

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTROOKSİDASYON PROSESİNDE ELEKTROT
SEÇİMİ VE PROSES PERFORMANSI ÜZERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Sinem SELKİ**

**Danışman
Doç. Dr. Ömür GÖKKUŞ**

Yüksek Lisans Tezi

**Ekim 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTROOKSİDASYON PROSESİNDE ELEKTROT
SEÇİMİ VE PROSES PERFORMANSI ÜZERİNE
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Sinem SELKİ**

**Danışman
Doç. Dr. Ömür GÖKKUŞ**

**Ekim 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Sinem SELKİ

“EO Prosesinde Elektrot Seçimi ve Proses performansı Üzerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Sinem SELKİ

Danışman
Doç. Dr. Ömür GÖKKUŞ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. Oktay ÖZKAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince her türlü yardım ve fedakârlıklarını esirgemeyen, farklı bakış açıları ile büyük katkıları olan değerli hocam sayın danışmanım Doç. Dr. Ömür GÖKKUŞ'a ve her konuda yardımlarını esirgemeyen Çevre Yüksek Mühendisi İbrahim Yasin KÖKTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim-öğretim hayatım boyunca maddi-manevi desteklerini esirgemeyen, sabır ve anlayışla verdikleri her türlü destek ile beni başarıya ulaştıran çok kıymetli babam Ahmet ÇEVİK, annem Birsal ÇEVİK'e,

Son olarak hayatımın her noktasında bana olan anlayış ve desteğinden dolayı her zaman yanımda olan çok değerli eşim Emre SELKİ'ye en büyük teşekkürlerimi sunuyorum.

Sinem SELKİ

Ekim 2023, Kayseri

ELEKTROOKSİDASYON PROSESİNDE ELEKTROT SEÇİMİ VE PROSES PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Sinem SELKİ

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ekim 2023
Danışman: Doç. Dr. Ömür GÖKKUŞ**

ÖZET

Bu çalışmada EO prosesi performansını doğrudan etkileyen anot malzemelerin özellikleri incelenmiştir. EO prosesinde, arıtım verimi kullanılan elektrot malzemeleri ile yakından ilişkilidir. Kullanılan anot malzeme EO prosesine uygulanan akım şiddeti değerlerini ve potansiyeli önemli ölçüde etkileyerek arıtma maliyetlerini de değiştirebilmektedir. Doğrudan EO prosesinde anot materyali önemli bir role sahiptir. Genel olarak doğrudan EO prosesi sırasında anot olarak Pt, Ti, TiO_2 , Ti/IrO_2 , Pb/PbO_2 , IrO_2 , poroz karbon, fiber karbon, cam karbon gibi elektiriği kolayca ileten ve çözünürlüğü yüksek olan metaller kullanılır. Uzun yıllardır EO prosesinde kullanılan boyutsal kararlı anot (DSA) ve karışık metal oksit (MMO) elektrotlar en çok kullanılan anot malzemelerdir. Bu amaçla çalışma kapsamında; Ti/PbO_2 , Ti/IrO_2 , $Ti/IrO_2/RuO_2$, Ti/RuO_2 , Ti/Pt , grafit, bor katkılı elmas (BDD) ve Ti/SnO_2 anot malzemelerin literatür uygulamaları incelenerek farklı çalışma koşullarında giderim verimleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre BDD anot malzemesinin özellikle mikrokirletici grubundaki bileşikler, ilaç etken madde, pestisitler gibi ayrışmaya karşı dirençli kirleticilerin gideriminde diğer elektrot malzemelere göre çok daha yüksek giderim verimlerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. BDD anotları kullanılan çalışmalarda diğer anot malzemelerine göre giderim verimi daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. BDD anot için literatür araştırmaları incelendiğinde, toplam organik karbon (TOK) %86,0 ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) %92,0 gibi yüksek giderim verimlerinin elde edildiği çalışmalar mevcuttur. Maliyet noktasında alternatif olarak kullanılan kurşun dioksit ile kaplı titanyum, titanyum-iridyum oksit kaplama, titanyum-MMO kaplı titanyum, titanyum-rutenyum oksit kaplama, platin kaplı titanyum, grafit, kalay oksit ile kaplı titanyum anotlar tatmin edici düzeyde giderim verimi sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: EO Anot Malzeme Atıksu Arıtımı Elektrokimya.

ELECTRODE SELECTION IN THE ELECTROOXIDATION PROCESS AND INVESTIGATION OF ITS EFFECTS ON PROCESS PERFORMANCE

Sinem SELKİ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, October 2023

Supervisor: Assoc. Dr. Ömür GÖKKUŞ

ABSTRACT

In this study, the properties of anode materials that directly affect the performance of the electrooxidation process were investigated. In the electrooxidation process, the electrolysis efficiency is closely related to the electrode materials used. The anode material used can change the system costs by significantly affecting the current intensity values and the potential applied in electrooxidation. If the pollutants in the wastewater are decomposed by the oxidation process, removal takes place. The anode metal plays an important role in direct electrooxidation. Generally, metals that conduct electricity easily and have high solubility such as Pt, Ti, TiO₂, Ti/IrO₂, Pb/PbO₂, IrO₂, porous carbon, fiber carbon, glass carbon are used as anodes during the direct electrooxidation process. Dimensionally stable anode (DSA) and mixed metal oxide electrodes (MMO), which have been used in electrooxidation for many years, are known by these names. The electrooxidation process is carried out by coating titanium metal, which is resistant to corrosion, with metal oxides (RuO₂, IrO₂, PbO₂, SnO₂).

For this purpose, in this study; Ti/PbO₂, Ti/IrO₂, Ti/IrO₂/RuO₂, Ti/RuO₂, Ti/Pt, graphite, BDD, Ti/SnO₂ anode materials were evaluated in the literature and compared the removal efficiencies under different operating conditions. According to the results of the study, it has been understood that BDD is much superior to other electrode materials in the removal of pollutants that are resistant to decomposition, especially compounds in the micro-pollutant group, drugs, pesticides. However, titanium anodes coated with lead dioxide, titanium- irinium oxide coating, titanium- mixed metal oxide coated titanium, titanium-ruthenium oxide coating, platinum coated titanium, graphite, boron coated diamond, tin oxide coated titanium provides a high level of removal efficiency, which are used as alternatives in terms of the treatment costs, are satisfactory.

Keywords: Electrooxidation-Anode Material-Wastewater Treatment-Electrochemistry.

İÇİNDEKİLER

ELEKTROOKSİDASYON PROSESİNDE ELEKTROT SEÇİMİ VE PROSES PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK	iii
KABUL VE ONAY.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1

BÖLÜM 1

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. EO (Yükseltgenme) Prosesi.....	3
1.2. Doğrudan (Direkt) Oksidasyon.....	6
1.3. Dolaylı (İndirekt) Oksidasyon.....	8
1.4. Anodik Oksidasyon	10
1.5. EO Prosesinin Avantajları	10
1.6. EO Prosesinin Dezavantajları.....	11
1.7. EO Proses Performansını Etkileyen Parametreler	11

BÖLÜM 2

YÖNTEM ve MATERYAL

2.1. Yöntem ve Materyal.....	14
------------------------------	----

BÖLÜM 3

BULGULAR

3.Literatürde Yaygın Olarak Kullanılan Anot Malzemeler	15
3.1. Kurşun Dioksit (PbO ₂) İle Kaplı Titanyum (Ti/PbO ₂).....	15
3.2. Titanyum- İridyum Oksit Kaplama (Ti/IrO ₂).....	16

3.3. Karışık Metal Oksit Kaplı Titanyum (Ti/IrO₂/RuO₂).....	17
3.4. Titanyum - Rutenyum Oksit Kaplama (Ti/RuO₂)	17
3.5. Platin Kaplı Titanyum (Ti/Pt).....	18
3.6. Grafit.....	19
3.7. Bor Katkılı Elmas (BDD).....	20
3.8. EO Prosesinde Kullanılan Anot Malzemelerin İncelenmesi	21
3.9. EO Prosesi Sırasında Kullanılan Anot Malzemeler Ve Deneysel Koşullar.....	22
3.10. EO Proses Performansını Etkileyen Parametreler	25
3.10.1. pH Etkisi.....	25
3.10.2 Uygulanan Akım.....	26
3.10.3. Destek Elektrolit Konsantrasyonu.....	27
3.10.4. Elektroliz Süresi	28
3.10.5. Anot Malzemenin Etkisi	28
3.11.EO Prosesinde Kullanılan Anot Malzemelerin SEM Görüntüleri.....	29

BÖLÜM 4

SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Sonuç.....	31
4.2 Öneriler.....	32
KAYNAKÇA.....	33
ÖZGEÇMİŞ.....	42

KISALTMALAR

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
A	Akım	(amper)
MMO	Karışık Metal Oksit Elektrotlar	--
MnO ₂	Manganez Dioksit	--
TOK	Toplam Organik Karbon	(mg/L)
DSA	Boyutsal Kararlı Anot	--
DOC	Çözünmüş Organik Karbon	--
Ag	Gümüş	--
CPC	Kapasitabin	--
EO	EO	--
BDD	Bor katkılı elmas	--
OFLX	Ofloksasin	--
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı	(mg/L O ₂)
L	Hacim	(litre)
t	Süre	(dakika)
TC	Tetrasiklin	--
Au	Altın	--
Ir	İridyum	--
Ru	Rutenyum	--
Ti	Titanyum	--
Pt	Platin	--
MTX	Metotraksat	--
IOX	İyoheksol	--

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 1.1.	Oksidant türleri ve EO oluşma potansiyelleri.....	5
Tablo 1.2.	Oksidasyon çalışmalarında kullanılan anot malzemeler.....	10
Tablo 3.1.	Elektrokimyasal yöntemler	19
Tablo 3.2.	Literatürde bulunan elektrooksidasyon çalışmalarında kullanılan anot malzemeler ve deneysel koşullar.	22



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	EO prosesinin görseli.....	4
Şekil 1.2.	EO prosesinde kirleticelerin parçalanması	5
Şekil 1.3.	Doğrudan anodik oksidasyon prosesinde OH [*] radikalleri.....	7
Şekil 1.4.	Dolaylı (indirekt) oksidasyon gösterimi.....	9
Şekil 3.1.	Sn/Sb/Ni: 500/8/1 kaplamalı kullanılmamış Ti anotun tipik SEM görüntüsü (×150, bar = 200 µm).....	29
Şekil 3.2.	PbO ₂ tozunun SEM görüntüleri.....	30



GİRİŞ

EO (EO) prosesinde, çözünemeyen elektrotlar (grafit, Pt, Ru, Ti, BDD) kullanılarak biyolojik olarak parçalanması zor olan organik maddelerin CO₂ ve H₂O'ya kadar oksitlenme işlemi gerçekleşir. EO prosesinde en iyi sonuçların metal oksitlerle yapılan çalışmalar olduğu görülmüştür. Genele bakıldığında ise kurşun, grafit anotlarının kullanıldığı durumlarda iyi sonuçlarla karşılaşılır. EO prosesinde işletim süresi kısa, işletimi kolay ve basit ekipmanlar kullanılarak arıtım işlemi gerçekleştirilmektedir. EO'da özellikle kullanılan anot aktif olarak rol alır. Bu yüzden katalitik etki olarak anotun önemli etkisi vardır. EO prosesinde elektrotların bulunduğu ortam önemli olup iki tür oksidasyon türü görülmektedir. Bu oksidasyon türleri doğrudan ve dolaylı olmak üzere ikiye ayrılır. Organik kirleticilerin parçalanma işlemi anot yüzeyde doğrudan ya da dolaylı olarak gerçekleşir. Doğrudan EO prosesinde; anotun yüzeyine tutunan kirleticiler elektron transferleri ile tekrar reaksiyondan giderilir.

Dolaylı EO prosesinde; elektrotta oluşan kirleticilerin parçalanması olayıdır. Bu parçalanma işlemi sistemde çeşitli kimyasallar bulunması halinde ya da güçlü oksitleyiciler (Cl₂, ClO₂, O₃, O, OH^{*}, ClOH., H₂O₂, O₂, H₂, CO₂) eklenmesi durumunda organik kirleticiler oksidantlarla reaksiyona girerek parçalanma işlemi gerçekleşmesidir. Uzun yıllardır EOda kullanılan DSA ve MMO kullanılan bu isimleri ile bilinirler.

Metal oksit tabakasının titanyum üzerine çökeltilmesiyle oluşan DSA anotların kirleticilerin giderilmesinde önemli rol oynadığı görülmektedir. EO prosesinde kullanılan RuO₂ ve IrO₂ kaplı elektrotlar, bozunmanın gerçekleşmesi için yüksek bir aktivite göstermemektedir. Diğer yandan PbO₂ ve SnO₂ bazlı elektrotlar ise kirleticilerin tamamen bozunmasına yardımcı olurlar. Bu durumda PbO₂ ve benzeri anotlar organik kirleticilerin bozunmasında önemli rol almaktadır.

DSA anot kullanılarak kalıcı olan organik bileşiklerin EOla giderim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar ışığında kullanılan ilaçlar Metotraksat (MTX),

Kapasitabin (CPC), İyoheksol (IOX) gibi kanser ilaçları fabrika atıksuları içerisinde bulunup EO işlemine tabi tutulmuş olup kararlı yapıdaki anot mateyalleri ile atıksu içerisindeki giderimleri sağlanmaya çalışılmıştır.

EO sızıntı suyu, belediye atıksuyu ve içme suyu içerisindeki organik kirleticileri azaltmak için kullanılan bir yöntem olduğu bilinmektedir. Kompleks bir yapıya sahip olan sızıntı suyu kirlilik yükü açısından oldukça zengindir. Sızıntı suyu farklı atıksulara göre konsantre olan yapısı daha iyi görülmektedir. Kirletici yükünün fazla olduğu bu sızıntı suyunun deşarj standartlarına uygun olması için EO prosesi en uygun proses olarak kabul edilmiştir. EO prosesi ile sızıntı suyu içerisindeki organik inorganik maddelerin giderimleri incelenmektedir.

Sulu çözelti içerisinde bulunan Asit Red 20 boyar maddenin EO yöntemi ile arıtımı hedeflendiği araştırma görülmüştür. Bu çalışmada EO yöntemi maliyeti diğer yöntemlere göre düşük olduğu için tercih edilmiştir. Uygulanan EO prosesinde farklı tuzlar uygulanarak en uygun tuz belirlenmiştir. Tuzların uygulanmasında boyar maddenin en uygun tuz koşulunda giderimi sağlanmıştır. Tekstil sanayisinde daha çok rastlanan bu azo boyaların sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında genellikle tercih edilen yöntemin EO prosesi olduğu anlaşılmaktadır [1].

Bu çalışmada çeşitli EO prosesleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda yapılan EO çalışmaları sırasında kullanılan elektrotların giderim verimleri üzerine etkilerinin farklılıkları gözlemlenmiş olup araştırmalar ışığında elektrotların arasındaki giderim verimlerinin etkileri üzerine odaklanılmıştır.

BÖLÜM 1

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

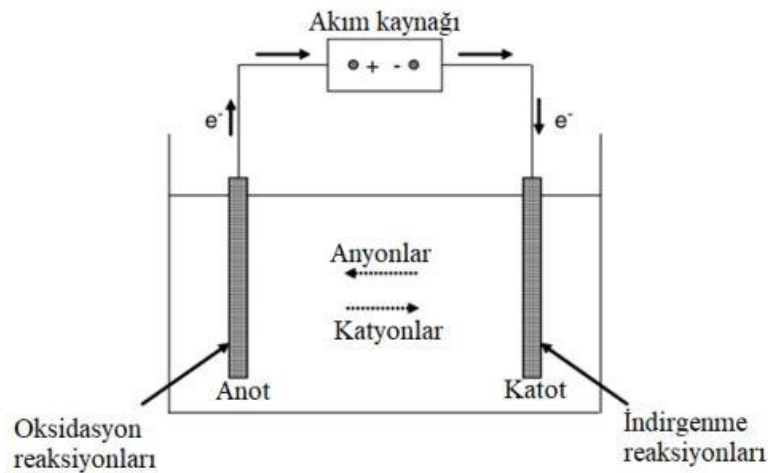
1.1. EO (Yükseltgenme) Prosesi

EO prosesi, parçalanması biyolojik olarak zor olan organik maddelerin ara ürünlere kadar direkt ya da doğrudan oksitlenmesi işlemine denmektedir. Çözünmeyen elektrotlar (Ti, Ru, Pt, paslanmaz çelik vb.) kullanılarak gerçekleştirilen EO işleminde atıksudaki kirleticiler anotta yükseltgenirler. EO prosesinde, kullanılan elektrot anot elektrot olduğundan dolayı etkili olan elektrot anottur ve anodun katalitik etkisi önemlidir [2]. EO prosesinde tercih edilen akım yoğunluğu ve anot yüzeyindeki aktif bölgelerde gerçekleşen organik madde difüzyon hızı, sıcaklık ve pH'a bağlı olarak anot elektrotta oluşan katalitik aktivite farklılık göstermektedir [3].

EO prosesinde kullanılması daha kolay ve basit olan ekipmanlar tercih edilmektedir ve işletim süresi daha kısadır. EO prosesinde, elektroliz verimi kullanılan elektrot malzemesi ile yakından ilişkilidir [4].

Şekil 1.1' de EO prosesinin şematize edilmiş gösterimi verilmiştir.

Anot elektrotta (yükseltgenme) hidroksil radikalleri ve katot elektrotta (indirgenme) ise hidrojen gazı oluşur.



Şekil 1.1. EO prosesinin görseli [3].

Hidroksil radikalleri kirleticilere karşı seçici olmayıp kuvvetli bir oksidandır. Hidroksil radikalleri organik moleküllerin bazı bağlarını destabilize etmekle beraber yüksek oksidasyon potansiyeline neden olurlar aynı zamanda hidroksil radikalleri ömürleri az reaktiftirlerdir. Bu nedenle EO sonucunda çevreye karşı oluşan zararlı ürünler daha az oluşur [5].

Aşağıdaki denklemlerde hidroksil radikallerinin oluşum mekanizmaları gösterilmektedir. [6].



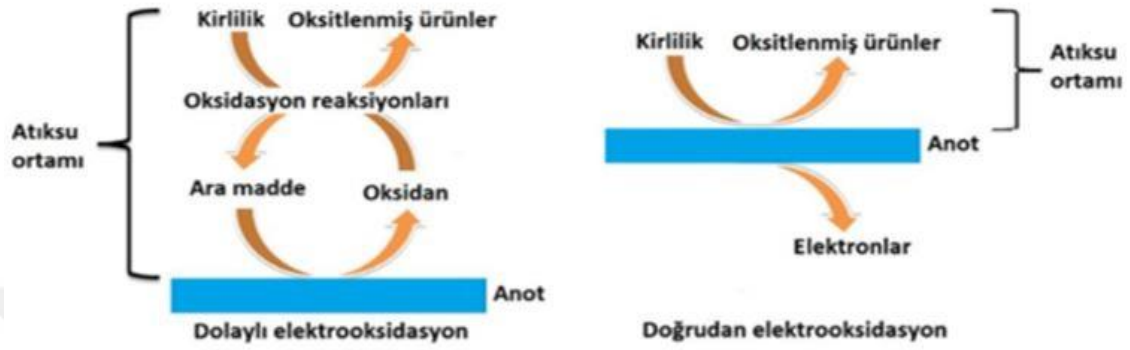
Denklem 1.1 ve 1.2'deki hidroksil radikalleri, hidrojen atomunun molekülden ayrılması ile ya da doymamış bağlara hidrojen atomunun eklenmesi ile organik maddelerle reaksiyona girerler.



Aromatik bileşikler: Ar-H

Alifatik bileşikler: R-H

EO; grafit, bor katkılı elmas, platin gibi anot malzeme kullanılarak organik maddelerin doğrudan ya da dolaylı olarak oksitlenmesi esasına dayanan bir yöntem olarak da bilinmektedir [7].



Şekil 1.2. EO prosesinde kirleticelerin parçalanması[7].

EO prosesi arıtımı biyolojik olarak zor olan atıksularda zehirli ve kalıcı özellikteki bileşiklerin oksitlenmesi, parçalanması kolay olan son ürünler elde etmek, organik maddelerin tamamen ya da kısmen mineralizasyona uğraması ve bununla birlikte CO_2 ve H_2O gibi son ürünlere dönüşmesidir [8].

Tablo 1.1. Oksidant türleri ve EO oluşma potansiyelleri [9].

Oksidant Türleri	Oluşma Potansiyelleri (V)
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$ (Atomik Oksijen)	1,23
$\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (Dikromat)	1,23
Cl^-/Cl_2 (Klor)	1,36
Cl^-/HOCl (Hipokloröz Asit)	1,47
$\text{Ag}^+/\text{Ag}^{2+}$ (Gümüş II İyonu)	150
$\text{Cl}^-/\text{ClO}_2^-$ (Klordioksit)	1,57
$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$ (Hidrojen Peroksit)	1,77
$\text{SO}_4^{2-}/\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ (Peroksodisülfat)	2,01
O_2/O_3 (Ozon)	2,07
$\text{H}_2\text{O}/\text{OH}^\bullet$ (Hidroksil Radikali)	2,80

Elektrooksidasyon prosesinde kullanılan elektrotlar Pt, Ti, Ir, Au, Ru, BDD gibi çözünmeyen inert elektrotlardır. EO prosesinde bu elektrotların kullanılmadığı alanlara bağlı olarak O₂ ve H₂ gazları açığa çıkarlar ve bu gazların açığa çıkması ile oksidasyon sağlanır. Ortamdaki giderilmek istenilen kirletici maddeler bozunabilirliği kolay olan ve zor olan organik bileşikler O₂ ve H₂'ya kadar dönüştürülürler [10]. EO prosesinde dikkate alınan elektrot anot olan elektrottur. EO prosesinde en etkili işletme parametreleri pH, sıcaklık, akım ve kirletici konsantrasyonu olarak sıralanabilir. Anot uygulama esnasında yeterli potansiyele sahipse atık su içerisinde görülen klorür iyonları kloro dönüşür [11].

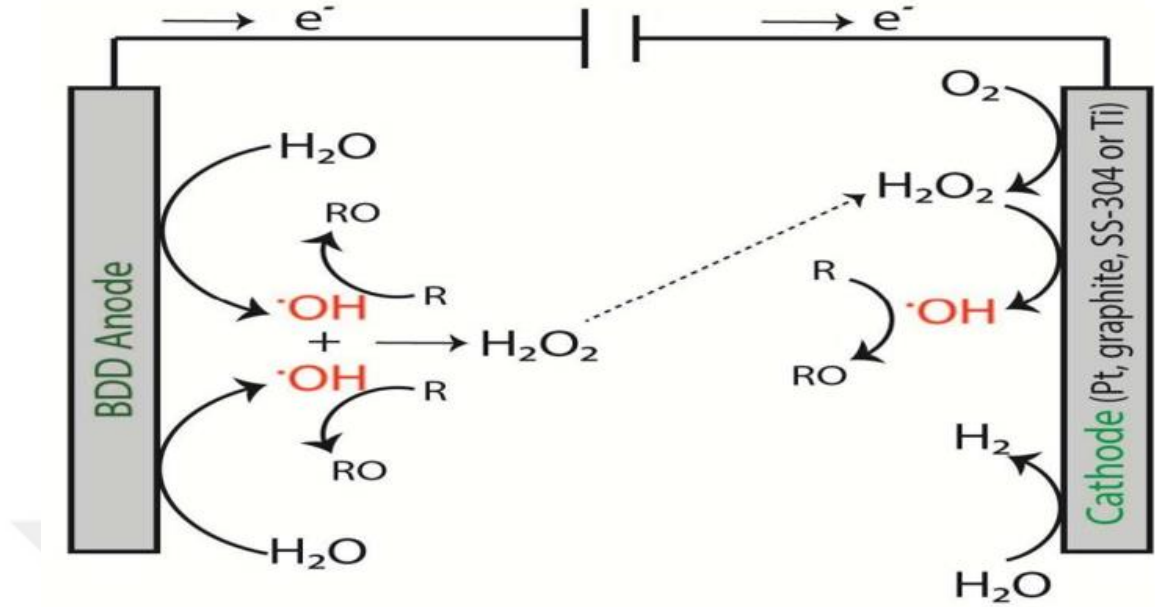


Bu durumda güçlü oksidantlar arasında klorun olduğu söylenebilir. EO prosesinde KOİ giderim veriminin %90 olduğu görülür. Arıtılan atıksuyun türüne göre ise KOİ oranı değişiklik gösterebilir [11]. Anotta oluşan oksidatif faaliyetin katotta oluşan oksidatif faaliyete göre daha baskın olduğu gözlemlenir. Bu durumda ise bu oluşan kimyasal oksidasyonun EO olduğunun bir göstergesidir [12].

Doğrudan ve dolaylı olarak elektrotların bulunduğu ortama göre iki tip oksidasyon olduğu görülmektedir [13].

1.2. Doğrudan (Direkt) Oksidasyon

Anot elektrot doğrudan oksidasyon prosesindeki önemli bir parametredir. Anot materyaller: grafit, Pt, Ti/IrO₂, IrO₂, BDD, Ti, Pb/PbO₂, TiO₂, cam karbon, poroz karbon, karbon fiberdir ve bu materyaller deney esnasında anot olarak kullanılırlar. Katot kısmında ise paslanmaz çelik, Ti, Pt metalleri kullanılır. Anotların katalitik seviyesi yüksek olanlar ile suyun hidrolizi sağlanır ve OH• üretilir. Kirleticiler bu OH• radikalleri ile bozunurlar [13].



Şekil 1.3. Doğrudan anodik oksidasyon prosesinde OH• radikalleri [14]

Elektrokimyasal oluşumunda ve elektrokimyasal parçalanma olarak doğrudan anodik oksidasyon iki farklı türde incelenir. Elektroliz süresi boyunca anot yüzeyde iki oksit tür de elektrokimyasal olarak üretilirler (MO_x). Elektrokimyasal oluşumunda kimyasal olarak absorblanmış aktif oksijen (MO_{x+1}) olarak ve elektrokimyasal parçalanmada ise fiziksel şekilde adsorblanmış oksijen(OH•) olarak görülmektedir [13]. Organik bileşikler (R) hidroksil radikalleri (OH•) tarafından yakılırlar. Selektif oksidasyon ürünleri, kimyasal olarak organik kirleticilere bağlı oksijen ile oksidasyon olması sonucu oluşurlar [14]. EO prosesinde meydana gelen reaksiyonlar:

Anodik Reaksiyonlar



Çözelti reaksiyonları





Katodik Reaksiyonlar



Anodik oksidasyon kimyasalların az eklenmesi ve ikincil kirlenmeye neden olmadığı için deneysel durumlarda kullanılmaktadır. Anot elektrot olarak Ti/Pt-Ir, MnO₂, gözenekli karbon pençesi, karbon fiber, paslanmaz çelik materyalleri kullanılmaktadır. Bu kullanılan elektrotlar yeteri kadar kararlı değildir. En fazla kullanılan anot materyaller BDD, Pt, PbO₂, TiO₂, IrO₂, SnO₂ dir [15].

Organik veya inorganik kirliliğin türü, anotta ve katotta meydana gelen katalitik aktivite ve iyon ve gazların difüzyon oranı ve akım yoğunluğudur.

1.3. Dolaylı (İndirekt) Oksidasyon

Dolaylı oksidasyonu tanımlayacak olursak elektrotlar arasında su ortamında gerçekleşen oksidasyon (dolaylı) indirekt oksidasyon olarak tanımlanır. Dolaylı (indirekt) oksidasyonun etki mekanizması şu şekilde gerçekleşir; elektrokimyasal oksidasyon sırasında güçlü bir oksidant (oksitleyici ajan), anot yüzeyinde elektrik ile üretilir ve sonuç olarak çözeltideki kirlleticileri yok eder [16]. En yaygın oksitleyici ajan genellikle, anotta klorür oksidasyonu ile oluşan klordur. Klor organik kirleticilerin oksidasyonunda aktif olarak rol almayabilir, genellikle amonyak oksidasyonu dolaylı oksidasyon mekanizması aracılığıyla gerçekleşebilir. Geniş bir kullanım alanına sahip olan klor her yerde kolaylıkla bulunması ve etki mekanizmasının yüksek olmasından dolayı atıksuların arıtımında yaygın olarak kullanılır.

Elektrokimyasal olarak üretilen oksidantlara örnekler verilecek olunursa, hidrojen peroksit (H₂O₂), ozon (O₃) ve hipoklorit (OCl⁻) bunlar arasında gösterilebilir. Hidroksil radikallerin oluşumu için metal katalitik araçlar (Ag⁺², Fe⁺³ Co⁺³ vb.) kullanılabilir. Ancak sonrasında metal iyonlarının miktarsal olarak kullanımının artmasıyla başlangıçtaki durumu ile kıyaslanacak olunursa daha yüksek bir toksisiteye sahip atık su

oluşumu ile sonuçlanır [17]. İndirekt oksidasyon verimini etkileyen parametreler; çözeltideki ikincil oksitleyicilerin difüzyon miktarı, reaksiyon sıcaklığı ve pH değeridir [18].

İndirekt oksidasyon sırasında meydana gelen kimyasal denklemler [19].

Anodik reaksiyonlar:



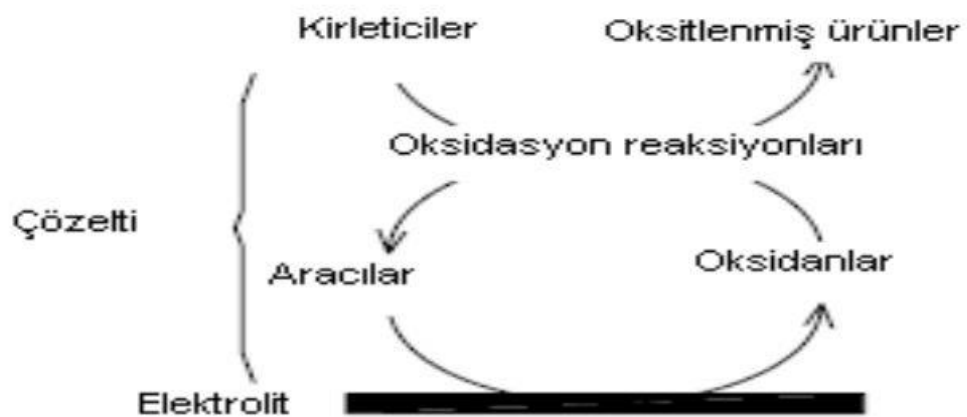
Toplu Reaksiyonlar:



Katodik Reaksiyonlar:



Oluşan reaksiyonlar Şekil 1.3’de grafiksel olarak da verilmiştir.



Şekil 1.4. Dolaylı (indirekt) oksidasyon gösterimi [16].

1.4. Anodik Oksidasyon

Anodik oksidasyon ozon gazı ile oksijenin direkt olarak veya sodyum klorür bulunan çözelti içerisinde hipoklorit ile klor gazının eklenmesiyle organik moleküllerin yükseltgenerek parçalanması işlemine denmektedir. KOİ giderimi organik maddelerin parçalanması ile sağlanmaktadır [20].

Malzeme seçimi anodik oksidasyon prosesi için verimi etkileyen önemli parametrelerdendir. Dolaylı oksidasyon için aşağıda anot için seçilmiş malzemeler verilmiştir [21].

Tablo 1.2. Oksidasyon çalışmalarında kullanılan anot malzemeler [22].

Deneysel Çalışma	Anot Malzemesi	Referans
4-Klorofenolün oksidasyonu	Pt-Karbon Siyahı	[23]
Klorofenollerin elektrokimyasal oksidasyonu	Gözenekli karbon keçesi	[24]
Sulu fenol çözeltisinin elektrokimyasal oksidasyon ile arıtımı.	Camsı karbon	[25]
Organiklerin doğrudan elektrokimyasal olarak yükseltgenmesi	Ti/Pt-Ir	[26]
Nitritin elektrokimyasal olarak arıtımı	Paslanmaz Çelik	[27]
Tekstil endüstrisi atıksuyunu elektrokimyasal arıtımı	Ti/RuO ₂	[28]
Deri endüstrisi atıksularının elektrokimyasal arıtımı	Fiber Karbon	[29]
Deri endüstrisi atıksularında bulunan sülfidlerin elektrokimyasal oksidasyonu	MnO ₂	[30]

1.5. EO Prosesinin Avantajları

EO prosesinin atıksular içerisindeki kirlilik probleminin giderilmesi için avantajları aşağıda sıralanmaktadır.

- Oksidasyon prosesinde kimyasallara ihtiyaç duyulmamasıdır.
- Oksidasyon yapılırken işletim süresinin kısa olması, basit ve kolay kurulum olmasıdır.
- EO prosesi birden fazla kirlilik yayan maddelerin giderimi için kullanılabilen bir proses olmasıdır.

- Elektrokimyasal prosteşte çoğu zaman kullanılan yakma ve kritik oksidasyon olan eşdeğer elektrokimyasal prosteşte farklı olarak düşük sıcaklık ve basınç'a ihtiyaç duyulur ve bu durumda reaksiyon içerisine girmemiş olan ürünlerin buharlaşması engellenmiş olur [31].
- Kontrol işlemlerini, veri toplama ve proses otomasyonunu elektrokimyasal çalışmalar sırasında elektriksel olarak değişkenlik gösteren özellikler kolaylaştırır.
- Toksik kirletici içeren atık suların arıtılmasını sağlar.
- Deneysel çalışmalar sırasında kontrol etmesi kolaydır ve etkili sonuçlar alınan prosteştir.
- Maliyeti genel olarak elektrięin ucuz olduğu ortamlarda düşüktür [32].

1.6. EO Prosesinin Dezavantajları

- Çalışmalar esnasında kullanılan elektrotların yüzeyinde oluşan geçirimsiz tabaka normalden fazla temizlenmesi gerekmektedir.
- Kullanılan elektrotlar uzun ömürlü ve ucuz olmalıdır.
- Arıtılan atıksular genelde iletkenliği az ya da fazla olması durumunda elektrolit gerekmektedir.
- Akım verimliliği kütle taşımının kısıtlı olması durumunda azalabilir [31-32].

1.7. EO Proses Performansını Etkileyen Parametreler

Organik kirlilikleri yüksek olan atıksuların arıtımında elektrokimyasal proses olan EO prosesinin performansını etkileyen parametreler;

pH: Direkt olarak ortamda oluşan elektrolitik reaksiyonları etkiler ve bu yüzden önemli bir parametre olarak görülür. Hidroksil radikallerinin oluşumu ve anodik oksidasyon için pH etkilidir. pH, oksidasyon prosesinde düşme eğilimi gösterir. Arıtım sırasında gözlemlenen giderim verimleri başlangıç pH değerine ve son durumdaki pH değerlerine bağlıdır. En iyi giderim verimi asidik şartlarda anot malzemesine göre belirlenebilirken bazı durumlarda ise bazik veya nötral pH değerine göre en iyi arıtım sonuçlarına ulaşılmış

olur. Görülen bu farklılıklar, pH aralıklarının değişim göstermesinden ve arıtımı yapılan atıksuyun kompozisyonlarının kompleks oluşturmasındandır [33].

Yapılan EO çalışmasında pH değerleri 3, 5, 7, 9 ve 11 olarak bulunmuştur. Çalışma esnasında KOİ ve renk giderim açısından incelendiğinde KOİ giderim veriminde değişiklik olduğu gözlemlenmiştir. KOİ'deki bu değişimin sebebi pH'taki değişimin partiküllerin yüzey yükünde değişim meydana getirmesi ve buda çözelti içerisindeki organik maddelerin parçalanmasına yardımcı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu EO çalışmasında pH-11 diğer uygulanan pH değerlerine göre en yüksek verim sağladığı saptanmıştır [72].

Ön arıtım: Proses verimini artırmak için EO işlemi yapılmadan önce ön arıtım yapılmalıdır. EO prosesi sırasında atıksu içerisindeki katı madde ayrımı yapılmış olan anotların pasivizasyonu engellenir ve akım yoğunluklarında daha yüksek artıma verimleri gözlemlenir. Akım yoğunluğu verimi atıksuyun içindeki katı maddeler sayesinde ortam direncini artırarak düşer. Bu esnada sisteme verilen akım ısıya dönüşür ve elektrik maliyeti artar, arıtma verimi düşer [65].

Akım Yoğunluğu: Reaksiyon hızını kontrol eden en önemli prametre akım yoğunluğudur. EO prosesi için akım yoğunluğu optimizasyonu önemlidir. Sisteme akım yoğunluğu fazla uygulandığı durumlarda işletme maliyetinde artış meydana gelir. Arıtım süresi ile akım yoğunluğu çalışmalar esnasında birbiri ile ilişkilidir. Kısa sürede bir arıtım işlemini gerçekleştirebilmek için akım yoğunluğunu artırmak yeterli olacaktır [34].

EO çalışmasında askıda katı madde (AKM), KOİ, bulanıklık ve renk giderim verimleri üzerine uygulanan akım yoğunluğunun etkisini incelenmiştir. Anot olarak Ti/Pt ve Ti/IrO₂/RuO₂ elektrotlar kullanılmıştır. Akım yoğunlukları 18,55; 23,19; 27,83; 32,47; 37,11 mA/cm² değerleridir. Akım yoğunluğunda artış olduğunda giderim verimlerinde de artış gözlemlenmiştir. Ti/IrO₂/RuO₂ ve Ti/Pt anot elektrotları kullanılarak yapılan bu çalışmada her iki anot metaryal için giderimin en iyi sonuç verdiği akım yoğunluğu değeri 18,55 mA/cm² olarak belirlenmiştir [91].

Destek Elektrolit Türü ve Konsantrasyonu: EO prosesinde kullanılan elektrolit türü atık suyun iletkenliğini artırır. Destek elektrolit dolaylı (direkt) oksidasyon proses hızını artırmak içinde eklenir. Çözelti içerisine eklenen destek elektrolit çözeltideki reaksiyonlar

yardımıyla dolaylı (direkt) oksidasyonu yükselten oksidantlara dönüşür. Destek elektrolit konsantrasyonu artıkça oksidant miktarında artış görülür böylece EO prosesinin etkinliği belirli noktalara kadar artış sağlar [93].

Anot malzemesi: EOu etkileyen faktörler anot malzemesi krozyona olan direnci anotların katalitik aktivitesi olarak sıralayabiliriz. Organik içeriği yüksek olan atıksuların EOunda farklı anot malzemeler kullanılmıştır. Bu kullanılan malzemeler aşağıda sıralanmaktadır.

- Kurşun dioksit (PbO_2) ile kaplı titanyum (Ti/PbO_2)
- Titanyum - iridyum oksit kaplama (Ti/IrO_2)
- Titanyum - karışık metal oksit kaplı titanyum ($\text{Ti/IrO}_2/\text{RuO}_2$)
- Titanyum - rutenyum oksit kaplama (Ti/RuO_2)
- Platin kaplı titanyum (Ti/Pt)
- Grafit
- Bor katkılı elmas (BDD)
- Kalay Oksit (SnO_2) ile kaplı titanyum (Ti/SnO_2) EO'da kullanılan anot malzemelerden bazıları yukarıda sıralanmıştır.

BÖLÜM 2

YÖNTEM ve MATERYAL

2.1. Yöntem ve Materyal

Bu çalışmada literatürde bulunan farklı anot malzemelerinin çeşitli atık sulardaki giderim verimleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmayı yapmak için Google Akademik, Web of Science, Sciencedirect ve Yök Tez Merkezi web sitelerindeki ilgili makaleler ve tezler incelenmiş olup özellikle 2013 ve 2022 yılları aralığındaki makale sonuçlarına yer verilmiştir. Literatür araştırmaları veri tabanları üzerinden “EO”, “Anot Malzeme”, “Atıksu Arıtımı” ve “Elektrokimya” anahtar kelimeleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 3

BULGULAR

3.Literatürde Yaygın Olarak Kullanılan Anot Malzemeler

3.1. Kurşun Dioksit (PbO₂) İle Kaplı Titanyum (Ti/PbO₂)

Kullanılan anot malzemesi türleri elektrokimyasal oksidasyon prosesini oldukça etkilemektedir [35-36]. Elektrokimyasal oksidasyonu elektrotlar katalize ederler ve elektrotların farklı kristal yapılarına bağlanırlar [37]. Bu durumda, kontrollü koşullarda CBZ'nin Ti/SnO₂, Ti/BDD ve Ti/PbO₂ anotlarının oksidasyonunu belirlemek için deneyler yapılmıştır: akım, yoğunluk (2A), geri dönüşüm akış hızı (333ml/dk), NaSO₄ konsantrasyonu (400mg/L) ve ilk CBZ konsantrasyonu (10mg/L) değerleri kullanılarak deneysel çalışma yürütülmüştür.

CBZ giderimi için Ti/BDD ve Ti/PbO₂, Ti/SnO₂'den daha etkilidir. 100 dakikalık çalışmanın sonunda Ti/PbO₂ ve Ti/BDD ile daha yüksek CBZ uzaklaştırma yüzdeleri (yaklaşık %90) gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu çalışmanın bir sonraki adımı için bu iki elektrot seçilmiştir. Aslında, elektrot malzemesinin doğası, doğrudan oksidasyon işleminin hem seçiciliğini hem de verimliliğini güçlü bir şekilde etkiler.

Karbamazepin gideriminde, üç farklı anot malzemesi kullanılarak giderim yapılmıştır: Ti/SnO₂, Ti/PbO₂ ve Ti/BDD silindirik örgü elektrot malzemeleri kullanılmıştır. Bu çalışmanın ilk kısmı, elektrolit olarak sodyum sülfat kullanılarak CBZ'nin sentetik ortamında gerçekleştirilmiş olup böylece elektrolizin doğrudan etkisi kanıt olarak alınmıştır. CBZ giderimi için en iyi sonuçlar Ti/PbO₂ ve Ti/BDD anot ile elde edilmiştir. Faktöriyel tasarım (FD), elektroliz süresi ve akım yoğunluğunun CBZ'nin elektrokimyasal oksidasyonu üzerinde en etkili parametreler olduğunu göstermiştir. Bu iki ana faktörün incelenmesi üzerine etkisi yaklaşık %75 iken, anot malzemesinin etkisi, geri dönüşüm akış hızı ve diğer etkileşim sonucunda ise %25'i temsil etmiştir. Ayrıca,

CBZ'nin çıkarılması için en uygun çalışma koşullarını tanımlamak için merkezi bir kompozit tasarım (CCD) kullanılmıştır. Akım yoğunluğu ve elektroliz süresinin, Ti/PbO₂ veya Ti/BDD anot malzemesi kullanılarak CBZ çıkarılması için çok anlamlı olduğu bulunmuştur. 101 dakikalık tedavi süresi boyunca 1,37 A akım yoğunluğunda çalıştırılan Ti/PbO₂ ve 232 ml/dk geri dönüşüm akış hızı, etkinlik/enerji tüketimi açısından en uygun koşullar olarak bulunmuştur. Bu koşullar altında sistem, CBZ'nin %88 ± 1.2'sini oksitlemiştir ve büyük miktarlarda (P-Nitrosodimetilanilin) RNO'yu 3.159 mg/L/dk oranında uzaklaştırmıştır. Bu süreç, atık sulardan ortaya çıkan kirleticileri gidermek için üçüncül arıtma olarak kullanılabilecek umut verici bir teknoloji olduğu görülmüştür [38].

3.2. Titanyum- İridyum Oksit Kaplama (Ti/IrO₂)

Fenol arıtımı için Ti/IrO₂ elektrodu ile birlikte elektrooksidasyon prosesi için birçok elektrot kullanılmıştır. Ti/SnO₂ elektrodu ile yüksek akım verimliliği sağlanmıştır ve aynı zamanda yarı tam toplam organik karbon eliminasyonunda sağlanmıştır. Öte yandan, Ti/IrO₂ ve Ti/RuO₂ gibi elektrotlar nispeten akım verimi daha düşüktür [36-39]. Elektro organik sentez için sözde potansiyostatik elektroliz altında iki bölmeli bir akış hücresinde Ti/IrO₂ üzerinde fenol oksidasyonu ile ilgili yakın zamanda yayınlanmış bir çalışmada [40]. Ti/IrO₂ elektrot kullanıldığında fenolün neredeyse tamamen organik aromatik ürünlere (hidrokinon, benzokinon ve pirokatekol) dönüştüğü tespit edilmiştir. Genel olarak, reaksiyon ara ürünlerinin dağılımı, elektrolit bileşimi ve sıcaklık dahil olmak üzere çalışma koşullarının yanı sıra elektrot malzemelerine önemli ölçüde bağımlı görünmüştür.

Deneyisel çalışmada tek bölmeli bir hücre kullanılarak IrO₂ elektrotları üzerinde fenolün anodik oksidasyonu incelenmiştir. Farklı deneyisel koşullar altında fenol oksidasyonu ve organik dönüşüm için tipik bir "aktif" anot olan Ti/IrO₂'nin aktivitesini değerlendirmek için 1M HClO₄ içinde döngüsel voltametri ve toplu elektroliz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca hem reaksiyon sıcaklığının hem de elektrolite farklı elektroaktif anyonların (Cl⁻, Br⁻ ve SO₄²⁻) eklenmesinin bozunması üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur. Ti/IrO₂ anot üzerindeki HClO₄ içindeki fenolün elektrokimyasal oksidasyonu, döngüsel voltametri ve elektroliz deneyleri ile incelenmiştir. Elektrot yüzeyi, muhtemelen döngüsel voltametri ölçümleri sırasında polimerik bir film oluşturmuştur bu nedenle pasifleşmeye maruz kalmıştır. Reaksiyon sıcaklığı ve elektroaktif anyonların varlığı oksidasyon sürecini

etkilemiştir. Fenolün anodik oksidasyonu, düşük akım verimliliğine sahip olup hidrokinon, pirokatekol ve 1,4-benzokinon gibi ara ürünler vermek üzere fenolün hidroksilasyonu/oksidasyonu yoluyla ilerliyor gibi görünmüştür [41].

3.3. Karışık Metal Oksit Kaplı Titanyum (Ti/IrO₂/RuO₂)

Yüksek katalitik aktiviteye sahip olan rutenyum oksit (RuO₂), Oksijen oluşum reaksiyonu (OER) için en çekici elektrokatalitik kaplama olarak bilinmektedir [42-43]. Asit çözeltisinde Ti/RuO₂ anod stabilitesinin olmaması uygulamanın işleyişini sınırlar[44]. IrO₂, Oksijen oluşum reaksiyonu (OER) için geniş çapta araştırılan bir elektrokatalitiktir. Asit ortamda RuO₂'den yaklaşık 20 kat daha uzun hizmet ömürlüdür [45].

Bu çalışmanın amacı, Ti/IrO₂-RuO₂ anodunun sülfürik asit çözeltisindeki yüzey morfolojisini ve elektrokimyasal davranışını ortaya koymaktadır. Yüzeyde gözlenen ince kristallerin kristalit boyutu, artan kalsinasyon sıcaklığı ile 52 nm'den 539 nm'ye yükselirken, kesit boyutu 48'den 483 nm'ye çıkmaktadır. Artan kalsinasyon sıcaklığı kaplamanın aktif yüzey alanını azaltır. 350-450 °C'de kalsine edilen anotlar için aktif yüzey alanına "iç" aktif yüzey hakimdir, 500-600 °C'de kalsine edilen anotlara ise "dış" aktif yüzey hakimdir.

Anotların elektrokatalitik aktivitesi, kaplamaların çatlaklarına ve kristalleşme davranışına atfedilebilecek kalsinasyon sıcaklığının artmasıyla azalır. Hazırlanan Ti/IrO₂-RuO₂ anotlarının hız belirleme adımı, düşük aşırı potansiyel alanındaki yeniden düzenleme adımıdır. 450–600°C'de kalsine edilen anotların hız belirleyici adımı, yüksek aşırı potansiyel alanında ilk ara S-OH*ads adımının oluşumu ve adsorpsiyonudur. Anotların hizmet ömrü, esas olarak kaplamanın kompakt yapısına ve yüksek kristallik derecesine bağlı olarak kalsinasyon sıcaklığının artmasıyla artar. Elektrokatalitik aktivite ve stabilite göz önüne alındığında, Ti/IrO₂-RuO₂ anotunun hazırlanması için 450–500°C'lik orta sıcaklık uygundur [46].

3.4. Titanyum - Rutenyum Oksit Kaplama (Ti/RuO₂)

Ofloksasinin (OFLX) bozunması ve mineralizasyonu için Ti/RuO₂ elektrotunun potansiyelini uygulanan akım (I), başlangıç pH'ı, başlangıç OFLX konsantrasyonu (C₀)

ve destekleyici elektrolit konsantrasyonu gibi çeşitli EO parametrelerinin %OFLX uzaklaştırma verimliliği ve %TOC giderim verimi üzerindeki etkileri görülmüştür.

Rutenyum dioksit (Ti/RuO_2) ile kaplanmış titanyum, farklı organik kirleticilerin bozunması için umut verici bir elektrot malzemesi olarak ortaya çıkmıştır [47]. Ucuz olmanın yanı sıra, Ti/RuO_2 anotları boyutsal olarak kararlıdır ve 2,0 V'luk yüksek oksijen oluşum potansiyeline sahiptir [48].

Bu deneysel çalışmada, daha önce bildirilmemiş olan EO yöntemiyle sentetik atık sudan ofloksasin (OFLX)'in bozunması ve mineralizasyonu için Ti/RuO_2 elektrotunun potansiyelini belirlemek için kullanılmıştır.

Optimum pH ve akım (I) sırasıyla 6,8 (OFLX atık suyunun doğal pH'ı) ve 1 A olarak bulundu. Mineralizasyon akımı değeri 0,25'ten 1 A'ya artmasıyla %7,8'den %4,9'a kadar düşmüştür. 30 dakikalık elektrolizde OFLX gideriminin %80'i ve 240 dakikalık elektrolizde %46,3 TOC giderimi elde edilmiştir [49].

3.5. Platin Kaplı Titanyum (Ti/Pt)

Anot malzemesi olarak platin kaplı titanyum (Ti/Pt) elektrot kullanılan bu deneysel çalışmada mezbaha atıksularından EO prosesi ile KOİ ve renk gideriminde sistemin performansını etkileyen akım yoğunluğu ve pH giderim verimleri incelenmiştir.

Mezbaha atıksularından alınan örneklerle yapılan çalışmada KOİ ve renk gideriminde pH'ın etkisi pH değerleri 3,0~7,0 (doğal), 9,0 ve 11,0 için 4,06 mA/cm² akım yoğunluğu, 400 devir/dakika karıştırma hızı ise 0,2 M NaCl destek elektrolit kullanılmıştır. Çalışma 180 dakika boyunca yapılmıştır. pH = 3,0, ~7,0 (doğal), 9,0 ve 11,0 olduğu durumlarda KOİ giderimi için %70,48, %80,05, %75,50 ve %67,03 olmaktadır. Renk için giderim verimleri ise %95,58, %98,64, %97,09 ve %92,36 olarak hesaplanmıştır. Yürütülen deneysel çalışmalar göstermektedir ki; mezbaha atıksuyunda pH= ~7,0'de (doğal pH) KOİ ve renk giderimi açısından en yüksek verim elde edilmektedir.

Mezbaha atıksularından alınan örneklerle yapılan çalışmada KOİ ve renk gideriminde akım yoğunluğunun etkisi incelendiğinde, kullanılmış olan akımlar 4,06, 6,09, 8,12, 10,15 ve 12,18 mA/cm², NaCl konsantrasyonu 0,2M ve pH değeri 7 olduğunda giderim verimleri; KOİ için %80,05, %87,29, %95,76, %97,84 ve %99,70 olarak görülmüş. Renk

giderimi için ise; %92,36, %96,15, %97,45, %98,84 ve %99,97 değerleri bulunmuştur. Akım yoğunluğu arttıkça KOİ ve renk gideriminde artış gözlemlenmiştir [50].

3.6. Grafit

EO yöntemi ile antep fıstığı işleme atıksuyunun arıtımı üzerine olan çalışmada anot malzeme olarak grafit elektrot kullanılmıştır. Bu çalışma esnasında KOİ, TF ve TOK giderim verileri dikkate alınmıştır.

İçerisinde KOİ, TOK, fenol bulunduran atık suların arıtımı için birçok elektrokimyasal ve kimyasal yöntemler kullanılır.

Bu yöntemler aşağıda gösterildiği gibi sıralanmıştır.

Tablo 3.1. Elektrokimyasal yöntemler

Kullanılan yöntemler	Referans
Koagülasyon	[51,52]
Elektrokoagülasyon	[53,54]
Fenton	[55,56]
ElektroFenton	[57,58]
Kimyasal oksidasyon	[59,60]
EO	[61,62]

Bu elektrokimyasal yöntemler arasında antep fıstığı atıksuyunun arıtımı için EO yöntemi seçilmiştir. Çözünemeyen anot malzemesi olarak grafit seçilmiştir [63,64].

FİL, B. A ve diğ.(2012) tarafından yürütülen çalışma sonuçlarına göre giderim verimlerini incelenerek başlangıç pH'sı 3 olan atık suyun pH'sını 9'a arttırıldığında TOK giderimi %30,11'den %16,33'e, KOİ giderimi %37,83'den %17,08'ye ve TF giderimi %76,02'den %43,78'e düştüğü görülmüştür. Giderim veriminin görüldüğü üzere en yüksek olduğu pH değeri 3'tür.

Karıştırma hızı 100 rpm'den 400 rpm'ye çıkarıldığında giderim verimleri TOK %5,54 KOİ %10,79 ve TF %16,4 oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir.

Karıştırma hızı 400 rpm'den 600 rpm'ye çıkarıldığında ise TOK %2,12, KOİ %5,89 ve TF %4,85 oranlarında azalma olduğu belirtilmektedir. Bu veriler ışığında en yüksek giderim veriminin 400 rpm karıştırma hızı olduğu rapor edilmektedir [65].

3.7. Bor Katkılı Elmas (BDD)

BDD elektrotlar; anilin, siyanür, amonyak, fenoller, yüzey aktif maddeler ve boyar maddeler gibi maddelerin arıtımında kullanılan en aktif anot olarak bilinmektedir [66].

BDD son yıllarda yaygın olarak çalışmaya başlanmıştır. BDD anot malzeme, metal oksitlere göre kirleticilerin doğrudan oksidasyonu için daha uygun yüzey yapısına sahiptirler [67].

Kısacık, İ ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada, içerisinde benzen bulunduran ($3,2 \times 10^{-3}$ M) 1 M HClO₄ çözeltisi ile zamana bağlı olarak atmosfere açık koşullarda anot olarak BDD elektrot kullanılarak (2 V; 2,4 V ve 3 V) potansiyel değerlerinde araştırma yapılmıştır [68].

UV-VIS spektrofotometrede ölçüm yapıldığında üç ayrı potansiyelin farklı zaman aralıklarında benzen derişiminde azalma olduğu belirtilmektedir. Araştırma sonuçlarına göre, 60 dk'lık bir elektroliz işlemi sonrasında 2V = %27 - 2,4V = %28,14 ve 3V sabit potansiyel için %11,40 oranlarında benzene rastlanmıştır. Aynı zamanda, 2V ve 2,4V sabit potansiyellerinde 3V sabit potansiyeline göre daha yüksek derişimlerde benzen miktarı gözlemlenmiştir. Bu durumda 2V ve 2,4V sabit potansiyellerinde hidroksil radikallerinin üretilmediği rapor edilmektedir. Araştırma sonuçlarına göre, 3V sabit

potansiyel değeriinde benzen daha fazla bozunmaktadır. EO çalışmasında 60 dk boyunca benzen giderimi %8,78 civarında bir bozunmaya uğramıştır [68].

3.8. EO Prosesinde Kullanılan Anot Malzemelerin İncelenmesi

Literatürde EO prosesinde uygulanan farklı anot malzemeler üzerinde çalışmalara rastlamak mümkündür. İncelenen bu çalışmalarda özellikle titanyum taban malzeme olarak kullanılmış olup çeşitli MMO yüzey kaplaması işlemlerinin yapıldığı dikkat çekmektedir. Bu karışık metal oksitlerle kaplama çalışmalarında özellikle göze çarpan anot türleri; Ti/IrO₂/RuO₂, BDD, Ti/Pt, MMO, Ti/Pt, Sn/Sb/Ni-ti, Ti/IrO₂Ta₂O₅ RuO₂-IrO₂/Ti olup buna ilişkin literatürde çeşitli kirleticilerle hazırlanmış çözeltilerin EO sonuçları Tablo 3.1’de verilmektedir.

EO prosesinde genellikle kullanılan DSA anot türleri; Tetrasiklin, Ampisilin, tannik asit, metilen mavisi gibi ilaç etken maddelerin gideriminde sıklıkla kullanılmıştır. EO proses performansında titanyum anot malzeme olarak yalnız başına stabil değildir. Bu sebeple elektroliz işlenleri sırasında giderim verimlerinde çeşitli dalgalanmalara neden olabilmektedir. Titanyum anot malzeme, yüzey kaplama işlemleri ile birlikte yapısal olarak güçlendirilerek iyi bir anot malzemeye dönüştürülebilmektedir. EO çalışmalarında titanyumun diğer anot malzemelere göre daha yaygın olarak kullanılmasının temel sebebi maliyet olarak daha ucuz olması ve ayrıca saf halde stabil olmaması nedeni ile yüzey kaplama işlemleri ile daha kararlı hale getirilmek suretiyle etkin bir anot malzeme olarak kullanım imkanına sahip olmasıdır.

3.9. EO Prosesi Sırasında Kullanılan Anot Malzemeler Ve Deneysel Koşullar

Tablo 3.2. Literatürde bulunan elektrooksidasyon çalışmalarında kullanılan anot malzemeler ve deneysel koşullar.

Kullanılan Anot Malzeme	Kullanılan Katot Malzeme	pH	Kirletici Türü	Akım	Destek Elektrolit Türü	Elektroliz Süresi	Reaktör Hacmi	Giderim Verimi	Referans
Pt (platin)	Paslanmaz çelik	-	Ultrafiltrasyon Konsantratu	360 A/m ²	-	240 dk	-	KOİ %36,5-92,0 TOK %31,3- 86,8	[69]
BDD, Ti/Pt, MMO	Paslanmaz çelik	-	Fenol	125 mA/m ²	NaCl	300 dk	-	TOK %100	[70]
Ti/Pt	Titanyum	7	Mezbaha atıksyu	12,18 mA/cm ²	NaCl	180 dk	-	KOİ % 99,7 Renk %99,9	[49]
Titanyum	Paslanmaz çelik	11	Asit Red x	0,33A/m ²	KCl	200 dk	-	KOİ %99,5 Renk %99,5	[1]
Sn/Sb/Ni-ti	Platinize titanyum	8	Ampisilin	50 mA/cm ²	KCl	90 dk	500 ml	KOİ %40,1	[71]
Ti/IrO ₂ -Ta ₂ O ₅	Karbon, PTFE	5.9	Tannik asit	0,5A	Na ₂ SO ₄	40 dk	800 ml	TOK %15,3	[72]
RuO ₂ -IrO ₂ /Ti	Titanyum	3	Reaktif boyar madde	0,32 A/dm ²	NaCl	20 dk	-	Renk %99,0	[73]

Tablo 3.1 (devamı)

Kullanılan Anot Malzeme	Kullanılan Katot Malzeme	pH	Kirletici Türü	Akım	Destek Elektrolit Türü	Elektroliz Süresi	Reaktör Hacmi	Giderim Verimi	Referans
DSA-Cl ₂	Titanyum	6	Tetrasiklin	10 mA/m ²	NaCl	15 dk	-	TC %90,0	[74]
Ti/TiO ₂ -RuO ₂	Titanyum	3.5	Fenol	40 mA/cm ²	Na ₂ SO ₄	300 dk	-	TOC%99,0	[75]
Ti/TiO ₂ -RuO ₂ -IrO ₂	Titanyum	3.6	Fenol	60 mA/cm ²	Na ₂ SO ₄	240 dk	-	TOC%99,0	[75]
Titanyum	Titanyum	7	Biyolojik çamur	-	Na ₂ SO ₄	20 dk	1000 ml	KES %68,0	[76]
Titanyum	Paslanmaz çelik	7.48	Denim Ürünü Atıksuyu	120 A/m ²	-	49 dk	500 ml	KOI%70,0 TÇK%45,0 Renk%97,0	[77]
Ti/IrO ₂ /RuO ₂	Paslanmaz çelik	5	Metilen Mavisi	2.5 mA/cm ²	NaCl	30 dk	2000 ml	Renk%78,3	[78]
Ti/IrO ₂ -Ru-Ti/Ru-Ti/IrO ₂ -Ru	Paslanmaz çelik	7	Kanser ilaçları	30 mA/cm ²	Na ₂ SO ₄	30 dk	350 ml	MTX%56,8 IOX%52,0 CPC%35,4	[79]
BDD	Paslanmaz çelik	7	Kanser ilaçları	30mA/cm ²	Na ₂ SO ₄	30 dk	350 ml	IOX%53,4 MTX%86,1 CPC%99,0	[79]

Tablo 3.2 (devamı)

Kullanılan Anot Malzeme	Kullanılan Katot Malzeme	pH	Kirletici Türü	Akım	Destek Elektrolit Türü	Elektroliz Süresi	Reaktör Hacmi	Giderim Verimi	Referans
DSA anotları	Paslanmaz çelik	-	Ultrafiltrasyon Konsantratu	360 A/m ²	-	240 dk	-	TOK %31,3 KOİ %36,5	[80]
BDD	Paslanmaz çelik	7.67	Ultrafiltrasyon Konsantratu	120 A/m ²	-	240 dk	-	TOK %86,0 KOİ %92,0	[80]
Titanyum	Titanyum	8.5-9.5	Sızıntı suyu	-	-	60 dk	600 ml	KOİ %85,0 AKM %31,0	[81]
Grafit	Paslanmaz çelik	3	Antep Fıstığı İşletme Atıksuyu	-	-	200 dk	-	KOİ %37,8 TOK %30,1 TF %76,0	[82]
Ti/IrO ₂ /RuO ₂	Paslanmaz çelik	4-9	MTX (methotrexate)	15-45 mA/cm ²	Na ₂ SO ₄	30 dk	350 ml	MTX % 99,9	[83]

3.10. EO Proses Performansını Etkileyen Parametreler

Literatürde EO prosesini farklı anot malzemelerle inceleyen çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu çalışmalarda titanyum taban malzeme olarak kullanılmış olup çeşitli MMO yüzey kaplaması işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.10.1. pH Etkisi

Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde EO prosesi ile atıksu arıtımı çalışmalarında pH aralığının genellikle 3-9 aralığında seçildiği dikkat çekmektedir. Ayrıca deneysel çalışmalar esnasında pH ile ilgili herhangi bir müdahale yapılmamakla birlikte yalnızca başlangıç pH ayarlaması yapılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Elektrokimyasal sistem içerisinde kullanılan destek elektrolit, reaktör içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple pH parametresi EO prosesi için oldukça önemli bir işletme kriteridir. EO çalışmasında hidroksil radikallerinin oluşumu için pH önemli derecede etkilidir. EO çalışmaları sırasında EO'un baskın olduğu durumlarda pH'da genellikle yukarı yönlü bir eğilim görülebilmektedir. Giderim verimlerinde pH'nın etkisi başlangıç durumunda da etki gösterebildiği gibi son durumdaki pH artışı şeklinde de gözlemlenebilir [54].

Özellikle de elektrokimyasal hidrojen peroksit üretimi sürecinde pH değerinin önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Yapılan bir araştırmada, pH'nın etkisini belirlemek amacıyla salisilik asit çözeltisi, başlangıç pH aralığı 2,0-6,0 arasında, 60 mA akım şiddetinde ve 100 dakikalık elektroliz süresinde optimum pH 2 değerinde en iyi giderim verimine ulaşılmıştır [84].

Çalışma sonuçlarına göre, EO prosesi esnasında başlangıç pH değerinin arttırılması ile birlikte giderim veriminde bir azalış gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki; pH değeri düşük olduğunda organik kirliliklerin anot yüzeyine difüzyonu daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak pH değeri azaltıldıkça giderim veriminde de bir artış meydana gelmektedir. EO prosesi ile yürütülen çalışmada, pH 3,0 değerinde KOİ için giderim verimi %37,83, TOK için giderim verimi %30,11 ve TF giderim verimi için ise %76,02 olarak belirlenmiştir. Aynı deneysel koşullar altında, pH 9,0 olduğu durumda ise KOİ için giderim verimi %17,08, TOK için giderim verimi %16,33 ve TF için giderim verimi ise %43,78 olarak bulunmuştur. Bu

durumda yapılan çalışmada da görüldüğü üzere doğrudan EO için en uygun pH değerinin 3 olduğu rapor edilmektedir. Belirtilen bu veriler ışığında KOİ, TOK ve TF giderim verimlerini açısından en uygun pH değerinin 3 olduğu ve başlangıç pH değerindeki artış ile birlikte giderim verimlerinde belirgin bir azalış olduğu söylenilebilir [82].

3.10.2 Uygulanan Akım

Akım yoğunluğu reaktör ortamında gerçekleşen elektrokimyasal tepkimenin hızını doğrudan etkilediği için kilit role sahip bir işletme parametresidir [85]. Uygulanan akım şiddeti arttıkça, kirletici maddenin elektrokatalitik oksidasyon işlemi esnasında mineralizasyon hızı da artmaktadır [86]. Ti/IrO₂/RuO₂ anot malzemesi kullanılarak yapılan bir EO çalışmasında, AKM, KOİ, renk ve bulanıklık giderim verimleri incelenmiştir. Akım yoğunluğu değerleri 18,55; 23,19; 27,83; 32,47; 37,11 mA/cm² olarak belirtilmektedir. Çalışma sonuçlarına bakıldığında, AKM giderim verimleri, 18,55 mA/cm² akım yoğunluğu değeri için %95,33, 23,19 mA/cm² için %95,83; 27,83 mA/cm² için %96,25; 32,47 mA/cm² için %96,82 ve 37,11 mA/cm² için ise %97,50 giderim verimi elde edildiği rapor edilmektedir. KOİ giderim verimleri açısından, 18,55 mA/cm² için %73,20, 23,19 mA/cm² için %77,98, 27,83 mA/cm² için %82,88, 32,47 mA/cm² için %87,22 ve 37,11 mA/cm² akım yoğunluğu değerinde ise; %90,62 AKM giderimi elde edildiği belirtilmektedir. Belirtilen akım yoğunlukları için bulanıklık giderim verimleri ise sırası ile %97,50, %98,00, %98,69, %99,17 ve %99,94'tür. Renk giderim veriminde de belirtilen akım yoğunluklarında giderim verimleri ise %95,41, %96,32, %97,36, %98,98 ve %99,99 olarak sıralanmaktadır. Söz konusu çalışma sonrasında AKM, KOİ, bulanıklık ve renk giderimleri açısından en iyi sonuç sağlayan akım yoğunluğu değeri 37,11 olarak saptanmıştır. Sonuç olarak akım yoğunluğundaki artış kirletici giderim verimlerini de doğrudan arttırmaktadır [87].

Ti/Pt anot malzemesi ile yürütülen deneysel çalışmalarında ise EO prosesinde akım yoğunluğu değerleri 18,55; 23,19; 27,83; 32,47; 37,11 mA/cm² dir. AKM giderim verimleri sırasıyla %96,92, %97,19, %97,63, %98,00 ve %98,67 olarak belirtilmektedir. KOİ için belirtilen akım yoğunluğu değerlerinde giderim verimleri sırasıyla %52,96, %58,64, %69,25, %80,12 ve %87,99 olarak belirlenmiştir. Renk giderim verimleri ise sırasıyla %96,12, %96,40, %96,81, %97,29 ve %97,92 dir. Aynı akım yoğunluğu değerlerinde bulanıklık giderim verimleri %95,38, %96,07, %96,56, %97,50 ve %98,57'dir.

şeklinde sıralanmaktadır. Sonuç olarak, KOİ, AKM, renk ve bulanıklık giderimi için akım yoğunluğu değeri arttıkça giderim verimleri de doğru orantılı olarak artış göstermektedir. EO prosesi esnasında akım yoğunluğu değerindeki artış atıksudaki kirletici müneralizasyonunu önemli ölçüde arttırmaktadır [87].

3.10.3. Destek Elektrolit Konsantrasyonu

EO çalışmalarında genel olarak kullanılan destek elektrolit türleri NaClO_4 , NaCl , Na_2SO_4 , NaNO_3 , KCl tuzları olarak verilmektedir. NaSO_3 ve NaNO_2 türünde destek elektrolitler, indirgenme duruma göre kullanılırlar [86]. Nötral tuzlar olarak NaClO_4 ve indirgenme tuzları arasından da NaSO_3 tuzları organik bileşiklerle reaksiyona girip bir oksitleyici ürün oluşumuna neden olmazlar. Bu yüzden metal oksit anotlarla bir arada rahatlıkla kullanılabilirler. Elektroksidasyon çalışmaları sırasında ortamda klorür iyonunda artış olması halinde oksidan miktarında artış gözlemlendiği ve giderimin veriminin daha verimli bir şekilde gerçekleştiği rapor edilmektedir [88]. Ayrıca deneysel çalışma sırasında akım yoğunluğu sabit tutulduğunda destek elektrolit miktarında artış olduğunda EO hücre potansiyelinde de bir azalma olduğu belirtilmektedir [89].

Literatür çalışmalarına bakıldığında, EO prosesinde anot türü olarak $\text{Ti/IrO}_2/\text{RuO}_2$ malzemesi kullanılarak tesis edilen deneysel sistemlerde, KCl , NaCl , NaNO_3 , Na_2SO_4 tuzları kullanılarak çalışmalar da göze çarpmaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarına göre NaCl tuzu kullanılarak yürütülen çalışmalarda elde edilen KOİ giderim verimi %54'tür. KCl tuzu kullanıldığında ise elde edilen KOİ giderimi %49,4 olarak belirtilmektedir. Destek elektrolit olarak NaNO_3 tuzu kullanılması halinde ise KOİ giderimi %41,7 olarak belirlenmiştir. Son olarak Na_2SO_4 tuzu kullanılması halinde ise %39,2 KOİ giderimi elde edilmektedir. Rapor edilen bu deneysel sonuçlar ışığında EO prosesinde en iyi destek elektrolit türlerinin NaCl ve KCl olduğu anlaşılmaktadır [90].

Elektrokimyasal atıksu arıtımı çalışmalarında genellikle NaCl tuzunun tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise piyasada kolaylıkla bulunabilir olması ve maliyetinin düşük olmasıdır [95]. EO çalışmasında renk parametresinin giderilmesi en uygun destek elektrolit türlerinin NaCl ve KCl tuzları olduğu rapor edilmektedir. Renk giderim işlemi sırasında destek elektrolit kullanılmadan yürütülen deneysel çalışmalarda giderim verimi %70 iken KCl tuzunun kullanılması halinde renk giderim verimi %96,3 düzeylerine kadar ulaşabilmektedir [90].

3.10.4. Elektroliz Süresi

Elektroliz süresi EO prosesi için bir diğer önemli işletme parametresidir. Çalışma sırasında kullanılan elektroliz süresinin yeterli olmaması halinde, proses yeterli verimlilikte arıtım sağlayamamaktadır. Elektroliz süresi içerisinde kirletici giderim verimlerinin zamana bağlı olarak artış gösterdiği belirtilmektedir [91]. Ayrıca elektroliz süresi Faraday yasası gereğince EO prosesi esnasında enerji tüketiminde de bir artışa sebep olmaktadır. Diğer taraftan elektroliz süresinin gereğinden fazla uzun tutulması ise giderim veriminde sürekli bir artışa neden olmamakla birlikte genellikle belirli bir noktadan sonra giderim verimlerinin kararlı hale (steady-state) ulaşmak suretiyle sabit kaldığı belirtilmektedir [92].

3.10.5. Anot Malzemenin Etkisi

EO prosesini etkileyen önemli faktörlerden biriside elektrokimyasal sistemde kullanılan anot malzemesinin yapısı ve türüdür. EO'da kullanılan bu anot materyallerinin korozyona karşı olan direnci ve katalitik aktiviteside prosesi etkileyen diğer önemli faktörler olarak görülmektedir. Arıtım yapılan kirletici konsantrasyonunun yüksek olduğu EO çalışmalarında kullanılan farklı özelliklere sahip anot malzeler bulunmaktadır [93].

Kullanılan bu malzemeler;

Titanyum – MMO (Ti/IrO₂/RuO₂)

PbO₂ ile kaplı Titanyum (Ti/PbO₂)

Titanyum- Rutenyum oksit kaplama (Ti/RuO₂)

Kalay Oksit (SnO₂) kaplı Titanyum (Ti/SnO₂)

Titanyum- İridyum oksit kaplama (Ti/IrO₂)

Platin kaplı titanyum (Ti/Pt)

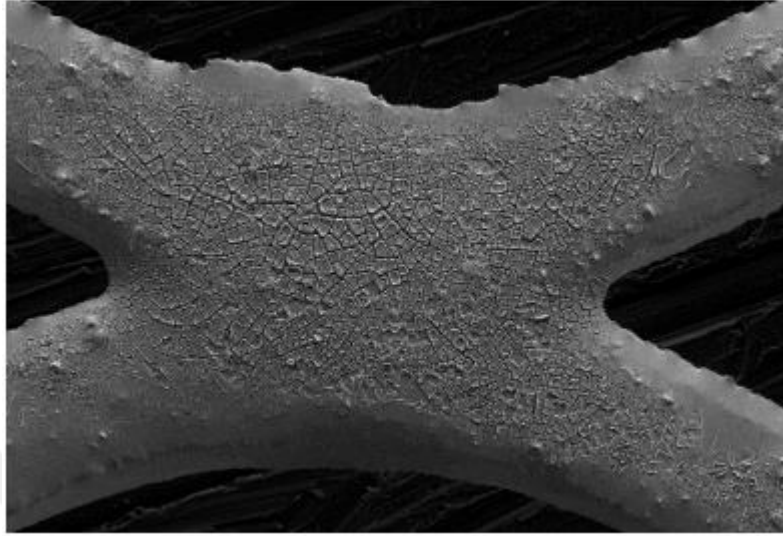
Üçlü Sn-Pd-Ru oksit kaplı titanyum (SPR)

Bor katkılı elmas (BDD)

Grafit

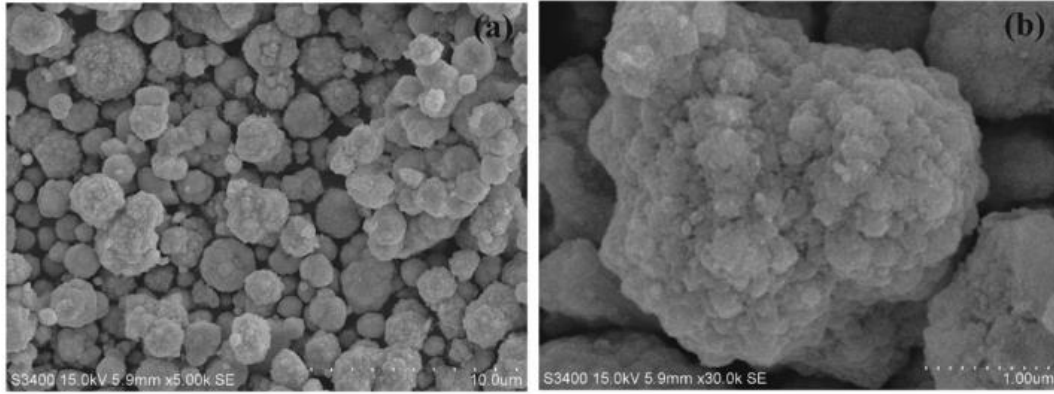
Yukarıda görüldüğü üzere EO çalışmalarında kullanılan çözünmeyen (inert) özellikteki anot malzemelerinden yalnızca birkaç tanesi sıralanmaktadır.

3.11.EO Prosesinde Kullanılan Anot Malzemelerin SEM Görüntüleri



Şekil 3.1. Sn/Sb/Ni: 500/8/1 kaplamalı kullanılmamış Ti anotun tipik SEM görüntüsü ($\times 150$, bar = 200 μm) [94].

Şekil 3.1 'de, görüldüğü üzere anot levhasının içeriğindeki şeritlerin kesişen bölgelerine ait SEM görüntüsü verilmektedir. Kullanılmamış ve kullanılmış olarak 150 kat büyütme ölçeğinde görüntülenme yapılmıştır. [95]. Şekil 3.1'de yeni kullanılacak olan anotların kaplama işlemlerinde kaynaklanan çatlaklarına ait morfoloji görülmektedir [96]. Anot levhaların fırınlanma işlemi sonrasında fırından çıkarılması esnasında levha yüzeyinde termal bir şok meydana gelmektedir [97]. Çalışmalarda daha önce kullanılmış anot levhaların çözelti içerisindeki iyonlarla yüzey alanından geçerken kaplanmaya rastlanmakta ve bu kaplanma sonucunda pürüzsüz ve düzgün bir görünüme sahip olmaktadır. Görüntüleri şekil 3.1'de verilen anot levhalara sol-jel tekniği ile kaplama işlemi uygulanmıştır. SEM görüntülerinde anot levhaların yüzeyinde 1-10 μm boyutlarında çatlaklar görülmesine rağmen çıplak gözle incelemelerinde anot yüzeyinde sağlam ve düzgün bir yapı olarak görülmektedir. Anot levha yüzeyindeki çatlakların oluşmasına elektrokimyasal çalışmalar sırasında anodun kademeli inhibiyonu neden olacağı belirtilmektedir [94].



Şekil 3.2. PbO₂ tozunun SEM görüntüleri [98].

Yapılan EO çalışmasında anot materyali olarak Ti/Sb-SnO₂/PbO₂ elektrodu kullanılmış ve SEM görüntüsünde PbO₂ tozu incelenmiştir.

Şekil 3.2’de SEM görüntüleri verilen farklı bir çalışmada ise kristalin yüzey morfolojisini analiz etmek için PbO₂ tozunun farklı büyütme oranlarında görüntülemesi yapılmıştır. 5000 kez büyütülmüş olan görüntüde PbO₂ tozunun yüzeyinin bazı parçacıklarının düzgün olduğu rapor edilmektedir. 30.000 kez büyütme yapıldığında ise PbO₂ parçacık boyutunun küçük olduğu ve genel görünümün karnabahar benzeri bir yapıya sahip olduğu bildirilmektedir [98].

BÖLÜM 4

SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Sonuç

Konu ile ilgili literatür araştırmaları incelendiğinde ayrışmaya karşı dirençli kirleticilerin (ilaç etken maddeler, mikrokirleticiler, kozmetik ürünleri vs.) arıtımında modifiye edilmiş elektrot malzemelerinin EO prosesinde anot malzeme olarak kullanımları ile ilgili çok sayıda çalışma bulunduğu görülmektedir. EO prosesi özellikle ilaç pestisit ayrışmaya karşı dirençli organik maddeler gibi kirleticilerin giderimi için özellikle tercih edilmektedir. Bunun sebebi, geleneksel metotlar bu tür kirleticilerin gideriminde çoğunlukla yetersiz kalmaktadır. Tez çalışması kapsamında EO prosesi üzerinde etkili pH, akım yoğunluğu/şiddeti, destek elektrolit türü ve konsantrasyonu gibi çeşitli işletimsel parametrelerin EO performansına olan etkileri de incelenmiştir. Bunlardan özellikle pH ve akım yoğunluğu proses performansı üzerinde daha etkin parametrelerdir. Çünkü giderim verimini önemli derecede etkilemektedir.

Tez çalışması kapsamında yapılan araştırmalarına göre anot malzeme olarak kullanılan elektrot türleri arasında EO prosesi ile kirletici giderim verimi açısından en verimli elektrot türü BDD anotlardır. EO prosesi ile atıksu arıtımı çalışmalarında BDD elektrodu kullanılarak pekçok kirletici için yüksek verimlilikte TOK giderimleri (yaklaşık %100) elde edilmiştir [69]. Konu ile ilgili makalelerde ilaç etken maddelerin giderimde BDD elektrot kullanıldığında EO prosesi ile IOX %53,8-MTX, %86,1- CPC %99,0 giderim verimleri rapor edilmektedir [79]. Ultrafiltrasyon konsantratı için BDD elektrodu kullanıldığında ise TOK %86,0, AKM %92,0 gibi yüksek giderim verimlerine ulaşılabilmektedir [80]. Çeşitli çalışmalarda ise genel olarak düşük maliyetli materyaller olması ve piyasada kolay ulaşılabilir olmaları sebebiyle MMO ya da titanyum esaslı iridyum dioksit, rutenyum oksit, kalay oksit, kurşun dioksit gibi DSA türünde elektrotlar

da tercih edilmektedir. Tez kapsamında incelenen bir çalışmada DSA anotları kullanıldığında tetrasiklin giderim veriminin %90 gibi oldukça başarılı sonuçlar sağladığı belirtilmektedir. Bunun yanı sıra EO prosesinin özellikle ilaç etken madde, pestisitler mikrokirleticiler türünde ayrışmaya karşı dirençli organik kirleticilerin mineralizasyonu için kullanıldığı göze çarpmaktadır. Çünkü bu tür kirleticilerin gideriminde konvansiyonel arıtma metotları yetersiz kalmaktadır.

Titanyum elektrotun pek çok literatür çalışmasında saf halde stabil olmaması sebebiyle sol-gel yöntemi, dip-coating gibi çeşitli yüzey kaplama yöntemleri ile kaplanmak suretiyle daha kararlı bir yapı kazandırılmak suretiyle EO anot malzemesi olarak kullanıldığı belirtilmektedir. Titanyum saf halde stabil bir anot malzemesi değildir. Ancak çeşitli metal oksitlerle kaplanmak sureti ile yüzey özellikleri iyileştirilmekte, böylelikle BDD gibi yüksek maliyetli elektrotlara alternatif olarak uygun maliyetli bir anot malzeme olarak kullanılmaktadır.

4.2 Öneriler

Pestisitler, ilaç etken maddeler ve mikrokirleticiler gibi ayrışmaya karşı kirleticilerin giderimi için düşük maliyetli ve kolay ulaşılabilir anot malzemelerin üretimleri atıksu arıtım uygulamaları açısından büyük önem taşımaktadır. EO prosesi özel kirleticiler için uygun bir alternatif arıtma metodu olmakla birlikte proste kullanılan anot malzemeler, arıtım verimi açısından en temel bileşendir. Genel olarak tüm elektrokimyasal süreçlerde tercih edilen farklı özellikteki anot malzemeler doğrudan proses maliyetini etkileyeceğinden dolayı proses seçimini kısıtlayan en temel faktörlerden birisidir. Bu nedenle daha ekonomik ve giderim verimleri yüksek anot malzemelerinin üretimleri ve kullanımları oldukça önemli bir gereksinimdir. Konu ile ilgili benzer çalışmaların yapılması ve farklı kirleticiler için farklı anot modifikasyonlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında yalnızca var olan çeşitli kompozit anot malzemelerin giderim verimlerini ve EO prosesinde yaygın olarak kullanılan elektrot malzemeleri araştırılmıştır. Gelecekte daha ekonomik ve yüksek arıtım verimine sahip anot malzemelerin üretiminin yapılması ve bununla ilgili daha fazla sayıda çalışma yapılması, EO prosesinin ayrışmaya karşı dirençli özel kirleticiler için kullanımını daha da yaygın hale getirecektir.

KAYNAKÇA

1. Erkmen, J., & Adıgüzel, M. Acid red-20 sentetik endüstriyel boyar maddenin elektro-oksidadasyon yöntemi ile sulu çözeltiden uzaklaştırılması. **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 11(2), 363-371.
2. İlhan F., Kurt U., Apaydın Ö., Arslankaya E., Gönüllü M.T. 2007. Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması. *Türkey AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetiminde Çevre Sorunları Sempozyumu*, YTÜ Makine Fakültesi Endüstri Müh. Bölümü, İstanbul.
3. Demirci Y., Pekel, L.C., Altınten, A., Alpbaz, M. 2016. Elektrokoagülasyon reaktöründe bulanık kontrol metodu ile pH, iletkenlik ve sıcaklığın eş zamanlı kontrolü. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University** 31(4): 987- 996.
4. Anglada, A., Urtiaga, A. ve Ortiz, I. 2009. Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: Fundamentals and review of applications, **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 84(12), 1747–1755.
5. Cheng Y., Sun H., Jin W., Xu N., 2007. “Photocatalytic Degradation of 4-Chlorophenol with Combustion Synthesized TiO₂ under Visible Light Irradiation”, **Chemical Engineering Journal**, 128 (2–3), 127-133.
6. Sires I., Brillas, E., Oturan, M.A., Rodrigo, M.A., Panizza, M., 2014. “Electrochemical Advanced Oxidation Processes Today and Tomorrow”, **Environmental Science Pollutant Resource**, 21, 8336-8367.
7. Gümüş, D., & Akbal, F. 2017. A comparative study of ozonation, iron coated zeolite catalyzed ozonation and granular activated carbon catalyzed ozonation of humic acid. *Chemosphere*, 174, 218-231.
8. Sultana, I., Rahman, M. M., Chen, Y., & Glushenkov, A. M. 2018. Potassium-ion battery anode materials operating through the alloying–dealloying reaction mechanism. **Advanced Functional Materials**, 28(5), 1703857.
9. Metcalf, L., Eddy, H. P., & Tchobanoglous, G. 1972. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse (Vol. 4). NewYork: McGraw-Hill.
10. Sathish, M., Viswanathan, B., Viswanath, R. P., & Gopinath, C. S. 2005. Synthesis, characterization, electronic structure, and photocatalytic activity of nitrogen-doped TiO₂ nanocatalyst. **Chemistry of materials**, 17(25), 6349-6353.

11. Sundarapandian, S., May, J. C., & McLean, J. A. 2010. Dual source ion mobility-mass spectrometer for direct comparison of electrospray ionization and MALDI collision cross section measurements. **Analytical chemistry**, 82(8), 3247-3254.
12. Peng, X., Xiong, Y. L., & Kong, B. 2009. Antioxidant activity of peptide fractions from whey protein hydrolysates as measured by electron spin resonance. **Food Chemistry**, 113(1), 196-201.
13. Carbonio, E. A., Nagao, R., Gonzalez, E. R., & Varela, H. 2009. Temperature effects on the oscillatory electro-oxidation of methanol on platinum. **Physical Chemistry Chemical Physics**, 11(4), 665-670
14. Farmer, J. C., Wang, F. T., Hawley-Fedder, R. A., Lewis, P. R., Summers, L. J. ve Foiles, L. 1992. Electrochemical Treatment of Mixed and Hazardous Wastes: **Oxidation of Ethylene Glycol and Benzene by Silver (II)**, **Journal of The Electrochemical Society**, 139(3), 654–662.
15. Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment, **Separation and Purification Technology**, 38(1), 11–41.
16. Şen, M.F. 2007. Katı Atık Sızıntı Sularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi (İzaydaş Tesisleri). Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
17. Mart´mez-Huitle CA and Ferro S 2006. Electrochemical Oxidation Of Organic Pollutants for The Wastewater Treatment, Direct and İndirect Processes. **Chem Soc Rev** 35:1324– 1340.
18. Gotsi M, Kalogerakis N, Psillakis E, Samaras P ve Mantzavinos D. 2005. **Electrochemical Oxditaion of Olive Oil Mill Wastewaters**, **Water Research**, 39:4177-4187.
19. Deng Y ve Englehardt D. 2006. Electrochemical Oxidation for Landfill Leachate Treatment.
20. Zeren A. 1999. Elektrokimya, Birsen Yayınevi, İstanbul.
21. Güven G 2004. Peyniraltı Atıksuyunun Arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
22. Deng Y ve Englehardt D. 2006. Electrochemical Oxidation for Landfill Leachate Treatment.
23. Boudenne, J. L., & Cerclier, O. 1999. Performance of carbon black-slurry electrodes for 4-chlorophenol oxidation. **Water Research**, 33(2), 494-504.

24. Polcaro A.M. and Palmas S., 1997. Electrochemical oxidation of chlorophenols, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 1791 – 1798.
25. Çetin, B. 4-(2-((6-nitro-1H-benzo [d] oksazol-2-il) tiyo) etil) fenolün sentezi ve elektrokimyasal özelliklerinin incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
26. Murphy O.J., Hitchens G.D., Kaba L., Verostko C.E., 1992. **Direct electrochemical oxidation of organics for wastewater treatment**, *Water Res.*, 26, 443 – 451.
27. Abuzaid N.S., Al – Hamouz Z., Bukhari A.A. and Essa M.H., 1999. Electrochemical treatment of nitrite using stainless steel electrodes, *Water Air Soil Pollut.*, 109, 429 – 442.
28. Naumczyk J., Szpyrkowicz L. And Grandi F.Z., 1996. Electrochemical treatment of textile wastewater, *Water Sci. Technol.* 34 (11), 17 – 24.
29. Rao N.N., Somasekhar K.M., Kaul S.N. and Szpyrkowicz L., 2001. Electrochemical oxidation of tannery, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 76, 1124 – 1131.
30. Rajalo G. and Petrovskaya T.,1996. Selective electrochemical oxidation of sulphides in tannery wastewater, *Environ. Technol.*, 17, 605 – 612.
31. Fil B. A., Antep Fıstığı İşleme Atıksularının EO Yöntemiyle Arıtılması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2014, 10050202.
32. Van Hege, K., 2002. Bottlenecks of Sustainable Water Reuse: Advanced Treatment of Municipal Wastewater and Membrane Concentrates.
33. Kahraman, Ö. 2019. Kot Kumaşı Üretim Tesisi Atıksularının Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üni., Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Aksaray.
34. Yazıcı, E.T. 2017. IOHEXOL'ün EO Yöntemi ile Parçalanması ve İşletme Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, GTÜ, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Gebze.
35. C. Comninellis, C. Pulgarin, J. **Appl. Electrochem.** 21 1991. 703–708.
36. C. Comninellis, A. Nerini, J. **Appl. Electrochem.** 25 1995. 23–28.
37. C. Feng, N. Sugiura, S. Shimada, T. Maekawa, J. Hazard. Mater. B 103 2003. 65–74.
38. García-Gómez, C., Drogué, P., Zaviska, F., Seyhi, B., Gortáres-Moroyoqui, P., Buelna, G., ... & Ulloa-Mercado, R. G. 2014. Experimental design methodology

- applied to electrochemical oxidation of carbamazepine using Ti/PbO₂ and Ti/BDD electrodes. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, 732, 1-10.
39. C. Comninellis, C. Pulgarin, J. **Appl. Electrochem.** 23 1993. 108– 112.
 40. S. Fierro, E. Passas-Lagos, E. Chatzisyneon, D. Mantzavinos, C. Comninellis, **Electrochem. Commun.** 11 (2009) 1358–1361
 41. Chatzisyneon, E., Fierro, S., Karafyllis, I., Mantzavinos, D., Kalogerakis, N., & Katsaounis, A. 2010. Anodic oxidation of phenol on Ti/IrO₂ electrode: Experimental studies. **Catalysis Today**, 151(1-2), 185-189.
 42. X.M. Chen, G.H. Chen, Stable Ti/RuO₂-Sb₂O₅-SnO₂ electrodes for O₂ evolution, **Electrochim. Acta** 50 2005. 4155–4159.
 43. L. Youngmin, S. Jin, J.M. Kevin, et al., Synthesis and activities of rutile IrO₂ and RuO₂ nanoparticles for oxygen evolution in acid and alkaline solutions, **J. Phys. Chem. Lett.** 3 2012 399–404.
 44. L.M. Gajic-Krstajic, T.L. Trisovic, N.V. Krstajic, 2004. Spectrophotometric study of the anodic corrosion of Ti/RuO₂ electrode in acid sulfate solution, **Corros. Sci.** 46 65–74.
 45. X.M. Chen, G.H. Chen, P.L. Yue, Stable Ti/IrO₂-Sb₂O₅-SnO₂ anodes for O₂ evolution with low Ir content, **J. Phys. Chem. B** 105 (2001) 4623–4628.
 46. Liu B. Wang C., Chen, Y., & Ma, B. (2019). Electrochemical behavior and corrosion mechanism of Ti/IrO₂-RuO₂ anodes in sulphuric acid solution. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, 837, 175-183.
 47. Yavuz, Y., Koparal, A.S., 2006. Electrochemical oxidation of phenol in a parallel plate reactor using ruthenium mixed metal oxide electrode. **J. Hazard. Mater** 136, 296-302.
 48. Anglada, A., Urtiaga, A., Ortiz, I., 2009. Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications. **J. Chem. Technol. Biotechnol.** 84, 1747e1755.
 49. Kaur, R., Kushwaha, J. P., & Singh, N. 2018. Electro-oxidation of Ofloxacin antibiotic by dimensionally stable Ti/RuO₂ anode: evaluation and mechanistic approach. **Chemosphere**, 193, 685-694.
 50. Sözüdoğru, O., Günaslan, S., & FİL, B. A. Mezbaa Atıksularından EO Sistemi ile KOİ ve Renk Giderilmesi Üzerine pH ve Akım Yoğunluğunun Etkisi. **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi**, (36), 106-110.

51. Azbar, N., Yonar, T., Kestioglu, K., 2004. Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent. **Chemosphere**, 55(1): 35-43.
52. Zayas Pérez, T., Geissler, G., Hernandez, F., 2007. Chemical oxygen demand reduction in coffee wastewater through chemical flocculation and advanced oxidation processes. **Journal of Environmental Sciences**, 19(3): 300-305.
53. Bayar, S., Yıldız, Y.Ş., Yılmaz, A.E., İrdemez, Ş., 2011. The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method. **Desalination**, 280(1-3): 103-107
54. Barrera-Diaz, C., Linares-Hernandez, I., Bilyeu, B., JuarezGarciaojas, P., Campos-Medina, E., 2010. A combined electrocoagulation-electrooxidation treatment for industrial wastewater. **Journal of hazardous materials**, 175(1-3): 688- 694.
55. Deng, Y., Englehardt, J.D., 2006. Treatment of landfill leachate by the Fenton process. **Water research**, 40(20): 3683-3694.
56. Bedoui, A., Ahmadi, M.F., Bensalah, N., Gadri, A., 2009. Comparative study of Eriochrome black T treatment by BDD-anodic oxidation and Fenton process. **Chemical Engineering Journal**, 146(1): 98-104.
57. Boye, B., Morième Dieng, M., Brillas, E., 2003. Anodic oxidation, electro-Fenton and photoelectro-Fenton treatments of 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, 557: 135-146.
58. Sires, I., Oturan, N., Oturan, M.A., 2010. Electrochemical degradation of beta-blockers. Studies on single and multicomponent synthetic aqueous solutions. **Water research**, 44(10): 3109- 3120.
59. Ghoreishi, S.M., Haghighi, R., 2003. Chemical catalytic reaction and biological oxidation for treatment of non-biodegradable textile effluent. **Chemical Engineering Journal**, 95(1-3): 163- 169.
60. Cho, E.-A., Tameda, K., Hanashima, M., Yamada, T., Higuchi, S., 2009. Toxicological evaluation of the chemical oxidation methods for landfill stabilization. **Waste Management**, 29(3): 1006-1011.
61. Kannan, N., Sivadurai, S.N., Berchmans, L.J., Vijayavalli, R., 1995. Removal of phenolic compounds by electrooxidation method. **Journal of Environmental Science and Health**, A30(10): 2185- 2203.

62. Deng, Y., Englehardt, J.D., 2007. Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. **Waste Manag**, 27(3): 380-388.
63. Sathish, M., Viswanath, R., 2005. Electrochemical degradation of aqueous phenols using graphite electrode in a divided electrolytic cell. **Korean Journal of Chemical Engineering**, 22(3): 358-363.
64. Sundarapandian, S., Chandrasekar, R., Ramanaiah, B., Krishnan, S., Saravanan, P., 2010. Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater. **Journal of hazardous materials**, 180(1-3): 197-203.
65. FİL, B. A., Boncukcuoğlu, R., Yılmaz, A. E., & Bayar, S. 2012. Antep fıstığı işleme atıksularının EO yöntemiyle ön arıtım çalışmaları. **Journal of the Institute of Science and Technology**, 2(2), 29-36.
66. Panizza, M., Michaud, P. A., Cerisola, G. ve Comninellis, C. 2001. Electrochemical treatment of wastewaters containing organic pollutants on boron doped diamond electrodes: **Prediction of specific energy consumption and required electrode area, Electrochemistry Communications**, 3(7), 336–339.
67. Comninellis, C. 1994. Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. **Electrochimica Acta**, 39(11–12), 1857–1862.
68. Kısacık, İ., & Yazıcı, B. Benzenin Bor Katkılı Elmas (Bdd) Elektrot Üzerinde Elektrooksidasyonu1.
69. Ukundimana, Z., Omwene, P. I., Gengec, E. R. H. A. N., Can, O. T., & Kobya, M. 2018. Electrooxidation as post treatment of ultrafiltration effluent in a landfill leachate MBR treatment plant: effects of BDD, Pt and DSA anode types. **Electrochimica Acta**, 286, 252-263.
70. Can, O. T. 2020. Fenol Çözeltilisinin Farklı Elektrotlar Kullanılarak Elektrooksidasyonu. **Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 9(2), 952-957.
71. Ayşe, K. U. R. T., Shakir, F., & Yonar, T. Ampisilinin Sn/Sb/Ni-Ti Anotlarla Elektrokimyasal Olarak Giderimine Çeşitli Parametrelerin Etkisi. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 38(2), 1141-1152.
72. Dinc, O. 2020. Tannic acid oxidation by electroperoxone. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, 35(1), 51-60.

73. Nevim, G. E. N. Ç., & Durna, E. 2021. Ti-Bazlı Metal Oksit Kaplanmış Elektrot ile Reaktif Boyar Maddenin Anodik Oksidasyonu: Proses Şartlarının Optimizasyonu. **El-Cezeri**, 8(2), 951-961.
74. Fiori, I., Santacruz, W., Dionisio, D., & Motheo, A. J. 2022. Electro-oxidation of tetracycline in ethanol-water mixture using DSA-Cl₂ anode and stimulating/monitoring the formation of organic radicals. **Chemosphere**, 308, 136487.
75. Santos, M. J., Medeiros, M. C., Oliveira, T. M., Morais, C. C., Mazzetto, S. E., Martínez-Huitle, C. A., & Castro, S. S. 2016. Electrooxidation of cardanol on mixed metal oxide (RuO₂-TiO₂ and IrO₂-RuO₂-TiO₂) coated titanium anodes: insights into recalcitrant phenolic compounds. **Electrochimica Acta**, 212, 95-101.
76. Erden, G. 2018. Biyolojik Çamurların Elektro-Oksidasyon Prosesi ile Şartlandırılması. **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 20(60), 1018-1025.
77. Solak, M. 2019. Hibrit Elektrokoagülasyon/EO Prosesleri ile Denim Ürün Üretim Atıksularının Arıtımı. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 23(3), 780-786.
78. Sözüdoğru, O. 2022. Ti/IrO₂/RuO₂ Anot ve Paslanmaz Çelik Katot Kullanılarak EO Prosesi ile Metilen Mavisi Boyası Giderimi: İşletme Parametrelerin Rolü. **Journal of the Institute of Science and Technology**, 12(4), 2054-2063.
79. Türkay, Ö., Barışçı, S., Ulusoy, E., & Dimoglo, A. 2018. Kanser İlaçları Atıksularının EO Prosesi ile Giderimi. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 22(2), 913-917.
80. Ukundimana, Z., Omwene, P. I., Gengec, E. R. H. A. N., Can, O. T., & Kobya, M. 2018. Electrooxidation as post treatment of ultrafiltration effluent in a landfill leachate MBR treatment plant: effects of BDD, Pt and DSA anode types. **Electrochimica Acta**, 286, 252-263.
81. Akarsu, C., Taner, F., & Ayol, A. 2014. Sızıntı suyunun EO prosesi ile arıtılması. 2nd International Symposium on Environment and Morality ISEM, 914-920.
82. Fil, B. A., Boncukcuoğlu, R., Yılmaz, A. E., & Bayar, S. 2012. Antep fıstığı işleme atıksularının EO yöntemiyle ön arıtım çalışmaları. **Journal of the Institute of Science and Technology**, 2(2), 29-36.

83. Barışçı, S., Türkay, Ö., & Dimoglo, A. 2018. Elektro-oksidasyon prosesi ile methotrexate gideriminin yüzey yanıt metodu ile optimizasyonu. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 22(2), 1054-1057.
84. Köktaş, İ. Y., & Gökkuş, Ö. (2022). Removal of salicylic acid by electrochemical processes using stainless steel and platinum anodes. **Chemosphere**, 293, 133566.
85. Wu, W., Huang, Z. H. ve Lim, T. T. 2014. Recent development of mixed metal oxide anodes for electrochemical oxidation of organic pollutants in water. **Applied Catalysis A: General**, 480, 58-78.
86. Köktaş, İ. Y., Gökkuş, Ö., Kariper, İ. A., & Othmani, A. (2023). Tetracycline removal from aqueous solution by electrooxidation using ruthenium-coated graphite anode. **Chemosphere**, 315, 137758.
87. Elgün, C. 2022. Kağıt endüstrisi atıksularının EO yöntemiyle arıtılması (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
88. Panizza, M. ve Cerisola, G. 2006. Olive mill wastewater treatment by anodic oxidation with parallel plate electrodes. **Water Research**, 40(6), 1179-1184.
89. Anglada, A., Urtiaga, A. ve Ortiz, I. 2009. Contributions of electrochemical oxidation to waste- water treatment: fundamentals and review of applications. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, 84(12), 1747-1755.
90. Derel, E. N. 2022. Zeytin seperatör atıksuyunun EO yöntemiyle arıtımının incelenmesi (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
91. Ighilahriz, K., Ahmed, M.T., Djelal, H. and Maachi, R. 2014. Electrocoagulation and electro-oxidation treatment for the leachate of oil-drilling mud. **Desalination and Water Treatment**, 52(31-33), 5833-5839.
92. Kul, S., Boncukcuoğlu, R., Yilmaz, A.E. ve Fil, B.A. 2015. Treatment of olive mill wastewater with electro-oxidation method. **Journal of The Electrochemical Society**, 162(8), G41-G47.
93. Bhatnagar R., Joshi H., Mall I.D. ve Srivastava V.C. 2014. Electrochemical oxidation of textile industry wastewater by graphite electrodes. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 49(8), 955-966.
94. Qian, S., Liu, S., Jiang, Z., Deng, D., Tang, B.Zhang, J., 2019. Electrochemical degradation of tetracycline antibiotics using a Ti/SnO₂-Sb₂O₃/PbO₂ anode: kinetics, pathways, and biotoxicity change, **Journal of The Electrochemical Society**, 166 (6), E192.

95. Christensen, P.A., Zakaria, K., Christensen, H., Yonar, T., The effect of Ni and Sb oxide precursors, and of Ni composition, synthesis conditions and operating parameters on the activity, selectivity and durability of Sb-doped SnO₂ anodes modified with Ni, **Journal of the Electrochemical Society**, 160 (8), H405, 2013.
96. Parsa, J.B. Abbasi, M., Application of in situ electrochemically generated ozone for degradation of anthraquinone dye Reactive Blue 19, **Journal of Applied Electrochemistry**, 42 (6), 435-442, 2012.
97. Montilla, F., Morallón, E., De Battisti, A., Vázquez, J.L., Preparation and Characterization of Antimony-Doped Tin Dioxide Electrodes. Part 1. **Electrochemical Characterization, The Journal of Physical Chemistry B**, 108 (16), 5036-5043, 2004.
98. Yang, J., Wang, Q., Zhou, J., Shen, Q., Cao, L., & Yang, J. 2020. Electrochemical removal of gaseous elemental mercury in liquid phase with a novel foam titanium-based DSA anode. **Separation and Purification Technology**, 250, 117162.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Sinem SELKİ
Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Yüksek lisans	Erciyes Üniversitesi, Çevre Mühendisliği	2023
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Çevre Mühendisliği	2019
Lise	Mustafa Eraslan Lisesi, Kayseri	2015

İŞ DENEYİMİ

2017-2019	Erciyes Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarı	2019
-----------	--	------

YABANCI DİL

İngilizce