



**LİKİT GAZ DOLUM ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ
ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE
ARITILMASI**

Sami AKBIYIK

Dr. Öğr. Üyesi Fatma EKMEKYAPAR TORUN
Yüksek Lisans Tezi
Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2022

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**LİKİT GAZ DOLUM ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON
YÖNTEMİ İLE ARITILMASI**

(Treatment of Liquid Gas Filling Industry Wastewater by Electrocoagulation Method)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sami AKBIYIK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Erzurum
Eylül, 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Sami AKBIYIK tarafından hazırlanan “Likit Gaz Dolum Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagölasyon Yöntemi İle Arıtılması” başlıklı çalışması 01/09/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Teknolojisi Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Alper Erdem YILMAZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Dr. Öğr. Üyesi Fatma EKMEKYAPAR TORUN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Sinan KUL <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim YönetmeliĐi’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk BuĐrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu’ndaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Dr. Öğr. Üyesi Fatma EKMEKYAPAR TORUN danışmanlığında sunulan “Likit Gaz Dolum Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon Yöntemi İle Arıtılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	1	30
Kuramsal Temeller	13	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Bulgular	2	20
Tartışma	2	20
Tezin Geneli	16	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)

Sami AKBIYIK

1.9.2022

İmza: Aslı ıslak imzalıdır

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Fatma EKMEKYAPAR
TORUN

1.9.2022

İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Yüksek Lisans öğrenimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, değerli fikirlerini paylaşan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatma EKMEKYAPAR TORUN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi birikimime çok şey katan, karşılaştığım tüm zorluklarda yanımda olup beni yüreklendiren, değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Alper Erdem YILMAZ'a, Sayın Doç. Dr. Şahset İRDEMEZ'e ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sinan KUL'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, dualarını her daim hissettiğim annem Sayın Meryem AKBIYIK'a ve babam Sayın Ali AKBIYIK'a, ablam Sayın Tuğba AKBIYIK'a ve arkadaşım Sayın Elifnur MERAL'e teşekkürü borç bilirim.



Sami AKBIYIK
Eylül 2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

LİKİT GAZ DOLUM ENDÜSTRİSİ ATIKSULARININ ELEKTROKOAGÜLASYON YÖNTEMİ İLE ARITILMASI

Sami AKBIYIK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Amaç: Erzurum ili Aziziye ilçesinde tüp demirbaşı üretimi ve dolumu gerçekleştirilen Ergaz San. ve Tic. A. Ş.'nden alınan boyalı atıksuların laboratuvar ortamında pH, iletkenlik, akım ve potansiyel fark gibi parametrelerin göz önünde bulundurularak elektrokoagülasyon yöntemiyle arıtılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Elektrokoagülasyon, demir ve alüminyum gibi yumaklaştırıcı ve çözünebilen metal elektrotlar yardımıyla elektrokimyasal olarak atıksuyun arıtıldığı bir mekanizmadır. Bu arıtım süreci ve kimyasal koagülasyonu birbirinden ayıran en büyük özellik alüminyum parça ya da demir parçanın mekanizmaya eklenme biçimidir. Elektrokoagülasyon işlemlerinde arıtım için atıksuya reaktör içerisindeki elektrotlar yardımı ile elektrik akımı verilmektedir. Elektrokoagülasyon yöntemi ile yapılan denemelerde, reaktöre 5'er mm'lik aralıklarla alüminyum plakalar yerleştirilerek elektrik verilmiş ve numunelerdeki giderim verimleri gözlemlenmiştir.

Bulgular: Bu çalışmada doğal pH kontrolü sonrasında farklı pH değerlerinde arıtım verimleri gözlemlenerek optimum pH belirlenmiştir. İşlemler sırasında sıcaklık, iletkenlik ve potansiyel fark değişimleri gözlemlenmiştir. Akım yoğunlukları da deneylerde değiştirilerek farklı pH ve akımlarda giderim verimleri incelenmiş olup daha sonra sisteme destek elektrolit katkısı yapılmıştır. Destek elektrolit olarak sisteme NaCl eklenmiştir. Bu şartlar altında deney verimleri gözlemlenerek karşılaştırılmıştır.

Sonuç: Erzurum ili Aziziye ilçesinde Ergaz San. ve Tic. A. Ş.'nden alınan su örneklerinin elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılması işlemlerinde, 100 mM NaCl varlığında, doğal pH ve 12.5 mA/cm²'lik optimum şartlarda yapılan 1 saatlik deney sonucunda %81.85'lik bir giderim verimi elde edilmiştir. Elde edilen veriler, arıtımın literatüre uyum sağladığını ve atıksuyun elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokoagülasyon, Elektrokimyasal arıtım, Tüp boyası atıksuyu

Eylül 2022, 69 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

TREATMENT OF LIQUID GAS FILLING INDUSTRY WASTEWATER BY ELECTROCOAGULATION METHOD

Sami AKBIYIK

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fatma EKMEKYAPAR TORUN

Purpose: It is aimed to treat dyed wastewater taken from Ergaz Industry and Trade Joint Stock Company, where tube fixtures are produced and filled in Aziziye district of Erzurum province, using electrocoagulation method in the laboratory by considering parameters such as pH, conductivity, current and potential difference.

Method: It is a mechanism in which wastewater is treated electrochemically with the help of flocculating and soluble metal electrodes. The biggest feature that distinguishes this treatment process and chemical coagulation from each other is the way of adding the aluminium component or the iron component to the mechanism. In electrocoagulation processes, electrical current is given to wastewater with the help of electrodes in the reactor for treatment. In the experiments carried out with the electrocoagulation method, electricity was supplied to the reactor by placing aluminium plates at intervals of 5 mm and the removal efficiencies in the samples were observed.

Findings: In this study, the optimum pH was determined by observing the treatment efficiencies at different pH values after natural pH control. Variations of temperature, conductivity, and potential difference were observed during the processes. The current densities were also changed in the experiments, and the removal efficiencies were examined at different pH and current densities. Then NaCl was added to the system as the supporting electrolyte. Under these conditions, the removal efficiencies were observed and compared

Results: In the treatment of water samples taken from Ergaz Industry and Trade Joint Stock Company with the electrocoagulation method, in the presence of 100 mM NaCl, the removal efficiency of 81.85% was obtained as a result of one hour experiment performed under optimum conditions at natural pH and 12.5 mA/cm². The obtained data are compatible with the literature and show that wastewater can be treated by electrocoagulation method.

Keywords: Electrocoagulation, Electrochemical treatment, Tube dye wastewater

September 2022, 69 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Elektrokimyasal Arıtım Sistemleri ve Genel Özellikleri	5
Elektrokimya	5
Faraday kanunu	6
Elektrokimyasal Hücrelerde Potansiyel	6
Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri.....	7
Elektroliz	8
Elektrofiltrasyon.....	9
Elektrodiyaliz	10
Elektro-Fenton.....	11
Elektrooksidasyon	12
Elektrokoagülasyon.....	15
Elektrokoagülasyon yönteminin avantajları.....	17
Elektrokoagülasyon yönteminin dezavantajları	18
Elektrokoagülasyon prosesinde elektrotların konfigürasyonları.....	18
Elektrokoagülasyonun Teorisi	19
Destabilizasyon mekanizması	20
Elektrokoagülasyon prosesine etki eden parametreler	20
MATERYAL ve YÖNTEM	23
Materyal	23
Metot	24
Analiz Metotları	25

KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı)	25
Analiz çözeltileri	25
Analizin gerçekleştirilmesi	25
pH ve iletkenlik ölçümü	26
Arıtma İşlemlerinde Kullanılan Matematiksel Hesaplamalar	26
Atıksu kirlilik giderim hesabı	26
Reaktördeki akım miktarı hesabı	26
Arıtım esnasında kullanılan enerji hesabı	26
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	27
Başlangıç pH Değişiminin Elektrokoagülasyon Prosesi Üzerine Etkisi	27
Destek Elektrolit Konsantrasyonlarındaki Değişimin KOİ Giderim Verimleri Üzerindeki Etkisi	34
Akım Yoğunluklarındaki Değişimin KOİ Giderim Verimleri Üzerindeki Etkisi	43
Farklı Deney Şartlarında Enerji Sarfiyatlarının Değişimi	43
Değişen Başlangıç pH ve Akım Yoğunluklarındaki Enerji Sarfiyatı	44
Destek Elektrolit Kullanılması İle Enerji Sarfiyatları	46
SONUÇ VE ÖNERİLER	50
KAYNAKÇA	53
ÖZGEÇMİŞ	56

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Elektrokimyasal Arıtımın Olumlu Yönleri.....	8
Tablo 2. Elektrokimyasal Arıtımın Olumsuz Yönleri.....	8
Tablo 3. Bazı Anot Malzemelerine Ait Oksijen Dönüşüm Potansiyelleri.....	14
Tablo 4. Kimyasal Oksidant Türlerine Ait Oluşma Potansiyel Değerleri	14
Tablo 5. Atıksu Oluşumuna Sebep Olan Boyanın Bileşimi ve İçeriği Hakkında Bilgi.....	23
Tablo 6. Kullanılan Atıksuyun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	23
Tablo 7. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 3’de Deneysel Şartların Değişimi.....	28
Tablo 8. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 4.5’de Deneysel Şartların Değişimi.....	28
Tablo 9. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 6’da Deneysel Şartların Değişimi.....	29
Tablo 10. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 7.5’da Deneysel Şartların Değişimi.....	29
Tablo 11. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 9’da Deneysel Şartların Değişimi.....	30
Tablo 12. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 3’de Deneysel Şartların Değişimi.....	31
Tablo 13. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 4.5’de Deneysel Şartların Değişimi.....	31
Tablo 14. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 6’da Deneysel Şartların Değişimi.....	32
Tablo 15. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 7.5’da Deneysel Şartların Değişimi.....	32
Tablo 16. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda ve pH 9’da Deneysel Şartların Değişimi.....	33
Tablo 17. 18.75 mA/cm ² akım yoğunluğunda ve pH 3’de deneysel şartların değişimi	34
Tablo 18. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda. Doğal pH’da, 25 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	36
Tablo 19. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 50 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	36
Tablo 20. 6.25 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 100 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	37
Tablo 21. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 25 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	38
Tablo 22. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 50 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	39
Tablo 23. 12.50 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 100 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	39
Tablo 24. 18.75 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 25 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	41

Tablo 25. 18.75 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH'da, 50 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	41
Tablo 26. 18.75 mA/cm ² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH'da, 100 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi	42



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Elektron ve akımın yönü	9
Şekil 2. Elektrooksidasyon prosesinde kirleticilerin parçalanma mekanizması	12
Şekil 3. Tek kutuptaki seri bağlantılı elektrokoagülasyon reaktörü	18
Şekil 4. Seri bağlantılı çift kutuplu elektrokoagülasyon reaktörü	19
Şekil 5. Deneysel sistem (a. ayarlanabilir doğru akım güç kaynağı, b. reaktör, c. pH ve iletkenlik ölçer)	24
Şekil 6. Kalibrasyon eğrisi	25
Şekil 7. 6.25 mA/cm ² akım yoğunluğunda başlangıç pH değişimlerinin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi	27
Şekil 8. 12.5 mA/cm ² akım yoğunluğunda başlangıç pH değişimlerinin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi	30
Şekil 9. 18.75 mA/cm ² akım yoğunluğunda başlangıç pH 3'ün KOİ giderim verimi üzerine etkisi	33
Şekil 10. 6.25 mA/cm ² akım yoğunluğunda destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi	35
Şekil 11. 12.5 mA/cm ² akım yoğunluğunda destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi	37
Şekil 12. 18.75 mA/cm ² akım yoğunluğunda destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi	40
Şekil 13. Farklı destek elektrolit konsantrasyonlarında atıksu iletkenlik değişimleri.....	42
Şekil 14. Akım yoğunluklarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi.....	43
Şekil 15. 6.25 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı başlangıç pH'larında enerji sarfiyatları	44
Şekil 16. 12.50 mA/cm ² akım yoğunluğunda farklı başlangıç pH'larında enerji sarfiyatları ..	45
Şekil 17. 18.75 mA/cm ² akım yoğunluğunda pH 3'de enerji sarfiyatı	45
Şekil 18. pH 3'de farklı akım yoğunluklarında enerji sarfiyatı.....	46
Şekil 19. 6.25 mA/cm ² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da farklı konsantrasyonlardaki destek elektrolitler varlığında enerji sarfiyatları	47
Şekil 20. 12.50 mA/cm ² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da farklı konsantrasyonlardaki destek elektrolitler varlığında enerji sarfiyatı	48
Şekil 21. 18.75 mA/cm ² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da farklı konsantrasyonlardaki destek elektrolitler varlığında enerji sarfiyatı	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
A	: Reaktörde Kullanılmış Olan Elektrotun Alanı
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AKM	: Askıda Katı Madde
C	: Coulomb
C	: Numune Alındığı Andaki Su İçerisinde Kalan Kirlilik Konsantrasyonunu
C₀	: Atıksuyun Başlangıç Kirletici Konsantrasyonu
DC	: Doğru Akım
E°	: Pil Gerilimi
EMK	: Elektromotor Kuvveti
F	: Faraday
I	: Akım Yoğunluğu
J	: Sistem İçerisine Verilen Akımın Şiddeti
KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
N	: Reaksiyonda Alınıp Verilen Elektron Miktarı
R	: İdeal Gaz Sabiti
T	: Mutlak Sıcaklık
V	: Volt
v	: Hacim
W	: Güç Tüketimi
Q	: Kütlenin Tesiri

GİRİŞ

Şehirleşme ve şehirlerde yaşayan insanların artmasına bağlı olarak endüstriyel ve sanayi gelişimi de artmaktadır. Bu artışlarla birlikte çevre kirliliği de her geçen gün artmaktadır. Yoğun nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılan sanayileşme çevreyi etkilediği için çevre ve sanayi arasında bir ilişki oluşturmuştur. Oluşan bu etkileşimde olumlu etkiler yanında olumsuz etkilerde vardır. Olumsuz etkileri gelişen teknolojik alt yapılar ile müdahale edilmemesi çevre düzeninde bozulmalara sebebiyet verecektir. Bu bozulmalar çevresel döngüyü etkileyerek sorunlar ortaya çıkaracak ve çevremiz hızlı bir şekilde kirliliğe maruz kalacaktır. Ülkemiz ve diğer ülkelerde sanayinin gelişmesi ile özellikle son yıllarda toksik ve kimyasal madde kullanımında da elle tutulur bir artış olmuştur. Üretim tesislerinde ham madde ve ara ürünlerin şekillenmesi ve işlenmesinde yardımcı olarak kullanılan ve kirlatilen su çevreye bilinçsizce deşarj edildiğinde atıksu içerisinde olan kirleticilerle sahip toksik maddeler yaşadığımız çevreyi ve buna bağlı olarak bu çevrede bulunan temiz su kaynaklarını ciddi şekilde kirleterek doğaya zarar vermektedir. Su kirliliği, günümüzde karşılaşılan çevre sorunları içerisinde en başta gelen sorunlardan birisidir. Suyun kirlenmesinin ana sebepleri konutlardan kaynaklanan kullanılmış suların ve sanayilerde oluşan kirliliklerin su yataklarına kontrolsüzce deşarj edilmesi olarak söylenebilir. Kirleticiler su ortamında görsel kirlenmeye hatta zehirli bir reaksiyona sebep olabileceği gibi suda yaşayan canlılarının yaşam şartlarını bozarak taban birikmelerine de sebep olur. Biyolojik parçalanma veya çürüme oksijen kullanımına neden olduğundan dolayı su ortamında yaşayan diğer canlıların hayatları için tehlike yaratmasının yanı sıra buradan yararlanan insanların ve diğer canlıların hayatlarını etkileyecek durumların oluşmasına da sebep olmaktadır.

Çevre kirlenmesinin tamamının yok edilmesi günümüz ekonomik ve teknolojik imkânlar çerçevesinde bakıldığında hayal gibi görülmektedir. İnsanlığın teknolojik yaşamından tamamen vazgeçmesi durumunda bile oluşan kirliliği azaltmaktan başka bir çaresi yoktur. Çünkü bugüne kadar olan kirliliğin etkileri çok uzun yıllar devam edecektir. Bu sebepler dolayısıyla kirliliği olabildiğince azaltırken oluşan kirliliğin de bertaraf edilmesi için insanlık olarak elimizden gelen yapılmalıdır.

Sanayi kuruluşları içerisinde çevreye zarar veren nedenlerden biri de fosil kaynaklı enerji sektörüdür. Bu sektörden kaynaklanan kullanılmış atıksuların direkt yüzey suları, toprak ve yeraltı sularıyla temas etmesi ekolojik olarak sorunlara sebebiyet vermektedir.

Atıksuların arıtıldıktan hemen sonra deşarj edilecek uygun ortamlar bulunup deşarj işlemi gerçekleştirilmelidir. Endüstriyel atıksulardaki artış çevre sorunlarına ve sağlık problemlerine yol açmaktadır. Düzenli bir şekilde çevresel politikaların uygulanmaması nedeni ile su kaynaklarının tükenmesi sonucu, şehirlerimizdeki atıksuların yeniden kullanılmasını mecburi bir hale getirmektedir. Ülkemizdeki boya endüstrisi enerji sektöründeki gelişmeler gibi gelişmekte ve toplam üretim her geçen sene artmaktadır. Bu üretim fazlalığı atıksu miktarlarını da artırmaktadır. Bu nedenle boya endüstrisi, doğayı kirleten endüstriler içerisinde incelenmesi gerekenlerden biridir. Enerji sektöründeki boya atıksuları genellikle açık sarı renkli, pH değerleri yüksek ve organik madde içerikleri fazladır. Enerji sektöründeki boya atıksuları organik ve inorganik maddelerin çelik üzerine teması ile taşıma ve paketleme makinalarının tabanlarına teması esnasında meydana gelmektedir. Bu sular alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce ekonomik açıdan uygunluğu kontrol edilmelidir. Ayrıca çevrenin korunması açısından yeterli seviyede arıtımı sağlanmalıdır. Toksik özelliği ve içeriğinin kararlı olması alıcı ortamlara verilmesinde tehdit oluşturmaktadır. Bu özellikteki atıksularda ekonomik bir arıtım yapılması için aktif kirlilik yükü azaltılmalı, daha sonra metal iyonları, askıdaki katı maddeleri ve mikroorganizmaları sudan uzaklaştırma işlemleri yapılmalıdır. Enerji sanayisinde atıksuyun içindeki kirletici maddeleri fiziki, kimyasal ve biyolojik olarak ayırt edebilmek oldukça zordur. Kirletilmiş olan suyun hangi parametreler ile kirlendiği analizlerden ziyade, maddelerin prosese giriş ve çıkış bilgisine dayanmaktadır. Analiz edilecek atıksuyun karakterizasyon çalışmalarında, numune alma zamanları da önemlidir, üretimin tam kapasite çalıştığı kirlilik oranlarının pik yaptığı zamanlarda numune alma işlemi gerçekleştirilmelidir. Atıksuların karakterizasyon işlemlerinin tamamlanması deşarj ünitelerinin, arıtma tesislerinin ve kanalizasyon sularının dizayn ve işletme sistemlerini hazırlamada kullanılır. Atıksulardaki kirletici bileşenleri bilmek daha iyi bir arıtım yöntemi oluşturma için ön şarttır. Boya içerisinde kullanılan pigmentler, kimyasal maddeler ve çözücülerin farklı kanallarda toplanması ile atıksuların içeriği sürekli değişmektedir. Buna göre boya atıksularında atıksuyun karakterizasyonunda etkili olan başlıca fiziksel ve kimyasal parametreler içinde; askıda katı madde (AKM) kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), pH, renk, iletkenlik, bulanıklık ve ağır metaller yer almaktadır (Gönüllü, Gönül, & Toröz, 1983). Yapılan literatür taramaları sonucunda toksik maddelerin kullanım esnasında oluştuğu görülmektedir (EPA, 1990). Kirletilmiş sularda organik maddelerin arıtmalarında membran prosesleri, adsorpsiyon, ileri oksidasyon prosesleri ve kimyasal arıtım gibi yöntemler kullanılabilir (Akyol, 2012).

Bu çalışmada Ergaz San. ve Tic. A.Ş.'nde tüp boyama kabininde su perdesi karşısında boyanan tüpler sebebiyle oluşan, içinde boya ve diğer kirleticilerin bulunduğu atıksuyun

elektrokoagölasyon yöntemi kullanılarak arıtılması amaçlanmıştır. Arıtımda destek elektrot olarak alüminyum kullanılmış ve arıtma verimleri kontrol edilmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Hayattaki en önemli temel ihtiyaç sudur. Sadece doğal kaynak olarak değil günümüzde insanlığın siyasal ve sosyal amaçlarında kullanılmasına uygun olarak da karşımıza çıkmaktadır. Hayatımızda önemli bir yere sahip olan suyun hangi sebeplerle kullanıldığıyla birlikte farklı bilim dallarının yardımıyla bu kullanımlarda suyun kirlenme oranları detaylı bir şekilde araştırılarak bir sonuca varılmalıdır. Araştırmacılara yol gösterici olması için su ile ilgili bazı kavramların açıklanması gerekmektedir. Kâinatta dünyamızın oluşmasıyla ve insanoğlundan daha eskiye dayanan tarihi ile su sıcaklığın ve basıncın normal seviyelerde olması durumunda sıvı halde bulunur. Renksiz, tatsız ve kokusuzdur (Ulusoy, 2007). Suyun özellikleri bakımından yararı ve etkileri canlı ve cansız çevrenin tamamını kapsar. Dünyadaki nüfus artışı etkisiyle kullanılan ve ihtiyaç duyulan su talebi her geçen gün artmaktadır. Suyun kaynağından başlayarak kullanıcının hizmetine sunulmasına kadar su kanalları, arıtma tesisleri ve barajlar sürekli çalışmakta ve istihdam yaratmaktadır. Hayatın vazgeçilmezlerinin en başında gelen su tarım ve hayvancılıkta zorunlu bir tamamlayıcıdır. Madencilikten imalat sanayisine, sağlıktan inşaata kadar tüm alanlarda üretim yapılması için kullanılmaktadır. Taşımada ve aydınlatmada da kullanılan su kaynakları Dünya'nın her yerinde eşit olarak bulunamamaktadır. Bunun yanı sıra kaynağın az olduğu yerlerde her geçen gün ihtiyaçlarımızı karşılayamayacak duruma gelmektedir. Dünya'nın yüzdesel olarak neredeyse tamamın suyla kaplı olması bu suyun ihtiyaçlarımızı karşılayacak durumda olması anlamına gelmemektedir. Dünya'daki suyun %2'lik kısmının kullanıma elverişli olması ve bunun da %1.5'luk kısmının buz kütleleri halinde olması, kullanabilir özellikteki kısmının %1'den az olduğunu göstermektedir (Ulusoy, 2007). Yerkürenin sahip olduğu su oranına göre içilebilir su miktarının bu kadar az olması insanoğlunun gelecek yıllardaki su ihtiyaçları göz önüne alındığında büyük problemlere yol açılacağı en somut göstergesidir. Dünya üzerindeki içilemeyecek olan suların içilebilir duruma dönüştürülmesi iyi bir fikir olarak gözüktense de günümüz şartlarında altından kalkılamayacak durumda bir maliyete sebep olmaktadır. Günümüzde kullanılan yer altı suları ve akiferlerin doluluk oranları her geçen gün azalmaktadır.

Sanayi atıkları, petrol yakıtları ve radyoaktif maddeler sebebiyle su kirlilik oranı her geçen gün hızla artmakta ve içinden çıkılamayacak bir hal almaktadır. Bu sebeple bilim adamları ve araştırmacılar suyun verimli kullanımı ve kullanılan suyun geri dönüştürülmesi ile alakalı çalışmalarına hız vermiş ve bu çalışmaları insanlığa anlatmak için eğitimleri

arttırmışlardır. Sanayileşmenin artmasıyla üretim artmakta ve her geçen gün su kullanımı fazlalaşmaktadır. Bölgesel olarak su kaynaklarının değişiklik göstermesi sanayide kullanılan atıksuların arıtılma mecburiyetini arttırmaktadır. Sanayileşme ile içerisinde bulunan işyerlerinin üretmekte oldukları ürünler için kullandığı atıksuların ve bu sulardaki kirletici özellikli maddelerin doğrudan toprağa veya temiz sulara karışmasının engellenmesi ve kirliliği önlemek adına en uygun alanlara boşaltılması gerekmektedir (Camcıoğlu, Özyurt, Zeybek, & Hapoğlu 2016). Su kirliliklerine neden olan maddelerden biri de boyadır. Boyar maddelerin arıtma şekilleri farklılıklarının yanında maliyet konusunda da tesisleri zorlamaktadır. Sentetik boyar maddelerin kullanımı tüm sektörlerde yaygın olmakla birlikte enerji sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır. Boya Sanayicileri Derneği 2015 yılında yayınladığı rapora göre ülkemizdeki total pazar büyüklüğü 904 000 ton boyadır. Boyanın üretimi esnasında bir kısım ham boya kazanda kalmakta ve kalan bu kısmın temizlenmesi için kullanılan yıkama suyu düşünüldüğünde, boyalı atıksular çevre için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Boya karışımı yüksek olan suların direkt olarak doğaya verilmesi ile kanserojen aromatik aminler oluşarak insan sağlığını ciddi oranda etkilemektedir (Kargı, 2000). Çevremize deşarj edilen atıksuların canlı mikroorganizmaları etkileyerek toksik etkiler meydana getirmesi ve bu toksik etkinin bileşenlerinin suya karıştırılan boyaların türüne göre farklılık göstermesi arıtımı da zorlaştırmaktadır (Löschau & Krätke, 2005). Çevre koruma yönetmelikleri ile oluşan atıksular tesislerde arıtılarak tekrar kullanılabilir hale gelmektedirler (Topcuoğlu, Öna, & Arı, 2003). Üretim tesislerinin yaptıkları faaliyetler sonucunda çevresel maliyetler oluşur. Çevre koruma maliyetleri, firmaların çevreye zarar vermemeleri için almış oldukları önlemler için harcanan maliyetler ve zarar oluşuktan sonra gerçekleşen zararları karşılamak adına harcanan maliyetlerin toplamına denir. Üretim tesislerinin yaptıkları faaliyetler sonucunda çevresel maliyetler oluşur. Üretim süreçlerinde doğal madde kullanımını en aza indirmek, bu esnada kullanılan enerji miktarlarını azaltmak ve üretim sonucu oluşan atıkları çevreye zararlı etkisi olmayacak şekilde bertaraf etmek için planlama yapılırsa çevre dostu bir üretim yapılmış olur (Yücel & Ekmekçiler, 2008).

Elektrokimyasal Arıtım Sistemleri ve Genel Özellikleri

Elektrokimya

Elektrokimya biliminde teorik olarak anlatılan işlemlerin pratikte birebir yapılması önemlidir. Elektrokimya elektrik enerjisiyle yürüyen indirgenme ve yükseltgenme reaksiyonlarını gösteren bir bilimdir. Bulundurduğu kimyasal reaksiyonlarla elektrik akımı bağlılığını açıklamaya yardımcı olur. Elektrokimyasal olay kesinlikle bir redoks reaksiyondur (elektron alışverişi) ve reaksiyonlar elektrikteki akımlar desteği ile gerçekleşir. Redoks

reaksiyonlar indirgenme ve yükseltgenme yarı reaksiyonlarından oluşur. Elektrik akımının gerçekleşmesi için bir metalik iletken ve bir elektrolitik iletken kullanılır (Baker, 1991).

Kimyasal elektrik akımı üretebilen cihazlardaki olayın gerçekleştirilmesini sağlayan malzemeler elektrokimyasal pil, kimyasal pildeki akımların geçirilmesi için hazırlanan çözeltiler elektrolit, metal ya da grafitlerden oluşan elektron akımlarının gerçekleştirilmesi için elektroliz çözeltilerine yerleştirilen malzemeler elektrot olarak adlandırılır. Elektrokimyasal pillerin her çeşidinde yükseltgenme yarı tepkimesinin gerçekleştiği elektrot anot, indirgenme yarı tepkimesinin gerçekleştiği elektrotlar ise katot olarak adlandırılır.

Eğer inert elektrotlar kullanılmamışsa anot metalinde çözünmeler oluşur ve katot metalinin üzerinde birikmeler meydana getirir (Baker, 1991). Reaksiyonların istemli redokslarında, şekillenmeler üzerine ürünler verir. Sistemde elektrokimyasal olan hücre içerisinde redoks istemli reaksiyonun uygun ortam ve düzenekleri içerisinde uygulanması elinde bulundurduğu enerjinin belirli bir bölümünü elektrik enerjisine dönüştürebilir fakat reaksiyon istemli redoks değil de istemsiz redoks olup, istemli gibi yürümesi dışarıdan bir elektrik enerjisi verildiği takdirde oluşabilir. İstemsiz redoks tepkimelerindeki bu olaya elektroliz adı verilir (Yıldırım, 2007).

Faraday kanunu

Hücreden geçirilen elektriğin miktarı ile kimyasal olarak değişimi arasındaki ilişkiyi elektrokimyasal reaksiyonlar için 1833 yılında bu kanunu çıkaran Faraday bulmuştur. Elektrotlardaki ortaya çıkan maddelerin ağırlıkları sistemden geçen elektrik yük miktarları ile orantılıdır. Sistemden ne kadar yük geçiyorsa diğer maddelerden aynı şekilde kütle olarak açığa çıkmaktadır. Elektrokimyasal hücrelerdeki elektrik yükü bu sebeplerden ötürü reaksiyon sistemindeki bir ürün gibi düşünülmeli ve hesapları ona göre yapılmalıdır. Elektrik yükü miktarının birimi Coulomb (C) olup, 1 C, 1 amperlik akımın 1 saniyede taşıdığı elektrik yükü olarak tanımlanır. Elektrik katılarda elektronlar tarafından iletildiğinden 1 mol elektronun taşıdığı yük 96485 C'dur ve bu elektrik yükü 1 Faraday (F) olarak bilinir (Baker, 1991; Yıldırım, 2007).

Elektrokimyasal Hücrelerde Potansiyel

Elektrokimyasal hücrelerde potansiyel, dışarıdan iletken bir malzeme yardımı ile anottan başlayıp katoda doğru elektronlar vasıtasıyla akım geçerken elektrotların ikisinin arasındaki gerilim farkı sonucu ortaya çıkmaktadır.

Anot, katoda oranla negatif olarak fazla gerilime sahiptir. Bu yüzden elektronların akım yönleri katottan anoda doğru değil, anottan katoda doğru yönlendirilmektedir. Bir

elektrokimyasal hücredeki iki yarı hücrenin gerilim farkı pil gerilimi ve elektromotor kuvvet olarak bilinmektedir.

Elektromotor kuvveti, reaksiyonun sıcaklığına, içeriğindeki bileşiklere ve konsantrasyonuna bağlı olmaktadır. Birimi volt olan elektromotor kuvveti, kısaltması olan EMK olarak da bilinmektedir. Elektrolitin hacmine veya elektrotlardaki boyut farklılıklarına bağlı olarak herhangi bir değer farklılığı oluşturmaz (Türk, 1999).

Redoks reaksiyonlardaki EMK hesaplamaları, elektrotlarda oluşan gerilimlerden faydalanılarak hesaplamaları yapılmaktadır. İstemli redoks reaksiyonda EMK genellikle pozitifdir ($E^0 > 0$). Reaksiyon içerisinde bu pozitiflik negatif oluyorsa reaksiyon istemli değil aksine istemsiz bir şekilde çalıştığının habercisidir ($E^0 < 0$). EMK elektrot gerilimleri aracılığı ile hesaplandığı için sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin standart olanları alınmalıdır. Standart parametreler yerine rast gele bir parametre ile hesaplama yapmak istenirse EMK hesaplamaları Eşitlik 1’de verilen Nernst eşitliği yardımıyla yapılabilir (Türk, 1999).

$$E = E^0 - \left(\frac{2.303.R.T}{n.F} \cdot \log Q \right) \quad (1)$$

Burada; E^0 EMK veya pil gerilimini, R ideal gaz sabitini, T mutlak sıcaklığı, F Faraday sabitini, n reaksiyonda alınıp verilen elektron miktarını ve Q kütlenin tesirini ifade etmektedir.

Elektrokimyasal Arıtım Yöntemleri

Kirli ve temiz su arıtımlarında kullanılan elektrokimyasal işlemlerin, basit işletme şartları, temininin kolay olması ve ihtiyaca karşı verimlerinin yüksek olması sebeplerinden ötürü arıtımlardaki kullanım yüzdeleri gittikçe artmaktadır. Genel arıtma tesisi kullanılmasına da bu sebeple çok fazla gerek kalmamakta ve genel arıtma tesisi yerine her bir evin, konutun, iş yerinin kirli sularını arıtabilecek küçük çaplı arıtma üniteleri kullanılmasının önü açılmaktadır. Elektrokimyasal işlemlerdeki arıtma şekilleri ile arıtımın gerçekleştirilmesi ve bu arıtım için gerekli enerji ihtiyaçlarının aynı binalardaki çatılara yerleştirilecek güneş panelleri aracılığı ile karşılanması büyük kolaylık sağlayacaktır. Elektrokimyasal arıtımın olumlu ve olumsuz yönleri Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Elektrokimyasal Arıtımın Olumlu Yönleri

Verimi yüksektir. Reaksiyon yönetimi kolaydır. İşletmedeki uygulamaları ve kullanımı basit olması nedeniyle tercih sebebidir.

Düşük sıcaklık ve basınçta arıtım gerçekleştirilirken elektrik ihtiyacının az olması giderleri azalttığı için çok avantajlıdır.

Toksik olarak kirleticiliği çok olan ve diğer metotlarla arıtılamayan sular arıtılabilir.

Sisteme farklı kimyasallar eklemeye gerek yoktur.

Elektrotlar kullanılarak kimyasal madde elde edilebilir.

Bu durum kimyasal madde bulma ve taşıma sorununu ortadan kaldırmaktadır.

Tablo 2. Elektrokimyasal Arıtımın Olumsuz Yönleri

Kullanılacak olan elektrot malzemelerin temininde sorunlar oluşabilmektedir.

Elektrot olarak kullanılan malzemelerde kirliliklerin önüne geçilmelidir.

Elektrot üstünde oluşan tabakalar direnci artırarak verimi azaltır buda arıtım yüzdesini düşürmeye neden olur.

Elektrotların çalışma süreleri az ve maddi değerlerinin yüksek olması maliyeti arttırmaktadır.

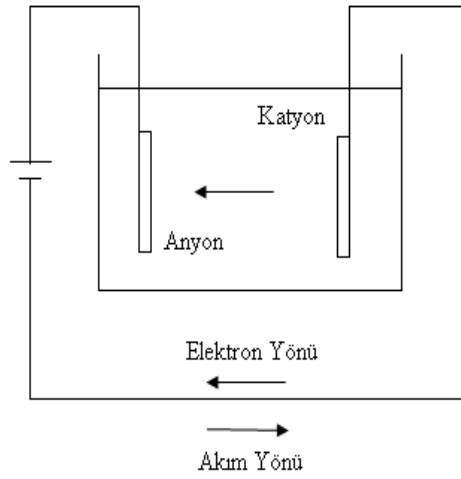
İletkenlik değeri düşük olan atıksularda yeterli arıtım yapılamamaktadır.

Arıtım esnasında konsantrasyon düşer ve bu durum akımın verimliliğini azaltır.

Kimyasal arıtım metotları, bu metoda göre daha az verimle çalıştığından aynı reaksiyon dönüşüm verimi için çok zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Sürenin artması, arıtılacak olan suyun depolanmasında gerekli mekânların daha büyük hacme sahip olmasını gerektirmektedir. Elektrokimyasal işlemlerdeki arıtma metotlarının dünya üzerinde kullanımına örnek gösterilebilecek arıtım prosesleri vardır ve farklı bölgelerde endüstriyel arıtım amaçlı elektrokoagülasyon, elektrodializ ve elektroflotasyon metotları kullanılmaktadır.

Elektroliz

Elektrolit içerisine dışarıdan elektrotlarla elektrik uygulanması sonucu ortamda kimyasal reaksiyon oluşturma olayına denir. Elektroliz oluşturulması anot ve katot dengelerini bozacak akımı dışarıdan vererek mümkün hale getirilir. Elektroliz hücresi akım şematığı Şekil 1’de gösterilmiştir (Kul, Boncukcuoğlu, Yılmaz, & Fil, 2015).



Şekil 1. Elektron ve akımın yönü

Katot için yürüyecek olan indirgenme reaksiyonu elektrona ihtiyaç duymaktadır. İhtiyaç duyulan bu elektronlar dışarıdan gelen bir elektrik kaynağından tedarik edilmektedir. Elektrolizdeki akım tarafları katottan başlayarak anoda doğru olmalıdır. Elektrokimyasal olaylar açısından pil ile elektroliz hücresi arasında çok fark yoktur. Aradaki fark elektrolizdeki anot ve katot dengesini bozarak, kimyasal reaksiyon oluşumunun gerçekleştirilmesidir. Pillerde ise anot ve katot reaksiyonları kendiliğinden yürür.

Anot ve katodun durgun devredeki elektrot potansiyeline “denge potansiyeli” denir. Elektroliz olayında sisteme akım verilir ve anot, katot potansiyelleri denge potansiyelinden daha yukarı çıkarılır. Elektroliz reaksiyonlarının başlaması için gerekli minimum potansiyele ayrışma gerilimi denir. Ayrışma gerilimini hesaplamak için Eşitlik 2 kullanılmakta olup, teorik olarak anot ile katodun sabit elektrot değerleri Nernst denklemi ile ortaya çıkarılabilir.

$$E_{a.g.} = E_{katot} - E_{anot} \quad (2)$$

Katotta;



Anotta;



Toplam reaksiyon ise;



Elektrofiltrasyon

Bu yöntemde elektrotlar kullanılarak bir elektrik alanı oluşturulur ve taneciklere çekim kuvveti kazandırılır. Daha sonra yüklü taneciklerin oluşturduğu floklar atıksudan filtre

ortamında uzaklaştırılır. Filtre keki ve filtre ortamının özelliklerinin, elektrik potansiyeli ve akım üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığına inanılmaktadır. Buna karşılık yeni geliştirilen filtre teorisi bu parametrenin sistemi gerçekten kontrol ettiğini iddia eder (Willis & Tosun, 1980). Filtre keki ne kadar kalın olursa, yerçekiminin etkisiyle filtre ortamı üzerindeki sıkışma kuvveti o kadar artar ve filtre hızı zamanla o kadar azalır. Filtre hızını ortamdaki süzme geçirgenliği belirlemektedir. Uygun büyüklükte ve polaritede bir elektrik alanı uygulanarak kek oluşumu azaltılabilir, filtre ortamında gözeneklerin küçük parçacıklar tarafından tıkanması geciktirilebilir (Yıldırım, 2007). Atıksu içeriğine bağlı olarak anot malzemesi olarak Demir (Fe), Alüminyum (Al), Grafit, Kurşun (Pb), Platin (Pt), Titanyum dioksit (TiO_2) vb. elemanlar kullanılır. Fe ve Al, uygulanan potansiyel farkından dolayı zamanla çözünbildikleri ve büyük hacimli baloncuklar (H_2 ve O_2) oluşturabildikleri için tercih edilmezler. Bu yöntem teknolojik ve endüstriyel süreçleri basitleştirir, sistemin boyutunu küçültür. Bu nedenle konvansiyonel arıtma prosesleri ile arıtılması zor olan bir atıksu, bu yüksek verimli sistem ile daha kolay arıtılabilir.

Elektrodiyaliz

Çok eski zamanlardan beri birçok bilim insanı tarafından yapılan çalışmalarla bu yöntem önemli ilerlemeler kaydetmiş ve iyon seçici membranlardaki yenilikler sayesinde günümüzde en önemli prosesler arasında yerini almıştır (Yazıcı, 2012). Elektrodiyaliz bir ayırma mekanizmasıdır ancak bir geri kazanım prosesi olarak da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Elektrodiyaliz, dünyada çeşitli alanlarda kullanılan bir teknolojidir ve genellikle rafinasyon, ayırma, kimyasal, petrokimya ve metalürjik işlemlerde bileşenlerin geri kazanılmasını amaçlamaktadır (Hacıoğlu, 2006; Yazıcı, 2012). Bu işlem 20 yılı aşkın bir süredir demineralizasyonda (minerallerin, özellikle katyonların ve anyonların sudan uzaklaştırılması işlemi) kullanılmaktadır (Araya-Farias & Bazinet 2006). Elektrodiyaliz, içme suyunun ve deniz suyunun tuzunun giderilmesinde, ayrıca biyoteknoloji ve çevresel proseslerde kullanılmaktadır (Lee, Choi, Cho, & Moon, 2002).

Elektrodiyaliz prosesinin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Ters osmoza oranla kullanım ömrü beş kata yakın fazladır (ters osmoz 1-2 yıl, elektrodiyaliz ise 8-10 yıl).
- Öncesinde küçük ve basit bir ön işleme yeterli olabilir.
- Düşük basınçlarda işletilebilir.
- Membran ömrü, proseste kirletici maddeler sürekli olarak uzaklaştırıldığı sürece uzundur.

- Yoğun içerikli suların bulunduğu bölgelerde de çok etkilidir (10000 mg/L TDS).
- İşletme ve bakım maliyetleri, karşılaştırılabilir süreçlere kıyasla düşüktür.
- Yüksek basınçlı bir pompaya duyulan ihtiyacın yanı sıra, süreç sessiz, basit ve karmaşık değildir. Membran koruyucu (antiscalant) gerekli değildir.
- Birçok iyon formu üzerinde oldukça etkilidir.
- Ters ozmoz gibi diğer yöntemlerden farklı olarak konsantre giriş suyuna verilebilir. Ayrıca ters osmozdan farklı olarak konsantre çok düşük seviyede kalır.
- Ters ozmoz ile karşılaştırıldığında, konsantre iki farklı şekilde toplanabilir, bu da geri kazanımı kolaylaştırır.
- Elektrodializ, çoğu uygulamada iyon değişimi, ters ozmoz ve diyaliz gibi diğer ayırma süreçleri ile rekabet halindedir. Bu üstünlüklerinin sebebi besleme suyu için kimyasal madde gerektirmemesidir.
- Yüksek ürün geri kazanım oranına sahiptir.
- Düşük sermaye ve enerji maliyetleriyle sürekli çalıştırılabilir.
- Yüklü bileşenler için yüksek seçicilik sağlamaktadır.

Elektrodializ prosesinin dezavantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Mikroorganizmalar ve çoğu antropojenik organik kirleticiler üzerinde etkinliği azdır.
- Bu konuda deneyimli ve sorumlu personel yeteri kadar yoktur.
- Yüksek elektrik tüketimi gerçekleşmektedir.

Elektro-Fenton

Elektro-Fenton, elektrokimyaya dayalı yeni gelişmiş bir oksidasyon yöntemidir (Liu ve ark. 2007; Zhang ve ark. 2007). Fe^{2+} ile doyurulmuş sulu bir çözeltide H_2O_2 (hidrojen peroksit) Fenton reaksiyonu sonucunda $OH\bullet$ radikallerini oluşturur ve çözeltiye sürekli hidroksil radikali sağlanır. Elektrokimyasal işlem sırasında katottan oksijen geçirilir. Kirleticilere aynı ortamda direnen organik maddeler, $OH\bullet$ radikalleri ile reaksiyona girerek ayrışır ve eğer işlem süresi yeterliyse kademeli olarak mineralize olurlar (Kaplan, 2007).

Elektro-Fenton prosesinin avantajları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Proses basit bir şekilde orta sıcaklık ve basınçta gerçekleştirilir.
- Fe^{2+} katotta yeniden üretilebilir.
- Seyreltik H_2O_2 çözeltisi işlem sırasında güvenliği artırır.
- Oksijen veya hava gönderilmesi tepkime çözeltisinin karışımını artırır.

- H_2O_2 yerli ve ihtiyaca göre sürekli üretilebilir. Bu durum nakliye ve depolamayı ortadan kaldırır.

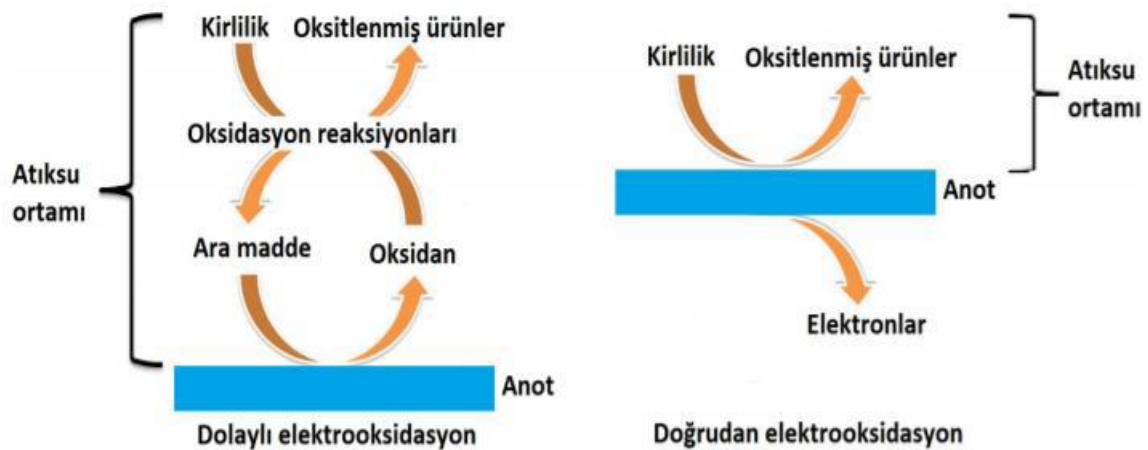
Elektro-Fenton prosesinin dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- H_2O_2 katot ara yüzünde birikebilir ve kısmen bozunabilir.
- Yüksek konsantrasyonlarda protonlar elektronlarla rekabet eder ve hidrojen gazı açığa çıkar.

H_2O_2 proste akım verimliliğini azaltır, bu nedenle, asidik bir çözeltide, katot potansiyelinin ve çözeltinin pH değerinin, akımın verimliliğini kontrol etmede iki önemli faktör olduğu bilinmelidir (Gözmen, 2002; Kaplan, 2007).

Elektrooksidasyon

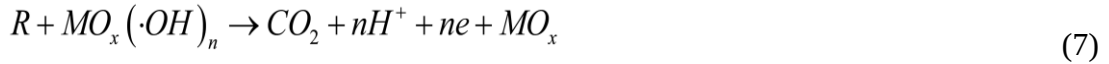
Elektrooksidasyon yöntemi; bor kaplı elmas (Anglada, Urtiaga, & Ortiz, 2009; Domínguez, González, Palo, & Sánchez-Martín, 2010), kaplanmış titanyum (Kong, Wang, Ma, & Gu, 2006; Dutra, Santos, & Afonso, 2010), grafit (Sathish & Viswanath 2005; Sundarapandiyar, Chandrasekar, Ramanaiah, Krishnan, & Saravanan 2010), platin (Fino, Jara, Saracco, Specchia, & Spinelli, 2005; Carbonio, Nagao, Gonzalez, & Varela, 2009), çözünmeyen anot malzemesi kullanan bir sistemdeki inorganik olmayan maddelerin oksidasyonunun genel adıdır. Organik safsızlıklar, elektrokimyasal oksidasyon ile doğrudan veya dolaylı oksidasyon yoluyla anot yüzeyinde bozunabilir (Grimm, Bessarabov & Sanderson, 1998). Bu iki işlemin şematik diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrooksidasyon prosesinde kirlenmelerin parçalanma mekanizması

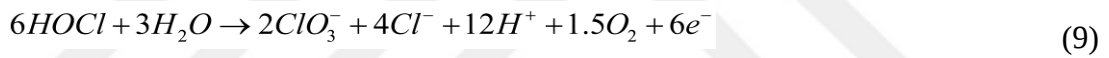
Direkt anodik proseslerde kirlenmeler anot yüzeyi ile doğrudan temas yoluyla absorbe edilir ve bu olaydan sonra anot yüzeyinden elektron transferi gerçekleşir. Organik kirlenmelerin oksidasyon hızı, anodun aktif noktalarına doğru organik bileşiklerin difüzyon hızı ve uygulanan akım kullanılarak anodun katalitik aktivitesine bağlıdır. Organik maddeyi

oksitleyen hidrojen peroksit ve ozon anodik olarak üretilebilir. Direk anodik oksidasyonda elektrokimyasal parçalanma ve çevrimi olmak üzere iki farklı yol vardır. Elektrolizin gerçekleşme aşamasında aktif oksijenin iki oksit türü anot yüzeyinde elektrokimyasal olarak üretilebilir (MO_x). Bunlardan ilki kimyasal adsorplanmış aktif oksijendir (MO_{x+1}), diğeri ise elektrokimyasal çevrimden sorumludur. Ancak elektrokimyasal parçalanmadan sorumlu olan fiziksel olarak adsorplanmış oksijendir ($\cdot OH$).



R, organik bileşikler ve n, anot yüzeyinde adsorbe edilen OH sayısıdır. Elektrokimyasal döngüde, organik madde yalnızca belirli bir dereceye kadar bozunur ve daha fazla biyolojik arıtma gerektirebilir, ancak elektrokimyasal dönüşümün son ürünleri su ve tam saflaştırma sayısı olan CO_2 'dir (Grimm ve ark. 1998).

Anot reaksiyonları;



Çözelti reaksiyonları;



Katot reaksiyonları;



Anodik ve katot olaylarının performansı, çözelti-metal arayüzüne, iyonların veya moleküllerin elektrot yüzeyinde adsorpsiyonuna ve bunların elektrokimyasal reaktivitesine, ortam koşullarına, elektrot metali özelliğine, sıcaklığa vb. faktörlere bağlıdır. Elektrokimyasal reaksiyonların ara yüzeyinde meydana gelen olaylarda metal, elektrot ve elektrolitin özellikleri, uygulanan potansiyel, elektrokimyasal reaksiyon sürecini etkileyen önemli

faktörlerdir. Elektrokimyasal reaksiyon, elektrot çözelti ara yüzünde meydana gelen bir reaksiyondur. Bu sistemlerdeki elektrokimyaya anot olayları denir.

Eklenen Elektrolit Türü ve Konsantrasyonu: Elektrokimyasal arıtma proseslerinde atıksuyun iletkenliğini artırmak için belirli işlemler yapılır. Bu işlemlerden biri elektrolit türüdür. Oksidasyon işlemlerini hızlandırmak için de çeşitli elektrolit türleri kullanılır. Eklenen elektrolitler, anot, katot veya çözelti reaksiyonları kullanılarak dolaylı olarak elektrooksidasyonu artıran bir oksitleyici ara maddeye dönüştürülür. Elektrolitler oksidant miktarının artırılması neden olur böylece elektrooksidasyon verimi de belli oranda artar.

Elektrooksidasyon işlemlerini hızlandırmak için çeşitli elektrot ve destek elektrolit türleri kullanılmaktadır. Sistemde dolaylı olarak elektrooksidasyonu artıran oksitleyici ara maddeler oluşmaktadır. Bazı anot malzemelerin oksijen dönüşümü potansiyel değerleri ile bazı kimyasal oksidantların oluşma potansiyelleri Tablo 3’de ve Tablo 4’de gösterilmektedir.

Tablo 3. Bazı Anot Malzemelerine Ait Oksijen Dönüşüm Potansiyelleri

Anot Türleri	Değer(V)
IrO ₂ (İridyum)	1.6
Pt (Platin)	1.3-1.6
PbO ₂ (Kurşunoksit)	1.9
Grafit	1.7
SnO ₂ (Kalayoksit)	1.9
Ebonex (Ti ₄ O ₇)	2.2
Pb-Sn	2.5
Ti/BDD	2.7-2.8
Si/BDD	2.3

Tablo 4. Kimyasal Oksidant Türlerine Ait Oluşma Potansiyel Değerleri

Oksidant Türleri	Oluşma Potansiyeli (V)
H ₂ O/O ₂ (Atomik Oksijen)	1.23
Cr ³⁺ /Cr ₂ O ₇ ²⁻ (Dikromat)	1.23
Cl ⁻ /Cl ₂ (Klor)	1.36
Cl ⁻ /HOCl (Hipokloröz asit)	1.47
Ag ⁺ /Ag ²⁺ (Gümüş (II) İyonu)	1.50
Cl ⁻ /ClO ₂ ⁻ (Klordioksit)	1.57
H ₂ O/H ₂ O ₂ (Hidrojen Peroksit)	1.77
SO ₄ ²⁻ /S ₂ O ₈ ²⁻ (Peroksodisülfat)	2.01
O ₂ /O ₃ (Ozon)	2.07

Elektrokoagülasyon

Demir ve alüminyum gibi yumaklaştırıcı ve çözünebilen metal bir elektrot parçasının yardımıyla elektrokimyasal olarak atıksuyun arıtıldığı bir mekanizmadır. Bu arıtım süreci ve kimyasal koagülasyonu birbirinden ayıran en büyük özellik alüminyum parça ya da demir parçanın mekanizmaya eklenme biçimidir. Elektrokoagülasyon işlemlerinde arıtma için sistem işleyişi reaktör içerisindeki elektrotlar yardımı ile tamamlanmaktadır (Donini, Kan, Szykarczuk, Hassan, & Kar, 1994; Koparal, Gökşen, & Ögütveren, 1999; İrdemez, Demircioğlu & Tosunoğlu, 2011).

Tanım olarak elektrokoagülasyon kolloid maddelerin elektrik yüklerinin manyetik alan içerisindeki etkilere maruz kalmalarıdır. Sistemdeki yüklü taneciklerin yanı sıra elektrotlar yardımı ile verilen yük taneciklerdeki yüzey gerilimini nötrleştirir ve su içerisinde birbirleriyle birleşerek büyük boyutlarda sudan ayrılan aglomer denilen parçacıklar oluşur (Ögütveren & Koparal, 1997).

Elektrokimyasal sistemde bir elektrotla sudaki kirliliğin ayrıştırılması 1889 yılında İngiltere’de ortaya atılmıştır. Bunun yanı sıra suda çözünebilen demir malzeme ve alüminyumların kullanımı ile suyun arıtılması için ilk patent 1909 yılında ABD’de alınmış bulunmaktadır.

Fazla miktarda kirli olan ve içme suyu olarak kullanılacak suları arıtma işlemi yine ABD’de 1946’lı yıllarda uygulanmıştır. Uygulanan bu metot ile alüminyum elektrotlardaki yumaklaştırma işlemleri sağlanmıştır. Elektrolit yardımı ile meydana getirilen yumaklar çökme eğiliminde olduğundan sudaki berraklaşma ile renk giderimi de gözle görülür şekilde sağlanmış olur. 1956’lı yıllarda Amerika’da olduğu gibi İngilizler de bu metodu kullanarak ülkelerinde bulunan nehirlerdeki suları arıtmışlardır. Farklı yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar ile bu metot, renk ve bulanıklık giderim işlemlerinde oldukça verimli ve güzel sonuçlar elde ederek suyun kalitesini arttırsa bile kimyasal yumaklaştırma metotlarındaki arıtım gider ve maliyetleri ile karşılaştırıldığında çok büyük farklar oluşturduğu için Dünya genelinde fazla rağbet görmemiştir.

Gıda endüstrisinde meydana gelen kirlenmiş suların temizlenmesi için 1972’li yıllarda elektrokoagülasyon işlemi, çözünmüş hava flotasyonu ve kimyasal koagülasyonun arıtmada kullanıldığı bir sistemle karşılaştırılmıştır. Çalışmalar sonrasında yumaklaştırma oluşum süreci takip edilmiş ve oluşumun hızlı fakat oluşan floklarda daha katı çamurlaşma olduğu izlenmiştir.

Bu metotta malzeme seçimi sistem verim ve maliyeti için önem arz etmektedir. Dünya genelinde bu metotta yaygın olarak alüminyum ve demir kullanılmaktadır. Bunların kullanılmasının asıl nedenlerinden biri de günümüz şartlarında ucuz ve kolay bir şekilde bulunmasıdır.

Elektrot olarak demir seçildiği zaman elektrot reaksiyonları aşağıdaki gibidir;

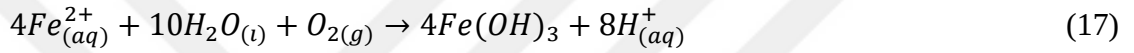
Katotta;



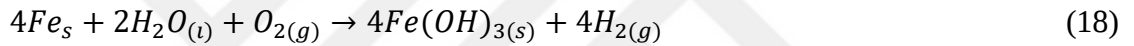
Anotta;



ve çözeltideki çözünmüş oksijen ile;



nihai olarak toplam reaksiyon ise



şeklindedir.

Elektrot olarak alüminyum seçildiği zaman aşağıdaki reaksiyonları gerçekleşmektedir;

Anotta;



Çözeltide;



Bu reaksiyonlar sonucunda elektrokoagülasyon işleminin yumaklaştırma ve flotasyon işlemlerinin bir karışımı olduğu görülebilmektedir. Katot elektrottan ortaya çıkan hidrojen gazı su içerisinde oluşan yumaklaşmış parçaları ittirerek su yüzeyine çıkarır ve arıtılan suyun yüzeyinde bir araya toplanmasına sebebiyet verir. Bu da elektroflotasyon işleminin reaksiyona destek verdiğinin bir göstergesidir.

Metotta oluşan tecrübeler ile son yıllarda görülmüştür ki elektroliz olayında atıksudan organik maddeleri ayırma işlemlerinde verim çok iyidir. Hatta elektroliz sadece elektrokoagülasyonda değil elektrokimyasal işlemlerin tamamında önemlidir. Akımlardaki yoğunluk, elektrotlar arası mesafe, su içerisindeki iletkenlik birbirleri ile tam bir uyum ve düzen içerisinde dirler.

Elektroliz prosesinde giderim için çökelme, yükseltgenme ve indirgenme mekanizmaları etkinken, elektrokoagülasyon prosesinde ise adsorpsiyon, absorpsiyon, koagülasyon (yumaklaştırma), yüzdürme ve çöktürme mekanizmaları etkindir.

Elektrokoagülasyon yönteminin avantajları

Elektrokoagülasyon yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kullanımı basit ve işletme esnasındaki kolaylıkları çoktur.
- Bu işlem sırasında çıkan çamurdan yüksek miktarda metal oksit ve hidroksit oluşur. Oluşan bu maddeler kolay şekilde çöker ve susuzlaştırma işlemine tabi tutulabilirler.
- İçerisinde yüksek miktarda katı madde vardır. Bu sebeple işlem sırasında daha az çamur üretimi gerçekleşir.
- Reaksiyonda ürün miktarı belirlemede kısa süre gerektirir.
- Atıksu arıtma işlemi sonrası suda renk, koku ve bulanıklık bakımından verim yüksek olur.
- Bu işlemde su içerisinde çözünmüş olarak bulunan katı madde oranı daha azdır. Katı madde oranının az olmasının avantajı, suyun başka şekilde tekrar kullanımını sağlamak istediğimizde geri kazanım esnasındaki maliyetinin düşürmektedir.
- Kimyasal ve elektrokoagülasyon işlemlerinde oluşmakta olan yumaklar birbirlerine yapısal olarak benzemektedirler. Ancak elektrokoagülasyondaki yumakların boyutları diğerine göre daha büyüktür. Bağlı su bulundurma eğilimleri düşüktür. Kararlı bir yapıya sahiptirler ve dirençleri daha fazladır. Filtreleme işlemleri ile ayırma oranları birbirine paraleldir.
- Elektrokoagülasyon işleminde koagülant madde ekleme sırasında oluşan kirlilik miktarı artması gibi bir durum söz konusu değildir.
- Bu teknikten elektriğin olmadığı yerlerde de güneşten enerji elde eden panellerden destek alarak yararlanılabilir.
- Çok küçük yapıları taneciklerde bile arıtım verimi ile giderim sağlanması büyük bir avantajdır.
- Sisteme verilecek olan elektrik hacimsel olarak alanın büyüklüğüne göre yumaklaştırma işlemlerini kolaylaştırarak verimi artırır.

- Elektroliz esnasında oluşan gaz yukarıya çıkarken kirletici maddelere yapışarak sistemin üst kısmında birikme yapabilir ve bu şekilde flotasyon ile kirliliği sudan ayırma işlemi gerçekleştirilebilir.

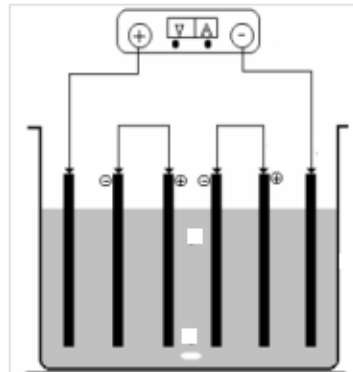
Elektrokoagülasyon yönteminin dezavantajları

Elektrokoagülasyon yönteminin diğer yöntemlere göre dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çoğu zaman elektrik kullanımı pahalıdır.
- Arıtılacak atıksuyun yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir.
- Yükseltgenme esnasında anot madde çözünmektedir. Çözünen anot gittikçe azalacağı için belirli periyotlarla kullanılmamış malzeme ile değiştirilmelidir.
- Hidroksit jelimsi yapıda olduğu için bazı durumlarda çözünebilir.
- Katot kısmında elektriği geçiremeyecek şekilde bir tabaka oluşursa verim düşer hatta sıfırlanabilir.

Elektrokoagülasyon prosesinde elektrotların konfigürasyonları

Elektrokoagülasyon reaktörü katot ve anottan oluşur. Elektrotlar farklı enerji kaynaklarından beslenmeye başlayınca katot kısmında bir etki gözükmezken anot yükseltgenmenin bir sonucu olarak çözünerek azalmaya başlar. Çözünme hızını yavaşlatmak için anot kısmına bağlı elektrotların yüzey alanının artırılması gereklidir. Bu da her arıtım ünitesi için uygun değildir. Sorunun çözülebilmesi için tek kutupta paralel veya seri şekilde bağlanması gerekmektedir. Şekil 3’de anot ve katot malzemelerin tek kutup ve paralel şekilde bağlı görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 3. Tek kutuptaki seri bağlantılı elektrokoagülasyon reaktörü

Hücreler seri olarak bağlanırsa sistemdeki dirençte artma meydana gelir. Bu olay aynı akım geçmesine rağmen oluşmaktadır. Hücrelerin toplam direnci artması sebebiyle potansiyel

Destabilizasyon mekanizması

Çözeltiden geçen bir elektrik akımı ile anottan çözünmüş iyonların etkileşimi nedeniyle yüklü parçacıkların etrafındaki dağınık çift katmanlı tabakanın sıkıştırılmasıdır. Atıksuda bulunan iyonik türler sayesinde yükler nötralize edilir. Burada, karşıt iyonlar parçacıklar arasındaki itici kuvveti azaltır, parçacıklarda Van der Waals çekiminin etkili olmasını sağlar ve katılaşmanın gerçekleşmesi için yeterince yakın olmalarına izin verir. İşlem sonucunda net yük "sıfır" olacaktır. Aglomerasyon ve pıhtılaşma ile oluşan çamur örtüsünün oluşumu, henüz bir kompleks oluşturmamış kolloidal partiküller arasında köprüler oluşturur. Elektrokoagülasyon mekanizması, sulu ortamın kimyası, özellikle iletkenlik ile yakından ilişkilidir. Ayrıca, geçerli parametreler pH, partikül boyutu ve kimyasal konsantrasyon olarak sayılabilir. Anot olarak demir kullanıldığında, $Fe(OH)_n$ formunda demir hidroksit oluşur. $Fe(OH)_n$ 'in oluşumu için iki farklı mekanizma önerilmiştir (n değerinin 2 veya 3 olduğu varsayılarak).

Anotta;



Katotta;



nihai olarak toplam reaksiyon ise;



şeklindedir.

$Fe(OH)_{n(s)}$ sistemde jelimsi bir yapıda bulunmaktadır. Kompleksleşme ve koagülasyon işlemlerinden hemen sonra kirleticileri elektrostatik çekim ile uzaklaştırır. İndirgeme reaksiyonu akabinde oluşan hidrojen gazı (H_2), çözünmüş organikleri yüzdürme yöntemiyle askıda katı maddeleri uzaklaştırabilir. Ancak Fe^{3+} iyonlarının hidrasyona uğrama ihtimali yüksektir. Bu durumda çözeltinin pH'sına bağlı olarak asidik koşullar altında, $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$ vb. gibi bileşikler bulunabilir.

Elektrokoagülasyon prosesine etki eden parametreler

Elektrokoagülasyon mekanizması, sulu ortamın kimyasal özellikleri, özellikle elektriksel iletkenliği ile yakından ilişkilidir. Ek olarak, kimyasal bileşen konsantrasyonu, pH ve partikül boyutu, elektrokoagülasyonun etkili parametreleri arasında sayılabilir (Mollah,

Schennach, Parga & Cocke, 2001; Avşar ve ark. 2007). Chen ve Hung (2000) yaptıkları çalışmada elektrokoagülasyona etki eden parametreleri şu şekilde tanımlamışlardır.

Akım Yoğunluğu ve Yükü: Elektrokoagülasyon sisteminin akımı, elektrotlardan ayrılan Al^{+3} ve Fe^{+2} miktarını belirler. Elektrokimyasal eşdeğer kütleler alüminyum için 335.6 mg/A.sa ve demir için 1041 mg/A.sa'dır. Yüksek akım, küçük elektrokoagülasyon ünitesi anlamına gelir. Bununla birlikte akım çok yüksek ise elektrik enerjisi boşa gider. Daha da önemlisi, çok yüksek bir akım yoğunluğu akım verimini önemli ölçüde azaltır. Yüksek akım verimi sağlamak için akım yoğunluğu; debi, pH değeri ve sıcaklık gibi çalışma parametreleri ile birlikte seçilmelidir. Elektrokoagülasyon sisteminin uzun süreli kesintisiz çalışması için önerilen akım yoğunluğu 20-25 A/m²'dir. Alüminyumun akım verimi %120-140 iken, demirin akım verimi yaklaşık %100'dür. Alüminyum elektrotların yüksek akım verimi, alüminyumun amfoterik bir metal olmasından kaynaklanmaktadır. Arıtılmış suyun kalitesi, üretilen iyon miktarı (mg), şarj miktarı, akım verimliliği ve süre ile belirlenir. Atıksu arıtımında elektrik yükü gereklidir. Elektrik yükü kritik bir değere ulaştığında, akımdaki daha fazla artış drenajın kalitesinde önemli değişiklikler üretmez (İrdemez, 2005).

Destek Elektrolit Varlığı: Tuzlar, arıtılan suyun veya atık suyun iletkenliğini artırmak için yaygın olarak kullanılır. Ortamda klorür iyonlarının varlığı yüke katkıda bulunur ve HCO_3^- ve SO_4^{2-} gibi anyonların olumsuz etkilerini büyük ölçüde azaltabilir. Karbonat veya sülfat iyonlarının varlığında Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonları çökerek elektrot yüzeyinde yalıtkan bir tabaka oluşturur. Bu yalıtkan tabaka elektrotlar arasındaki potansiyeli yükseltir ve akım verimini büyük ölçüde azaltır. Bu nedenle su ve atıksu arıtımında elektrokoagülasyonun doğru çalışmasını sağlamak için anyonlarda %20 Cl^- bulunmalıdır. Ortama eklenen NaCl, suyun iletkenliğini artırır ve güç tüketimini azaltır. Aynı zamanda elektrokimyasal olarak üretilen klor da suyun dezenfekte edilmesinde etkilidir.

pH Değerinin Etkisi: Su veya atıksu pH'sının elektrokoagülasyon üzerindeki etkisi, hem akım verimliliği hem de metal hidroksit çözünürlüğü ile ilgilidir. Alüminyumun mevcut verimi, asidik veya alkali koşullar altında, nötr koşullar altında olduğundan genellikle daha yüksektir. Kirleticinin türüne bağlı olarak, en yüksek arıtma verimliliği pH 7 civarındadır. Bununla birlikte, iletkenlikteki değişiklik nedeniyle enerji tüketimi nötr pH'da daha yüksektir. İletkenlik yüksekse, pH değerinin etkisi ihmal edilebilir.

Sıcaklık: Literatür çalışmaları, alüminyumun mevcut veriminin 60°C'ye kadar artan sıcaklıkla yükseldiğini göstermektedir. Sıcaklığın daha da artması elektrokoagülasyon verimliliğini azaltır. Elektrokoagülasyon veriminin sıcaklıkla artmasının nedeni, elektrot yüzeyindeki alümina filmin parçalanmasına sıcaklığın katkısı olarak gösterilebilir. Bununla

birlikte, sıcaklık çok yüksekse, $\text{Al}(\text{OH})_3$ jelinin büyük gözenekleri küçülebilir ve elektrot yüzeyinde daha fazla birikebilir.

Güç Kaynağı: Elektrokimyasal bir reaktöre uygulanan akım; denge potansiyel farkını, anot potansiyelini, katot potansiyelini ve çözeltinin potansiyel düşüşünü karşılayacak değerde olmalıdır. Elektrokoagülasyon sistemlerinde genellikle doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılmaktadır. Elektrot yüzey oksidasyonunu veya pasifleşmesini mümkün olduğu kadar azaltmak için güç kaynağının yönü belirli zaman aralıklarında değiştirilir.

Anot Malzemesi: Anotların kimyasal bozunma hızı ve korozyona karşı dirençleri elektrokimyasal süreci etkileyen en önemli faktörlerdir. Organik içeriği bakımından fazla olan atıksuların arıtımında farklı anot malzemeler denenmiştir.

Akım Yoğunluğu: Elektrokimyasal arıtmada önemli çalışma koşullarından biri akım yoğunluğudur. Çünkü akım yoğunluğu reaksiyon hızını kontrol eden en önemli parametredir. Akım yoğunluğunun optimizasyonu elektrokimyasal arıtma için çok önemlidir. Gerekenden daha fazla akım yoğunluğu uygulandığında maliyetlerde artış oluşabilir. Ayrıca arıtım çalışmalarında mevcut yoğunluk ve arıtılacak süre yakından ilişkilidir. Yüksek akım yoğunluğu uygulandığında daha kısa işlem süreleri gerçekleşir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Çalışmada kullanılan atıksu Erzurum ili Aziziye ilçesi sınırları içerisinde yer alan Ergaz San. ve Tic. A.Ş.'nden tedarik edilmiştir. Atıksu oluşumuna neden olan boyanın bazı özellikleri Tablo 5’de verilmiştir. Atıksuyun pH ayarlanması ve analizler için kullanılan tüm kimyasal maddeler analitik saflıktadır.

Tablo 5. Atıksu Oluşumuna Sebep Olan Boyanın Bileşimi ve İçeriği Hakkında Bilgi

Ürün Adı	: Alüminyum Boya		
Ürün Tanımı	: Hidrokarbon reçine esaslı, hava kurumalı, hızlı kuruyan parlak son kat bir boyadır.		
Kimyasallar	CAS NO	% Ağırlık	Zararlılık İşaretleri
Toluen	108-88-3	<50	Xn;R10,R20/21,R38
Metalik Pigment	7429-90-5	<10	H302, H312, H332,
Hidrokarbon Reçine	68131-27-1	<40	H302, H312, H332

Kullanılan atıksuyun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6’da verilmiştir.

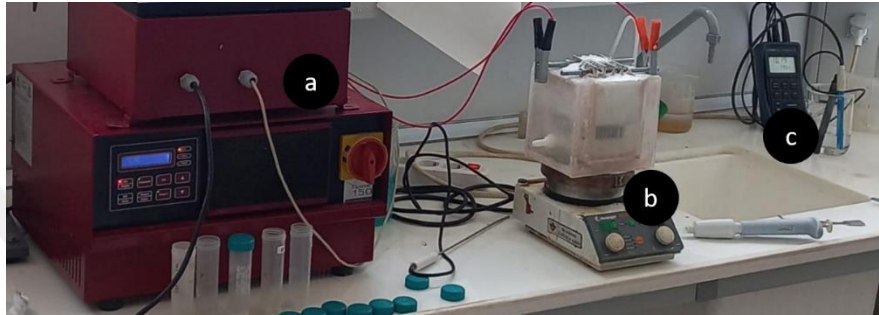
Tablo 6. Kullanılan Atıksuyun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Parametre	Birim	Değer
pH	-	7.5-8
İletkenlik	mS/cm	1570-1580
Sıcaklık	°C	22 ± 2
Toplam KOİ	mg/L	3500-4500
Çözünmüş KOİ	mg/L	2000-3000
AKM	mg/L	100-150
Al ⁺³	ppb	232591.29
Toplam Cr	ppb	1117.45
Mn ⁺²	ppb	14459.71
Co ⁺²	ppb	9113.31
Ni ⁺²	ppb	<0.00
Cu ⁺²	ppb	62238.79
Zn ⁺²	ppb	113510.53
As	ppb	981.60
Cd ⁺²	ppb	41.89
Pb ⁺²	ppb	14627.59

Denemeler boyunca kullanılan atıksuyun başlangıç KOİ değeri 3000 mg/L olacak şekilde seyreltilerek hazırlanmıştır.

Metot

Çalışmalar için kullanılan elektrokoagülasyon sistemi Şekil 5’de gösterilmiş olup, reaktörde ısınmalara karşı ceket olmasına karşın deneylerde yüksek sıcaklıklara çıkma oranı az olduğu için kullanımına gerek duyulmamıştır. Deneylerde kullanılan atıksu hacmi 1000 mL olup, çalışma için 5 mm aralıklarla birbirlerine paralel olarak reaktör içerisine yerleştirilmiş 4 adet anot ve 4 adet katot alüminyum plaka kullanılmıştır. Her bir plakanın yüzey alanı 100 cm² olup, anot yüzeyi toplam 400 cm², katot yüzeyi toplam 400 cm² olmak üzere plakaların toplam yüzey alanı 800 cm² olup hesaplamalar anot yüzey toplamından yapılmıştır.



Şekil 5. Deneysel sistem (a. ayarlanabilir doğru akım güç kaynağı, b. reaktör, c. pH ve iletkenlik ölçer)

Sistemin çalışma şekli reaktöre 1000 mL atıksu konularak alüminyum plakaların suyun içine daldırılıp plakaları tutan tij demirlerinin çapraz uç kısımlarına tutamaklar ile anot ve katot uçların bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Reaktör içindeki suya farklı akım şiddetlerinde ve farklı pH değerlerinde ayrı ayrı sabit şekilde elektrik verilmiştir. Bu işlemler sırasında belirli periyotlarla da numuneler alınmıştır. Alınan numunelerin anlık pH, iletkenlik, sıcaklık, akım ve potansiyel fark değerleri sonradan kontrol edebilmek için not edilmiştir. Elektrik akımı Quassar 150 Switch Mode marka doğru akım güç kaynağı kullanılarak ayarlanmıştır. pH ve iletkenlik parametreleri WTW 340i marka multiparametre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sıcaklık da yine aynı cihazdan ölçülmüştür. Gerekli parametrelerin ölçüm ve not edilme işlemleri bittikten sonra farklı zamanlarda alınan numuneler Schleicher&Schuell marka 0.22 µm şırınga ucu membranından geçirilerek süzölmüştür. Süzölen numune analiz yapmak için hazır hale getirilmiştir. Optimum pH ve akımın bulunabilmesi için deneyler tekrar edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney bittikten sonra reaktör ve alüminyum elektrotlar, tüpler vb deney malzemeleri üzerindeki kalıntılar temizlendikten sonra saf su ile tekrar yıkanıp bir sonraki deney için hazır hale getirilmiştir.

Analiz Metotları

KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı)

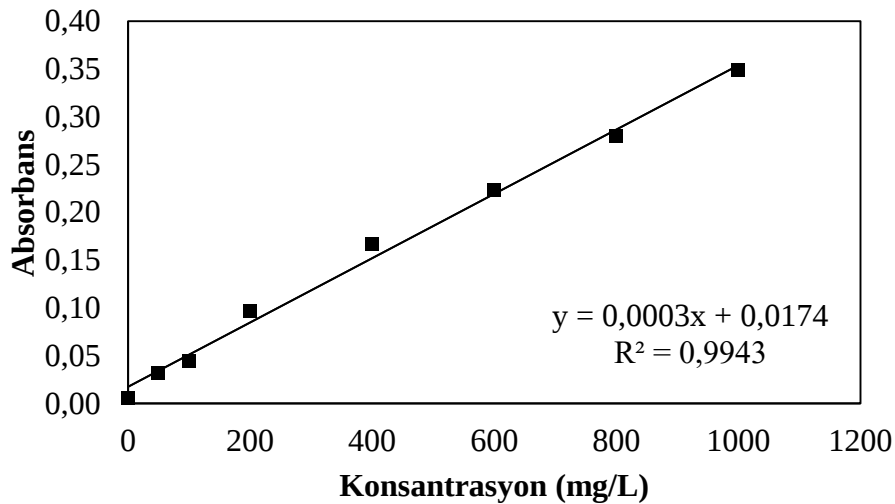
KOİ analizleri genel olarak yaygın olan AWWA 1985 metoduna göre kapalı sisteme uygun olarak yapılmıştır.

Analiz çözeltileri

- Asit çözeltisi:** 11 gr gümüş sülfatın (Ag_2SO_4) derişik ile 1 L sülfürik asit (H_2SO_4) içerisinde çözünmesi sağlanarak hazırlanmıştır.
- Parçalama çözeltisi:** 10.216 gr potasyum dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ve 33 gr cıva sülfat (HgSO_4) 167 mL derişik sülfürik asit (H_2SO_4) içerisinde çözülerek saf su ile 1 L'ye tamamlanmıştır.
- Potasyum Hidrojen Fitalat $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$:** KOİ değeri 1000 mg/L olacak şekilde 425 mg $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ derişigi 0.5 L'de çözülerek 0-1000 mg/L'lik KOİ eğrisinde kullanılmıştır.

Analizin gerçekleştirilmesi

Deney sırasında belirli periyotlarda alınan numuneler 0.22 μm şırınga ucu membranından geçirildikten sonra cam deney tüpüne (borosilikat) 1.5 mL doldurulmuştur. Daha sonra 2 mL asit çözeltisi ve 1 mL parçalama çözeltisi eklenip önceden 148°C'e çıkarılmış olan WTW CR 3200 markalı termoreaktöre konularak 2 saat bu sıcaklıkta bekletilmiştir. 2 saat sonunda çıkarılan numunelerin potasyum hidrojen fitalat kullanılarak önceden kalibrasyonu ayarlanmış olan Shimadzu UV 160A markalı spektrofotometre cihazında 600 nm dalga boyunda absorbans değerleri okunup KOİ sonuçları ortaya çıkarılmıştır. Şekil 6'da KOİ analizleri için kullanılan kalibrasyon eğrisi görülmektedir.



Şekil 6. Kalibrasyon eğrisi

pH ve iletkenlik ölçümü

pH ve iletkenlik değerleri WTW Multi 340i model cihaz yardımıyla ölçülmüştür.

Aritma İşlemlerinde Kullanılan Matematiksel Hesaplamalar

Atıksu kirlilik giderim hesabı

$$\eta (\%) = (C_0 - C / C_0) * 100 \quad (24)$$

Burada C_0 atıksu başlangıç numune konsantrasyonunu (mg/L), C numune alındığı anda su içerisinde kalan kirlilik konsantrasyonunu (mg/L) ifade etmektedir.

Reaktördeki akım miktarı hesabı

$$I = J/A \quad (25)$$

Burada I sistem içerisinde geçen akımın yoğunluğunu (mA/cm^2), J sistem içerisine verilen akımın şiddetini (A), A reaktörde kullanılmış olan elektrotun alanını (cm^2) göstermektedir.

Aritım esnasında kullanılan enerji hesabı

$$W (\text{kW-sa}/\text{m}^3) = (V * I * t) / v \quad (26)$$

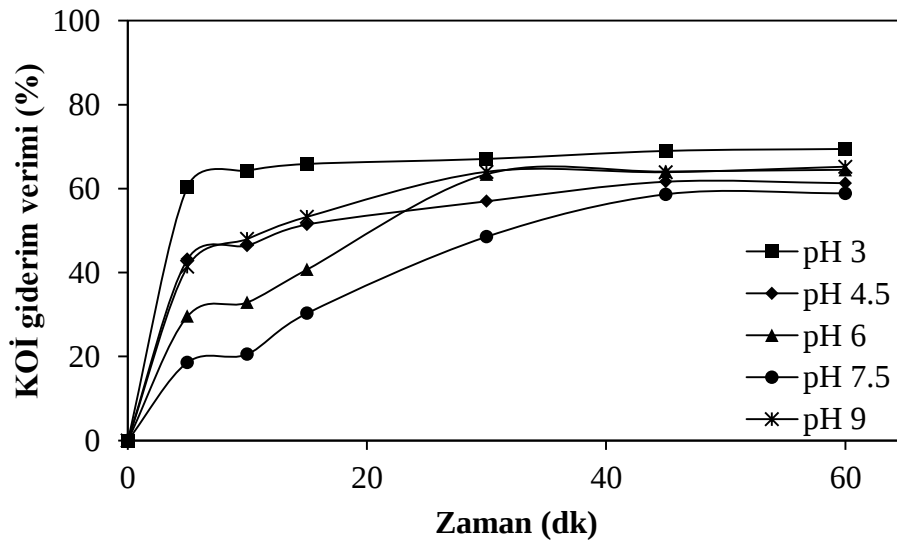
Burada; W enerji sarfiyatını, V reaktördeki potansiyel farkı ve t süreyi göstermektedir

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada doğal pH kontrolü sonrasında farklı pH değerlerinde arıtım verimleri gözlemlenerek optimum pH belirlenmiştir. İşlemler sırasında sıcaklık, iletkenlik ve potansiyel fark değişimleri gözlemlenmiştir. Akım yoğunlukları da deneylerde değiştirilerek farklı pH ve akımlarda arıtım verimleri incelenmiş olup daha sonra sisteme destek elektrolit katkısı yapılmıştır. Destek elektrolit olarak tuz (NaCl) denenmiş ve bu şartlar altında deney verimleri hesaplanmıştır.

Başlangıç pH Değişiminin Elektrokoagülasyon Prosesi Üzerine Etkisi

Başlangıç pH değişiminin KOİ giderim verimliliği üzerindeki etkilerini incelemek için yapılan deneylerin başlangıç pH değerleri 3, 4.5, 6, 7.5 ve 9 olarak belirlenmiş, karıştırma hızının etkisi sınırlı olduğundan dolayı deneylerde karıştırma işlemi yapılmamıştır. Atıksuyun doğal pH'sı 7.5 olduğundan bu değerde herhangi bir ayarlama yapılmamıştır. Denemelerde akım yoğunlukları sırasıyla 6.25, 12.5 ve 18.75 mA/cm² olacak şekilde ayarlanmış ve başlangıç pH değişiminin KOİ giderim verimleri üzerine olan etkisi 6.25 mA/cm² akım yoğunluğu için Şekil 7'de, 12.5 mA/cm² akım yoğunluğu için Şekil 8'de ve 18.75 mA/cm² akım yoğunluğu için Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 7. 6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda başlangıç pH değişimlerinin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi

Şekil 7 incelendiğinde akım yoğunluğunun 6.25 mA/cm² olarak ayarlanmış akım yoğunluğunda yapılan deneylerde giderim verimleri 1 saat içerisinde dengeye gelmiş olup bu

akım yoğunluğunda düşük pH değerlerinde daha fazla verim elde edilebildiği görülmüştür. 1 saatlik deney sonunda pH 3 için giderim verimi %69.41 olarak belirlenmişken pH değeri 4.5 olarak ayarlandığında %61.29 oranında giderim sağlanmıştır. pH 6 olarak ayarlandığında giderim verimi %64.51, pH 7.5 olarak ayarlandığında %58.88 ve pH 9 olarak ayarlandığında %65.19 oranında bir giderim sağlanmıştır.

6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 3’de deneysel şartların değişimi Tablo 7’de verilmiştir. 60 dakika boyunca süren deneyde başlangıç pH değeri 2.99’dan 5.15’e kadar yükselmiştir. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 2240 mS/cm iken deney sonunda 1674 mS/cm’ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 20,90°C olan değer deney sonunda 41.30°C’ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 11.90 volt iken deney sonunda 15.50 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 7. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 3’de Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	2.99	2240	20.90	11.90	2.50	0.00
5	3.90	2090	23.10	11.32	2.50	60.43
10	4.10	2040	26.10	17.30	2.50	64.24
15	4.30	2000	28.10	17.40	2.50	65.84
30	4.50	1930	33.00	13.60	2.50	67.04
45	4.84	1700	37.20	14.30	2.50	68.95
60	5.15	1674	41.30	15.50	2.50	69.41

Tablo 8 incelendiğinde 6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 4.5’de 60 dakika boyunca deneysel şartların değişimi görülmektedir. Başlangıç pH değeri 4.56’dan 9.40’a kadar yükselmiştir. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 1900 mS/cm iken deney sonunda 1470 mS/cm’ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 20.40°C olan değer deney sonunda 43.20°C’ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 11.35 volt iken deney sonunda 16.66 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 8. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 4.5’de Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	4.56	1900	20.40	11.35	2.50	0.00
5	5.29	1880	21.90	9.59	2.50	43.20
10	5.70	1840	23.40	10.10	2.50	46.44
15	6.10	1810	26.30	19.07	2.50	51.46
30	8.21	1760	31.50	13.90	2.50	56.98
45	9.35	1620	35.70	17.70	2.50	61.64
60	9.40	1470	43.20	16.66	2.50	61.29

6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 6'da deneysel şartların değişimi Tablo 9'da verilmiştir. Deney süresi boyunca başlangıç pH değeri 6.09'dan 9.95'e kadar yükselmiştir. İletkenlik başlangıçta 1750 mS/cm iken deney sonunda 1190 mS/cm'ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 20.60°C olan değer deney sonunda 42.80°C'ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 7.70 volt iken deney sonunda 25.00 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 9. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 6'da Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	6.09	1750	20.60	7.70	2.50	0.00
5	6.70	1688	22.50	8.39	2.50	29.60
10	7.85	1615	23.70	10.44	2.50	32.91
15	9.00	1542	25.60	13.50	2.50	40.75
30	9.40	1370	32.10	17.52	2.50	63.45
45	9.61	1240	37.90	20.17	2.50	64.09
60	9.95	1190	42.80	25.00	2.50	64.51

Tablo 10'da gösterilen ve 6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda, pH 7.5'da yapılan deney sonuçlarına göre elde edilen veriler doğrultusunda sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 20.30°C olan değer deney sonunda 45.10°C'ye kadar yükselmiştir. Başlangıç pH değeri 7.89'dan 9.92'ye kadar çıkmıştır. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 1570 mS/cm iken deney sonunda 1174 mS/cm'ye düşmüştür. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 12.20 volt iken deney sonunda 38.70 volt değerine ulaşmıştır.

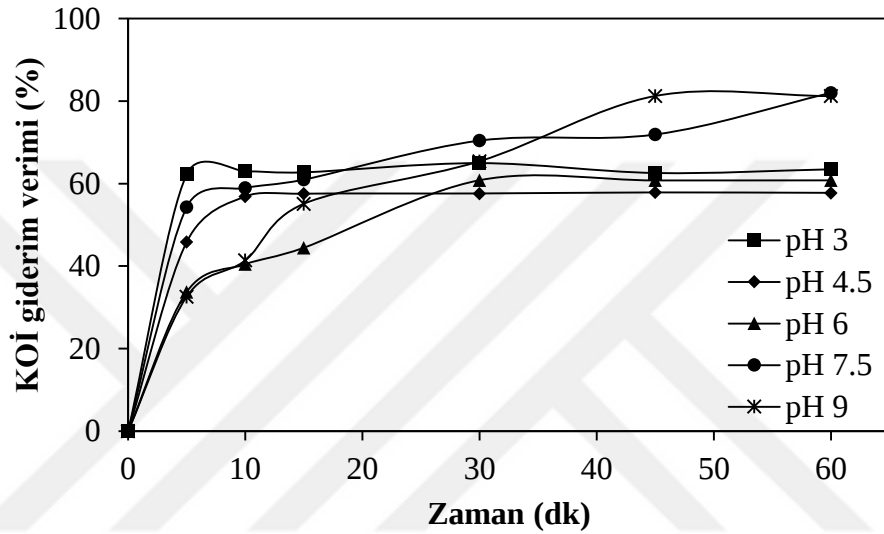
Tablo 10. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 7.5'da Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.89	1570	20.30	12.20	2.50	0.00
5	8.80	1550	22.40	12.54	2.50	18.61
10	9.10	1530	25.40	12.32	2.50	20.57
15	9.20	1517	27.30	12.50	2.50	30.31
30	9.80	1376	34.30	13.80	2.50	48.53
45	9.85	1250	41.00	31.14	2.50	58.64
60	9.92	1174	45.10	38.70	2.50	58.88

6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 9'da deneysel şartların değişimi Tablo 11'deki gibidir. Deney 60 dakika sürmüş olup deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 1600 mS/cm iken deney sonunda 1450 mS/cm'ye düşmüştür. Başlangıç pH değeri 9.18'den 10.05'e kadar yükselmiştir. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 22.40°C olan değer deney sonunda 60.90°C'ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 25.50 volt iken deney sonunda 37.20 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 11. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 9'da Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	9.18	1600	22.40	25.50	2.50	0.00
5	9.20	1577	28.10	29.76	2.50	41.38
10	9.45	1550	29.20	34.86	2.50	47.98
15	9.60	1514	37.90	43.40	2.50	53.26
30	9.70	1485	49.00	30.05	2.50	63.98
45	9.90	1470	58.40	43.40	2.50	63.88
60	10.05	1450	60.90	37.20	2.50	65.19

**Şekil 8.** 12.5 mA/cm² akım yoğunluğunda başlangıç pH değişimlerinin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi

Şekil 8 incelendiğinde 12.5 mA/cm² akım yoğunluğunda düşük pH değerlerinde giderim verimleri çok fazla değişmezken atıksuyun doğal pH değerinde giderim veriminin diğer pH değerlerine göre yüksek olduğu belirlenmiştir. 3 ile 9 arasında değişen başlangıç pH değerleri için 60 dakikalık bekletme süresi sonunda elde edilen KOİ giderme verimleri sırasıyla %63.48, %57.74, %60.81, %82.03 ve %81.19 olarak belirlenmiştir. Atıksuyun başlangıç pH değerleri 7.5 ve 9 olarak ayarlandığında KOİ giderim verimlerinin daha yüksek olduğu ancak dengeye daha geç ulaştığı görülmüştür. Başlangıç pH değerleri düşük olarak ayarlandığında ise sistem dengeye daha kısa sürede ulaşmakta olup ancak giderim verimlerinin daha düşük kaldığı gözlemlenmiştir. Başlangıç pH değerinin 7.5 olduğu göz önüne alınırsa flok yapma özelliği yüksek çözünme eğilimi zayıf olan Al(OH)₃ oluşumu için uygun bir pH aralığı sağlandığı düşünülmektedir. Yüksek pH'larda (7.5-9) KOİ giderim veriminin artması bu şekilde açıklanabilmektedir. pH 7.5 atıksuyun doğal pH'sı olduğundan ve herhangi bir ayarlama işlemi gerektirmediğinden bundan sonraki denemelerde optimum pH olarak kabul edilmiştir. Akım yoğunluğu arttıkça KOİ giderim verimi artmış olup bununla

beraber sıcaklık faktörü nedeni ile 18.75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda yüksek pH'larda çalışılmadığından bundan sonraki denemelere optimum 12.5 mA/cm^2 akım yoğunluğu ile devam edilmiştir.

12.50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve pH 3'de deneysel şartların değişimi Tablo 12'de verilmiştir. 60 dakika boyunca süren deneyde başlangıç pH değeri 3'den 6.90'a kadar yükselmiştir. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 2430 mS/cm iken deney sonunda 990 mS/cm 'ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 20.30°C olan değer deney sonunda 74.60°C 'ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 12.50 volt iken deney sonunda 43.03 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 12. 12.50 mA/cm^2 Akım Yoğunluğunda ve pH 3'de Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	3.00	2430	20.30	12.50	5.10	0.00
5	3.41	2050	23.40	16.79	5.10	62.28
10	3.63	1960	30.10	16.50	5.10	62.99
15	3.73	1808	34.50	18.47	5.10	62.74
30	4.63	1470	47.20	23.70	5.10	64.98
45	5.60	1208	56.80	24.80	5.10	62.59
60	6.90	990	74.60	43.03	5.10	63.48

12.50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve pH 4.5'de deneysel şartların değişimi Tablo 13'de verilmiştir. Deney süresince başlangıç pH değeri 4,45'den 7,80'e kadar çıkmıştır. Deney boyunca düşen iletkenlik başlangıçta 1893 mS/cm iken deney sonunda 800 mS/cm 'ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 20.30°C olan değer deney sonunda 72.80°C 'ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 12.20 volt iken deney sonunda 42.50 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 13. 12.50 mA/cm^2 Akım Yoğunluğunda ve pH 4.5'de Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	4.45	1893	20.30	12.20	5.10	0.00
5	5.20	1818	24.00	12.20	5.10	45.83
10	5.23	1750	27.40	15.30	5.10	56.86
15	5.64	1650	31.10	16.20	5.10	57.54
30	7.85	1395	41.70	31.30	5.10	57.59
45	7.86	1080	54.00	31.40	5.10	57.84
60	7.80	800	72.80	42.50	5.10	57.74

pH 6 değerinde ve 12.50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda deneysel şartların değişimi Tablo 14'de verilmiştir. 60 dakika boyunca süren deneyde başlangıç pH değeri 5.80'den 8.72'ye kadar yükselmiştir. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik

başlangıçta 1718 mS/cm iken deney sonunda 1009 mS/cm'ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 20.30°C olan değer deney sonunda 72.20°C'ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 16.70 volt iken deney sonunda 44.20 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 14. 12.50 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 6'da Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	5.80	1718	20.30	16.70	5.10	0.00
5	6.10	1620	25.10	15.90	5.10	33.75
10	7.85	1500	30.00	17.20	5.10	40.47
15	8.28	1455	33.80	27.50	5.10	44.47
30	8.54	1284	48.70	28.40	5.10	60.84
45	8.70	1104	72.80	44.00	5.10	60.79
60	8.72	1009	72.20	44.20	5.10	60.81

Doğal pH değerinde (pH 7.5) ve 12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda yapılmış olan deney sonuçları Tablo 15'de verilmiştir. 60 dakika boyunca süren deneyde başlangıç pH değeri 7.52'den 9.20'ye kadar yükselmiştir. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 1580 mS/cm iken deney sonunda 812 mS/cm'ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 21.80°C olan değer deney sonunda 85.30°C'ye kadar yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 36.00 volt iken deney sonunda 44.02 volt değerine ulaşmıştır.

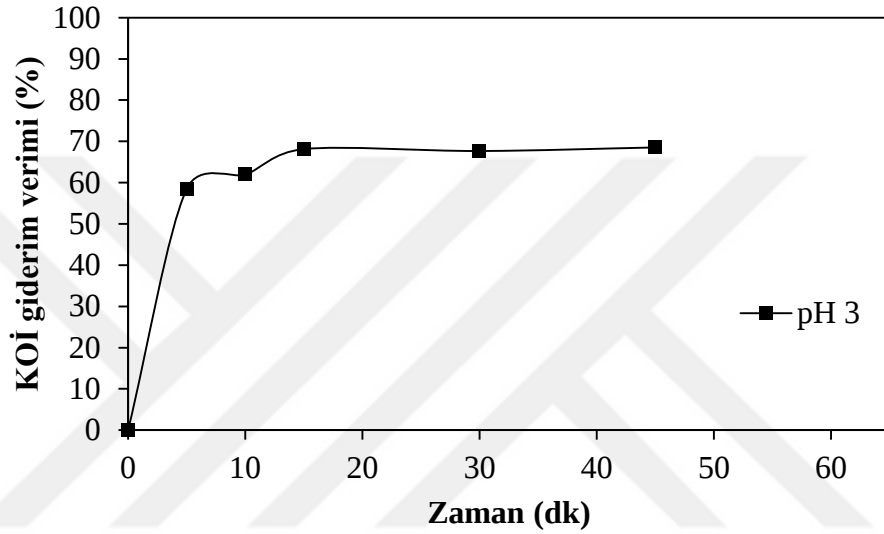
Tablo 15. 12.50 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 7.5'da Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.52	1580	21.80	36.00	5.10	0.00
5	9.30	1450	25.40	13.80	5.10	54.32
10	8.80	1350	31.60	16.20	5.10	58.93
15	9.15	1284	39.00	32.50	5.10	60.98
30	9.33	1045	60.00	44.00	5.10	70.44
45	9.60	1020	75.00	34.00	5.10	71.92
60	9.20	812	85.30	44.02	5.10	82.03

12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 9'da deneysel şartların değişimi Tablo 16'da verilmiştir. 60 dakika boyunca süren deneyde potansiyel fark değeri başlangıçta 29 volt iken deney sonunda 44 volt değerine ulaşmıştır. Başlangıç pH değeri 9.01'den 9.90'a kadar yükselmiştir. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 1596 mS/cm iken deney sonunda 1060 mS/cm'ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 21.60°C olan değer deney sonunda 78.80°C'ye kadar yükselmiştir.

Tablo 16. 12.50 mA/cm² Akım Yoğunluğunda ve pH 9’da Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	9.01	1596	21.60	29.00	5.10	0.00
5	9.60	1580	31.80	32.26	5.10	32.59
10	9.78	1500	39.90	39.90	5.10	41.38
15	9.80	1418	51.50	39.40	5.10	55.10
30	9.85	1342	66.50	27.80	5.10	65.41
45	9.80	1178	75.00	44.00	5.10	81.22
60	9.90	1060	78.80	44.00	5.10	81.19

**Şekil 9.** 18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda başlangıç pH 3’ün KOİ giderim verimi üzerine etkisi

Şekil 9 incelendiğinde 18.75 mA/cm² akım yoğunluğuna çıkıldığında reaktördeki su sıcaklığının hızla artması deneylerin yapılamaz hale gelmesine neden olmuş ve bu akım yoğunluğunda sadece başlangıç pH değeri 3 için deney yapılabilmektedir. Diğer başlangıç pH değerleri için sağlıklı veriler elde edilememiştir. pH 3 için yapılan bu deney ise sıcaklığın hızlı yükselişi nedeni ile 60. dakikaya kadar devam ettirilememiş olup 45. dakikada sonlandırılmıştır. Yapılabilen 45 dakikalık bu deney süresi sonucunda 5. dakikadaki KOİ giderim verimi %58.46 olarak bulunmuş olup bu değer 45. dakikada %68.53’e yükselmiştir.

Tablo 17’de 18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 3’de yapılan deneye ait değişen şartlar verilmiştir. Sıcaklık artışı sebebiyle 60 dakika deney yapılamamış olup en son 45. dakikada numune alınabilmektedir. Bu 45 dakikalık numune deneylerine göre başlangıç pH değeri 2.96’dan 3.88’e kadar yükselmiştir. Deney boyunca düşme eğilimi göstermiş olan iletkenlik başlangıçta 2370 mS/cm iken deney sonunda 1194 mS/cm’ye düşmüştür. Sıcaklık deney boyunca artmış olup başlangıçta 22.60°C olan değer deney sonunda 78.00°C’ye kadar

yükselmiştir. Potansiyel fark değeri ise başlangıçta 18.40 volt iken deney sonunda 44.00 volt değerine ulaşmıştır.

Tablo 17. 18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda ve pH 3’de deneysel şartların değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	2.96	2370	22.60	18.40	7.50	0.00
5	3.30	2004	30.00	19.50	7.50	58.46
10	3.60	1820	39.80	27.30	7.50	61.92
15	3.78	1539	46.60	39.99	7.50	68.13
30	3.80	1307	75.50	44.00	7.50	67.66
45	3.88	1194	78.00	44.00	7.50	68.53

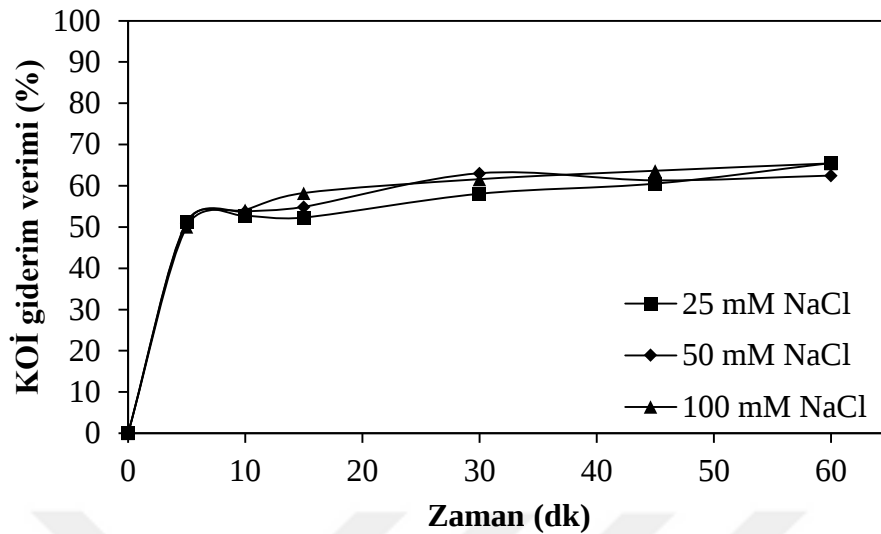
Yukarıda verilen tablolar ve şekiller incelendiğinde farklı akım yoğunlukları ve pH değerlerinde deneysel şartların (iletkenlik, sıcaklık, potansiyel fark) tüm deneylerde aynı eğilim içerisinde olduğu görülmüştür. 60 dakikalık deneyler boyunca tüm denemelerde iletkenliğin düştüğü, sıcaklık ve potansiyel fark değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Denemelerde iletkenliğin düşmesi, atıksu içerisinde bulunan çözünmüş maddelerin olması ve oluşan Al(OH)₃ floklarının elektrotların arasına girerek direnç oluşturmaları nedeni ile açıklanabilir. Oluşan direnç iletkenliğin düşüşüne sebebiyet vererek atıksuyun sıcaklığının deney boyunca artmasına yol açmıştır. Flokların deney sisteminde oluşturduğu bu direnç aynı zamanda potansiyel fark değerlerini de giderek arttırmıştır.

Atıksuyun başlangıç pH değeri elektrokoagülasyon prosesini etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır (Adhoum & Monser, 2004; Merzouk ve ark. 2004; Kumar ve ark. 2009). Ham atıksuyun pH değeri, oluşan hidroksitlerin stabilitesini etkilediğinden, kirlenici giderme verimliliği üzerindeki etkisi ya pozitif ya da negatiftir (Mollah ve ark. 2001). Benzer şekilde, pH değerindeki bir değişiklik partiküllerin yüzey yükünü değiştirmektedir ve bu da atıksu içinde dağılmış organiklerin uzaklaştırılmasını etkilemektedir (Drogué, Asselin, Brar, Benmoussa & Blais, 2008).

Destek Elektrolit Konsantrasyonlarındaki Değişimin KOİ Giderim Verimleri Üzerindeki Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde destek elektrolit olarak NaCl kullanılmış, deneyler atıksuyun doğal pH değerinde yürütülmüştür. Deneyler farklı destek elektrolit konsantrasyonlarında ve 6.25, 12.5 ve 18.75 mA/cm² akım yoğunluklarında yürütülmüştür. Elektrokoagülasyon prosesinde destek elektrolit konsantrasyonları 25, 50 ve 100 mM olacak şekilde ayarlanmış, başlangıç pH değişiminin KOİ giderim verimleri üzerine olan etkisi 6.25

mA/cm^2 akım yoğunluğu için Şekil 10'da, 12.5 mA/cm^2 akım yoğunluğu için Şekil 11'de ve 18.75 mA/cm^2 akım yoğunluğu için Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 10. 6.25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi

Şekil 10 incelendiğinde 6.25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda NaCl kullanılarak hazırlanan farklı destek elektrolit konsantrasyonları sırasıyla 25, 50 ve 100 mM olarak ayarlanmış olup bu konsantrasyonların KOİ giderim verimi üzerindeki etkisi görülmektedir. Atıksuyun doğal pH değerinde yürütülen 60 dakikalık çalışmaların sonunda 25 mM NaCl için giderim verimi %65.51, 50 mM NaCl için giderim verimi %62.47 ve 100 mM NaCl için giderim verimi %65.39 olarak bulunmuştur. Deneylerin ilk 15 dakikasından sonra artan destek elektrolit konsantrasyonlarına göre KOİ giderim verimleri sırasıyla %52.30, %54.90 ve %58.21 olarak belirlenmiştir. Her ne kadar 60 dakika sonunda ortaya çıkan giderim verimleri birbirine yakın olsa da deneylerin ilk 15 dakikası sonunda elde edilen veriler destek elektrolit konsantrasyonlarındaki artışın giderim verimlerinde de paralel bir artışa neden olduğunu ortaya koymaktadır. Destek elektrolit kullanılmadan aynı akım yoğunluğunda ve pH değerinde yapılan 60 dakikalık deney sonucunda KOİ giderim verimi %58.88 olarak bulunmuştur. Atıksuya ilave edilen destek elektrolit, tüm konsantrasyonlarında iletkenliği arttırıp direnci düşürmesiyle beraber giderim verimini de az miktarda olsa artırmıştır.

Tablo 18 incelendiğinde 6.25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, doğal pH'da ve 25 mM NaCl destek elektrolit ilavesi yapılan deneye ait değişen şartlar görülmektedir. Destek elektrolit katıldıktan sonra yapılan deneyler ile destek elektrolitsiz aynı şartlarda yapılan deneylerin verileri (Tablo 10) karşılaştırıldığında sıcaklık artış eğiliminin azalarak 22.8°C 'den 34°C 'ye kadar yükseldiği görülmüştür. pH değerleri destek elektrolitsiz deney sonuçlarına göre belirgin bir değişiklik göstermemiş olup deney başlangıç pH'sı 7.78'den 9.40'a kadar

yükselmiştir. Destek elektrolit varlığında yaklaşık 3 kat artış gösteren iletkenlik değeri deney boyunca düşüş göstermiş ve başlangıçta 4380 mS/cm iken deney sonunda 4040 mS/cm'ye gerilemiştir. Potansiyel fark değeri ise destek elektrolit eklenmesine bağlı olarak dirençte meydana gelen azalma nedeni ile sabit değerlerde kalarak başlangıçta 9.60 volt değeri deney sonunda büyük bir değişiklik göstermeden 8.14 volt değerine düşmüştür.

Tablo 18. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH'da, 25 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.78	4380	22.80	9.60	2.50	0.00
5	8.86	4360	24.00	9.35	2.50	51.19
10	9.01	4350	25.40	8.90	2.50	52.66
15	9.20	4310	27.00	9.37	2.50	52.30
30	9.38	4250	29.90	9.04	2.50	58.07
45	9.28	4140	32.20	7.79	2.50	60.53
60	9.40	4040	34.00	8.14	2.50	65.51

Tablo 19'da ise 6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da, destek elektrolit konsantrasyonu 2 katına çıkarılarak 50 mM NaCl kullanımı sonrası yapılan deneye ait değişen şartlar verilmiştir. Destek elektrolit artırıldıktan sonra Tablo 18 verileri ile yapılan karşılaştırmalarda, sıcaklık artışının biraz daha azalarak 22.7°C'den 31.90°C'ye çıktığı, pH değerinde belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Destek elektrolitin 50 mM seviyesine çıkarılmasına paralel olarak başlangıç iletkenlik değeri 6820 mS/cm'e yükselmiş, deney sonunda bu değer 6250 mS/cm'ye düşmüştür. Potansiyel fark değeri ise belirgin bir şekilde düşüş göstermiş ve başlangıçta 8.15 volt olan değer deney sonunda 3.98 volt değerine gerilemiştir.

Tablo 19. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH'da, 50 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

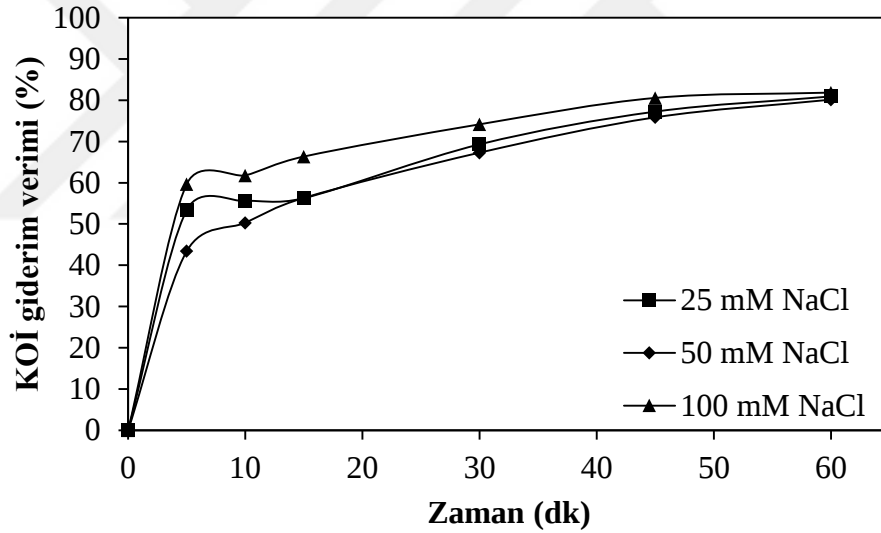
t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.85	6820	22.70	8.15	2.50	0.00
5	8.62	6780	23.50	7.74	2.50	50.97
10	8.87	6640	24.70	7.90	2.50	53.69
15	9.01	6610	28.80	6.40	2.50	54.90
30	9.15	6570	30.00	6.32	2.50	63.04
45	9.38	6300	31.30	4.25	2.50	61.31
60	9.45	6250	31.90	3.98	2.50	62.47

6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da, 100 mM ile en yüksek destek elektrolit konsantrasyonunun mevcut olduğu deneydeki veriler Tablo 20'de verilmiştir. Bu

değerlerin diğer destek elektrolit konsantrasyonlarına göre karşılaştırılması yapıldığında iletkenliğin 11970 mS/cm seviyesine kadar artması direnç azalmasına sebebiyet vermiştir. Sıcaklık bir önceki deneyde olduğu gibi 32°C seviyelerinde kalmıştır. pH değeri 7.78 başlangıç seviyesinden deney sonunda 9.07'ye yükselmiş olup potansiyel fark değeri ise başlangıçta 6.9 volttan 2.70 volt değerine gerilemiştir.

Tablo 20. 6.25 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH'da, 100 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.78	11970	21.90	6.90	2.50	0.00
5	8.48	11640	22.90	5.80	2.50	50.03
10	8.60	11510	24.30	4.80	2.50	54.13
15	8.80	11500	26.80	3.80	2.50	58.21
30	8.85	11430	29.40	2.60	2.50	61.57
45	9.03	11300	30.50	2.60	2.50	63.61
60	9.07	11100	32.40	2.70	2.50	65.39



Şekil 11. 12.5 mA/cm² akım yoğunluğunda destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi

Sonuçları Şekil 11'de verilen 12.5 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da yapılan deneyler, destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimi üzerine etkisini göstermektedir. 60 dakkalık çalışmaların sonunda 25 mM NaCl için giderim verimi %80.94, 50 mM NaCl için giderim verimi %80.15 ve 100 mM NaCl için giderim verimi %81.85 olarak bulunmuştur. Bu deneylerin ilk 15 dakikası sonunda KOİ giderim verimleri artan destek elektrolit konsantrasyonuna göre sırasıyla %56.27, %56.34 ve %66.35 olarak bulunmuştur. Çalışmalar 12.5 mA/cm² akım yoğunluğunda, doğal pH'da, destek elektrolitsiz olarak yürütüldüğünde 60 dakika sonundaki KOİ giderim verimi %82.03 olup

destek elektrolit konsantrasyonunun KOİ giderim verimini çok fazla etkilemediği görülmektedir.

Tablo 21 incelendiğinde 25 mM NaCl destek elektrolit varlığında, 12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da yapılan deneye ait değişen şartlar görülmektedir. Destek elektrolit katıldıktan sonra Tablo 15 verileri ile yapılan karşılaştırmalarda sıcaklık artış eğiliminin azaldığı fark edilmektedir. Başlangıç sıcaklığı 22.0°C'den 57.20°C'ye yükselmiştir. 60. dakika pH değerinde destek elektrolitsiz denemeye göre bir miktar düşme meydana gelerek deney başlangıç pH'sı 7,75'den 9.06'ya çıkmıştır. 25 mM destek elektrolit sonrası 4170 mS/cm'e çıkan iletkenlik değeri deney sonucunda 3550 mS/cm seviyesine düşmüştür. Potansiyel fark değeri destek elektrolit sonrası 12.60 volt seviyesine düşmüş olup bu değer deney sonunda 21.17 volt seviyesine yükselmiştir.

Tablo 21. 12.50 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH'da, 25 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.75	4170	22.00	12.60	5.10	0.00
5	9.20	4250	27.80	9.40	5.10	53.39
10	8.67	4180	32.00	14.60	5.10	55.57
15	8.90	4270	36.00	14.62	5.10	56.27
30	8.95	3920	41.60	7.40	5.10	69.33
45	9.08	3800	51.10	17.70	5.10	77.26
60	9.06	3550	57.20	21.17	5.10	80.94

Tablo 22'de ise destek elektrolit türü 2 katına çıkarılarak 50 mM NaCl kullanımı ile 12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da yapılan deney için değişen şartlar verilmiştir. Destek elektrolit arttırıldıktan sonra Tablo 21 verileri ile yapılan karşılaştırmalarda sıcaklık artışının biraz daha azalarak 22.20°C'den 52.70°C'ye çıktığı, pH değerinde belirgin bir fark olmadığı, başlangıç pH değeri 7.77'iken deney sonunda 8.90 değerine çıktığı görülmüştür. Destek elektrolitin 50 mM seviyesine çıkarılmasına paralel olarak başlangıç iletkenlik değeri 6750 mS/cm'ye yükselmiştir. Deney sonunda bu değer 6340 mS/cm'ye düşmüştür. Potansiyel fark değeri ise arttırılan destek elektrolit karşısında belirgin bir şekilde düşüş göstermiş ve başlangıçta 13.70 volt olan değer deney sonunda 8.95 volt değerine gerilemiştir.

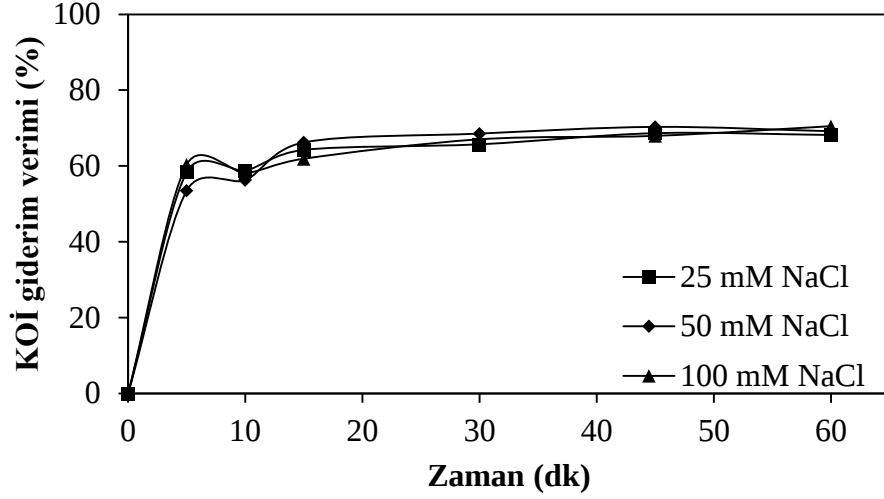
Tablo 22. 12.50 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 50 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.77	6750	22.20	13.70	5.10	0.00
5	9.18	6740	26.80	11.10	5.10	43.40
10	9.23	6700	31.20	10.66	5.10	50.29
15	9.40	6700	33.00	10.49	5.10	56.34
30	9.69	6540	37.80	7.90	5.10	67.30
45	9.40	6370	42.10	8.90	5.10	75.86
60	8.90	6340	52.70	8.95	5.10	80.15

12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH’da 100 mM konsantrasyon ile en fazla destek elektrolit katılan deneydeki veriler Tablo 23’de verilmiştir. Bu verilerin diğer destek elektrolit konsantrasyonlarına göre karşılaştırılması yapıldığında iletkenliğin 12040 mS/cm seviyesine kadar arttığı, dirençte azalmalar meydana geldiği ve potansiyel farkın 11.10 volt değerinden 6.49 volt değerine düştüğü görülmüştür. Sıcaklık 50 mM konsantrasyonlu destek elektrolit deneyine benzer şekilde 51.40°C’ye yükselmiş olup pH değeri 7.79 başlangıç değerinden deney sonunda 8.83’e çıkmıştır.

Tablo 23. 12.50 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 100 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.79	12040	24.00	11.10	5.10	0.00
5	8.52	11880	29.90	6.80	5.10	59.65
10	9.30	11530	35.40	6.49	5.10	61.79
15	9.20	11500	38.40	6.40	5.10	66.35
30	9.14	11420	44.70	6.01	5.10	74.16
45	8.97	11300	46.90	6.95	5.10	80.56
60	8.83	11150	51.40	6.49	5.10	81.85



Şekil 12. 18.75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi

Şekil 12 incelendiğinde 18.75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, doğal pH için yapılan deneylerde KOİ giderim verimleri, 25 mM, 50 mM ve 100 mM destek elektrolit konsantrasyonlarında ilk 15 dakikada sırasıyla %64.24, %66.23 ve %62.16 olarak bulunmuştur. 60 dakikanın sonundaki giderim verimleri ise sırasıyla %68.16, %69.19 ve %70.54 olarak bulunmuştur. 18.75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda destek elektrolitsiz denemeler sıcaklık artışı nedeni ile doğal pH'da yapılamamış olup bu akım yoğunluğunda KOİ giderim verimi üzerine destek elektrolit konsantrasyonunun etkisi incelenememiştir.

Tablo 24'de 18.75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve doğal pH'da, 25 mM NaCl destek elektrolit sonrası yapılan deneyin değişen şartlar verilmiştir. Destek elektrolit katıldıktan sonra Tablo 17 verileri (destek elektrolitsiz) ile yapılan karşılaştırmalarda sıcaklığın çok değişmediği görülmüştür. Başlangıç sıcaklığı 22.70°C 'den 60 dakikalık deney sonrası 82.80°C 'ye yükselmiştir. Destek elektrolit eklendikten sonra başlangıç pH'sının 7.98'den deney sonunda 9.40'a çıktığı gözlemlenmiştir. 25 mM destek elektrolit ilavesi sonrası 4210 mS/cm iletkenliğine çıkan değer deney sonucunda 2950 mS/cm seviyesine düşmüştür. Potansiyel fark değeri destek elektrolit sonrası 18.90 volttan deney sonunda 44.28 volta yükselmiştir.

Tablo 24. 18.75 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 25 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.98	4210	22.70	18.90	7.50	0.00
5	8.20	4050	33.90	14.87	7.50	58.36
10	8.33	3990	42.10	16.70	7.50	58.79
15	8.70	3840	50.40	16.80	7.50	64.24
30	9.45	3280	56.20	30.30	7.50	65.71
45	9.39	3020	78.40	44.30	7.50	68.64
60	9.40	2950	82.80	44.28	7.50	68.16

Tablo 25 incelendiğinde 18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH’da, 50 mM NaCl destek elektrolit ilavesi sonrasında yapılan deneydeki değişen çalışma şartları verilmiştir. Destek elektrolit katıldıktan sonra Tablo 24 verileri ile yapılan karşılaştırmalarda deney sonundaki sıcaklık değerlerinin farkı yaklaşık 20°C olarak belirlenmiştir. Başlangıç sıcaklığı 22.30°C’den 60 dakikalık deney sonunda 63.50°C’ye yükselmiştir. Destek elektrolit eklendikten sonra başlangıç pH’sının 7.89’dan 9.10’a çıktığı gözlemlenmiştir. 50 mM destek elektrolit ilavesi sonrası 6780 mS/cm iletkenliğine çıkan değer deney bittiğinde 5550 mS/cm’ye düşmüştür. Potansiyel fark değeri destek elektrolit sonrası 10.11 volt değerinden deney sonunda 31.20 volt seviyesine yükselmiştir.

Tablo 25. 18.75 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH’da, 50 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.89	6780	22.30	10.11	7.50	0.00
5	8.85	6660	27.80	8.70	7.50	53.50
10	8.89	6580	30.90	8.15	7.50	56.26
15	9.13	6460	36.40	7.56	7.50	66.23
30	9.26	6210	43.30	7.57	7.50	68.56
45	9.18	5920	50.20	15.10	7.50	70.33
60	9.10	5550	63.50	31.20	7.50	69.19

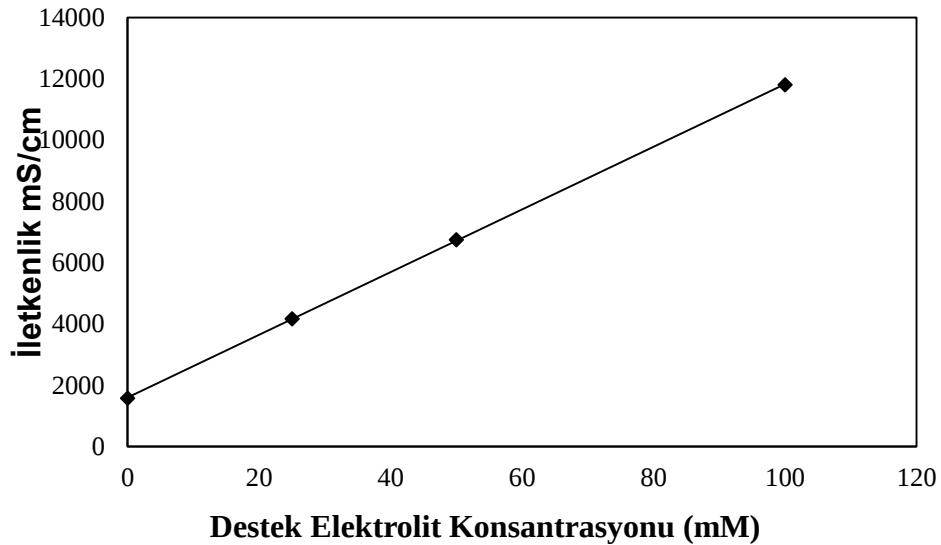
18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH’da, 100 mM konsantrasyon ile en fazla destek elektrolit ilave edilen deneydeki veriler Tablo 26’da verilmiştir. Bu değerlerin diğer destek elektrolit konsantrasyonlarına göre karşılaştırılması yapıldığında iletkenlik 12100 mS/cm seviyesine çıkmıştır. 25 ve 50 mM destek elektrolit eklenerek yapılan deneyler ile 100 mM destek elektrolit eklenen deneyin sonucuna göre konsantrasyon artışı ile sistemdeki direncin daha da azaldığı görülmüştür. Bu sebeple potansiyel farkta büyük bir artış olmamış ve deney başlangıcında 12.88 volt olan değer deney sonunda 13.40 volt değerine yükselmiştir.

Sıcaklık 50 mM destek elektrolit deneyinde olduğu gibi yükseliş göstermiş ve 24.80°C'den 63.80°C seviyesine çıkmıştır. pH değeri 7.92 başlangıç değerinden deney sonunda 6.90'a düşmüştür.

Tablo 26. 18.75 mA/cm² Akım Yoğunluğunda, Doğal pH'da, 100 mM NaCl Destek Elektrolit Varlığında Deneysel Şartların Değişimi

t (dak)	pH	İletkenlik (mS/cm)	Sıcaklık (°C)	V (volt)	Akım şiddeti (A)	Verim (%)
0	7.92	12100	24.80	12.88	7.50	0.00
5	8.84	11820	32.20	6.50	7.50	60.71
10	8.92	11611	35.50	7.50	7.50	63.56
15	9.03	11578	38.70	9.22	7.50	62.16
30	9.25	11503	48.50	8.99	7.50	67.14
45	8.10	11482	55.70	12.29	7.50	68.54
60	6.90	11314	63.80	13.40	7.50	70.54

Destek elektrolit konsantrasyonu arttıkça atıksuyun iletkenliğinin lineer olarak arttığı görülmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Farklı destek elektrolit konsantrasyonlarında atıksu iletkenlik değişimleri

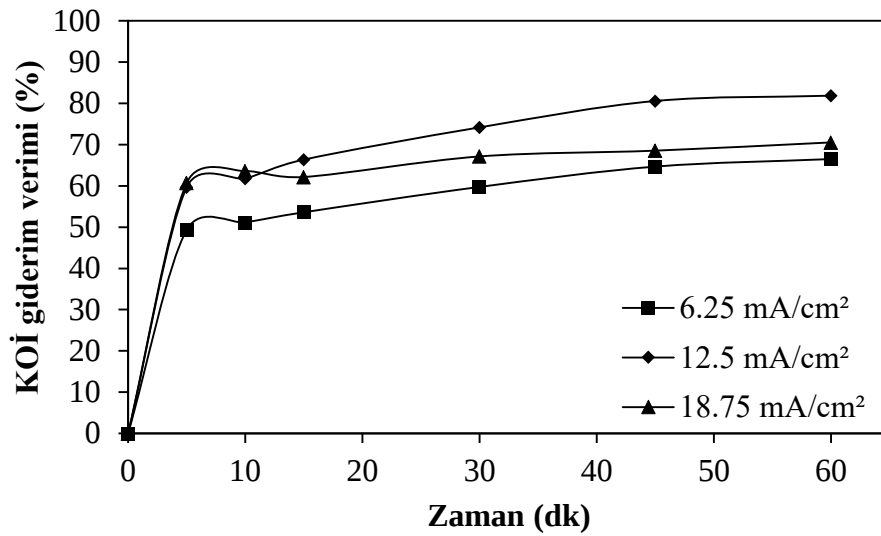
Şekil 13 incelendiğinde atıksuyun iletkenlik değeri destek elektrolitsiz iken 1580 mS/cm olup 25mM, 50mM ve 100 mM NaCl ilave edildiğinde aynı atıksuyun iletkenliğinin sırasıyla 4170 mS/cm, 6750 mS/cm ve 12040 mS/cm değerlerine çıktığı görülmüştür.

Destek elektrolit konsantrasyonlarındaki değişimin KOİ giderim verimlerine etkisinin incelendiği denemeler sonunda destek elektrolit kullanımının bütün akım yoğunluklarında iletkenlik değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Artan iletkenlik değerleri ile birlikte hem potansiyel gerilim değerlerinin hem de sıcaklıkların yüksek oranda artışı engellenmiş ve

böylece elektrokoagülasyon prosesinde ortaya çıkan sorunların giderilmesi sağlanmıştır.

Akım Yoğunluklarındaki Değişimin KOİ Giderim Verimleri Üzerindeki Etkisi

Akım yoğunluğu elektrotlar tarafından depolanan alüminyum ve demir miktarlarını, kabarcık oluşum hızlarını, büyüklüklerini belirler (Mollah ve ark. 2004; Chen 2004; Uğurlu ve ark. 2008, Golder ve ark. 2007). Bu nedenle kirletici giderim verimliliğini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Akım yoğunluğundaki değişimlerin etkisinin incelendiği çalışmalar atıksuyun doğal pH değerinde ve 100 mM NaCl eklenerek yapılmıştır. Elektrokoagülasyon sisteminde akım yoğunlukları 6.25, 12.5 ve 18.75 mA/cm² olacak şekilde ayarlanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 14’de gösterilmiştir.



Şekil 14. Akım yoğunluklarındaki değişimin KOİ giderim verimleri üzerine etkisi

Şekil 14 incelendiğinde çalışmanın ilk 15 dakikası sonunda KOİ giderim verimleri 6.25 mA/cm² için %53.60, 12.5 mA/cm² için %66.35 ve 18.75 mA/cm² için %62.16 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler 60 dakikanın sonuna gelindiğinde sırasıyla %66.50, %81.85 ve %70.54 olarak belirlenmiş olup akım yoğunluğundaki artış bir noktaya kadar KOİ giderim verimlerini arttırmış, daha fazla arttırıldığında ise KOİ giderim verimlerini düşürmüştür.

Atıksuya destek elektrolit eklenmesi giderim verimi açısından bir etken oluşturmamış olup kullanılan enerji sarfiyatında tasarruf sağlamıştır.

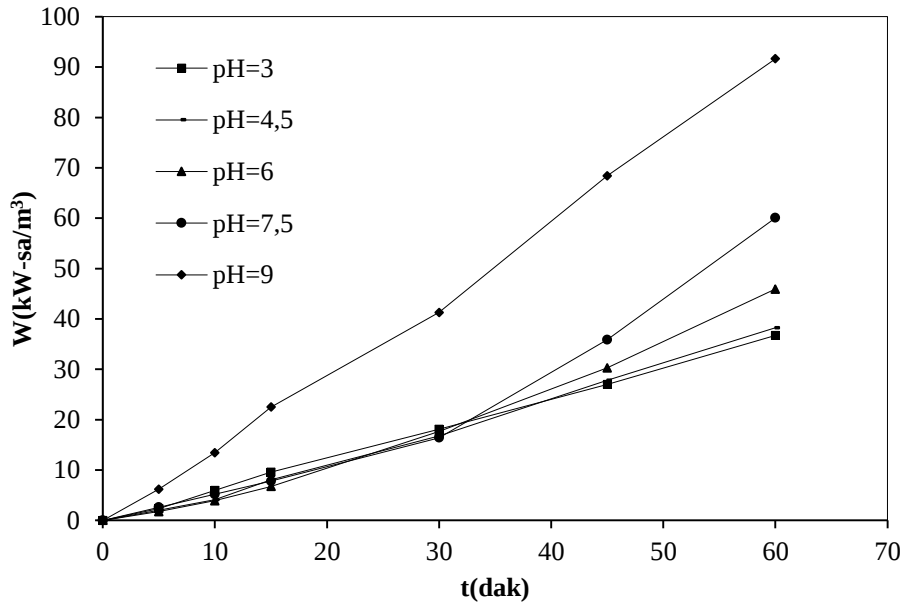
Farklı Deney Şartlarında Enerji Sarfiyatlarının Değişimi

Enerji sarfiyatlarındaki değişimin incelenmesi amacı ile değişen akım yoğunluklarında (6.25 mA/cm², 12.50 mA/cm² ve 18.75 mA/cm²) ve başlangıç pH değerlerinde (3, 4.5, 6, 7.5, 9) bir dizi deneyler yapılmıştır. Bu hesaplamalar optimum şartlarda destek elektrolitlerin

kullanılmasıyla yapılan deneyler için de yapılmış olup enerji sarfıyatı üzerinde destek elektrolitin etkisi incelenmiştir.

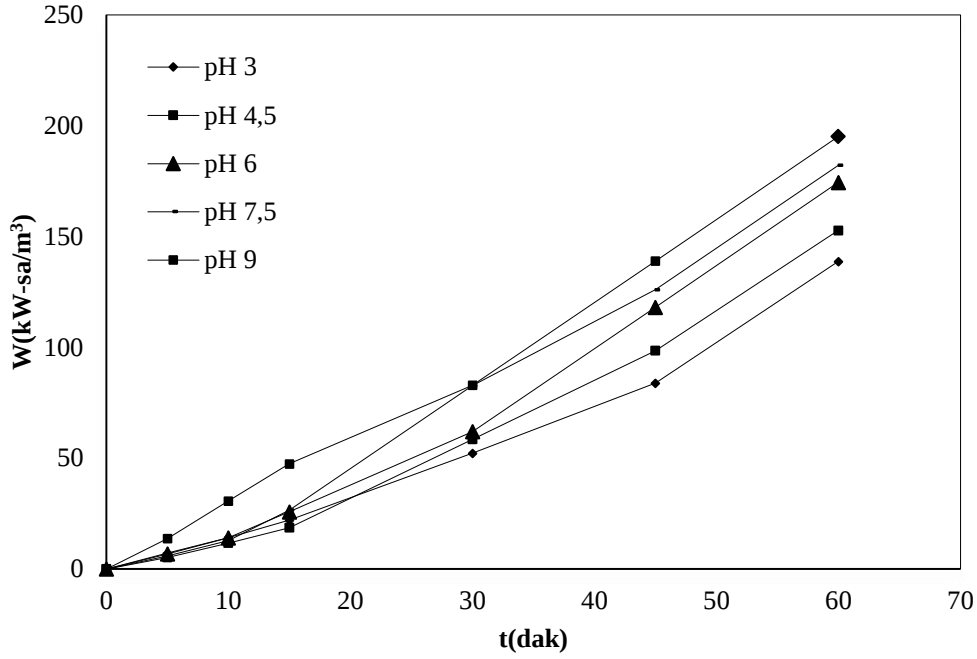
Değişen Başlangıç pH ve Akım Yoğunluklarındaki Enerji Sarfıyatı

6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı pH değerlerinde yapılan deney sonuçlarına göre enerji sarfıyatının pH değerlerinin yükselmesi ile arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 15). pH 3’de elektrik sarfıyatı 36.71 kW-sa/m³, pH 4.5’de elektrik sarfıyatı 38.24 kW-sa/m³, pH 6’da elektrik sarfıyatı 45.92 kW-sa/m³, pH 7.5’de elektrik sarfıyatı 60.06 kW-sa/m³ ve pH 9’da elektrik sarfıyatı 91.66 kW-sa/m³ olarak bulunmuştur.



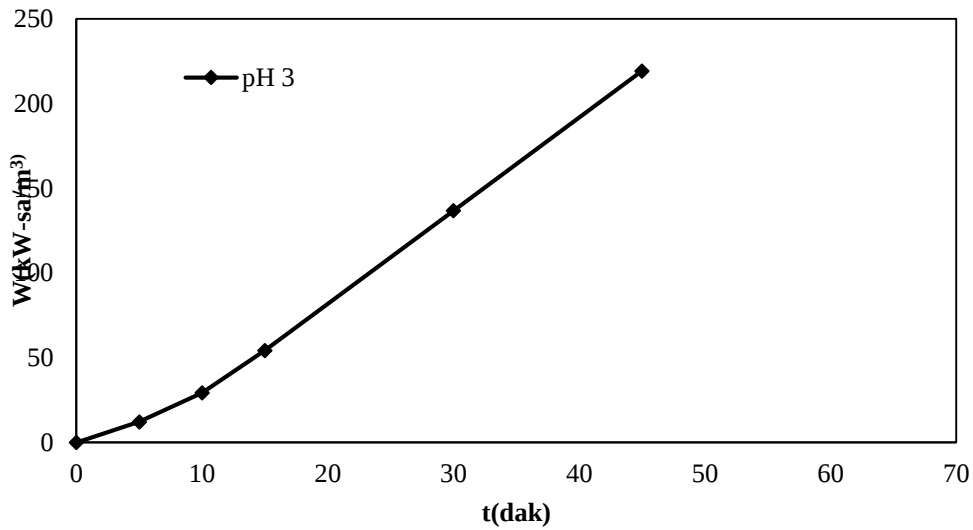
Şekil 15. 6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı başlangıç pH'larında enerji sarfıyatları

12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda pH değerleri arttıkça enerji sarfıyatının arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 16). 60 dakikalık deney süreleri sonunda pH 3’de enerji sarfıyatı 138.70 kW-sa/m³, pH 4.5’de enerji sarfıyatı 152.70 kW-sa/m³, pH 6’da enerji sarfıyatı 174.42 kW-sa/m³, pH 7.5’de enerji sarfıyatı 182.14 kW-sa/m³ ve pH 9’da enerji sarfıyatı 195.06 kW-sa/m³ olarak hesaplanmıştır. Sabit akım şiddeti altında gerçekleştirilen denemelerde pH değerlerinin yükselmesiyle artan potansiyel fark değerlerinden dolayı elektrik enerjisi tüketimi artmaktadır.



Şekil 16. 12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda farklı başlangıç pH'larında enerji sarfiyatları

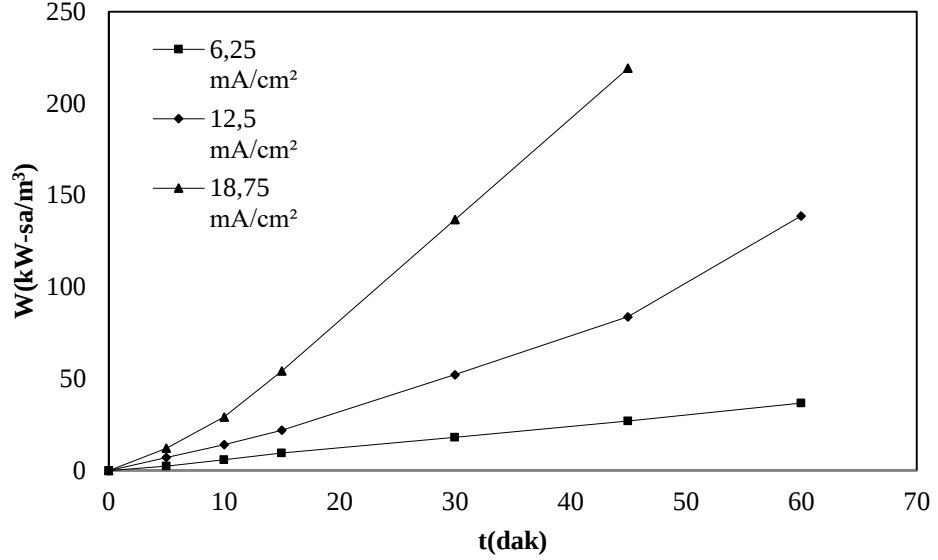
18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda yapılan denemelerde sıcaklık artışı sebebiyle sadece pH 3'de deney yürütülebilmiştir. Yapılan bu deney sonucuna göre elektrik sarfiyatı 219.24 kW-sa/m³ olmuştur (Şekil 17).



Şekil 17. 18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda pH 3'de enerji sarfiyatı

Atıksuyun doğal pH değeri 7.5 olduğundan düşük başlangıç pH değerlerinin elde edilebilmesi için derişik HNO₃ kullanılması elektriksel iletkenlik değerinin artmasına ve dolayısı ile potansiyel fark ve enerji sarfiyatı değerlerinin düşmesine sebebiyet vermiştir (Dede, 2015).

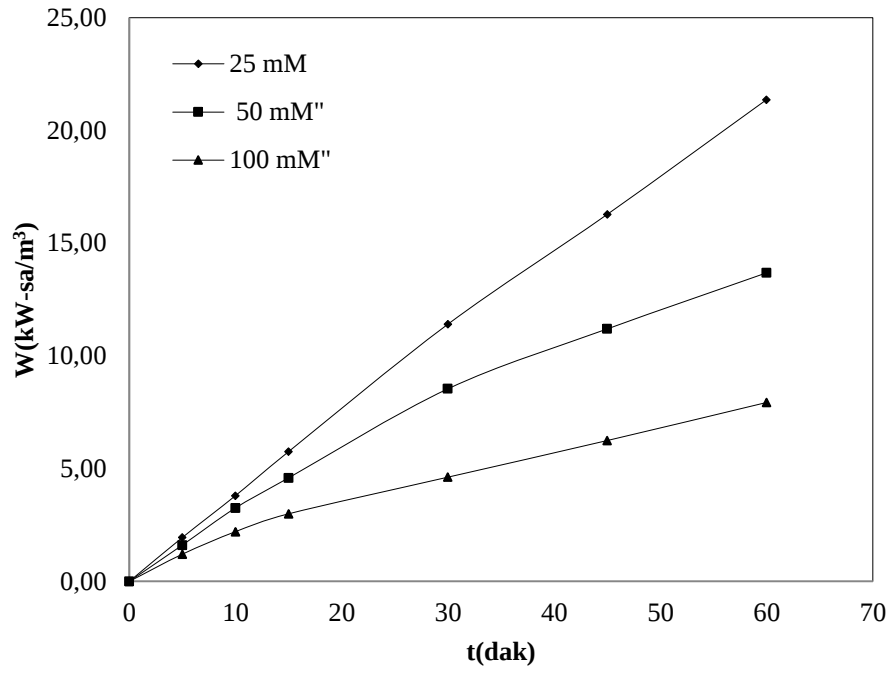
pH 3’de 6.25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda deney sonunda enerji sarfıyatı 36.71 kW-sa/m^3 , 12.5 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 138.70 kW-sa/m^3 ve 18.75 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 219.24 kW-sa/m^3 olarak hesaplanmış olup akım yoğunluğunun artması ile enerji sarfıyatının arttığı görülmüştür (Şekil 18).



Şekil 18. pH 3’de farklı akım yoğunluklarında enerji sarfıyatı

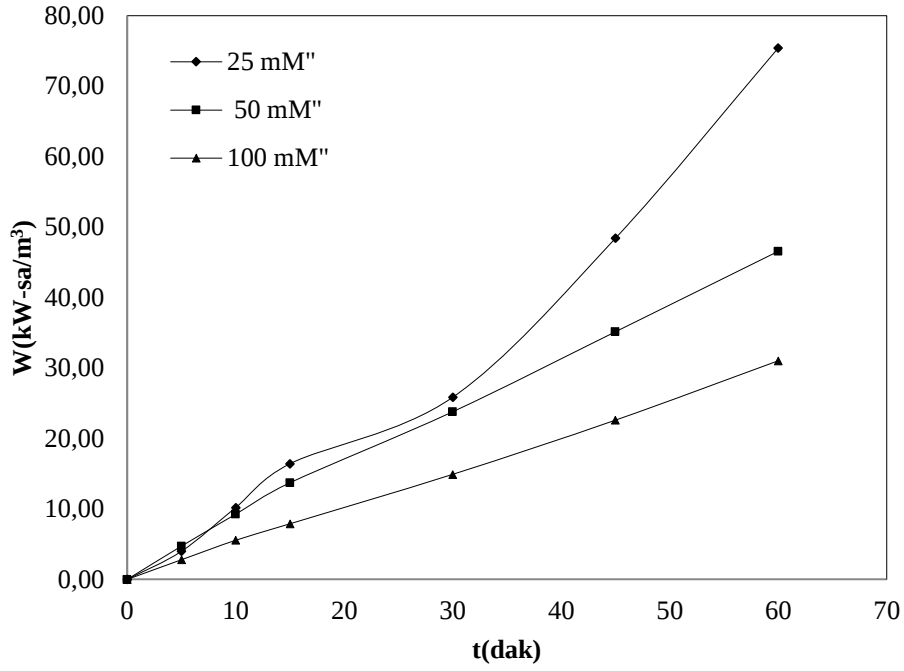
Destek Elektrolit Kullanılması İle Enerji Sarfıyatları

6.25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 25 mM, 50 mM ve 100 mM konsantrasyonlarında destek elektrolit kullanılarak doğal pH’da yapılan deneylerde destek elektrolit konsantrasyonu yükseldikçe artan iletkenlik sonucu sistemde oluşan direnç azalmakta ve enerji sarfıyatı düşmektedir. 60 dakikalık deney sonucunda 25 mM, 50 mM ve 100 mM konsantrasyonlarında oluşan enerji sarfıyatları sırası ile 21.36 kW-sa/m^3 , 13.69 kW-sa/m^3 ve 7.94 kW-sa/m^3 olarak hesaplanmıştır (Şekil 19). Destek elektrolitin kullanılmadığı aynı şartlarda yapılan denemede enerji sarfıyatı 60.06 kW-sa/m^3 olarak bulunmuştur. En düşük destek elektrolit konsantrasyonundaki sarfiyattan yaklaşık 3 kat kadar fazla bir enerji kullanımı gerçekleşmiştir.



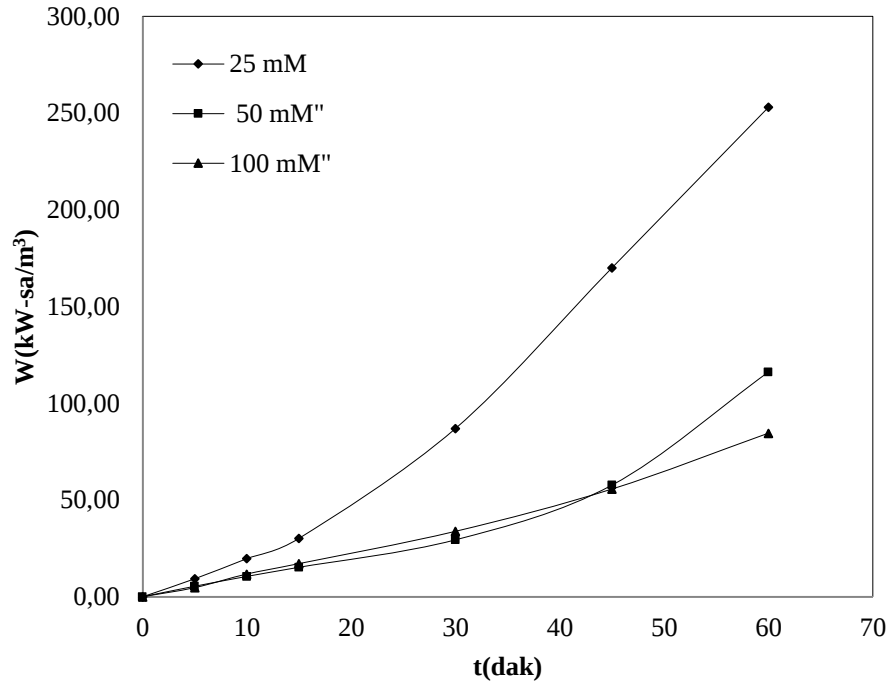
Şekil 19. 6.25 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da farklı konsantrasyonlardaki destek elektrolitler varlığında enerji sarfiyatları

12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda 25 mM, 50 mM ve 100 mM konsantrasyonlarında destek elektrolit kullanılarak doğal pH'da yapılan deneylerde destek elektrolit konsantrasyonu yükseldikçe iletkenlik artmıştır. Sistemde oluşan direnç iletkenliğe bağlı olarak azalmış ve enerji sarfiyatları düşmüştür. Deney sonucunda 25 mM, 50 mM ve 100 mM konsantrasyonlarında oluşan enerji sarfiyatları sırası ile 75.41 kW-sa/m³, 46.54 kW-sa/m³ ve 31.01 kW-sa/m³ olarak hesaplanmıştır (Şekil 20). Destek elektrolitin kullanılmadığı aynı şartlarda yapılan denemede enerji sarfiyatı 182.14 kW-sa/m³ olarak bulunmuştur. En düşük destek elektrolit konsantrasyonundaki sarfiyattan yaklaşık 2.5 kat kadar fazla bir enerji kullanımı gerçekleşmiştir.



Şekil 20. 12.50 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da farklı konsantrasyonlardaki destek elektrolitler varlığında enerji sarfiyatı

18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda 25 mM, 50 mM ve 100 mM konsantrasyonlarında destek elektrolit kullanılarak doğal pH'da yapılan deneylerde destek elektrolit konsantrasyonu yükseldikçe iletkenlik artmıştır. İletkenlikteki artışa bağlı olarak sistemdeki direnç azalmış ve enerji sarfiyatları düşmüştür. Deney sonucunda 25 mM, 50 mM ve 100 mM konsantrasyonlarında oluşan enerji sarfiyatları sırası ile 253.13 kW-sa/m³, 116.26 kW-sa/m³ ve 84.54 kW-sa/m³ olarak hesaplanmıştır (Şekil 21). Destek elektrolitin kullanılmadığı 18.75 mA/cm² akım yoğunluğundaki denemeler pH 3 haricinde diğer pH değerlerinde yüksek sıcaklık nedeni ile yapılamadığından doğal pH'daki enerji sarfiyatları karşılaştırılamamıştır.



Şekil 21. 18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda ve doğal pH'da farklı konsantrasyonlardaki destek elektrolitler varlığında enerji sarfiyatı

Şekil 19, 20 ve 21 incelendiğinde doğal pH değerlerinde 6.25 mA/cm², 12.50 mA/cm² ve 18.75 mA/cm² akım yoğunluklarında destek elektrolit konsantrasyonu artırıldıkça atıksuyun iletkenlik değerleri artmakta ve sistemde direnç azalmaları görülmektedir. Bu sayede potansiyel farkların azaldığı ve enerji sarfiyatlarının düştüğü belirlenmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında Erzurum 1. Organize Sanayi Bölgesi bünyesinde bulunan Ergaz Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye ait olan tüp gaz depolama, tüp gaz dolumu ve tüp demirbaş üretimi gerçekleştirilen fabrikadan 2022 yılında alınan tüp boyama atıksuyu numunelerinin Atatürk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarlarında yapılan deneyler sonucunda elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı gerçekleştirilmiştir. Deney sisteminin performansı KOİ parametresinin ölçülmesi ile belirlenmiştir. KOİ giderim verimini elektrokoagülasyon prosesinde etkileyebileceği düşünülen atıksuyun başlangıç pH'sı, akım şiddeti ve destek elektrolit konsantrasyonu değişken parametreler olarak seçilmiştir. Bu değişken parametreler sonucunda elde edilen veriler ile KOİ giderim verimleri ve enerji tüketim sarfiyatları hesaplanmıştır.

Farklı pH değerlerinde yapılan deneyler ile arıtım verimleri hesaplanmış ve atıksuyun doğal pH'sı optimum pH olarak belirlenmiştir. İşlemler sırasında sıcaklık, iletkenlik ve potansiyel fark değişimleri gözlemlenmiştir. Akım yoğunlukları da deneylerde değiştirilerek farklı pH ve akımlarda deney verimleri incelenmiş olup daha sonra sisteme destek elektrolit katkısı yapılmıştır. Destek elektrolit olarak NaCl denenmiştir. Farklı akım yoğunluklarında 25 mM, 50 mM ve 100 mM destek elektrolit konsantrasyonları atıksuya eklendiğinde, destek elektrolit konsantrasyonunun her bir akım yoğunluğunda artırılması ile sistemdeki iletkenliğin paralel şekilde arttığı ve direncin azaldığı görülmüştür. Bu şartlar altında deneylerde KOİ giderim verimleri belirlenmiştir.

Deneyler yapılırken 1 L su numunesi reaktör içerisine eklenmiştir. Atıksuyun doğal pH değeri 7.5 olup bunun haricinde başlangıç pH değerleri 3, 4.5, 6, 9 olacak şekilde ayarlanarak farklı pH'larda arıtım verimleri bulunmuştur. Başlangıç pH'sını 7.5 alarak 6.25 mA/cm² ve 12.50 mA/cm² akım yoğunluklarında yapılan deneylerde, KOİ giderim verimleri kontrol edildiğinde yüksek pH'larda yapılan deney verimlerinin, düşük pH'lara göre daha fazla olduğu görülmektedir. Yüksek pH'larda KOİ giderim veriminin fazla olması anot elektrolit olarak kullanılan alüminyum plakaların elektrokimyasal çözünmelerinde hidroksit türleri için en uygun pH aralığının sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Çözünürlük oranı az, flok oluşturma eğilimi yüksek Al(OH)₃ flokları, atıksuların pH 5.5 ile pH 7.5 değerleri arasında oluşmaktadır. Bu da kullandığımız atıksuyun arıtımının pH 7.5 değerinde en iyi sonuç verdiğini açıklamaktadır. Atıksu içerisindeki alüminyum plakalara 6.25 mA/cm², 12.50 mA/cm² ve 18.75 mA/cm² lik akım yoğunlukları, her bir pH için ayrı ayrı verilmiştir.

Deneylerde 5, 10, 15, 30, 45 ve 60. dakikalarda numuneler alınmış olup bu numunelerdeki pH, iletkenlik, sıcaklık, potansiyel fark ve akım yoğunlukları tablolar halinde verilmiştir. Gözlemler sonucunda asidik ortamda arıtım esnasında köpüklenme azalmış ve sistem dengeye daha erken ulaşmıştır. Fakat yüksek pH'larda direnç giderek artmakta, bu durum hem sistem ısısını arttırmakta hem de elektrik sarfiyatını yükseltmektedir. Hatta bu sıcaklık artışları sonucunda 18.75 mA/cm^2 akımda deneyler yapılamayacak sıcaklıklara ulaşmıştır. Sorunların ortadan kaldırılması için destek elektrolit olarak NaCl kullanılmıştır. Kullanılan destek elektrolit KOİ giderim verimini çok fazla etkilememesine rağmen iletkenliği artırarak oluşan sıcaklığı azaltmış ve direnci kırmıştır. Elektrik sarfiyatı da buna bağlı olarak azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda optimum şartlar hem KOİ giderim veriminin hem de enerji sarfiyatının dikkate alınması ile belirlenmiştir. Atıksuyun doğal pH değeri olan pH 7.5'da 12.50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda ve 100 mM destek elektrolit konsantrasyonunda optimum şartlar oluşturulmuş, bu şartlar altında en yüksek KOİ giderim verimi %81.85 olarak bulunmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda Organize Sanayi Bölgesinde faaliyet gösteren firmanın atıksuyunun çok yoğun ve yüksek debili olmaması sebebiyle elektrokoagülasyon yönteminin kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Atıksudaki askıda katı madde konsantrasyonu 100-150 mg/L'dir. 12.50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, atıksuyun doğal pH'sı olan 7.5 başlangıç pH'sında, 1 litre atıksuda 60 dakikalık deney sonucu alınan numunede askıda katı madde miktarı 50-70 mg/L civarlarına gerilemiştir. Bu miktarlarda askıda katı madde bulunduran bir atıksuyun arıtımı için içerisindeki ağır metallerin de varlığı düşünülerek geleneksel metotlar haricinde alternatif olarak elektrokimyasal arıtım yöntemlerinden elektrooksidasyon prosesi de kullanılabilir.

Erzurum Aziziye bölgesinde faaliyet gösteren 1. Organize Sanayi Bölgesi yönetimi tarafından belirlenen enerji faturalandırılmalarında elektriğin kW-sa birim fiyatı 2.50 TL'dir. Sisteme eklenen destek elektrolit sonrası 6.25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, doğal pH'da ve 25 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 21.36 kW-sa/m^3 enerji sarfiyatı gerçekleşmiştir. Bu da 6.25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 25 mM destek elektrolit konsantrasyonu sonucu m^3 başına atıksuyun arıtım maliyetini 53.40 TL/ m^3 olarak ortaya çıkarmıştır. Atıksuyun arıtım maliyeti, 50 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 13.69 kW-sa/m^3 olan enerji sarfiyatı karşılığı 34.23 TL/ m^3 ve 100 mM konsantrasyonda yapılan deneyde ise 7.69 kW-sa/m^3 olan enerji sarfiyatı karşılığı 19.26 TL/ m^3 olarak hesaplanmıştır.

12.50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, doğal pH'da ve 25 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 75.41 kW-sa/m^3 enerji sarfiyatı gerçekleşmiştir. Bu da 12.50 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 25 mM destek elektrolit konsantrasyonu sonucu m^3 başına atıksuyun arıtım

maliyetini 188.53 TL/m³ olarak ortaya çıkarmıştır. 50 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 46.54 kW-sa/m³ olan enerji sarfıyatı karşılığı arıtım maliyeti 116.35 TL/m³ ve 100 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 31.01 kW-sa/m³ olan enerji sarfıyatı karşılığı arıtım maliyeti 77.53 TL/m³ olarak hesaplanmıştır.

18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda, doğal pH'da ve 25 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 253.13 kW-sa/m³ enerji sarfıyatı gerçekleşmiştir. Bu da 18.75 mA/cm² akım yoğunluğunda 25 mM destek elektrolit konsantrasyonu sonucu m³ başına atıksuyun arıtım maliyetini 632.83 TL/m³ olarak ortaya çıkarmıştır. 50 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 116.26 kW-sa/m³ olan enerji sarfıyatı karşılığı arıtım maliyeti 290.65 TL/m³ ve 100 mM konsantrasyonda yapılan deneyde 84.54 kW-sa/m³ olan enerji sarfıyatı karşılığı arıtım maliyeti 111.35 TL/m³ olarak hesaplanmıştır.

Destek elektrolit konsantrasyonlarının arıtım verimine yüksek oranda bir etkisi olmadığı görülmüştür. Arıtımda destek elektrolitin kullanım amacı daha çok enerji sarfıyatındaki avantajıdır. Bu avantaj optimum şartlarda incelendiğinde 25 mM destek elektrolit konsantrasyonu ile 100 mM konsantrasyon arasında 111 TL/m³ bir fark oluştuğunu göstermektedir. Bu fark 50 mM konsantrasyon ile 100 mM konsantrasyon arasında 72.18 TL/m³ olmuştur. Destek elektrolit miktarının artırılması ile enerjiden tasarruf edilirken suyun NaCl oranının arttırılması da söz konusudur. Arıtılacak suyun bir parametresini istenilen seviyelere getirirken başka parametrelerde olumsuzluğa sebebiyet vermemek adına reaktöre 100 mM destek elektrolit konsantrasyonu ilavesi yerine 50 mM destek elektrolit konsantrasyonu ilave ederek atıksuda NaCl yoğunluğu düşürülürken m³ başına 72.18 TL enerji tasarrufundan vazgeçilebilir. Atıksu oluşumunun çok yoğun ve yüksek debili olmaması sebebiyle enerji kullanımının bir miktar artması maliyet açısından tolere edilebilir.

KAYNAKÇA

- Adhoum, N. and Monser L., 2004. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing*, 43, 1281-1287.
- Akyol, A., 2012. Treatment of Paint Manufacturing Wastewater by Electrocoagulation. *Desalination*, 285: 91-99.
- Anglada, A., Urtiaga, A., Ortiz, I., 2009. Pilot scale performance of the electro-oxidation of landfill leachate at boron-doped diamond anodes. *Environmental Science and Technology*, 43 (6), 2035-2040.
- Araya-Farias, M., Bazinet, L., 2006. Effect of calcium and carbonate concentrations on anionic membrane fouling during electrodialysis. *Journal of colloid and interface science*, 296 (1), 242-247.
- Artibel Certification. (2013) <http://www.csi-turkey.com.tr/cevre-eitimi-C183/atk-su-egitimiP1.html>
- Avsar, Y., Kurt U. and Gonullu T., 2007. Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 148, 340-345.
- Baker, H., 1991. Genel Kimya KTÜ Yayınları.
- Camcıoğlu, Ş., Özyurt, B., Zeybek, Z., & Hapoğlu, H. (2016). Su bazlı boya atık suyu arıtımında bir adım ileri gelişmiş deneysel pH kontrol uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(3).
- Carbonio, E. A., Nagao, R., Gonzalez, E. R., Varela, H., 2009. Temperature effects on the oscillatory electro-oxidation of methanol on platinum. *Physical chemistry chemical physics: PCCP*, 11 (4), 665-670.
- Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41.
- Dede, Y. Evsel atıksuların kesikli ve sürekli sistemde elektrokoagülasyon arıtım yöntemi ile arıtımının incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Domínguez, J. R., González, T., Palo, P., Sánchez-Martín, J., 2010. Anodic oxidation of ketoprofen on boron-doped diamond (BDD) electrodes. Role of operative parameters. *Chemical Engineering Journal*, 162 (3), 1012-1018.
- Donini, J.C., Kan J., Szykarczuk J., Hassan T.A. and Kar K.L., 1994. The operating cost of electrocoagulation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72, 1007-1012.
- Drogui, P., Asselin M., Brar S.K., Benmoussa H. and Blais J-F., 2008. Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. *Separation and Purification Technology*, 61, 301-310.
- Dutra, A. J. B., Santos, I. D., Afonso, J. C., 2010. Behavior of a Ti/RuO₂ anode in concentrated chloride medium for phenol and their chlorinated intermediates electrooxidation. *Separation and Purification Technology*, 76 (2), 151-157.
- EPA, 1990. The Paint Manufacturing Industry, US Environment Protection Agency, EPA/

- Fino, D., Jara, C., Saracco, G., Specchia, V., Spinelli, P., 2005. Deactivation and regeneration of Pt anodes for the electro-oxidation of phenol. *Journal of Applied Electrochemistry*, 35 (4), 405-411.
- Golder, A.K., Samanta A.N. and Ray S., 2007. Removal of trivalent chromium by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 53, 33-41.
- Gönüllü, M. T., Göknil, M. H. ve Toröz, G., 1983. Boya Endüstrisi Kullanılmış Sularının Tasfiyesi, II Ulusal Çevre Sempozyumu, İzmir
- Gözmen, B., 2002. Sulu Ortamda Refrakter Toksik Organik Bileşiklerin Elektrokimyasal Fenton Tepkimesi Aracılığı ile Parçalanmalarının İncelenmesi ve Değişik Çalışma Elektrotlarının Etkinliklerinin Kıyaslanması. (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Grimm, J., Bessarabov, D., Sanderson, R., 1998. Review of electroassisted methods for water purification. *Desalination*, 115 (3), 285–294.
- Hacıoğlu, B., 2006. Elektrodializ yöntemi ile model çözeltilerden sitrik asit geri kazanımı. (Yüksek Lisans Tezi), Osmangazi Üniversitesi Eskişehir.
- Kapdan Karapınar, İ., Kargı F., 2000. Atıksulardan tekstil boyar maddelerinin adsorpsiyonlu biyolojik arıtım ile giderimi. *Turkish Journal of Engineering Environmental Science*, 24:162-172.
- İrdemez, Ş., 2005. Phosphate removal from wastewaters by electrocoagulation, Ph.D. Thesis, School of Natural and Applied Science, Atatürk University, Erzurum.
- İrdemez, Ş., Demircioğlu, N., Tosunoğlu, V., 2011. The effects of supporting electrolyte type and concentration on the phosphate removal. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 1 (2), 35-40.
- Kaplan, F., 2007. Zeytin Kara Suyundaki Toksik Fenolik Bileşiklerin, Farklı Karbon Elektrotlar Kullanılarak, Elektrofenton Yöntemi İle Parçalanmaları. (Yüksek Lisans Tezi), Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Kong, W., Wang, B., Ma, H., Gu, L., 2006. Electrochemical treatment of anionic surfactants in synthetic wastewater with three-dimensional electrodes. *Journal of hazardous materials*, 137 (3), 1532-1537.
- Koparal, A.S., Gökşen Ş. ve Ögütveren Ü.B., 1999. Petrol formasyon suyunun elektrokimyasal ve geleneksel yöntemler ile arıtılabilirliğinin incelenmesi. *Türkiye’de Çevre Kirlenmesi Öncelikleri Sempozyumu III*, Cilt I, 370-379.
- Kul, S., Boncukcuoğlu, R., Yılmaz, A. E., & Fil, B. A. (2015). Treatment of olive mill wastewater with electro-oxidation method. *Journal of the Electrochemical Society*, 162(8), G41.
- Lee, H.-J., Choi, J.-H., Cho, J., Moon, S.-H., 2002. Characterization of anion exchange membranes fouled with humate during electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, 203
- Liu, H., Li, X. Z., Leng, Y. J., Wang, C., 2007. Kinetic modeling of electro-Fenton reaction in aqueous solution. *Water research*, 41 (5), 1161-1167.
- Löschau M, Krätke R, 2005. Efficacy and toxicity of self-polishing biocide-free antifouling paints. *Environmental Pollution*, 138 (2): 260–267.
- Mollah, M.Y.A, Morkovsky P., Gomes J.A.G., Kesmez M., Parga J. and Cocke D.L., 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of*

Hazardous Materials , B114, 199-210.

- Mollah, M.Y.A., Schennach R., Parga J.R. and Cocke D.L., 2001. Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, B84, 29-41.
- Öğütveren, Ü.B. and Koparal S., 1997. Electrocoagulation for oil-water emulsion treatment. *Journal of Environmental Science and Health*, 32 (9-10), 2507-2520.
- Özoğul, S.Ç. (1993). “Yaygın Eğitim Düzeyinde Çevre İçin Eğitim,” Çevre Eğitimi, Türkiye Çevre Vakfı Yayınları, 65-80, Ankara.
- Production EL, Marketing G, 2008. Çevre Dostu Ürün Kavramına Bütünsel Yaklaşım. Temiz Üretim Sistemi. Eko-Etiket Yeşil Pazarlama, Ankara, Türkiye.
- Sathish, M., & Viswanath, R., 2005. Electrochemical degradation of aqueous phenols using graphite electrode in a divided electrolytic cell. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 22(3), 358-363.
- Sundarapandiyan, S., Chandrasekar, R., Ramanaiah, B., Krishnan, S., Saravanan, P., 2010. Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater. *Journal of hazardous materials*, 180(1-3), 197-203.
- Topcuoğlu B, Önal MK, Arı N, 2003. Toprağa Uygulanan Kentsel Arıtma Çamurunun Domates Bitkisine Etkisi I. Bitki Besinleri ve Ağır Metal İçerikleri. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16(1): 87-96
- Türk, H., 1999. Elektrokimya. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi İlköğretim Öğretmenliği Lisans Tamamlama Programı Yayınları.
- Uğurlu, M., Gürses A., Doğar Ç. and Yalçın M., 2008. The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation. *Journal of Environmental Management*, 87, 420-428.
- Ulusoy, K., (2007), Küresel Ticaretin Son Hedefi: Su Pazarı, Kristal Kitaplar Yayınevi, Ankara
- Willis, M. S., Tosun, I., 1980. A rigorous cake filtration theory. *Chemical Engineering Science*, 35 (12), 2427-2438.
- Yazıcı, S., 2012. Elektrodializ Bipolar Membran Proseslerin Tıkanma Mekanizması ve Önleme Çalışmalarının Analizi: Sızıntı Suyu Örneği. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yıldırım, Ö., 2007. Kağıt Endüstrisi Atıksularının Elektro-Fenton Yöntemiyle Arıtılabilirliğinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
- Yücel, M., & Ekmekçiler, Ü. S. (2008). Çevre dostu ürün kavramına bütünsel yaklaşım; temiz üretim sistemi, eko-etiket, yeşil pazarlama. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(26), 320-333.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Sami AKBIYIK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	3 Temmuz Lisesi
Lisans:	Çevre Mühendisliği
Yüksek lisans:	Çevre Mühendisliği
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	
Almanca:	
Rusça:	
Diğer	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Çevre Mühendisleri Odası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	