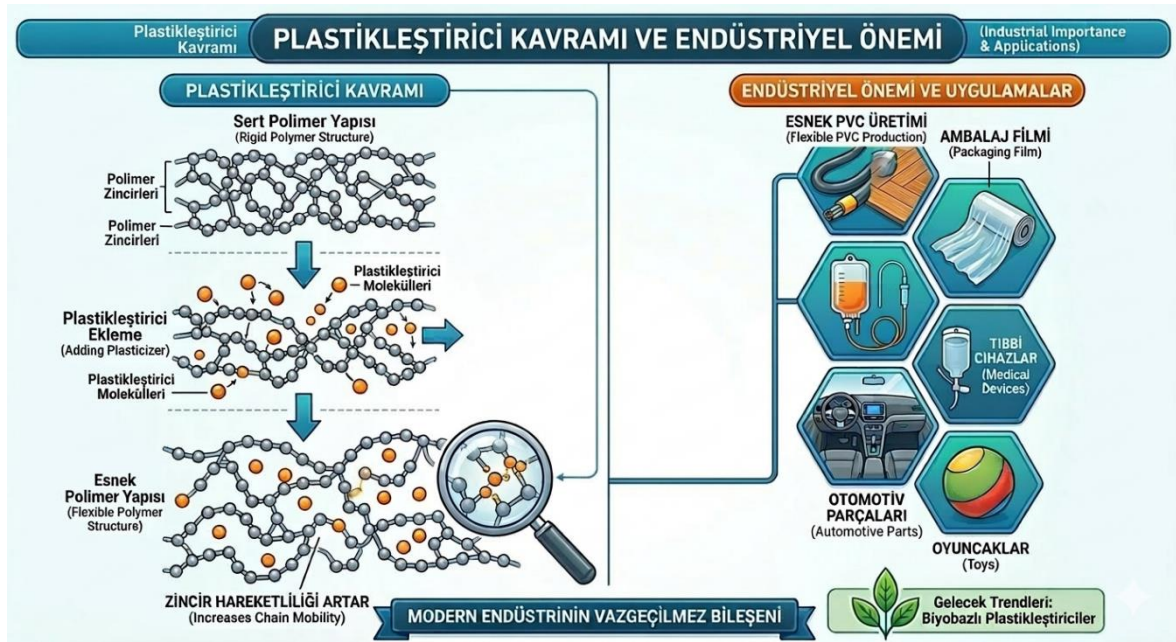
2. KAVRAMSAL VE KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Plastikleştirici Kavramı ve Endüstriyel Önemi

Plastikleştiriciler, polimerlerin fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan katkı maddeleri olarak tanımlanmaktadır. Bu bileşikler, polimer zincirleri arasındaki ikincil etkileşimleri zayıflatarak zincir hareketliliğini artırmakta ve böylece sert ve kırılğan yapıdaki polimerlere esneklik, yumuşaklık ve işlenebilirlik kazandırmaktadır. Özellikle polivinil klorür (PVC) gibi camsı geçiş sıcaklığı yüksek olan polimerlerde plastikleştirici kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Plastikleştirici ilavesi ile PVC gibi polimerlerin sertliği azaltılmakta, elastikiyet sınırı genişletilmekte ve çeşitli endüstriyel uygulamalara uygun hale getirilmektedir (Altun ve Fellah, 2022).

Endüstride kullanılan plastikleştiriciler kimyasal yapılarına göre farklı gruplara ayrılmaktadır (Godwin, 2024). En yaygın grup ftalat esaslı plastikleştiriciler olmakla birlikte, bunların çevresel ve toksikolojik açıdan oluşturduğu riskler nedeniyle ftalat dışı alternatiflerin kullanımı giderek artmaktadır. Adipatlar, trimellititler, fosfat esterleri ve sitrat türevleri bu alternatif gruplar arasında yer almaktadır. Ayrıca, biyobazlı hammaddelerden üretilen çevre dostu plastikleştiriciler de son yıllarda önem kazanmaktadır. Bu çeşitlilik, plastikleştirici pazarında hem fonksiyonel gereklilikleri hem de çevresel beklentileri karşılamak amacıyla geniş bir yelpazede ürün bulunmasını sağlamaktadır (Schwendt, 2021).

Plastikleştiricilerin endüstriyel önemi, yalnızca polimerlerin mekanik özelliklerini değiştirmeleriyle sınırlı kalmamaktadır. Bu katkılar aynı zamanda ürünlerin dayanıklılığını artırmakta, işlenebilirliklerini geliştirmekte ve kullanım ömürlerini uzatmaktadır (Rahman ve Brazel, 2004). Elektrik kabloları, zemin kaplamaları, otomotiv parçaları, tıbbi cihazlar ve gıda ambalajları gibi birçok alanda plastikleştirici katkılı polimerler tercih edilmektedir. Dolayısıyla plastikleştirici kullanımı, modern endüstriyel üretim süreçlerinde vazgeçilmez bir unsur olarak görülmektedir (Jamarani vd., 2018).



Şekil 2.1: Plastikleştirici kavramı ve endüstrideki yeri

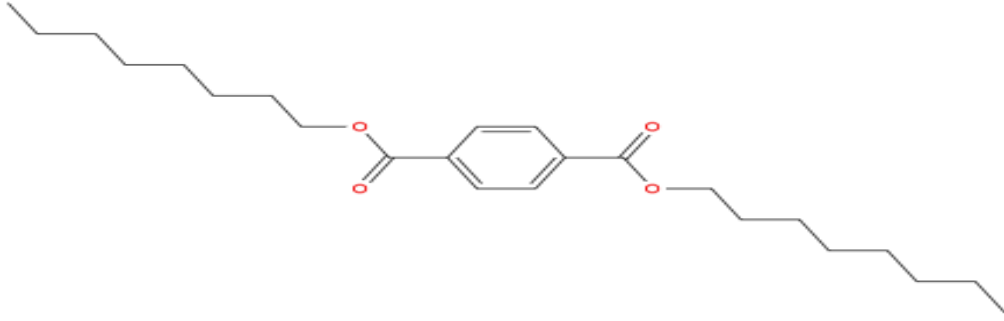
2.2. Plastikleştirici Çeşitleri

2.2.1. Dioctyl Terephthalate (DOTP) ve özellikleri

Dioctyl Terephthalate (DOTP), endüstriyel ölçekte ftalat içermeyen plastikleştiriciler arasında öne çıkan ve günümüzde yaygın olarak kullanılan bir katkı maddesi olarak tanımlanmaktadır. DOTP, tereftalik asit ile 2-Etilheksanol arasındaki esterleşme reaksiyonu sonucunda elde edilmekte ve ftalat esaslı plastikleştiricilere alternatif olarak değerlendirilmektedir. Moleküler yapısı itibarıyla aromatik tereftalat grubuna dahil olan DOTP, düşük uçuculuk, yüksek termal kararlılık ve polimer zincirleriyle güçlü uyum özellikleri göstermektedir (Altun ve Fellah, 2022). Bu özellikleri, DOTP'nin özellikle PVC bazlı ürünlerde tercih edilmesine neden olmaktadır.

DOTP'nin üretiminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Doğrudan esterifikasyon yöntemi, tereftalik asidin 2-Etilheksanol ile yüksek sıcaklık (180–270 °C) ve basınç altında uygun katalizörler yardımıyla reaksiyona sokulmasına dayanmaktadır (Altun ve Fellah, 2022). Transesterifikasyon yönteminde ise dimetil tereftalat (DMT), 2-Etilheksanol ile reaksiyona sokulmakta ve yan ürün olarak metanol açığa çıkmaktadır. Literatürde ayrıca atık polietilen tereftalat (PET) ürünlerinin 2-Etilheksanol ile alkoliz reaksiyonuna sokulması yoluyla DOTP üretimi de rapor edilmektedir. Bu yöntem, atıkların yeniden değerlendirilmesine

olarak tanımakta ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Çeşitli çalışmalarda, uygun katalizör ve reaksiyon koşulları kullanıldığında %90'ın üzerinde verim ve yüksek saflıkta DOTP elde edildiği bildirilmektedir (Zhou vd., 2019).



Şekil 2.2: DOTP'nin kimyasal yapısı

DOTP'nin endüstriyel uygulamalardaki önemi oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. PVC esaslı kaplama malzemeleri, kablo yalıtımları, otomotiv iç aksamaları, zemin döşemeleri, medikal cihazlar, oyuncaklar ve gıda ile temas eden ambalajlar DOTP kullanım alanları arasında yer almaktadır (European Chemicals Agency, 2023). DOTP ile plastikleştirilmiş PVC ürünlerinde mekanik dayanımın yüksek olduğu, migrasyon eğiliminin düşük seviyede bulunduğu ve termal kararlılığın artırıldığı literatürde ifade edilmektedir. Bu özellikler, DOTP'nin yalnızca performans açısından değil, aynı zamanda güvenlik kriterleri bakımından da tercih edilmesine neden olmaktadır. Özellikle düşük ekstraksiyon değerleri, DOTP'yi sağlık sektöründe ve çocuk ürünlerinde kullanılmaya uygun hale getirmektedir (Kawakami vd., 2011).

DOTP, çevresel ve toksikolojik açıdan ftalat esaslı plastikleştiricilere kıyasla daha güvenli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Ftalat türevlerinin biyolojik sistemlerde endokrin bozucu etki gösterdiği ve sucul ekosistemlerde kalıcı kirleticiler olarak davranabildiği

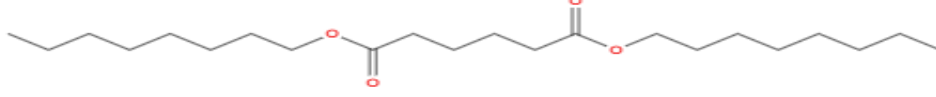
literatürde vurgulanmaktadır. DOTP ise benzer kimyasal yapıya sahip olmasına rağmen, ester bağlarının daha kararlı yapısı ve parçalanma ürünlerinin daha düşük toksisite göstermesi nedeniyle çevresel açıdan daha avantajlı bir konumda bulunmaktadır. Bu özellik, DOTP'nin özellikle Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri gibi regülasyonların sıkı olduğu bölgelerde tercih edilmesine zemin hazırlamaktadır (Altun ve Fellah, 2022).

DOTP ile plastikleştirilmiş polimer ürünler, migrasyon ve ekstraksiyon testlerinde diğer ftalatlarla kıyasla daha düşük değerler sergilemektedir. Bu durum, DOTP'nin polimer matrisine daha güçlü bağlanma eğiliminde olduğunu göstermekte ve ürünlerin uzun süreli kullanımında katkı maddesi kayıplarını azaltmaktadır. Ayrıca DOTP'nin düşük uçuculuğu, yüksek sıcaklıklarda bile stabil kalmasını sağlamak ve termal dayanıklılık gerektiren uygulamalarda avantaj sunmaktadır. Literatürde DOTP ile hazırlanan PVC ürünlerinin şeffaflık, mekanik dayanım ve elastikiyet özellikleri bakımından üstün performans sergilediği belirtilmektedir (Chen vd., 2024).

DOTP'nin bir diğer önemli yönü, geri dönüşüm süreçlerine uyum sağlayabilmesidir. Atık PET ürünlerinden DOTP sentezlenebilmesi, bu malzemenin hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek olarak değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Shariati vd., 2025). Bu sayede hem plastik atıklarının azaltılması hem de yüksek değerli ürünlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Böyle bir üretim yaklaşımı, döngüsel ekonomi prensipleri ile uyumlu olmakta ve endüstriyel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır.

2.2.2. Dioctyl Adipate (DOA) ve özellikleri

Dioctyl Adipate (DOA), kimyasal formülü $C_{22}H_{42}O_4$ olan ve adipik asit ile 2-Etilheksanolün esterifikasyonu sonucu elde edilen lineer zincirli bir plastikleştiricidir. DOA, özellikle düşük sıcaklıklarda esneklik sağlayan yapısı nedeniyle polivinil klorür (PVC) ve benzeri termoplastik polimerlerde ikinci plastikleştirici olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Molekülün uzun alifatik zincirleri, polimer zincirleri arasındaki Van der Waals etkileşimlerini zayıflatarak esneklik ve elastikiyet kazandırmakta; bu sayede ürünün işlenebilirliği ve darbe dayanımı artmaktadır. DOA, uçuculuk ve ekstraksiyon eğilimi bakımından ftalat esaslı plastikleştiricilere göre daha düşük değerlere sahip olduğundan, özellikle gıda ambalajları ve tıbbi malzemeler gibi insan teması gerektiren alanlarda tercih edilmektedir (Üreten ve Üçüncü, 2013).



Şekil 2.3: DOA'nın kimyasal yapısı

Endüstriyel uygulamalarda DOA, PVC filmler, kablo yalıtımları, oyuncaklar, tıbbi tüpler ve özellikle düşük sıcaklıkta esneklik gerektiren dış ortam uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Dioktil adipatın en belirgin avantajı, düşük sıcaklıklarda bile esnekliğini koruyabilmesi ve camsı geçiş sıcaklığını önemli ölçüde düşürmesidir. Bu nedenle özellikle buzdolabı contaları, dış cephe kaplamaları ve soğuk iklimlerde kullanılan kablo izolasyonları gibi uygulamalarda yüksek performans göstermektedir. Bununla birlikte DOA, kimyasal olarak kararlı bir bileşik olmasına rağmen çevreye karıştığında biyolojik sistemlerde parçalanabilir özellik göstermektedir (Üçüncü vd., 2010).

DOA'nın çevresel ve biyolojik etkileri üzerine yapılan çalışmalarda, sucul ekosistemler üzerindeki potansiyel toksik etkileri vurgulanmıştır. Üreten ve Üçüncü (2013) tarafından yürütülen araştırmada, *Sparus aurata* (çipura) balıkları 15 gün süreyle 250, 500 ve 750 ppm DOA çözeltilerine maruz bırakılmış ve bu süre sonunda karaciğer ve solungaç dokularında belirgin histopatolojik değişimler gözlenmiştir. Çalışmada özellikle solungaç dokularında vakuolizasyon, merkezi venada genişleme, epitel hücrelerinde hiperplazi ve mukus hücrelerinde hipertrofi tespit edilmiştir. Benzer biçimde karaciğer dokusunda yağlanma (steatoz), nekroz ve fibrozis gibi hücresel düzeyde bozulmalar ortaya çıkmış; DOA konsantrasyonu arttıkça bu etkilerin şiddetinin de belirgin biçimde yükseldiği rapor

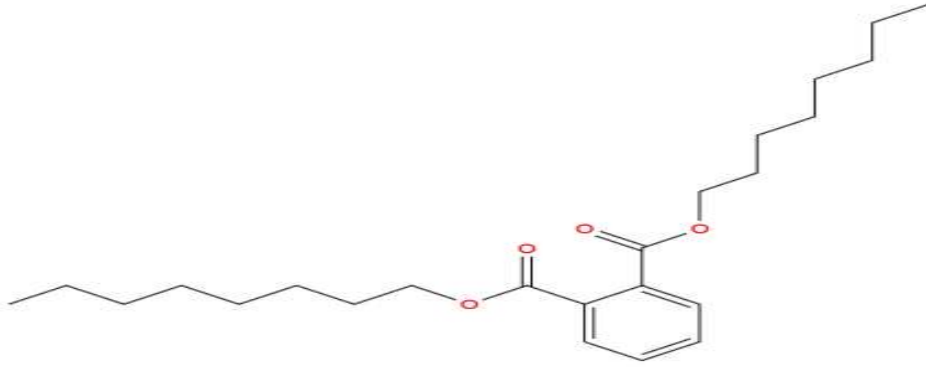
edilmiştir. Bulgular, DOA maruziyetinin solunum, ozmoregülasyon ve metabolik faaliyetlerde ciddi bozulmalara yol açabileceğini göstermiştir (Üreten ve Üçüncü, 2013).

DOA'nın özellikle karaciğer hücrelerinde gözlenen yağlanma ve doku deformasyonları, bileşiğin metabolik sistem üzerinde stres yaratan bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırmada DOA'nın su ortamında düşük çözünürlüğe sahip olmasına rağmen canlı dokularında birikim eğilimi gösterdiği, bu nedenle biyokümülatif özellik taşıyabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca hepatopankreas dokusunda görülen morfolojik değişimlerin, sindirim enzimleri ile endokrin fonksiyonların da olumsuz yönde etkilendiğini göstermesi açısından önemli olduğu belirtilmiştir. Çalışmada DOA'nın deniz ekosisteminde toksik bir bileşik olarak değerlendirilmesi gerektiği ve uzun süreli maruziyetlerin hem çevre hem de insan sağlığı açısından risk oluşturabileceği sonucuna varılmıştır (Üreten ve Üçüncü, 2013).

Plastik üretim süreçlerinde DOA'nın yaygın kullanımı, özellikle polimer zincirleri arasında yüksek hareket kabiliyeti sağlaması ve mekanik özellikleri iyileştirmesiyle ilişkilidir. Ancak bu katkı maddesinin zamanla yüzeyden migrasyon yoluyla dış ortama geçebilmesi, hem gıda güvenliği hem de ekotoksikolojik açıdan önemli bir problem oluşturmaktadır. DOA, gıda ile temas eden ambalajlarda düşük seviyelerde migrasyon gösterse de uzun süreli depolama koşullarında, özellikle yüksek sıcaklıklarda, bu geçişin artabileceği bildirilmiştir. Bu nedenle son yıllarda ftalat dışı plastikleştiriciler arasında dahi DOA'nın çevresel riskleri tartışılmakta ve alternatif biyobazlı plastikleştiricilere yönelim hız kazanmaktadır (Oh vd., 2024).

2.2.3. Dioctyl Phthalate (DOP) ve özellikleri

Dioctyl Phthalate (DOP), kimyasal formülü $C_{24}H_{38}O_4$ olan, ftalik asit ile 2-Etilheksanolün esterifikasyonu sonucunda elde edilen yüksek verimli bir plastikleştiricidir. DOP, uzun yıllardır polivinil klorür (PVC) ve benzeri termoplastik sistemlerde en yaygın kullanılan katkı maddelerinden biridir. Kimyasal olarak saydam, renksiz ve hafif viskoz bir sıvı olan DOP, polimer zincirleri arasındaki etkileşimleri azaltarak PVC'nin camsı geçiş sıcaklığını düşürür ve malzemenin esnekliğini arttırmaktadır. Bu sayede DOP katkılı PVC ürünleri daha yumuşak, elastik ve işlenebilir hale gelmektedir. Aynı zamanda iyi bir elektrik yalıtkanı olması nedeniyle kablo yalıtımı, vinyl döşeme, ambalaj filmi ve otomotiv iç aksamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir (Tomaszewska vd., 2021).



Şekil 2.4: DOP'un kimyasal yapısı

Başboğa ve arkadaşlarının (2017) geri dönüştürülmüş PVC (r-PVC) kompozitler üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, DOP miktarının ve dolgu maddesi oranının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi kapsamlı biçimde incelenmiştir. Çalışmada her 100 gram PVC için 15 ve 30 gram DOP kullanılmış, kompozit numuneler enjeksiyon ve pres kalıplama yöntemleriyle üretilmiştir. Bulgulara göre DOP miktarının artması, PVC matrisinde daha yüksek esneklik ve darbe dayanımı sağlamış, buna karşılık çekme ve eğilme mukavemetlerinde düşüşe neden olmuştur. Bu sonuç, DOP'un polimer zincirleri arasındaki kohezyon kuvvetini zayıflatarak zincir hareketliliğini artırmasından kaynaklanmaktadır. Böylece ürün daha yumuşak ve elastik hale gelirken, mukavemet değerlerinde azalma gözlenmiştir (Başboğa vd., 2017).

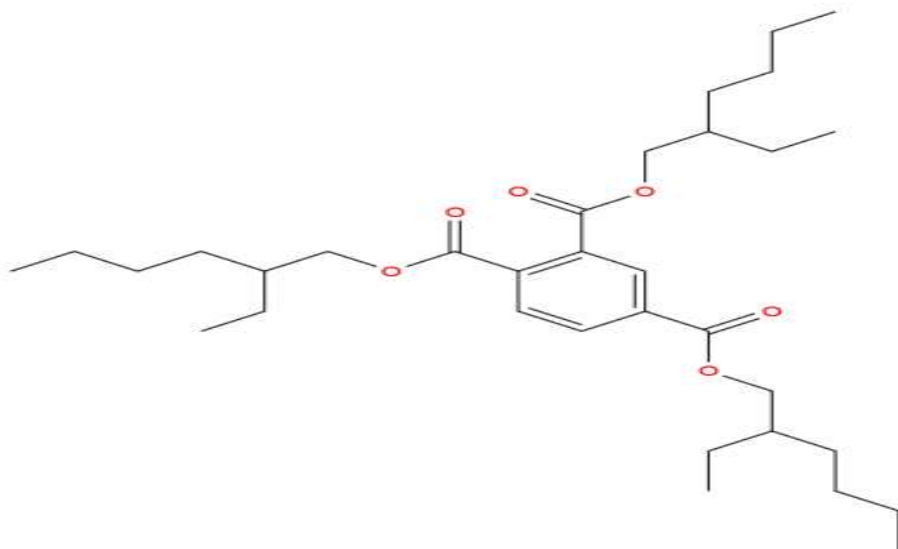
DOP katkısının malzemenin yüzey sertliği üzerindeki etkileri de bulunmaktadır. Araştırmada Shore D sertlik değerlerinin DOP oranı arttıkça düştüğü belirlenmiştir. Bu durum, DOP'un plastifikasyon kapasitesinin doğrudan kanıtı niteliğindedir; yüksek oranda DOP içeren numuneler düşük sertlik, yüksek darbe direnci ve uzama değerleri göstermiştir. Özellikle enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen numuneler, vida mekanizması sayesinde daha homojen karışım elde edildiğinden pres kalıplama ile üretilenlere kıyasla daha iyi mekanik performans sergilemiştir. Çalışma, üretim yönteminin ve plastikleştirici miktarının malzeme özellikleri üzerinde birbirini etkileyen parametreler olduğunu göstermiştir (Başboğa vd., 2017).

DOP'un PVC sistemlerindeki etkisi yalnızca mekanik değil, aynı zamanda termal ve reolojik davranışları da kapsamaktadır. DOP, PVC'nin viskozitesini düşürerek işlenebilirliği artırır ve üretim sırasında enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ancak uzun süreli kullanımlarda DOP'un polimer matrisinden dış ortama migrasyonu görülebilir. Bu durum, özellikle gıda ambalajı ve çocuk oyuncakları gibi insan teması içeren ürünlerde sağlık açısından risk oluşturur. Bu nedenle DOP, ftalat grubu plastikleştiriciler içinde çevresel ve toksikolojik açıdan en çok tartışılan bileşiklerden biridir. Avrupa Birliği tarafından 2005 yılından itibaren çocuk oyuncakları ve tıbbi malzemelerde kullanımı sınırlandırılmış, birçok endüstriyel üretici daha çevre dostu alternatiflere yönelmiştir (Liu, 2022).

Yine de DOP, maliyet etkinliği, yüksek plastifikasyon kapasitesi ve PVC ile kimyasal uyumluluğu sayesinde hâlen geniş bir kullanım alanına sahiptir. Geri dönüştürülmüş PVC'nin yeniden işlenmesi sürecinde DOP, polimerin zincir yapısını stabilize ederek malzemenin ikinci kez işlenebilirliğini artırmaktadır. Başboğa ve ekibinin çalışmasında, 30% DOP içeren enjeksiyon kalıplı numunelerin en yüksek uzama ve darbe dayanımına ulaştığı rapor edilmiştir. Bu durum, DOP'un hem birincil hem de ikincil üretim süreçlerinde etkili bir yumuşatıcı rol üstlendiğini göstermektedir (Başboğa vd., 2017).

2.2.4. Trioctyl Trimellitate (TOTM) ve özellikleri

Trioctyl Trimellitate (TOTM), kimyasal formülü $C_{33}H_{54}O_6$ olan, trimellitik asidin üç adet 2-Etilheksanol molekülüyle esterleşmesi sonucu oluşan yüksek moleküler ağırlıklı bir plastikleştiricidir.



Şekil 2.5: TOTM'nin kimyasal yapısı

Molekül yapısındaki üç ester bağı ve dallanmış uzun alkil zincirleri, TOTM'ye olağanüstü termal kararlılık, düşük uçuculuk ve üstün migrasyon direnci kazandırmaktadır. Bu özellikleri sayesinde TOTM, özellikle tıbbi malzemeler, kablo izolasyonları, otomotiv iç aksamaları ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir katkı maddesidir. Polivinil klorür (PVC) ile yüksek uyumluluk gösteren TOTM, ftalat içermeyen bir plastikleştirici olarak çevresel açıdan da görece daha güvenli kabul edilmektedir (Manurung vd., 2024).

Lai ve çalışma arkadaşları (2012), TOTM'nin PVC filmlerindeki difüzyon davranışını ATR-FTIR spektroskopisiyle incelemişlerdir. 25 °C, 40 °C ve 70 °C sıcaklıklarında yapılan deneylerde TOTM'nin karbonil (C=O) gruplarının zamanla gösterdiği yapısal değişimler detaylı olarak analiz edilmiştir. Araştırma, TOTM moleküllerinde üç farklı karbonil yapısının bulunduğunu ortaya koymuştur: serbest C=O grupları, TOTM molekülleri arasındaki dipol-dipol etkileşimlerinden kaynaklanan kümelenmiş C=O grupları ve PVC'nin klor atomlarıyla etkileşen C=O grupları. Bu üç yapı arasındaki oran, sıcaklık ve zaman faktörlerine bağlı olarak dinamik bir denge oluşturmaktadır. Çalışmanın bulgularına göre TOTM'nin PVC içindeki difüzyon katsayısı sıcaklık arttıkça yükselmekte, ancak denge konsantrasyonu azalmaktadır. Bunun nedeni, yüksek sıcaklıklarda moleküller arası hareketin artmasıyla TOTM'nin PVC matrisinde daha az tutulabilmesidir (Lai vd., 2012).

Araştırmada, 25 °C sıcaklıkta TOTM'nin serbest C=O gruplarının PVC'nin C-Cl gruplarıyla güçlü dipolar etkileşimler kurduğu, bu nedenle plastikleştiricinin film içinde daha kararlı bir şekilde tutulduğu belirlenmiştir. Buna karşılık 40 °C'de kümelenmiş C=O yapıların etkileşimi daha belirgin hale gelmiş, 70 °C'de ise serbest, kümelenmiş ve etkileşen gruplar arasındaki denge çok daha hızlı bir şekilde oluşmuştur. Bu gözlem, yüksek sıcaklıklarda TOTM'nin hızlı bir şekilde dengeye ulaşsa da PVC içinde kararlı bir şekilde kalma oranının azaldığını göstermektedir. Bu durum, yüksek sıcaklıkta TOTM'nin polimer matrisinden dışarı migrasyonunun artmasıyla açıklanmaktadır. Ayrıca 43,1 kJ/mol olarak hesaplanan aktivasyon enerjisi, TOTM difüzyonunun sıcaklıkla doğrudan ilişkili olduğunu ve moleküler hareketin ısı enerjisiyle duyarlı olduğunu göstermektedir (Lai vd., 2012).

FTIR analizleri, TOTM'nin karbonil gruplarındaki dalga sayısı değişimlerinin (1739, 1728 ve 1720 cm⁻¹ bölgelerinde) PVC ile etkileşim derecesini yansıttığını göstermektedir.

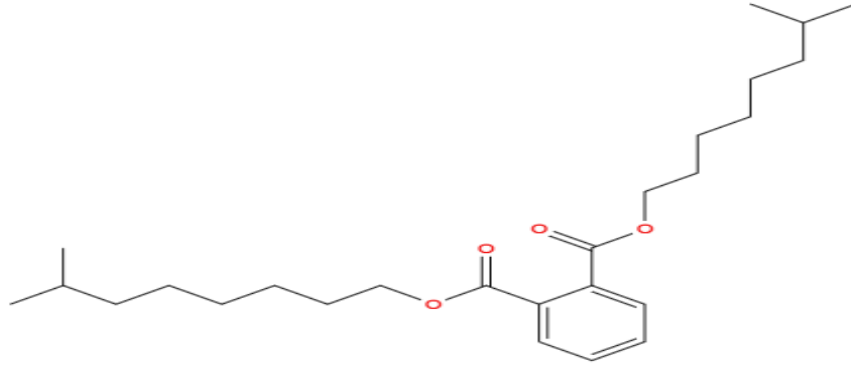
Özellikle 1720 cm^{-1} civarındaki yeni pik, TOTM ve PVC arasında gerçekleşen dipolar etkileşimin doğrudan bir kanıtı olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgu, TOTM'nin plastikleştirici olarak PVC zincirleri arasında fiziksel bağlayıcı bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. TOTM'nin üçlü ester yapısının her bir kolu farklı etkileşimlere katılabilmekte, böylece polimer matris içinde çok yönlü bir bağlanma ağı oluşturmaktadır. Bu bağlanma yapısı, TOTM'nin yüksek sıcaklıklarda bile düşük volatilite göstermesinin temel nedenlerinden biri olarak açıklanmıştır (Lai vd., 2012).

TOTM, ftalat türevi plastikleştiricilere kıyasla düşük difüzyon hızına ve yüksek termal kararlılığa sahip olduğundan, özellikle uzun ömürlü PVC ürünlerinde kullanılmaktadır. Yüksek molekül ağırlığı, polimer zincirleri arasındaki boşluklara daha sınırlı şekilde nüfuz etmesini sağlamakta ve migrasyon oranını düşürmektedir. Bu nedenle TOTM, medikal cihazlarda ve gıda ambalajlarında güvenli bir alternatif olarak değerlendirilmiştir (Qadeer vd., 2024).

Kimyasal yapısı gereği yüksek kararlılık, düşük uçuculuk ve sınırlı migrasyon özellikleri sunan modern bir plastikleştiricidir. PVC ile etkileşimi esas olarak karbonil ve klor grupları arasındaki dipolar çekimlere dayanmakta, bu sayede uzun süreli mekanik dayanım ve termal stabilite sağlamaktadır. TOTM'nin çevresel dayanıklılığı ve toksikolojik olarak düşük risk profili, onu özellikle ftalat içermeyen formülasyonlarda ön plana çıkarmaktadır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda artan difüzyon eğilimi, kullanım koşullarına göre dikkatli optimizasyon gerektirmektedir. Bu yönüyle TOTM, sürdürülebilir plastikleştirme stratejilerinde önemli bir geçiş malzemesi olarak değerlendirilmektedir.

2.2.5. Diisononyl Phthalate (DINP) ve özellikleri

Diisononyl Phthalate (DINP), kimyasal formülü $\text{C}_{26}\text{H}_{42}\text{O}_4$ olan ve ftalik asit ile izononil alkollerin esterleşmesi sonucu oluşan, yüksek moleküler ağırlıklı bir plastikleştiricidir. Yapısındaki dallanmış alkil zincirleri sayesinde düşük uçuculuk, yüksek termal stabilite ve düşük migrasyon özellikleri göstermektedir. DINP, mekanik dayanım ve esneklik arasında denge sağlayabilen, ftalat grubuna ait modern bir plastikleştirici olarak kabul edilmektedir. Özellikle polivinil klorür (PVC) esaslı ürünlerde uzun ömür, yüksek sıcaklık dayanımı ve düşük ekstraksiyon eğilimi sağlaması nedeniyle kablo kaplamaları, zemin döşemeleri, otomotiv parçaları ve oyuncak sanayinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (McKee vd., 2002).



Şekil 2.6: DINP'nin kimyasal yapısı

İşçi (2023) tarafından yürütülen çalışmada, polietilen tereftalat (PET) materyallerle ambalajlanan içeceklerdeki plastikleştirici migrasyon seviyeleri incelenmiştir. Çalışma, DINP'nin gıda temas yüzeylerinden ortama geçiş dinamiklerini ve bu sürecin sıcaklık ile depolama koşullarına bağlı değişimini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, DINP'nin yüksek sıcaklık ve uzun süreli depolama koşullarında migrasyon eğiliminin arttığını, düşük sıcaklıklarda ise stabil kaldığını göstermiştir. Bu sonuç, DINP'nin moleküler yapısındaki dallanmanın polimer zincirleri arasındaki boşluklarda güçlü fiziksel tutunma oluşturmaya rağmen, ısı enerjisiyle bu bağların zayıflayabileceğini göstermektedir. Çalışmada ayrıca PET ambalajlardan içecek ortamına geçen DINP miktarının uluslararası gıda güvenliği limitlerinin altında kaldığı belirtilmiştir (İşçi, 2023).

DINP'nin polimer matrislerdeki davranışı, moleküller arası etkileşim gücüne ve difüzyon katsayısına bağlıdır. Bu plastikleştirici, DOP gibi daha kısa zincirli ftalatlara kıyasla daha yavaş difüze olur, ancak uzun zincir yapısı sayesinde polimer içerisinde daha homojen bir dağılım sağlamaktadır. Bu durum, özellikle dış ortama geçiş oranını düşürmekte ve uzun süreli kullanımlarda plastikleştiricinin polimer içinde tutulmasına yardımcı olmaktadır. Ancak yüksek sıcaklıklarda artan moleküler hareket, DINP'nin yüzeye doğru göçünü hızlandırabilmektedir. Bu özellik, hem gıda ambalajı hem de oyuncak üretiminde kullanılan PVC sistemlerinde dikkatle değerlendirilmesi gereken bir parametredir. İşçi'nin

alışmasında da benzer şekilde, 40 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda DINP migrasyonunun belirgin biçimde arttığı rapor edilmiştir (İşçi, 2023).

DINP, kimyasal stabilitesi ve düşük toksisite profili nedeniyle Avrupa Birliği'nin 2000'li yılların ortasından itibaren belirli uygulamalarda DOP'un yerine önerdiği bir plastikleştirici olmuştur. Avrupa Kimyasallar Ajansı (ECHA) tarafından yapılan toksikolojik değerlendirmeler, DINP'nin diğer ftalatlarla göre daha düşük endokrin bozucu potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, özellikle gıda ambalajı ve çocuk ürünlerinde kullanımında belirli sınırlandırmalar uygulanmakta, migrasyon testleri düzenli olarak yapılmaktadır. İşçi'nin tezinde de belirtildiği üzere, DINP'nin gıda güvenliği açısından değerlendirilmesi, hem migrasyon miktarının hem de maruz kalma süresinin dikkate alınmasıyla yapılmalıdır. Bu değerlendirme, sürdürülebilir plastikleştirici seçimi açısından değerlendirilmektedir (Lee ve Choi, 2024).

DINP'nin polimer sistemlerindeki performansını belirleyen en önemli özelliklerinden biri, yüksek moleküler ağırlığına bağlı olarak düşük volatilite göstermesidir. DINP katkılı PVC ürünlerinin uzun süre boyunca esnekliklerini korumalarını sağlamaktadır. Ayrıca DINP, ışık ve oksijen varlığında oksidatif bozunmaya karşı dirençlidir ve termal kararlılığı DOP'a göre daha yüksektir. Bu avantajları sayesinde DINP, hem teknik hem de çevresel açıdan güvenilir bir plastikleştirici olarak değerlendirilmektedir. Ancak yüksek sıcaklık altında uzun süreli depolama koşullarında migrasyon eğiliminin tamamen ortadan kalkmadığı, özellikle yağlı gıda ortamlarında çözünürlüğünün arttığı bilinmektedir. Bu nedenle DINP içeren ambalaj malzemelerinin kullanımında, temas eden gıda türü ve depolama sıcaklığı gibi değişkenlerin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Magalhães, 2021).

2.2.6. Plastikleştirici seçim kriterleri ve karşılaştırmalı değerlendirme

Plastikleştirici seçimi, polimer endüstrisinde hem ürün performansını hem de çevresel sürdürülebilirliği doğrudan etkileyen çok boyutlu bir süreçtir. Uygun plastikleştiricinin belirlenmesi; polimerin kimyasal yapısı, kullanım koşulları, hedeflenen mekanik özellikler ve insan sağlığına etkiler gibi çeşitli kriterlerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Literatürde yapılan araştırmalar, plastikleştirici performansının yalnızca esneklik kazandırma gücüyle değil, polimer matris ile kurduğu moleküler etkileşim derecesiyle de belirlendiğini ortaya koymaktadır (Rahman ve Brazel, 2004).

Plastikleştirici seçiminde ilk kriter polimer uyumluluğudur. Polivinil klorür (PVC) gibi polar karakterli polimerlerde karbonil gruplarıyla dipol-dipol etkileşimi kurabilen ester yapılı plastikleştiriciler yüksek uyumluluk sergiler. DOP ve DINP gibi ftalat esaslı plastikleştiriciler, bu etkileşim gücü sayesinde PVC'ye üstün bir plastifikasyon etkisi kazandırırılar; ancak bu bileşiklerin çevresel toksisiteleri ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri kullanım alanlarını sınırlamıştır. Buna karşın DOTP, DOA ve TOTM gibi ftalat dışı plastikleştiriciler, PVC ile benzer kimyasal uyumluluk gösterirken daha düşük toksisite ve migrasyon eğilimi sunmaları nedeniyle modern üretim süreçlerinde tercih edilmektedir (Jarray vd., 2016).

İkinci önemli kriter termal ve kimyasal kararlılıktır. Plastikleştirici, polimerin işlenme sıcaklıklarında bozunmadan kalabilmeli ve uzun süreli kullanımlarda kimyasal bütünlüğünü koruyabilmelidir. DOP ve DINP orta düzeyde termal stabilite gösterirken, TOTM ve DOA daha yüksek sıcaklıklarda dahi yapısal kararlılıklarını sürdürebilmektedir. TOTM'nin üçlü ester yapısı, yüksek moleküler ağırlığı ve düşük buhar basıncı, migrasyon ve uçuculuğa karşı direncini belirgin biçimde artırmaktadır. Bu özellik, özellikle tıbbi cihazlar, yüksek sıcaklıkta çalışan kablo sistemleri ve otomotiv malzemeleri için ideal bir kullanım sağlamaktadır (Rahman ve Brazel, 2004).

Üçüncü kriter olan migrasyon ve uçuculuk direnci, plastikleştiricinin çevresel ve sağlık açısından güvenliğini belirleyen temel faktörlerden biridir. DINP ve TOTM gibi yüksek moleküler ağırlıklı bileşikler, PVC zincirleri arasındaki boşluklara sıkı bir şekilde tutunarak migrasyon hızını düşürürken; DOP gibi daha küçük moleküllu ftalatlar, zamanla yüzeye göç etme eğilimi göstermektedir. İşçi'nin (2023) alışmasında da vurgulandığı üzere, plastikleştirici migrasyonu depolama süresi ve sıcaklıkla doğrudan ilişkilidir; bu nedenle düşük difüzyon katsayısına sahip bileşiklerin tercih edilmesi gıda güvenliği açısından önem taşımaktadır (Rahman ve Brazel, 2004).

Mekanik performans da plastikleştirici seçiminde belirleyici bir parametredir. DOP yüksek esneklik kazandırmakla birlikte, malzemenin çekme ve eğilme mukavemetinde azalmaya neden olmaktadır. DOA ve DOTP, düşük sıcaklıklarda dahi yüksek elastikiyet sağlarken mekanik dayanım açısından dengeli sonuçlar vermektedir. Başboğa ve çalışma arkadaşlarının (2017) araştırması, DOP oranının artmasının malzemenin darbe dayanımını yükseltmesine rağmen sertlik değerlerini düşürdüğünü ortaya koymuştur. Bu bulgu, plastikleştirici miktarı ile mekanik performans arasındaki ters orantıyı açıkça göstermektedir.

Son olarak çevresel ve toksikolojik uygunluk, modern plastik endüstrisinin en kritik seçim ölçütü haline gelmiştir. Geleneksel ftalat esaslı plastikleştiricilerin ekotoksik etkileri ve biyobirikim potansiyelleri, uluslararası düzenleyici kurumların bu bileşiklerin kullanımını kısıtlamasına yol açmıştır. DOP, birçok ülkede tıbbi ürünlerde ve çocuk oyuncaklarında yasaklanırken; DINP ve DOTP sınırlı kullanıma tabi tutulmuştur. Buna karşılık DOA ve TOTM, daha düşük toksisite profili ve biyolojik bozunabilirlik potansiyeliyle sürdürülebilir alternatifler arasında yer almaktadır (Bekki vd., 2024).

Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, DOP yüksek plastifikasyon gücüyle öne çıkarken çevresel riskleri nedeniyle sınırlanmıştır; DINP ise daha kararlı ve düşük toksisiteli bir alternatiftir ancak yüksek sıcaklıklarda migrasyon eğilimi gösterebilmektedir. DOA, düşük sıcaklık koşullarında esneklik ve düşük uçuculuk avantajı sunarken TOTM, yüksek sıcaklıkta kullanım için en uygun bileşik olarak öne çıkmaktadır. DOTP ise ftalat içermeyen yapısıyla hem çevresel hem de mekanik açıdan dengeli bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla plastikleştirici seçimi, yalnızca teknik gereksinimlere değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, insan sağlığı ve yasal düzenlemelere de bağlı çok boyutlu bir karardır.

Çizelge 2.1: Plastifiyanların özelliklerine göre karşılaştırılması (Zattini, G.,2013)

Özellik	DOP	DOTP	DINP	TOTM	DOA
Molekül Ağırlığı (g/mol)	390.6	390.6	418.6	546.8	344.5
Uçuculuk (Volatility)	Orta	Düşük	Düşük	Çok Düşük	Yüksek
Migrasyon Direnci	Orta	İyi	İyi	Çok İyi	Zayıf
Soğuk Direnci (T_g düşürme)	İyi	İyi	Orta	Orta	Mükemmel
Elektriksel Yalıtım	İyi	Çok İyi	İyi	Mükemmel	Orta
Genel Kullanım Amacı	Genel	Genel (Eko)	Genel	Yüksek Isı	Gıda/Soğuk

2.3. Ozon ve Aktif Karbonun Kimyasal Özellikleri

Ozon (O_3), üç oksijen atomundan oluşan yüksek oksidasyon potansiyeline sahip bir allotroptur. Oksijen molekülünün (O_2) elektriksel boşalım veya ultraviyole ışın etkisiyle parçalanarak tekil oksijen atomlarına ayrılması ve bu atomların yeniden birleşmesiyle oluşur. Standart koşullarda renksiz, keskin kokulu bir gaz olan ozon, güçlü bir oksitleyici ve dezenfektan özellik göstermektedir. Oksidasyon potansiyeli 2,07 V olan ozon, klor (1,36 V) ve hidrojen peroksitten (1,78 V) daha yüksek bir oksidasyon gücüne sahiptir ve bu özelliği sayesinde hem organik hem de inorganik kirleticilerin parçalanmasında etkili bir kimyasaldır (Xantheas vd., 1991).

Endüstriyel uygulamalarda ozon genellikle su arıtma, hava dezenfeksiyonu ve renk giderim işlemlerinde kullanılmaktadır. Özellikle organik boyar maddelerin gideriminde ozon, çift bağ içeren kromofor gruplarına saldırarak bu bağları kırar ve molekülün renk veren yapısını ortadan kaldırmaktadır. Bu mekanizma genellikle “ozonoliz” olarak adlandırılır ve aromatik halka içeren maddelerde oksijenli ara ürünlerin (aldehit, keton veya karboksilik asit) oluşumuna yol açmaktadır. Ozonlama süreci, ortamın pH'ına, sıcaklığına, çözülmüş organik madde miktarına ve temas süresine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Asidik ortamda doğrudan oksidasyon baskınken, bazik koşullarda ozon suyla reaksiyona girerek hidroksil radikalleri ($\bullet OH$) oluşturmaktadır. Bu radikallerin oksidasyon potansiyeli 2,8 V'a kadar çıkar ve reaksiyonun hızını arttırmaktadır. Dolayısıyla, ozon yalnızca doğrudan değil, dolaylı yoldan da oksidasyon sağlayarak renk giderimi verimini yükseltmektedir (Tripathi ve Hussain, 2022).

Aktif karbon ise yüksek yüzey alanı (500–1500 m^2/g) ve mikrogözenekli yapısı sayesinde organik ve inorganik kirleticilerin adsorpsiyonu için en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Genellikle odun, kömür, hindistan cevizi kabuğu veya sentetik karbon kaynaklarının yüksek sıcaklıkta (800–1000 $^{\circ}C$) aktiflenmesiyle üretilmektedir. Aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesi, yüzey alanı, gözenek hacmi, gözenek dağılımı ve yüzey kimyasına bağlıdır. Mikrogözenekler (<2 nm) özellikle düşük molekül ağırlıklı maddelerin tutulmasında etkilidirken, mezogözenekler (2–50 nm) daha büyük organik bileşiklerin adsorpsiyonuna katkıda bulunmaktadır. Yüzeyde bulunan oksijenli fonksiyonel gruplar (karboksil, hidroksil, karbonil vb.), adsorbe edilecek madde ile hidrojen bağı veya Van der Waals kuvvetleri aracılığıyla etkileşime girer ve fiziksel adsorpsiyonun etkinliğini artırır (Jeirani, 2017).

Renk giderimi süreçlerinde aktif karbon, ozonlama gibi oksidatif yöntemlerle kombine edildiğinde sinerjik etki oluşturmaktadır. Ozon, organik maddeleri daha küçük ve daha polar bileşiklere dönüştürürken; aktif karbon bu ara ürünleri yüzeyine adsorbe ederek sistemin genel verimini yükseltir. Bu kombinasyon özellikle endüstriyel atık suların arıtımında, boya ve plastik üretim tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca aktif karbon, ozonlama sırasında oluşabilecek toksik ara ürünleri de uzaklaştırarak hem su kalitesini artırmakta hem de çevresel riski azaltmaktadır. Bu nedenle ozon ve aktif karbon birlikte kullanıldığında kimyasal oksidasyon ile fiziksel adsorpsiyon mekanizmaları bir arada işleyerek daha yüksek renk giderim oranı sağlamaktadır (Zou, 2015).

Ozon ve aktif karbonun bu şekilde birlikte kullanımı, plastikleştirici üretimi gibi organik madde yoğun ortamlarda da etkin bir renk giderimi sağlamaktadır. Plastikleştirici üretiminde kullanılan ftalat, adipat ve tereftalat türevleri gibi bileşikler üretim sırasında renkli yan ürünler oluşturabilmektedir. Ozon bu bileşikleri okside ederek parçalar, aktif karbon ise oluşan küçük molekülleri yüzeyine bağlamaktadır. Böylelikle hem renk giderimi sağlanmakta hem de çözeltinin optik özellikleri iyileştirilmektedir.

2.4. Endüstriyel Üretim Süreçlerinde Renklenme Sorunu

Endüstriyel üretim süreçlerinde ortaya çıkan en önemli kalite problemlerinden biri renklenme olgusu olarak tanımlanmaktadır (Ercan, 2019). Plastikleştiriciler başta olmak üzere birçok kimyasal üründe üretim aşamasında istenmeyen renk farklılıkları oluşabilmektedir. Renklenme, ürünün yalnızca estetik görünümünü etkilememekte, saflık derecesi, stabilite düzeyi ve müşteri nezdindeki kalite algısı üzerinde belirleyici bir unsur oluşturmaktadır. Bu nedenle renk giderimi, endüstriyel üretimlerde önemli bir kalite kontrol aşaması olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 2.7: Farklı renklerde üretilen DOTP numuneleri

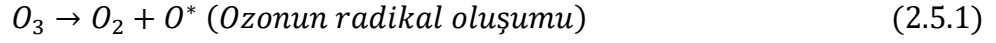
Renklenmeye yol açan faktörler çeşitli kimyasal ve fiziksel süreçlerle ilişkilendirilmektedir. Kullanılan hammaddelerin safsızlık içeriği, üretimde kullanılan katalizörlerin kalıntıları, proses sıcaklığı, reaksiyon süresi ve yan ürünlerin varlığı renk farklılıklarının başlıca kaynaklarını oluşturmaktadır. Ayrıca depolama koşulları, oksidatif bozunma ve çevresel etkenler de ürünün zamanla renklenmesine neden olabilmektedir. Özellikle DOTP gibi ester yapılı plastikleştiricilerde, üretim sırasında meydana gelen yan reaksiyonlar ve oksidatif süreçler renk oluşumunu hızlandırabilmektedir (Ak, 2011).

Renk, endüstride yalnızca görsel bir özellik olarak değil, kalite göstergesi olarak da kabul edilmektedir. Rengin değişmesi, ürünün kimyasal yapısında meydana gelen bozulmaların veya safsızlıkların varlığının dolaylı bir işareti olarak yorumlanmaktadır. Bu nedenle renk ölçümleri, uluslararası standartlara uygun cihazlar ile yapılmakta ve ürün kalitesinin sürekliliği bu ölçümler aracılığıyla kontrol edilmektedir. Ölçümlerde kullanılan sistemler, objektif ve tekrarlanabilir sonuçlar elde etmeye olanak tanımakta ve endüstriyel kalite yönetiminde temel araçlar arasında yer almaktadır (Ünal, 2023).

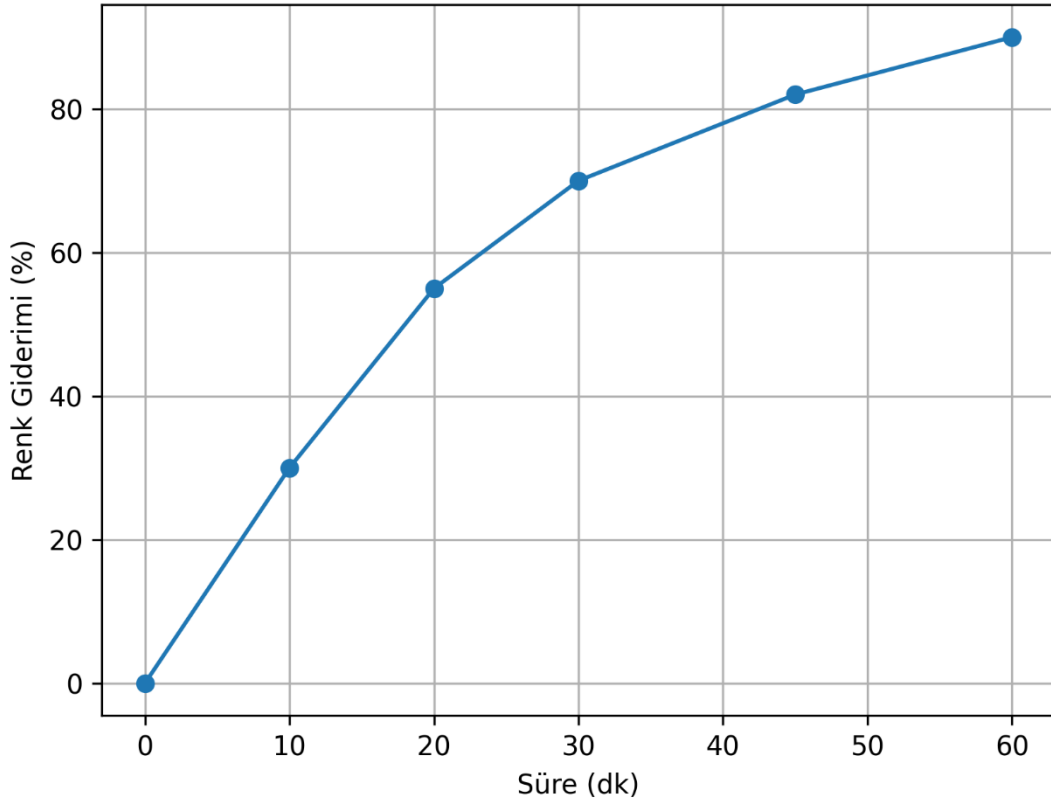
Endüstriyel üretimlerde renk giderimi amacıyla çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Filtrasyon, çözücü ekstraksiyonu, kimyasal oksidasyon ve adsorpsiyon gibi yöntemler renkli safsızlıkların ortadan kaldırılmasında kullanılmaktadır. Bununla birlikte her yöntemin kendine özgü sınırlılıkları bulunmaktadır. Örneğin, filtrasyon düşük molekül ağırlıklı renkli bileşikler uzaklaştırmada yetersiz kalabilmekte, çözücü ekstraksiyonu ise maliyet ve çevresel açıdan sürdürülebilirlik sorunları doğurabilmektedir (Kaçar, 2013). Bu bağlamda ozonlama ve adsorpsiyon yöntemleri, hem yüksek etkinlikleri hem de uygulanabilirlikleri nedeniyle öne çıkan alternatifler olarak değerlendirilmektedir.

2.5. Ozonlama Yöntemi

Ozonlama, güçlü oksidasyon kapasitesine sahip olan ozon gazının kimyasal veya biyolojik olarak parçalanması güç olan organik ve inorganik bileşiklerin gideriminde kullanılan ileri arıtım yöntemlerinden biri olarak tanımlanmaktadır (Karaarslan, 2012). Ozon (O_3), oksijenin yüksek enerjili formlarından biri olup, serbest radikaller oluşturarak organik moleküllerin yapısında dönüşümlere neden olmaktadır (Karabulut ve Gülay, 2016). Bu özellik, özellikle kromofor grupları içeren renkli bileşiklerin parçalanmasını kolaylaştırmakta ve renk gideriminde yüksek verimlilik sağlamaktadır.



Ozonlama işlemi sırasında ozon, doğrudan hedef bileşiklerle reaksiyona girebilmekte ya da sudaki hidroksit iyonları ile etkileşime girerek hidroksil radikalleri oluşturmaktadır. Bu radikaller, oksidasyon potansiyeli açısından ozondan daha güçlü olup, organik moleküllerin kısa sürede parçalanmasına neden olmaktadır. Böylece ozonlama, hem doğrudan hem de dolaylı oksidasyon mekanizmaları ile etkin bir arıtım sağlamaktadır. Bu özellik, ozonlamayı özellikle boyar madde içeren endüstriyel atıksuların ve yüksek safsızlık içeren kimyasal çözeltilerin arıtımında öne çıkan bir yöntem haline getirmektedir (Völker ve ark., 2019).



Şekil 2.5: Ozonlama süresine bağlı renk giderimi (Author, 2023).

Endüstriyel uygulamalarda ozonlama yönteminin avantajları arasında yüksek oksidasyon gücü, hızlı etki, ek kimyasal madde gerektirmemesi ve mikroorganizmaların çoğalmasını engellemesi yer almaktadır (Brodowska vd., 2018). Bununla birlikte, ozonun kısa yarı ömrü

ve hızlı bozunması, sürekli üretim gerekliliğini doğurmaktadır. Ayrıca yüksek dozlarda ozon kullanımı maliyetleri artırmakta ve prosesin ekonomik sürdürülebilirliği üzerinde sınırlılık oluşturmaktadır. Bu nedenle ozonlama, çoğu zaman başka yöntemlerle birlikte kullanılarak daha etkin ve dengeli sonuçlar elde edilmektedir (Sırma, 2021).

Ozonlamanın plastikleştiriciler ve ftalat türevleri üzerindeki etkileri de literatürde incelenmektedir. Yapılan çalışmalarda, ozonun özellikle di-etilheksil ftalat (DEHP) ve dietil ftalat (DEP) gibi ester yapıdaki bileşiklerin parçalanmasında etkili olduğu ve su ortamında bu bileşiklerin konsantrasyonlarını önemli ölçüde azalttığı gösterilmektedir (de Oliveira ve ark., 2011). Bu bulgular, ozonlamanın yalnızca renk giderimi değil, aynı zamanda toksikolojik açıdan risk taşıyan plastikleştirici kalıntılarının gideriminde de kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

2.6. Adsorpsiyon Yöntemi ve Farklı Adsorbanlar

Adsorpsiyon, sıvı veya gaz fazda bulunan kirleticilerin, yüksek yüzey alanına sahip katı malzemelerin yüzeyine tutunması esasına dayanan bir arıtım yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Fil ve Elgün, 2022). Bu süreç, Van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağları, iyon değişimi veya kovalent bağlanma gibi fiziksel ve kimyasal etkileşimler aracılığıyla gerçekleşmektedir. Adsorpsiyon, düşük maliyeti, basit uygulanabilirliği ve yüksek etkinliği nedeniyle endüstriyel ölçekte yaygın olarak tercih edilmektedir (Karaduman, 2022).

Endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan adsorban malzeme aktif karbon olarak öne çıkmaktadır. Aktif karbon, yüksek poroziteye ve geniş yüzey alanına sahip olması sayesinde düşük konsantrasyondaki organik ve inorganik bileşiklerin etkin şekilde uzaklaştırılmasını sağlamaktadır (Sharma vd., 2022). Mikrogözenekli yapısı, farklı boyutlardaki moleküllerin tutulmasına olanak tanımakta ve bu özellik adsorpsiyonu renk giderimi için güçlü bir yöntem haline getirmektedir. Aktif karbon kullanımıyla özellikle boyar maddeler, fenolik bileşikler ve plastikleştirici türevleri gibi organik kirleticiler yüksek verimle uzaklaştırılmaktadır (Mu'azu vd., 2017).

Aktif karbonun yanı sıra zeolitler, kil mineralleri, biyokömürler, reçineler ve nanomalzemeler de alternatif adsorbanlar arasında yer almaktadır (Rammal vd., 2025). Zeolitler, iyon değişim kapasitesi ve düzenli gözenek yapısı sayesinde özellikle amonyum ve ağır metal gideriminde kullanılmaktadır. Biyokömürler, tarımsal ve organik atıklardan üretilmekte olup sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. Ayrıca son yıllarda grafen

oksit, manyetik nanopartiküller ve hibrit kompozitler gibi nanomalzemeler de adsorpsiyon kapasitesi yüksek alternatifler olarak geliştirilmektedir. Bu çeşitlilik, adsorpsiyon yönteminin farklı endüstriyel koşullara uyarlanabilirliğini artırmaktadır.

Plastikleştirici bileşiklerin giderimi açısından da adsorpsiyon etkin bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Yapılan çalışmalarda, di-etil ftalat (DEP) ve di-etilheksil ftalat (DEHP) gibi ftalat esterlerinin aktif karbon ve diğer gözenekli malzemeler yardımıyla yüksek verimle uzaklaştırılabildiği gösterilmektedir (Amiri vd., 2023). Bu bulgular, adsorpsiyonun yalnızca boyar maddeler için değil, plastikleştirici kaynaklı renklenme ve toksik organik kirleticilerin kontrolü için de kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

2.7. Ozonlama ve Adsorpsiyonun Kombinasyonu

Ozonlama ve adsorpsiyon, tek başına yüksek verimlilik sağlayabilen iki yöntem olmakla birlikte, bu yöntemlerin ardışık veya eş zamanlı olarak uygulanması daha etkin sonuçlar ortaya koymaktadır (Beltran vd., 2009). Ozonlama sırasında organik moleküller kısmi olarak okside edilmekte, kompleks yapıdaki kirleticiler daha küçük ve daha kolay adsorbe edilebilir ara ürünlere dönüştürülmektedir. Bu durum, ozonlama ile ön işlem gören sistemlerde adsorpsiyon kapasitesinin artmasına ve daha yüksek renk giderim verimliliği elde edilmesine olanak tanımaktadır (de Oliveira vd., 2011).

Ozon ve aktif karbon kombinasyonu, yalnızca renk gideriminde değil, aynı zamanda toksisite ve biyolojik parçalanabilirlik açısından da avantaj sağlamaktadır. Ozonlama ile parçalanmış yüksek molekül ağırlıklı kirleticiler, aktif karbon yüzeyine daha etkin şekilde bağlanmakta ve böylece hem renkli bileşikler hem de zararlı organik maddeler ortamdaki uzaklaştırılmaktadır. Bu sinerjik etki, ozonlama veya adsorpsiyonun tek başına uygulanmasına kıyasla daha yüksek arıtım performansı sunmaktadır (Völker vd., 2019).

Literatürde, ftalat esterleri gibi plastikleştirici bileşiklerin su ortamından uzaklaştırılmasında ozon ve aktif karbonun birlikte kullanılmasının başarılı sonuçlar verdiği bildirilmektedir. Yapılan çalışmalarda, di-etil ftalatın (DEP) ozon ve aktif karbon kombinasyonu ile yüksek oranda giderildiği, bu süreçte aktif karbonun yalnızca adsorban görevi görmediği, aynı zamanda ozon bozunma ürünleri için katalitik yüzey işlevi üstlendiği vurgulanmaktadır. Böylece kombine yöntem, organik bileşiklerin parçalanma hızını artırmakta ve toplam mineralizasyon derecesini yükseltmektedir (de Oliveira vd., 2011).

2.8. Çevresel ve Endüstriyel Perspektif

Plastikleştiricilerin endüstride yaygın kullanımı, beraberinde çevresel riskleri ve sürdürülebilirlik tartışmalarını gündeme getirmektedir. Özellikle ftalat esaslı plastikleştiriciler, sucul ekosistemlerde kalıcı olmaları ve biyolojik birikim eğilimleri nedeniyle çevre ve insan sağlığı açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Khurshid vd., 2025). Bu bileşikler, endokrin sistem üzerinde bozucu etkilere sahip olabilmekte ve uzun vadede toksikolojik riskler doğurabilmektedir. Dolayısıyla plastikleştiricilerin üretiminde ve kullanımında çevresel sürdürülebilirlik kriterlerinin dikkate alınması gerekmektedir (Raclavská vd., 2018).

DOTP gibi ftalat içermeyen plastikleştiriciler, çevre ve sağlık açısından daha güvenli alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Ester bağlarının daha kararlı yapısı ve parçalanma ürünlerinin düşük toksisite göstermesi, DOTP'nin çevresel risklerini azaltmaktadır (Altun ve Fellah, 2022). Bununla birlikte, DOTP ve benzeri plastikleştiricilerin de üretim süreçlerinde yan ürünler, katalizör kalıntıları ve renklenme sorunları ortaya çıkabilmekte, bu durum ürün kalitesini ve çevresel güvenilirliği doğrudan etkilemektedir (Vanarse vd., 2025). Bu nedenle üretim sonrası arıtım yöntemleri, yalnızca estetik bir gereklilik değil, çevresel sorumluluk açısından da önemli bir durum olarak kabul edilmektedir.

PVC ve türevlerinin uzun vadeli dayanıklılıkları, çevresel açıdan ayrı bir tartışma alanı oluşturmaktadır. PVC malzemeler, güneş ışığı, ısı ve oksidatif süreçlere maruz kaldığında bozunmakta ve yapılarında renklenme, mekanik zayıflama ve toksik yan ürünlerin açığa çıkması gözlenmektedir (Rijavec ve ark., 2020). Bu durum, plastikleştirici katkılı ürünlerin kullanım ömrü boyunca çevresel etkileşimlerinin dikkate alınmasını zorunlu hale getirmektedir.

Endüstriyel açıdan bakıldığında, ozonlama ve adsorpsiyon gibi renk giderim yöntemleri yalnızca ürün kalitesini artırmakla kalmamakta, çevreye salınabilecek zararlı bileşiklerin de azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu tür yöntemlerin üretim süreçlerine entegre edilmesi, sürdürülebilir üretim hedefleriyle uyumlu olmakta ve çevresel yükün hafifletilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, bu yöntemlerin verimli bir şekilde uygulanması, üretim maliyetleri ve rekabet gücü açısından da işletmelere avantaj sağlamaktadır.

2.9. Literatür Araştırmaları

Ozonlama, güçlü oksitleyici özelliği sayesinde renk gideriminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ozon, özellikle konjuge çift bağ içeren organik molekülleri parçalayarak renkli bileşiklerin yapısını bozmakta ve daha küçük moleküllere dönüştürmektedir. Aktif karbon, yüksek yüzey alanı ve gelişmiş gözenek yapısı sayesinde organik bileşiklerin gideriminde etkili bir adsorbent olarak öne çıkmaktadır. Bitkisel yağlar üzerinde yapılan çalışmalarda, aktif karbonun özellikle klorofil ve karotenoid gibi renk verici bileşenlerin uzaklaştırılmasında yüksek verim sağladığı gösterilmiştir. Ozonlama ve aktif karbonun birlikte kullanıldığı hibrit sistemler, renk giderimi açısından daha yüksek performans sunmaktadır. Bu tür sistemlerde ozonlama, büyük ve kompleks yapıdaki renkli molekülleri daha küçük ve daha polar bileşiklere dönüştürmekte, ardından aktif karbon bu bileşikleri adsorbe ederek sistemden uzaklaştırmaktadır. Literatür araştırmalarında ozonlama ve aktif karbonun tek başına kullanıldığı sistemlerin yanı sıra iki yönteminde hibrit olarak kullanıldığı araştırmalar incelenmiştir.

Konsowa ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, tekstil atık suyunda bulunan boyar maddelerin giderimi amacıyla ozonlama ve granüler aktif karbon adsorpsiyonunun birlikte kullanıldığı bir sistem incelenmiştir. Çalışmada ozon konsantrasyonu, pH ve başlangıç boya konsantrasyonunun renk giderim hızı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ozon konsantrasyonu ve pH arttıkça renk giderim hızının arttığını, buna karşılık başlangıç boya konsantrasyonu arttıkça giderim hızının azaldığını göstermiştir. Ayrıca prosesin ilk aşamasında ozonlama ile hızlı bir renk giderimi sağlandığı, ardından uygulanan aktif karbon adsorpsiyonu ile ozonlama sonrası oluşan organik kalıntıların giderildiği belirlenmiştir (Konsowa vd., 2010).

Faria ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, farklı boyar maddeler içeren renkli çözeltilerde ozonlama, aktif karbon adsorpsiyonu ve her iki yöntemin birlikte kullanıldığı sistemler karşılaştırılmıştır. Çalışmada üç farklı prosesin (yalnız adsorpsiyon, yalnız ozonlama ve ozon + aktif karbon) kinetik ve mineralizasyon davranışları incelenmiştir. Sonuçlar, ozon ve aktif karbonun birlikte kullanıldığı sistemde hem renk giderimi hem de organik maddelerin mineralizasyonunun daha etkili gerçekleştiğini göstermiştir (Faria vd., 2005).

Wang ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, içme suyu sistemlerinde ozonlama ve toz aktif karbon adsorpsiyonunun çözünmüş organik madde giderimi üzerindeki etkisi

incelenmiştir. Çalışmada, her iki yöntemin ayrı ayrı ve birlikte uygulanması değerlendirilmiştir. Sonuçlar, ozonlama ve aktif karbonun birlikte uygulanmasının organik madde ve dezenfeksiyon yan ürünleri gideriminde etkili olduğunu göstermiştir (Wang vd., 2017).

Yu ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, içme suyu arıtımında ozonlama ve granüler aktif karbon filtrasyonunun birlikte kullanımı araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, ozonlama sonrası aktif karbon filtrasyonunun organik kirleticilerin ve toksik etkilerin azaltılmasında etkili olduğunu göstermiştir (Yu vd., 2021).

Karwowska ve Sparczyńska tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, ozonlama ve adsorpsiyon proseslerinin birlikte kullanıldığı su arıtım sistemleri incelenmiştir. Çalışma sonuçları, ozonlama işleminin organik maddelerin yapısını değiştirerek adsorpsiyon verimini artırdığını ve prosesler arasında tamamlayıcı bir etki bulunduğunu göstermiştir (Karwowska ve Sparczyńska, 2023).

Muthukumar ve arkadaşları (2004), Acid Red 88 boyar madde içeren tekstil atıksuyunun ozon ile renk ve kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) giderimini araştırmıştır. Çalışmada, ozonlama süresi, tuz konsantrasyonu ve pH değişkenlerinin renk ve COD giderimi üzerindeki etkileri merkezi kompozit tasarım kullanılarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, % renk giderimi ozonlama süresi arttıkça artmakta, tuz konsantrasyonu yükseldiğinde tam dekolorizasyon süresi uzamakta ve optimum renk giderimi pH 3 ve 5 g/l tuz konsantrasyonu şartlarında sağlanmaktadır. COD giderimi ise belirli bir tuz konsantrasyonunda zamanla artmakta, maksimum %64 COD giderimi ise 5 g/l tuz konsantrasyonu ve alkali pH şartlarında elde edilmiştir (Muthukumar vd., 2004).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada renk giderimi deneyleri için temel malzeme olarak endüstriyel plastikleştirici olan DOTP kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda renk farklılıklarını gözlemlemek amacıyla daha önceden ikinci kalite dediğimiz off spek asitten üretilmiş DOTP ve 2-Etilheksanol bazlı renklenme sorunu oluşan numuneler kullanılacaktır. Böylece gerçek proseslerde karşılaşılabilecek renklenme koşulları laboratuvar ortamında modellenmiştir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Çizelge 3.1: Kullanılan malzemeler ve kullanım amacı

Kullanılan malzeme adı	Kullanılma amacı
D.O.T.P.(Dioktil Teraftalat)	Ana madde
AKTİF KARBON	Adsorban
OZON	Oksitleyici ajan

3.1.1 D.O.T.P. (Di-oktil teraftalat)

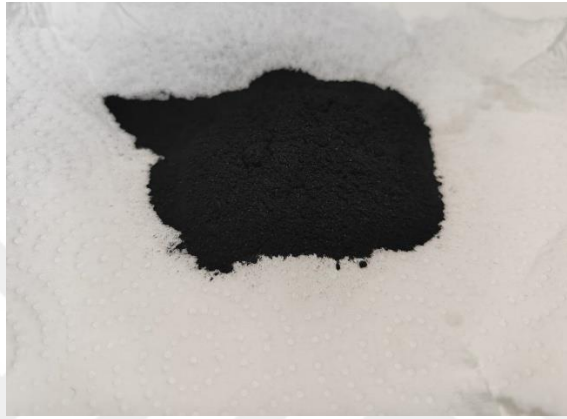
Dioktil tereftalat (DOTP), 2-Etil hekzanol ile saf tereftalik asidin esterleşme reaksiyonu sonucu elde edilen, yaygın olarak kullanılan bir plastikleştiricidir. Bu çalışmada kullanılan DOTP, iki farklı hammadde kaynağından üretilmiş olup, hammadde farklılığına bağlı olarak renklenme problemi göstermektedir.



Şekil 3.1: İki farklı renklenme sorunu olan DOTP

3.1.2. Aktif karbon

Aktif karbon, yüksek özgül yüzey alanı ve gelişmiş gözenek yapısı sayesinde organik bileşiklerin adsorpsiyonunda yaygın olarak kullanılan bir adsorbandır. Bu çalışmada, plastikleştiricilerde renklenmeye neden olan organik bileşiklerin adsorpsiyon yoluyla ortamdan uzaklaştırılması ve ozonlama işlemi sonrasında oluşabilecek yan ürünlerin tutulması amacıyla aktif karbon kullanılmıştır. Aktif karbon yüzey alanı $950 \text{ m}^2/\text{gr}$ dır.



Şekil 3.2: Aktif karbon

3.1.3. Ozon

Ozon, güçlü oksitleyici özelliği sayesinde organik bileşiklerin kimyasal yapılarını oksidatif mekanizmalar yoluyla dönüştürebilen bir gazdır. Bu çalışmada ozon, plastikleştiricilerde renk oluşumuna neden olan organik bileşiklerin oksidatif olarak parçalanması veya daha düşük renk yoğunluğuna sahip bileşiklere dönüştürülmesi amacıyla oksitleyici ajan olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan ozon jeneratörü, Sabo marka SE-15 ozon jeneratörü kompakt olarak modüler oksijen jeneratörü içinde portatif bir kompresör bulunduran ve bu kompresörle 5 gram/saat ozon gazı üretimi yapan bir ozon jeneratörüdür. SE-15 ozon jeneratörüne ,oksijen jeneratörü veya oksijen konsantratörü ile oksijen gazı beslendiğinde 15 gram/saat seviyesinde ozon gazı üretimi gerçekleştirmektedir.



Şekil 3.3: Ozon Jeneratörü

3.2. Kullanılan cihazlar

Bu çalışmada Plastay Kimya laboratuvar altyapısı ve cihazları kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında numuneler, Alman Menşei Heidolph marka Hei-Plate Mix'n Heat Core model manyetik karıştırıcı yardımıyla aktif karbon denemeleri için belirlenen uygun sıcaklığa getirilmiş ve homojenlik sağlanacak şekilde sürekli karıştırılmıştır. Aktif karbon ile gerçekleştirilen adsorpsiyon işlemi sonrasında numuneler filtrelenmiş ve renk analizleri Birleşik Krallık menşei Lovibond marka PFX 195 modelli renk ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her renk ölçümü sonrası numune asit değerleri Alman menşei Brand marka 50 ml modelli titrasyon cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

Renk ölçümü yapılan numuneler, SE-15 model ozon jeneratörü kullanılarak, 5 gram/saat kapasitesinde ve 10 dakika süreyle ozonlama işlemine tabi tutulmuştur. Ozonlama işlemi sonrasında numunelerin asit değerleri, mg KOH/g cinsinden titrasyon yöntemiyle belirlenmiş ve elde edilen veriler kayıt altına alınmıştır.

Ozonlama işleminin kimyasal yapı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, ozon öncesi ve sonrası numuneler Alman menşei Bruker marka Alpha II Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) cihazı ile analiz edilerek olası bağ oluşumları ve bağ kırılmaları değerlendirilmiştir. Ayrıca, ozonlama işleminin numune saflığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla, ozon öncesi ve sonrası numuneler Hollanda menşei Scion marka 436 modelli gaz kromatografisi (GC) cihazında analiz edilmiştir.

3.3. Deneysel Yöntem

3.3.1 DOTP numunelerin hazırlanması

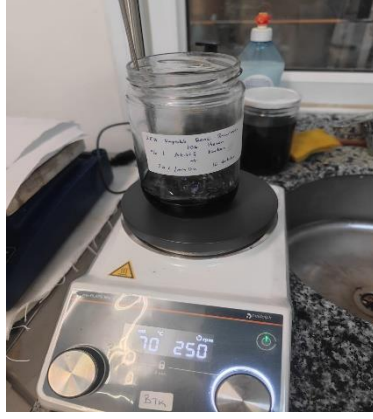
Numune hazırlığı kapsamında, biri 2-Etilheksanol, diğeri ise saf tereftalik asidin off-grade hammaddesinden üretilmiş iki farklı DOTP numunesinden eşit miktarda olacak şekilde 78 g tartım yapılmıştır. Mettler Toledo marka hassas terazi kullanılarak tartımlar gerçekleştirilmiştir. Tartımı yapılan numuneler cam kavanozlara alınmış ve bu numunelere uygulanacak farklı aktif karbon dozajları Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.2. DOTP numunelerine uygulanacak aktif karbon miktarları

Numune numarası	2-EH kaynaklı renk bozulması DOTP miktarı (gr)	PTA kaynaklı renk bozulması DOTP miktarı(gr)	Aktif karbon Miktarı(gr)
1	78	78	%1 (0,78 gr)
2	78	78	%1,5 (1,17 gr)
3	78	78	%2 (1,56 gr)
4	78	78	%2,5 (1,95 gr)
5	78	78	%3 (2,34 gr)

3.3.2. Numunelerin adsorpsiyonu

Çizelge 3.2’de miktarları belirtilen numuneler ile aktif karbon karışımları, Heidolph marka manyetik karıştırıcı kullanılarak 70 °C sıcaklıkta ve 30 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi 250 rpm hızda gerçekleştirilmiş olup, bu hız aktif karbonun mekanik olarak parçalanmasını önlerken adsorpsiyon için gerekli yeterli temasın sağlanması amacıyla tercih edilmiştir.



Şekil 3.3: DOTP numunelerinin aktif karbon ile homojen karıştırılması

3.3.3. Numunelerin filtrasyonu

Aktif karbon ile 30 dakika süreyle homojen olarak karıştırılan numunelerin filtrasyon işlemi, %100 selüloz esaslı ve yaklaşık 20 μm eşdeğer tutma kapasitesine sahip filtre kâğıdı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin 70 °C gibi nispeten düşük bir sıcaklıkta bulunması nedeniyle viskozitenin yüksek olması, filtrasyon süresinin uzamasına yol açmış ve filtrasyon işlemi yaklaşık 3–4 saatlik bir süre içerisinde tamamlanmıştır.



Şekil 3.4: Numunelerin filtrasyonu

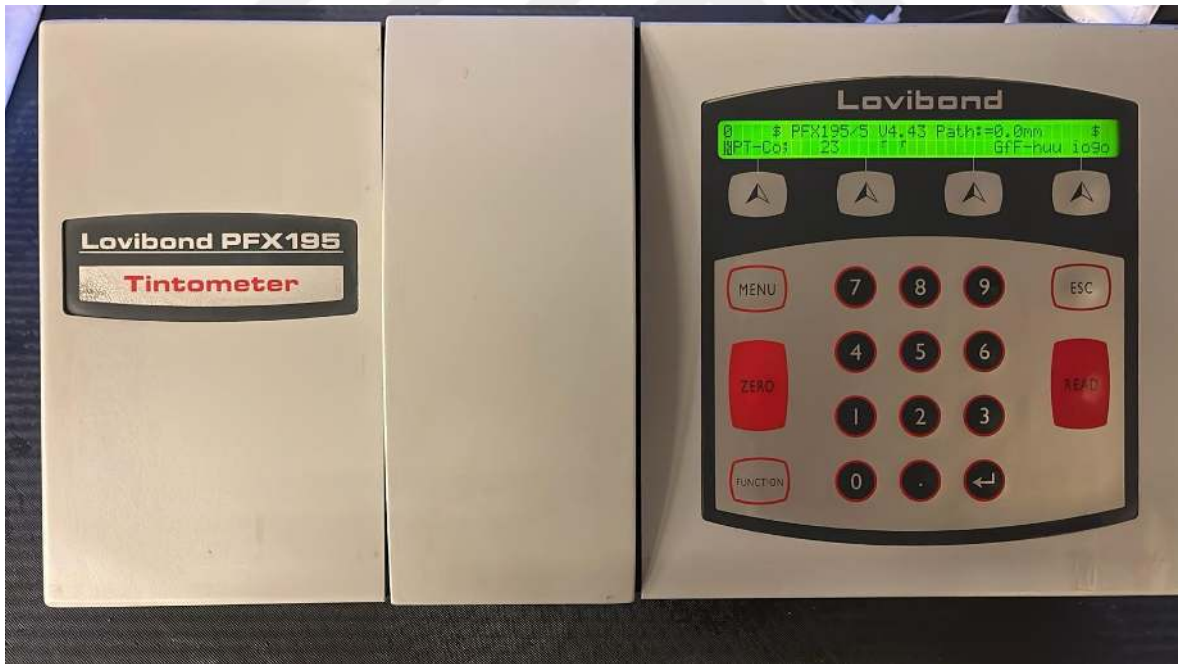
3.3.4. Numunelerin ozonlanması

Numunelerin renk ve asit değeri ölçümleri tamamlandıktan sonra, numuneler 20 L/dk oksijen debisinde üretilen ozon kullanılarak 10 dakika süreyle ozonlama işlemine tabi tutulmuştur.

3.4. DOTP numunelerin renk giderilmesinde kullanılan test cihazları

3.4.1 Renk analizi (Pt-Co / Hazen Yöntemi)

DOTP numunelerinin ham hâli ile aktif karbon ve ozonlama işlemleri sonrasındaki renk değişimlerinin belirlenmesi amacıyla Lovibond marka renk ölçüm cihazı kullanılmıştır. Renk ölçümleri, Pt-Co (Hazen) skalasında ve ASTM D1209 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Plastikleştiriciler için kabul edilen uluslararası kalite kriterlerine göre renk değeri üst sınırı 30 Hazen olarak değerlendirilmektedir. Şekil 3.5’ te lovibond Pfx195 tintometer renk cihazının gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Lovibond renk ölçüm cihazı

3.4.2. Asit değeri analizi

DOTP numunelerinin asit değeri, ASTM D1045 standardına uygun olarak Brand marka titrasyon cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen asit değeri sonuçları mg KOH/g birimi cinsinden ifade edilmiştir. Şekil 3.6’da testin yapıldığı titrasyon cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Brand marka titrasyon cihazı

3.4.3 FTIR analizi

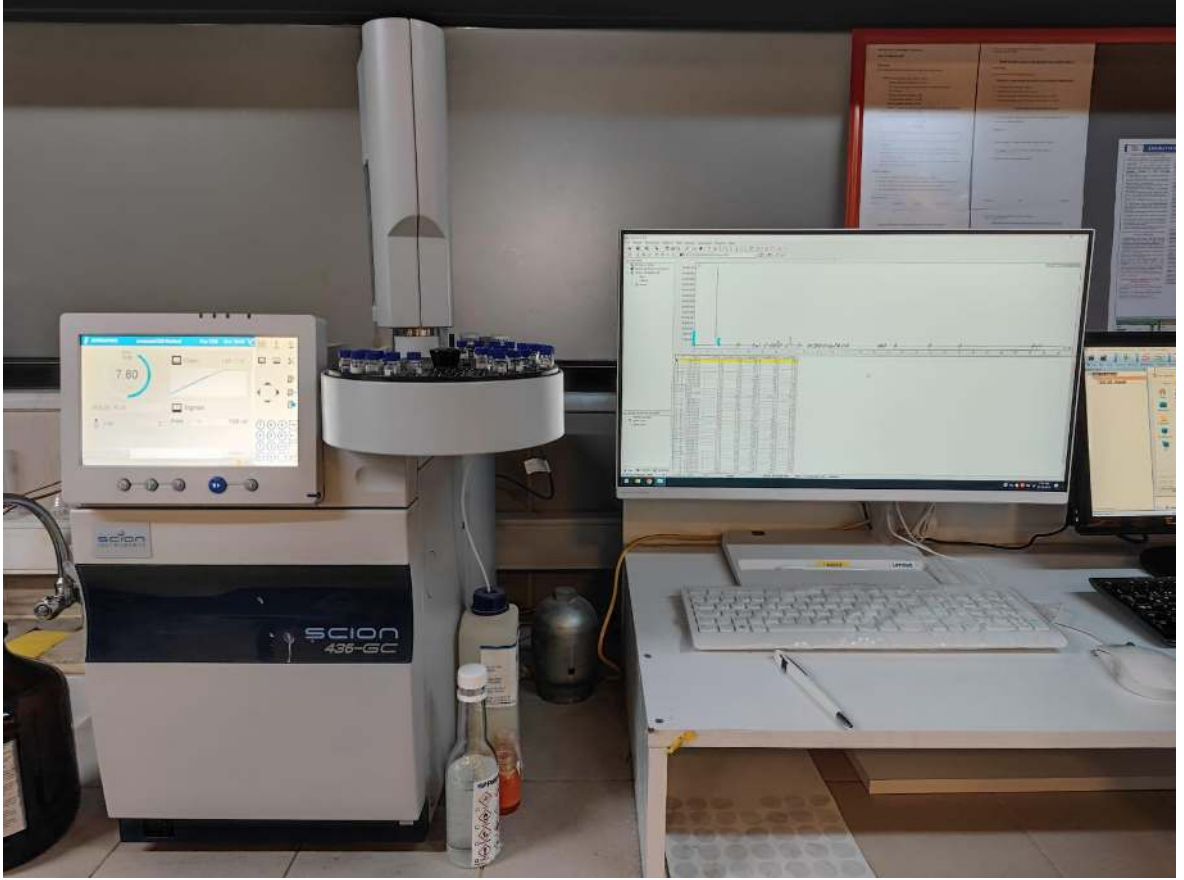
DOTP numunelerinin ozonlama öncesi ve sonrası kimyasal yapı değişimlerinin incelenmesi amacıyla Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, Bruker Alpha II model FTIR cihazına entegre Platinum ATR (Attenuated Total Reflectance) ünitesi kullanılarak, 4000–400 cm^{-1} aralığında yapılmıştır. Şekil 3.7’de FTIR cihazı görseli gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Bruker Alpha II FTIR cihazı

3.4.4 Gaz kromatografisi (GC) analizi

DOTP numunelerinin ozonlama öncesi ve sonrası saflık değişimlerinin incelenmesi amacıyla gaz kromatografisi (GC) analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, Scion 436 model gaz kromatografisi cihazı kullanılarak yapılmış olup, elde edilen kromatogramlar numunelerdeki olası bileşen değişimleri ve saflık farklılıkları açısından değerlendirilmiştir. Şekil 3.8’ de Gaz kromatografisi cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Scion 436 marka Gaz Kromatografisi

4. BULGULAR

4.1 Renk analiz bulguları

4.1.1 Aktif karbon uygulaması

DOTP numunelerinin aktif karbon uygulaması sonrası renk değişimleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: DOTP numunelerinin aktif karbon uygulaması sonrası renk değişimleri.

Numune no	Aktif karbon miktarı (%)	1.numune (hazen)	1.numune A.K. sonrası (hazen)	2.numune (hazen)	2.numune A.K. sonrası (hazen)
1	1	104	78	328	258
2	1,5	104	76	328	256
3	2	104	73	328	255
4	2,5	104	72	328	253
5	3	104	72	328	252

Yapılan renk analizleri sonucunda, 2-Etilheksanol kaynaklı renklenme problemi bulunan DOTP numunelerinde aktif karbon uygulamasının belirgin bir renk giderimi sağladığı görülmüştür. Bu kapsamda 1 numaralı DOTP numunesinde, aktif karbon uygulaması sonrasında 26–32 Hazen aralığında bir renk azalımı elde edilmiş olup, bu değişim başlangıç renk değerine kıyasla yaklaşık %25–30 oranında bir renk giderimine karşılık gelmektedir.

Off-grade tereftalik asit kullanımı sonucunda belirgin renklenme problemi gözlenen 2 numaralı DOTP numunesinde ise aktif karbon uygulaması sonrasında 70–76 Hazen aralığında bir renk giderimi sağlandığı belirlenmiş olup, bu değişim başlangıç renk değerine kıyasla yaklaşık %21–23 oranında bir renk azalımına karşılık gelmektedir.

4.1.2 Ozonlama uygulaması

DOTP numunelerinin ozonlama uygulaması sonrası renk değişimleri çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: DOTP numunelerinin ozon uygulaması sonrası renk değişimleri.

Numune no	Ozon miktarı	1.numune (hazen)	1.numune ozon sonrası (hazen)	2.numune (hazen)	2.numune ozon sonrası (hazen)
1	5 L/min O ₂ 10 dakika	104	97	328	304
2	10 L/min O ₂ 10 dakika	104	93	328	296
3	15 L/min O ₂ 10 dakika	104	91	328	284
4	20 L/min O ₂ 10 dakika	104	93	328	269
5	20 L/min O ₂ 5 dakika	104	91	328	293

Ozonlama uygulamalarının 1 numaralı DOTP numunesi üzerindeki etkileri incelendiğinde, ozon miktarının artmasıyla birlikte belirli bir seviyeye kadar renk azalımı sağlandığı görülmüştür. Başlangıçta 104 Hazen olan renk değeri, 10 dakika süreyle 5–15 L/dk O₂

debilerinde gerçekleştirilen ozonlama işlemleri sonrasında 91–97 Hazen aralığına dūřmūř olup, bu değişim yaklaşık %7–13 oranında bir renk azalımına karşılık gelmektedir.

Off-grade tereftalik asit kullanılarak üretilmiş 2 numaralı DOTP numunesinde ise ozonlama uygulamasının renk giderimi açısından daha belirgin bir etki gösterdiği gözlenmiştir. Başlangıçta 328 Hazen olan renk değeri, uygulanan ozon miktarına bağlı olarak 269–304 Hazen aralığına gerilemiş ve bu değişim yaklaşık %7–18 oranında bir renk azalımına karşılık gelmiştir. En yüksek renk giderimi, 20 L/dk O₂ debisi ve 10 dakikalık ozonlama sresinde elde edilmiştir.



4.1.3 Kombine (ozon+aktif karbon) uygulama

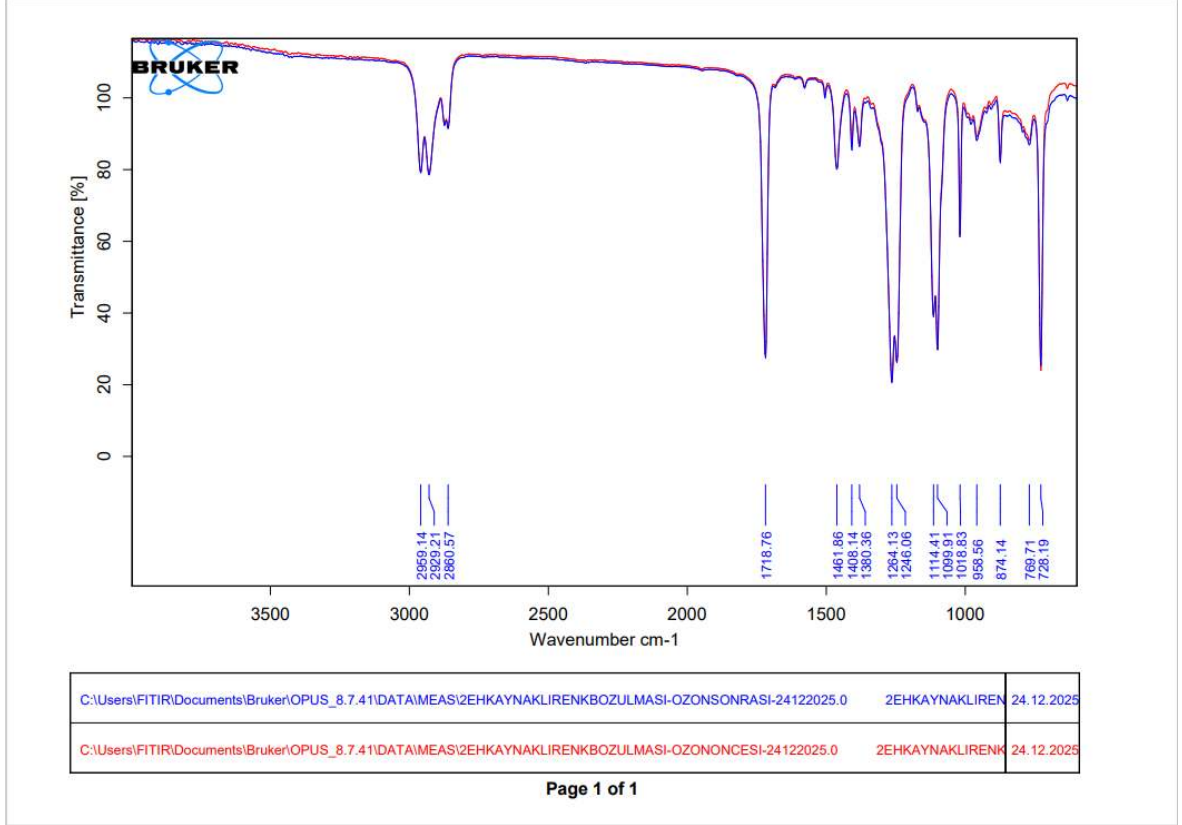
Çizelge 4.3 DOTP numunelerinin Kombine (ozon+aktif karbon) uygulaması sonrası renk değişimleri

Numune no	Ozon miktarı	A.K. Miktarı %	1.numune (hazen)	1.numune Ozon+A. K. sonrası (hazen)	2.numune (hazen)	2.numune Ozon+A. K. sonrası (hazen)
1	5 L/min O ₂ 10 dakika	1	104	65	328	239
2	10 L/min O ₂ 10 dakika	1,5	104	59	328	227
3	15 L/min O ₂ 10 dakika	2	104	53	328	219
4	20 L/min O ₂ 10 dakika	2,5	104	47	328	206
5	20 L/min O ₂ 5 dakika	3	104	51	328	208

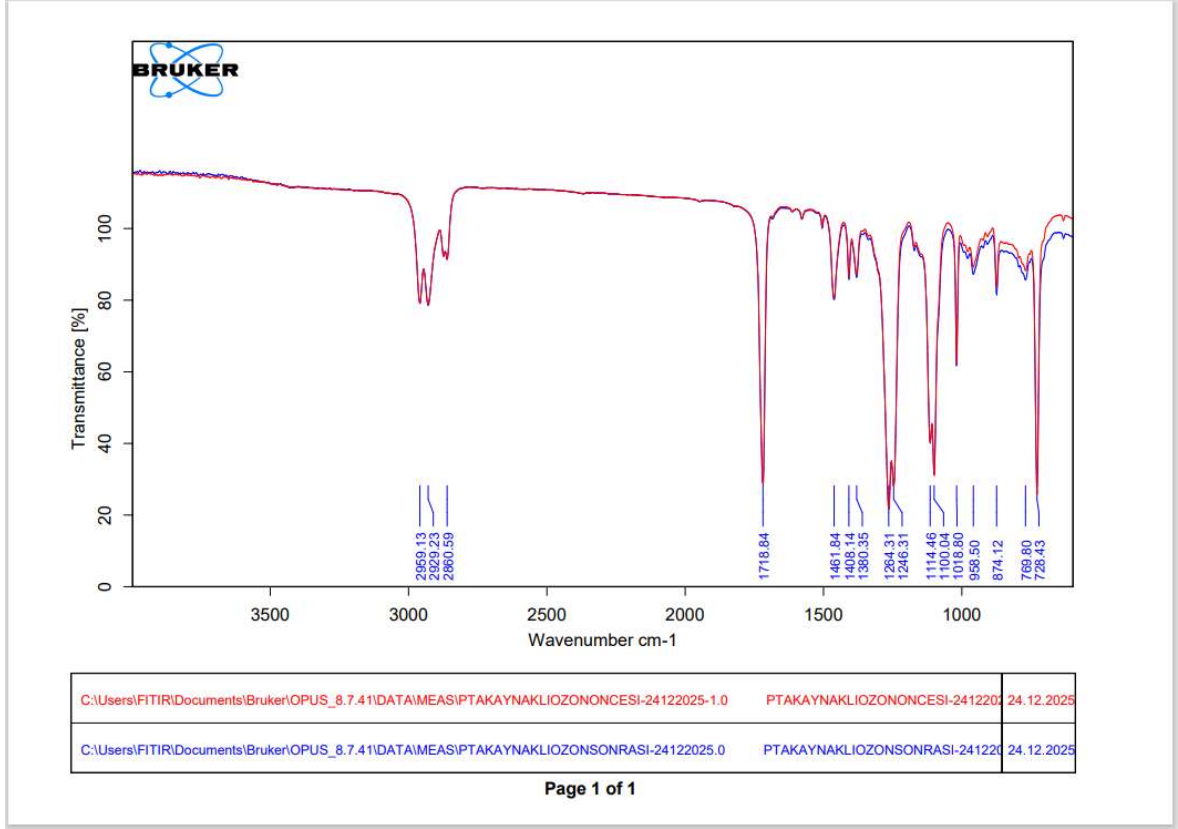
Ozon ve aktif karbonun birlikte uygulandığı denemeler, her iki DOTP numunesinde de renk giderimi açısından tekil uygulamalara kıyasla belirgin derecede daha yüksek performans sergilemiştir. Kombine uygulama sonucunda, 1 numaralı DOTP numunesinde başlangıçta

104 Hazen olan renk değeri 47–65 Hazen aralığına düşmüş olup, bu değişim yaklaşık %38–55 oranında bir renk azalımına karşılık gelmektedir. Benzer şekilde 2 numaralı DOTP numunesinde başlangıçta 328 Hazen olan renk değeri 206–239 Hazen aralığına gerilemiş ve bu durum yaklaşık %27–37 oranında bir renk giderimi sağlandığını göstermiştir.

4.1.4 FTIR analizi



Şekil 4.1: 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi ve sonrası DOTP numunelerine ait FTIR spektrumları



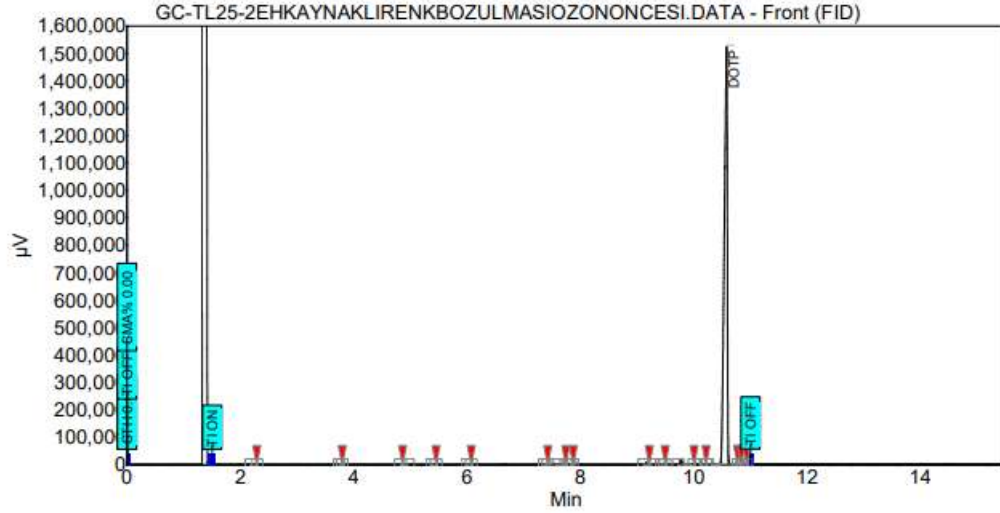
Şekil 4.2: PTA bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi ve sonrası DOTP numunelerine ait FTIR spektrumları

FTIR spektrumlarının ozonlama öncesi ve sonrası karşılaştırmalı incelenmesi sonucunda, 1100 cm^{-1} dalga sayısının altında yalnızca düşük şiddette ve sınırlı spektral değişimler gözlenmiştir. Karakteristik ester fonksiyonel gruplarına ait ana piklerde belirgin bir kayma, yeni pik oluşumu veya pik şiddetlerinde anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir. Bu durum, ozonlama işlemiyle gözlenen renk azalımı veya artışının, DOTP'nin ana kimyasal yapısında meydana gelen majör bağ kırılmaları veya yeni fonksiyonel grup oluşumları ile ilişkili olmadığını göstermektedir.

4.1.5 Gaz kromatografisi (GC) analizleri

Gaz kromatografisi (GC) analizleri sonucunda elde edilen veriler, ozon uygulamasının farklı hammadde matrisleri üzerindeki etkisinin değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmalarında, ozonlama işlemi öncesi ve sonrası yapılan GC ölçümleri kıyaslandığında, numune safiyetinde yalnızca %0,03 oranında bir değişim saptanmıştır. İstatistiksel açıdan ihmal edilebilir düzeyde olan bu değer, ozon uygulamasının

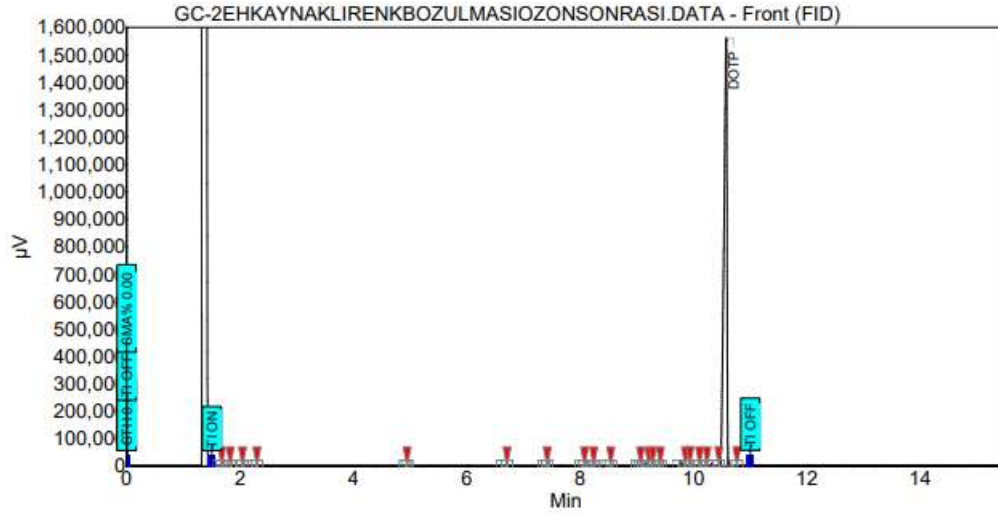
2-etilheksanol bazlı sistemlerde ürünün kimyasal safiyetini ve yapısal bütünlüğünü bozmadan renk giderme işlevini yerine getirdiğini kanıtlamaktadır. Buna karşın, ikinci kalite tereftalik asit bazlı renk bozunması olan numunelerde ozonlama sonrası %1,01 oranında anlamlı bir değişim gözlemlenmiştir. PTA matrisinin sahip olduğu kontaminasyon riskinin 2-Etilheksanole kıyasla daha yüksek olması, ozonun mevcut safsızlıklar üzerindeki oksidatif reaktivitesinin kromatografik verilerde daha net bir şekilde izlenmesine olanak tanımıştır.



Peak results :

Index	Name	Time [Min]	Quantity [% Area]	Height [µV]	Area [µV.Min]	Area % [%]
1	UNKNOWN	2.23	0.08	2833.0	78.2	0.083
2	UNKNOWN	3.77	0.00	94.5	1.8	0.002
3	UNKNOWN	4.84	0.00	72.8	1.5	0.002
4	UNKNOWN	5.41	0.01	332.4	6.9	0.007
5	UNKNOWN	6.03	0.01	392.8	8.9	0.009
6	UNKNOWN	7.38	0.00	55.9	1.2	0.001
7	UNKNOWN	7.67	0.08	2209.9	70.8	0.075
8	UNKNOWN	7.84	0.00	68.0	1.7	0.002
9	UNKNOWN	9.16	0.19	6892.3	179.2	0.190
10	UNKNOWN	9.46	0.01	368.0	9.7	0.010
11	UNKNOWN	9.77	0.47	16409.2	440.4	0.467
12	UNKNOWN	9.91	0.03	966.9	31.3	0.033
13	UNKNOWN	9.96	0.02	509.8	15.1	0.016
14	UNKNOWN	10.17	0.01	220.9	7.4	0.008
15	UNKNOWN	10.39	0.01	186.7	6.1	0.006
16	UNKNOWN	10.44	0.01	254.0	8.3	0.009
17	DOTP	10.58	99.04	1524816.3	93353.1	99.038
18	UNKNOWN	10.70	0.02	455.0	23.5	0.025
19	UNKNOWN	10.80	0.01	226.6	7.5	0.008
20	UNKNOWN	10.89	0.01	240.9	6.8	0.007
Total			100.00	1557606.0	94259.5	100.000

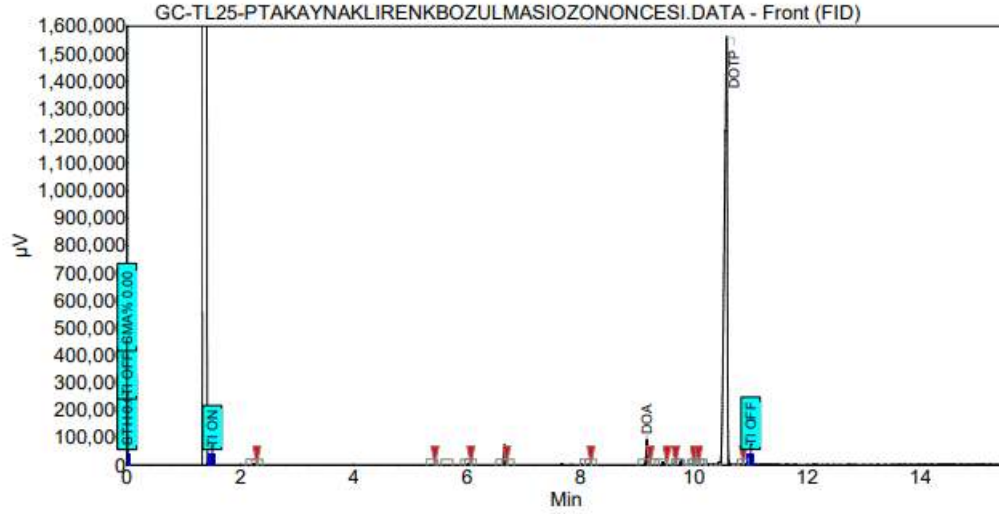
Şekil 4.3: 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi DOTP numunesine ait GC analizi



Peak results :

Index	Name	Time [Min]	Quantity [% Area]	Height [µV]	Area [µV.Min]	Area % [%]
1	UNKNOWN	1.63	0.00	87.6	3.0	0.003
2	UNKNOWN	1.78	0.00	157.8	4.8	0.005
3	UNKNOWN	1.98	0.01	371.0	13.2	0.014
4	UNKNOWN	2.23	0.10	3538.1	98.0	0.101
5	UNKNOWN	4.92	0.00	60.8	1.1	0.001
6	UNKNOWN	6.66	0.06	2666.9	56.4	0.058
7	UNKNOWN	7.39	0.00	84.1	1.9	0.002
8	UNKNOWN	8.05	0.00	82.5	1.6	0.002
9	UNKNOWN	8.21	0.00	104.3	2.4	0.002
10	UNKNOWN	8.50	0.00	102.3	2.1	0.002
11	UNKNOWN	9.03	0.00	104.8	2.9	0.003
12	UNKNOWN	9.16	0.19	7192.2	188.1	0.195
13	UNKNOWN	9.24	0.00	109.5	3.3	0.003
14	UNKNOWN	9.38	0.00	72.7	1.9	0.002
15	UNKNOWN	9.77	0.45	16186.6	435.7	0.451
16	UNKNOWN	9.91	0.03	1005.2	33.7	0.035
17	UNKNOWN	10.04	0.00	105.8	4.0	0.004
18	UNKNOWN	10.16	0.01	238.6	10.6	0.011
19	UNKNOWN	10.20	0.00	83.1	2.5	0.003
20	UNKNOWN	10.39	0.01	118.9	5.0	0.005
21	DOTP	10.57	99.07	1563014.0	95714.1	99.074
22	UNKNOWN	10.70	0.02	460.0	22.3	0.023
Total			100.00	1595946.6	96608.7	100.000

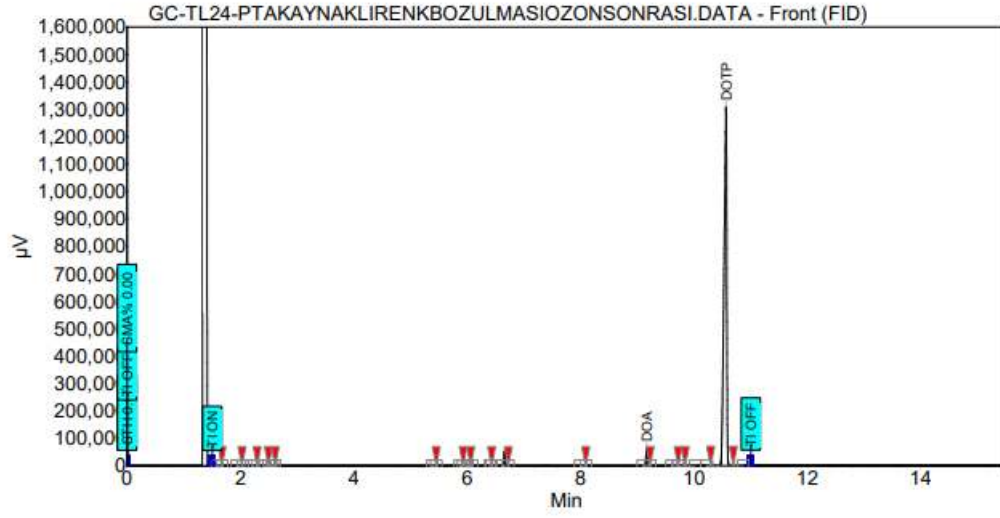
Şekil 4.4: 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmanın ozonlama sonrası DOTP numunesine ait GC analizi



Peak results :

Index	Name	Time [Min]	Quantity [% Area]	Height [µV]	Area [µV.Min]	Area % [%]
1	UNKNOWN	2.23	0.07	2322.6	65.3	0.067
2	UNKNOWN	5.41	0.01	726.7	14.3	0.015
3	UNKNOWN	6.03	0.06	3037.1	58.9	0.060
4	UNKNOWN	6.66	1.46	73745.9	1435.9	1.465
5	UNKNOWN	8.14	0.03	1066.6	25.9	0.026
6	DOA	9.17	2.46	93364.6	2414.9	2.463
7	UNKNOWN	9.46	0.29	10949.9	283.5	0.289
8	UNKNOWN	9.64	0.02	768.4	19.9	0.020
9	UNKNOWN	9.77	0.40	14845.7	394.7	0.403
10	UNKNOWN	9.91	0.03	892.5	27.6	0.028
11	UNKNOWN	9.95	0.01	335.1	10.0	0.010
12	UNKNOWN	10.04	0.00	52.8	1.6	0.002
13	UNKNOWN	10.17	0.01	209.7	7.2	0.007
14	UNKNOWN	10.27	0.06	1935.2	58.0	0.059
15	UNKNOWN	10.32	0.17	4777.9	167.8	0.171
16	UNKNOWN	10.44	0.30	8045.3	290.8	0.297
17	DOTP	10.57	94.60	1561160.8	92745.5	94.595
18	UNKNOWN	10.72	0.02	334.9	15.3	0.016
19	UNKNOWN	10.82	0.01	167.9	7.1	0.007
Total			100.00	1778739.6	98044.4	100.000

Şekil 4.3: PTA bazlı renk bozulmanın ozonlama öncesi DOTP numunesine ait GC analizi



Peak results :

Index	Name	Time [Min]	Quantity [% Area]	Height [μV]	Area [μV.Min]	Area % [%]
1	UNKNOWN	1.62	0.01	126.0	4.2	0.006
2	UNKNOWN	1.97	0.03	585.7	19.3	0.026
3	UNKNOWN	2.23	0.12	3505.8	91.3	0.121
4	UNKNOWN	2.46	0.01	374.1	8.2	0.011
5	UNKNOWN	2.58	0.00	41.2	0.9	0.001
6	UNKNOWN	5.41	0.01	541.4	10.8	0.014
7	UNKNOWN	5.90	0.00	64.7	1.4	0.002
8	UNKNOWN	6.03	0.06	2270.7	45.6	0.060
9	UNKNOWN	6.41	0.00	41.5	0.8	0.001
10	UNKNOWN	6.66	1.41	54372.5	1064.6	1.412
11	UNKNOWN	8.02	0.02	569.6	14.9	0.020
12	DOA	9.16	2.38	69642.2	1793.7	2.380
13	UNKNOWN	9.64	0.02	549.4	15.0	0.020
14	UNKNOWN	9.77	0.17	4467.9	124.7	0.165
15	UNKNOWN	10.27	0.06	1482.8	42.5	0.056
16	DOTP	10.56	95.70	1310442.1	72137.0	95.704
Total			100.00	1449077.6	75374.9	100.000

Şekil 4.3: PTA bazlı renk bozulmanın ozonlama sonrası DOTP numunesine ait GC analizi

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Plastikleştirici sektörü, modern polimer endüstrisinin temel taşı olup, başta PVC olmak üzere birçok polimerin işlenebilirliğini ve esnekliğini belirleyen kritik bir bileşen grubunu temsil etmektedir. Bu sektörde ürün kalitesini belirleyen en temel parametrelerden biri olan renk standardı, özellikle PTA ve 2-Etilheksanol bazlı plastikleştiricilerin üretim süreçlerinde ham maddeden gelen safsızlıklar veya yüksek sıcaklıktaki esterleşme reaksiyonları nedeniyle sıklıkla karşılaşılan kronik bir sorundur. Bu çalışma kapsamında yürütülen deneysel süreçlerde, endüstriyel standartların dışına çıkan renkli numunelerin ozonlama ve farklı adsorban olarak seçilen aktif karbon kombine uygulaması ile yüksek oranda renk giderimi sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre ;

Aktif karbon uygulanan 2-Etilheksanol bazlı renklenme sorunu yaşayan 1.numunenin başlangıç hazen değerine göre %25-30 oranında iyileşme gösterdiği saptanmıştır. Bu da 2-Etilheksanol bazlı üretim ve hammadde sorunları sebebiyle üretilen plastikleştirici proseslerinde renklenme sorununun çözümü için alternatif bir yöntem olduğunu göstermektedir.

İkinci kalite tereftalik asit kullanımının neden olduğu 2.numunede yoğun renklemenin aktif karbon uygulamaları ile tamamen giderilememekle birlikte, renk kalitesinin belirli bir düzeyde iyileştirilebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda aktif karbon uygulaması, maliyet avantajı nedeniyle off-grade hammadde kullanımını tercih eden plastikleştirici üreticileri için renk kalitesini artırmaya yönelik uygulanabilir bir ön arıtma veya iyileştirme yöntemi olarak değerlendirilebilir.

Aktif karbon dozajının artırılmasına bağlı olarak renk gideriminde belirli bir seviyeye kadar iyileşme sağlandığı ancak bu seviyenin üzerinde aktif karbon miktarının artırılmasının renk giderimine sürdürülebilir bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Özellikle %2 aktif karbon dozajı ile %2,5 dozajı arasında renk değerleri açısından kayda değer bir fark oluşmaması, aktif karbon kullanımında doygunluk noktasına ulaşıldığını göstermektedir. Bu durum, %2 aktif karbon dozajının hem teknik performans hem de maliyet-etkinlik açısından en uygun

seviye olduğunu, daha yüksek dozajların ise gereksiz hammadde tüketimine yol açarak ekonomik açıdan tercih edilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, aktif karbon uygulamasının hammadde kaynaklı renklenme türüne bağlı olarak farklı etkinlik düzeyleri sergilediği, 2-Etilheksanol kaynaklı renklemelerde daha yüksek performans sağlarken, off-grade tereftalik asit kaynaklı renklemelerde ise sınırlı bir iyileşme sunduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, aktif karbon kullanımında optimum dozaj seçiminin ve hammadde kalitesinin, plastikleştirici üretiminde renk kontrolü açısından kritik parametreler olduğunu ortaya koymaktadır.

Ozonlama uygulaması sonrasında, 2-Etilheksanol bazlı renklenme problemi bulunan 1 numaralı numunede, başlangıç değerine kıyasla %7–13 oranında renk giderimi sağlandığı belirlenmiştir. En düşük renk değeri 15 L/dk O₂ debisinde elde edilmiştir. Ancak ozon miktarının 20 L/dk seviyesine çıkarılmasıyla birlikte renk gideriminde ek bir iyileşme gözlenmemiş, aksine renk değerinin 93 Hazen seviyesine yükseldiği tespit edilmiştir. Bu bulgular, 1 numaralı DOTP numunesinde ozon uygulamasının sınırlı bir etkiye sahip olduğunu ve belirli bir dozun üzerinde doygunluk davranışı sergilediğini göstermektedir.

İkinci kalite tereftalik asit kullanımından kaynaklanan 2 numaralı numunede ise renk giderimi %7–18 aralığında gerçekleşmiştir. Her iki numune için elde edilen sonuçlar, ozon uygulamasının tek başına sınırlı düzeyde renk giderimi sağladığını ortaya koymaktadır. Bu durum, ozonun tekil kullanımının ürün rengini tamamen gidermekten ziyade yalnızca kısmi bir iyileşme sağladığını göstermektedir.

Kombine uygulamalar sonucunda, 1 numaralı DOTP numunesinde başlangıç değerine kıyasla %38–55 oranında belirgin bir renk giderimi sağlandığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, 2 numaralı DOTP numunesinde de renk gideriminin %27–37 aralığında gerçekleştiği ve önemli bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir.

Kombine sistemde elde edilen bu yüksek performans, ozonun oksidatif etkisi ile aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesinin birbirini tamamlayıcı şekilde çalışmasından kaynaklanmaktadır. Ozonlama sürecinde, renklenmeye neden olan kompleks ve yüksek molekül ağırlıklı organik bileşikler daha küçük ve daha polar ara ürünlere dönüştürülmekte; bu dönüşüm, söz konusu bileşiklerin aktif karbon yüzeyine adsorpsiyonunu kolaylaştırarak renk giderim verimini artırmaktadır.

FTIR spektrumlarının ozonlama öncesi ve sonrası karşılaştırmalı incelenmesi sonucunda, 1100 cm⁻¹ dalga sayısının altında yalnızca düşük şiddette ve sınırlı spektral değişimler

gözlenmiştir. Karakteristik ester fonksiyonel gruplarına ait ana piklerde belirgin bir kayma, yeni pik oluşumu veya pik şiddetlerinde anlamlı bir değişim tespit edilmemiştir.

Gaz kromatografisi (GC) analizleri sonucunda elde edilen veriler 2-Etilheksanol bazlı renk bozulmalarında, ozonlama işlemi öncesi ve sonrası yapılan GC ölçümleri kıyaslandığında, numune safiyetinde yalnızca %0,03 oranında bir değişim saptanmıştır. Buna karşın, Safılaştırılmış Tereftalik Asit (PTA) bazlı renk bozunması olan numunelerde ozonlama sonrası %1,01 oranında anlamlı bir değişim gözlemlenmiştir. PTA matrisinin sahip olduğu kontaminasyon riskinin 2-Etilheksanole kıyasla daha yüksek olması, ozonun mevcut safsızlıklar üzerindeki oksidatif reaktivitesinin kromatografik verilerde daha net bir şekilde izlenmesine olanak tanımıştır. Bu sonuçlar, ozonlamanın PTA bazlı kirliliklerin giderilmesinde etkin bir modifikasyon aracı olduğunu, 2-Etilheksanol sistemlerinde ise safiyeti koruyan bir yöntem olarak öne çıktığını göstermektedir.

Farklı adsorban olan bentonit ve silika jel kullanımı , renklenme sorunu olan DOTP numunelerinde çok kısıtlı etki elde ettiğinden sadece aktif karbon denemeleri yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Ak, M. S.** (2011). Tiyofer ve pirol esaslı yeni monomerlerin sentezi, polimerleştirilmesi ve polimerlerin özelliklerinin incelenmesi (Doctoral dissertation, Ankara Üniversitesi (Turkey)).
- [2] **Altun, A., & Fellah, M. F.** (2022). A mini review on different synthesis reactions of dioctyl terephthalate (DOTP) and properties of DOTP plasticized PVC. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(7), 1001-1013.
- [3] **Amiri, H., Martinez, S. S., Shiri, M. A., & Soori, M. M.** (2023). Advanced oxidation processes for phthalate esters removal in aqueous solution: a systematic review. Reviews on Environmental Health, 38(2), 197-218.
- [4] **Author(s).** (2023). Application of advanced oxidation processes for the treatment of color and chemical oxygen demand of pulp and paper wastewater. Journal Name, Volume(Issue), 5
- [5] **Başboğa, İ. H., Karakuş, K., BOZKURT, F., & MENGELOĞLU, F.** (2017). Effects of Processing Methods, DOP Amount and Filler Content on the Mechanical Properties of Recycled Polyvinyl Chloride (PVC) Composites. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(2), 9-15.
- [6] **Bekki, K., Eguchi, A., Takaguchi, K., Inaba, Y., Yukawa, K., Yoshida, S., & Azuma, K.** (2024). Comprehensive survey on the use of plastic additives in toy products used in Japan. Environmental Health and Preventive Medicine, 29, 43-43.
- [7] **Beltrán, F. J., Masa, F. J., & Pocostales, J. P.** (2009). A comparison between catalytic ozonation and activated carbon adsorption/ozone-regeneration processes for wastewater treatment. Applied Catalysis B: Environmental, 92(3-4), 393-400.
- [8] **Boyoğlu, C.** (2009). Metalize olmuş Esnek Ambalaj Malzemelerinde poliüretan esaslı bağlayıcıların geliştirilmesi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [9] **Brodowska, A. J., Nowak, A., & Śmigielski, K.** (2018). Ozone in the food industry: Principles of ozone treatment, mechanisms of action, and applications: An overview. Critical reviews in food science and nutrition, 58(13), 2176-2201.
- [10] **Chen, M., Yang, B., & Zhang, J.** (2024). A comparative study of comprehensive performances for transparent plasticized polyvinyl chloride films with different plasticizers. Journal of Applied Polymer Science, 141(40), e56021.
- [11] **Çolak, G., Özsin, G., & Türkmen, B. A.** (2024). Sürdürülebilir Ahşap Plastik Kompozit Malzemeler: Hammaddeler, Yapısal Özellikler, Üretim Süreçleri ve Güncel Eğilimler. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, (Erken Görünüm), 1-1.
- [12] **de Oliveira, T. F., Chedeville, O., Fauduet, H., & Cagnon, B.** (2011). Use of ozone/activated carbon coupling to remove diethyl phthalate from water: Influence of activated carbon textural and chemical properties. Desalination, 276(1-3), 359-365.
- [13] **Ercan, E.** (2019). Reaktif boyamada laboratuvar ile işletme renk farkının azaltılması: Taguchi yaklaşımına dayalı bir uygulama (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- [14] **Eren, H. A., & Anış, P.** (2006). Tekstil boyama atıksularının ozonlama ile renk giderimi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 11(1).

- [15] **Erkekoğlu, P.** (2022). Plastikleştiriciler; Ftalatlar ve Bisfenoller. K. Şahin ve H. F. Keleştemur (Ed.), *Endokrin Bozucular ve Sağlık içinde* (s. 35-64). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları.
- [16] **European Chemicals Agency, E. E.** (2023). INVESTIGATION REPORT ON PVC AND PVC ADDITIVES.
- [17] **Evcı, M.** (2022). Polimer türü oyuncaklarda ftalat analizi ve iş sağlığı ve güvenliği açısından incelenmeleri (Master's thesis, Hitit University (Turkey)).
- [18] **Faria, P. C. C., Orfão, J. J. M., & Pereira, M. F. R.** (2005). Mineralisation of coloured aqueous solutions by ozonation in the presence of activated carbon. *Water Research*, 39(8), 1461–1470.
- [19] **Fil, B. A., & Elgün, C.** (2022). BÖLÜM 7. ÇEVRESEL PROBLEMLERİN ÇÖZÜMÜNDE YENİLİKÇİ YAKLAŞIMLAR II, 165.
- [20] **Godwin, A. D.** (2024). Plasticizers. In *Applied plastics engineering handbook* (pp. 595-618). William Andrew Publishing.
- [21] **Gözaçan, K.** (2023). Plastik Hammadde İthalatı ve dış Açık üzerindeki Etkisi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [22] **Gürül, B.** (2019). Sürdürülebilir üretim göstergelerinin kurumsal sürdürülebilirlik performansına etkisinin araştırılması.
- [23] **İŞÇİ, G.** (2023). Polietilen Tereftalat (Pet) Materyaller İle Ambalajlanan İçeceklerin Farklı Depolama Koşullarındaki Migrasyon Seviyelerinin Belirlenmesi Ve Gıda Güvenliği Açısından Değerlendirilmesi (Doctoral dissertation, Atatürk Üniversitesi).
- [24] **Jamarani, R., Erythropel, H. C., Nicell, J. A., Leask, R. L., & Marić, M.** (2018). How green is your plasticizer? *Polymers*, 10(8), 834.
- [25] **Jarray, A., Gerbaud, V., & Hemati, M.** (2016). Polymer-plasticizer compatibility during coating formulation: A multi-scale investigation. *Progress in Organic Coatings*, 101, 195-206.
- [26] **Jeirani, Z., Niu, C. H., & Soltan, J.** (2017). Adsorption of emerging pollutants on activated carbon. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(5), 491-522.
- [27] **Kaçar, E.** (2013). Sulu çözeltilerden ultrasonik sistem ile renk giderimi (Master's thesis, Anadolu University (Turkey)).
- [28] **Karaarslan, M.** (2012). İleri oksidasyon prosesleri ile sulardan doğal organik madde giderimi.
- [29] **Karaduman, A. B.** (2022). Moleküler Baskılanmış Kriyojellerin Hazırlanması ve Salisilik Asit Adsorpsiyonu.
- [30] **Karwowska, B., & Spierczyńska, E.** (2023). Coagulation enhanced with adsorption and ozonation processes in surface water treatment. *Sustainability*, 15(24), 16956.
- [31] **Kawakami, T., Isama, K., & Matsuoka, A.** (2011). Analysis of phthalic acid diesters, monoester, and other plasticizers in polyvinyl chloride household products in Japan. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(8), 855-864.
- [32] **Khurshid, S., Anjum, M., Nawaz, R., Kauser, F., Saleem, S., Hanafiah, M. M., & Abbas, M.** (2025). Di-butyl phthalates (DBP) in the environment: health risks and advances in treatment technologies. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(9), 1-23.
- [33] **Konsowa, A. H., Ossman, M. E., Chen, Y., & Crittenden, J. C.** (2010). Decolorization of industrial wastewater by ozonation followed by adsorption on activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1–3), 181–185.
- [34] **Lai, H., Wang, Z., Wu, P., Chaudhary, B. I., Sengupta, S. S., Cogen, J. M., & Li, B.** (2012). Structure and diffusion behavior of trioctyl trimellitate (TOTM) in PVC film studied by ATR-IR spectroscopy. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(27), 9365-9375.

- [35] **Lee, K. J., & Choi, K.** (2024). Environmental occurrence, human exposure, and endocrine disruption of di-iso-nonyl phthalate and di-iso-decyl phthalate: A systematic review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 54(8), 603-640.
- [36] **Liu, Z.** (2022). *Green Catalytic Hydrogenation of Phthalate Plasticizers*. Springer.
- [37] **Magalhães, A. M. R.** (2021). Evaluation of Diisobutyl Phthalate (DIBP) in Food: Comparison With Dibutyl Phthalate (DBP) in Terms of Hazard Identification, Characterization and Exposure Via Packaging and Food Contact Materials (Master's thesis, Universidade de Lisboa (Portugal)).
- [38] **Manurung, M. M., Leksonowati, N. F. P., Pamungkas, N., Stefani, W., Batubara, N. H., & Purba, A. S.** (2024). The impact of plasticizer levels in hardening PVC plastic. *Jurnal Integrasi*, 16(2), 135-140.
- [39] **Matos, M., Cordeiro, R. A., Faneca, H., Coelho, J. F., Silvestre, A. J., & Sousa, A. F.** Replacing Di (2-ethylhexyl) Terephthalate by Di (2-ethylhexyl) 2, 5-Furandicarboxylate for PVC Plasticization: Synthesis, Materials Preparation and Characterization.
- [40] **McKee, R. H., El-Hawari, M., Stoltz, M., Pallas, F., & Lington, A. W.** (2002). Absorption, disposition and metabolism of di-isononyl phthalate (DINP) in F-344 rats. *Journal of Applied Toxicology: An International Journal*, 22(5), 293-302.
- [41] **Mu'azu, N. D., Jarrah, N., Zubair, M., & Alagha, O.** (2017). Removal of phenolic compounds from water using sewage sludge-based activated carbon adsorption: a review. *International journal of environmental research and public health*, 14(10), 1094.
- [42] **Namal, O. Ö.** (2017). Tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında kullanılan proseslerin araştırılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 388-396.
- [43] **Muthukumar, M., Ramesh, K., & Mani, P.** (2004). Optimisation of ozone treatment for colour and COD removal of acid dye effluent using central composite design experiment. *Dyes and Pigments*, 63(2), 127-134.
- [44] **Oh, E., Godoy Zúniga, M. M., Nguyen, T. B., Kim, B. H., Trung Tien, T., & Suhr, J.** (2024). Sustainable green composite materials in the next-generation mobility industry: review and prospective.
- [45] **Pash, S.** (2022). Plastik katkı maddeleri ve sucul ortama etkileri. *Recep Tayyip Erdogan University Journal of Science and Engineering*, 3(1), 40-49.
- [46] **Pfaff, G.** (2021). Colorants in plastic applications. *Physical Sciences Reviews*, 6(2).
- [47] **Qadeer, A., Anis, M., Warner, G. R., Potts, C., Giovanoulis, G., Nasr, S., ... & Shuhang, W.** (2024). Global environmental and toxicological data of emerging plasticizers: current knowledge, regrettable substitution dilemma, green solution and future perspectives. *Green Chemistry*, 26(10), 5635-5683.
- [48] **Raclavská, H., Růžicková, J., Juchelková, D., Kuchel, M., Švédová, B., Šafář, M., & Slamová, K.** Leachable organic compounds from sewage sludge and their environmental risk potential.
- [49] **Rahman, M., & Brazel, C. S.** (2004). The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges. *Progress in polymer science*, 29(12), 1223-1248.
- [50] **Rammal, J., Daou, A., Badan, D. E. L., Baki, Z. A., Darwich, S., Rammal, W., & Hijazi, A.** (2025). Comparative Analysis of Natural and Synthetic Materials for Wastewater Treatment: Plant Powders, Activated Carbon, Biochar, Zeolite, and Nanomaterials. *J. Chem. Rev.*, 7(4), 566-590.
- [51] **Rijavec, T., Strlič, M., & Cigić, I. K.** (2020). Plastics in heritage collections: poly (vinyl chloride) degradation and characterization. *Acta Chimica Slovenica*, 67(4), 993-1013.

- [52] **Schwendt, A.** (2021). The influence of conventional phthalate plasticizers versus emerging and novel non-phthalate plasticizers on recovery From cardiac injury using a mouse model of surgically Induced myocardial infarction.
- [53] **Shariati, S., Kazemi, M., Mithaiwala, H., Bakireddy, A., Stirling, R. B., Allen, R. D., ... & Fini, E. H.** (2025). Accounting for sustainability and performance: Contrasting effects of PET-derived modifiers on asphalt durability. *Resources, Conservation and Recycling*, 220, 108366.
- [54] **Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Lai, C. W., Naushad, M., Shehnaz, ... & Stadler, F. J.** (2022). Activated carbon as superadsorbent and sustainable material for diverse applications. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 4184809.
- [55] **Tomaszewska, J., Sterzyński, T., Woźniak-Braszak, A., & Banaszak, M.** (2021). Review of recent developments of glass transition in PVC nanocomposites. *Polymers*, 13(24), 4336.
- [56] **Tripathi, S., & Hussain, T.** (2022). Water and wastewater treatment through ozone-based technologies. In *Development in wastewater treatment research and processes* (pp. 139-172). Elsevier.
- [57] **Üçüncü, S. İ., Önen, Ö., Ergen, G., Üreten, M., Boz, E., Seferoğlu, K., & Gökçe, B.** (2010). Dioktil adipat'ın (DOA) *Labidochromis caeruleus*' un fryer, 1956 (Cichlidae, teleostei) solungaç histolojisi üzerine etkileri. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 16(2), 343-346.
- [58] **Ünal, S.** (2023). Uluslararası baskı standartlarına uygunluk İçin kontrol uygulaması (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [59] **Üreten, M., & Üçüncü, S. İ.** (2013). The effects of Dioctyl Adipate (DOA) on liver and gill histology of *Sparus aurata* (Sea Bream). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 30(3).
- [60] **Vanarse, V. B., Ahmed, M. M., Singha, D., Paul, A., & Bandyopadhyay, D.** (2025). Depolymerization: A Catalyst for Environmental Sustainability. In *Depolymerization: Concepts, Progress, and Challenges Volume 1: Core Concepts and Fundamentals* (pp. 103-129). American Chemical Society.
- [61] **Wang, F., Gao, B., Yue, Q., Bu, F., & Shen, X.** (2017). Effects of ozonation and powdered activated carbon adsorption on removal of disinfection by-product precursors in reservoir water. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(21), 17945–17954.
- [62] **Völker, J., Stapf, M., Miehe, U., & Wagner, M.** (2019). Systematic review of toxicity removal by advanced wastewater treatment technologies via ozonation and activated carbon. *Environmental Science & Technology*, 53(13), 7215-7233.
- [63] **Yu, M., Lavonen, E., Oskarsson, A., & Lundqvist, J.** (2021). Removal of oxidative stress and genotoxic activities during drinking water production by ozonation and granular activated carbon filtration. *Environmental Sciences Europe*, 33, 124.
- [64] **Xantheas, S. S., Atchity, G. J., Elbert, S. T., & Ruedenberg, K.** (1991). Potential energy surfaces of ozone. I. *The Journal of chemical physics*, 94(12), 8054-8069.
- [65] **Yildiztekin, K. G., Erkekoğlu, P., & Koçer-Gümüşel, B.** (2017). Plastikler Sağlık İçin Bir Tehdit mi? Ftalatlara Genel Bir Bakış. *FABAD Journal of Pharmaceutical Sciences*, 42(2), 111.
- [66] **Zattini, G.** (2013). *New plasticizers for PVC based on renewable resources* [Doktora tezi, Bologna Üniversitesi]. AMS Dottorato.
- [67] **Zeynelgil, A.** (2024). Polivinil klorür (pvc) geri dönüşüm tesisinin yangın güvenliği ve fine kinney analiz metodu ile yangın riskinin değerlendirilmesi= Fire safety of polyvinyl chloride (pvc) recycling facility and assessment of fire risk using fine kinney analysis method (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi).

- [68] **Zhang, X. ve Wang, W.** (2012). Structure and diffusion behavior of trioctyl trimellitate (TOTM) in PVC film. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(16), 5747-5752.
- [69] **Zhou, L., Lu, X., Ju, Z., Liu, B., Yao, H., Xu, J., ... & Zhang, S.** (2019). Alcoholysis of polyethylene terephthalate to produce dioctyl terephthalate using choline chloride-based deep eutectic solvents as efficient catalysts. *Green Chemistry*, 21(4), 897-906.
- [70] **Zou, X. L.** (2015). Combination of ozonation, activated carbon, and biological aerated filter for advanced treatment of dyeing wastewater for reuse. *Environmental science and pollution research*, 22(11), 8174-8181.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Emre SARI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : Halen , İnönü Üniversitesi, Fizikokimya Anabilim Dalı,

MESLEKİ DENEYİM:

- 2021 yılından beri Plastay Kimya A.Ş. 'de Kimya mühendisi olarak çalışmaktadır.