



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

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**2,6-DİMETİLFENOL GİDERİMİNDE ELEKTROKİMYASAL
ARITIMIN UYGULANABİLİRLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem DURUR

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

AKSARAY, 2023

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 202301407 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi İrem DURUR tarafından hazırlanan **“2,6-DİMETİLFENOL GİDERİMİNDE ELEKTROKİMYASAL ARITIMIN UYGULANABİLİRLİĞİ”** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Doç. Dr. Hakan ÇELEBİ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Sinan KUL

Bayburt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 22/06/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Doç. Dr. Mehmet Ali HİNİS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

İmza

İrem DURUR

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca bilgi birikimini benden esirgemeyen, sabırla bana yol gösteren zaman kavramı fark etmeksizin yardımcı olan çok kıymetli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamda kullanmış olduğum gerçek atıksuyun temini konusunda katkılarından dolayı Sayın Öğr. Gör. Zeynep ÖZCAN'a çok teşekkür ederim.

Bu yaşıma kadar her adımda arkamda duran, desteklerini hiç esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

İrem DURUR
AKSARAY, 2023

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1 Fenol	3
2.2 Fenolün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	3
2.3 Fenol ve Türevlerinin Su İçerisinde Bulunabilir Sınır Değerleri	5
2.4 Fenol ve Türevlerinin Kullanım Alanları	6
2.5 Fenolün Çevreye ve Canlılara Etkileri	7
2.6 Fenol ve Türevleri	8
2.7 2,6-Dimetilfenol	9
2.8 Fenolün Giderim Yöntemleri	10
2.9 Elektrokimyasal Yöntemler.....	12
2.9.1 Elektrodializ.....	12
2.9.2. Elektroforez	13
2.9.3 Elektroflokülasyon.....	14
2.9.4 Elektrokimyasal sterilizasyon.....	14
2.9.5 Elektrofilitasyon	14
2.9.6 Elektrofilitasyon.....	14
2.9.7 Elektrooksidasyon.....	15
2.9.8 Elektrokoagülasyon.....	17
2.10 Yapılan Çalışmalar	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM	24
3.1 Kullanılan Kimyasallar.....	24
3.2 DeneySEL Tasarım	24
3.3 Analiz	24
3.4 Hesaplama ve Denklemler.....	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	27
4.1 Elektrotların Seçimi.....	27
4.2 pH'ın Etkisi	29
4.3 İletkenliğin Etkisi	30
4.3.1 Elektrolit çeşidi.....	30
4.3.2. Elektrolit miktarı.....	32
4.4 Akımın Etkisi	33
4.5 İşletme Süresinin Belirlenmesi.....	35
4.6 Elektrotlar Arası Mesafenin Etkisi	36
4.7 Enerji Tüketimi.....	37
4.8 Optimum Koşulların Gerçek Atıksu Üzerinde Uygulanması.....	38
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	40
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ.....	47

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2,6-DİMETİLFENOL GİDERİMİNDE ELEKTROKİMYASAL ARITIMIN UYGULANABİLİRLİĞİ

İrem DURUR

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail ŞİMŞEK

ÖZET

Birçok nedenden dolayı ortaya çıkan su kirliliği canlı yaşamını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenlerin arasında fenol ve türevleri de yer almaktadır. Fenoller benzen veya benzenoid halkasına doğrudan bağlanmış hidroksil grubu bulunduran organik bileşiklerdir. Birçok endüstri alanında kullanılan fenoller teması halinde çok ciddi sağlık sorunlarına sebep olmaktadır. Fenoller toksik aynı zamanda kanserojen bileşiklerdir. Fenollerin çeşitli arıtım yöntemleri ile sucul ortamdan giderimi mümkündür. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte elektrokimyasal yöntemler ile fenolün giderimi hakkında farklı çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada fenolün bir türevi olan 2,6-Dimetilfenol içeren sentetik atıksuyun elektrokimyasal yöntemlerle arıtımı incelenmiştir. Elektrokimyasal arıtım prosesinde giderim verimini etkileyen parametreler olan elektrot cinsi, pH, elektrolit türü ve miktarı, akım şiddeti, işletme süresi ve elektrotlar arası mesafe üzerine deneyler gerçekleştirilmiş ve optimum koşullar belirlenmiştir. Buna göre paslanmaz çelik (Ss) anot ve katotun kullanılması, elektrotlar arası mesafenin 1 cm olması, ortam pH'sının 8, akım şiddetinin 2 A, destek elektrolit konsantrasyonunun 0,5 g/L NaCl ve 210 dakikalık işletme süresinin sonunda %67 giderim verimi elde edilmiştir. 777,9 mg/L 2,6-Dimetilfenol içeren gerçek endüstriyel atıksuda yapılan çalışmada ise optimum koşullar altında %57 arıtım verimi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fenolik Bileşikler, 2,6 Dimetilfenol, Elektrokimyasal Arıtım, Paslanmaz Çelik Elektrot

Haziran, 2023; 47 sayfa

M.Sc. THESIS

APPLICABILITY OF ELECTROCHEMICAL TREATMENT FOR REMOVAL OF 2,6-DIMETHYLPHENOL

İrem DURUR

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Environmental Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İsmail ŞİMŞEK

ABSTRACT

Water pollution, which occurs for many reasons, directly affects the living life. Among these reasons are phenol and its derivatives. Phenols are organic compounds containing hydroxyl group directly attached to the benzene or benzenoid ring. Phenols, which are used in many industrial areas, cause very serious health problems in contact. Phenols are toxic as well as carcinogenic compounds. It is possible to remove phenols from the aquatic environment by various treatment methods. With the advancement of technology, different studies have been carried out on the removal of phenol by electrochemical methods.

In this study, the electrochemical treatment of synthetic wastewater containing 2,6-Dimethylphenol, a derivative of phenol, was investigated. Experiments on electrode type, pH, electrolyte type and amount, current intensity, operating time, and distance between electrodes which were the parameters that affect the removal efficiency in the electrochemical treatment process were carried out and optimum conditions were determined. Accordingly, the use of stainless steel (Ss) as anode and cathode, the distance between the electrodes 1 cm, the pH of the environment of 8, the current intensity of 2 A, the concentration of the supporting electrolyte 0.5 g/L NaCl and at the end of the 210 min. operating time 67% removal efficiency has been done. In the study carried out in real industrial wastewater containing 777,9 mg/L 2,6-Dimethylphenol, 57% treatment efficiency was obtained under optimum conditions.

Keywords: Phenolic Compounds, 2,6 Dimethylphenol, Electrochemical Treatment, Stainless Steel Electrode

June, 2023; 47 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Fenolün moleküler yapısı ve oda sıcaklığında fiziksel görünümü.....	4
Şekil 2.2. 2,6 DMP kirleticisinin moleküler yapısı.....	10
Şekil 2.3. Şematik elektrodializ reaktörü.....	13
Şekil 2.4. Şematik elektroforez reaktörü.	13
Şekil 2.5. Şematik elektroflotasyon reaktörü.....	15
Şekil 2.6. Şematik elektrooksidasyon reaktörü.....	17
Şekil 2.7. Şematik elektrokoagülasyon reaktörü.....	20
Şekil 3.1. Kalibrasyon eğrisi.....	25
Şekil 4.1. Farklı elektrot materyallerinin 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.....	28
Şekil 4.2. Farklı pH'larda 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.....	30
Şekil 4.3. Farklı destek elektrolitlerde 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.....	31
Şekil 4.4. Farklı destek elektrolit miktarlarında 2,6 DMP ve TOC giderim verimi. .	32
Şekil 4.5. Farklı akım şiddetinde 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.....	34
Şekil 4.6. Farklı işletme sürelerinde 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.....	36
Şekil 4.7. Farklı elektrotlar arası mesafedeki 2,6 DMP ve TOC giderim verimi	37
Şekil 4.8. Optimum koşulların gerçek atıksu üzerine uygulanmasındaki 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.....	39

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Fenolün kimyasal özellikleri.....	4
Çizelge 2.2. İçme sularında müsaade edilen fenol limit değerleri.....	6
Çizelge 2.3. 2,6 DMP kirleticisinin kimyasal özellikleri	9
Çizelge 4.1. Gr-Gr, Ss-Ss, Gr-Ss, Ss-Gr, Fe-Fe, Al-Al, Al-Fe, Fe-Al elektrotların çalışmalarına ait arıtım parametreleri.	27
Çizelge 4.2. Al-Gr, Gr-Al, Fe-Ss, Ss-Fe, Gr-Fe ,Fe-Gr ,Ss-Al, Al-Ss elektrotların çalışmalarına ait arıtım parametreleri.	27
Çizelge 4.3. Farklı pH çalışmalarına ait arıtım parametreleri.	29
Çizelge 4.4. Farklı destek elektrolit çalışmalarına ait arıtım parametreleri.....	31
Çizelge 4.5. Farklı destek elektrolit miktarları çalışmalarına ait arıtım parametreleri	32
Çizelge 4.6. Farklı akım şiddeti çalışmalarına ait arıtım parametreleri.....	34
Çizelge 4.7. Farklı işletme süreleri çalışmalarına ait arıtım parametreleri.	35
Çizelge 4.8. Farklı elektrotlar arası mesafe çalışmalarına ait arıtım parametreleri. ..	36
Çizelge 4.9. Optimum koşulların gerçek atıksu üzerine uygulanmasına ait arıtım parametreleri.	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

2,6 DMP	2,6- Dimetilfenol
A	Amper
C_e	Giderim Sonrası Kirletici Konsantrasyonu
cm	Santimetre
C₀	Başlangıç Kirletici Konsantrasyonu
CR(%)	Çözüldükten 2,6-Dimetilfenolün Giderim Verimliliği
DSÖ	Dünya Sağlık Örgütü
EPA	Çevre Koruma Ajansı
F	Faraday Sabiti
g	Gram
KOİ	Kimyasal Oksijen İhtiyacı
L	Litre
mA	Miliamper
MCE	Mineralizasyon Akım Verimliliği
mg	Miligram
mm	Milimetre
N	Normal
°C	Santigrat
°F	Fahrenheit
ppm	Milyonda bir
rpm	Dakika Devir Sayısı
SEC	Enerji Tüketimi
TOC	Toplam Organik Karbon
\$	Dolar
v	Hacim
t	İşletme Süresi
I	Akım
V	Voltaj
Δ	Fark

1. GİRİŞ

Tüm dünyanın ortak sorunu olan çevre kirliliği gün geçtikçe korkutmaktadır. Endüstriyel gelişim, nüfusun artışı, kentleşme, teknolojinin gelişmesi başlıca sebeplerdir ve çevrenin kirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. İnsanoğlunun yaşamında ihtiyacı olan her şey için doğal kaynaklar kullanılmakta ve bu kaynakları kullanırken bilinçsiz bir şekilde çevreye zarar verilmektedir. Gerek su kaynaklarına gerekse hava ve toprağa verilen zarar hızla artmakta, ekolojik denge bozulmaktadır. Yaşam için büyük tehlike arz eden çevre kirliliği konusu birçok bilim insanı tarafından araştırılmakta, önlem alabilmek adına çalışmalar yapılmaktadır.

Yaşamın temel kaynağı aynı zamanda çevrenin en önemli bileşenlerinden birisi olan su, çevre kirleticilerinden doğrudan etkilenmektedir. Bu durum da ekosistemi ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Su kirliliğine sebep olan etmenleri, tarımda bilinçsiz kullanılan gübreler, pestisitler, endüstride kullanılan ağır metaller, fabrikalardan çıkan toksik atıklar şeklinde sıralamak mümkündür. Fenol ve türevleri de bu kirleticiler arasındadır.

Fenol doğal olarak kömür katranından elde edildiği gibi artık günümüzde sentetik olarak eldesi mümkündür. Fenolün su içerisinde bulunması insanlara, hayvanlara ve çevreye verebileceği zarardan dolayı çok risklidir. Fenol ve türevlerinin kanserojen etkisinden dolayı ekosistem ve canlılara teması ile ileri derecede mağduriyet oluşturabilmektedir.

Boyaların ve ahşap koruyucuların üretiminde, kauçuk kimyasallarında, boyar maddelerin yapımında, yağlayıcılara ve benzinlere katkı maddesi olarak fenolün kullanımı yaygındır. Birçok endüstri de ürünün yapım aşamasında bulunan fenol aynı zamanda böcek ve mantar öldürücü olarak pestisitlerde de kullanıldığı bilinmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (EPA) ve Avrupa Birliği'nin birincil kirleticisi olarak tanımladığı fenol ve türevleri için EPA ve Dünya Sağlık Örgütü'nün (DSÖ) su içerisinde bulunması gereken fenol ve türevlerinin limit değerleri açıklanmıştır. Fenol ve türevlerinin istenilen değerlere indirebilmek için birçok giderim yöntemi vardır.

Bunlar adsorpsiyon, iyon değişimi, aktif çamur sistemleri, koagölasyon, membran prosesler olarak sıralanabilir. Bu proseslerin avantajları olduğu kadar yüksek maliyetlerinin olması, verimin istenilen kadar olmaması, işletim koşullarının zor olması gibi dezavantajları da mevcuttur.

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile birlikte elektrokimyasal yöntemlerin gelişimi de söz konusu olmuştur. Elektrokimyasal yöntemler kimyasal ilavesi olmadan ana reaktifin elektrot olduğu sistemlerdir. Çok dirençli kirleticilerin bile arıtılabildiği, düşük maliyetli bu sistemlerin bir diğer avantajı ise sistem sonunda az miktarda çamur oluşumudur.

Bu çalışmada oldukça toksik bir fenol türü olan 2,6-Dimetilfenol'ün (2,6 DMP) diğer arıtım sistemlerinin aksine teknolojinin ilerlemesi ile birlikte ortaya çıkan elektrokimyasal yöntem ile sulardan giderilebilirliği üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında sentetik olarak hazırlanan 2,6 DMP içeren suyun elektrokimyasal olarak arıtılabilirliğine etki eden elektrotların cinsi, pH, iletkenlik, akım şiddeti ve işletme süresi gibi parametrelerin optimum değerleri belirlenmiştir. Son aşamada ise 2,6 DMP içeren gerçek endüstriyel atıksudan optimum koşullarda ne kadar giderim verimi elde edilebileceği ortaya konulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Fenol

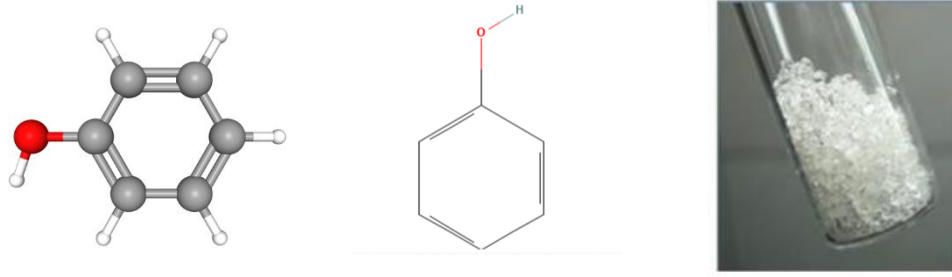
Fenol benzen veya benzenoid halkasına doğrudan bağlanmış hidroksil grubu bulunduran organik bileşiklerdir (Barlak, 2010). Çok yönlü bileşikler olan fenoller, adı fenik asit ya da karbolik asit olarak da geçmektedir (Akyol, 2020). Aynı zamanda en basit üyesi olan mono hidroksi benzeninin (C_6H_5OH) özel adıdır (Korkmaz, 2022). Saf fenoller renksiz, kokulu, beyaz kristal yapıdadırlar (Barlak, 2010). Moleküllerine bağlanan hidroksil grubunun sayısına göre bir değerli ya da çok değerli sınıflandırılabilirler (Akyol, 2020).

Fenoller doğada az da olsa serbest halde veya ester şeklinde bağlı olarak bulunur. Odun, odun ve taş kömürünün termik şekilde bozunması halinde fenoller açığa çıkar. Aynı zamanda bunların katranlarından da elde edilmesi mümkündür (Aytaş, 2008). Fenol I. Dünya Savaşı dönemine kadar kömür katranından elde edilirken o dönemden sonra sentetik olarak elde edilmeye başlanmıştır (Barlak, 2010). Taş kömürü katranından elde edilen fenollere ilk olarak karbon asidi ismi verilmiştir (Akyol, 2020). Sentetik olarak ilk kez fenol, benzenin sülfolanması ve sülfonatın hidroliz olmasıyla elde edilmiştir (Korkmaz, 2022).

İlk ticari sentezi ise sodyum benzen sülfat ve sodyum hidroksitin harmanlanarak yüksek sıcaklıkta eritilmesi ile meydana gelen fenoksiti asitlendirerek elde edilmiştir (Kaya, 2018). Günümüzde ise fenol daha çok kömür katranından ziyade sentetik olarak elde edilmektedir (Kaya, 2018). Orman yangınları sonrası atmosferde ve toprakta fenol konsantrasyonunda önemli bir artış söz konusudur. Aynı zamanda arabaların egzoz gazlarından havaya bir miktar fenol saldıgı gözlemlenmiştir (Barlak, 2010).

2.2 Fenolün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Saf ve katı halde olan fenoller, görünüm olarak renksiz veya beyazdan az pembeye çalan, kristal yapıda olan kendine has rahatsız edici bir kokusu bulunan aşındırıcı bir organik bileşiklerdir. (Bayraktar Bulut, 2019). Kimyasal yapısı Şekil 2.1’de verilen fenollerin koku eşiği sularda 7,9 ppm, hava da 0,040 ppm’dir (Kaplan Çakmak, 2013; URL-3; URL-4).



Şekil 2.1. Fenolün moleküler yapısı ve oda sıcaklığında fiziksel görünümü.

Zayıf asit özelliği gösteren, kolay tutuşabilen fenoller suda çok çabuk çözünürler (Bayraktar Bulut, 2019). Düşük erime noktası ve yüksek kaynama noktasına sahip fenollerin, halkaya eklenen ikame ediciyle birlikte bu özelliklerinde farklılıklar görülebilmektedir (İleri, 2020). Fenolün kimyasal özellikleri Çizelge 2.1’de ayrıntılı olarak verilmiştir (Akyol, 2020).

Çizelge 2.1. Fenolün kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer
Ticari adı	Karbolik asit, fenik asit, fenik alkol
Molekül ağırlığı (g/mol)	94,144
Molar hacim (cm ³ /mol)	90
Kaynama noktası (°C)	182
Erime noktası (°C)	43
Otomatik tutuşma sıcaklığı (°C)	715
Parlama noktası (°C)	79
Yanma noktası (°C)	85
Sıvı yoğunluğu (g/cm ³)	1,058 (20°C)
Sulu çözelti pH’sı	6
Suda moleküler dağılma gücü (cm/sec)	6,0 x 10 ⁻⁴
Bağıl buhar yoğunluğu	3,24 (air=1)
Buhar basıncı (mm Hg)	0,41 (25°C)
Doygun hava içindeki hacim yüzdesi	0,046 % (25°C)
Doygun havanın yoğunluğu	1,00104 (air=1)

Çizelge 2.1 (devam). Fenolün kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer
Hava su ayırma katsayısı, K_{aw} (25°C)	$2,5 \times 10^{-5}$
Log K_{ow}	1,46
Dipol moment	1,450007
Ayrışma sabiti	$1,3 \times 10^{-10}$
Koku eşik değeri	0,047 ppm (0,18 mg/m ³) - % 100 tepki 0,006 ppm (0,02 mg/m ³)-duyarlılık
Polarize olabilirlik,	0,89
Dönüşüm faktörü	1 ppm (v/v) = mg/m ³ x 0,260 1 mg/m ³ = ppm (v/v) x 3,85
Kırılma oranı	1,54 (45°C)
Sıvı yüzey gerilimi (dynes/cm)	36,5 (55°C)
Aşırı serbest enerji (kJ/mol)	10
Asidite sabiti, pKa (25°C)	10,02

Fenollerin kimyasal özelliklerini daha çok hidroksil grubu ile aromatik halkaların birbirleriyle olan ilişkisi belirler. Bundan dolayı fenolün kuvvetli bazlarla girdiği reaksiyon sonucu fenoksitler, fenolatlar ve fenatlar ortaya çıkar. Fenol aslında yapı olarak alkollere benzese de alkollerden daha kuvvetli asitlerdir (Günay, 2010).

2.3 Fenol ve Türevlerinin Su İçerisinde Bulunabilir Sınır Değerleri

EPA ve Avrupa Birliği tarafından birincil kirleticiler olarak tanımlanan fenol ve türevleri, yüksek oksijen ihtiyacı ve biyolojik parçalanma özelliği düşük olduğundan su içerisinde izin verilebilecek maksimum sınır değerler belirlenmiştir (Akyol, 2020). İçme sularında müsaade edilen fenol limit değerleri Çizelge 2.2’de verilmiştir (Günay, 2010).

Çizelge 2.2. İçme sularında müsaade edilen fenol limit değerleri.

Bileşik	İzlenen Maks Kons.		Koku Başlangıç Kons. (µg/L)	Tat Başlangıç Kons. (µg/L)	Tipik Limitler	
	Ham Suda (µg/L)	İçme Suyunda (µg/L)			Zehir Kons. (µg/L)	Kanser Yapıcı Kons. (µg/L)
Fenol	100	1	1000	100	3000	-

DSÖ'ye göre maksimum izin verilen sınır değer 0,002 mg/L olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda Türk standartlarında ise su içerisinde maksimum bulunabilecek fenol konsantrasyonu 0,002 mg/L olarak belirlenmiştir.

Yüzey sularında ise EPA tarafından 1ppb den az miktarda fenol bulunabileceği belirtilmiştir (Akyol, 2020).

Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliğine göre fenol içeren atıksuların deşarjı, tam arıtma ile sonuçlanan atıksu altyapı tesislerinde 20 mg/L, derin deşarj ile sonuçlanan atıksu altyapı tesislerinde ise 10 mg/L sınır değer olarak öngörülmüştür (Bayraktar Bulut, 2019). Yine aynı yönetmelikte farklı endüstrilerin fenol sınır değeri incelendiğinde maksimum 20 mg/L olduğu görülmüştür.

İçme Suyu Temin Edilen Suların Kalitesi ve Arıtılması Hakkında Yönetmeliğe göre ise ; basit fiziksel arıtma ve dezenfeksiyon ardından içilebilir hale gelen sularda bulunabilecek maksimum fenol sınır değeri 2 µg/L, fiziksel arıtma, kimyasal arıtma ve dezenfeksiyon ardından içilebilir hale gelen sularda bulunabilecek maksimum fenol sınır değeri 5 µg/L, fiziksel arıtma, kimyasal arıtma, ileri arıtma ve dezenfeksiyon ardından içilebilir hale gelen sularda bulunabilecek maksimum fenol sınır değeri 10 µg/L 'dir.

2.4 Fenol ve Türevlerinin Kullanım Alanları

Kimyasal tesisler, patlayıcı imalatları, reçine üreticileri, yağ rafineleri ve kok fırınları gibi tesislerden fenol içeriği yüksek olan atıksular oluşmaktadır (Evcin vd., 2014). Fenol ve türevleri birçok endüstriyel alanda kullanılan organik kimyasallardır. Çok sayıda ürünün yapımında başrolde olan fenol en çok kullanım alanı reçine üretimidir.

Bu reçineler kağıt ve kauçuk endüstrisinde, izolasyon ve sürtünmeye dayanıklı malzemelerin yapımında kullanılmaktadır. Fenolün türevlerinden olan klorofenoller genellikle boya ve ilaç sanayisinde, alkil fenoller antioksidan ve plastikleştiricilerde, oktik fenoller yüzey aktif maddeler ve pestisitlerde kullanılmaktadır. Fenol bilinen en eski dezenfektanlardan biridir. Fenol ve bütün türevleri patojen öldürücü olarak tanımlanabilir. Özellikle klor türevleri bakteriler ve mantarlara karşı oldukça etkilidirler (Barlak, 2010).

2.5 Fenolün Çevreye ve Canlılara Etkileri

Fenol toksik bir madde olduğundan tüm canlılara ve çevreye oldukça zararlıdır (Barlak, 2010). İçerisinde fenol bulunan suyun tadı bozuktur. Fenoller su içerisindeki oksijeni azaltmasından dolayı insan ve sucul ortamdaki canlılar için tehlike arz etmektedir (Evcin vd., 2014). Hayvansal dokularda yakıcı bir etkiye sahip olan fenolün, ağız, deri ve solunum yolu ile temasından kaçınılmalıdır. Ağız yoluyla vücuda alınan fenol sindirim sistemini tahrip eder (Barlak, 2010).

Fenol içeren suların içilmesi, böbrek sorunlarına, vücutta sarsıntılara ve hatta ölümlere sebep olabilir. Fenolün solunması halinde baş ağrısı ve dönmesi, genel kilo kaybı ve iştahsızlık gözlemlenebilir. Fenolün cilde teması halinde aşama aşama gözlemlenen hasarlar en son fenol kangrenine kadar yol açmaktadır (Barlak, 2010). Egzama, nefrit, kangren, sarılık gibi hastalıklara da sebep olabilmektedir (Aytaş, 2008).

Hayvanların birkaç dakikalık fenol soluması akciğerlerinde soruna neden olurken bu problem ölüme dahi yol açabilmektedir (Barlak, 2010). Hayvanların uzun süre maruziyetin de kas titremeleri ve kondisyon düşüklüğü de gözlemlenmiştir (Akyol, 2020).

Fenol insan ve hayvanlar üzerine etkisi bir yana sucul yaşam için de risk barındırmaktadır. Balıklar ve diğer canlı türleri için olumsuz sonuç doğuran fenollerin aynı zamanda su içerisinde serbest amonyak bulunması halinde balıkların bünyesine nüfusu hızlanmaktadır (Kaplan Çakmak, 2013).

Fenolün toksisitesi açısından maruz kalınan konsantrasyonla birlikte maruziyet süresi de önemli faktörlerdendir (Evcin vd., 2014).

2.6 Fenol ve Türevleri

Genel anlamıyla fenol olarak adlandırılan bu organik bileşiklere farklı bileşiklerin bağlanması ile birlikte türevleri ortaya çıkmaktadır. Bunlardan bazıları; nitrofenoller, klorofenoller, metilfenoller, aminofenoller olarak sıralanabilir.

Nitrofenoller diğer fenollere göre daha asidiktir. Boya ilaç ve fotoğraf için kullanılan aminofenoller için indirgenir. Renklendirici olarak kullanılabilirler de genelde mantar öldürücü fungusit olarak kullanılmaktadırlar. Kanserojen etkileri mevcuttur. Nitrofenol çeşitleri şu şekilde sıralanabilir (Baysal, 2020);

- 2-Nitrofenol

- 3-Nitrofenol

- 4-Nitrofenol

Klorofenoller renksiz, toksik ve zayıf asidik olan fenol türevidir (Yazıcı, 2009). Genelde pestisitler, odun ve ahşap koruyucularda kullanılmaktadır. Teması ve solunması halinde solunum sistemi ve ciltte gibi önemli rahatsızlıklara yol açabilir. Aynı zamanda kanserojenik bir etkiye sahiptir. Klorofenol çeşitleri şu şekilde sıralanabilir (Aytaş, 2008);

- Monoklorofenol

- Diklorofenol

- Triklorofenol

- Tetraklorofenol

- Pentaklorofenol

Metilfenoller, kokusu katranımsı, renksiz kristal yapıdadırlar. Cilt ve göz ile teması halinde diğer fenollerden daha tahriş edici olabilir fakat emilimi yavaş olduğundan diğer yan etkileri daha hafiftir. Yapay reçine yapımında, dezenfektanlarda, boya ve tarım endüstrilerinde, yağ çözücü bileşiklerde, tekstil endüstrisinde kullanılır (URL-1).

Aminofenoller toz halinde bulunan beyaz renkli bir fenol türüdür. Bazik ortamda kolayca çözünebilirler. Kauçuk, petrol, boya ve ilaç endüstrisinde kullanılmaktadır. Aminofenol, 2-Aminofenol ve 3-Aminefenol olarak üç gruba ayrılmaktadır (Demirci Tanrıkulu, 2010).

2.7 2,6-Dimetilfenol

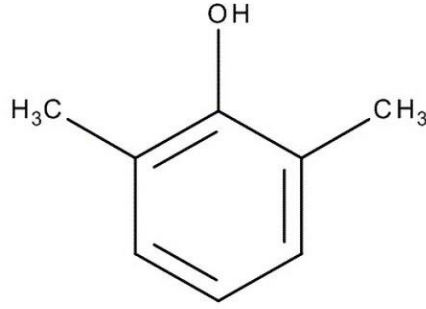
Fenolün bir türevi olan 2,6 Dimetilfenol (2,6 DMP) molekül formülü $C_8H_{10}O$ şeklinde gösterilmektedir. Molekül ağırlığı 122,16 g/mol'dür. 2,6 DMP renksiz kristal bir yapısı bulunmaktadır. Koku eşiği konsantrasyonu 0,4 mg/L olan bu bileşiğin keskin katransı bir kokusu bulunmaktadır. Kaynama ve erime noktaları sırasıyla 201-203 °C ve 49 °C olup kimyasal özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir (URL-2).

Çizelge 2.3. 2,6 DMP kirleticisinin kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer
Molekül formülü	$C_8H_{10}O$
Molekül ağırlığı (g/mol)	122,16
Erime noktası(°C)	49
Kaynama noktası(°C)	201-203
Parlama noktası(°C)	73
Koku eşiği değeri(mg/L)	0,4
Su içerisinde çözünürlüğü(mg/L) (25 °C)	$6,05 \times 10^{+3}$
Yoğunluk(g/cm ³)(68 °F)	1,01
Buhar basıncı(mm Hg)(°C)	0,274
LogP	2,36
Henry yasası sabiti	$6,7 \times 10^{-6}$
Kırılma indeksi(60 °C)	1,5171
Ayrışma sabiti, pKa(25 °C)	10,59

2,6 DMP endüstri alanında yapay reçine üretiminde, plastikleştiricilerde, benzinin katkı maddesinde, boyar maddelerde, kauçuk kimyasallarında ve boyar maddelerin içerisinde bulunmaktadır. Aynı zamanda ilaçlarda, dezenfektanlarda, böcek ve mantar öldürücülerinde, çözücü yapımında da kullanılmaktadır (URL-2).

Fenol ve türevlerinden olan 2,6 DMP ile temas akut ve kronik sağlık problemlerine yol açar. Solunum yolunda tahrişe sebep olurken hırıltı, öksürük ve nefes darlığı gözlemlenebilir. Cilt yolu ile nüfusu sonrası deride kızarıklık, aşınma söz konusudur. Göz ile temasında gözde kızarıklık aşındırıcı şekilde tahriş olabilir. Baş ağrısı, baş dönmesi, mide ağrısı, bulantı, kusma, halsizlik de yan etkileri arasındadır. Temas sonrası genel belirtiler dışında komaya hatta ölüme bile sebep olabilir. Aynı zamanda Şekil 2.2’de moleküler yapısı verilen 2,6 DMP ayrışmaya kadar ısıtıldığında ortama karbonmonoksit gibi zehirli gaz ve duman ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (URL-2).



Şekil 2.2. 2,6 DMP kirleticisinin moleküler yapısı.

2.8 Fenolün Giderim Yöntemleri

Fenol ve türevlerinin gideriminde kullanılan fiziksel kimyasal ve biyolojik bazı yöntemler mevcuttur. Fiziksel ve kimyasal yöntemler; koagülasyon-flokülasyon, adsorpsiyon, iyon değişimi ve membran prosesler olarak biyolojik giderim yöntemleri ise aktif çamur yöntemi, halkasal yapıları parçalayabilen fungus türlerini kullanarak arıtım olarak sıralanabilmektedir (Deveci, 2014).

Adsorpsiyon, kirleticinin bir adsorplayıcı tarafından adsorbanın yüzeyine tutulmasıyla kirleticinin giderilmesini amaçlamaktadır (Kaya, 2018). Adsorpsiyon yöntemi su içerisindeki fenol gibi biyolojik yöntemlerle arıtılamayan toksik bileşiklerin arıtılmasında verim sağlanan bir yöntemdir (Altan Süel, 2019)

Adsorpsiyon yöntemi, en sık kullanılan, maliyeti az, birçok adsorbent maddesi bulunan, verim konusunda etkili bir procestir (Evcin vd., 2014). Fakat proceste kullanılan adsorbanın türü ve rejenerasyonu maliyet açısından pahalı olabilmektedir (Öztürk, 2019).

Fenol için damıtma yöntemlerinden biri olan yöntem buhar damıtmadır bu yöntem ise fenolün uçuculuğuna dayanır. Fakat bu yöntem için çok fazla enerji tüketilmektedir (Öztürk, 2019).

İyon değiştirici reçine kullanarak fenolün giderimindeki verim, reçinenin miktarına, atık suyun pH'ına, sıcaklık ve fenol derişimine bağlıdır. Aynı zamanda reçinenin formu da önemli bir etkiye sahiptir (Arar vd., 2017).

Membran prosesler, güvenilir ve düşük enerji gereksinimi olan proses olması açısından avantajlı olsa da besleme sırasında su içerisindeki katı partiküllerin membranı kirletmesi önemli dezavantajları arasındadır (Öztürk, 2019).

Kimyasal oksidasyon, zararlı bileşiklerin zararsız veya daha sonraki arıtım işlemine uygun bileşiklere dönüşmesini sağlayan bir giderim yöntemidir (Kaya, 2018).

Ozonlama, siyanür giderme, koku ve tat problemini ortadan kaldırma ve fenol bileşiklerinin gideriminde kullanılmaktadır. Fakat giderim konusunda çok etkili olsa da maalesef maliyet açısından büyük bir yükür (Kaya, 2018).

Biyolojik arıtım, çözünmüş organik maddelerin mikroorganizmalar tarafından parçalanarak gerçekleşen bir giderim prosesidir. Proseste biyo-filtreler, aktif çamur sistemi, uzun ve doğal sulama yatakları şekilden uygulanabilmektedirler. Yeterli giderimin sağlanması için kirletici konsantrasyonunun inhibisyona sebep olmayacak şekilde belirli bir seviyede tutulması gerekmektedir. Yapay ve doğal biyolojik arıtım için bu seviyeler 150-160 mg/L ve 125-500 mg/L olarak belirlenmiştir (Kaya, 2018).

Su içerisinde fenol arıtımı yapılabilecek bu arıtım yöntemleri gerek maliyet açısından yüksek olması gerek yan ürünlerin tehlike oluşturmaları, arıtım veriminin düşük olması istenilen şekilde arıtımın gerçekleşmemesi gibi birçok dezavantajı vardır (Günay, 2010). Aynı zamanda bu klasik yöntemler genellikle tek başına değil birkaç yöntem ile birlikte kullanılmaktadır (Kaya, 2018).

Gelişen teknoloji ile birlikte sucul ortamdan fenolün giderimin de elektrokimyasal yöntemlerinde kullanıldığı görülmüş ve bu konuda çalışmalar yapılmıştır.

2.9 Elektrokimyasal Yöntemler

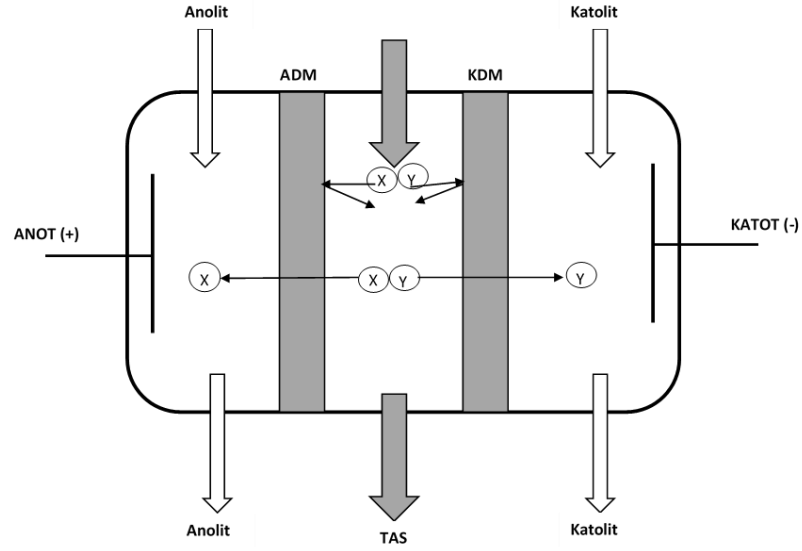
Bahsettiğimiz bu arıtma yöntemlerinin yanında son zamanlarda elektrokimyasal arıtma yöntemleri de kullanılmaktadır. Bu yöntemler kimyasal ilavesi olmadan, diğer yöntemlere kıyasla dezavantajları çok daha az, daha faydalı bir yöntemlerdir. Elektrik akımının kullanıldığı bu yöntemde yüksek miktar da bulunan fenol ve türevlerinin arıtılması sağlanmaktadır.

Elektrokimyasal arıtım metotları atıksu arıtımında özellikle de endüstriyel atıksularda dirençli kirleticilere karşı son dönemlerde sıkça yararlanılmaktadır. İlave kimyasal madde gerektirmemesi ve buna bağlı olarak da çamur oluşumunun azalması, yaygın olarak kullanılmasının başlıca sebepleri olarak düşünülebilir. Bu yöntemin en önemli avantajı ana reaktifin elektrot olması ve arıtım için gerekli ürünlerin işlem sonunda oluşmasıdır (Akbaş, 2014).

Bu yöntemler; elektrodializ, elektrofenton, elektroflokülasyon, elektro sterilizasyon, elektrofiltrasyon, elektroflotasyon, elektrooksidasyon, elektrokoagülasyon şeklinde sıralanabilir.

2.9.1 Elektrodializ

Elektrodializ, seçilmiş iyon elektrotların eriyikten elektriksel olarak yüklenmiş taneciklerin ayrılması işlemidir. Bir elektrodializ ünitesi, bir anot ve bir katot arasında, anyon değişimi ve katyon değişimini sağlayan elektrotların sıralanmasıyla meydana gelmektedir. Elektrodializ hücreleri, tek bir membran olarak işlem görmekte katyonik membranlardan (+) yüklü iyonların anyonik membranlardan (-) yüklü iyonların geçmesine izin vermektedir (Akbaş, 2014). Bu sistem genel olarak içilebilir su elde edilmesinde ve ağır metal geri kazanımı sırasında kullanılmaktadır (Atabey, 2019). Elektrodializ reaktörünün bir örneği Şekil 2.3'de görülmektedir (İlhan, 2017).

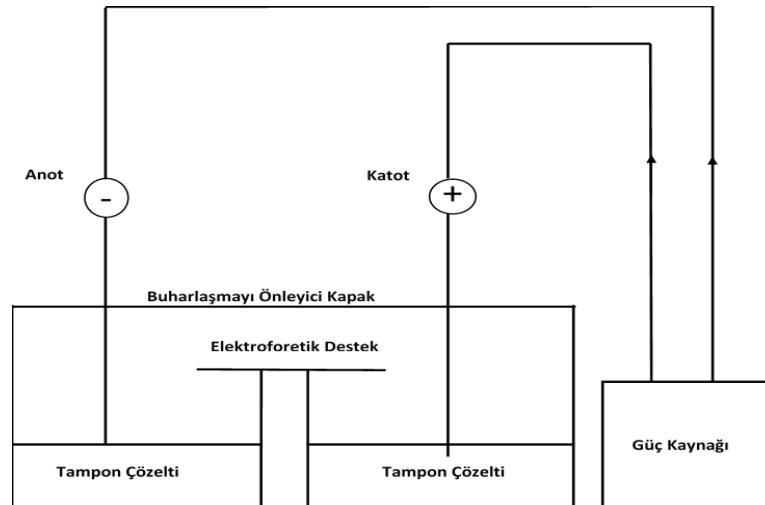


Şekil 2.3. Şematik elektrodializ reaktörü.

2.9.2 Elektroforez

Bu arıtım yöntemi yapılan çalışmalarda, yüklü partiküllerin bulundukları elektriksel alanda elektrik akımının tesiri altında kendi yüklerinin aksine farklı yönde hareketi ile taşınması durumu olarak tanımlanmaktadır (Akbaş, 2014; Atabey, 2019).

Bunun için elektriksel alandaki güç, partikülün yükü, elektroforetik alanın yoğunluğu partikülün hareketini etkileyen önemli parametrelerdir (Akbaş, 2014; Atabey, 2019) Elektroforez reaktörünün şematik bir gösterimi Şekil 2.4’de verilmiştir (Kahraman, 2019).



Şekil 2.4. Şematik elektroforez reaktörü.

2.9.3 Elektroflokülasyon

Elektroflokülasyon yönteminde anot elektrotunun çözünerek metal iyonlarına, katot elektrotunun hidrojen gazına dönüşüp birleşmesinden metal hidroksitler oluşur. Kirlilik, oluşan bu yeni iyonlara tutunarak yüzeye çıkar. Genel olarak anot elektrotta alüminyum ve demir kullanılırken katot elektrotta paslanmaz çelik tercih edilir (Karakaş, 2013).

2.9.4 Elektrokimyasal sterilizasyon

Elektrokimyasal sterilizasyon, iletkenliği yüksek çözeltilerin atıklara eklenerek atık suyun bir süre elektroliz olmasıdır. Bu yöntem genellikle maliyeti olmayan deniz suyunun atıksu ile karıştırılarak deşarj edilmesinde kullanılır (Karakaş, 2013).

2.9.5 Elektrofiltrasyon

Diğer elektrokimyasal yöntemlerin yanında ilave olarak kullanılan elektrofiltrasyon yöntemi filtrelerin verimini artırır ve ömrünü uzatır. Bu yöntemde filtrasyon sırasında uygulanan potansiyel farktan dolayı parçacıklar filtrelerden uzak tutulur. Özellikle suluboya çamuru, kanalizasyon, liman sanayi ve kağıt sanayi atıksularının arıtımında kullanımları mevcuttur (Karakaş, 2013).

2.9.6 Elektroflotasyon

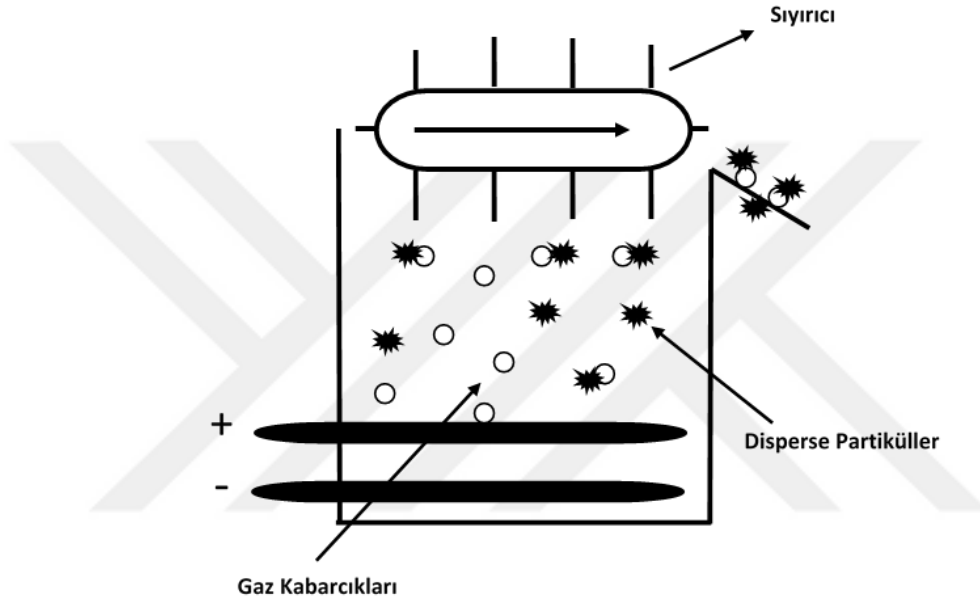
Yöntem elektrotlardan elektrik akımı geçmesiyle gaz kabarcıklarının (katotta H_2 , anotta O_2) oluşturulması, oluşan gaz kabarcıklarına ortamdaki kirleticilerin yapışarak su yüzeyine çıkması esasına dayanır (Elçi vd., 2007; Karadağ, 2009; Şimşeker, 2009).

Elektroflotasyon yöntemi genellikle tek başına kullanılan bir yöntem olmamakla birlikte birçok elektrokimyasal yöntem sırasında elektroflotasyon işlemi de ortamda gözlenmektedir (Elçi vd., 2007; Karadağ, 2009).

Şimşeker çalışmasında suda bulunan çözünmüş maddelerin ayrılması için; çökeltme, koagülasyon/flokülasyon ya da adsorpsiyon işlemlerinden birisinin flotasyondan önce uygulanmasının gerektiğinden bahsetmiştir (Şimşeker, 2009).

Genellikle flotasyon işlemi ile küçük partiküllere sahip süspansiyonlar, yağ emulsionları, askıda katı madde ve KOİ giderimi gerçekleştirmek mümkündür. (Öztürk, 2019; Şimşeker, 2009).

Elektroflotasyon yönteminde, elektrot tipi ve yüzey alanı, akım yoğunluğu, reaktör tipi, pH, sıcaklık vb. parametreler arıtma verimini ve maliyeti etkilemektedir (Öztürk, 2019). Elektroflotasyon reaktörünün şematik bir gösterimi Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Kahraman, 2019).



Şekil 2.5. Şematik elektroflotasyon reaktörü (Kahraman,2019).

2.9.7 Elektrooksidasyon

Elektrooksidasyon yöntemi diğer elektrokimyasal yöntemler de olduğu gibi elektrotlara elektrik akımı vererek gerçekleşen bir yöntemdir. Diğer yöntemlerden farkı anot elektrotunun çözünemeyen metal veya metaloksit elektrot olmasıdır. Sistem elektrottan geçen akımla oluşan O_2 ve H_2 gazları ile kirleticinin oksidasyonu sonucu CO_2 , H_2O ve kolay parçalanabilir organik bileşiklere dönüşmesi esasına dayanır (Öztürk, 2019).

Solak (2019) yaptığı bir araştırmada proste kullanılan anot elektrot sayesinde gerçekleşen oksidasyon ve atıksu ortamında oksitleyicilerin gerçekleştirdiği oksidasyonu doğrudan ve dolaylı oksidasyon olarak ikiye ayırmıştır. Her iki oksidasyon da arıtım sürecinde oluşmaktadır. Doğrudan oksidasyonda kirletici anot

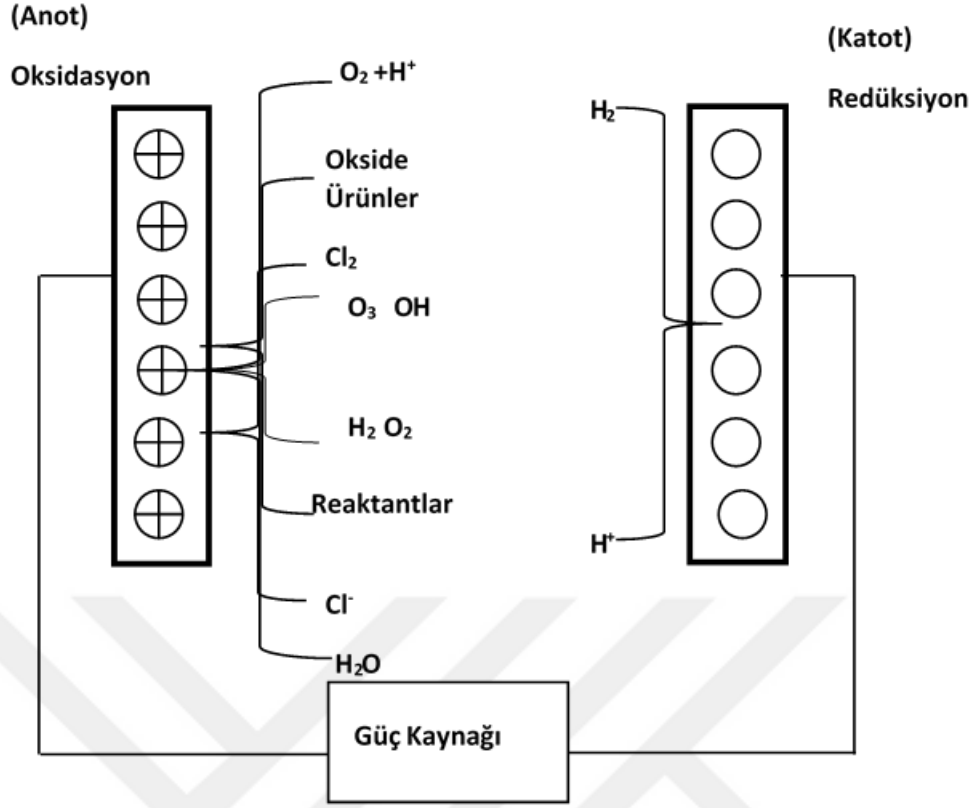
yüzeyinde adsorbe olur ve oksitlenerek giderilirler. Dolaylı oksidasyonda hipoklorit/klor, ozon ve hidrojen peroksit gibi kuvvetli oksitleyiciler elektrokimyasal olarak üretilir. Kirleticiler ise üretilen bu oksitleyici maddeler ile okside edilerek giderilir (Solak, 2019).

Sistemin avantajları olarak kimyasal ilavesinin çok az miktarda hatta hiç kullanılmaması, kolay kullanımı ve basit oluşu, düşük alıkonma süresi aynı zamanda birçok kirleticili arıtabilmesi şeklinde sıralanabilir (Karakaş, 2013).

Elektrooksidasyon prosesinin verimini etkileyen parametreler akım yoğunluğu, işletme süresi, pH, elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve sistemde kullanılan elektrotun cinsi olarak sıralanabilir.

Akım yoğunluğunun sistemde oluşan oksitleyici ajanların oluşumu üzerine bir etkisi vardır. Bu da verimi etkilemektedir. İşletme süresinin artması su içerisindeki kirleticinin giderimini artırır fakat bir süreden sonra bazı kararlı organik bileşikler yükseltgenmeye karşı direnç sahibi olurlar bu durum da fazla miktarda enerji tüketimine neden olur. Sistemdeki verimi etkileyen bir diğer parametre ise pH değeridir. Klorür içeren ortamdaki tepkimelerde oksidasyon hızı etkilenir. Sistemde etkisi olan bir diğer etmen elektriksel iletkenliktir. Bu konuda fikir birliği olmasa da sabit akım yoğunluğunda elektrolit iletkenliği artarsa hücre voltajının azaldığı söylenmektedir.

Sıcaklığın sistemdeki etkisi ise yüksek sıcaklıkta hipokloritin azalması ile kirleticili oksidasyonu azalır aynı zamanda sıcaklığın artmasıyla Cl_2 'nin suda çözünürlüğü azalarak kirleticili giderimini etkilediği söylenmektedir (Özyurt, 2019). Elektrooksidasyon reaktörünün bir örneği Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Orkun, 2007).



Şekil 2.6. Şematik elektrooksidasyon reaktörü.

2.9.8 Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyon sistemi anot elektrotun çözünerek atıksu ile reaksiyonu sonucu ortamda metal hidroksit flokları oluşturarak kirliliğin giderimi prensibine dayanır. Elektrokoagülasyon sisteminde çöktürme flotasyon, koagülasyon, adsorpsiyon gibi işlemler aynı anda gözlemlenebilir (Akbaş, 2014).

Genellikle alüminyum ve demir kullanılan anotların çözünerek su ile hidrolizi sırasında az çözünen, adsorpsiyon özelliği kuvvetli $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ gibi metal hidroksitler oluşur. Bu metal hidroksitler kirleticiyi adsorplar ve sudan uzaklaşmasını sağlar (Atmaca vd., 2011; Karadağ, 2009)

Metal hidroksitlerin kirleticiyi adsorplayarak çökmesi ile oluşan çamur, içerisinde metal hidroksit bulunmasından dolayı kolay susuzlaştırılabilir ve çökelebilmek özelliğine sahiptir (Atmaca vd., 2011; Karagözoğlu ve Yılmaz, 2019).

Elektrokoagülasyon sisteminde elektriksel alanın oluşması ile en küçük partiküllerin bile giderimini sağlamıştır (Atmaca vd., 2011)

Elektrokoagülasyon yöntemi ile atıksulardaki ağır partiküller, süspanse ve kolloid maddeler, yağ ve gres, kompleks yapıcı maddeler, bakteri ve virüslerin giderimi yüksek verimlerde gerçekleştirilmektedir (Akdemir, 2020; Tetik, 2011).

Elektrokoagülasyon sistemi birçok endüstriyel atıksuyun arıtımı için denenmiş ve başarılı sonuç elde edilmiştir. Bunlar; çöp sızıntı suyu, evsel atıksuyu, tekstil atıksuyu, petrol atıksuyu, çamaşırhane atıksuyu, kimyasal fabrika atıksuyu, deri endüstrisi atıksuyu, maya atıksuyu, zeytin fabrikası atıksuyu, restoran atıksuyu, yumurta prosesi, yağ, süt ve süt ürünleri atıksuyu gibi çeşitli yiyecek üretim endüstrisi atıksuları şeklinde sıralamak mümkündür (Karagözoğlu ve Yılmaz, 2019; Tanattı, 2009).

Elektrokoagülasyon sistemini etkileyen parametreler pH, akım yoğunluğu, arıtım süresi, elektrot tipi, sıcaklık ve iletkenlik şeklinde sıralanabilir

Yapılan çalışmalarda sistem içerisinde çözünen metal iyonları farklı pH'larda farklı metal hidroksitlerin oluştuğu gözlemlenmiştir (Atmaca vd., 2011).

Giderim verimini etkileyen bir diğer parametre ise akım yoğunluğudur. Sisteme verilen akım miktarının artması ile ortamda çözünen anot miktarı artar. Aynı zamanda ortamda oluşacak metal hidroksitlerinde miktarını etkileyeceği bilinmektedir (Atmaca vd., 2011) .

Sistemin işletim süresi de su içerisindeki giderim verimini etkilemektedir. İşletim süresinin artması verimin de artmasına sebep olur fakat bir süreden sonra enerji israfına sebep olmaktadır (Candar, 2018).

Sistemde çözünecek elektrotun cinside verimi etkilemektedir. Genel olarak elektrot cinsinde erişimi kolay ve ucuz olmasından dolayı alüminyum veya demir tercih edilmektedir (Candar, 2018) .

Sistemden elde edilecek verimi etkileyen bir diğer parametre ise sıcaklıktır. Sıcaklığın artması ile sistemde oluşacak reaksiyon da hızlanacaktır. Fakat belirli bir sıcaklıktan sonra sistem içerisinde oluşan floklar tekrar çözünecek ve elde edilen verim azalacaktır (Akbaş, 2014) .

İletkenlikte sistemin verimini etkileyen bir faktördür. İletkenliği arttırmak için, nötr tuzlar (NaClO_4 , Na_2SO_4 , NaCl ve NaNO_3) ve indirgeme tuzları (NaSO_3 ve NaNO_2) kullanılır. Bunlar arasında, NaClO_4 ve NaNO_3 organik bileşiklerle reaksiyona girebilecek herhangi bir oksitleyici türün üretilmesine sebep olmadıklarından dolayı, karışık metal oksit anotlarla doğrudan oksidasyon çalışmaları için uygun bileşiklerdir (Özyurt, 2019).

Sistemin avantajlarına bakıldığında diğer kimyasal metotlara göre daha az koagülant istemesi, kimyasal ilavesi olmaması üzerine ikincil bir kirlilikle karşılaşılması, proses için az alana ihtiyaç duyulması, maliyetin düşük olması, basit ekipman ve iş gücünün az olması, kolay işletimi ve daha az çamurun oluşması, alıkonma süresinin az olması şeklinde sıralanabilir (Akbaş, 2014; Akdemir, 2020).

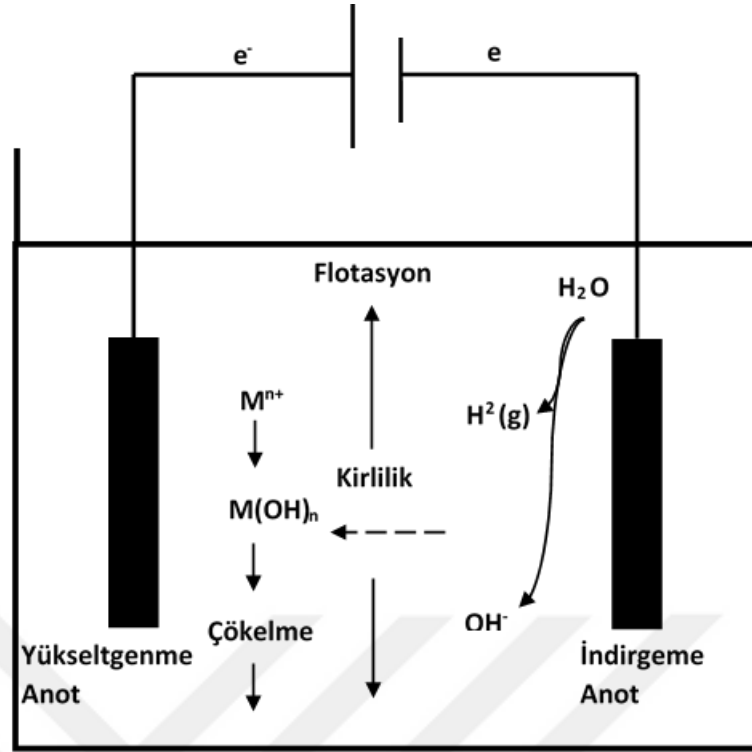
Elektrokoagülasyon sistemi üç aşamada gerçekleşmektedir (Atmaca vd., 2011). Bu aşamalar;

1. Elektrotun çözünmesiyle koagülantın oluşumu,
2. Kirleticilerin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması,
3. Destabilize edilmiş fazlarda flokların toplanması.

Taneciklerin destabilizasyon mekanizması ve emülsiyonların kırılması şu şekilde özetlenebilmektedir (Arar vd., 2017).

1. Yüklü partiküllerin çevresindeki difüz tabakasının sıkışması, anot elektrotun çözünmesiyle meydana gelen iyonların girişi ile gerçekleşir.
2. Atıksuda mevcut iyonik türlerin yük nötralizasyonu, elektrotun çözünmesiyle üretilen zıt yüklü iyonların sayesinde tanecikler arasında elektrostatik itmeyi azaltır, böylece Van der Waals çekim güçleri etkin olur. Proseste net yükün sıfır olması söz konusudur.
3. Flok teşekkülü ve çamur tabakasının oluşması, oluşan çamur tabakası, bağlanmış olan kolloidal tanecikleri yakalayıp bağlayarak, onları da uzaklaştırır.

Şekil 2.7’de elektrokoagülasyon prosesinin bir şeması gösterilmiştir (Dinçer, 2013).



Şekil 2.7. Şematik elektrokoagülasyon reaktörü.

2.10 Yapılan Çalışmalar

Şimşek (2023) içerisinde 4-nitrofenol bulunan suyun anot olarak paslanmaz çelik, katot olarak ise pirinç elektrot kullanarak elektrokimyasal yöntemlerle arıtımını incelemiştir. Çalışmada optimum koşullar 20 dakikada, 3A akımda, pH 5,5' te, 3 g/L NaCl ilavesi ve elektrotların birbirine uzaklığı 0,5cm olarak belirlemiştir. Bu şartlar altında 20 dakika sonunda %97,44'lük bir oranda 4-nitrofenolün sudan uzaklaştığını gözlemlemiştir.

Al-Thawr vd. (2022) içerisinde fenol bulunan atıksudan elektrofenton yöntemi ile giderim elde etmek üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Uygun işletim sistemi üzerine araştırma yapmışlardır. 300 mg/L fenol konsantrasyonunda, 2500 mg/L H₂O₂ kullanılarak, 40 mA/ cm² akım yoğunluğunda %93 oranında atıksu içerisinde fenol giderimi sağlanmıştır.

Can (2020) farklı elektrot malzemeleri kullanılarak elektrooksidasyon yöntemi ile su içerisinde fenolün giderimi incelemiştir. 125 mA/cm² akım yoğunluğunda anot elektrot olarak BDD, Ti/Pt, MMO elektrotlar ve katot olarak paslanmaz çelik elektrot kullanmıştır. Farklı elektrotlarla yapılan çalışmalarda 300. dakika sonunda % 84 lük

bir verim gösteren Pt elektrotu en düşük performansı gösteren elektrot olarak kabul etmiştir. Daha sonra MMO anodu ile 300. dakikanın sonunda % 72-79 aralığında verim elde edildiği gözlemlenmiştir. 180. dakikanın sonundan %100 lük bir performans gösteren BDD anot elektrotu su içerisinde en yüksek giderim verimini sağlayan elektrot olarak kabul etmiştir.

Öztürk (2019) fenol başlangıç konsantrasyonu 50 mg/L olan suyun hibrit elektrooksidasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleri ile sudan uzaklaştırılması üzerine çalışmıştır. Ti/Pt-Fe ve Ti/Pt-Al elektrot kullanarak başlangıç pH değeri, akım yoğunluğu, sıcaklık çeşitli parametrelerin de verim üzerine etkisi gözlemlenmiştir. Ti/Pt-Fe elektrot kullanımında başlangıç pH değeri 7,56 olan 2A akım ile çalışan sistemde 3 saatin sonunda %98'den fazla su içerisindeki fenol konsantrasyonunda giderim elde edilmiştir.

Kaya (2018) 100 mg/L fenol konsantrasyonuna sahip suda elektrooksidasyon yönteminin bazı parametrelerinin verim üzerindeki etkisini incelemiştir. Anot elektrot olarak Ti/IrO₂/RuO₂ ve katot olarak Ti/Pt elektrot seçtiği sistemde 20 A şiddetinde, pH değeri 7 olan, sabit sıcaklıkta 1 saatlik çalışmanın sonucunda en yüksek verim elde edildiğini gözlemlenmiştir.

Köksal ve Yılmaz (2017) elektrokoagülasyon yöntemi ile fenol gideriminde pH değerinin prosesteki verim üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Toplam fenol konsantrasyonu 4000 mg/L olan suda 4, 5,2 (suyun kendi pH değeri), 6 ve 7 pH değerlerinde fenol giderimini incelemişlerdir. pH 4'te %70 verim elde edilirken suyun kendi doğal pH değerine yükseltilmesi halinde %70' den %77' ye çıktığını gözlemlenmişlerdir. Aynı zamanda kendi pH değeri olan 5,2 den 7'ye yükseltildiğinde ise toplam fenolün giderim verimi %92'ye kadar ulaştığını ortaya koymuşlardır.

Dinçer (2013) toplam fenol konsantrasyonu 10 g/L olan atıksuyun elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi üzerine çalışmıştır. Optimum şartlarda (pH değeri; 5 , seyreltme oranı %10, akım yoğunluğu; 20 mA/ cm², 20 dakika) Al elektrotun ve Fe elektrotun verim performansını karşılaştırmıştır. Fe elektrotla %87'lik bir toplam fenol giderimi izlenirken, Al elektrotla %81'lik bir verim elde edilmiştir.

Boncukcuoğlu vd. (2012) başlangıç toplam fenol konsantrasyonu 3200-4000 mg/L olan suyun anot elektrot olarak grafit, katot elektrot olarak paslanmaz çelik kullanılarak elektrooksidasyon yöntemi ile arıtımını incelemişlerdir. Karıştırma hızı ve başlangıç pH değerinin verim üzerine etkileri incelenmişler ve en uygun pH değeri 3 olarak kabul ederek % 76,02'lık bir verim elde etmişlerdir. Karıştırma hızının ise 100 rpm'den 400 rpm'ye kadar arttırıldığında verimin % 16,4 oranında arttığı gözlemlerken 400rpm'den 600 rpm'ye artışında % 4,85 oranında azalış söz konusu olduğunu ortaya koymuştur.

Şahin (2009) Fe ve Al elektrot kullanarak içerisinde fenol bulunduran sudan elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmada akım yoğunluğunun, başlangıç pH değerinin, başlangıç konsantrasyonun, işletme süresinin ve elektrolitlerin konsantrasyonun giderim verimi konusunda ki etkilerini incelemiştir. Başlangıç pH değeri ve konsantrasyonun artması giderim veriminin azalmasına neden olduğunu görmüş, akım yoğunluğunun artışı ise verimin de artmasına neden olduğunu söylemiştir. Çalışmada aynı zamanda Al elektrota göre Fe elektrot hem maliyet açısından hem de giderim verimi konusunda iyi olduğu sonucuna varmıştır.

Abdelwahab vd. (2009) petrol rafinesi atıksuyundan alüminyum anot ve katot elektrot kullanarak elektrokoagülasyon yöntemi ile fenol giderimi üzerinde çalışma yapmışlardır. Yüksek giderim için uygun koşullar tespit edildikten sonra pH 7'de 2 saat sonunda atıksu içerisinde %97 oranında fenolün giderildiğini ortaya koymuşlardır.

Gümüş (2007) demir elektrot kullanarak fenol ve 4-klorofenol bulunan suyun elektrokimyasal oksidasyon ile sudan giderimini incelemiştir. Aynı zamanda reaksiyon süresi, akım yoğunluğu, iletkenlik, başlangıç pH değeri, hidrojen peroksit (H_2O_2) konsantrasyonu ve başlangıç konsantrasyonunun etkileri gibi parametrelerin sistem üzerine etkilerini araştırmıştır. Yapılan çalışmaya göre hidrojen peroksit (H_2O_2) konsantrasyonu 500 mg/l, iletkenlik 1000 μ s/cm, akım yoğunluğu 1 mA/cm², başlangıç pH 3 şartları altında başlangıç konsantrasyonu 250 mg/L olan numune için %91,71 fenol, %96,09 4-klorofenol giderimi elde etmiştir. 5 mA/cm² akım yoğunluğunda 5 dakika çalışma süresi içinde fenolde %98,34'lük en yüksek verim elde edilirken aynı şartlar altında 4-klorofenol için %99,73'lük bir verim gözlemlemiştir.

Yavuz (2004) fenol içeren petrol rafinesi atıksuyunun rutenyum oksit elektrotu ile direkt elektrokimyasal yükseltgenmesi, bor katkılı elmas elektrot ile direkt ve indirekt elektrokimyasal yükseltgenmesi, demir elektrotlarla H_2O_2 varlığında elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi konuları üzerinde çalışmıştır. En uygun şartlar altında rutenyum oksit elektrotu kullanılarak yapılan elektrokimyasal yükseltgenme işleminde 210 dakika sonunda %94,49 oranından bir fenol giderimi sağlandığı gözlemlenmiştir. Demir elektrotlarla yapılan çalışmada ise destek elektrolit ilavesi olmadan 120 dakika sonunda %6,27 fenol giderim verimi sağlanırken destek elektrolit ilavesi ile (1000 mg/L H_2O_2) 6 dakika sonunda %98,74'lık bir verim elde edildiği gözlemlenmiştir. Elmas elektrotların kullanıldığı proseste ise elektrolit ilavesi olmadan 40. Dakikada %99,53 fenol giderim verimi elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu değerler eşliğinde en iyi giderim verimi olarak elektrolit ilaveli demir elektrot kullanılan proseste elde edildiğini ortaya koymuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Kimyasallar

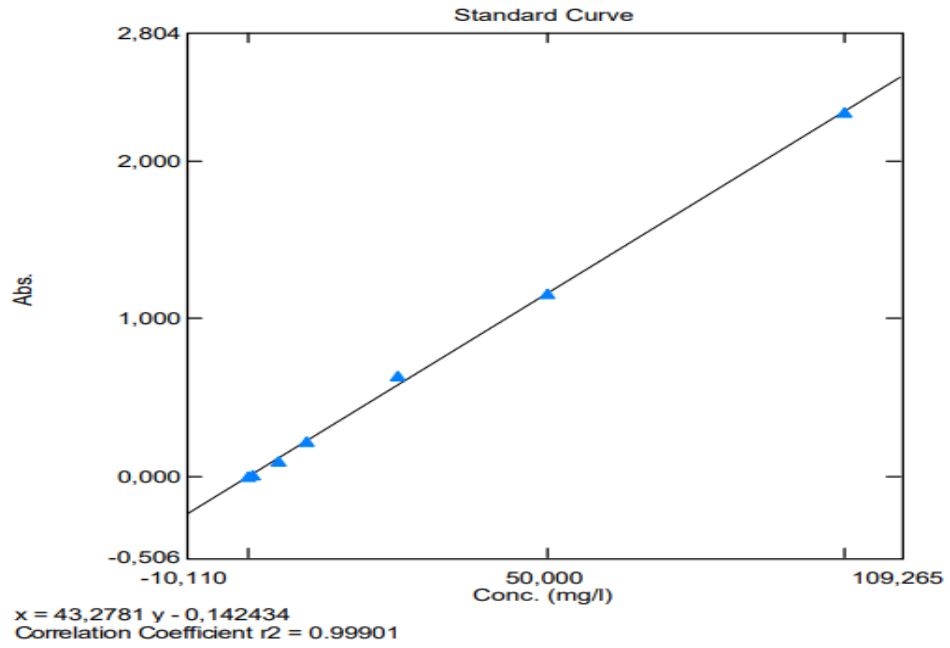
Sentetik olarak 2,6 DMP stok çözeltisini hazırlamak için Sigma Aldrich marka, kimyasal formülü 2,6 $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_3\text{OH}$ olan kimyasal kullanılmıştır. Sistem için optimum koşulların oluşturulması adına pH ayarlaması için 0,1 N HCl ve 0,1 N NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Proseste optimum iletkenliğin sağlanması için destekleyici elektrolit olarak NaCl, K_2SO_4 , Na_2SO_4 ve CaCl_2 kimyasalları kullanılmıştır

3.2 Deneysel Tasarım

Sentetik olarak hazırlanan 2,6 DMP içeren çözeltiden bu kirleticiyi arıtmak üzere demir (Fe), alüminyum (Al), paslanmaz çelik (Ss) ve grafit (Gr) plaka elektrotlar kullanılarak elektrokimyasal metotlarla kesikli olarak çalıştırılmıştır. Prosesin gerçekleştirilmesi adına 10,5 cm taban çapına ve 14,5 cm yüksekliğe sahip 1 L çözelti alabilme kapasiteli cam reaktör kullanılmıştır. Reaktör içerisine 500 mL, 100mg/L 2,6 DMP kirleticisi bulunduran çözelti konulmuştur. Reaktörün içerisinde monopolar seri bağlı şekilde 1 anot, 1 katot elektrot bulunmaktadır. Bu elektrotların boyutları 10 x 7 cm ve aktif yüzey alanı 38 cm²'dir. Reaktörün dış kısmında ise sıcaklığın sabit kalması adına su ceketі bulunmaktadır. Sistemin ihtiyacı olan akım Zhaoxin RXN-305D markalı güç kaynağı ile karışımı ise Labart SHT-5 marka manyetik karıştırıcı ile sağlanmıştır.

3.3 Analiz

2,6 DMP içeren stok çözeltisi (1 g/L) ultra saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışmada başlangıç konsantrasyon olarak 100 mg/L seçilmiştir. Optimum koşullar için çözeltinin pH değeri 0,1 N NaOH kullanılarak 8'de sabit tutulmuştur. Elektrolit desteği ile proseste gerekli iletkenlik sağlanmıştır. Sistemi belirli bir süre işledikten sonra reaktörden numune alınmıştır. Alınan numuneler şırıngalı filtrelerden süzülerek 2,6 DMP ve TOC analizi için hazır hale getirilmiştir. Shimadzu UV-1280 marka UV-VIS spektrofotometrede 2,6 DMP kirleticisi λ_{max} 288,5 nm'de ölçülmüştür. İletkenlik ve pH ayarlaması için HACH HQ440D multimetre kullanılmıştır. TOC ise Shimadzu TOC-VCPN/TNM-1 cihazı ile analiz edilmiştir. 2,6 DMP kirleticisinin kalibrasyon eğrisi Şekil 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kalibrasyon eğrisi.

3.4. Hesaplama ve Denklemler

Çözeltiden 2,6 DMP gideriminin verimliliğini hesaplamak için Denklem 3.1’de verilen formül kullanılmıştır.

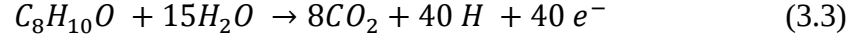
$$CR(\%) = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada; CR(%) çözeltiden 2,6 DMP giderim verimliliği, C_0 çözeltideki 2,6 DMP ve TOC’un başlangıç konsantrasyon değerlerini ve C_e ise elektrokimyasal arıtmadan sonra çözeltilinin içindeki 2,6 DMP ve TOC konsantrasyon değerlerini ifade etmektedir. (Şimşek,2023).

Mineralizasyon akım verimliliği (MCE), elektrokimyasal proseslere uygulanan akımın kirleticilerin giderilmesinde ne ölçüde verimli kullanıldığını belirlemek için kullanılan bir parametredir. Bu çalışmada, MCE, ölçülen TOC değerlerine bağlı olarak Denklem 3.2’de verilen denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Şimşek,2023).

$$MCE (\%) = \frac{(nFV \Delta(TOC)t)}{(4.32 \times 10^7 mIt)} \times 100 \quad (3.2)$$

Burada; F , Faraday sabitidir ($96.487 \text{ C mol}^{-1}$). V çözeltinin hacmi (L), $\Delta(TOC)t$ t zamanda prosesin işleyişinden sonra çözeltide kalan TOC değeri, 4.32×10^7 birim dönüştürme faktörüdür. M , 2,6 DMP de bulunan karbon atomu sayısı, I akım şiddeti (A), t işletim süresi (saat) ve n ise aşağıdaki kimyasal reaksiyona dayanarak 2,6DMP'nin karbondioksite mineralizasyonu sırasında tüketilen elektrot sayısı olup meydana gelen reaksiyon Denklem 3.3'te gösterilmiştir.



4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Elektrotların Seçimi

Yapılan araştırmalara göre elektrokimyasal arıtmada verimi etkileyen önemli parametrelerden biri sistemde kullanılacak olan elektrotun cinsidir.

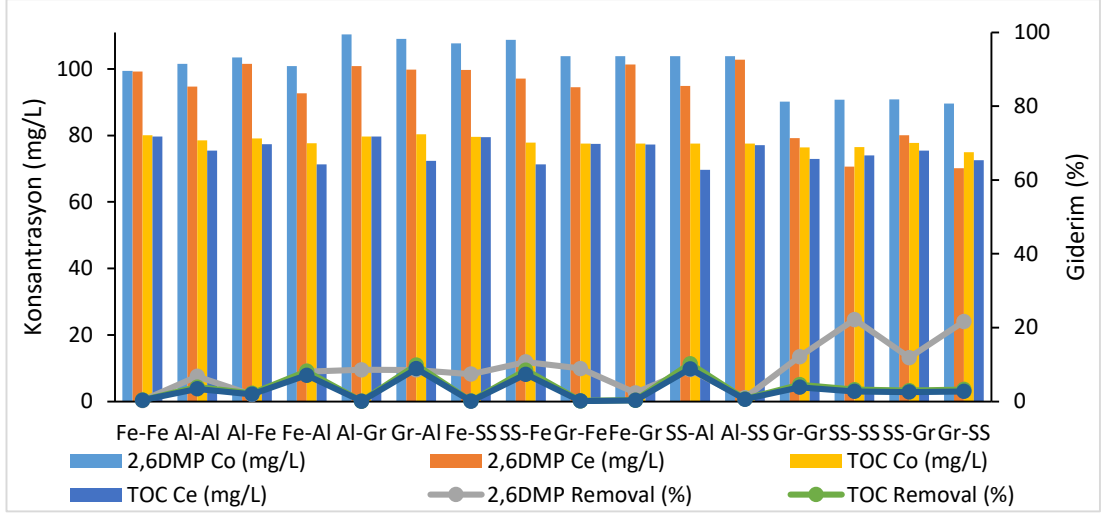
Çalışmada ilk olarak sentetik olarak hazırlanmış 2,6 DMP içeren suyun farklı anot ve katot elektrotların elektrokimyasal yöntem ile arıtımının üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde Gr, Fe, Al, ve Ss elektrotlar farklı kombinasyonlarda kullanılmıştır. pH 6,5’da, 0,5 g NaCl ilavesi ile 1 A de 30 dakika boyunca ve oda sıcaklığında çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, ve Şekil 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Gr-Gr, Ss-Ss, Gr-Ss, Ss-Gr, Fe-Fe, Al-Al, Al-Fe, Fe-Al elektrotların çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Parametre	Gr-Gr	Ss-Ss	Gr-Ss	Ss-Gr	Fe-Fe	Al-Al	Al-Fe	Fe-Al
pH	5,8	9,63	5,93	9,74	11,48	9,31	9,33	11,69
İletkenlik (µs/cm)	2094	2093	2063	2051	2159	1987	2047	2164
Akım (A)	1	1	1	1	1	1	1	1
Voltaj (Volt)	19,8	16,4	16,1	16,8	11,7	15,5	14,5	14,8
2,6DMP Ce (mg/L)	79,2	70,61	70,16	80,01	99,18	94,65	101,8	92,65
2,6 DMP Giderimi (%)	12,13	22,18	21,7	11,88	0,27	6,81	1,86	8,11
TOC Ce (mg/L)	72,96	74,01	74,96	75,43	79,71	75,41	77,38	71,27
TOC Giderimi (%)	4,54	3,22	3,24	2,96	0,4	3,91	2,19	8,18
MCE (%)	3,88	2,75	2,71	2,57	0,36	3,43	1,93	7,09

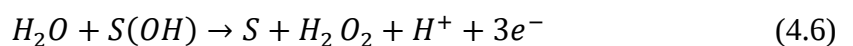
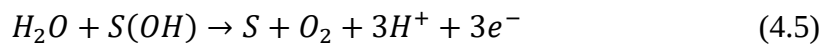
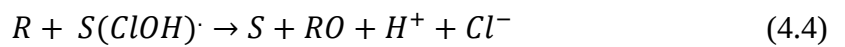
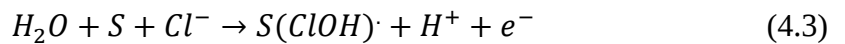
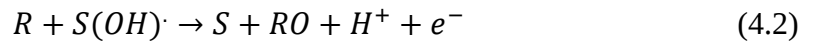
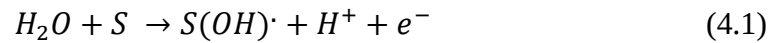
Çizelge 4.2. Al-Gr, Gr-Al, Fe-Ss, Ss-Fe, Gr-Fe ,Fe-Gr ,Ss-Al, Al-Ss elektrotların çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

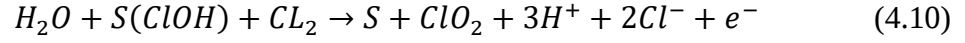
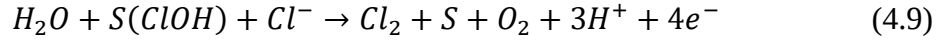
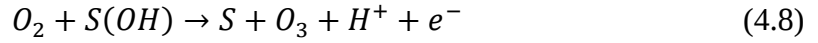
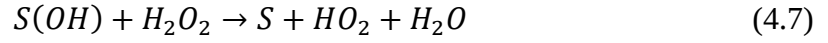
Parametre	Al-Gr	Gr-Al	Fe-Ss	Ss-Fe	Gr-Fe	Fe-Gr	Ss-Al	Al-Ss
pH	9,38	6,04	10,8	10,48	5,72	10,94	10,2	9,44
İletkenlik (µs/cm)	2006	2053	2080	1986	2028	1993	1962	2001
Akım (A)	1	1	1	1	1	1	1	1
Voltaj (Volt)	12,7	16,6	14,7	13,7	18,7	14,5	16,3	13,6
2,6DMP Ce (mg/L)	100,88	99,75	99,68	97,1	94,51	101,35	94,84	102,78
2,6 DMP Giderimi (%)	0,08	9,88	0,11	8,48	0,15	0,32	10,23	0,67
TOC Ce (mg/L)	79,63	72,4	79,51	71,26	77,43	77,3	69,62	77,03
TOC Giderimi (%)	8,57	8,52	7,41	10,7	8,94	2,35	8,62	0,97
MCE (%)	0,07	8,87	0,10	7,37	0,13	0,28	8,86	0,58



Şekil 4.1. Farklı elektrot materyallerinin 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

Şekil 4.1. incelendiğinde anot olarak Fe, katot olarak Al, Fe, Ss ve Gr kullanıldığında 2,6 DMP giderim veriminin %10'un altında kaldığı gözlenmiştir. Aynı şekilde anot olarak Al, katot olarak Al, Fe, Ss ve Gr kullanımında giderim veriminin çok düşük olduğu belirlenmiştir. Anot olarak Ss elektrot kullanımında ise sadece katot olarak Ss kullanıldığında %22,18 2,6 DMP giderim verimi elde edilirken diğer katot elektrotlarda %20'nin altında kalmıştır. Gr anot elektrot olarak kullanıldığında ise anot olarak Ss elektrot kullanımından farksız bir sonuç elde edilmiştir. Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi Gr-Ss ve Ss-Ss kombinasyonlarında (%21,7 ve %22,18) %20'nin üstünde verim elde edilmiştir. Ss-Ss En çok giderim verimine sahip elektrot kombinasyonudur. Yapılan çalışmalara göre %22,18 2,6 DMP bir giderim verimi elde edilen kombinasyon baz alınarak anot olarak Ss, katot olarak Ss elektrotu seçilmiştir. Ss elektrot kullanıldığında proseste meydana gelen tepkimeler Denklem(4.1)-(4.10)'da verilmiştir. (Şimşek, 2023)



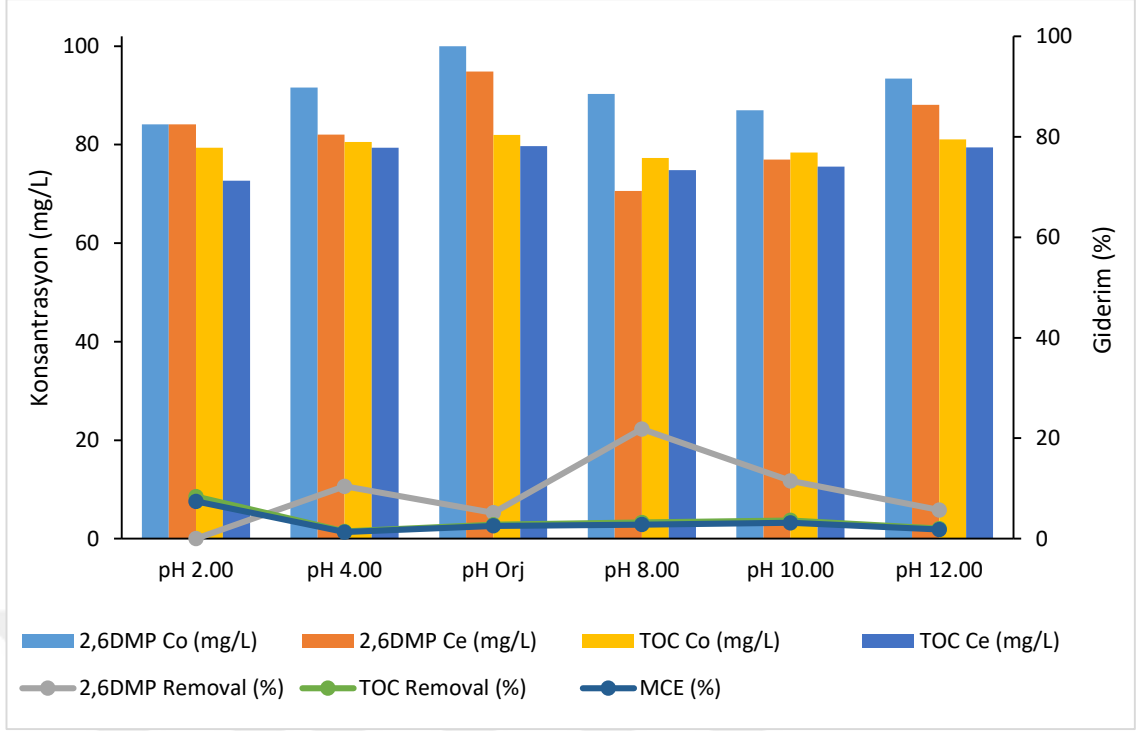


4.2 pH'in Etkisi

Hazırlanan sentetik suyun içerisinde bulunan 2,6 DMP'nin giderim prosesindeki verim üzerine etkisini araştırmak üzere farklı pH'lar da çalışmalar yapılmıştır. Seçilen anot Ss, katot Ss elektrotlar ile 1 A de 0,5g NaCl ilavesi ile 2; 4; orijinal pH(6,5); 8; 10; 12 pH'da 30 dakika boyunca çalışılmıştır. Sistemde pH değerini ayarlamak üzere 0,1 N HCl ve 0,1 N NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Farklı pH çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Parametre	pH 2	pH 4	pH 6,5	pH 8	pH 10	pH 12
pH	3,18	10,65	10,62	10,54	10,47	11,82
İletkenlik (µs/cm)	434	1957	1947	1957	1940	5300
Akım (A)	1	1	1	1	1	1
Voltaj (Volt)	9,9	14,7	13	14,7	13,5	10,3
2,6DMP Ce (mg/L)	84,14	82,03	94,84	70,61	77	88,06
2,6 DMP Giderimi (%)	0	10,42	5,16	21,81	11,49	5,71
TOC Ce (mg/L)	72,69	79,41	79,69	74,81	75,55	79,45
TOC Giderimi (%)	8,39	1,44	2,78	3,23	3,62	2,01
MCE (%)	7,44	1,30	2,55	2,79	3,17	1,82



Şekil 4.2. Farklı pH'larda 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

Yapılan pH çalışmasında Şekil 4.2'de de görüldüğü gibi pH 2 ve pH 8 haricinde genel olarak %10'luk bir verim elde edilmiştir. Fakat pH 8 de %21,81 civarında bir verim elde edilmiştir. Bunun üzerine su içerisindeki 2,6 DMP gideriminde optimum pH 8 olarak seçilmiştir.

4.3 İletkenliğin Etkisi

Elektrokimyasal prosesler, elektrot yüzeyinden çözeltiye ve çözelti içinde heterojen iyon transfer reaksiyonuna dayandığı için suyun iletkenliği önemli bir faktördür. Suyun iletkenliğindeki değişim enerji tüketimini etkilemektedir (Şahin, 2009).

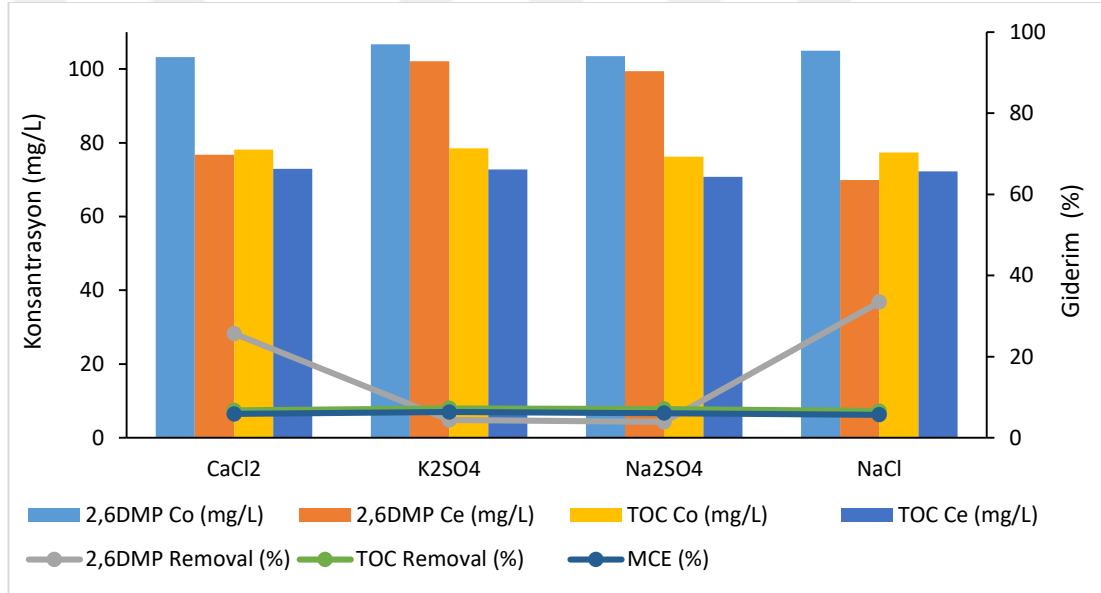
4.3.1 Elektrolit çeşidi

Su içerisindeki 2,6 DMP kirleticisinin giderim verimine farklı parametrelerin etkisi incelenmektedir. Bir diğer parametre olarak iletkenliğin etkisi gözlenmiştir.

Seçilen Ss-Ss elektrotların pH 8'de, 1 A de 30 dakika boyunca ve 0,5 g/L olmak üzere farklı kimyasallar ile denemeler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Farklı destek elektrolit çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Parametre	CaCl ₂	K ₂ SO ₄	Na ₂ SO ₄	NaCl
pH	10,54	10,72	5,86	5,39
İletkenlik (µs/cm)	1889	2035	1639	1656
Akım (A)	1	1	1	1
Voltaj (Volt)	14,4	14,5	19,5	16,1
2,6DMP Ce (mg/L)	76,73	102,07	99,44	69,88
2,6 DMP Giderimi (%)	25,69	4,36	3,89	33,45
TOC Ce (mg/L)	72,91	72,8	70,79	72,26
TOC Giderimi (%)	6,73	7,26	7,11	6,58
MCE (%)	5,87	6,37	6,05	5,68



Şekil 4.3. Farklı destek elektrolitlerde 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

Şekil 4.3 incelendiğinde potasyum sülfat ve sodyum sülfat tuzlarında %4'lük bir 2,6 DMP giderim verimi elde edilmiştir. Yanı sıra sodyum klorür ve kalsiyum klorürde alınan verimler birbirine oldukça yakındır. %33,45 2,6 DMP verim elde edilmesi, kolay bulunması ve ekonomik olması nedeniyle elektrolit çeşidi olarak sodyum klorür tercih edilmiştir.

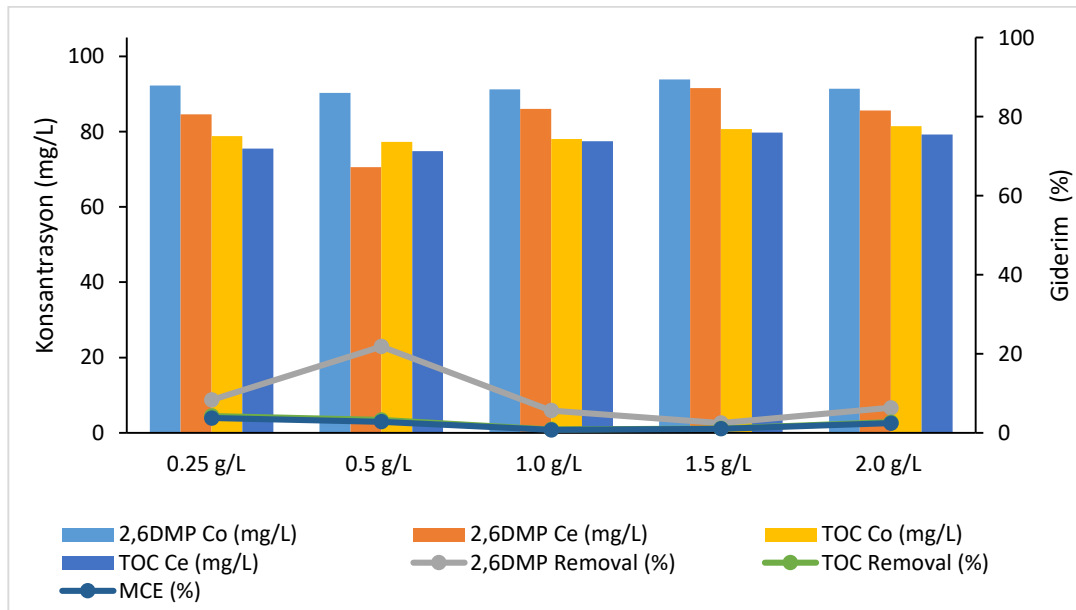
Elektrolit ilavesi, prosesteki atıksuyun elektriksel iletkenliğini artırmak için gereklidir. Uygun fiyatı, düşük toksisite ve klor türleri tükenen anot yüzeylerinde inhibisyon olayını önlemek amacı ile NaCl tercih edilebilir (Şahin, 2009).

4.3.2 Elektrolit miktarı

Tuz çeşidinin seçilmesi üzerine giderim verimine etki edecek parametre olan iletkenliği incelemek adına sisteme farklı miktarlarda sodyum klorür ilave edilmiştir. Ss-Ss elektrotların kullanıldığı ve suyun pH'nın 8 olarak ayarlandığı çalışmada 30 dakika boyunca 0,25 - 0,5- 1 -1,5 -2 g/L soydum klorür ilavesi ile iletkenlikleri ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı destek elektrolit miktarları çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Parametre	0,25 g	0,5 g	1 g	1,5 g	2 g
pH	10,35	10,54	10,84	10,9	10,89
İletkenlik (µs/cm)	942	1957	3780	5430	7140
Akım (A)	1	1	1	1	1
Voltaj (Volt)	21	14,7	7,2	6,5	6,5
2,6DMP Ce (mg/L)	84,6	70,61	86,09	91,56	85,65
2,6 DMP Giderimi (%)	8,30	21,81	5,62	2,44	6,32
TOC Ce (mg/L)	75,52	74,81	77,44	79,81	79,27
TOC Giderimi (%)	4,22	3,23	0,82	1,09	2,65
MCE (%)	3,72	2,7	0,71	0,98	2,41



Şekil 4.4. Farklı destek elektrolit miktarlarında 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

Çizelge 4.5 ve Şekil 4.4'te görüldüğü gibi 0,25 mg soydum klorür ilavesi ile %8'lik bir verim elde edilmiştir. Daha sonra 0,5 mg soydum klorür ilavesi ile birlikte verimde %14'lük bir artışla 2,6 DMP kirleticisinin giderim verimi %22'ye kadar yükselmiştir. Fakat daha fazla soydum klorür ilavesi giderim verimini tekrar düşürmüştür ve %5, %2 ve %6'lık verimler gözlenmiştir. Bu nedenle 0,5 g/L optimum soydum klorür dozu ve iletkenlik 1957 $\mu\text{s/cm}$ olarak belirlenmiştir.

4.4 Akımın Etkisi

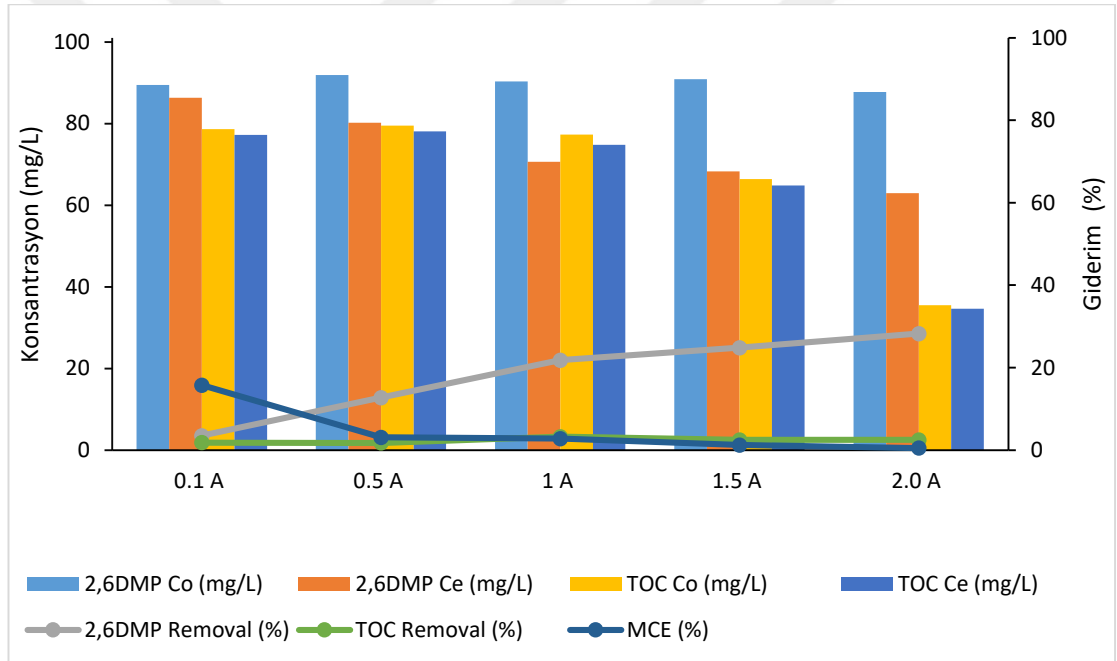
Prosesse uygulanacak akım şiddetine göre kurban elektrotlardan çözünecek metal miktarı değişecektir. Akım şiddeti ve çözünecek metal miktarı ile arasında doğru bir orantı vardır. Akım şiddetinin artmasıyla çözünme daha çok olacaktır (Şahin, 2019).

Akım şiddeti ve hidrojen üretim hızı doğru orantılıdır. Akımın şiddetinin artması prosesteki hidrojen üretim hızını da arttıracaktır aynı zamanda proseste oluşan flok halindeki maddelerinde yüzmesini sağlayacaktır. Fakat çok yüksek akım şiddetinde hücre gerilimi artacak ve elektrik enerjisi artık atıksuyu ısıtacaktır. Bundan dolayı yüksek akım şiddeti sistemdeki giderim verimini olumsuz etkileyecektir (Kahraman, 2019).

2,6 DMP kirleticisinin giderilmesini etkileyen akım farklı yoğunluklarında çalışılmak üzere ayarlanmıştır. Sentetik suyun pH'ı 8'e ayarlandıktan sonra Ss-Ss elektrotlar kullanılarak iletkenliğin artırılması amacıyla 0,5 g/L sodyum klorürün de ilavesi ile 30 dakika boyunca seçilen farklı akımlarda sistem çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.6. Farklı akım şiddeti çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Parametre	0,1 A	0,5 A	1A	1,5 A	2 A
pH	8,55	10,53	10,54	10,11	10,93
İletkenlik (µs/cm)	1865	1914	1957	2020	2039
Akım (A)	0,1	0,5	1	1,5	2
Voltaj (Volt)	2	9	14,7	19,3	21,6
2,6DMP Ce (mg/L)	86,35	80,23	70,61	68,3	62,94
2,6 DMP Giderimi (%)	3,47	12,71	21,81	24,85	28,24
TOC Ce (mg/L)	77,24	78,12	74,81	64,8	34,64
TOC Giderimi (%)	1,79	1,75	3,23	2,45	2,48
MCE (%)	15,75	3,10	2,79	1,21	0,49



Şekil 4.5. Farklı akım şiddetinde 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

Şekil 4.5 ve Çizelge 4.6'da görüldüğü üzere akım şiddeti arttıkça 2,6 DMP kirleticisinin su içerisindeki bulunma oranı da gittikçe azalmaktadır. 0,1 A şiddetinde çalışılan sistemde en az giderim verimi ile % 0,3'lük bir oranda su içerisinde giderilmiştir. Akım şiddeti 1 A ve üstü çalışıldığında sistemden %20'nin üstünde bir 2,6 DMP kirleticisinin giderimi söz konusu olmuştur. En çok verimin elde edildiği akım şiddeti ise %28'lik bir oranla 2 A'dır.

Faraday yasasına göre, uygulanan akımın artışı ile anot elektrotun çözünme oranında arttığı ve buna bağlı olarak sistemde daha fazla metal hidroksit çökeltisi meydana geldiği gözlemlenmektedir. Sistem içerisinde oluşabilecek yüksek kabarcık oluşumu kirlletici ve koagülantın birbiri ile temasını azaltabileceğinden dolayı ve aynı zamanda oksijen oluşumu, ısı üretimi gibi diğer olumsuz etkiler sistemin verimini etkileyeceğinden dolayı sisteme verilecek akım şiddeti sınırlandırılmalıdır (Öztürk, 2019). Bu sebeplerden optimum akım şiddeti 2 A olarak belirlenmiştir.

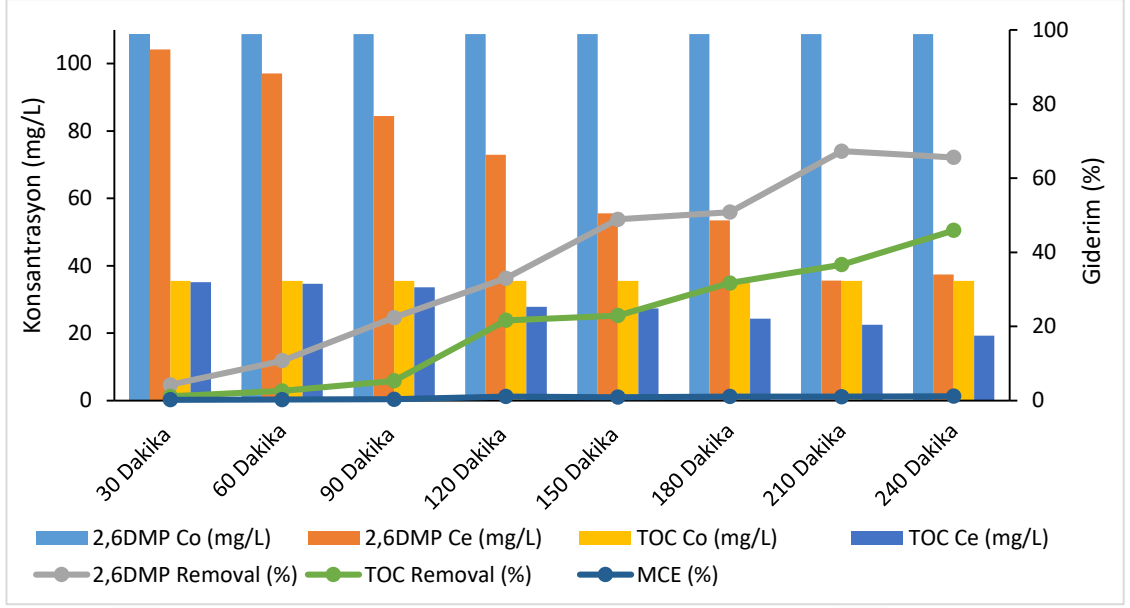
4.5 İşletme Süresinin Belirlenmesi

Arıtım süresi artarsa, iyonların konsantrasyonu ve onların sebep olduğu hidroksit flokların oluşumu artar. Elektrokimyasal arıtım prosesinde yeterli miktarda ve uygun flokların oluşması arıtım süresine bağlı olarak gerçekleşmektedir (Kahraman, 2019).

Giderim verimini etkileyen bir diğer parametre olan işletme süresi üzerinde farklı dakikalarda çalışmalar yapılmıştır. pH 8’de 2 A akım şiddetinde 0,5 g/L NaCl elektrolit ilavesi ile Ss-Ss elektrotları ile yarım saatlik artışlarla çalışan sistem 4 saat boyunca çalışmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7 ve Şekil 4.6’da sunulmuştur.

Çizelge 4.7. Farklı işletme süreleri çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Parametre	30 Dk.	60 Dk.	90 Dk.	120 Dk.	150 Dk.	180 Dk.	210 Dk.	240 Dk.
pH	10,91	11,25	11,32	11,37	11,42	11,44	11,47	11,4
İletkenlik (µs/cm)	2029	2180	2280	2330	2370	2360	2430	2380
Akım (A)	2	2	2	2	2	2	2	2
Voltaaj (Volt)	14,5	15	15,6	16	18,2	19,7	21,9	21,9
2,6DMP Ce (mg/L)	104,2	97,12	84,49	72,93	55,59	53,51	35,57	37,41
2,6 DMP Giderimi (%)	4,23	10,74	22,34	32,97	48,91	50,82	67,31	65,62
TOC Ce (mg/L)	35,13	34,61	33,63	27,84	27,37	24,26	22,5	19,22
TOC Giderimi (%)	1,10	2,56	5,32	21,62	22,94	31,70	36,66	45,89
MCE (%)	0,22	0,25	0,35	1,07	0,91	1,05	1,04	1,14



Şekil 4.6. Farklı işletme sürelerinde 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

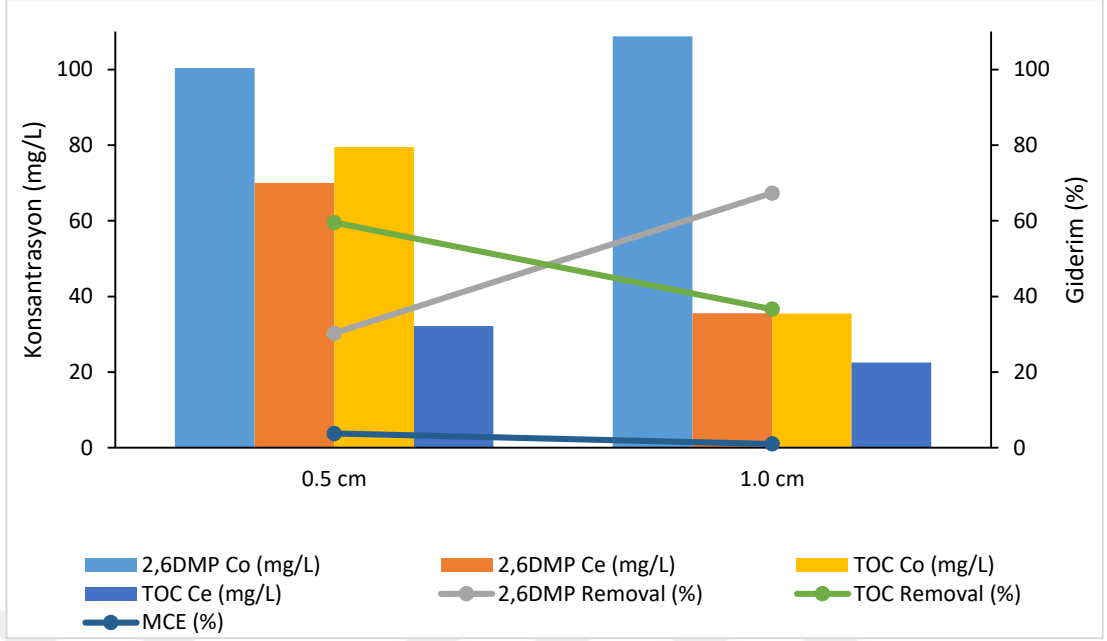
İşletme süresi arttıkça elde edilen giderim veriminin de arttığı ortaya çıkmıştır. 3,5 saatin sonunda sistemden %67'lik bir 2,6 DMP kirleticisinin uzaklaştığı gözlemlenmiştir. İşletme süresindeki artış işletme maliyetini de arttıracığından bu süre optimum işletme süresi olarak belirlenmiştir.

4.6 Elektrotlar Arası Mesafenin Etkisi

Prosesteki kirleticinin arıtımında rol oynayan bir diğer faktör ise elektrotlar arasındaki mesafedir. Ss-Ss elektrotları kullanılarak pH 8'de 0,5 g/L NaCl ile desteklenmesi ile birlikte 2A akımda 3,5 saat boyunca iki elektrot arası mesafenin 0,5 ve 1 cm olacak şekilde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı elektrotlar arası mesafe çalışmalarına ait arıtım parametreleri.

Parametre	0,5 cm	1 cm
pH	8,08	11,47
İletkenlik (µs/cm)	1459	2430
Akım (A)	2	2
Voltaj (Volt)	20,1	21,9
2,6DMP Ce (mg/L)	70	35,57
2,6 DMP Giderimi (%)	30,26	67,31
TOC Ce (mg/L)	32,17	22,5
TOC Giderimi (%)	59,54	36,66
MCE (%)	3,78	1,04



Şekil 4.7. Farklı elektrotlar arası mesafedeki 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.7’de görülebileceği üzere 3,5 buçuk saatin sonunda sistemde iki elektrotun 0,5 cm aralıklarla yerleştirilmesi ile %30,26 2,6 DMP verimi elde edilmiştir. Elektrotlar 1 cm mesafe ile yerleştirildiğinde ise verim %67,3’e yükselmiştir. Bunun sebebi olarak elektrotlar arası mesafenin çok yakın olduğu durumda reaktör içinde etkin sirkülasyonun gerçekleştirilememesi düşünülmektedir. Böylece optimum koşullar için iki elektrot arasındaki mesafe 1 cm olarak tercih edilmiştir.

4.7 Enerji Tüketimi

Çalışmanın bu aşamasında optimum koşullarda 2,6 DMP’nin elektrokimyasal arıtımı için gerekli enerji miktarı hesaplanmıştır. Ss-Ss elektrotlar kullanarak pH 8’de 0,5 mg/L NaCl elektrolit desteği ile, elektrotlar arası mesafe 1cm ve 2A akım şiddetinde 3.5 saatin sonunda ihtiyaç duyulan enerji miktarı Denklem 4.1, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır (Şimşek,2023). Ancak bu hesaplamalar bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilir. Ön görülen maliyette değişiklikler olabilir.

$$SEC \left(\frac{kWh}{m^3} \right) = \frac{(U.i.t)}{(10^3.V)} \quad (4.1)$$

$$SEC \left(\frac{kWh}{kg \text{ 2,6 DMP}} \right) = \frac{(U.i.t)}{(10^3.V . (2,6DMPC_0 - 2,6DMPC_e))} \quad (4.2)$$

$$SEC \left(\frac{kWh}{kg TOC} \right) = \frac{(U.i.t)}{10^3.V.(TOCC_0 - TOCC_e)} \quad (4.3)$$

Denklemlerde U voltaj, i akım (A), t işletim süresi (saat) ve V ise çözeltinin hacmini (m^3) ifade etmektedir.

Bu denklemlere göre optimum koşullarda işletilmesi sırasında $1m^3$ atıksu için enerji tüketimi $2,142 kWh/m^3$ olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda 2,6 DMP ve TOC için enerji tüketimi ise sırayla $31,82 kWh/kg$, $58,42 kWh/kg$ olarak belirlenmiştir. T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından 01.04.2023 tarihindeki geçerli elektrik tarifiesi ve günlük kura göre elektrik enerjisinin birim fiyatı $0,156\$/kWh$ olarak belirlenmiştir. Buna göre optimum koşullarda gerçekleşecek bir elektrokimyasal arıtımın elektrik enerji maliyeti sırayla $0,33\$/m^3$, $4,96\$/kg$ 2,6DMP , $9,11\$/kg$ TOC olarak hesaplanmıştır.

4.8 Optimum Koşulların Gerçek Atıksu Üzerinde Uygulanması

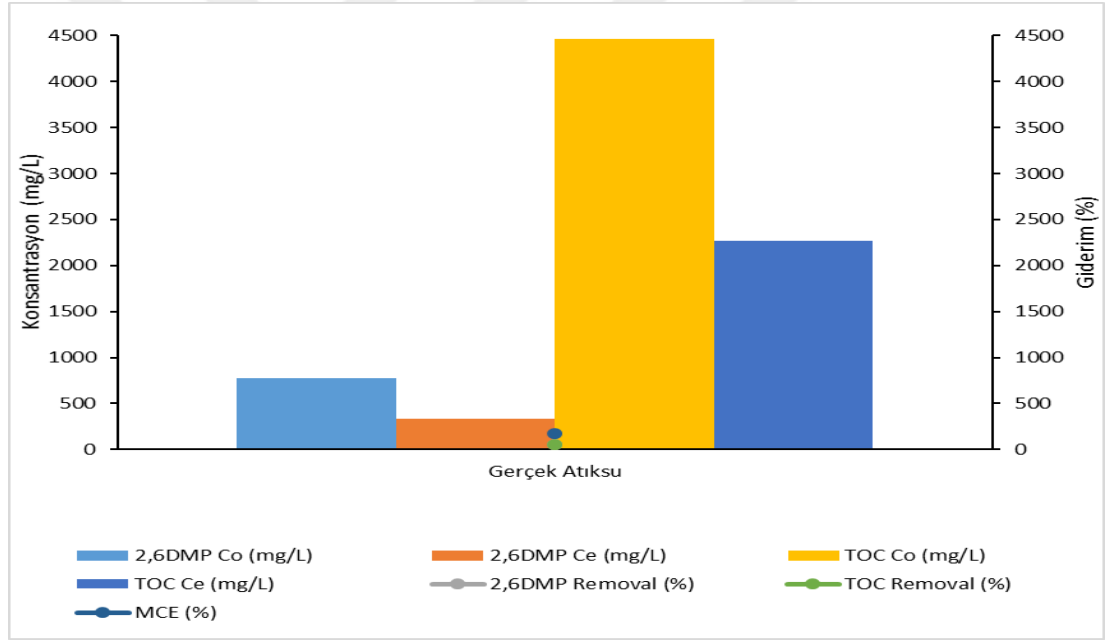
İçerisinde 2,6 DMP kirleticisi bulunan reçine endüstrisi atıksuyunu arıtmak amacıyla reaktör optimum koşullarda işletilmiştir.

Ss-Ss elektrotların 1cm aralıkla yerleştirildiği pH8 de $0,5 g/L$ NaCl ile desteklenmesi ile birlikte 2A akımda 3,5 saat boyunca sistem çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9 ve Şekil 4.8’de sunulmuştur.

Optimum koşulların uygulandığı 2,6 DMP içeren gerçek atıksuyun içerisinden 3,5 saatin sonunda %57,47 oranında 2,6 DMP kirleticisi giderilmiştir. TOC giderim verimi ise %49,09’dur.

Çizelge 4.9. Optimum koşulların gerçek atıksu üzerine uygulanmasına ait arıtım parametreleri.

Parametre	Gerçek Atıksu
pH	9,47
İletkenlik (µs/cm)	796
Akım (A)	2
Voltaj (Volt)	21,3
2,6DMP Co (mg/L)	777,9
2,6DMP Ce (mg/L)	330,82
2,6 DMP Giderimi (%)	57,47
TOC Co (mg/L)	4461
TOC Ce (mg/L)	2271
TOC Giderimi (%)	49,09
MCE (%)	174,69



Şekil 4.8. Optimum koşulların gerçek atıksu üzerine uygulanmasındaki 2,6 DMP ve TOC giderim verimi.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kanserojenik bir organik bileşik olan 2,6 DMP'nin su içerisinde elektrokimyasal yöntemler kullanarak giderimi araştırılmıştır.

Çalışmanın başında elektrokimyasal yöntemlerle giderimi bakımından 1 A akım şiddetinde 30 dakika işletme süresi ve 0,5 g/L NaCl elektrolit ilavesi ile orijinal pH değerinde Gr, Fe, Al, ve Ss elektrotları ile 16 farklı kombinasyonda çalışılmıştır. Farklı elektrotların giderim verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyler sonunda anot olarak kullanılan Ss ve Gr elektrotları ortamdaki ortalama %10 2,6 DMP kirleticisini uzaklaştırmıştır. Anot ve katot elektrot olarak Ss elektrot kullanılan kombinasyonda %22 2,6 DMP kirleticisinin giderimi elde edildiği gözlemlenmiştir. %22'lik bir verim elde edilmesiyle sistemde anot elektrot ve katot elektrot olarak Ss materyali seçilmiştir.

Elektrotların Ss materyali seçildikten sonra, içerisinde 2,6 DMP bulunan atıksuyun pH'ı farklı değerlere ayarlanarak (2-4-Orijinal pH6,5 -8-10-12) pH'ın giderim verimi üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Deneyler 1 A akım şiddetinde oda sıcaklığında 0,5 g/L NaCl destek elektroliti ile 30 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonunda yaklaşık olarak su içerisinde bulunan 2,6 DMP kirleticisi %10'luk bir oranda ortamdaki giderildiği gözlemlenmiştir. pH 8' de yaklaşık %22'lik bir giderim elde edildiği gözlemlendiğinden dolayı optimum pH 8 olarak belirlenmiş ve deneylere suyun pH'ı 8'e ayarlayarak devam edilmiştir.

Optimum pH ve elektrot materyali seçilmesinin ardından arıtım sırasında iletkenliğin etkisini gözlemlemek adına farklı elektrolit ve miktarının belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Destek elektrolit olarak NaCl, K₂SO₄, Na₂SO₄ ve CaCl₂ kimyasalları sırayla denenmiştir. 1 A akım şiddetinde pH 8'de anot ve katot elektrot olarak Ss elektrot kullanılarak oda sıcaklığında, 30 dakika boyunca sırayla 0,5 g/L NaCl, K₂SO₄, Na₂SO₄ ve CaCl₂ kimyasalları ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonucunda K₂SO₄ ve Na₂SO₄ destek elektrolitlerinde yaklaşık %5 oranda giderim verimi sağlanırken NaCl ve CaCl₂ destek elektrolitlerinde yaklaşık %30'luk bir verim elde edilmiştir. Hem erişiminin kolay olması hem de maliyet bakımından daha ucuz olan NaCl destek elektrolit olarak seçilmiştir.

Destek elektrolit olarak NaCl kimyasalının seçiminden sonra arıtım sırasında giderim verimini etkileyecek bir diğer parametre olarak destek elektrolitin miktarı konusunda yani iletkenliğin arıtmadaki oynadığı rolü değerlendirmek adına farklı miktarlarda NaCl destek elektrolitin ilavesiyle deneyler yapılmıştır. 0,25 – 0,5- 1-1,5 ve 2 g/L NaCl destek elektroliti ilavesi ile 1 A akım şiddetinde 30 dakika boyunca optimum pH ve seçilmiş olan anot ve katot elektrot kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerin sonunda 0,25-1-1,5 ve 2 g/L NaCl kimyasalının ilavesi ile gerçekleşen deneylerde ortamdan uzaklaşan 2,6 DMP kirleticisinin oranının %10'un altında kaldığı gözlemlenmiştir. 0,5 g/L NaCl destek elektrolit ilavesinde ise yaklaşık olarak %21'lik bir giderim veriminin olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak optimum destek elektrolit miktarının 0,5 g/L NaCl olduğuna karar verilmiştir.

0,5 g/L NaCl destek elektroliti , optimum pH ve seçilen uygun anot- katot elektrotların belirlenmesi ile birlikte giderim verimini etkileyen bir diğer parametre olan akım şiddetini gözlenmek adına deneyler yapılmıştır. Deneyler 0,1 – 0,5 – 1 – 1,5 ve 2 A olacak şekilde seçilen akımlarda optimum koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonunda akım şiddetinin artışıyla giderim veriminin de doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. 2 A akım şiddetinde yaklaşık olarak %28'lik oranda su içerisinde 2,6 DMP kirleticisinin giderildiği gözlemlenmiştir.

2A akım şiddetinde pH8'de 0,5 g/L NaCl destek elektrolit ilavesi ile anot ve katot elektrot materyali olarak Ss seçiminden sonra giderim verimini etkileyecek bir diğer parametre olarak optimum işletme süresinin belirlenmesi adına deneyler yapılmıştır. Deneyler 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 ve 240 dakika olacak şekilde farklı sürelerde gerçekleştirilmiştir. İşletim süresinin artmasıyla giderim veriminde de bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 180 dakikanın sonunda %50'lik bir oranda su içerisinde 2,6 DMP kirleticisinin giderildiği gözlemlenmiştir. 210 dakikanın sonunda ise %67'lik giderim söz konusudur. Bu şartlar altında 210 dakikalık bir işletme süresi en verimli proses işletim süresi olarak belirlenmiştir.

Son olarak 210 dakikalık işletim süresinde 2 A akım şiddetinde pH8 ve 0,5 g/L NaCl destek elektrolit ilavesi ile çalışacak olan proseste iki elektrot arası mesafenin giderim verimine etkisi araştırılmak adına deneyler yapılmıştır. İki elektrotun arası 0,5 cm ve 1 cm olmak üzere ayarlanmış ve optimum seçilen şartlarda çalıştırılmıştır. İki elektrot arası 0,5 cm olarak ayarlanan proses sürecinde %30'luk bir verim elde edilmiştir.

Optimum koşullar altında prosesteki iki elektrotun arasındaki mesafenin 1cm olarak ayarlanması sonucunda ise %67'lik bir verim elde edilmiştir.

Su içerisindeki 2,6 DMP kirleticisinin giderilmesi adına proses verimini etkileyen başlıca parametreler üzerine deneyler yapılmış ve optimum şartlar belirlenmiştir. Deneyler sonunda anot ve katot olarak Ss materyalinin kullanılması iki elektrot arası mesafenin 1cm olarak ayarlanması ile suyun pH8 de 2 A akım şiddetinde 0,5 g/L NaCl destek elektrolitinin ilavesi ile toplamda 210 dakikalık bir işletim süresinin sonunda %67 oranında su içerisinde 2,6 DMP kirleticisinin giderildiği yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır.

2,6 DMP kirleticisi içeren bir suyun optimum koşullarda elektrokimyasal yöntemlerle arıtılması için elektrik enerji maliyeti ortalama 0,33\$/m³ , 4,96\$/kg 2,6 DMP ve 9,11\$/kg TOC olarak hesaplanmıştır.

Optimum koşulların belirlenmesi adına yapılan deneylerin ardından belirlenen optimum koşulları gerçek 2,6 DMP kimyasalı içeren bir atıksu üzerinde uygulanmıştır. Yapılan deney sonunda içerisinde 2,6 DMP kirleticisi barındıran gerçek atıksu içerisinde %57 oranında 2,6 DMP kirleticisinin arıtıldığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada yapılan giderim sistemi 2,6 DMP giderimi için etkili bir yöntemdir. Giderim verimini arttırmak adına farklı elektrot materyalleri ile sistem geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdelwahab O., Emin, N. K., ve El-Ashtoukhy, Es. Z., 2009. Electrochemical removal of phenol from oil refinery wastewater, *Journal of hazardous materials*, 163, 2–3, 711-716.
- Akbaş, H., 2014. Elektrokoagülasyon yöntemi ile renk gideriminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Akdemir, Ö. Ü., 2020. Metal kaplama tesisi atıksuyundan elektrokoagülasyon yöntemi ile fosfat giderimi, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10, 4, 1077-1084.
- Akyol, R. B., 2020. Aljinat doğal ve endüstriyel atık materyal katkılı kompozitlerle atıksulardan fenol giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun.
- Altan Süel, B., 2019. Organik peroksit üreten bir kimya endüstrisi atıksuyunun karakterizasyonu ve arıtılabilirlik çalışması, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Al-Thawr, H., Tezcan Ün, U. ve Özden Üzmez, Ö., 2022. Removal of phenol by electro-fenton process, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 39, 149-153.
- Arar, Ö., Kocaoğlu, A., Sandıkçı, Ö., Parmaksız, A. ve Yüksel, Ü., 2017. The effect of ion exchange resin form on the removal of phenol from water, *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2, 2, 39-50.
- Atabey, M., 2019. Reaktif red 195 içeren tekstil atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Atmaca, E., Karagözoğlu, B. ve Özyonar, F., 2011. İçme suyundan elektrokoagülasyon prosesi ile doğal organik madde giderimi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27, 4, 309-316.
- Aytaş, B., 2008. Farklı adsorbanlar ile sulu çözeltilerden klorofenol giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü , İstanbul.
- Barlak, S. M., 2010. Jet loop reaktörde fenol ve dikloro fenolün ozonlama ile giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bayraktar Bulut, B., 2019. Su ortamındaki fenollerin ozon bazlı ileri oksidasyon teknikleri ile giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Baysal, G., 2020. 3-Amino-1, 2, 4-triazol-5-tiyol ile modifiye edilen kalem grafit elektrot yüzeyinde 2-nitrofenol'ün elektrokimyasal davranışı ve tayini, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Boncukcuoğlu, R., Bayar, S., Fil, B. A. ve Yılmaz A. E., 2012. Antep fıstığı işleme atıksularının elektrooksidasyon yöntemiyle ön arıtım çalışmaları, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2, 2, 29-36.
- Can, O. T., 2020. Fenol çözeltisinin farklı elektrotlar kullanılarak elektrooksidasyonu, Beü Fen Bilimleri Dergisi, 9, 2, 952-957.
- Candar, K. G., 2018. Bor cevheri yıkama atık suyundan çöktürme ve elektrokoagülasyon yöntemleri ile borun giderimi ve geri kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demirci Tanrikulu, B., 2010. Determination of p-aminophenol in the presence of paracetamol in pharmaceutical preparations, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Deveci, E. Ü., 2014. Fenol ve fenol türevi bileşiklerin biyolojik parçalanabilirliği, 2. Uluslararası çevre ve ahlak sempozyumu, Adıyaman, Bildirler Kitabı, 664-672.
- Dinçer, T., 2013. Fenolik bileşiklerin elektrokoagülasyon ile zeytin karasuyunda geri kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Elçi, A., Gündüz, O., Şimşek, C. ve Polat, R., 2007. İzmir-Nif Dağı çevresindeki yeraltı suyu nitrat kirliliği boyutunun mevsimsel değerlendirilmesi, 7. Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, İzmir, 482-489.
- Evcin, A., Uçar, M., Uçar, S. ve Ünverdi, H., 2014. 4-Klorofenolün Al_2O_3 katkılı hidroksiapatit ile sulu ortamdan uzaklaştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14, 3, 225-232.
- Gümüş, D., 2007. Elektrokimyasal oksidasyon yöntemi ile fenol ve 4-klorofenol giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Günay, N., 2010. Döner biyodisk sistemlerde fenol giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- İleri, B., 2020. Cu-Ti-Sütunlu zeolit kullanarak atıksulardan fenol gideriminin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- İlhan, F., 2017. Elektrodializ proseslerinden kaynaklanan konsantre akımın minimizasyonu ve yeniden kullanılabilirliğinin incelenmesi: Tekstil atıksuyu örneği, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21, 5, 943-950.
- Kahraman, Ö., 2019. Kot kumaşı üretim tesisi atıksularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.

- Kaplan akmak, Y., 2013. Yüksek gerilimli elektrik deşarjı kullanılarak fenolik bileşiklerin giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Karadağ, E. K., 2009. Elektrokoagülasyon yöntemi ile karışım halindeki tekstil boyar maddelerin renk giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Karagözoğlu, M. B. ve Yılmaz, Z., 2019. Atıksuların arıtılmasında elektrokoagülasyon uygulamaları, Be Fen Bilimleri Dergisi, 8, 1, 319-334.
- Karakaş, A., 2013. Model süt endüstrisi atıksuyunun elektrokimyasal yöntemlerle arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Kaya, ř., 2018. Elektrooksidasyon yöntemi ile fenol gideriminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Kayserili, Z., 2001. Karbon nanotüpler ile bazı fenol bileşiklerinin giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Korkmaz, C., 2022. Hidrotermal yöntem ile polimerik reçine üzerine perovskit katalizörlerin kaplanması ve fotokatalitik yöntemle fenol giderimi, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Köksal, Z., Yılmaz, A. E., 2017. Antep fıstığı işleme sanayi atıksularının sürekli elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımına etki eden parametrelerin incelenmesi, Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 1, 95-103.
- Orkun, M. O., 2007. Katı atık sızıntı sularının elektrokimyasal yöntemlerle arıtımının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Öztürk, D., 2018. Mermer endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Öztürk, H., 2019. Elektrooksidasyon-elektrokoagülasyon hibrit prosesiyle fenol giderimi: reaksiyon kinetiği ve metabolitlerin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- zyurt, B., 2019. Evsel ve endüstriyel atık suların birleşik elektrokoagülasyon ve elektro-oksidasyon prosesi ile arıtılması, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- T.C. Resmi Gazete, İçme suyu temin edilen suların kalitesi ve arıtılması hakkında yönetmelik.(31608), 24.09.2021
- T.C. Resmi Gazete, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği.(25687), 31.12.2004

- Solak, M., 2019. Hibrit elektrokoagülasyon / elektrooksidasyon prosesleri ile denim ürün üretim atıksularının arıtımı, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23, 3, 780-786.
- Şahin, O., 2009. Fenol içeren atıksuların elektrokimyasal metot ile arıtımı, Yüksek Lisans Tezi, T.C. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Şimşek, İ., 2023. Usability of brass and stainless steel electrodes in electrochemical treatment of 4-nitrophenol, Journal of hazardous materials advances, 9,100249.
- Şimşeker, M., 2009. Tekstil endüstrisi indigo atıksularının elektrokoagülasyon ve diğer fiziksel-kimyasal yöntemler ile arıtımı ,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tanattı, N. P., 2009. Kanatlı hayvan kesimhane atıksularının elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Tanattı, N. P., 2015. Biyodizel atıksularının elektrokoagülasyon ve ileri oksidasyon yöntemleri ile arıtılabilirliği, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Tetik, A., 2011. İçme sularından elektrokoagülasyon yöntemi ile florür giderimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yavuz, Y., 2004. Fenolün elektrokimyasal yöntemlerle sudan giderimi, Doktora Tezi , Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yazıcı, R., 2009. Aerobik ve anaerobik depo sahasında oluşan sızıntı sularında fenol bileşiklerinin tayini, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- URL-1 <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2879>>, Erişim tarihi: 21.05.2023
- URL-2 <<https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/product/aldrich/d175005>>, Erişim tarihi: 21.05.2023
- URL-3<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/996>>, Erişim Tarihi :21.05.2023
- URL-4<<https://www.nkfu.com/fenol-nedir-ozellikleri-nelerdir-bilesikleri-kullanimleri-hakkinda-bilgi/>> , Erişim Tarihi : 21.05.2023

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : İrem Durur

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 2016-2020

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020-2023

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Aksaray Üniversitesi Kurumu / Yaz Stajı
2. Brisa Bridgestone Sabancı Lastik San. Ve Tic. A.Ş. Kurumu / Ortak Eğitim Programı

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Bildiriler

1. Durur, İ. ve Şimşek,İ., 2023. Fenolik bileşiklerin arıtımına elektrokimyasal bir bakış, 3. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve Yenilikçi Çalışmalar Sempozyumu , Balıkesir, Bildiri Kitabı, 581-582.