T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

EVSEL ATIKSULARIN BİYOELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rıdvan DİNÇER

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

ARALIK-2022

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

EVSEL ATIKSULARIN BİYOELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Rıdvan DİNÇER
(19278033016)

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet AYGÜN

ARALIK-2022

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19278033016 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Rıdvan DİNÇER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "Evsel Atıksuların Biyoelektrokoagülasyon Prosesi İle Arıtılması" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ahmet AYGÜN** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Orhan Taner CAN** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Beytullah EREN .....
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : 02.12.2022
Savunma Tarihi : 02.01.2023

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü tezi, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Rıdvan DİNÇER

İmzası:

Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez dönemimde önemli katkılarından ötürü tez danışmanım, değerli hocam Doç.Dr. Ahmet AYGÜN‘e teşekkür ederim.

Atıksu Ruhsat Denetleme Şube Müdürü Dr. İpek Diğdem Yolcu’ya, Atık su Laboratuvarı Birim Sorumlusu Şeyma Peker, Çalışma Arkadaşlarım Salih Koç, Yavuz ATAK, Emine YILMAZ, Emine ORDU, Fatma ÇETİN, Metin MEDİN ve Semra KURT'a deneysel çalışmalar boyunca kullanılan atık suyun teminine izin verdikleri ve desteklerinden ötürü teşekkürü bir borç bilirim. Tez savunmamda katkılarından dolayı jüri üyeleri hocalarım ve Prof. Dr. Mehmet İŞLEYEN hocama teşekkür ederim. Beni bu günlere getiren, hiçbir koşul altında desteğini esirgemeyen değerli aileme de tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2023

Rıdvan DİNÇER
(Kimyager)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
KISALTMALAR ..... **ix**
SEMBOLLER ..... **x**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
SUMMARY ..... **xiv**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **5**
2.1 Atıksu Arıtımının Amacı ve Kapsamı 5
2.2 2.2. Biyoelektrokoagülasyon Prosesi ve Uygulamları 5
3. MATERYAL VE YÖNTEM **10**
3.1 Atıksu Özellikleri 10
3.2 Deney Düzeneği Kurulumu ve İşletilmesi 11
3.3 Analiz Metotları 12
4. DENEYSEL BULGULAR **13**
5. SONUÇ VE ÖNERİLER **23**
KAYNAKLAR **25**
6. ÖZGEÇMİŞ **27**

KISALTMALAR

AKM	: Askıda Katı Madde
BOİ	: Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
CI	: Colour İndex
ÇKM	: Çözünmüş Katı Madde
DC	: Doğru Akım
EF	: Elektro flotasyon
EK	: Elektrokoagülasyon
EO	: Elektro oksidasyon
GB	: Görünür Bölge
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
TÇM	: Toplam Çözünmüş Madde
UV	: Ultraviyole

SEMBOLLER

A	: Aktif anot yüzey alanı
C	: Çözelti konsantrasyonu
E	: Akım verimi
F	: Faraday sabiti
HRT	: Hidrolik bekleme süresi
İ	: Akım şiddeti
I_0	: Gelen ışın demetinin şiddeti
J	: Akım yoğunluğu
M	: Teorik olarak çözünen metalin
m_{act}	: Pratikte çözünen metalin (mol olarak)
m_{metal}	: Çözünen elektrot materyali miktarı
MA	: Pratikte anotta elektrottaki çözünme miktarı
MA	: Molekül ağırlığı
MT	: Toplam çözünen alüminyum miktarı
N	: İyon yükü
pH	: Çözeltideki hidrojen iyonu konsantrasyonun negatif
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
SRT	: Çamur yaşı
q	: Akımın miktarı(yük)
t	: Zaman
ts	: Arıtma süresi
T	: Geçirgenlik
v	: Elektrolit hacmi
V	: Volt
W	: Watt
Z	: Elektrot materyali iyonlarının valansı
λ	: Dalga boyu
ε	: Molar sönüm katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Atıksu karakterizasyonu 10
Çizelge 3.2 : Arıtılmış atıksuyun karakterizasyonu..... 10
Çizelge 3.3 : Parametre ve uygulanan metot 12
Çizelge 4.1 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Al^{+}-Al^{-}) 14
Çizelge 4.2 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Fe^{+}-Fe^{-}) 16
Çizelge 4.3 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Al^{+}-Fe^{-}) 19
Çizelge 4.4 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Fe^{+}-Al^{-}) 21

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Deneysel düzeneğin görüntüsü 11
Şekil 4.1 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Al^{+}-Al^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk 15
Şekil 4.2 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Fe^{+}-Fe^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk 17
Şekil 4.3 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Al^{+}-Fe^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk 20
Şekil 4.4 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Fe^{+}-Al^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk 22

EVSEL ATIKSULARIN BİYOELEKTROKOAGÜLASYON PROSESİ İLE ARITILMASI

ÖZET

Son Kullanılabilir nitelikte bulunan su miktarının az olması, suyun yeniden kullanımını gerekli hale getirmektedir. Bu yüzden atıksu arıtımında yenilikçi, daha etkili ve ucuz teknikleri geliştirmek zorundayız ve zorunluluk ihtiyaç haline gelmiştir. Artan nüfus ve gelişen sanayiye bağlı olarak her geçen gün farklı karakteristikte atıksularla karşı karşıya kalınmaktadır. Bu nedenle gerek maliyet açısından gerekse ortaya koyulan giderim verimi açısından ihtiyaçlara cevap verecek yeni arıtım yöntemleri için arayışlar sürmekte ve araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmamızda, son yıllarda diğer arıtım yöntemlerine kıyasla maliyeti alternatif teknolojilerine göre oldukça düşük, avantajlarıyla göz önüne çıkan ileri arıtım tekniklerinden elektrokimyasal arıtım yöntemlerinden biri olan elektrokoagülasyon irdelenmiştir. Elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtım yönteminin temel mekanizması, diğer arıtım yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları, önemli işletme parametreleri ve elektrokoagülasyonun tercih edilme sebepleri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Su ve Atıksu Arıtımı, Koagülasyon, Flokülasyon, Elektrokimyasal Prosesler, Elektrokoagülasyon

TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER BY BIOELECTROCOAGULATION PROCESS

SUMMARY

The low amount of usable water makes it necessary to reuse water. That's why we have developed innovative, more effective and cheaper techniques in wastewater treatment and it has become a necessity. Due to the increasing population and developing industry, wastewater with different characteristics is encountered day by day. For this reason, searches continue and researches are carried out for new treatment methods that will meet the need in terms of both cost and lifting efficiency. In this study, electrocoagulation, which is one of the advanced treatment techniques and has a very low cost compared to other alternative technologies in recent years, has been examined compared to other treatment methods. The basic mechanism of treatment with electrocoagulation method, its advantages and disadvantages compared to other treatment methods, important working parameters and the reasons for choosing electrocoagulation were examined.

Keywords: Water and Waste Water Teatment, Coagulation, Flocculation, Electro chemical Processes, Electro-coagulation

1. GİRİŞ

Nüfusun hızla artması, endüstriyel su kullanımının artışı ile birlikte değerlendirildiğinde suyun tekrar kullanılabilir hale getirilmesi büyük önem arz etmektedir. Atıksu arıtımında yenilikçi, düşük maliyetle işletilebilen arıtma yöntemlerinin kullanılması zorunluluk haline gelmiştir. Artan nüfus ve gelişen sanayiye bağlı olarak her geçen gün farklı karakteristik de ve daha yüksek devirlerde atık sularla karşı karşıya kalınmaktadır. Artırılacak atık suyun, karakterize edilmesi en uygun arıtma yöntemi veya birden çok arıtım yönteminin artışı kullanımının tercih edilmesi açısından son derece önemlidir. Bu çalışma özelinde son yıllarda diğer arıtım yöntemler ile karşılaştırıldığında özellikle nitrifikasyon prosesinde elektron transferine olanak sağlayan biyoelektrokoagülasyon prosesinin evsel atıksularda uygulanabilirliği ve arıtım verimi üzerine etkisi araştırılacaktır. EC, anodun çözülmesiyle atık su içerisinde metot hidroksit floklarının oluşturmasından ibaret olan bir portresidir. EC, çok küçük kolloidal tanecikleri uzaklaştırabilir ve nispeten daha az çamur üretme, biyolojik olarak bozulmayan organik maddeyi uzaklaştırabilme veya biyolojik arıtma hazır hale getirme, koagülant dozajının kolayca kontrol edebilmesi, hidroksitler şeklinde çökerek veya floklar üzerinde adsobsiyonla ağır metal iyonları uzaklaştırabilme, sürekli pH kontrolü gerektirmeme, iyi dizayn edilmiş sistemlerde % 90 ve üzerinde yüksek verime ulaşılmasına olanak sağlama, 10 dakika gibi konvansiyonel proseslerdeki bekleme süreleri ile karşılaştırıldığında oldukça kısa temas süresi gerektirmesi ve alternatif yöntemler ile karşılaştırıldığında nispeten düşük yatırım maliyeti gerektirme [2], alışılmış koagülasyon-flokülasyon uygulamalarına kıyasla, elektriksel alanın varlığından dolayı en küçük kol parça ulaşabilme gibi avantajlara sahiptir.

Koagülasyon prosesi, kolloidal halde bulunan parçacıkların zıt yüklü iyonlarla karşılıklı etkileşime girmesi ile nötralize edilmesi, topaklanmanın sağlanarak çöktürmenin gerçekleştirilmesi sürecidir. Bu amaçla, uygun kimyasal maddeler ilave edilir. Koagülasyon kolloid partikülleri, net yüzey yükünün azaltılması sonucu elektrostatik itme kuvveti sıkışmasıyla bir araya gelip yeterli Van Der Waals kuvveti

ile tutunup birikmesi ile gerçekleştirilir. Elektrikte zıt yüklerin neden olduğu elektriksel çift tabakanın içme potansiyelinde azalma yüzey yükünün azalmasıyla sağlanır. [4]

Elektrokoagülasyon hücresi tasarımından maksimum verim alınabilmesi için, elektrokoagülasyon hücresinin tasarımı yapılırken aşağıdaki faktörler göz önünden bulundurulmalıdır.

- Elektrotlar arasındaki voltaj azalması en düşük seviyeye getirilmelidir.
- Elektrotların birbirine bakan yüzeylerinde oluşacak hidrojen (H_2) ve oksijen (O2) kabarcıklarının birimi en aza indirilmelidir.
- Elektrotlar arasındaki boşluklardan kütle transferinin engellenmesi en alt seviyeye indirilmelidir.

Elektrokoagülasyon Teknolojisinin avantajları ve dezavantajları Atıksu işlemlerine göre elektrokoagülasyon prosesinin avantajları aşağıda özetlenmektedir;

- İşletilmesinin kolaydır.
- Toksisite içeren atıkların arıtımına olanak sağlamaktadır.
- Renksiz, kokusuz ve berrak sular elde edilmektedir.
- Klasik koagülasyon prosesi ile karşılaştırıldığında daha az çamur oluşumu gözlenmektedir.
- Klasik koagülasyon prosesi ile karşılaştırıldığında daha olgun flok oluşturmaktadır. Filtre edilebilirliği daha iyi olan çamur oluşturmaktadır.
- Klasik koagülasyon prosesi ile karşılaştırıldığında çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı madde içermektedir.
- Elektrokoagülasyon prosesi göre daha düşük çapa sahip ve giderimi zor olan kolloidal parçacıkların etkin giderimine olanak sağlamaktadır.
- pH değerinin sürekli kontrolüne ihtiyaç yoktur.
- Yaklaşık 10 dakika gibi kısa temas süresi gerektirir.
- İyi tasarlanmış sistemlerde %90 civarında yüksek verim elde edilebilir.
- Alternatif teknolojiler ile karşılaştırıldığında ilk yatırım maliyeti görece daha düşüktür.
- Alternatif teknolojiler ile karşılaştırıldığında atıksu birim arıtma maliyeti (işletme maliyeti) görece daha düşüktür.
- Elektrik tüketimi alternatif yöntemlere göre daha düşüktür.

Elektrokoagülasyon prosesi aşağıda listelenen suların arıtımında kullanılmaktadır:

- Yağ ve gres içeren atıksular,
- Tekstil, gıda endüstrisi atıksuları,
- MetalGalvanize sanayi atıksuları ve petrokimya endüstrileri atıksuları,
- Kâğıt ve kâğıt hamuru endüstrisi atıksuları,
- Düzenli depolama sahası sızıntı suları,

Elektrokoagülasyon prosesi katot ve anotta sırasıyla üretilen hidrojen, oksijen kabarcıkları nedeniyle elektro-flotasyonla birlikte gerçekleşmektedir. Elektrokoagülasyon prosesi ve buna bağlı olarak da elektro-flotasyon prosesinin başarısı, kabarcıkların büyüklüğüne ve atıksu ile kabarcıkların birbiriyle tam olarak karışmasına bağlıdır. Küçük kabarcıklar geniş yüzey alanı yaratarak, sıvıda dağılmış partiküllerin yapışmasını, böylece daha iyi ayrılarak elektro-flotasyon prosesinin veriminin artmasını sağlar.

Elektrokoagülasyon prosesinin daha verimli çalışmasını temin etmek, pasivizasyon nedeniyle oluşacak verim kayıplarının önüne geçmek için anot ve katot kutuparının yerinin değiştirilmesi, belirlenen döngü içerisinde bu kutup başlarına verilen akımın elektriksel olarak zıt yüklü olarak uygulması tercih edilmektedir. Elektrot yüzey alanlarının arttırılması elektrokogülasyon veriminin arttırılmasına katkı sağlamaktadır. Zira çözünen yüzey arttıkça oluşan flok ve flok yapıları daha stabil olmaktadır. İki elektrotlu EC prosesleri yerine 4-6 ve daha fazla elektrodun paralel veya seri bağlanmış olması verimin artışına sebep olmaktadır. Elektrokoagülasyon proseslerinde alternatif akımdan ziyade doğru akım güç kaynakları kullanılmaktadır. 1980'li yılların başında alternatif akım kullanan elektrokoagülasyon sistemleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Özellikle maden endüstrisinde oluşan kömür partikülleri ve süspanse killerin kararlılığının kırılmasında alternatif akımlı elektrokoagülasyon sistemleri kullanılmıştır.

Elektrokoagülasyon prosesinde ortam pH değeri, debi, potansiyel fark (V), amper (A), elektrot materyali (demir, alüminyum, titanyum, grafit gibi) ve elektrotlar arası mesafe parametreleri optimize edilir. Bu teknoloji özellikle yağ, metaller ve bakteri içeren atıksuların arıtımında çok etkilidir. Sıcaklık ve basınç gibi değişkenler ise proses üzerinde daha az etkiye sahiptir. Bu etkileri anlamak için yukarıda bahsedilen parametreleri özellikleri belli spesifik bir atıksuya uygulamak gereklidir.

Atıksuların arıtılması ve kullanılabilir hale getirilmesi günümüzün en büyük sorunlarından biridir. Bunun çeşitli yöntemleri olup bununla ilgili olarak incelediğimiz elektrokimyasal olarak atıksu arıtımı son zamanlarda üzerinde yoğun çalışmalar yapılan önemli bir yöntemdir.

Elektrokoagülasyonda demir ve alüminyum iyonları, hidroksitleri ve polihidroksileri oluşturmak üzere hemen reaksiyona girerken, kimyasal koagülasyonda önce $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ve $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ hidrolizi gerekmektedir. Bu, prosesin flok oluşumunu geciktirdiği için, prosesin ilerleyişini etkilemektedir. Ayrıca elektrokoagülasyonda kirleticiler oluşan elektrik alanının etkisiyle daha hızlı hareket ederek koagüle olmaktadırlar [7].

Elektrokoagülasyon çalışmasında, kimyasal koagülasyon çalışmasına göre daha yüksek arıtım verimi elde edilmesine karşılık, oluşan çamur miktarı daha azdır.

Üzerinde durulan prosesin en önemli özelliklerinden birisi ekonomik olmasıdır. Proseste elektrik sarfiyatı en önemli gideri oluşturmaktadır.

Atıksu karakteri incelendiğinde ön plana çıkan parametreler Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOI), Toplam Kjeldahl Azotu (TKN), Amomyak (NH_3), Fosfat (PO_4), Sülfat (SO_4), Toplam Katı Madde (TKM), Uçucu Askıda Katı Madde (UKM), Alkalinite, pH ve renktir.

Temel bir elektrokoagülasyon reaktöründeki hücrelere elektrik potansiyeli uygulandığında anot yüzeyinde oksidasyon , katot yüzeyinde elementeş metallerin indirgenmesi gerçekleşir.

Elektrokoagülasyon hücresinde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşebilir.

- Atıksudaki kirleticilerin katodik indirgenmesi
- Koloidal partiküllerin koagülasyonu
- Çözeltideki iyonların taşınınmı
- Katotta metal iyonlarında gerçekleşen indirgenme

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Atıksu Arıtımının Amacı ve Kapsamı

Atıksu arıtımı, çeşitli kullanımlar sonucu oluşan atıksuların deşarj edildikleri alıcı ortamın fiziksel, kimyasal, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerini değiştirmeyecek hale getirmek için uygulanan fiziksel kimyasal ve biyolojik proseslerin birini ya da birkaçının bir arada kullanımını kapsamaktadır. Atıksu içindeki kirleticilerin uzaklaştırılması amacı ile atıksu karakterine göre birincil, ikincil ve ileri arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Birincil arıtma, atıksudaki yüzen ve çökebilen katı maddelerin uzaklaştırılması işlemlerini kapsayan fiziksel arıtma ünitelerini içerir. İkincil arıtma organik, maddelerin gideriminde kullanılan biyolojik ve veya kimyasal arıtma ünitelerini içerir. İleri arıtma bu işlemlere ilaveten ikincil arıtmada giderilmeyen kirleticilerin uzaklaştırılmasında kullanılan görece daha maliyetli olan arıtma yöntemlerini, prosesleri kapsamaktadır [8]

Ülkemizde atıksuların alıcı ortam üzerindeki etkilerini en aza indirmek amacıyla yasal mevzuat uygulanmaktadır.

Bunlar;

- 1380 Sayılı Su Ürünleri Kanunu,
- Umumi Hıfzıssıhha Kanunu
- Gayrisıhhi Müesseseler Kanunu
- Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY)

2.2 2.2. Biyoelektrokoagülasyon Prosesi ve Uygulamları

Son zamanlarda, elektrokimyasal ve biyolojik arıtmayı birleştiren biyoelektrokimyasal sistemler (BES) teknolojisi arıtma performansının arttırılması amacıyla araştıma konusu olmuş ve yaygınlaşmaktadır [9].

Elektrokoagülasyon (EC), en yaygın olarak kullanılan proseslerden biridir. Demir (Fe^{+3}, Fe^{+2}) ve alüminyum (Al^{+3}) iyonlarıyla birlikte demir veya iyon kaplı elektrotlarda çözündürme işlemi yapılmaktadır. Demir ve alüminyum elektrotları suyla reaksiyona girerek $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitler oluşturur. Bu sistemler tek başına çalışbildiği gibi aynı anda da çalışabilmektedir [10].

Anotta gerçekleşen reaksiyon:

$$2H_2O \rightarrow O_2(g) \uparrow + 4H + + 4e- \quad (2.1)$$

Katotta gerçekleşen reaksiyon:

$$4H^+ + 4e- \rightarrow 2H_2 \quad (2.2)$$

Akyol [11] tarafından boya imalatından kaynaklanan atıksuların elektrokoagülasyon ile arıtımı incelenmiştir. Bu çalışmada elektrot tipi (Al ve Fe), başlangıç pH'sı (2-10), akım yoğunluğu (5-80 A/m^2) ve reaksiyon süresi (0-50 dakika) için optimum arıtım şartları araştırılmıştır. Akım yoğunluğunun 35 A/m^2 , başlangıç pH'sının 6,95 ve reaksiyon süresinin de 15 dakika alındığı optimum deney ortamında KOI ve TOK kirleticilerinin giderim verimleri sırasıyla Fe elektrot için % 93 ve % 88, Al elektrot için % 94 ve % 89 olarak belirlenmiştir. İşletme maliyeti ise Fe elektrot kullanımı için 0,187 €/m^3 Al elektrot kullanımı için ise 0,129 €/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Günümüzde elektrokoagülasyon ile arıtım yöntemi farklı karakterlerdeki atıksuyun arıtımı için kullanılmaya uygundur. Bu konu ile ilgili araştırmalar vardır. Bizim daha çok ilgileneceğimiz bioelektrokoagülasyon ile alakalı çok fazla yapılan araştırma olmamasına rağmen, elektrokoagülasyon ile alakalı yapılan çalışmalar vardır.

Tekstil atıksularının, endüstriyel atıksuların metal gideriminde, boya endüstrisinde, kağıt endüstrisinde elektrokoagülasyon yöntemi kullanım alanı bulmaktadır.

Endüstriyel atıksularda bulunan ağır metallerin elektrokoagülasyon uygulanarak giderimi incelenmiştir. Çalışma sonucunda 4,8 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 20 dakika süren bir çalışmada verimler %98,7 ile %99,9 şeklinde olmuştur [12].

Tekstil atıksularında, iletkenlik ve pH gibi ilgili atık su özelliklerinin ve akım yoğunluğu ve çalışma süresi gibi önemli proses değişkenlerinin kimyasal oksijen ihtiyacı (COD) ve bulanıklık giderme verimlilikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada, elektrot ve her bir elektrot için enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, KOİ giderim verimliliği ve enerji tüketim noktalarında demirin kurban elektrot malzemesi olarak alüminyumdan daha üstün olduğunu göstermektedir [13].

Bazrafshan ve ark. [13] tarafından farklı konsantrasyonlarda hazırlanan sentetik florür çözeltilerinin elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı incelenmiştir. Al ve Fe elektrotlar için giderimin verimlerinin aynı olduğu çalışmada, farklı florür

konsantrasyonlarında en yüksek giderim verimi 40 V ve 60 dak. reaksiyon süresinde elde edilmiştir.

Zaied ve ark. [14] tarafından yapılan kağıt endüstrisinde siyah likörün elektrokoagülasyon ile arıtımı incelenmiştir. Bu çalışmada elektroliz süresi, akım yoğunluğu, elektrot tipi ve başlangıç pH'sı için optimum şartlar belirlenmiştir. Akım yoğunluğunun 14 mA cm^{-2} , başlangıç pH'sının 7 ve elektroliz süresinin de 50 dakika olduğu deney şartlarında % 98 KOİ, % 92 polifenol ve % 99 renk giderimi elde edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde önümüze genelde gelen elektrotlar Al ve Fe elektrotlarıdır yaygın olarak kullanılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesi farklı endüstriyel atıksuların arıtımı için uygun bir prosestir. Elektrokoagülasyon prosesi ile atıksu özelliğine bağlı olarak oksidasyon flotasyon adsorbsiyon gerçekleştirebilir.

Bir kağıt fabrikası atıksularından elektrokoagülasyon yöntemi ile fenol, renk ve KOİ giderimi farklı elektrot kombinasyonları kullanılarak incelenmiştir. pH, sıcaklık ve akım yoğunluğu gibi çalışma şartlarının giderim verimi üzerinde etkisinin belirlendiği çalışmada en yüksek renk giderimi Al-Al, en yüksek KOİ ve fenol giderimi ise Fe-Fe elektrot kombinasyonları ile elde edilmiştir [15].

Evsel atıksular alıcı ortamlara direk deşarj edilemezler çünkü fazla derecede kirlilik yükü içerirler. Son zamanlarda literatürde laboratuvar ölçekli elektrokoagülasyon proseslerinin evsel atıksu arıtımı için kullanıldığı görülmektedir. Evsel atıksuda bulunan mikroorganizma , bulanıklık , AKM , partiküler maddeler, amonyak, fosfor ve organik madde miktarının EK prosesi ile deşarj limitlerine inmesi ile alakalı çalışmalar mevcuttur. Sonuçların geneline bakıldığında ise her bir kirletici için giderim yüzdeleri istenen düzeylerde ve oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Kimyasal koagülasyon ve elektrokoagülasyon arasında, karşılaştırma amacıyla yapılan bir çalışmada farklı pH'larda farklı alüminyum miktarlarında bulanıklık giderimi gerçekleştirilmiştir [16]. Partikül özelliklerini anlamak amacıyla zeta potansiyelleri analiz edilmiştir. Sonuç olarak elektrokoagülasyon kimyasal koagülasyona göre bulanıklık gideriminde çok daha etkili olduğu bulunmuştur.

Bir patent çalışmasında kırsal bölgelerdeki sulardan patojen mikroorganizmaların ve içme sularından ağır metallerin giderimi, gıda sanayi yıkama sularından kirleticilerin bertarafında uygulama potansiyelinden söz edilmiştir. Powell Su Sistemleri şirketi

tarafından elektrokoagülasyon ile kirleticilerin giderilme hızlarının artırılmasında önemli bir adım atılmış, işletme ve ilk yatırım maliyetlerinin çok düşük olduğu ifade edilmiştir. Bu şirket elektrik maliyeti, elektrotların değiştirilme maliyeti, pompa bakım onarımı ve işçilik maliyetinin bazı atıksuların arıtımı için 1$/galon atıksu altında olduğunu belirtmiştir.

Elektrokoagülasyon prosesi; suyun pH'ı, atıksu akış hızı, voltaj, amper, elektrot materyali (demir, alüminyum, titanyum, grafit gibi) ve elektrotlar arası mesafe ile optimize edilir. Bu teknoloji özellikle yağ, metaller ve bakteri içeren atıksuların arıtımında çok etkilidir. Sıcaklık ve basınç gibi değişkenler ise proses üzerinde daha az etkiye sahiptir. Bu etkileri anlamak için yukarıda bahsedilen parametreleri özellikleri belli spesifik bir atıksuya uygulamak gereklidir.

Az ve çok kirli evsel atıksular için yapılan elektrokoagülasyon çalışmasında, elektroliz süresi olarak az kirli evsel atıksuda 8 dk, çok kirli evsel atıksuda ise 15 dk elektroliz süresine ihtiyaç olduğu tespit edilmiştir. Enerji tüketimi 0,4 kWh/m^3 ve 0,2 kWh/m^3 olarak hesaplanmıştır. KOİ ve AKM giderim verimi sırasıyla %60 ve %70'in üzerindedir [17].

Evsel atıksuların arıtımında elektrocoagulasyonun kullanıldığı çalışmada, optimum çalışma koşulları olarak orijinal pH (7,8), 100 A/m^2 ve 10 dk EC süresinde sırasıyla KOİ, bulanıklık ve fosfor giderim verimleri (%72, %98 ve %98) olarak elde edilmiştir. İşletme maliyetleri 10-150 A/m^2 ve 5-40 dakikada atık su arıtımında sırasıyla 0,03 ila 1,67 \$/m^3 ve 0,44 ila 3,85 \$/m^3 arasında değişmiştir [18].

Evsel atıksulardan fosfat gideriminin incelendiği başka bir çalışmada ise, C_i = 52 mg/L PO_4-P'de <0,01 mg/L P konsantrasyonu elde etmek için optimum koşullar, Fe elektrot için pH_i = 4, akım yoğunluğu j = 20 A/m^2 ve EC süresi = 100 dk (q = 954C) iken, Al elektrot için optimum koşullar EC süresi = 50 dakika (q = 372C), pH_i = 4 ve akım yoğunluğu, j = 20 A/m^2 olarak belirlenmiştir [19].

Li ve ark. [20] yılında yaptıkları çalışmada, geleneksel bir batık membran biyoreaktörüne (MBR, Rc) bir çift Fe-C elektrot yerleştirildi ve yeni bir asenkron periyodik ters biyo-elektrokoagülasyon sistemi (Re) geliştirildi. Eşzamanlı nitrifikasyon ve denitrifikasyon (SND) performansı, sınırlı çözünmüş oksijen (DO) altında tartışılmıştır. Sonuçlar, elektrokoagülasyonun toplam nitrojen (TN) giderimini 1,2 mg/L DO'da %59,48'den %75,09'a yükselttiğini ortaya koymuştur.

Qian ve ark. [21] yaptıkları çalışmada, Fe-C elektrotları ile periyodik ters biyo-elektrokoagülasyon sisteminin nitrifikasyon mekanizmasını ortaya koymayı hedeflemişlerdir. Amonyak azotu giderimi, dört özdeş reaktör kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bunlardan ikisi sırasıyla Fe–C elektrotlu (S1) ve C–C elektrotlu (S2) reaktörleri Diğer ikisi sırasıyla demir iyonları (S3) ve geleneksel bir SBR (S4) içeren reaktördü. Sonuçlar, S1'de nitrifikasyonu artırma üzerindeki etkinin dört SBR'nin tümü arasında en iyisi olduğunu, ardından S3, S2 ve S4'ün geldiğini göstermiştir. Demir iyonları biyokütleyi arttırdı ve elektrik alanı proton transferini ve enzim aktivitesini geliştirmiştir. Dört SBR'deki baskın bakteri cinsi *Hyphomicrobium, Thauera, Nitrobacter, Nitrosomonas, Paracoccus ve Hydrogenophaga* idi. Demir iyonları, her ikisi de nitrifikasyon sürecinin ana mikropları olan *Nitrosomonas* ve *Nitrobacter* seviyelerini artırabildiği ifade edilmiştir. Bu çalışma, bir biyo-elektrokoagülasyon sisteminde nitrifikasyonun önemli ve anlamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamıştır.

Al-Othman ve ark. [22] yapıtkları çalışmada, kentsel atık suların sulama suyu olarak kullanılabilirliğini araştırmak için biyolojik arıtıma elektrokoagülasyon yöntemini (Biyo-elektrokoagülasyon (BEC)) entegre ederek etkilerini araştırmıştır. Sistem, sürekli akış modunda çalıştırılan sistemde alüminyum (Al) elektrotların kullanıldığı bir elektrokoagülasyon aşamasından ve ardından sabit bir biyo-filtre (BF) kullanılan bir biyoremediasyon aşaması içermekteydi. 22, 26 ve 30 voltaj değerlerinde, debi 1, 3 ve 5 L/sa aralığında ve başlangıç pH'ı değeri ise 3, 5, 7, 7.4 (orijinal pH) ve 9 aralığında değiştiirlmiştir. Optimum çalışma koşullarını belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yürütülmüştür. BEC için en etkili işletme koşulları, farklı sulama suyu kalitesi (WQ) göstergeleri için incelenmiştir. pH 7,4 ve 26 V'un 1 L/sa akış hızında kirleticilerin maksimum giderim verimini sağladığı tespit edilmiştir. Biyoelektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak sulama amaçlı MWW arıtmanın genel işletme maliyeti 0,76 $\$m^{-3}$ olarak hesaplanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Atıksu Özellikleri

Bursa Atıksu Projesi kapsamında inşa edilmiş olan Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisi, Bursa Büyükşehir Belediyesi sınırları içerisinde Küçükbalıklı mevkiinde bulunmaktadır. Tesis Bursa'nın Doğu Havzası evsel atıksularının arıtılarak alıcı ortamın kirletilmesinin önlenmesi amacını taşımaktadır. Tesisin 1.550.000 E.N'a hizmet vermektedir. Bursa Doğu Atıksu Arıtma Tesisi giriş suyuna ait karakterizasyon Çizilge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Atıksu karakterizasyonu

Parametre	Birim	En Düşük	En fazla	Ort.	Std. Sapma
pH	-	8,77	9,10	8,97	0,1
İletkenlik	mS/cm	1450	1490	1470	8
Kimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	493	573	533	42
Biyolojik Oksijen İhtiyacı	mg/L	217	327	267	50
Askıda Katı Madde	mg/L	214	329	266	12
Toplam Fosfor	mg/L	10,65	11,35	11	0,35
Toplam Azot	mg/L	58	68	63	5
Renk	Pt-Co	237	1362	800	184
Amonyum Azotu	µg/L	40	49	45	4
Sıcaklık		10	25	19	3,01

Çizelge 3.1 incelendiğinde, atıksuyun renkli, alkali ve katı madde içerdiği yüksek iletkenlik içerdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, göreceli olarak kimyasal oksijen ihtiyacının ve, biyolojik oksijen ihtiyacının yüksek olduğu, ve azot içerdiği görülmektedir. Çizelge 3.2 çıkış arıtılmış atıksu değerleri ve giderim değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Arıtılmış atıksuyun karakterizasyonu

Parametre	Birim	Çıkış Değeri
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ)	mg/l	25
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/l	125
Toplam Azot (TN)	mg/L	10
Askıda Katı Madde (AKM)	mg/L	35
Toplam Fosfor (TP)	mg/L	3

3.2 Deney Düzeneği Kurulumu ve İşletilmesi

Deney düzeneği olarak 1 L'lik cam beher kullanılmıştır.Bursa Doğu Atıksu Arıtma tesisi geri devir hattından alınan çamur, ardışık kesikli olarak işletilen proseste aşı olarak kullanılmıştır. 200 mL geri devir çamuru üzerine 500 mL atıksu beslenmiş ve sistem 24 saat döngü (22 saat havalandırma ve 2 saat çöktürme) oluşturulacak şekilde ardışık kesikli olarak çalıştırılmıştır. Bu reaktör kontorl reaktörü olarak kullanılmıştır.

Kontrol reaktöründen farklı olmak üzere Fe-Fe, Fe-Al, Al-Al ve Al-Fe elektrot çiftleri kullanılarak sistem biyoelektrokoagülasyon prosesine dönüştürülmüştür. 10 cm genişlik, 20 cm boyunda, 1 cm kalınlığında elektrot kullanılmış ve 1 cm boşluk bırakılmıştır. Deneyler 0,025 A / 0,050 A / 0,075 A değişen akım yoğunluklarında yürütülmüştür. Deneysel çalışmalar sırasında pH ve iletkenlik izlenmiştir.



Şekil 3.1 : Deneysel düzeneğin görüntüsü

Deneysel çalışmalar oda sıcaklığında 25 ±3 ^{0}C laboratuvar ölçekli reaktörler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kontrol reatkörü ve bioelektrokoagülasyon prosesleri için hava ihtiyacı akvaryum tipi hava motoru (ACO-5502 Kodlu JUN Marka) ile hava taşı kullanılarak sağlanmıştır. İstenen akım UDP1306C DC güç kaynağı ile sağlanmıştır. Deneysel düzeneğin görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.

3.3 Analiz Metotları

Deneysel çalışmalarda kimyasal oksijen ihtiyacı, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, toplam azot ve renk parametresi izlenmiştir. Analizler standart metodlar kullanılarak [23], Çevre Şehirlik ve İklim Değişikliği Bakanlığından yetkili, TÜRKAK tarafından akredite edilmiş BUSKİ Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü Atıksu Laboratuvarları'nda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3 : Parametre ve uygulanan metot

Parametre	**Metot**
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	Standart Metot SM 5220 B
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı	Standart Metot 5210 B
Toplam Azot (TN)	Standart Method 4500 N
Renk	Standart Metot 2120 C

4. DENEYSEL BULGULAR

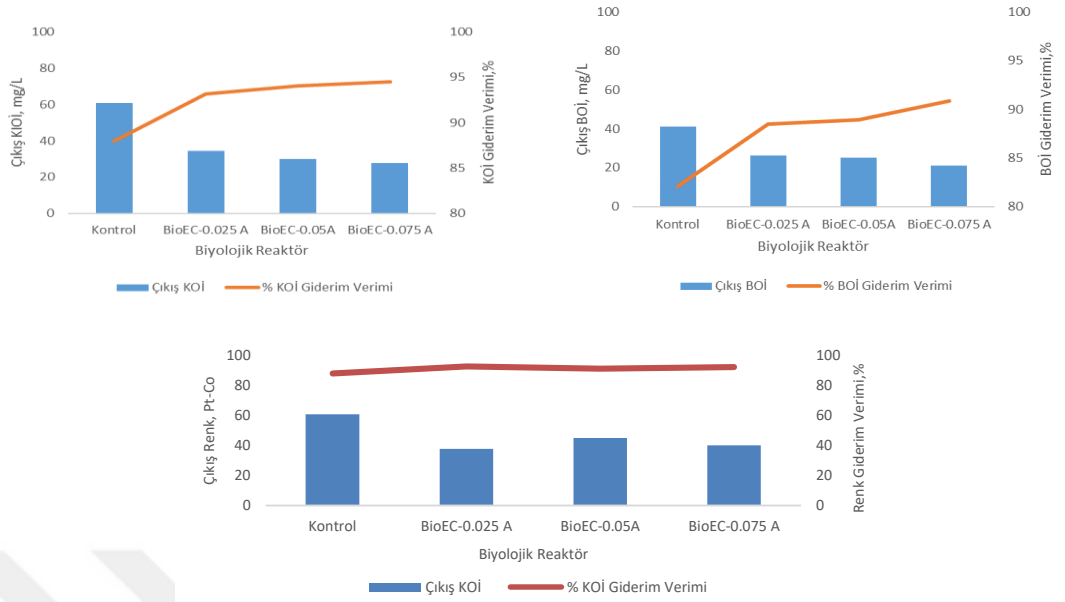
Elektrokoagülasyon proseslerinde elektrot materyali, arıtım verimi üzerine etki eden en önemli faktörlerdendir. Su ve atıksu arıtımında insan ve çevre sağlığı açısından zararlı özellik taşımayan, kolay ulaşılabilir, uygulanabilir ve ucuz materyal tercih edilmesi gerektiği literatür çalışmalarında ortaya konulmuştur (Daneshvar ve ark. 2007, Zaied M ve Bellakhal N, 2009). Bu tez çalışması kapsamında, kontrol reaktörü ve Fe ve Al elektrotlar kullanılarak oluşturulan biyoelektrokoagülasyon prosesinin performansının izlenmesi için yürütülen çalışmalar üç terkarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1'de anot ve katotta alüminyum elektrot kullanılması durumunda farklı akım değerlerinde biyoelektrokoagülasyon prosesinin perfomansının belirlenmesi için yürütülen çalışmalara ait analiz sonuçarı verilmiştir. Elektrokoagülasyon proseslerinde uygulanan akım ve elektroliz süresine bağlı olarak çözünen elektrot miktarı değişkenlik göstrmektedir. Artan elektroliz sürelerinde ve akım değerlerinde faraday yasası uyarınca reaktöre geçen elektrokimyasal olarak oluşturulmuş koagülant madde miktarı artmaktadır. Tüm parametreler için en yüksek verimler en fazla akımın uygulandığı 0,075 A değerinde elde edilmiştir. Yine tüm parametreler için kontrol reaktörü ile karşılaştırıldığında biyoelektrokoagülasyon prosesine dönüş ile arıtma veriminde artış olduğu ifade edilebilmektedir.

Çizelge 4.1 incelendiğinde Al-Al elektrot çifti kullanıldığında kimyasal oksijen ihtiyacı için kontrol reaktöründe % 87,99 olan giderim verimi, 0,025 A uygulandığında % 93,16, 0,05 A akım uygulandığında %94,08 ve 0,075 A akım uygulandığında ise %94,47 olarak hesaplanmıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacı açısından ele alındığında akım değeri arttırıldıkça artış gözlenmiş olmasına rağmen artan akım değerlerinde bu değişim sınırlı kalmıştır. Bu karşılık Biyolojik oksijen ihtiyacı açısından bakıldığında 0,05 A akım uygulandığında giderim verimindeki artış % 82,10'dan %88,50 olmuştur. Bu durum kimyasal oksijen ihtacındaki artış ile karşılaştırıldığında artış hızı daha fazladır. Şekil 4.1'de değişim grafiksel olarkak verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Al^{+}-Al^{-})

Parametre	Birim	Giriş ORTALAMA	Kontrol Reaktörü					Biyoelektrokoagülasyon Prosesi														
								0,025 A					0,050 A					0,075 A				
			DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	505	60	65	57	60,67	87,99	34,6	32,8	36,2	34,53	93,16	31,7	28,4	29,6	29,90	94,08	27,4	24,2	32,2	27,93	94,47
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)	mg/L	229	43	42	38	41,00	82,10	25	26	28	26,33	88,50	25	21	30	25,33	88,94	20	21	22	21,00	90,83
Toplam Azot (TN)	mg/L	62	46	44	47	45,67	26,34	44,2	39,5	49,56	44,42	28,35	39,11	37,56	47,2	41,29	33,40	38,2	37,8	41,2	39,07	36,99
Renk	Pt-Co	147	135	134	130	133	9,52	115	118	120	118	19,95	110	114	112	112	23,81	85	96	87	89	39,23



Şekil 4.1 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Al^{+}-Al^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk

Biyoelektrokoagülasyon prosesi KOİ ve BOİ yani organik madde giderimi açısından önemli derecede iyileşmeye neden olsa da toplam azot ve renk üzerinde sınırlı giderim etkisi göstermiştir. Azotun biyolojik olarak giderimi için ardışık anoksik ve oksik zonların oluşturulması ve elektron alıcıların düzenlenmesi ile mümkün olmaktadır. Renk açından azota benzer olarak giderim veriminde elektrokoagülasyonla oluşturulan koagülantın verimde artışa neden olması beklenirken artış sınırlı kalmıştır.

Çizelge 4.2'de anot ve katotta demir elektrot kullanılması durumunda farklı akım değerlerinde biyoelektrokoagülasyon prosesinin perfomansının belirlenmesi için yürütülen çalışmalara ait analiz sonuçarı verilmiştir. Artan elektroliz sürelerinde ve akım değerlerinde faraday yasası uyarınca reaktöre geçen elektrokimyasal olarak oluşturulmuş pH değerine bağlı olarak monomerik ve polimerik demir içerikli koagülant madde miktarı artmaktadır. Tüm parametreler için en yüksek verimler en fazla akımın uygulandığı 0,075 A değerinde elde edilmiştir. Yine tüm parametreler için kontrol reaktörü ile karşılaştırıldığında biyoelektrokoagülasyon prosesine dönüş ile arıtma veriminde artış olduğu ifade edilebilmektedir.

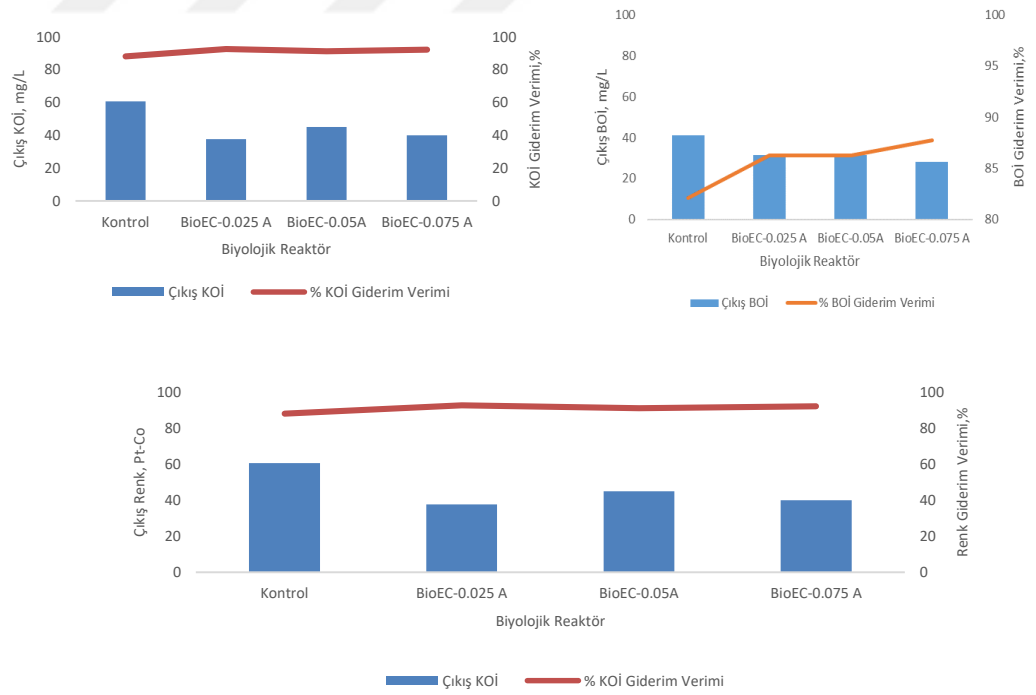
Çizelge 4.2 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Fe^{+}-Fe^{-})

Parametre	Birim	Giriş ORTALAMA	Kontrol Reaktörü					Biyoelektrokoagülasyon Prosesi														
								0,025 A					0,050 A					0,075 A				
			DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	505	60	65	57	60,67	87,99	53,1	5,7	54,3	37,70	92,53	44,7	43,2	47,2	45,03	91,08	42,5	38,9	38,5	39,97	92,09
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)	mg/L	229	43	42	38	41	82,10	30,785	31,22	32,2	31,40	86,29	34,2	30,2	30,2	31,53	86,23	28	27	29	28	87,77
Toplam Azot (TN)	mg/L	62	46	44	47	45,67	26,34	45,05	42,14	46,14	44,44	28,32	43,7	40,02	42,2	41,97	32,30	42,3	39,64	38,56	40,17	35,22
Renk	Pt-Co	147	135	134	130	133	9,52	124	128	132	128	12,93	121	119	117	119	19,05	105	112	106	108	26,76

Çizelge 4.2 incelendiğinde Fe-Fe elektrot çifti kullanıldığında kimyasal oksijen ihtiyacı için kontrol reaktöründe % 87,99 olan giderim verimi, 0,025 A uygulandığında % 92,53, 0,05 A akım uygulandığında beklenenin aksine düşüşle % 91,08 ve 0,075 A akım uygulandığında ise 0,025 A uygulanması durumuna göre dahaz az ancak 0,05 A uygulanmasına göre daha fazla olacak şekilde % 92,09 olarak hesaplanmıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacı açısından ele alındığında akım değeri arttırıldıkça giderim veriminde Al-Al ile karşılaştırıldığında liner bir artış gözlenmemiştir.

Biyolojik oksijen ihtiyacı açısından bakıldığında 0,05 A akım uygulandığında giderim verimindeki artış % 82,10'dan %88,50 olmuştur. Şekil 4.2'de demir elektrot çifti kullanılarak oluşturulan biyoloelektrokoagülasyon prosesinde peformans değişimi grafiksel olarkak verilmiştir.

Elektroliz süresi ve uygulanan akıma bağlı olarak işletme maliyeti artış göstermektedir. Demir elektrot çiftlerinde akım miktarı %100 ve %200 arttırıldığında beklenen arıtma verimi gözlenmediğinden daha ekonomik çözümler için 0,025 A de çalışmak daha uygulanabilir olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.2 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Fe^{+}-Fe^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk

Biyoelektrokoagülasyon prosesinde Al-Al elektrot çiftine benzer şekilde KOİ ve BOİ yani organik madde giderimi açısından önemli derecede iyileşmeye neden olsa da toplam azot ve renk üzerinde sınırlı giderim etkisi göstermiştir. Azotun biyolojik olarak giderimi için ardışık anoksik ve oksik zonların oluşturulması ve elektron alıcıların düzenlenmesi ile mümkün olmaktadır. Renk açından azota benzer olarak giderim veriminde elektrokoagülasyonla oluşturulan koagülantın verimde artışa neden olması beklenirken artış sınırlı kalmıştır. Bununla birlikte özellikle renk açısından bakıldığında çözünen demir elektrotların artan akım miktarları ile sarımtrak renk verdiği bu nedenle Al-Al elektrot çiftleri ile karşılaştırıldığında daha az renk giderimi elde edildiği gözlenmiştir.

Çizelge 4.3'te anotta alüminyum (Al) ve katotta demir (Fe) elektrot kullanılması durumunda farklı akım miktarlarında biyoelektrokoagülasyon prosesinin perfomansının belirlenmesi için yürütülen çalışmalara ait analiz sonuçarı verilmiştir.

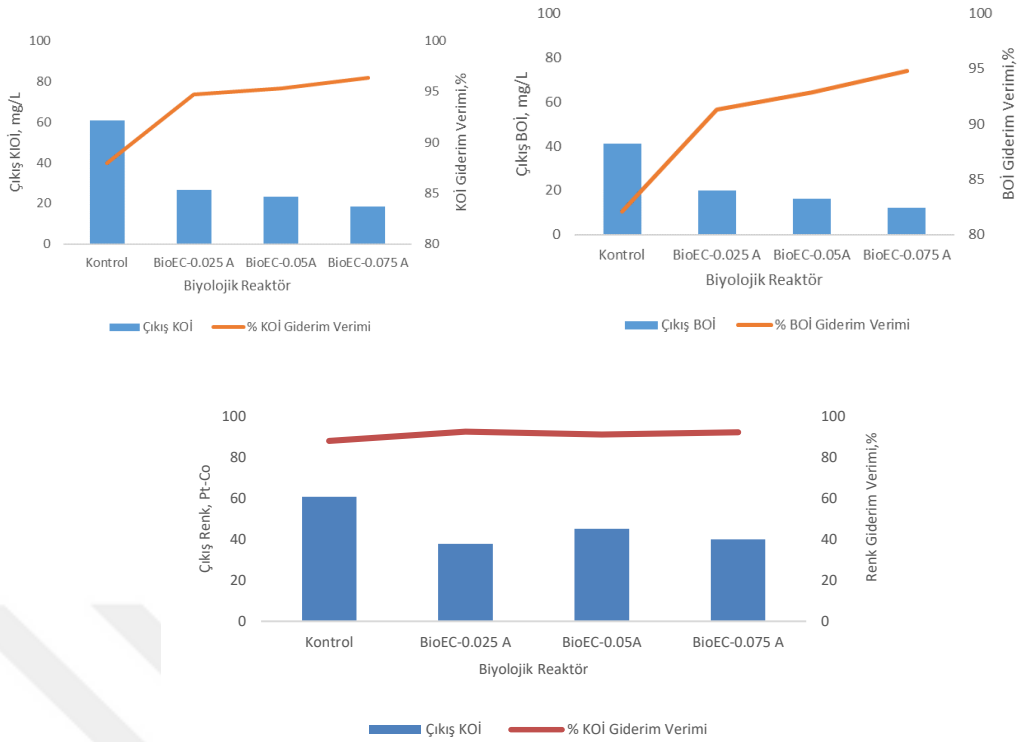
Alüminyum ve demir elektrot çiftleri yerine anotta ve katotta farklı elektrot materyallerinin kullanının etkisi de bu tez kapsamında incellenmiştir. Teorik olarak sadece anodun çözünmesi beklenen biyoelektrokoagülasyon prosesinde katotunda bir miktar çözündüğü hibrit elektrot uygulamalarından anlaşılmaktadır. Zira, Kimyasal oksijen ihtiyacı açısından anotta Al ve katotta demir elektrot kullanılması durumunda Al-Al çiftine nazaran tüm akım değerlerinde artış gözlenmiştir. 0,025 A uygulandığında Al-Al elektrot çiftinde % 93,16 olan KOİ giderim verimi Al-Fe çiftinde % 94,69'a, 0,050 A uygulandığında ise % 94,08'den % 95,35'e ve 0,075 A uygulandığında ise % 94,47'den %96,36 değerine artış göstermiştir. Bu durum Al-Al elekrot çifti yerine daha iyi verim için Al-Fe elektrot çiftinin kullanımını avantajlı kılmaktadır.

Biyolojik oksijen ihtiyacı için de benzer durum geçerlidir. 0,050 A için Al-Al elektrot çiftinde % 88,94 olan verim % 92,87 ve 0,075 A uygulandığında % 90,83 olan verim %94,76 değerine yükselmiştir.

Uygulanan akım arttıkça tüm parametreler için anlamlı bir şekilde giderim verimleri artmış ve çıkış suyunda gözlenen kirletici konsantrasyonları azalmıştır. Anotta alüminyum ve katotta demir elektrot kullanılması durumunda biyoelektrokoagülasyon prosesindeki performans değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Al^{+}-Fe^{-})

Parametre	Birim	Giriş ORTALAMA	Kontrol Reaktörü					Biyoelektrokoagülasyon Prosesi														
								0,025 A					0,050 A					0,075 A				
			DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	505	60	65	57	60,6	87,99	25,1	26,8	28,5	26,80	94,69	24,5	23,7	22,2	23,47	95,35	19,4	18,3	17,4	18,37	96,36
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)	mg/L	229	43	42	38	41	82,10	19	20	21	20,00	91,27	16	17	16	16,33	92,87	11	13	12	12,00	94,76
Toplam Azot (TN)	mg/L	62	46	44	47	45,6	26,34	43,5	42,2	44,56	43,42	29,97	41,22	41,2	41,88	41,43	33,17	40,67	38,65	40,29	39,87	35,69
Renk	Pt-Co	147	135	134	130	133	9,52	117	115	112	115	22,00	109	105	107	107	27,21	98	94	97	96	34,47



Şekil 4.3 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Al^{+}-Fe^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk

Biyoelektrokoagülasyon prosesi KOİ ve BOİ yani organik madde giderimi açısından önemli derecede iyileşmeye neden olsa da Al-Al elektrot çiftine benzer şekilde toplam azot ve renk üzerinde sınırlı giderim etkisi göstermiştir. Azotun biyolojik olarak giderimi için ardışık anoksik ve oksik zonların oluşturulması ve elektron alıcıların düzenlenmesi ile mümkün olmaktadır. Renk açından azota benzer olarak giderim veriminde elektrokoagülasyonla oluşturulan koagülantın verimde artışa neden olması beklenirken artış sınırlı kalmıştır. Bununla birlikte, Al-Al elektrot çiftinin hem azot hem de renk için Al-Fe elektrot çiftine göre görece daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal oksijen ihtiyacı ve biyolojik oksijen ihtiyacı parametreleri için meydana gelen olumlu iyileşme renk ve azot için gerçekleşmemiştir.

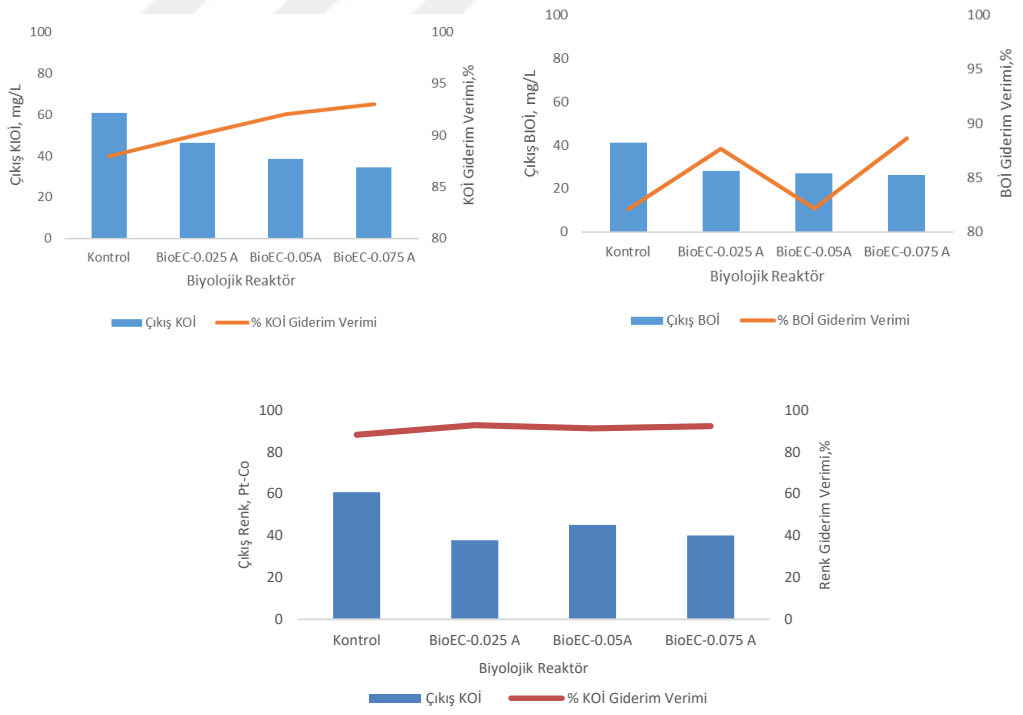
Çizelge 4.4'te anotta Demir (Fe) ve katotta Alüminyum (Al) elektrot kullanılması durumunda farklı akım miktarlarında biyoelektrokoagülasyon prosesinin perfomansının belirlenmesi için yürütülen çalışmalara ait analiz sonuçarı verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Biyoelektrokoagülasyon proesesi deney sonuçları (Fe^{+}-Al^{-})

Parametre	Birim	Giriş ORTALAMA	Kontrol Reaktörü					Biyoelektrokoagülasyon Prosesi														
								0,025 A					0,050 A					0,075 A				
			DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)	DNY-T1	DNY-T2	DNY-T3	Ort.	Ort. Verim (%)
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	505	60	65	57	60,67	87,99	45,1	46,4	47,8	46,43	90,8	38,30	37,20	39,60	38,37	92,4	34,80	33,10	35,40	34,43	93,2
Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)	mg/L	229	43	42	38	41	82,10	29	30	26	28,13	87,7	28	29	25	26,91	88,2	27	28	24	26,20	88,6
Toplam Azot (TN)	mg/L	62	46	44	47	45,67	26,34	44,75	42,28	43,27	43,43	29,9	43,05	41,05	42,14	42,08	32,1	40,50	40,20	40,14	40,28	35,0
Renk	Pt-Co	147	135	134	130	133	9,52	122	126	126	125	15,3	116	120	112	116	21,2	102	108	106	105	28,5

Kimyasal oksijen ihtiyacı açısından anotta demir ve katotta alüminyum elektrot kullanılması durumunda Fe-Fe çiftine nazaran tüm akım değerlerinde görece az da olsa artış gözlenmiştir. 0,025 A uygulandığında Fe-Fe elektrot çiftinde % 92,53 olan KOİ giderim verimi Fe-Al çiftinde % 90,08'e düşüş gösterirken, 0,050 A uygulandığında ise % 91,08'den % 92,4'e ve 0,075 A uygulandığında ise % 92,09'dan % 93,02 değerine artış göstermiştir. Bu durum anot olarak demir kullanımının görece alüminyum kullanımına nazaran daha az verimli olduğunu, bununla birlikte demir elektrot çifti yerine anotta demir katotta alüminyum olmasının verimi az da olsa arttırdığını ortaya koymuştur. Biyolojik oksijen ihtiyacı için de benzer durum geçerlidir. Azot ve renk parametreleri için de tüm çalışma boyunca olduğu gibi sınırlı giderim gözlemlenmiştir.

Uygulanan akım arttıkça tüm parametreler için anlamlı bir şekilde giderim verimleri artmış ve çıkış suyunda gözlenen kirletici konsantrasyonları azalmıştır. Anotta demir ve katotta alüminyum elektrot kullanılması durumunda biyoelektrokoagülasyon prosesindeki performans değişimi Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : Uygulanan akımın biyoelektrokoagülasyon prosesi (Fe^{+}-Al^{-}) üzerine etkisi a) KOİ, b) BOİ ve c) renk

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Galvanik bir hücrede biyokütle varlığında kontrollü elektrik akımının uygulanan biyolektrokoagülasyon prosesinde işlem sırasında bir tarafta anodik, diğer tarafta ise katodik reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu proses elektrokimyasal temeller üzerine kurulu bir arıtma yöntemidir. Çözünen elektrotların elektrolitik oksidasyonu sonucunda üretilen alüminyum ve demir iyonları, biyolojik degradasyona paralel olarak partiküllerin yükünü nötr yaparak koagülasyon işleminin başlamasını ve devamlılığını sağlamaktadır. Elektrotlardan çözünen bu iyonların oluşturduğu metal hidroksit flokları, çökerek prosesten ayrılmaktadır. Oluşan metal floklarının yapısı pH ile kontrol edilmektedir. Bu çalışma özelinde evsel atıksu ile çalışıldığından pH kontrollü olarak çalışmak yerine atıksuyun ham pH değeri değiştirilmeden arıtma boyunca izlenmesi sağlanmıştır.

Biyoelektrokoagülasyon prosesinde oluşan elektriksel alan veya anot ve katot reaksiyonları sonucunda oluşacak olan elektrokimyasal çözünmüş iyonlar biyolojik parçalanmaya ilave arıtıma katkı sağlamaktadır.

Kontrol reaktörü ve paralel işletilen anotta ve katotta sırasıyla (Al-Al, Fe-Fe, Al-Fe ve Fe-Al) elektrot çiftlerinin kullanılmasıyla oluşturulan biyoelektrokoagülasyon çalışmaları sonucunda,

- En yüksek verimin anotta alüminyum, katotta demir elektrot kullanılması durumda elde edildiği,
- Akım değeri arttırıldıkça arıtma veriminin genel olarak artış gösterdiği, bununla birlikte artışın elektrot çifti özelinde değerlendirilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Akım değeri artışının oluşturduğu maliyet ve elde edilen verim artışı dikkate alınarak seçim yapılması gerekmektedir.
- Organik madde giderimine katkı sağladığı çıkış suyu kalitesini hem KOİ hem de BOİ olarak >%90 ile garanti altına aldığı, buna karşılık azot ve renk gideriminde sınırlı giderim verimi artışına neden olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma özelinde, tam karışımlı kesikli biyolojik reaktör kontrol reaktörü olarak kullanılmıştır. Demir ve alüminyum elektrotlarla biyoelektrokoagülasyon prosesine dönüştürülen sistemde elektrot türü ve akım miktarındaki artışın etkisi incelenmiştir. Elde edilen umut verici sonuçlar dikkate alındığında biyolojik reaktöre ait proses

değişkenlerinin araştırma konusu yapılması gerektiği, daha ekonomik çözümlerin özellikle kısmi endüstriyel atıksuların karıştığı kentsel atıksu arıtma tesisi atıksularının arıtımında biyolojik ve kimaysal proseslerin entegre edildiği biyoelketrokoagülasyon prosesi ile elde edilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Yilmaz, Z., KARAGÖZOĞLU, M.B. (2019). Atıksuların Arıtılmasında Elektrokoagülasyon Uygulamaları. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(1), 319-334.

[2] Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. Current opinion in electrochemistry, 22, 154-169.

[3] Tunaz, A.T. (2021). Görüntü İşleme ve Klasik Yöntem İleŞami ve Halep Keçilerinde Canlı Ağırlık Tahminlenmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 8(4), 913-927.

[4] EckenfelderJr., W.W. (1989) IndustrialWaterPollution Control, Singapore. McGraw-Hill, Singapore.

[5] Mollah, M.Y., Pathak, S.R., Patil, P.K., Vayuvegula, M., Agrawal, T.S., Gomes, J.A.G, Kesmez, M., Cocke, D.L. (2004). Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. Journal of hazardous materials, 109(1-3), 165-171.

[6] Ertugay, N. Acar, F.N. (2013). Sonokatalitik Oksidasyon ile Direct Blue 71 Azo Boyasının Renk Giderimi. Journal of the Institute of Scienceand Technology, 3 (1), 55-60.

[7] Liu, Y., Zhang, X., Jiang, W., Wu, M., Li, Z. (2021). Comprehensive review of floc growth and structure using electrocoagulation: Characterization, measurement, and influencing factors. Chemical Engineering Journal, 417, 129310.

[8] Al-Qodah, Z., Al-Qudah, Y., Omar, W. (2019). On the performance of electrocoagulation-assisted biological treatment processes: a review on the state of the art. Environmental Science and Pollution Research, 26(28), 28689-28713.

[9] Li, L., Dong, Y., Qian, G., Hu, X., Ye, L. (2018). Performance and microbial community analysis of bio-electrocoagulation on simultaneous nitrification and denitrification in submerged membrane bioreactor at limited dissolved oxygen. Bioresource technology, 258, 168-176.

[9] Wang, S., Liu, P., Chen, D., Yin, L., Li, H., &Deng, X. (2015). Siliconenhanced salttolerancebyimprovingtherootwateruptakeanddecreasingtheiontoxicity in cucumber. Frontiers in plantscience, 6, 759.

[10] İlhan, F. (2007). Elektrokimyasal Arıtım ve Uygulamaları: Katı Atık Sızıntı Suyu Çalışması. (Türkay 2007) AB Sürecinde Türkiye'de Kati Atik Yönetimi ve Çevre Sorunlari Sempozyumu, 4,5.

[11] Akyol, A. (2012). Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. Desalination, 285, 91-99.

[12] Mavrov, V., Stamenov, S., Todorova, E., Chmiel, H., Erwe, T. (2006). New hybrid electrocoagulation membrane process for removing selenium from industrial wastewater. Desalination, 201(1-3), 290-296.

[13] Bazrafshan, E., Ownagh, K. A., Mahvi, A. H. (2012). Application of electrocoagulation process using iron and aluminum electrodes for fluoride removal from aqueous environment. E-Journal of Chemistry, 9(4), 2297-2308.

[14] Zaied, M., Bellakhal, N. (2009). Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. Journal of hazardous materials, 163(2-3), 995-1000.

[15] Katal, R., Pahlavanzadeh, H. (2011). Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. Desalination, 265(1-3), 199-205.

[16] Han, M., Song, J., Kwon, A. (2002). Preliminary investigation of electrocoagulation as a substitute for chemical coagulation. Water Science and Technology: Water Supply, 2(5-6), 73-76.

[17] Kurt, U., Gonullu, M. T., Ilhan, F., Varinca, K. (2008). Treatment of domestic wastewater by electrocoagulation in a cell with Fe–Fe electrodes. Environmental Engineering Science, 25(2), 153-162.

[18] Ozyonar, F., Karagozoglu, B. (2011). Operating cost analysis and treatment of domestic wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. Polish Journal of Environmental Studies, 20(1), 173.

[19] Omwene, P. I., Kobya, M. (2018). Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes: a comparative study. Process Safety and Environmental Protection, 116, 34-51.

[20] Li, L., Dong, Y., Qian, G., Hu, X., & Ye, L. (2018). Performance and microbial community analysis of bio-electrocoagulation on simultaneous nitrification and denitrification in submerged membrane bioreactor at limited dissolved oxygen. Bioresource technology, 258, 168-176.

[21] Qian, G., Hu, X., Li, L., Ye, L., & Lv, W. (2017). Effect of iron ions and electric field on nitrification process in the periodic reversal bio-electrocoagulation system. Bioresource technology, 244, 382-390.

[22] Al-Othman, A. A., Kaur, P., Imteaz, M. A., Ibrahim, M. E. H., Sillanpää, M., & Kamal, M. A. M. (2022). Modified bio-electrocoagulation system to treat the municipal wastewater for irrigation purposes. Chemosphere, 307, 135746.

[23] APHA, (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. United Book Press, USA,.

6. ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **: Rıdvan DİNÇER**

Doğum Tarihi ve Yeri **:**

E-posta **:**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2013, Celal Bayar Üniversitesi , Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Rasih Çelik Tekstil Proses Sorumlusu 2013/2014
- Bursa Su Kanalizasyon İdaresi, Atıksu Laboratuvarı 2015/ (devam ediyor)
- Analizler Sorumluluğu
- Tehlikeli Atık Sorumluluğu
- Kalibrasyon Birim Sorumluluğu
- Numune Alma Sorumluğu Yetki Belgesi
- TÜRKAK Akreditasyon ve Çevre Bakanlığı Laboratuvar Yeterlilik süreçlerinde tam yetkili Personel
- Metot Geçerli Kılma ve Ölçüm Belirsizliği konusunda uzmanlık
- Yalın Yönetim/ KAIZEN ekip lideri