



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GALVANİZLEME PROSESİNDEN
KAYNAKLANAN ATIKSUDA
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİYLE
AĞIR METAL GİDERİMİ

Hüseyin Can GÜLYAŞAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

Ek-2

TEZ KABUL VE ONAYI

Hüseyin Can GÜLYAŞAR tarafından hazırlanan "Galvanizleme Prosesinden Kaynaklanan Atıksuda Elektrokoagülasyon Yöntemiyle Ağır Metal Giderimi" adlı tez çalışması 17/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği /-oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri**Başkan**

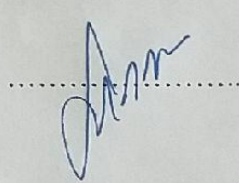
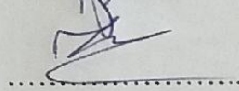
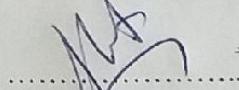
Dr.Öğr.Üyesi Fatma KUNT

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Zehra GÖK

Üye

Dr.Öğr.Üyesi Sezen KÜÇÜKÇONGAR

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hakan KARABÖRK
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Hüseyin Can GÜLYAŞAR

17.07.2019

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****GALVANİZLEME PROSESİNDEN KAYNAKLANAN ATIKSUDA
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİYLE AĞIR METAL GİDERİMİ****Hüseyin Can GÜLYAŞAR****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Zehra GÖK****2019, 68 Sayfa****Jüri****Dr. Öğr. Üyesi Sezen KÜÇÜKÇONGAR
Dr. Öğr. Üyesi Fatma KUNT**

Metal kaplama endüstrisi, hızla gelişen endüstriler arasında önemli bir yere sahiptir. Bu tesislerde galvaniz prosesinden kaynaklı ağır metal içeriği yüksek atık sular oluşmaktadır.

Ağır metaller çevre kirliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışmada; metal kaplama endüstrisinden kaynaklanan atık sularındaki ağır metallerden Cr^{+3} ve Zn^{+2} 'nin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi incelenmiştir.

Çalışmalar 1 L hacmindeki cam reaktörlerde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup demir-demir ve demir-bakır olmak üzere 2 farklı elektrot çifti kullanılmıştır.

Çalışmalarda farklı pH değerlerinde (pH 5-pH 12) reaksiyon gerçekleştirilmiştir ve reaksiyon sonucunda oluşan atıksuyun ICP-MS'te analizi yapılmıştır.

Demir-demir elektrotta 10 dakika içinde orijinal pH değerinde % 55.87 Cr^{+3} giderimi elde edilmiş olup, demir-bakır elektrotta pH değeri 7'de 30 dakika içinde % 79.74 Zn^{+2} giderme verimi elde edilmiştir.

Demir-bakır elektrotta 10 dakika içinde orijinal pH değerinde % 99.9 Cr^{+3} giderimi elde edilmiş olup, demir-bakır elektrotta pH değeri 9'da 30 dakika içinde % 99.9 Zn^{+2} giderme verimi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arıtım, Atıksu, Çinko, Elektrokoagülasyon, Krom

ABSTRACT

MS THESIS

TREATMENT OF METAL PLATING WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION PROCESS

Hüseyin Can GÜLYAŞAR

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Environmental Engineering**

Asst. Prof. Dr. Zehra GÖK

2019, 68 Pages

Jury

**Asst. Prof. Dr. Sezen KÜÇÜKÇONGAR
Asst. Prof. Dr. Fatma KUNT**

Metal plating industry has an important place among the rapidly developing industries. In these facilities, heavy metal rich wastewaters are generated from the facilities which have galvanized process.

Heavy metals have a significant impact on environmental pollution. In this study, it was investigated that the heavy metals in wastewaters due to metal coating industry rinsing bath waters can be treated by electrocoagulation method.

In this study, it was investigated that heavy metals (Cr^{+3} ve Zn^{+2}) in metal plating industry wastewater can be treated by electrocoagulation method. The experiments were carried out at room temperature in 1 L glass reactors. Two different electrodes, iron-iron and iron-copper, were used and experiments were performed at different pH values (pH 5-pH 12).

Heavy metal analyzes were performed with ICP-MS.

55.87 % Cr^{+3} removal was obtained in iron-iron electrode at the original pH value in 10 minutes and 79.74 % Zn^{+2} removal was obtained in iron-iron electrode at the pH value 7 in 30 minutes.

99.9% Cr^{+3} removal was obtained in iron-copper electrode at the original pH value in 10 minutes and 99.9 % Zn^{+2} removal was obtained in iron-copper electrode at the pH value 9 in 30 minutes.

Keywords: Chromium, *Electrocoagulation, Treatment, Wastewater, Zinc*

ÖNSÖZ

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda gerçekleştirilen yüksek tez çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimi ile çalışmamı yönlendiren danışman hocam Dr.Öğr. Üyesi Zehra GÖK'e, danışman hocam gibi yardımlarını esirgemeyen ve laboratuvarında çalışma imkanı tanıyan Dr. Öğr. Üyesi Sezen KÜÇÜKÇONGAR'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan, beni yetiştiren aileme ve İclal GÜLYAŞAR, Uras Musab GÜLYAŞAR, Kerem Ekin GÜLYAŞAR'a teşekkür ederim.

Hüseyin Can GÜLYAŞAR
KONYA-2019



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	10
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	12
2.2. Elektroliz	15
2.2.1. Elektrokimyasal Proseslerin Esasları	15
2.2.2. Faraday Yasası.....	16
2.3. Atıksuların Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtımı	17
2.3.1. Elektrodializ	18
2.3.2. Elektrooksidasyon	19
2.3.3. Elektroforez	20
2.3.4. Elektroflotasyon	21
2.3.6. Elektrokoagülasyon	22
2.3.3. Elektrokoagülasyon ile Atıksu Arıtımında Yapılan Bazı Çalışmalar.....	26
2.4. ELEKTROKOAGÜLASYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	31
2.4.1. pH	31
2.4.2. Sıcaklık	32
2.4.3. Elektrot Tipi.....	32
2.4.4. Akım Yoğunluğu	33
2.4.5. Bekleme Süresi	34
2.4.6. İletkenlik.....	34
2.4.7. Elektrotların Bağlantı Tipi.....	35
2.4.8. Elektrotlar Arası Uzaklık.....	37
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
3.1. Atıksu Karakteristiği	38
3.2. Reaktör Tasarımı ve İşletim	39
3.3. Koagülant Giderimi.....	42
3.4. Analizler.....	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	44
4.1. Fe-Fe Elektrot Kullanımı İçin Bulgular	44

4.1.1. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Zaman Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi.....	44
4.1.2. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak pH Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi.....	46
4.1.3. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin Optimizasyonu	47
4.1.4. Fe-Fe Elektrot Kullanımında Anotta Kütleli Kayıp	49
4.1.5. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminde Çamur Oluşumunun İncelenmesi.....	49
4.2. Fe-Cu Elektrot Kullanımı İçin Bulgular	52
4.2.1. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Zaman Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi.....	52
4.2.2. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak pH Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi.....	53
4.2.3. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin Optimizasyonu	55
4.2.4. Fe-Cu Elektrot Kullanımında Anotta Kütleli Kayıp	56
4.2.5. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminde Çamur Oluşumunun İncelenmesi.....	57
4.3. Elektrik Tüketiminin Hesaplanması.....	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	61
5.1. Sonuçlar.....	61
5.2. Öneriler	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- OH : Hidroksil Radikali
- q : Akım Miktarı
- I : Akım Şiddeti
- A : Amper
- d : Elektrotlar arası Mesafe
- E : Elektriksel Alan
- F : Faraday
- m : Metre
- n : Çözünen Metalin Tesir Değerliliği
- t : Zaman
- V : Elektriksel Potansiyel

Kısaltmalar

- AKM : Askıda Katı Madde
- BOI : Biyolojik Oksijen İhtiyacı
- CN :Siyanür
- KOI : Kimyasal Oksijen İhtiyacı
- TN : Toplam Azot
- TOK : Toplam Organik Karbon
- TP : Toplam Fosfor
- ÇOK : Çözünmüş Organik Karbon

1. GİRİŞ

İlkçağlardan itibaren insanlığın gelişimi ve metalin işlenmesi paralellik göstermiştir. Özellikle Britanya'da başlayan sanayi devrimi sonrasında metalin kullanım alanları ve kullanım şekilleri çeşitlilik göstermiştir.

İşlenen metallerin korozyona karşı direncinin artırılması amacıyla galvanizleme yöntemi geliştirilmiştir. Galvaniz kaplamalarda amaç altlık malzemesini korumak ve daha uzun bir ömür kazandırmaktır. Bu ise, kaplanan malzemenin altlık malzemesinden daha yavaş bir şekilde korozyona uğramasıyla yani kurban olmasıyla gerçekleşir (Akbaş, 2009). Ancak galvaniz prosesi neticesinde ağır metal içeriği yüksek olan atıksu çıkışı söz konusudur.

Endüstriyel atıksular içerdikleri ağır metal iyonları ile günümüzde en önemli çevre sorunlarından olarak görülmektedir. Bu atıksuların alıcı ortama ulaşması sucul yaşamı olumsuz etkilemekte ve su kaynaklarının içme suyu kaynağı olarak kullanılması durumunda pahalı arıtma tekniklerinin uygulanmasını gerekli kılmaktadır (Ergene, 2013).

Metal kaplama sanayinden kaplama işlemi sonrasında uygulanan durulama banyo işlemi sonrasında çevre kirliliğine sebep olan organik maddeler, Ni, Cu, Fe, Cr, Zn vb. ağır metal bileşikler, siyanür gibi katı, sıvı ve gaz atıklar ortaya çıkmaktadır. Kaplama atıksuyunda bulunan ağır metallere ötürü metal kaplama sanayi riskli sanayi sektörleri arasında yer almaktadır (Özlü, 2016).

Elektrokoagülasyon prosesi endüstriyel atıksuların arıtımında dikkat çeken bir yöntemdir. Elektrokoagülasyon prosesi, ağır metal gibi kirleticileri içeren atıksuların arıtımında kullanılan, kolay uygulanan, düşük maliyetli ve çevre dostu bir arıtma yöntemidir (Al-Shannag ve ark., 2015; Doggaz ve ark., 2019; Graça ve ark., 2019). Zeytin fabrikaları, petrol rafinerileri, kağıt hamuru ve kağıt fabrikaları, gıda endüstrisi, restaurant, boya imalat, metal kesme ve tekstil atıksularının arıtımında çok yönlülüğü ve sağladığı çevresel uyum ile tercih edilen bir prosestir (Veli ve ark., 2018). Ayrıca içme sularında da kirleticilerin giderimi için çalışmalar yapılmıştır.

Elektrokoagülasyonla emülsifiye maddeler, askıda katı maddeler ve kolloidal maddeler kararlı hale getirilir. Bu yüzden elektriksel uygulamalarda elektrotlarla partiküller uygun şekilde temas ettirildiğinde partiküller nötralize olmakta ve farklı partiküller kombine olarak büyük floklar oluşturmaktadır. Genellikle elektrokoagülasyon prosesinde alüminyum ya da demir elektrotlar kullanılmaktadır.

Bunun nedeni metalik iyonların adsorpsiyon kapasitesi yüksek olduğu için iyi bir koagülant olmasından kaynaklanmaktadır. Dağınık haldeki partiküller elektrokoagülasyon prosesiyle sudan arındırılabilmekte ve kararlı çamur elde edilebilmektedir (İlhan ve ark., 2007).

Elektrokoagülasyon prosesinin işletilmesi önündeki engeller; katot üzerinde film tabakası oluşması, elektrodun harcanması, yetersiz iletkenlik ve elektrik maliyeti olarak sıralanabilir. Ancak bu dezavantajlardan aşılabilir veyahut diğer sistemlerde de görülebilecek özelliklerdendir.

Tüm bunların yanında kolay kurulum ve işletim yapılabilmesi, kokusuz su çıkışı daha az ve stabil bir çamur oluşması, küçük kolloidalları bir araya getirebilmesi, kimyasal kullanılmaması sistemi cazip kılmaktadır.

Elektrokoagülasyon, klasik kimyasal koagülasyonun avantajlarına ilave olarak büyük çamur üretimi, yüksek işletme maliyeti ve ikincil kirlilik gibi pratik uygulamalarında birçok önemli sorunun üstesinden gelmektedir (Xu ve ark., 2017). Ayrıca genellikle küçük reaktörler kullanılmasına karşılık oldukça yüksek verim elde edilmektedir (Dias ve ark., 2019).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Galvaniz Prosesi ile İlgili Genel Bilgiler

İşlenen metallerin korozyona karşı direncinin artırılması amacıyla galvanizleme yöntemi geliştirilmiştir. Galvaniz kaplamalarda amaç altlık malzemesini korumak ve daha uzun bir ömür kazandırmaktır. Bu ise, kaplanan malzemenin altlık malzemesinden daha yavaş bir şekilde korozyona uğramasıyla yani kurban olmasıyla gerçekleşir (Akbaş, 2009).

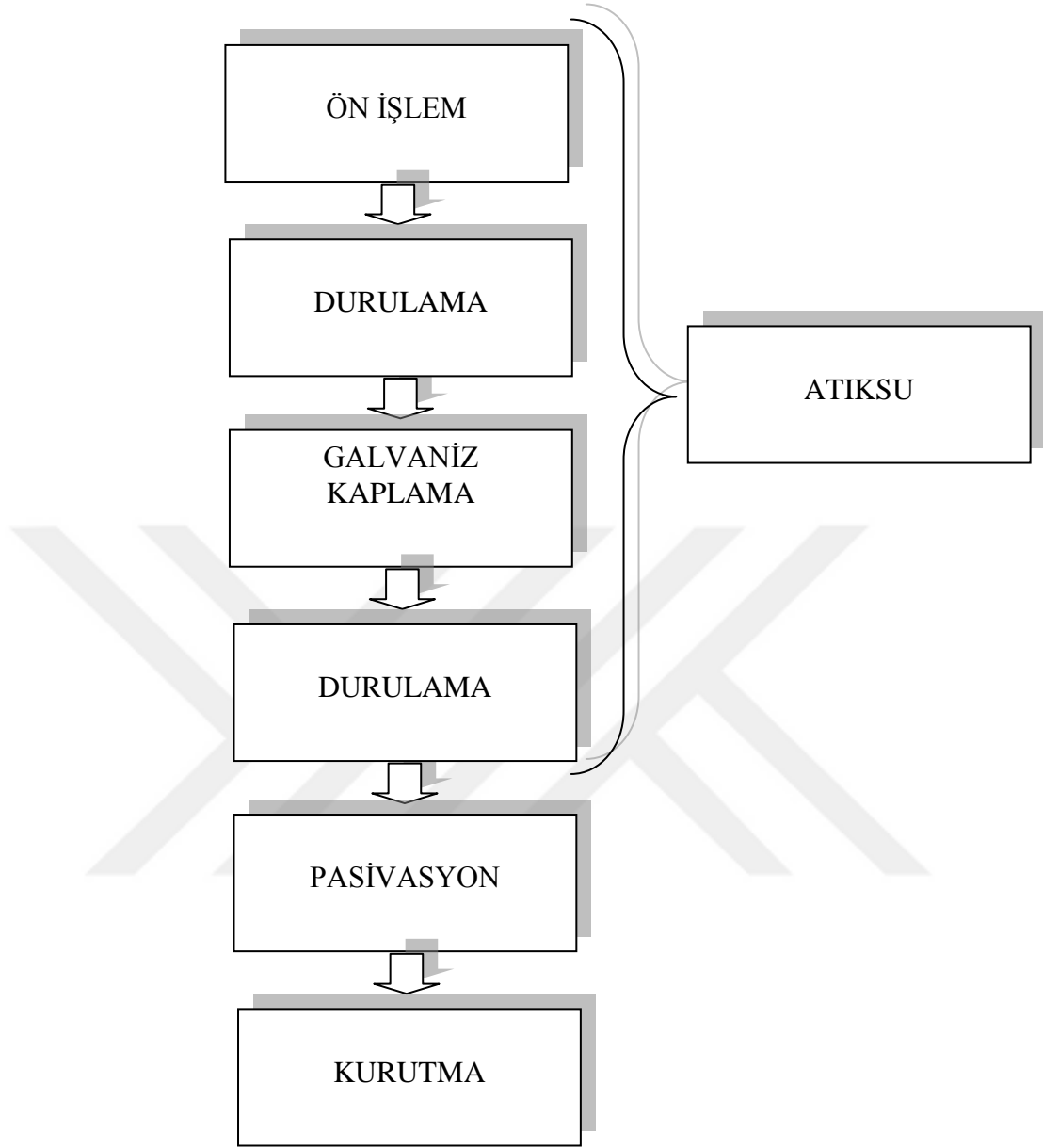
Galvanizleme yöntemi 1742 yılında kimyacı P.J. MALOUÏN tarafından French Royal Akademi’ de yapılan bir sunumda demirin ergitilmiş çinkoya daldırılarak kaplanması metodu olarak keşfedilmiştir. Galvaniz kaplama Elektro Galvaniz ile kaplama ve Sıcak Daldırma Galvaniz kaplama olmak üzere iki şekilde yapılır. Sıcak daldırma galvaniz yöntemi ile ergimiş halde bulunan çinko içerisine malzeme daldırılarak kaplama işlemi yapılır. Galvanizleme işlemi; gerekli parçaların sulu elektrolit çözücü içinde doğru akımla metalik tabaka ile kaplanmasıdır (Özlu, 2016).

Yüzey işlem teknolojilerinden biri olan çinko kaplama, galvanizleme olarak adlandırılmaktadır. Galvanizleme genellikle, sıcak daldırma, elektroliz veya metal püskürtme yöntemleri ile yapılır. Sıcak daldırma galvanizleme yöntemi sayesinde geleneksel malzemelerin daha uzun ömürlü kullanımı mümkün olmuştur (Akbaş, 2009)

Metal kaplama ile malzemedede;

- Korozyona karşı dayanım
- Daha iyi bir dış görünüş
- Parlak ve pürüzsüz-düzgün yüzey
- Eskime ve aşınmaya karşı dayanıklılık elde edilir (Özlu, 2016).

Kaplama yapılacak malzeme metal olabilmesinin yanı sıra suni maddeler de olabilmektedir. Galvaniz işleminin özet iş akışı Şekil 2.1.’de görülmektedir.



Şekil 2.1. Galvaniz prosesi iş akış şeması

Galvaniz kaplama prosesinde atıksu; ön işlemin yapıldığı (yağ alma, pas giderme, vb.) havuzlardan itibaren oluşmaktadır. Buradan kaynaklanan atıksular Ni, Cu, Fe, Cr, Zn vb. ağır metal bileşikleri, siyanür gibi zehirli atıklar içerebilmektedir (Al-Shannag ve ark., 2015). Bu atıksuların alıcı ortama deşarj edilebilmesi için kirlenici seviyenin sınır seviyenin altında olması gerekmektedir. Ülkemizde de bu sınır değeri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde belirtilmiş olup Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğine göre alıcı ortama bu suların deşarj edilebilmesi için sağlanması gereken kriterler Çizelge 2.1.'de yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Metal Sanayii (Galvanizleme) Alıcı Ortam Deşarj Standardı

PARAMETRE	BİRİM	KOMPOZİT NUMUNE 2 SAATLİK	KOMPOZİT NUMUNE 24 SAATLİK
KİMYASAL OKSİJEN İHTİYACI (KOİ)	(mg/L)	600	-
ASKIDA KATI MADDE (AKM)	(mg/L)	125	-
YAĞ VE GRES	(mg/L)	20	-
AMONYUM AZOTU (NH ₄ -N)	(mg/L)	100	-
AKTİF KLOR	(mg/L)	0.5	-
TOPLAM KROM	(mg/L)	2	-
KROM (Cr ⁺⁶)	(mg/L)	0.5	-
KURŞUN (Pb)	(mg/L)	1	-
TOPLAM SİYANÜR (CN ⁻)	(mg/L)	0.2	-
KADMİYUM (Cd)	(mg/L)	0.5	-
ALÜMİNYUM (Al)	(mg/L)	3	-
DEMİR (Fe)	(mg/L)	3	-
FLORÜR (F ⁻)	(mg/L)	50	-
BAKIR (Cu)	(mg/L)	2	-
NİKEL (Ni)	(mg/L)	3	-
ÇİNKO (Zn)	(mg/L)	5	-
GÜMÜŞ (Ag)	(mg/L)	0.1	-
BALIK BİYODENEYİ (ZSF)	-	8	-
pH	-	6-9	-

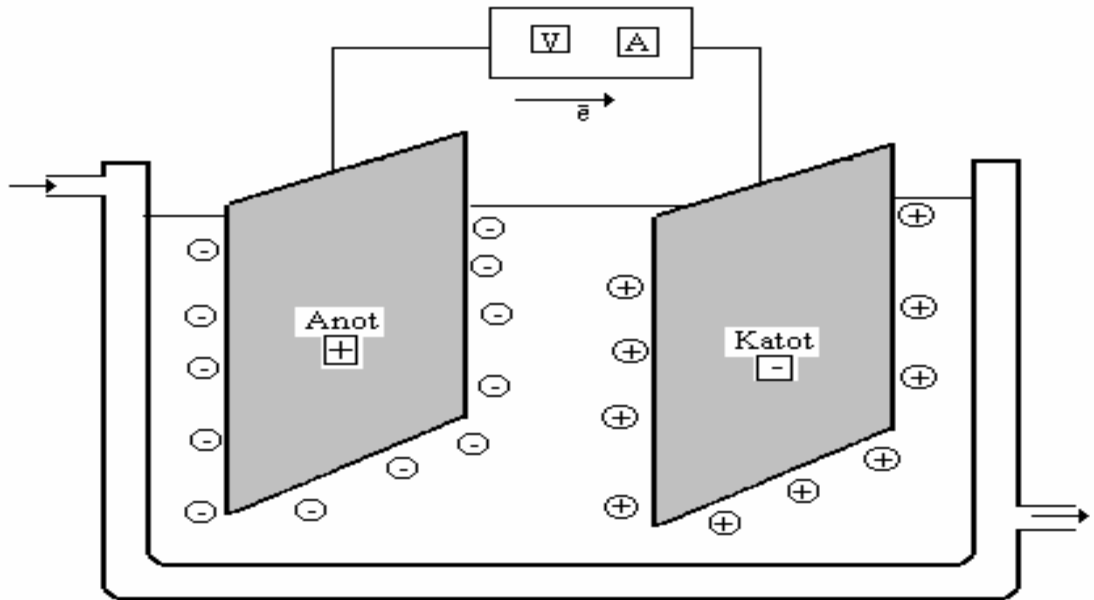
2.2. Elektroliz

2.2.1. Elektrokimyasal Proseslerin Esasları

Elektrokimyasal tepkimeler, elektrolitten hareket eden iyonik bileşiklerin anotta ve katotta yükseltgendiği veya indirgendiği heterojen iyon transferi tepkimeleridir. Anot ve katotta genellikle metal, karbon veya bir yarı iletken elektrot kullanılmaktadır. Bir elektroliz hücresinin şematik olarak görünüşü Şekil 2.2.'de anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar ise Çizelge 2.2.'de verilmiştir. Bir elektroliz işleminin gerçekleşebilmesi için; anot ve katot arasında bir bağlantı ve elektroliz çözeltisinde belli bir iletkenlik (anyon ve katyonlar) olması gerekir (Parlak, 2008).

Çizelge 2.2. Elektrokimyasal redoks reaksiyonları (Parlak, 2008)

Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
Anot elektron verir	Katotta indirgenme olur
Anotta çözünme olur	Katotta birikme olur
Anyonlar anotta toplanır	Katyonlar katotta toplanır
Anolit bölge oluşur	Katolit bölge oluşur
Anotta oksijen çıkışı gözlenir	Katotta hidrojen çıkışı gözlenir
Ortamda klorür iyonu var ise anotta klor çıkışı gözlenir	Ortamdaki çözünen gaz indirgenir



Şekil 2.2. Bir elektrokimyasal hücrenin şematik görünümü (Parlak, 2008)

2.2.2. Faraday Yasası

Metalin kütle dönüşümünü gösteren yasa Faraday yasası olarak bilinir. Bu dönüşüme göre, sisteme verilen elektrik yüküne bağlı olarak metal elektrotların kütlelerinde değişim olur. Elektrik katılarda elektronlar tarafından iletildiğinden 1.0 mol elektronun taşıdığı yük 96485 C'dur ve bu miktar elektrik yükü "1.0 Faraday (F)" olarak bilinmektedir (Kasap, 2017).

Bir elektrokimyasal hücrede, geçen akımın miktarı "q" ile akım şiddeti "I" ve zaman "t" arasındaki ilişki;

$$q = \int (I dt) \quad (2.1)$$

Çözünen metalin mol miktarı ise;

$$m = q / (n.F) = (I.t) / (n.F) \quad (2.2)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Bu eşitlikte,

n: Çözünen metalin tesir değeri

F: Faraday sabiti (96500 Coulomb/mol), olarak ifade edilir

Elektrokimyasal bir proseste; Faraday değeri ile akım verimi arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$CE = q_p / q_t \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte;

q_p : oluşan ürünün harcadığı yük

q_T : toplam harcanan yük değerini ifade etmektedir.

Oluşan ürün veya harcanan materyalin miktarı esas alınarak ölçülen (m_{act}) ve teorik (m) akım verimi arasındaki ilişki;

$$CE = m_{act} / m \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir. (1.2) eşitliği (1.4) eşitliğinde yerine yazılırsa;

$$CE = (m_{act} \cdot n \cdot F) / q \quad (2.5)$$

eşitliği elde edilir.

Bir elektrottaki toplam akım, her reaksiyonun akımlarının toplamına eşit olacaktır. Bu durumda bir elektrottaki toplam akım I_j ,

$$I = \sum I_j \quad (2.6)$$

olacaktır. Elektrokimyasal proseste herhangi bir anda akım verimi, akıma bağlı olarak:

$$CE = I_j / I \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir (Özyonar, 2007).

2.3. Atıksuların Elektrokimyasal Yöntemlerle Arıtımı

Artan endüstriyel faaliyetler neticesinde, başka alternatifi olmayan su kaynakları da kirlenmeye maruz kalmaktadır. Suya olan ihtiyacın giderilebilmesi için su kaynaklarının korunmasının yanı sıra kullanılmış suların arıtılabilmesi de elzemdir. Bu sebeple çeşitli arıtım yöntemleri geliştirilmiş olup, klasik yöntemlere nazaran daha etkin yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Elektrokimyasal arıtım yöntemleri basit, verimli, çevreye uyumlu ve çok yönlü bir arıtım prosesi olmasından dolayı su ve atıksu arıtımında önemli bir aktör kılmaktadır (İlhan ve ark., 2007; Yıldırım, 2007).

Elektrokimyasal arıtım yöntemleri 1990'ların ortalarında geliştirilen yeni bir yöntemdir. Elektrokimyasal bir reaksiyonda yük, elektrot ile iletken sıvı içindeki reaktif türler arasındaki ara yüzeyde transfer olur. Elektrokimyasal bir reaktör bir anot, bir katot, bir iletken elektrolit ve güç kaynağından oluşmaktadır (Deliktaş, 2011).

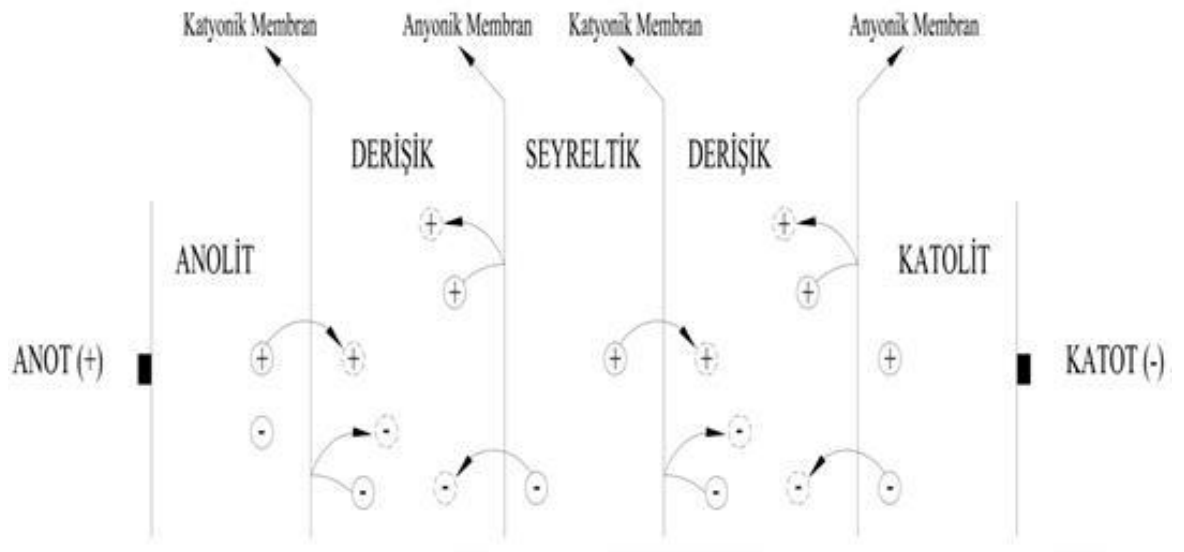
Elektrokimyasal arıtım yöntemlerinde kısa sürede yüksek arıtma verimleri elde edilmesi, ilave kimyasal kullanım gerektirmemesi ve dolayısıyla ilave kirlilik

oluşturmaması, işletme kolaylığı, düşük maliyet ve sürekli geliştirilebilirliğinden dolayı ümit verici yapıdadır (Yıldırım, 2007; Akbaş, 2014).

Elektrokimyasal arıtım prosesleri başta elektrokoagülasyon olmak üzere, elektrodializ, elektroflotasyon, elektrooksidasyon, elektroflokülasyon gibi yöntemlerdir (Akbaş, 2014; Fil, 2014).

2.3.1. Elektrodializ

Elektrodializ, elektrot ile iletken sıvı içindeki reaktif türler arasındaki ara yüzeyde transfer olmasıdır. Elektrokimyasal bir reaktör bir anot, bir katot, bir iletken elektrolit ve güç kaynağından oluşmaktadır (Kalkan, 2015). Eğer bir elektriksel potansiyel farkı bir elektrolit çözeltisine uygulanırsa sonrasında pozitif iyonlar (katyonlar) negatif elektroda (katot), negatif iyonlar (anyonlar) pozitif elektroda (anot) göç ederler. Yüksüz moleküller yürütücü kuvvetten etkilenmezler ve böylece elektriksel yüklü bileşenler onların yüksüz karşılıklarından ayrılabilirler. Elektriksel yüklü membranlar iyonların göçünü kontrol etmek için kullanılırlar. Bu tip membranlar elektriksel iletkenlerdir. Bu membranlar iki farklı tipte incelenirler. Katyon değiştirici membranlar pozitif yüklerin, anyon değiştirici membranlar negatif yüklerin geçişine izin verirler (Aytaç, 2016). Elektrodializ sürecinin çalışma prensibi Şekil 2.3.'te verilmektedir.



Şekil 2.3. Elektrodializ sürecinin çalışma prensibi (Kalkan, 2015)

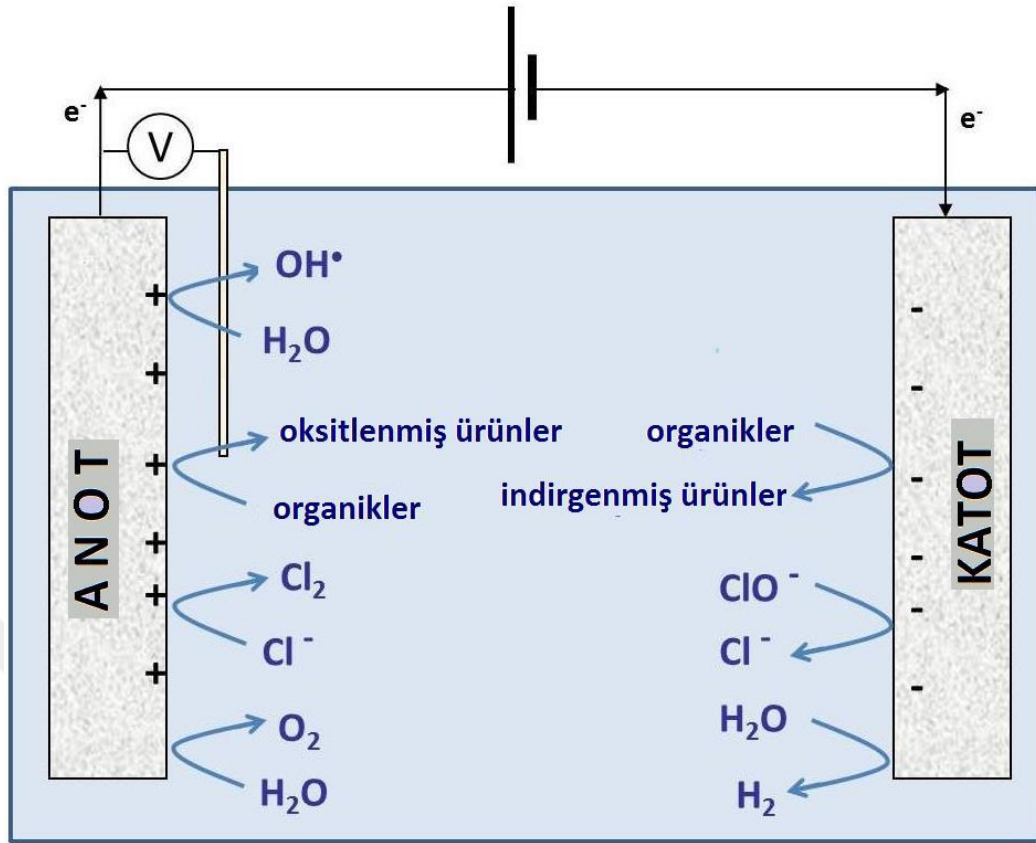
Tanklardan pompalar aracılığı ile hücreye gelen elektrolit, anot tarafından giriş yaptığında ilk olarak anot elektrodu ile kullanılan ilk membran arasında kalan bölgeye geçiş yapar. Anot ile ilk membran arasında kalan bölme anolit olarak adlandırılır. Katot tarafından giriş yapan elektrolit ise, ilk olarak katot ile katota en yakın ilk membran ile etkileşir. Katot ile membran arasında kalan bölge katolit olarak adlandırılır (Kalkan, 2015).

Katyonic membranlar pozitif yüklü iyonları geçirirken anyonik membranlar negatif yüklü iyonları geçirirler. Elektrodializ sisteminde membranlar arasında anyon ve katyonların geçişleri dolayısıyla daha fazla bulunduğu kısım derişik kısım, daha az bulunduğu kısım seyreltik kısım olarak adlandırılır (Kalkan, 2015).

Atıklardan yararlı ürünlerin ve suyun geri kazanımı, gıda süreçlerinden tuz ve asitlerin ayırımı, medikal çözeltilerin giderimi, deniz suyunda tuz eldesi, deniz suyunun tuzsuzlaştırılması, tuzlardan asit ve baz üretimi, asetik asit geri kazanımı, meyve sularında asit geri kazanımı, proteinlerin saflaştırılması, fotografik kimyasalların rejenerasyonu, ultra saf su üretimi, organik asitlerin ve şekerin demineralizasyonu, amino asit ve kan arıtımı, elektrolitlerin ayrıştırılması, izotonik çözeltilerin hazırlanması, şarap stabilizasyonu, metaller için arıtım veya zenginleştirme elektrodializ sisteminin kullanıldığı bazı süreçlerdir (Aytaç, 2016).

2.3.2. Elektrooksidasyon

Elektrooksidasyon; grafit, kaplanmış titanyum, bor kaplı elmas gibi çözünmeyen bir anot malzemesi kullanılarak organik maddelerin O_2 ve H_2 gibi gazlar ile oksitlenmesi esasına dayanır (Fil, 2014; Kasap, 2017). Organik kirlilikler elektrokimyasal oksidasyon yöntemiyle direk veya dolaylı oksidasyon prosesi ile anot yüzeyinde parçalanabilir (Fil, 2014). Bu oksidasyon sayesinde birçok madde okside olurken aynı zamanda biyolojik olarak parçalanması zor olan maddeler kolaylıkla parçalanabilir organik bileşikler haline, CO_2 ve H_2O gibi son ürünlere dönüştürülür (Köksal, 2015; Kasap, 2017). Şekil 2.4.'te elektrokimyasal oksidasyon prosesinde kirliticilerin anot ve katot yüzeyinde parçalanma mekanizması görülmektedir.



Şekil 2.4. Elektrokimyasal oksidasyon prosesinde kirlenmelerin anot ve katot yüzeyinde parçalanma mekanizması

2.3.3. Elektroforez

Elektroforez; bir çözeltideki yüklü bir molekülün veya partikülün elektriksel bir sahada bir elektroda doğru hareket etmesi esasına dayanan bir yöntemdir (Berik, 2002). Filtrasyon sisteminde uygulanan elektriksel alanın yüklü partiküller ve kolloidlerin hareket yönünü etkileyerek membran yüzeyinde depolanmasını engelleyen proses elektroforez olarak adlandırılır. Yüklü partiküller homojen bir elektriksel alan altında ters yüklü elektrotlara doğru bir elektroforetik hız ile hareket edeceklerdir (Delipınar, 2007).

2.3.4. Elektroflotasyon

Elektroflotasyon yöntemi, atıksular içerisinde bulunan organik ve çözülmüş çok küçük partiküller halinde bulunan süspansiyon maddelerin elektrik akımı kullanılarak, elektrotlarda suyun elektrolizi sonucu oluşan H_2 ve O_2 gibi gaz kabarcıklarıyla birleşerek su yüzeyine yükselmesi ve yüzeyde oluşan bu çamurların sıyrıcılar yardımı ile uzaklaştırılması işlemidir (Kasap, 2017).

Elektrokoagülasyon yönteminde alüminyum ve demir elektrot iyonları elektrikle çözülerek koagülant oluşurken, anotta metal iyonları üretimi gerçekleşmekte, katotta ise hidrojen gazı çıkmaktadır. Hidrojen gazı sudan çıkan floklaşmış partikülleri su üzerine yüzdürmesine neden olabilmektedir (Çolak, 2017).

Elektroflotasyon boyutları küçük olmasına rağmen dispersiyon yeteneğine sahip gaz kabarcıklarına dayalı olarak ilerleyen bir prosestir. Burada gaz kabarcıkları prosesin temelini oluşturmaktadır. Elektrotun cinsi ve yüzey alanının yanı sıra akım yoğunluğu ve reaktör tipi de büyük önem taşımaktadır (Kasap, 2017). Genel olarak elektroflotasyon prosesinin işletme şartlarının optimizasyonunda akım, elektrot tipi, pH ve sıcaklık gibi parametreler değiştirilerek sistem için optimum işletme şartları belirlenmektedir (Çolak, 2017; Kasap, 2017).

Atıksulardan elektroflotasyon yöntemiyle yağ ve emülsiyonlar gibi düşük yoğunluklu maddelerin yanı sıra askıda katı madde giderimi de sağlanabilmektedir. Özellikle bazı tesislerde problem oluşturan KOI'nin bir kısmı bu yöntemle giderilebilmektedir. Elektroflotasyon yöntemi metal kaplama, tekstil, boya, kentsel atıksu ve kimya sanayi atıksuların arıtımında kullanılmaktadır (Çolak, 2017; Kasap, 2017).

2.3.5. Elektroflokülasyon

Elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon işlemlerinin bir arada gerçekleştirildiği hibrit bir yöntemdir. Elektroflokülasyon prosesinde anot materyali olarak Fe veya Al levha tercih edilmektedir. Katot materyali olarak ise çelik levha kullanılmaktadır. Fe ve Al, anotta Fe^{2+} , Al^{3+} iyonlarına yükseltgenir. Katotta suyun elektrolizi sonucu H^+ iyonuna ve $\bullet OH$ radikallerine oksitlenir. Fe^{2+} ve Al^{3+} iyonları ile $\bullet OH$. radikalleri reaksiyona girerek çökelebilen, $Fe(OH)_2$ ve $Al(OH)_3$ formlarına dönüşürler. Bu flokların çökmesi sonucu ortamda kirliliklerin giderimi sağlanır.

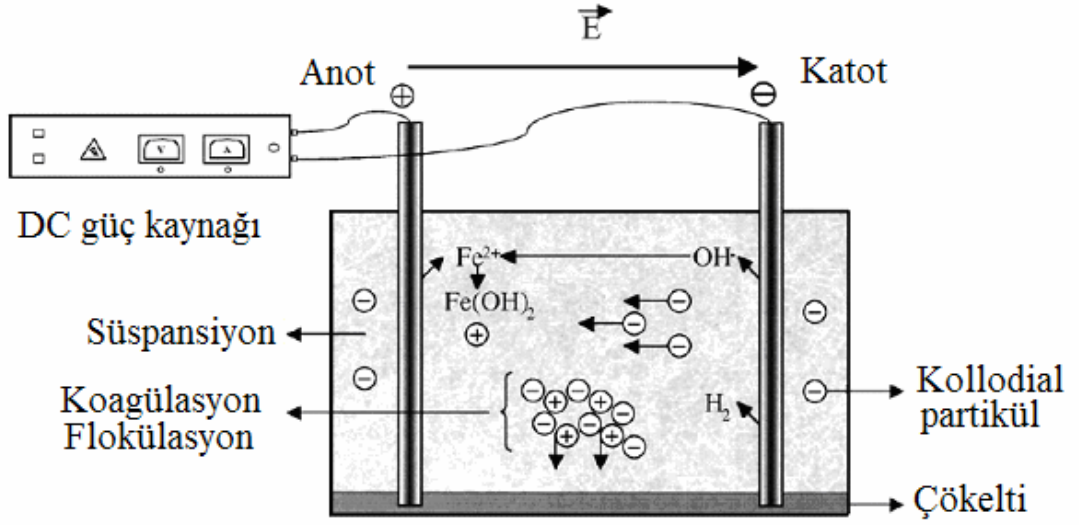
Ünite de aynı zamanda katotta oluşan H^+ gazı kabarcıkları negatif yüklü partiküller ile temas ederek su yüzeyinde flokların birikmesine neden olur. Oluşan bu floklar, bir sıyırıcı yardımı ile yüzeyden uzaklaştırılır (Fil, 2014).

2.3.6. Elektrokoagülasyon

Elektrokoagülasyonun kullanımı 1900'lü yılların başlarına dayanmaktadır (Dura ve Breslin, 2019). Elektrokoagülasyon ile atıksu arıtımı ilk olarak 1889'da İngiltere'de önerilmiştir. 1909 yılında ABD'de demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile atıksuların arıtımı ile ilgili bir patent alınmıştır. Büyük ölçekte elektrokoagülasyon ile içme sularının arıtımı 1946'da ABD'de ilk olarak uygulanmıştır. Elektrokoagülasyon ile 1956 yılında İngiltere'de nehir suları arıtılmış olup, dönem şartlarında yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle sistem rağbet görmemiştir. Atıksu deşarjında standartların getirilmesi ile birlikte yöntem yeniden rağbet görmüştür (Parlak, 2008).

En yaygın olarak kullanılan elektrokimyasal proses elektrokoagülasyondur (İlhan ve ark., 2007). Elektrokoagülasyon çözünebilir ve pıhtılaştırıcı özelliğe sahip bir metal elektrotun kullanıldığı (Alüminyum, demir, vb.) kimyasal atıksu arıtım sürecidir (İlhan ve ark., 2007; Fil, 2014; Kasap, 2017). Elektrokoagülasyon, suyun arıtılmasında ağır metaller gibi farklı kirletici türleri, organik bileşikler, yağ ve askıda katı maddeler gideriminde uygulanabilmektedir. Dahası, minimum kimyasal gereksinimi dolayısıyla daha az ikincil kirlilik ve düşük çamur üretimi konvansiyonel bir alternatif olarak görülmüştür (Graça ve ark., 2019).

Elektrokimyasal reaksiyonlar elektrolit ile hareket eden iyonik bileşiklerin anot ve katotta yükseltildiği veya indirildiği heterojen iyon transferi reaksiyonlarıdır. Anot ve katot genellikle metal, karbon veya yarı iletken malzemedir yapılan elektrotlardır (Öztürk, 2017). Kullanılan elektrodun çözünmesi sonucu ortaya çıkan M^{n+} iyonu ve suyun hidrolizi sırasında ortaya çıkan OH^- iyonunun birleşerek koagülant madde oluşturması ve kirleticiyi çökeltmesi esasına dayanır (Aytaç, 2016). Elektrokoagülasyon prosesinin kirleticileri uzaklaştırmadaki prensibi koagülasyon, adsorpsiyon, çöktürme ve flotasyon giderme mekanizmalarının biri veya bir kaçına dayandığı, alüminyum ve demir gibi metal anotların anodik çözülmeye uğraması ve hidrolizi ile çok az çözünen $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitlerin oluşması şeklindedir (Özyonar, 2012). Elektrokoagülasyon prosesinin şematik görünüşü Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Elektrokoagülasyon prosesinin şematik görünüşü (Özyonar, 2007)

Elektrokoagülasyon yönteminde birbirini izleyen 3 temel aşama vardır;

- Elektrotların yüzeyinde oluşan elektrolitik reaksiyonlar
- Sıvı fazda koagülantların (metalik iyonların) oluşumu
- Çözünabilir ya da kolloidal kirleticilerin adsorpsiyon, koagülasyon, sedimentasyon veya flotasyon mekanizmaları ile giderilmesi (Akbaş, 2014).

Elektrokoagülasyonla emülsifiye maddeler, askıda katı maddeler ve kolloidal maddeler kararlı hale getirilmektedir. Bu yüzden elektriksel uygulamalarda partiküller nötralize olmakta ve büyük floklar oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinde metalik iyonların adsorpsiyon kapasitesinin yüksek olması nedeni ile alüminyum ya da demir elektrotlar kullanılmaktadır (Akbaş, 2014).

Elektrot malzemesi olarak alüminyum kullanıldığında elektrot reaksiyonları:

Katotta;



Anotta;



ve çözeltideki çözülmüş oksijen ile



şeklinde özetlenebilir.

Ayrıca elektrot malzemesi olarak demir kullanılması durumunda ise reaksiyonlar katotta reaksiyon oluşurken anot ve çözelti reaksiyonları aşağıdaki gibidir;

Anotta;



Çözeltide;



ve sonuç olarak toplam reaksiyon ise;



Yukarıdaki reaksiyonlardan görüldüğü üzere elektrokoagülasyon; yumaklaşma ve yüzdürme işlemlerinin bir bileşimidir. Katottan çıkan hidrojen gazı kabarcıkları, oluşan yumaklara yapışarak onların yüzeye iletilmelerine zorlar ve bu sonuç elektrokagülasyon işlemine elektrofлотasyonun eşlik ettiğinin bir göstergesidir (Köksal, 2015).

Elektrokoagülasyonla ağır metal giderimi iki yolla gerçekleşmektedir. Bunlardan biri yüzey kompleksleşme, diğeri elektrostatik çekimdir. Metal hidroksitin çözünmeyen flokları, arıtım mekanizmasında mekanizmasında bağımsız olarak üretilir. İlave olarak, adsorpsiyon ve metal hidroksitlerin oluşumu ve doğrudan çökmesi gibi başka mekanizmalar da oluşabilmektedir. Kompleksleşme mekanizmasında, ağır metal, bir yüzey kompleksi veren pıhtılaştırıcı flokların sulu kısmına bir kompleksleşme bağı oluşturmak üzere bir ligand olarak rol oynamaktadır. İkinci mekanizma, ağır metal kirletici ile pıhtılaştırıcı flok arasındaki elektrostatik çekimi dikkate almaktadır. Floktaki görünür pozitif veya negatif yük alanlarının varlığına dayanarak, negatif görünen şarj alanı, ağır metalin flok

oluşturarak çökmesini sağlayacak biçimde çözüldüğüden çeker. Ayrıca, yeni oluşmuş şekilsiz flokların geniş yüzey alanları, sulu bir çözüldüğüden üçüncü bir mekanizma ile ayrılan çözünebilir iyonları absorplayabilir ve/veya koloidal parçacıkları tutabilir. Elektrokoagülasyonda pıhtılaşmanın ağır metallerin tek giderim mekanizması olmadığını belirtmek gerekir. Bu türlerin katot yüzeyine elektrokimyasal olarak indirgenmesi de mümkündür. Bu kirleticilerin giderim etkinliklerini artırır (Garcia-Segura ve ark., 2017).

Ağır metaller sudan uzaklaştırılma mekanizması 2 basamaklıdır. Bu sırasıyla kompleks oluşumu ve elektrostatik çekimdir.

Prosesin avantajları;

1. Basit ekipmanlar ve işletme şartları gerektirir.
2. Arıtım çıkışı renksiz, kokusuz ve berraktır.
3. Oluşan çamur, metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilir ve susuzlaştırılabilir. Çamur miktarı azdır.
4. Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağıl su içermektedirler. Asidik ortama dirençli ve stabil olup, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
5. Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözülmüş katılar içerir.
6. Elektrokoagülasyon prosesleri, en küçük koloidal parçacıkları giderme avantajına sahiptirler. Çünkü cihazların uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırır.
7. Elektrokoagülasyonda kimyasal madde kullanımından kaçınılır ve böylece kimyasal koagülasyonda ilave edilen yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddenin sebep olduğu ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi ortadan kaldırılmış olunur.
8. Elektroliz sırasında üretilen gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyabilir, böylece daha kolay ayrılmaları sağlanır.
9. Proses hücresi içindeki elektrotlar sabit konumda olup, elektriksel olarak kontrol edilir, böylece daha az bakım gerektirir.
10. Elektrokoagülasyon prosesi için, kırsal alanlarda elektrik prosese ilave edilen güneş panellerinden temin edilebilir (İlhan ve ark., 2007; Özyonar, 2007; Parlak, 2008).

Prosesin dezavantajları;

1. Çözünen 'harcanan elektrot'ların düzenli olarak yenilenmesi gerekmektedir.
2. Bazı yerlerde elektrik kullanımını pahalı olabilir.
3. Katot üzerinde geçirimsiz bir film tabakası oluşumu prosesin verimliliğini düşürebilir
4. Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir (Özyonar, 2007; Öztürk, 2017).

2.3.3. Elektrokoagülasyon ile Atıksu Arıtımında Yapılan Bazı Çalışmalar

Elektrokoagülasyon ile atıksu arıtımı, yapılan çalışmalara da paralel olarak daha cazip hale gelecektir. Bazı çalışmalar incelenmiş olup, başarılı sonuçlar gözlemlenmiştir.

Kasap (2017), alüminyum elektrot kullanarak kağıt endüstrisinden kaynaklanan atıksuda hidrojen peroksit ilavesi ile KOI, AKM ve renk giderimini incelemiş olup 24 dakikadan daha kısa sürede %97 KOI giderimini tespit etmiştir.

Parlak (2008), metal kaplama durulama banyolarından çıkan siyanür ve kadmiyum içeren atıksuların demir elektrot kullanarak elektrokoagülasyon ile arıtımını incelemiştir. Cd-CN içeren atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtılmasında işletme süresine bağlı olarak akım yoğunluğu arttıkça CN ve Cd giderim veriminin arttığı, yüksek akım yoğunluklarında daha düşük işletme süreleri gerektiğini belirtmiştir. Elde edilen sonuçlara göre siyanür ve kadmiyum içeren atıksular için 30 akım yoğunluğu ve 50 dakika işletme süresinin optimum olduğu belirtmiştir.

Siyanür ve kadmiyum içeren atıksular için, siyanür giderimi için pH 8.60, ve Cd içeren atıksular için ise pH 10.60 değerlerinin optimum pH'lar olduğu belirlenmiştir. CN ve Cd giderim verimleri sırasıyla % 99.81 ve % 99.50 olarak belirlemiştir. Sonuç olarak elektrokoagülasyon prosesinin çalıştığı atıksu için etkili arıtım yöntemi olduğunu belirtmiştir.

İlhan ve ark. (2007), katı atık sızıntı suyunun alüminyum elektrot kullanarak elektrokoagülasyon ile KOI ve amonyum azotu giderimini incelemişlerdir. Çalışmalarında optimum şartlar olarak; akım yoğunluğunu 63.1 mA/cm^2 , çalışma süresini 30 dakika olarak belirlemişlerdir. Bu şartlarda KOI ve amonyum azotu giderimlerini sırasıyla % 59.1 ve % 14.6 olarak tespit etmişlerdir. Çalışmaları neticesinde tüm bu elektrokoagülasyonun sızıntı suyunun nihai arıtımından ön arıtım sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Fil (2014), yaptığı çalışmada antep fıstığı işleme atıksularının grafit elektrot kullanarak elektrokoagülasyon ile KOİ, toplam organik karbon ve toplam fenol giderimini incelemiştir. İletkenliği sağlayabilmek için suya NaCl ilave etmiştir. 15 mA/cm² akım yoğunluğu ve 300 dakika bekleme süresi ile sırasıyla % 99.79, % 76.55, % 100 oranlarında giderim elde etmiştir.

Veli ve ark. (2018), gıda endüstrisi atıksuyunun alüminyum elektrot kullanılarak kesikli sistemde elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımını incelemiştir. Yaptıkları çalışmada pH, iletkenlik, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan optimum koşullar pH 7, iletkenlik 3.5 mS/cm, akım yoğunluğu 1.83 mA/cm² ve süre 30 dakika olarak belirlenmiştir. Bu koşullarda % 95 KOİ giderimi elde etmişlerdir.

Özyonar (2007), yaptığı çalışmada alüminyum ve demir elektrotları kullanarak et ve et ürünleri tesisinden kaynaklanan atıksuyun elektrokoagülasyon ile arıtımını incelemiştir. Bu çalışma sonucunda, demir elektrotları ile elektrokoagülasyonda % 76.73 KOİ, % 94.9 yağ-gres ve % 94.62 bulanıklık giderimi elde etmiştir. Demir elektrotları için optimum şartlar ise, 100 A/m² akım yoğunluğu, 30 dakika deney süresi ve pH 6 olarak bulmuştur. Alüminyum elektrotlar ile %77.47 KOİ, % 94.87 yağ-gres ve % 94.79 bulanıklık giderim verimi elde etmiştir. Alüminyum için optimum deney şartları ise, 140 A/m² akım yoğunluğu, 30 dakika deney süresi ve pH 4 olarak bulmuştur.

Özyonar (2012), yaptığı çalışmada kömür endüstrisinden kaynaklanan atıksuyun demir elektrot kullanarak arıtımını incelemiştir. İşletme koşullarının pH 3, akım yoğunluğu 200 A/m² ve elektroliz süresinin 80 dakika olduğu şartlarda, KOİ, TOK, fenol, siyanür ve tiyosiyanat giderme verimleri sırasıyla, % 30, % 27.5, % 14, % 14.2 ve % 16.1 olarak elde etmiştir. EC prosesinde bu atıksuların arıtılmasında beklenen sonuçları alamadığını belirtmiştir.

Öztürk (2017), evsel nitelikli gri atıksuyun arıtımını demir ve alüminyum elektrotlar kullanarak incelemiştir. Yaptığı çalışmada elektrokoagülasyon prosesinin optimum işletme şartları ham su pH değeri 7.4±0.2, 1 g Na₂SO₄/L elektrolit ilavesi, 3 mA/cm² akım yoğunluğu ve 40 dakika proses süresi olarak belirlemiştir. Bu optimum şartlarda Al (Alüminyum) elektrotlar kullanılarak % 88.1 KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) ve % 97.2 bulanıklık giderimi, Fe (demir) elektrotlar kullanılarak % 79.3 KOİ ve %99.4 bulanıklık giderim verimleri elde etmiştir. AKM (Askıda Katı Madde), TN (Toplam Azot), TP (Toplam Fosfor) ve BOİ₅ (Biyolojik Oksijen İhtiyacı)

parametrelerinde de alüminyum elektrot varlığında sırasıyla % 62.3, % 44, % 98, % 88.5; demir elektrot varlığında sırasıyla % 80.6, % 8.5, % 98.4, % 78.46 giderim verimleri elde etmiştir.

Tanattı (2015), demir ve alüminyum elektrot kullanarak biyodizel endüstrisinden kaynaklanan atıksuyun elektrokoagülasyon ile arıtımını incelemiştir. Optimum elektrokoagülasyon şartlarında her iki elektrotla % 95 civarında KOİ, % 87 civarında TOK ve % 99 üzerinde yağ-gres giderimi sağlamıştır.

Delil ve Gören (2018), demir ve alüminyum elektrot kullanarak her elektrot türü için ayrı ayrı optimum renk ve KOİ giderimlerin incelemiştir. Demir elektrot kullanarak yaptıkları çalışmada 3 saat bekleme süresi ve pH 3'e düşürülerek % 93 renk ve % 89 KOİ giderimi elde ettiklerini belirtmişlerdir. Alüminyum elektrot kullanarak ise yine 3 saat bekleme süresi ile suyun doğal pH'sında % 92 renk ve % 88 KOİ giderimi elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Özyonar ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada demir ve alüminyum elektrot kullanarak içme sularından doğal organik madde giderimini incelemiştir. Demir elektrot kullanarak ÇOK ve UV₂₅₄ için sırasıyla % 78 ve % 94.5 giderim elde etmişlerdir. Alüminyum elektrot kullanarak ise ÇOK ve UV₂₅₄ için sırasıyla % 65.4 ve % 80.3 giderim elde etmişlerdir. Sonuç olarak elektrokoagülasyon ile içme sularında doğal organik madde gideriminde etkin bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Elektrokoagülasyon ile yapılan ve örnek verilen çalışmalar Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Elektrokoagülasyon ile Atıksudan Kirletici Giderimi Konusunda Yapılan Çalışmalar

Atıksu Kaynağı	Kullanılan Elektrot	Çalışma Koşulları	Kirletici	Giderim	Kaynak
Metal Kaplama Endüstrisi	Fe	pH:8,6 ¹ -10,6 ² 30 A/m ² 50 dk	CN Cd	% 99.8 ¹ % 99.50 ²	Parlak (2008)
Metal Kaplama Endüstrisi	Fe	pH:5 30 A/m ² 30 dk	KOI Renk Cr Ni Zn	% 76.2 % 99.8 %98.5 % 96 % 99.7	Oden ve Erkan (2018)
Kağıt Endüstrisi	Al	pH:7,97 55mA/cm ² 23,56 dk H ₂ O ₂ İlavesi	KOI	% 97	Kasap (2017)
Sızıntı Suyu	Al	pH:8,1 63,1mA/cm ² 30 dk	KOI NH ₄ -N	% 59.1 % 14.6	İlhan ve ark. (2007)
Antep Fıstığı İşleme	Grafit	pH:5,3 15 mA/cm ² 300 dk NaCl İlavesi	KOI TOK TF	% 99.79 %76.55 % 100	Fil (2014)
Gıda Endüstrisi	Al	pH:7 1.83 mA/cm ² 30 dk	KOI	~ %80	Veli ve ark. (2018)
Et ve Et Ürünleri Endüstrisi	Fe	pH:4 100 A/m ² 30 dk	KOI Yağ-Gres Bulanıklık	% 78.99 % 94.9 % 94.62	Özyonar (2007)
Et ve Et Ürünleri Endüstrisi	Al	pH:4 100 A/m ² 30 dk	KOI Yağ-Gres Bulanıklık	% 77.47 % 94.87 % 94.79	Özyonar (2007)

Kömür Endüstrisi	Fe	pH:3 200 A/m ² 80 dk	KOI TOK Fenol Siyanür Tiyosiyanat	% 30 % 27.5 % 14 % 14.2 % 16.1	Özyonar (2012)
Evsel (Gri)	Al	pH:7,4 3 mA/cm ² 40 dk Na ₂ SO ₄	KOI Bulanıklık AKM TN TP BOI ₅	% 88.1 % 97.2 % 62.3 % 44 % 98 % 88.5	Öztürk (2017)
Evsel (Gri)	Fe	pH:7,4 3 mA/cm ² 40 dk Na ₂ SO ₄	KOI Bulanıklık AKM TN TP BOI ₅	% 79.3 % 99.4 % 80.6 % 8.5 % 98.4 % 78.46	Öztürk (2017)
Biyodizel	Fe Al	pH:4 4.8 mA/cm ² 10 dk	KOI TOK Yağ-Gres	~% 95 ~% 87 >% 99	Tanattı (2015)
Tekstil Endüstrisi	Fe	pH:3 0,5 mA/cm ² 180 dk	Renk KOI	% 93 % 89	Delil ve Gören (2018)
Tekstil Endüstrisi	Al	pH:6,96 1,5 mA/cm ² 180 dk	Renk KOI	% 92 % 88	Delil ve Gören (2018)

¹ ilgili pH için giderim verimi

² ilgili pH için giderim verimi

2.4. ELEKTROKOAGÜLASYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Elektrokoagülasyon prosesinde optimum giderim veriminin tespiti için çalışılan numunenin; pH'sı, sıcaklığı, seçilen elektrotların tipi, akım yoğunluğu, bekleme süresi, iletkenliği, elektrotların bağlantı tipi ve elektrotların birbirine olan mesafesi en önemli parametrelerdendir.

Ancak ana faktörler mevcut kirliliğin miktarı, reaksiyon süresi ve pH'dir (Oden ve Erkan, 2018).

2.4.1. pH

pH, elektrokoagülasyon prosesinde giderim verimini etkileyen önemli bir faktördür (Al Aji ve ark., 2012; Al-Shannag ve ark., 2015). Gerek elektrooksidasyon için hidroksil radikallerinin oluşumu ve gerekse elektrokoagülasyon için metal hidroksitlerin oluşumunda pH etkindir. Belli pH değerleri dışında koagülantlar oluşmayacağı gibi hidroksil radikallerinin oluşum yüzdesi de büyük oranda azalacaktır. Ayrıca prosesler sonucunda pH'nın değişimi de söz konusudur (İlhan ve ark., 2007). Bununla birlikte, pH'ın ağır metallerin gideriminde verimleri üzerindeki etkisi uygulamaya özeldir. Literatürde, ağır metallerin giderimi 2.4 ila 8 arasında değişen çeşitli başlangıç pH değerlerinde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir (Oden ve Erkan, 2018).

Başlangıç pH'ı elektrokoagülasyon esnasında oluşan metal hidroksitlerin çözünürlüğünü belirleyici bir parametredir. Alüminyum elektrot kullanıldığı zaman çözelti pH'ı asidik ise çıkış suyunda pH daha yüksek, çözelti pH'ı bazik ise çıkış suyu pH'ı daha düşük olmaktadır. Demir elektrot kullanıldığında atıksu çıkış pH değeri başlangıç pH değerinden her zaman daha yüksek olmaktadır. Başka bir deyişle, çözeltinin pH'ı düşük olduğu zaman pH'da bir artış, çözeltinin pH'ı yüksek olduğunda pH'da bir düşüş meydana gelmektedir. Bu sonuçlar elektrokoagülasyon prosesinin özellikle alkali ortamda bir miktar tampon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir (Akbaş, 2014).

Köksal (2015), yaptığı çalışmada çalıştığı atıksuyun doğal pH değeri olan 5,2'nin altında ve üstünde değerlerde çalışmış olup denemelerde elde edilen KOI ve TF giderim verimi sonuçları, bu pH değerinin altında ve üstündeki pH değerleri ile

gerçekleştirilen denemelerden elde edilen sonuçlardan çok daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Bu durumun anot elektrot olarak kullanılan alüminyumun elektrokimyasal olarak çözünmesi sonucu oluşturacağı alüminyum hidroksit/oksihidroksit türleri için en uygun pH aralığının olmasından kaynaklandığı belirtmiştir.

Yıldırım (2007), yaptığı çalışmada uygun pH seçimi deneyleri sonucunda en iyi renk ve KOI gideriminin pH 2.5 değerinde elde edildiği belirtmiştir.

Al-Shannag ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada kaplama endüstrilerinden kaynaklanan atıksuda ağır metal gideriminde optimum giderimin hafif alkali seviye olduğunu belirtmişlerdir.

2.4.2. Sıcaklık

Elektrokoagülasyon prosesinde de tüm kimyasal proseslerde olduğu gibi sıcaklığın artması reaksiyon hızını arttırmaktadır. Ancak sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşmasıyla iyon hareketinin artması yumak ve metal hidroksit floklarının tekrar çözünmesine buna bağlı olarak da veriminin azalmasına neden olmaktadır. Akım veriminin 60 °C sıcaklığa kadar artması elektrot yüzeyindeki alüminyum oksit filmin bozunmasıyla artan aktiviteye bağlanmaktadır. (Akbaş, 2014). Bununla birlikte, çözelti sıcaklığı 300 K'den yüksek olduğunda, üretilen iyonların hareketi önemli derecede artar ve bu iyonların toplanması ve metalik hidroksit flokları üretme şansı da azalmaktadır (Yaşar, 2018). Sıcaklığın çok daha yüksek değerlere ulaşması elektrot yüzeyinde birikmeye daha elverişli flokların oluşumuna yol açmaktadır. Bunun yanı sıra sıcaklığın artması ile iletkenlik artmakta dolayısıyla enerji tüketimi azalmaktadır (Akbaş, 2014).

2.4.3. Elektrot Tipi

Elektrokoagülasyon proseslerinde arıtım verimini etkileyen parametlerin en önemlisi seçilen elektrot tipidir. Çünkü prosesin başından sonuna kadar arıtım türünü etkilediği gibi giderim veriminde de birinci dereceden önemlidir (İlhan ve ark., 2007; Kasap, 2017). Elektrot seçimi yapılırken basit bir elektrokoagülasyon reaktörü, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Çözünen anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlanır. Bu durumda anotta oksidasyon olacağından anot materyali elektrokimyasal olarak çözünecektir. Bu arada katot ise pasivasyona maruz

kalacaktır. Fakat bu durum atıksu arıtımı için uygun değildir; çünkü metal elektrotların yeterli miktarda çözünmesi için kullanılan elektrotların geniş yüzey alanına sahip olmaları gerekmektedir (Özyonar, 2007).

Kullanılacak elektrotlar mali açıdan uygun, kolay bulunabilir ve yüksek giderim verimi sağlayan malzemelerden seçilmelidir. Bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda en çok demir ve alüminyum elektrotların kullanıldığı görülmektedir (Akbaş, 2014; Garcia-Segura ve ark., 2017). Demir ve alüminyum elektrot kullanılmasıyla kirletici maddelerin metal hidroksitlere adsorpsiyonu ve anotta kısmi oksidasyonu gerçekleşmektedir. Alüminyum plakalar Al^{3+} iyonunun yüksek koagülasyon verimi nedeniyle tek başına veya demir plakalarla kombinasyon halinde uygulanabilmektedir. Suda önemli miktarda Ca^{2+} veya Mg^{2+} iyonlarının bulunması durumunda katot malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanılması tavsiye edilmektedir (Akbaş, 2014).

2.4.4. Akım Yoğunluğu

Elektrokoagülasyon prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucu iyon hareketleri önemli olduğundan akım ve bu nedenle de akım yoğunluğu sistemin işletilmesinde bakılması gereken önemli bir parametredir. Elektrokoagülasyon prosesinde kirleticilerin uzaklaştırılması kimyasal koagülasyon prensiplerine dayanmaktadır (Özyonar, 2007). Köksal (2015) yaptığı çalışmada Yüksek KOİ ve TF giderim verimlerine ulaşmak için diğer optimum şartlarla birlikte en yüksek akım şiddetlerinde çalıştırılması uygun olduğunu belirtmiştir. Özyonar (2012) ise elektrokimyasal arıtımda yüksek akım yoğunluğunda fazla demir miktarının artması ile de giderme veriminin düştüğü belirtmiş olup, bu durum literatürde belirtildiği gibi ortamda bulunan aşırı katalizörün hidroksil radikali ile reaksiyona girerek kirletici oksidasyonunu engellenmesiyle açıklanabileceğini belirtmiştir.

Gerekenden fazla akım yoğunluğu uygulandığında maliyet artışı oluşabileceği gibi paralel oranda çamur oluşumu da artacaktır (Öztürk, 2017).

2.4.5. Bekleme Süresi

Elektrokoagülasyon prosesinde yeterli miktarda flokların oluşumu zamana bağlı olarak gerçekleşir. Reaksiyon süresindeki artışa bağlı olarak kirleticilerin giderim verimlerinde artış sağlanmaktadır (Veli ve ark., 2018). Elektrokimyasal yöntemlerden elektrokoagülasyon prosesinde yeterli bekleme süresi sağlanmazsa yeterli koagülant oluşumu sağlanamaz ve verim düşebilir. Çözeltilen kirletici parametrelerin gideriminde direkt olarak elektrotlar tarafından üretilen iyon konsantrasyonu önemlidir. Elektroliz süresi artarsa, iyonların konsantrasyonu ve onların hidroksit flokları artar. Ancak uzun süreli arıtmalarda ise fazla çamur ve koku oluşu gözlemlenebildiği gibi maliyeti de arttıracaktır (Kasap, 2017). Birçok yazar, literatürdeki en uygun zaman değerlerinin ağır metal giderimi için 10 ila 60 dakika arasında olduğunu tespit etmiştir (Oden ve Erkan, 2018).

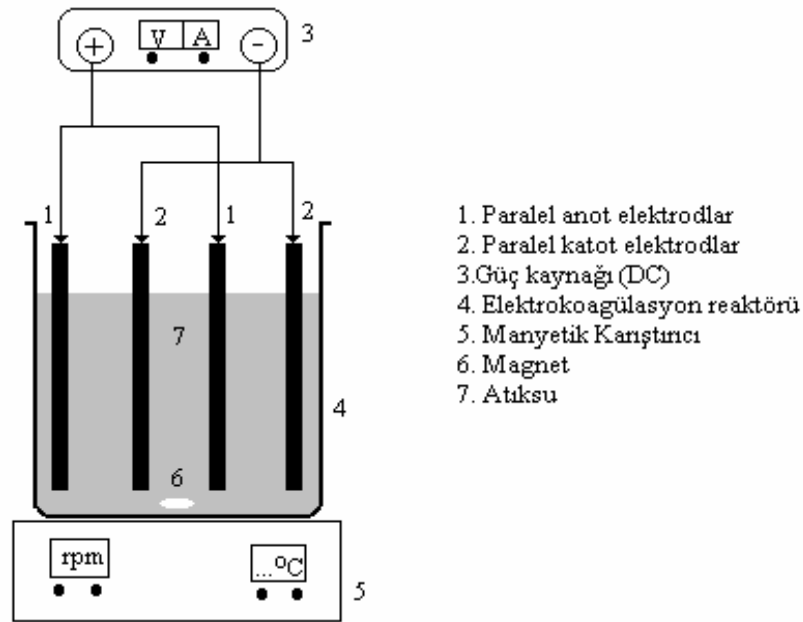
2.4.6. İletkenlik

Derişimin artırılmasının pozitif etkileri, çözeltinin iletkenliğini ve iyonik gücünü artırmasıdır. Besleme çözeltisinin derişiminin incelendiği bir çalışmada atıksu ve elektrolit çözeltilerindeki madde derişimlerinin artışının akımda artışa neden olduğunu, bunun nedeninin ise sulardaki katyon artışıyla birlikte elektrik taşınımındaki artış olduğunu belirlenmiştir (Aytaç, 2016). Düşük iletkenlikte iyonların transferi ve beklenen reaksiyonların gerçekleşmesi zorlaşır (Fil, 2014). Su ve atıksu arıtımında elektrokoagülasyon prosesinin verimli bir şekilde yürütülebilmesi için ortamda bulunan anyonların %20'sinin klorür iyonu olması önerilmektedir. Ayrıca sodyum klorür ilavesi iletkenliği artırdığı için güç tüketimini azaltmaktadır (Akbaş, 2014). Çoğu zaman istenen akıma ulaşabilmek için çözeltilere tuz ilavesi yapılmaktadır (Öztürk, 2017).

2.4.7. Elektrotların Bağlantı Tipi

Proses süreçlerinde uygun elektrot seçimlerinin önemi olduğu kadar elektrotların reaktör içerisinde yerleştirilme şekilleri de oldukça önemlidir. Bu yerleşim yatay ve dikey olmakla beraber, elektrotların monopolar ya da bipolar olarak kullanılması, seri veya paralel bağlanması da arıtım verimine oldukça etki etmektedir (Kasap, 2017).

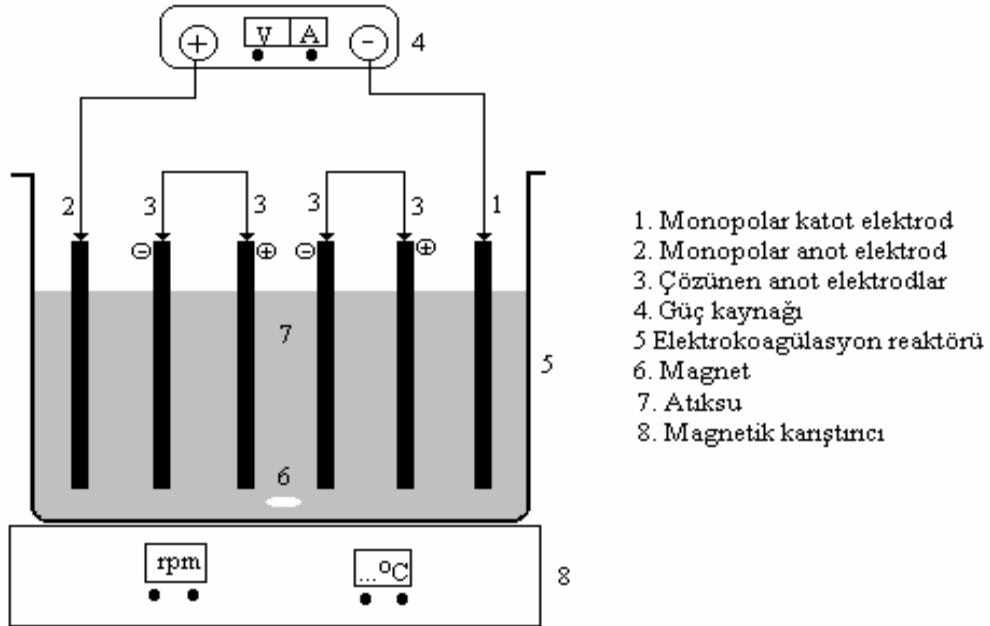
En basit bir elektrokoagülasyon reaktörü, bir elektrolit içine daldırılmış bir anot ve bir katottan oluşmaktadır. Çözünen anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlanır. Bu durumda anotta oksidasyon olacağından anot materyali elektrokimyasal olarak çözünecektir. Bu arada katot ise pasivasyona maruz kalacaktır. Fakat bu durum atıksu arıtımı için uygun değildir; çünkü metal elektrotların yeterli miktarda çözünmesi için kullanılan elektrotların geniş yüzey alanına sahip olmaları gerekmektedir. Anot ve katot elektrotlar paralel veya seri bağlanmak suretiyle tek kutuplu (monopolar) elektrokimyasal reaktörler oluşturulabilir. Çift anot ve katotdan ibaret paralel bağlı bir monopolar elektrokoagülasyon reaktörü aşağıda Şekil 2.6.'da gösterilmiştir (Delipınar, 2007).



Şekil 2.6. Paralel Bağlı Monopolar Elektrokoagülasyon Reaktörü (Delipınar, 2007)

Tek kutuplu (monopolar) elektrotların seri bağlanması ile Şekil 2.7.'de görülen elektrokoagülasyon reaktörü ortaya çıkmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi her bir tükenen veya çözünen anot elektrot çiftleri birbirine bağlanmaktadır. Diğer taraftan,

monopolar anot ve katot elektrotlar bir güç kaynağına bağlıdır. İçteki çözünen anot elektrotların en dıştaki monopolar anot veya katot elektrotlar ile bir bağlantısı bulunmamaktadır (Delipınar, 2007).



Şekil 2.7. Seri Bağlı Monopolar Elektrokoagülasyon Reaktörü (Delipınar, 2007)

Seri bağlı elektrokoagülasyon prosesinde ortama verilecek akımın geçmesi için daha yüksek bir potansiyel fark uygulamak gerekmektedir. Çünkü seri bağlı elektrokoagülasyon reaktörlerinde direnç daha yüksektir. Bu yüzden reaktör içinde her yerde akım aynı değerdedir. Bir diğer elektrokoagülasyon reaktöründe ise elektrotlar paralel çift kutuplu (bipolar) olarak bağlanmaktadır. Bir güç kaynağına bağlı monopolar anot ve katot elektrot arasında birbiri ile bağlantısı olmayan çözünen anot elektrotlar yerleştirilmiştir. Bu elektrokoagülasyon reaktör şekli, prosesin kullanım ve işletim kolaylığı amacıyla düzenlenmiştir. Elektrokoagülasyon reaktöründeki sıvı çözeltiye elektrik akımı uygulandığında, ortadaki çözünen bağımsız anot elektrotların bir yüzü anot diğer yüzü katot gibi davranmaktadır. Böylece elektrokimyasal arıtım esnasında elektrotların pozitif tarafında anodik negatif tarafında ise katodik reaksiyonlar oluşacaktır. Çözünen elektrotların iyon oluşturduğu sistemde demir ve alüminyum gibi çözünen metal levhalar kullanılabilir. Ortama verilen bu iyonlar, yüklenmiş partikülleri nötralize ederek koagülasyon işleminin başlamasını sağlamaktadır. Elektrotlardan çözünen iyonlar; kimyasal reaksiyon ile çöktürme veya koloidal maddelerle birleşip elektroflotasyonla reaktör yüzeyine çıkan floklar oluşmaktadır. Ayrıca, elektriksel

alandan dolayı sudaki kolloidal partiküller, yağlar veya diğer bileşiklerin ayrılması da sağlanmaktadır. Elektrokoagülasyon prosesinde anot ve katot reaksiyonları ve ortamda oluşacak serbest radikal türleri, reaktör içindeki su ve bileşiklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir. Tüm bu karmaşık elektrokoagülasyon işleminde kirleticiler atıksulardan uzaklaştırılarak arıtım yapılmış olunur (Delipınar, 2007).

2.4.8. Elektrotlar Arası Uzaklık

Elektrokoagülasyon prosesinde önemli olan bir diğer dizayn parametresi ise elektriksel alan kuvvetidir.

Düz levha bir membranın kullanıldığı proste elektriksel alan kuvveti aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$E = V/D \quad (2.14)$$

Burada E, elektriksel alan (V/m); V, elektriksel potansiyel (V) ve d (m) elektrotlar arasındaki mesafedir (Delipınar, 2007).

Elektrokoagülasyon reaktöründeki atıksuyun ısınmasına neden olan elektrot aşırı potansiyeli ile birlikte ohmic direnci azaltmak için mümkün olduğunca elektrotlar arası mesafe az olmalıdır. Elektrot yüzeylerinin pürüzlülüğü elektrokimyasal reaktöründe oluşan askıdaki katı maddelerin elektrot kanallarını engelleyecek şekilde olmamalı, sonuçta minimum bir elektrotlar arası mesafe olması gerekir (Parlak, 2008).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Atıksu Karakteristiği

Metal kaplama endüstrisi, büyük miktarda atık su üreten ana kimyasal proseslerden biridir. Atık su, alkali temizleme maddeleri, siyanitler, ağır metaller (çoğunlukla krom, nikel, çinko ve bakır yağı), yağ çözücü çözücüler ve yağ gibi çeşitli toksik maddeleri içerir. Metal kaplama atık suyunun herhangi bir arıtma işlemi yapılmadan atık su tesisatı sistemlerine deşarj edilmesi, yüksek toksik potansiyel nedeniyle ciddi sorunlara neden olur ve bu durum, atık su arıtma tesisindeki aktif çamurun mikrobiyal aktivitesini etkileyebilir (Oden ve Erkan, 2018).

Çalışmalarda kullanılan atıksu örneği, ağır metal içeriği yüksek olduğu düşünülen galvaniz kaplama prosesi bulunan metal işleme sanayi tesisinden temin edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan atıksu, seçilen tesise ait galvaniz prosesinden kaynaklanan atıksuyun kanalizasyona deşarj edildiği noktadan 30 gün arayla 2 farklı numune olarak alınmıştır. Alınan ham atıksuların özelliği Çizelge 3.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Ham Atıksu

HAM ATIKSU	
pH Aralığı	6.2-10.2
Cr ⁺³ (mg/L)	1.1659-15.406
Zn ⁺² (mg/L)	48.4199-167.5508

Çalışmada farklı pH değerlerinde, farklı bekleme sürelerinde ve farklı elektrotlar kullanılarak Cr⁺³ ve Zn⁺² giderim verimleri incelenmiştir. Alınan numuneler, çalışma süresinde 4⁰C sıcaklıkta saklanmıştır.

3.2. Reaktör Tasarımı ve İşletim

Çalışmalar cam reaktörlerde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup planlama aşamasında demir-demir, demir-bakır ve demir-alüminyum olmak üzere olmak üzere 3 farklı elektrot çifti kullanılması planlanmış olup alüminyum elektrot anotta ve katotta kullanıldığında reaktörün çalışmadığı tespit edilmiştir. DC güç kaynağı sabit akım verdiği için akım artırılarak tekrar denemeler yapılamamış ve çalışmalar 2 çift reaktör üzerinden yürütülmüştür.

Reaktörde reaksiyonun olması durumunda anotta demir kullanılması durumunda katotta, anot ve çözelti reaksiyonları aşağıdaki gibidir;

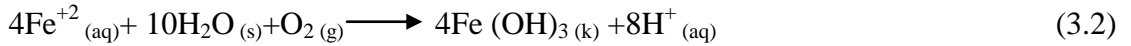
Katotta;



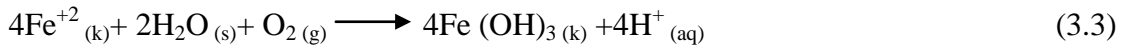
Anotta;



Çözeltide;



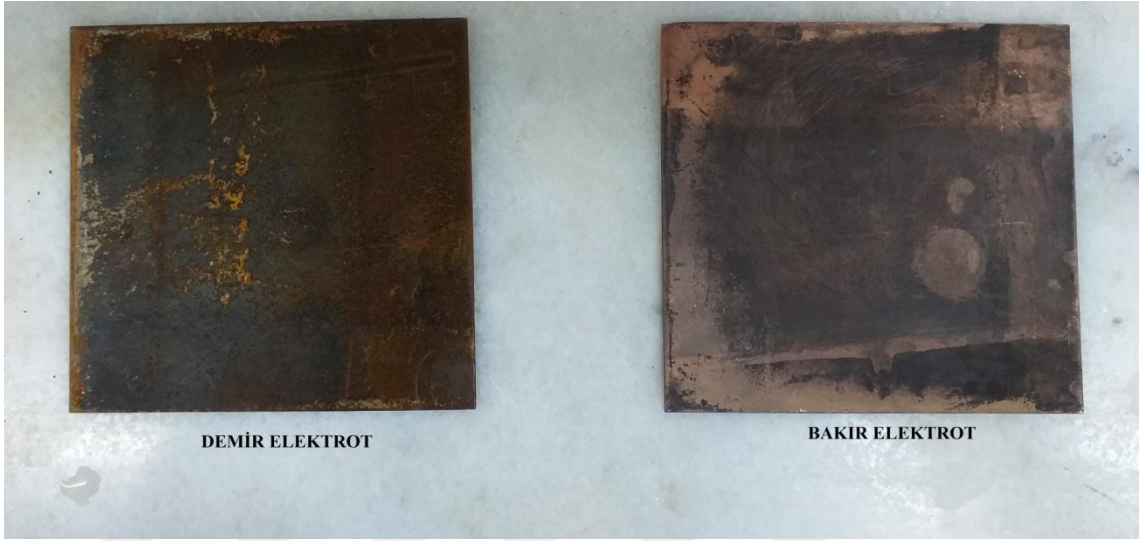
ve sonuç olarak toplam reaksiyon ise;



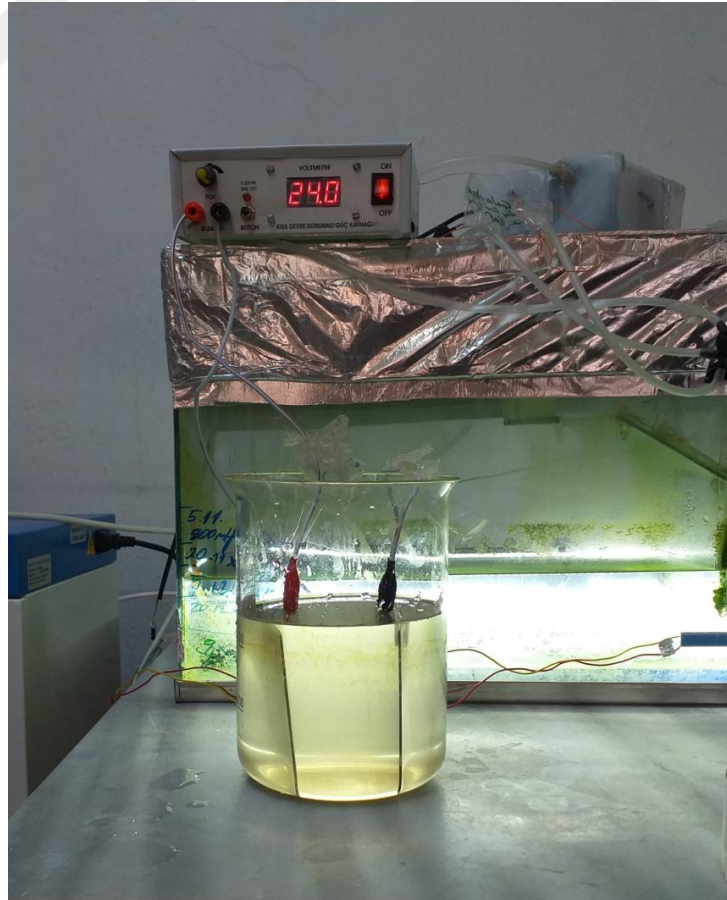
Reaktörde atıksu beslemesi kesikli olarak yapılmıştır. Reaktörde 24 volt ve 1 amper akıma sahip DC güç kaynağı kullanılmıştır. Reaktörde pH, reaksiyon süresi ve elektrot türlerinin giderim verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Reaktörlerde kenar uzunluğu 9 cm olan kare elektrotlar kullanılmış olup her reaktörün yüzey alanı 81 cm^2 , akım yoğunluğu $12,3 \text{ mA/cm}^2$ Yapılan çalışmada kullanılan elektrotların tamamı atıksuyun içerisinde kalacak şekilde çalışma yapılmıştır.

Reaktöre ait teknik özellikler Çizelge 3.2’de, reaktörde kullanılan demir ve bakır elektrotların görüntüsü Şekil 3.1’de, reaktöre ait görüntü ise Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kullanılan demir ve bakır elektrotlara ait görüntü.



Şekil 3.2. Çalışılan reaktöre ait görüntü.

Çizelge 3.2. Çalışılan Reaktörün Teknik Özellikleri

REAKTÖRÜN TEKNİK ÖZELLİKLERİ	
Her Reaksiyonda Kullanılan Atıksu Miktarı (L)	1
Elektrot Boyutları (cm)	9 x 9
Elektrotlar Yüzey Alanı (cm ²)	81
Elektrot Sayısı	2
Elektrotlar Arası Mesafe (cm)	7
Akım (Amper)	1
VoltaJ	24
Akım Yoğunluğu (mA/cm ²)	12.3

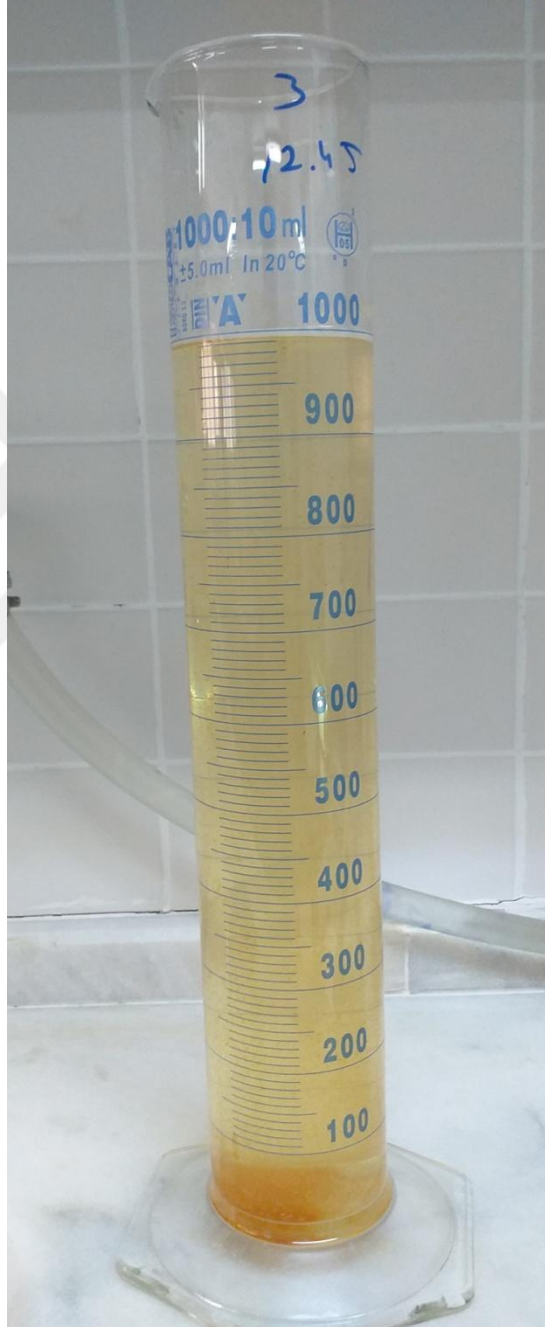
Reaktörde; bekleme süresi elektrot seçimi ve farklı pH için krom ve çinko giderimi verimleri incelenmiştir.

Elektrokoagülasyon proseslerinde en önemli tasarım parametrelerinden birisi bekleme süresidir. Aygün (2012), yaptığı çalışmada elektrokoagülasyon ile arıtmada optimum bekleme süresinde giderim veriminde artış olmadığı ve sabit kaldığını; hatta kullanılan elektrota da bağlı olarak bekleme süresinin fazlaşmasının arıtma verimini negatif yönde etkilediğini de belirtmiştir.

İlhan ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada belli pH değerleri dışında koagülantlar oluşmayacağı gibi hidroksil radikallerinin oluşum yüzdesi de büyük oranda azalacağını belirtmişlerdir. Yaşar (2018), yaptığı çalışmada; genel olarak giderim verimliliği, nötral pH değerinde, asidik veya alkali durumdakinden daha yüksek olduğu bulunduğunu, en iyi giderim verimi pH 7 civarında sağlanıyor olmasına rağmen nötral pH'da güç tüketimi iletkenlik değişimine bağlı olarak yüksek olur ancak iletkenlik yüksek olduğunda, pH etkisi ortadan kalkacağını belirtmiştir.

3.3. Koagülant Giderimi

Reaksiyon bitiminde oluşan atıksular 1 L hacmindeki mezüre alınıp, 30 dakika çökeltim işlemine tutulmuştur. Ardından su yüzeyinden 50 mL'lik kaplara atıksu aktarılmıştır. Çökeltme işlemine ait görüntü Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Koagülant çöktürme aşaması.

3.4. Analizler

Çalışma kapsamında Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimini takip etmek için yapılmıştır. Ham su ve reaksiyon sonucunda elde edilen atıksular 50 mL'lik ışık geçirgenliği zayıf olan cam şişelerde ve 4°C sıcaklıkta saklanmıştır. Atıksuyun pH'ları Hach Lange pH metre ile, ağır metal giderim veriminin tespiti için atıksuların analizi Perkin Ermel ICP-MS ELAN DRC-E ile yapılmıştır. Çalışma sonrasında oluşan atıksuların saklandığı şişelere ait görüntüler Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Reaksiyon sonucu oluşan atıksu numunelerinin saklanması.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında 1 amper 24 volt DC güç kaynağı ve her seferinde 1 L hacminde atıksuda işletilen reaktörde Fe-Fe ve Fe-Cu elektrot kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} 'nin elektrokoagülasyon yöntemi ile giderimi incelenmiştir.

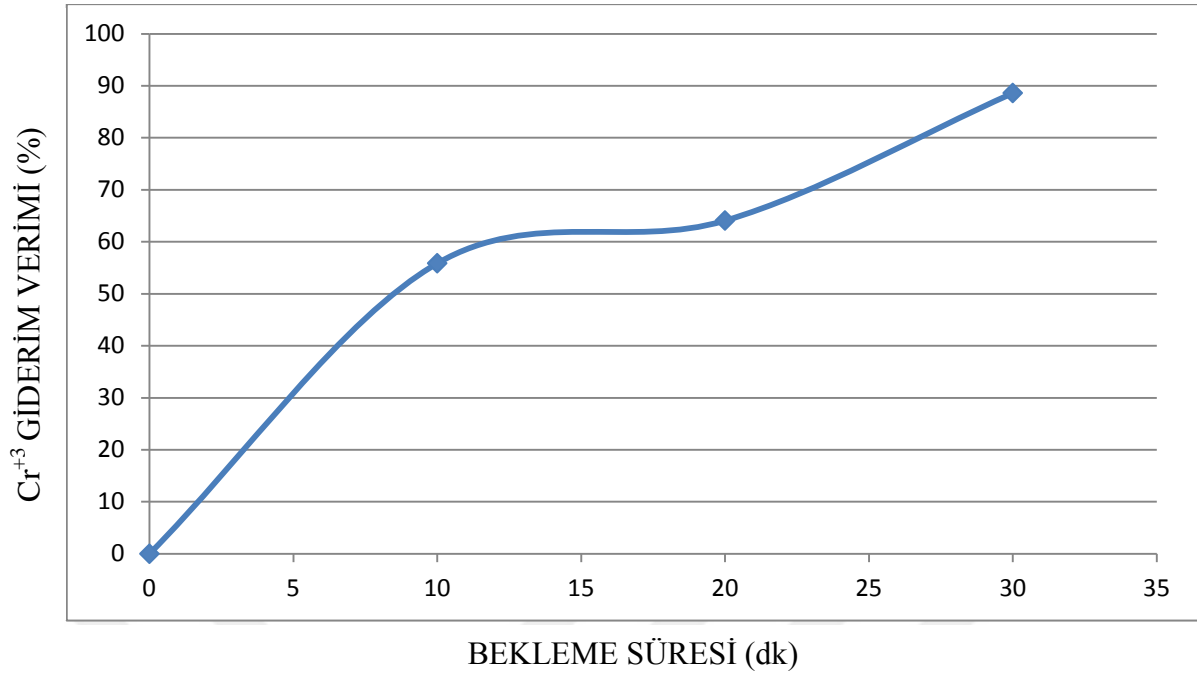
4.1. Fe-Fe Elektrot Kullanımı İçin Bulgular

Çalışma kapsamında Fe-Fe elektrot kullanılarak sabit pH'ta 10 dk, 20 dk ve 30 dk bekleme sürelerinde Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi ile bekleme süresi sabit 30 dk'da sırasıyla 5, 7, 9 ve 10.2 pH'ta Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

4.1.1. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Zaman Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi

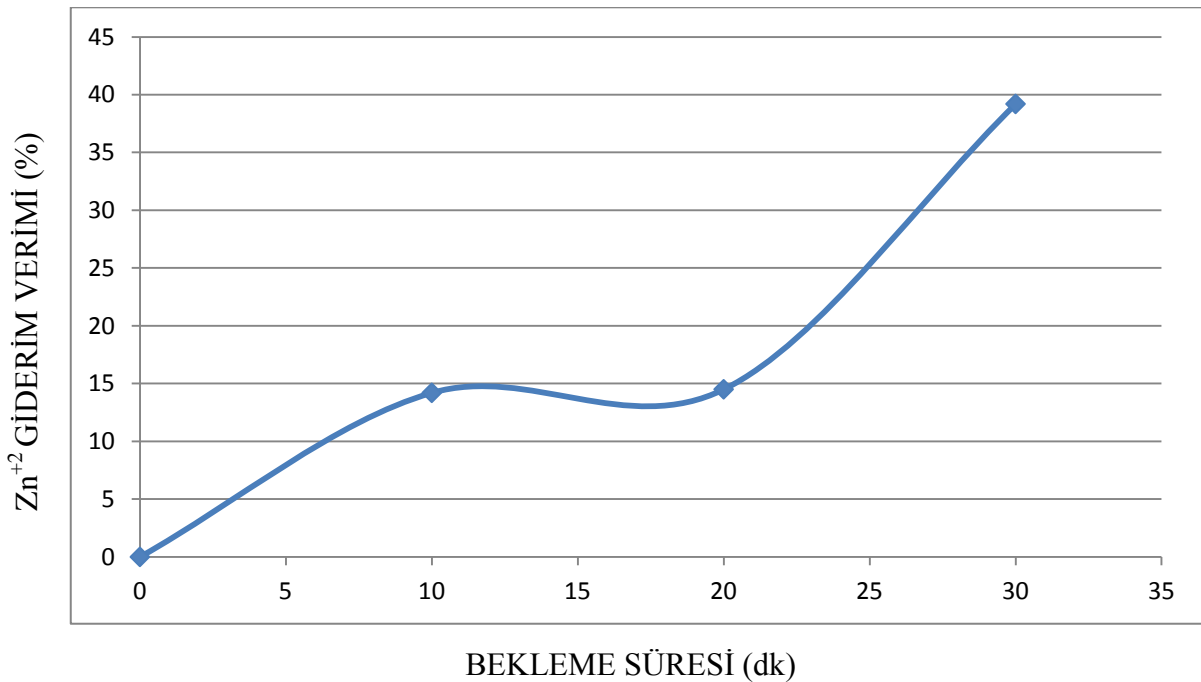
Çalışmanın bu aşamasında Fe-Fe elektrot kullanılarak pH 10.2'de; 10 dk, 20 dk ve 30 dk bekleme sürelerinde Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

Zamana bağlı olarak Cr^{+3} 'ün giderimi 10. dk'da % 55.87 giderim verimi elde edilmişken 20. dk'da % 64.09 giderme verimi elde edilmiştir. Bekleme süresi 30. dk'ya çıkarıldığında ise % 88.61 giderim verimi elde edilmiştir. Giderimin zamana bağlı grafiksel değerlendirilmesi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Sabit pH'ta Zamana Bağlı Cr⁺³ Giderim Verimi

Zamana bağlı olarak Zn⁺² 'nin giderimi 10. dk'da % 14.2 iken 20. dk'da % 14.5, ve 30. dk'da % 39.2'ye ulaşılmıştır. Çalışılan zaman dilimleri içerisinde bekleme süresi arttıkça giderim veriminin arttığı tespit edilmiştir. Giderimin zamana bağlı grafiksel değerlendirilmesi Şekil 4.2'de verilmiştir.

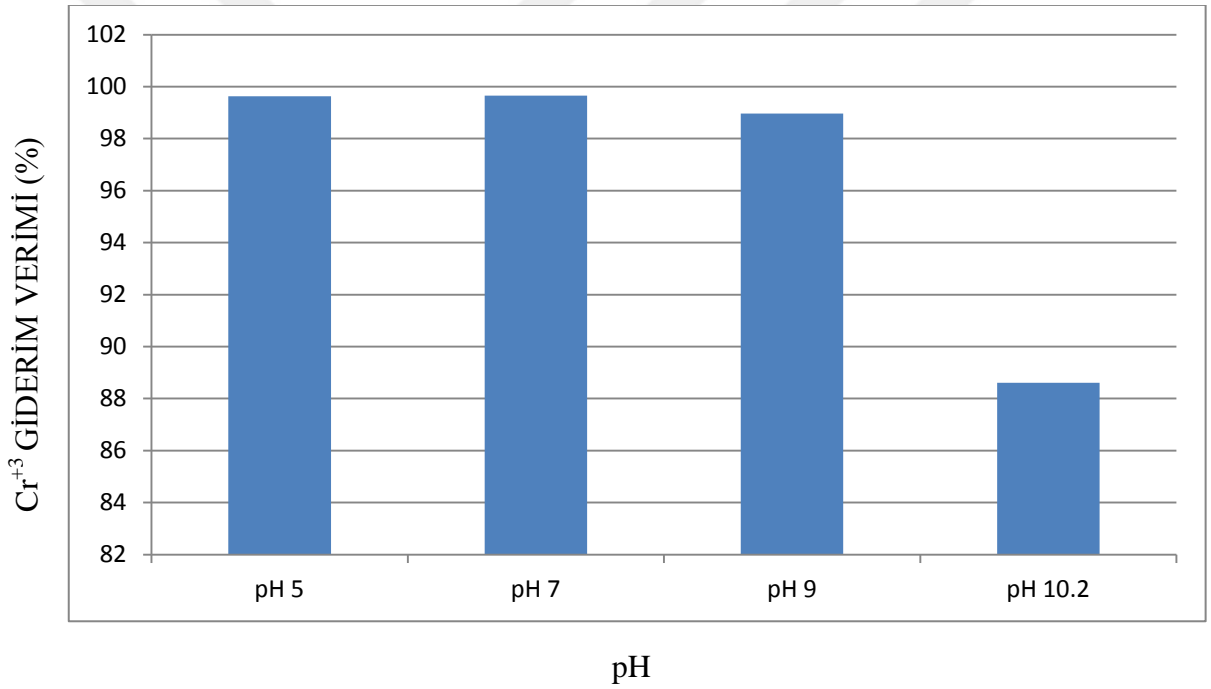


Şekil 4.2. Sabit pH'ta Zamana Bağlı Zn⁺² Giderim Verimi

4.1.2. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak pH Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi

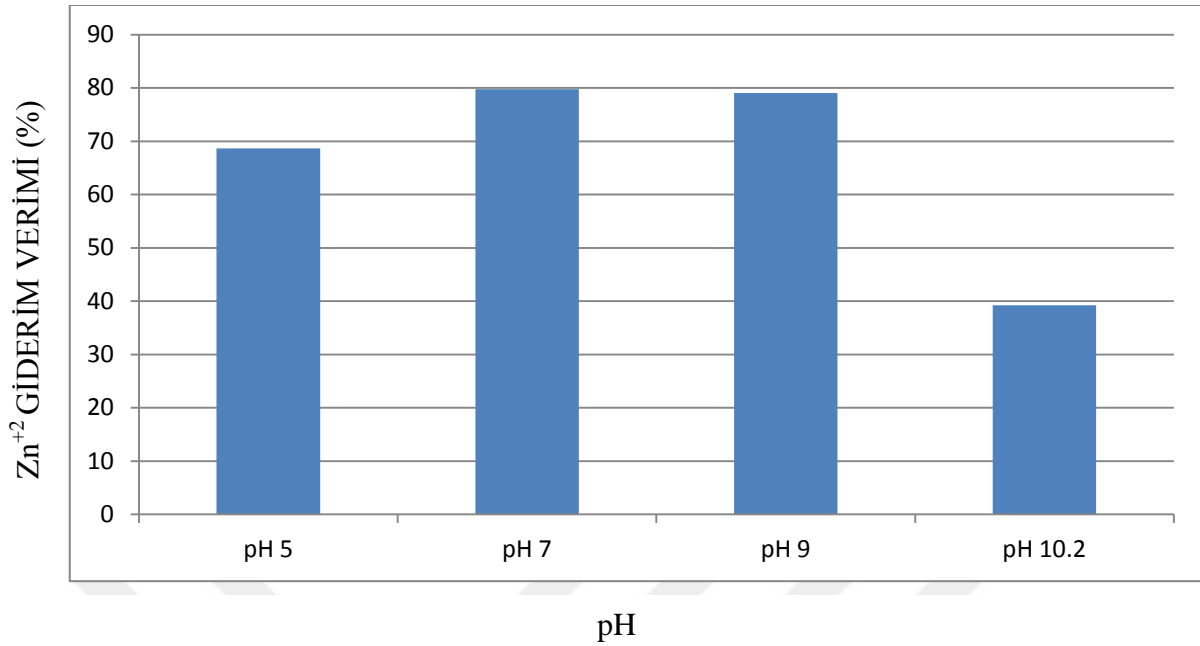
Çalışma zaman dilimleri içerisinde en yüksek giderim veriminin olduğu tespit edilen 30. dakikada pH üzerinde değişimler yapılarak giderim verimi değerlendirilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında Fe-Fe elektrot kullanılarak 30 dk bekleme süresinde pH 5,7,9 ve 10.2'de Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

pH'a bağlı olarak Cr^{+3} 'ün 5 pH'da % 99.63, 7 pH'da % 99.65, 9 pH'da % 98.96, 10.2 pH'da % 88.61 olarak bulunmuştur. 30 dakika bekleme süresince değişen pH'ya bağlı grafiksel değerlendirilme Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Sabit Bekleme Süresinde pH Değişkenli Cr^{+3} Giderim Verimi

pH'a bağlı olarak Zn^{+2} 'nin 5 pH'da % 68.63, 7 pH'da % 79.74, 9 pH'da % 79.06, 10.2 pH'da % 39.2, olarak bulunmuştur. 30 dakika bekleme süresince değişen pH'ya bağlı grafiksel değerlendirilme Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Sabit Bekleme Süresinde pH Değişkenli Zn⁺² Giderim Verimi

Çalışmada seçilen pH'larda en iyi giderim verimi 7'de elde edilmiştir.

4.1.3. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Cr⁺³ ve Zn⁺² Gideriminin Optimizasyonu

Çalışılan düzeneğe Fe-Fe elektrot kullanılarak 10, 20 ve 30. dakikalık bekleme süresince atıksuda bulunan Cr⁺³ ve Zn⁺² giderim verimi incelenmiştir. Çalışılan zaman dilimi içerisinde bekleme süresi arttıkça giderim veriminin arttığı tespit edilmiştir.

Ardından çalışılan zaman dilimleri içerisinde en yüksek giderim veriminin olduğu tespit edilen 30. dakikada pH üzerinde değişimler yapılarak giderim verimi değerlendirilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında 30 dk. bekleme süresinde pH 5, 7, 9 ve 10.2'de Cr⁺³ ve Zn⁺² giderim verimi incelenmiş olup Cr⁺³ giderimi Çizelge 4.1'de, Zn⁺² giderimi Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} Gideriminin İncelenmesi

Atıksu Hacmi (L)	Elektrot (Anot/Katot)	Akım (A)	Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)	pH	Bekleme Süresi (dk)	Giderim Verimi (%)
1	Fe/Fe	1	12.3	5	30	99.63
1	Fe/Fe	1	12.3	7	30	99.65
1	Fe/Fe	1	12.3	9	30	98.96
1	Fe/Fe	1	12.3	10.2	10	55.87
1	Fe/Fe	1	12.3	10.2	20	64.09
1	Fe/Fe	1	12.3	10.2	30	88.62

Çalışmanın bu aşamasında maksimum Cr^{+3} giderimi 30 dakikalık bekleme süresinde 7 pH'da gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi

Atıksu Hacmi (L)	Elektrot (Anot/Katot)	Akım (A)	Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)	pH	Elektroliz Süresi (dk)	Giderim Verimi (%)
1	Fe/Fe	1	12.3	5	30	99.98
1	Fe/Fe	1	12.3	7	30	100
1	Fe/Fe	1	12.3	9	30	98.91
1	Fe/Fe	1	12.3	10.2	10	14.2
1	Fe/Fe	1	12.3	10.2	20	14.5
1	Fe/Fe	1	12.3	10.2	30	39.2

Çalışmanın bu aşamasında maksimum Zn^{+2} giderimi 30 dakikalık bekleme süresinde 7 pH'da gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Çalışılan atıksu örneğinde Fe-Fe elektrot kullanılarak optimum aynı zamanda maksimum Cr^{+3} ve Zn^{+2} kirlenmelerinin birlikte giderim verimi 30 dakikalık bekleme süresinde 7 pH'da elde edilmiştir.

4.1.4. Fe-Fe Elektrot Kullanımında Anotta Kütlesel Kayıp

Reaktörde kullanılan elektrotlar her reaksiyon öncesi ve sonrasında saf su ile yıkanmış ve 105 °C sıcaklıkta etüvde kurutularak hassas terazide tartılmıştır. Anottaki kütleli değişimler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Fe-Fe elektrot kullanımında anotta kütleli kayıp

pH	Bekleme Süresi	Anot İlk Tartım (g)	Anot Son Tartım (g)	Anottaki Kütleli Değişim (mg)
5	30	94.2185	94.2159	-2.6
7	30	94.2159	94.0685	-147.4
9	30	94.0685	93.96	-108.5
10.2	10	94.306	94.247	-59
10.2	20	94.247	94.2216	-25.4
10.2	30	94.2216	94.2185	-3.1

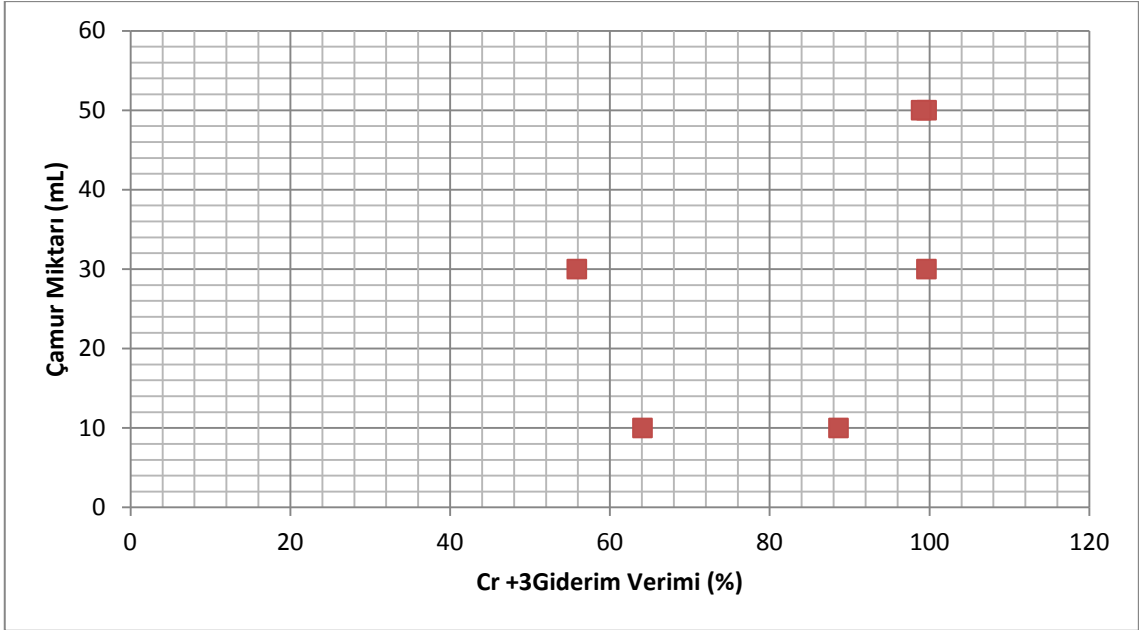
4.1.5. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Cr⁺³ ve Zn⁺² Gideriminde Çamur Oluşumunun İncelenmesi

Çalışmada oluşan atıksular reaksiyon sonunda 1 L hacmindeki 30 dakikalık çökelmeye alınmış ve oluşan çamur miktarı hacimsel olarak ölçülmüştür. Çamur oluşumunun kaynağı suda bulunan kirleticilerin koagülant oluşturması ve bu koagülantların sudan uzaklaştırılması ile olabileceği gibi anotun elektroliz işlemi neticesinde çözünmesinden de ileri gelebilmektedir. Oluşan bu çamurdaki flokların kirleticilerin adsorpsiyonu veya tutulması potansiyeline sahip olduğu literatürde rapor edilmektedir (Graça ve ark., 2019). Oluşan çamur miktarları aşağıda Çizelge 4.4'te verilmiştir.

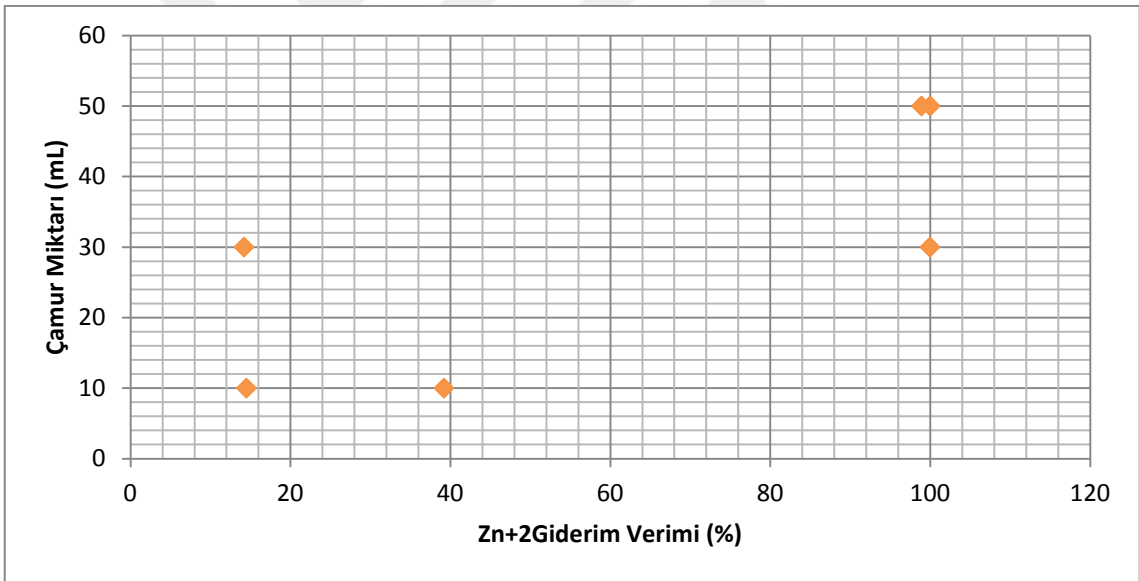
Çizelge 4.4. Fe-Fe Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminde Oluşan Çamur Miktarları

Atıksu Hacmi (L)	pH	Elektroliz Süresi (dk)	Çökeltme Süresi (dk)	Zn^{+2} Giderim Verimi (%)	Cr^{+3} Giderim Verimi (%)	Oluşan Çamur Hacmi (mL)
1	5	30	30	99.98	99.63	30
1	7	30	30	100	99.65	50
1	9	30	30	98.91	98.96	50
1	10.2	10	30	14.2	55.87	30
1	10.2	20	30	14.5	64.09	10
1	10.2	30	30	39.2	88.62	10

Oluşan çamur miktarları Cr^{+3} giderimi için Şekil 4.5'te, Zn^{+2} giderimi için Şekil 4.6'da grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.5. Cr⁺³ giderim verimine göre oluşan çamurun hacmi



Şekil 4.6. Zn⁺² giderim verimine göre oluşan çamurun hacmi

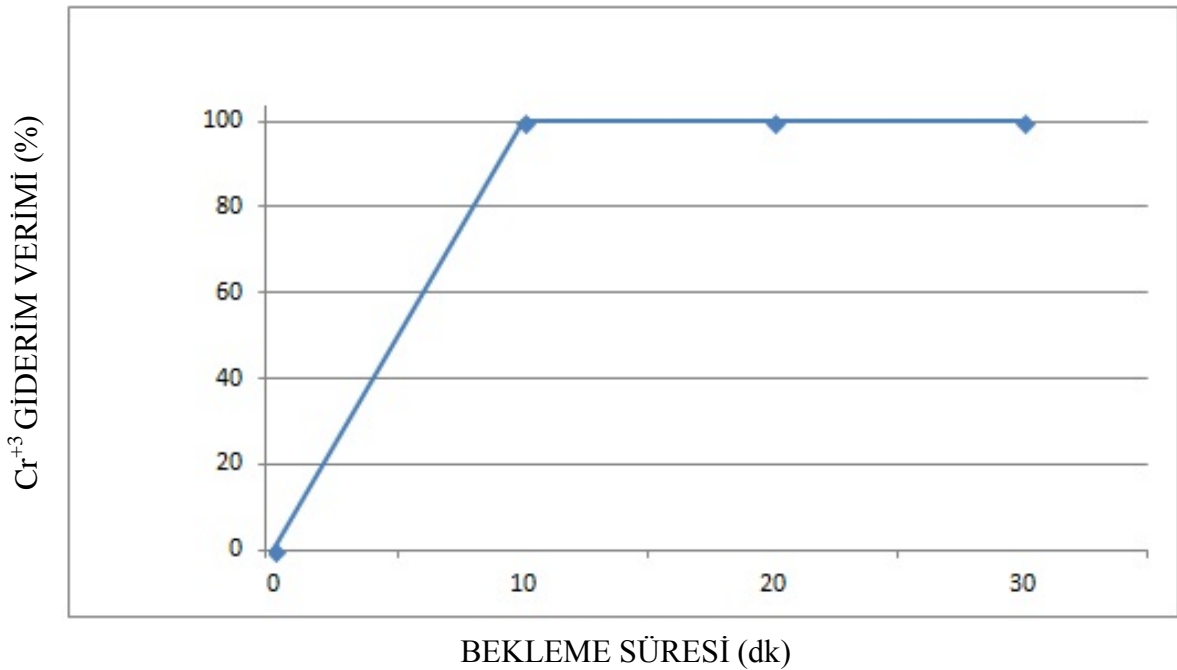
4.2. Fe-Cu Elektrot Kullanımı İçin Bulgular

Çalışma kapsamında anotta bakır ve katotta demir elektrot kullanılarak sabit pH'ta 10 dk, 20 dk ve 30 dk bekleme sürelerinde Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi ile bekleme süresi sabit 30 dk'da sırasıyla 5, 7, 9 ve 6.2 pH'ta Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

4.2.1. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Zaman Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi

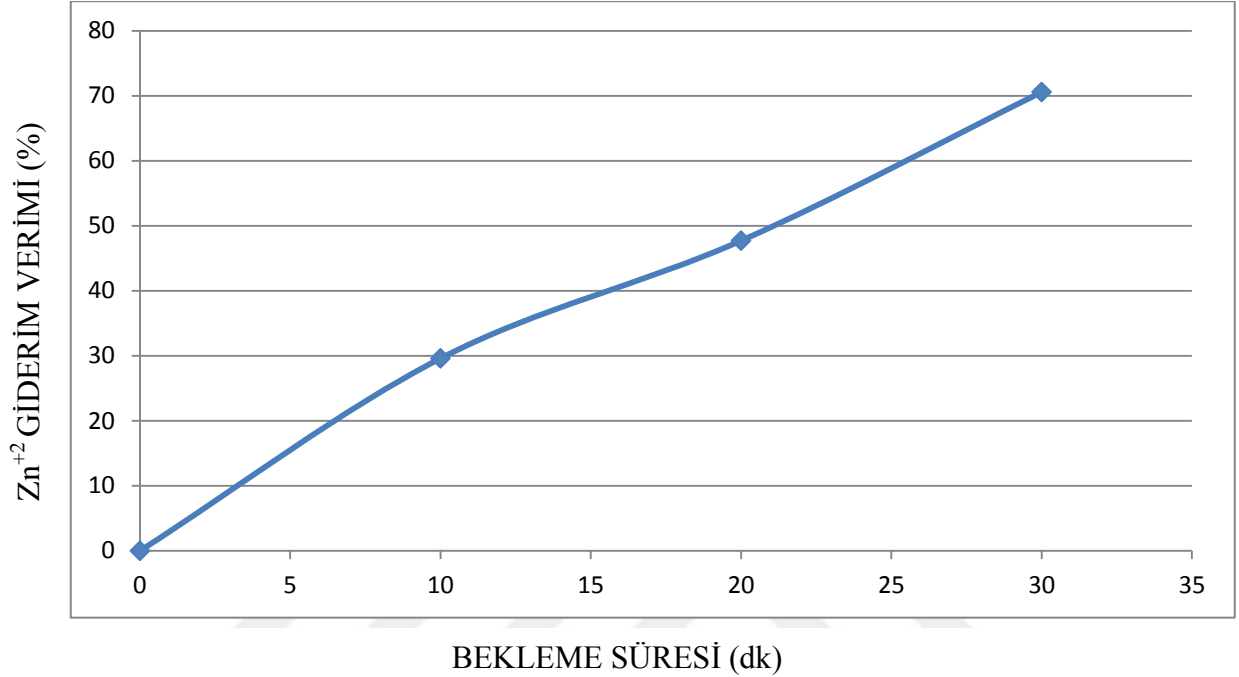
Çalışmanın bu aşamasında Fe-Cu elektrot kullanılarak pH 6.2'de; 10 dk, 20 dk ve 30 dk bekleme sürelerinde Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

Zamana bağlı olarak Cr^{+3} 'ün giderimi 10. dk'da % 99.98, 20. dk'da % 100, 30. dk'da % 99.91 olarak bulunmuştur. Çalışılan zaman dilimleri içerisinde 20. dakikada atıksuda Cr^{+3} kalmadığı tespit edilmiştir. Giderimin zamana bağlı grafiksel değerlendirilmesi Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Sabit pH'ta zamana bağlı Cr^{+3} giderim verimi

Zamana bağılı olarak Zn^{+2} 'nin giderimi 10. dk'da % 29.61, 20. dk'da % 47.72, 30. dk'da % 70.59 olarak bulunmuştur. Çalışılan zaman dilimleri içerisinde bekleme süresi arttıkça giderim veriminin arttığı tespit edilmiştir. Giderimin zamana bağılı grafiksel değerlendirilmesi Şekil 4.8'de verilmiştir.

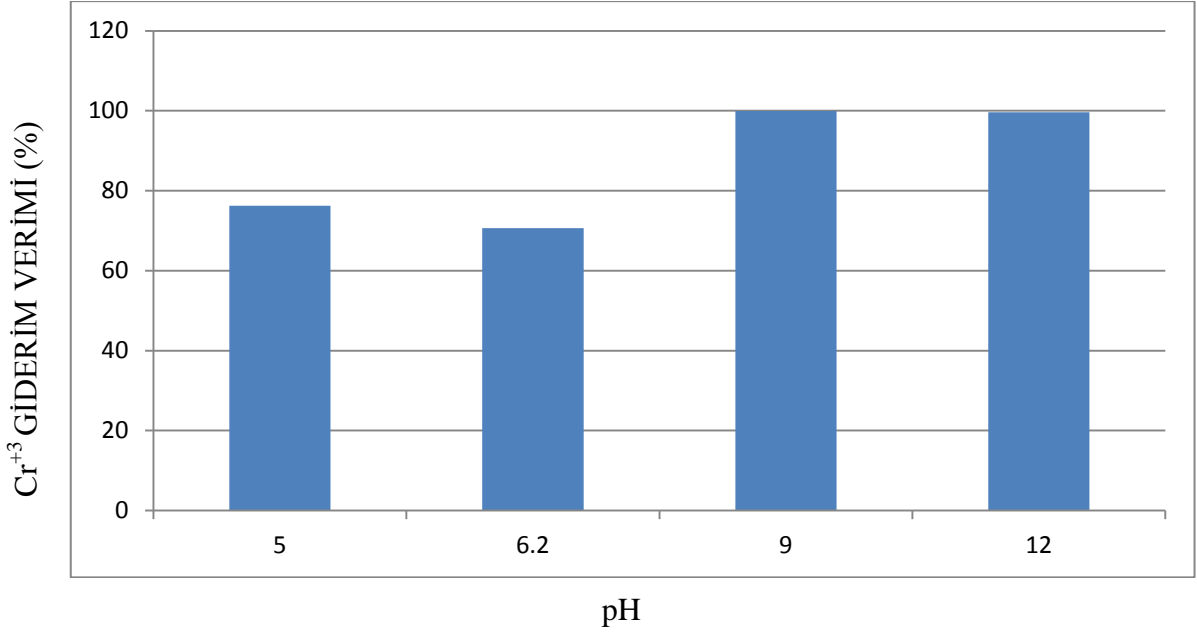


Şekil 4.8. Sabit pH'ta zamana bağılı Zn^{+2} giderim verimi

4.1.2. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak pH Değişkenli Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi

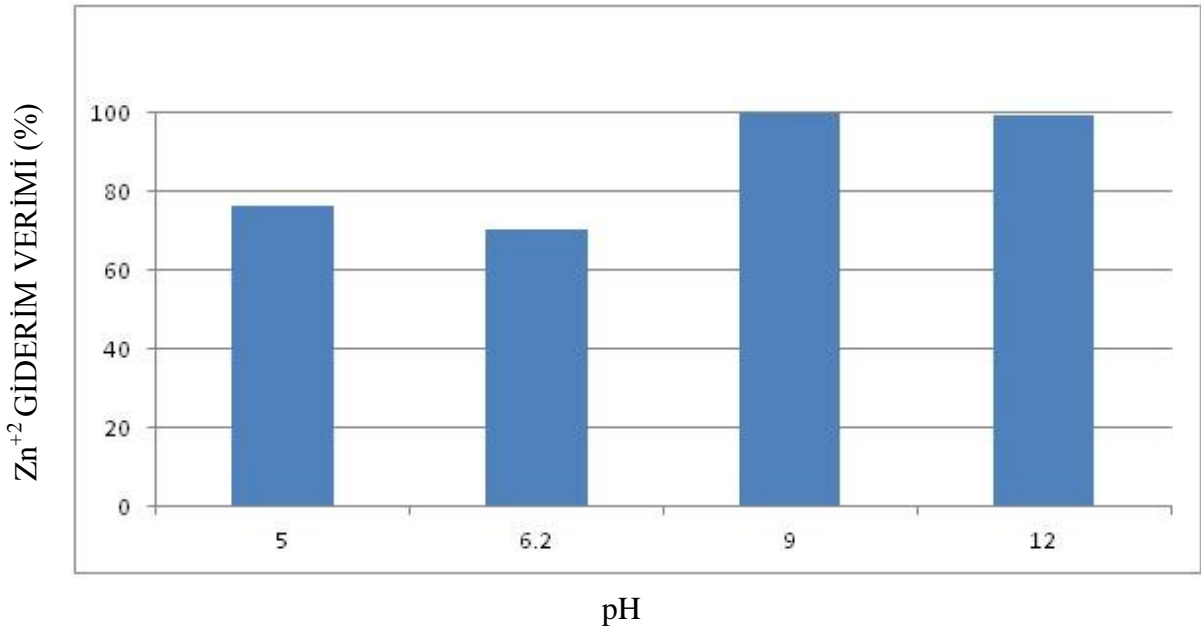
Çalışma zaman dilimleri içerisinde optimum giderim veriminin olduğu tespit edilen 30. dakikada pH üzerinde değişimler yapılarak giderim verimi değerlendirilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında Fe-Cu elektrot kullanılarak 30 dk bekleme süresinde pH 5, 6.2, 9 ve 12'de Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

pH'a bağılı olarak Cr^{+3} 'ün 5 pH'da % 100, 6.2 pH'da % 99.91, 9 pH'da % 99.98, 12 pH'da % 100 olarak bulunmuştur. Çalışmada seçilen pH'larda en iyi giderim verimi 5 ve 12'de elde edilmiştir. 30 dakika bekleme süresince değişen pH'ya bağılı grafiksel değerlendirilme Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9. Sabit bekleme süresinde pH değişkenli Cr⁺³ giderim verimi

pH'a bağlı olarak Zn⁺²'nin 5 pH'da % 76.25, 6.2 pH'da % 70.6, 9 pH'da % 99.92, 12 pH'da % 99.60 olarak bulunmuştur. Çalışmada seçilen pH'larda en iyi giderim verimi 9'da elde edilmiştir. Xu ve ark. (2017), Zn⁺²'nin gideriminde yüksek pH değerlerinde verimin arttığını bildirmişlerdir. 30 dakika bekleme süresince değişen pH'ya bağlı grafiksel değerlendirilme Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10. Sabit bekleme süresinde pH değişkenli Zn⁺² giderim verimi

4.2.3. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin Optimizasyonu

Çalışılan düzende Fe-Cu elektrot kullanılarak 10, 20 ve 30. dakikalık bekleme süresince atıksuda bulunan Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir. Çalışılan zaman dilimi içerisinde maksimum Cr^{+3} giderimine 20. dakikada ulaşılmış olup, Zn^{+2} için bekleme süresi arttıkça giderim veriminin arttığı tespit edilmiştir.

Ardından çalışılan zaman dilimleri içerisinde optimizasyonu sağlamak için 30. dakikada pH üzerinde değişimler yapılarak giderim verimi değerlendirilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında 30 dk. bekleme süresinde pH 5,6,2,9 ve 12'de Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiş olup Cr^{+3} giderimi Çizelge 4.7'de, Zn^{+2} giderimi Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} Gideriminin İncelenmesi

Atıksu Hacmi (L)	Elektrot (Anot/Katot)	Akım (A)	Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)	pH	Bekleme Süresi (dk)	Giderim Verimi (%)
1	Fe/Cu	1	12.3	5	30	100
1	Fe/Cu	1	12.3	6.2	10	99.98
1	Fe/Cu	1	12.3	6.2	20	100
1	Fe/Cu	1	12.3	6.2	30	99.91
1	Fe/Cu	1	12.3	9	30	99.98
1	Fe/Cu	1	12.3	12	30	100

Çalışmada maksimum Cr^{+3} giderimi 30 dakikalık bekleme süresinde 5 ve 12 pH'da gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.8. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi

Atıksu Hacmi (L)	Elektrot (Anot/Katot)	Akım (A)	Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)	pH	Bekleme Süresi (dk)	Giderim Verimi (%)
1	Fe/Cu	1	12.3	5	30	76.25
1	Fe/Cu	1	12.3	6.2	10	29.61
1	Fe/Cu	1	12.3	6.2	20	47.72
1	Fe/Cu	1	12.3	6.2	30	70.59
1	Fe/Cu	1	12.3	9	30	99.92
1	Fe/Cu	1	12.3	12	30	99.59

Çalışmada maksimum Zn^{+2} giderimi 30 dakikalık bekleme süresinde 12 pH'da gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Çalışılan atıksu örneğinde en Fe-Cu elektrot kullanılarak optimum Cr^{+3} ve Zn^{+2} kirleticilerinin birlikte giderim verimi 30 dakikalık bekleme süresinde 12 pH'da elde edilmiştir.

4.2.4. Fe-Cu Elektrot Kullanımında Anotta Kütleli Kayıp

Reaktörde kullanılan elektrotlar her reaksiyon öncesi ve sonrasında saf su ile yıkanmış ve $105\text{ }^{\circ}C$ sıcaklıkta etüvde kurutularak hassas terazide tartılmıştır. Anottaki kütleli değişimler Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Fe-Cu elektrot kullanımında anotta kütleli kayıp

pH	Bekleme Süresi	Anot İlk Tartım (g)	Anot Son Tartım (g)	Anottaki Kütleli Değişim (mg)
5	30	94.3665	94.0982	-0.2683
6.2	10	94.5757	94.389	-0.1867
6.2	20	94.389	94.3848	-0.0042
6.2	30	94.3848	94.3665	-0.0183
9	30	94.0982	93.913	-0.1852
12	30	93.913	93.6849	-0.2281

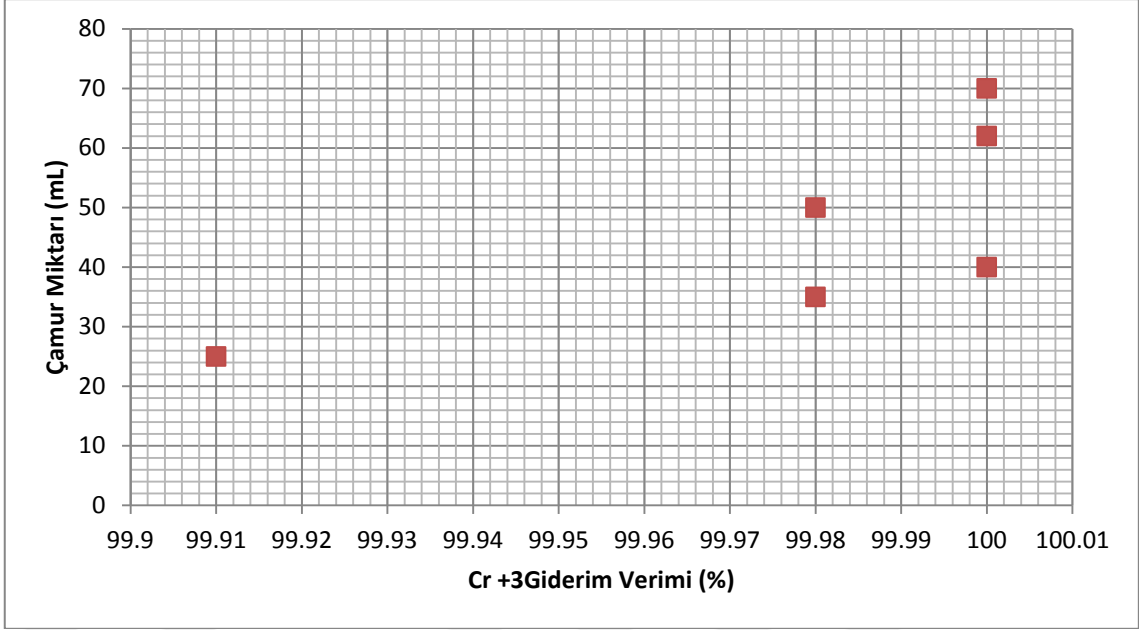
4.2.5. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminde Çamur Oluşumunun İncelenmesi

Çalışmada oluşan atıksular reaksiyon sonunda 30 dakikalık çökelmeye alınmış ve oluşan çamur miktarı tartılmıştır. Çamur oluşumunun kaynağı suda bulunan kirlenmelerin koagülant oluşturması ve bu koagülantların sudan uzaklaştırılması ile olabileceği gibi anotun elektroliz işlemi neticesinde çözünmesinden de ileri gelebilmektedir. Oluşan çamur miktarları aşağıda Çizelge 4.10'da verilmiştir.

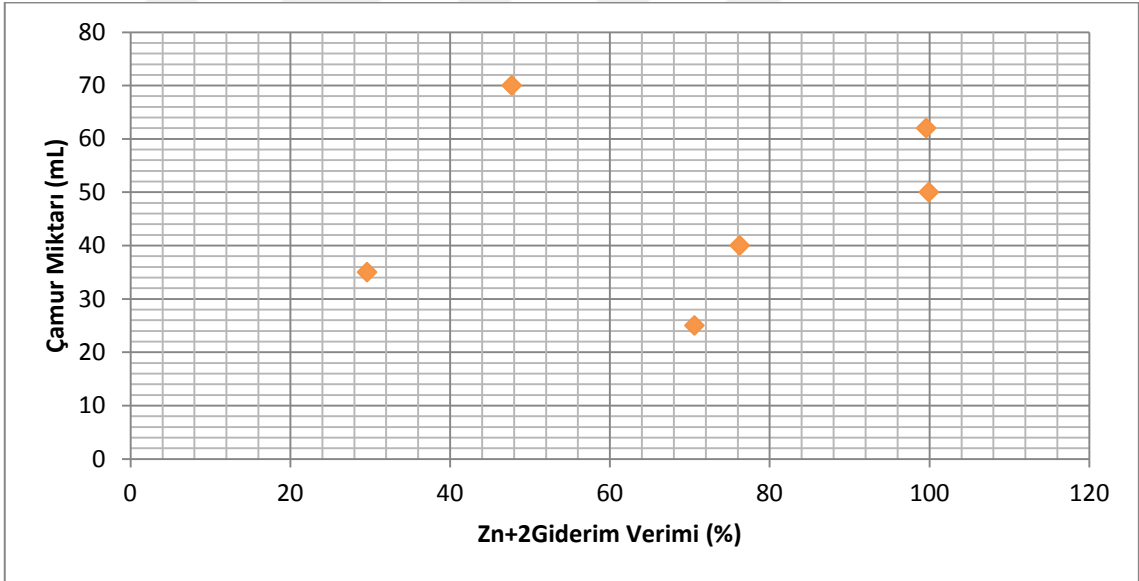
Çizelge 4.10. Fe-Cu Elektrot Kullanılarak Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminde Oluşan Çamur Miktarları

Atıksu Hacmi (L)	pH	Elektroliz Süresi (dk)	Çökeltme Süresi (dk)	Zn^{+2} Giderim Verimi (%)	Cr^{+3} Giderim Verimi (%)	Oluşan Çamur Hacmi (mL)
1	5	30	60	76.25	100	40
1	6.2	10	60	29.61	99.98	35
1	6.2	20	60	47.72	100	70
1	6.2	30	60	70.59	99.91	25
1	9	30	60	99.92	99.98	50
1	12	30	60	99.59	100	62

Oluşan çamur miktarları Cr^{+3} giderimi için Şekil 4.13'te, Zn^{+2} giderimi için Şekil 4.14'te grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.13. Cr⁺³ giderim verimine göre oluşan çamurun hacmi



Şekil 4.14. Zn⁺² giderim verimine göre oluşan çamurun hacmi

Tüm çalışma için; demir-demir ve demir-bakır elektrotta pH ve zaman değişkenli giderim verimleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Fe-Fe Elektrot Çifte ve Fe-Cu Elektrot Çiftinde Cr^{+3} ve Zn^{+2} Gideriminin İncelenmesi

Fe-Fe Elektrot Çifti				Fe-Cu Elektrot Çifti	
pH	Elektroliz Süresi (dk)	Cr^{+3} Giderim Verimi (%)	Zn^{+2} Giderim Verimi (%)	Cr^{+3} Giderim Verimi (%)	Zn^{+2} Giderim Verimi (%)
5	30	99.63	99.98	100	76.25
6.2	10	-	-	99.98	29.61
6.2	20	-	-	100	47.72
6.2	30	-	-	99.91	70.59
7	30	99.65	100	-	-
9	30	98.96	98.91	99.98	99.92
10.2	10	55.87	14.2	-	-
10.2	20	64.09	14.5	-	-
10.2	30	88.62	39.2	-	-
12	30	-	-	100	99.59

4.3. Elektrik Tüketiminin Hesaplanması

Reaktörde tüketilen elektrik miktarı denklem 4.1 ile hesaplanmıştır.

$$E = (U.I.t)/V_{atıksu} \quad (4.1)$$

Burada;

E : Tüketilen Elektrik Enerji Miktarı (kWh/L),

U : Güç Kaynağındaki Gerilim (V)

I : Güç Kaynağındaki Akım Şiddeti (A)

t : Reaksiyon Süresi (h)

$V_{atıksu}$: Atıksu hacmi (L)

olarak tanımlanmıştır. Bu durumda her giderim değerlendirilmesinde tüketilen elektrik miktarı ve elektrik birim fiyatının 0.4 TL alındığında tüketim bedeline ilişkin tablo Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Zamana Göre Elektrik Sarfiyatı ve Elektrik Tüketim Maliyeti

Uygulanan Gerilim (V)	Uygulanan Akım Şiddeti (A)	Reaksiyon Süresi (dk)	Elektrik Sarfiyatı (kW)	Enerji Birim Fiyat (TL)	Arıtma Maliyeti (m³/TL)
24	1	10	144	0.41	57.6
24	1	20	288	0.41	115.2
24	1	30	432	0.41	172.8

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Elektrokoagülasyon prosesinde demir-demir elektrot ile demir-bakır elektrot kullanılarak galvaniz prosesinden kaynaklanan atıksularda bekleme süresi, elektrot seçimi ve farklı pH için Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderimi verimleri incelenmiştir.

Reaktörlerde her bir kenar uzunluğu 9 cm olan kare elektrotlar kullanılmış olup her reaktörün yüzey alanı 81 cm^2 , akım yoğunluğu 12.3 mA/cm^2 Yapılan çalışmada kullanılan elektrotların tamamı atıksuyun içerisinde kalacak şekilde çalışma yapılmıştır.

Çalışma kapsamında Fe-Fe elektrot kullanılarak sabit pH'ta 10 dk, 20 dk ve 30 dk bekleme sürelerinde Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi ile bekleme süresi sabit 30 dk'da sırasıyla 5, 7, 9 ve 10.2 pH'ta Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir. Zamana bağlı olarak Cr^{+3} 'ün giderimi 10. dk'da % 55.87 giderim verimi elde edilmişken 20. dk'da % 64.09 giderim verimi elde edilmiştir. Bekleme süresi 30. dk'ya çıkarıldığında ise % 88.61 giderim verimi elde edilmiştir. Zamana bağlı olarak Zn^{+2} 'nin giderimi 10. dk'da % 14.2 iken 20. dk'da % 14.5, ve 30. dk'da % 39.2'ye ulaşılmıştır. Çalışılan zaman dilimleri içerisinde bekleme süresi arttıkça giderim veriminin arttığı tespit edilmiştir.

Çalışma zaman dilimleri içerisinde en yüksek giderim veriminin olduğu tespit edilen 30. dakikada pH üzerinde değişimler yapılarak giderim verimi değerlendirilmiştir. 30 dk bekleme süresinde pH 5, 7, 9 ve 10.2'de Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

pH'a bağlı olarak Cr^{+3} 'ün 5 pH'da % 99.63, 7 pH'da % 99.65, 9 pH'da % 98.96, 10.2 pH'da % 88.61 olarak bulunmuştur. Zn^{+2} 'nin 5 pH'da % 68.63, 7 pH'da % 79.74, 9 pH'da % 79.06, 10.2 pH'da % 39.2, olarak bulunmuştur. Çalışmada seçilen pH'larda en iyi giderim verimi 7'de elde edilmiştir.

Çalışılan atıksu örneğinde en Fe-Fe elektrot kullanılarak optimum aynı zamanda maksimum Cr^{+3} ve Zn^{+2} kirleticilerinin birlikte giderim verimi 30 dakikalık bekleme süresinde 7 pH'da elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında Fe-Cu elektrot çifti kullanılarak pH 6.2'de; 10 dk, 20 dk ve 30 dk bekleme sürelerinde Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

Zamana bağlı olarak Cr^{+3} 'ün giderimi 10. dk'da % 99.98, 20. dk'da % 100, 30. dk'da % 99.91 olarak bulunmuştur. Çalışılan zaman dilimleri içerisinde 20. dakikada atıksuda Cr^{+3} kalmadığı tespit edilmiştir. Zamana bağlı olarak Zn^{+2} 'nin giderimi 10. dk'da % 29.61, 20. dk'da % 47.72, 30. dk'da % 70.59 olarak bulunmuştur. Çalışılan zaman dilimleri içerisinde bekleme süresi arttıkça giderim veriminin arttığı tespit edilmiştir.

Çalışma zaman dilimleri içerisinde optimum giderim veriminin olduğu tespit edilen 30. dakikada pH üzerinde değişimler yapılarak giderim verimi değerlendirilmiştir. 30 dk bekleme süresinde pH 5, 6.2, 9 ve 12'de Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderim verimi incelenmiştir.

pH'a bağlı olarak Cr^{+3} 'ün 5 pH'da % 100, 6.2 pH'da % 99.91, 9 pH'da % 99.98, 12 pH'da % 100 olarak bulunmuştur. Çalışmada seçilen pH'larda en iyi giderim verimi 5 ve 12'de elde edilmiştir. pH'a bağlı olarak Zn^{+2} 'nin 5 pH'da % 76.25, 6.2 pH'da % 70.6, 9 pH'da % 99.92, 12 pH'da % 99.60 olarak bulunmuştur. Çalışmada seçilen pH'larda en iyi giderim verimi 9'da elde edilmiştir.

Çalışılan atıksu örneğinde en Fe-Cu elektrot kullanılarak optimum Cr^{+3} ve Zn^{+2} kirleticilerinin birlikte giderim verimi 30 dakikalık bekleme süresinde 12 pH'da elde edilmiştir. Alınan atıksu örnekleri aynı tesisten olmasına rağmen farklı pH değerlerine ve farklı kirletici konsantrasyonlarına sahip olduğu için numunelerin alındığı tesiste dengeleme havuzu yapılması gerekmektedir.

5.2. Öneriler

Su, hayatın devamlılığı için olmazsa olmazdır. Dünyadaki su miktarı sabit olup, artan nüfus ve buna paralel tüketimdeki artış ve endüstrileşme suya olan ihtiyacı arttırmaktadır. Fakat yağışlardaki düzensizlik ve kurulan yerleşim yerleri kullanılabilir suya erişimi güçleştirmektedir. Sulama suları ve endüstride kullanılan sular, su tüketiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Hayatın devamlılığı için su kaynaklarının verimli kullanımı elzemdir.

Metal sanayi, suyun endüstriyel alanda kullanımında önemli bir alanı kaplamaktadır. Ancak özellikle metal kaplama sanayinde oluşan atıksular, başta ağır metal olmak üzere çeşitli kirleticiler içermektedir. Bu ağır metaller doğrudan bu suyu kullanan canlıların hayatında olumsuz etkiler oluşturmakla beraber, besin piramidinde

bu suya maruz kalan canlılarla beslenen canlıların da metabolizmasında birikerek olumsuzluklara neden olmaktadır. Bu sebeple, söz konusu atıksuların doğrudan alıcı ortama verilmemesi gerekmektedir.

Metal sanayinden kaynaklanan atıksuların arıtımında yaygın olarak kimyasal arıtım yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada daha yüksek verim ve daha kolay işletme yöntemi arayışları için elektrokimyasal arıtımın alternatif olup olmayacağı değerlendirilmiş olup, Fe-Cu elektrot çiftinde 9 pH'da yüksek Cr^{+3} ve Zn^{+2} giderme verimi elde edilmiştir. Elektrokoagülasyonun bu ağır metallerin gideriminde iyi bir yöntem olduğu görülmüştür. Sistemin geliştirilebilmesi için;

- Daha düşük akım yoğunluğunda giderim verimi değerlendirilmeli ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi incelenmelidir.
- Çalışma laboratuvar ölçekli olup, pilot ölçekli işletme ile detaylı uygulanabilirlik araştırılmalıdır.
- İşletme maliyetlerinin hesaplanmasında detaylı analizler yapılmalıdır.
- Farklı debiler için sürekli akışlı reaktör tasarımları değerlendirilmelidir.
- Farklı elektrotlar için giderim verimleri incelenmelidir.
- Farklı elektrot bağlantı tiplerinin arıtma verimine etkileri incelenmelidir.
- Aynı zamanda diğer kirleticilerin giderimi de incelenmelidir.
- Arıtım sonucunda oluşan çamurda bulunan metallerin geri kazanımı üzerinde çalışılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Akbaş, A., 2009, Erdemir 7140K mikro alaşımlı çelik levhaların sıcak daldırma galvaniz yöntemi ile kaplanma ve galvaniz alaşım özelliklerinin geliştirilmesi, , *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.*
- Akbaş, H., 2014, Elektrokoagülasyon yöntemi ile renk gideriminin incelenmesi, *Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.*
- Al-Shannag, M., Al-Qodah, Z., Bani-Melhem, K., Qtaishat, M. R. ve Alkasrawi, M., 2015, Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance, *Chemical Engineering Journal*, 260, 749-756.
- Al Aji, B., Yavuz, Y. ve Koparal, A. S., 2012, Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes, *Separation and Purification Technology*, 86, 248-254.
- Aygün, A., 2012, Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesi işe arıtımı: yüzey yanıt yöntemi ile optimizasyon *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Konya.*
- Aytaç, E., 2016, Elektrodializ yöntemi ile atıksulardan kurşun, bakır ve nikel giderimini araştırılması, *Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, Zonguldak.*
- Berik, N., 2002, İşlenmiş ve işlenmemiş su ürünlerinin elektroforez yöntemi ile cinslerinin tanımı, *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Su Ürünleri Avlanma ve İşleme Teknolojisi Ana Bilim Dalı, İşleme Teknolojisi Programı, Doktora Tezi, İstanbul.*
- Çolak, Z., 2017, Adıyaman Kahta Yüzüncüyıl Göleti'ne deşarj edilen ilçe atıksuyun elektroflotasyon yöntemiyle arıtılabilirliğinin araştırılması, *Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman.*
- Deliktaş, E., 2011, Kağıt endüstrisi atıksularının elektro-fenton prosesi ile arıtılması, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Konya.*
- Delil, A., Demir; ve Gören, N., 2018, Treatment of real textile wastewater with electrocoagulation and electrooxidation methods, *3. International Conference on Civil and Environmental Engineering*, 83-95.

- Delipinar, Ş., 2007, Maya endüstrisi atıksularının elektrokoagülasyon ve kimyasal koagülasyon ile arıtımı, *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Gebze.
- Dias, O., Avancini, Muniza, E., Perini, ve Porto, P., Sérgio. da Silva, 2019, Electrocoagulation using perforated electrodes: An increase in metalworking fluid removal from wastewater, *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 113-120.
- Doggaz, A., Attour, A., Le Page Mostefa, M., Côme, K., Tlili, M. ve Lapicque, F., 2019, Removal of heavy metals by electrocoagulation from hydrogenocarbonate-containing waters: Compared cases of divalent iron and zinc cations, *Journal of Water Process Engineering*, 29.
- Dura, A. ve Breslin, C. B., 2019, Electrocoagulation using aluminium anodes activated with Mg, In and Zn alloying elements, *J Hazard Mater*, 366, 39-45.
- Ergene, B., 2013, Metal kaplama endüstri atıksularının arıtımı, *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Fil, B., Ali, 2014, Antep fıstığı işleme atıksularının elektrooksidasyon yöntemiyle arıtılması, *Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çevre Teknolojisi Bilim Dalı, Doktora Tezi*, Erzurum.
- Garcia-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., de Melo, J. V. ve Martínez-Huitle, C. A., 2017, Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267-299.
- Graça, N., S., Ribeiro, A., M. ve Rodrigues, A., E., 2019, Modeling the electrocoagulation process for the treatment of contaminated water, *Chemical Engineering Science*, 379-385.
- İlhan, F., Kurt, U., Apaydın, Ö., Arslankaya, E. ve Gönüllü, M. T., 2007, Elektrokimyasal arıtım ve uygulamaları: Katı atık sızıntı suyu çalışması, *TÜRKAY 2007 AB Sürecinde Türkiye’de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu*, İstanbul.
- Kalkan, S., 2015, TiO₂ katkılı nafion membran sentezi ve atıksu dezenfeksiyonunda sürekli sistem elektroliz/elektrodiyaliz hücresinin kullanılması, *Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Mersin.
- Kasap, T., 2017, Kağıt endüstrisi atıksularının peroksit ilaveli elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımında cevap yüzey yöntemi kullanılarak proses optimizasyonu, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.

- Köksal, Z., 2015, Antep fıstığı işleme atıksularının sürekli sistemde elektrokimyasal arıtım yöntemleri ile arıtımının incelenmesi, *Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Erzurum.
- Oden, M., Kamil ve Erkan, H., Sarı, 2018, Treatment of metal plating wastewater using iron electrode by electrocoagulation process: Optimization and process performance, *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 207-217.
- Özlü, E., Budak;, 2016, Metal kaplama endüstrisi atıksularının ileri arıtım yöntemleriyle arıtılmasının incelenmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.
- Öztürk, H., 2017, Gri suların elektrokoagülasyon ile arıtılabilirliğinin incelenmesi, *Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Gebze.
- Özyonar, F., 2007, Entegre et ve et ürünleri tesisleri atıksularının kimyasal koagülasyon ve elektrokoagülasyon yöntemleriyle arıtılabilirliğinin incelenmesi, *Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Sivas.
- Özyonar, F., Karagözoğlu, B. ve Atmaca, E., 2011, İçme suyundan elektrokoagülasyon prosesi ile doğal organik madde giderimi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27 (4), 309-316.
- Özyonar, F., 2012, Elektrokimyasal yöntemlerle kömür koklaştırma endüstrisi (kok) atıksuların arıtılabilirliğinin incelenmesi, *Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi*, Sivas.
- Parlak, N., Uzun;, 2008, Metal kaplama prosesi durulama banyo atıksularının elektrokoagülasyon ile arıtımı, *Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Gebze.
- Tanattı, N., Pınar, 2015, Biyodizel atıksularının elektrokoagülasyon ve ileri oksidasyon yöntemleri ile arıtılabilirliği, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya.
- Veli, S., Özbay, B., Özbay, İ., Arslan, A. ve Çebi, E., 2018, Elektrokoagülasyon Prosesi İle Gıda Endüstrisi Atıksuyunun Arıtımında Optimum Koşulların Belirlenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 932-936.
- Xu, L., Cao, G., Xu, X., Liu, S., Duan, Z., He, C., Wang, Y. ve Huang, Q., 2017, Simultaneous removal of cadmium, zinc and manganese using electrocoagulation: Influence of operating parameters and electrolyte nature, *J Environ Manage*, 204 (Pt 1), 394-403.

- Yaşar, Ö., Deniz, 2018, Metal kaplama atıksuyundan elektrokoagülasyon flokları, klinoptilolit ve koalin kullanarak nikel (II) iyonlarının giderimi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Samsun.*
- Yıldırım, Ö., 2007, Kağıt endüstrisi atıksularının elektro-fenton yöntemiyle arıtılabilirliğinin incelenmesi, *Zonguldak Kara Elmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.*



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hüseyin Can GÜLYAŞAR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya/09.12.1987
Telefon : + (90) 505 516 51 05
e-mail : h.cangulyasar@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: CUMHURİYET LİSESİ, SELÇUKLU, KONYA	2005
Üniversite	: CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ, SİVAS	2012
Yüksek Lisans	: KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, KONYA	2019
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-2014	ENVİRO MÜHENDİSLİK	ÇEVRE MÜHENDİSİ
2014-2018	CAN AKBAŞ GERİ DÖNÜŞÜM	ÇEVRE MÜHENDİSİ
2018-Halen	DORU ÇEVRE DAN. MÜH.	ÇEVRE MÜHENDİSİ/ KOORDİNATÖR

UZMANLIK ALANI : Çevre Danışmanlık, Atık Yönetimi

YABANCI DİLLER : İngilizce, Almanca

YAYINLAR

Gülyaşar H.C., Gök Z., Treatment of metal plating electrocoagulation process, International Symposium for Environmental Science and Engineering Research, Konya, Türkiye, 25-27 May 2019