



**GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN
ELEKTROKİMYASAL
KOAGÜLASYONLA ARITIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Tuğçe ÇELİK BAŞOL

Eskişehir 2022

**GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKİMYASAL
KOAGÜLASYONLA ARITIMI**

Tuğçe ÇELİK BAŞOL

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Teknolojisi Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2022

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Tuğçe ÇELİK BAŞOL'un GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKİMYASAL KOAGÜLASYONLA ARITIMI başlıklı çalışması 10/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Çevre Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof.Dr. Yusuf YAVUZ

Üye

: Prof.Dr. Alime ÇITAK

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Emine Esra GEREK

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

10/08/2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ęrencisi Tuęęe ÇELİK BAşOL, GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKİMYASAL KOAGÜLASYONLA ARITIMI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

ÖZET

GIDA ENDÜSTRİSİ ATIKSUYUNUN ELEKTROKİMYASAL KOAGÜLASYONLA ARITIMI

Tuğçe ÇELİK BAŞOL

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Teknolojisi Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2022

Danışman: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

Gıda üretim endüstrilerinde hammadde olarak kullanılan süt ve süt ürünleri, yağlar gibi yüksek kirlilik oluşturacak ürünler kullanılmasından ötürü atıksuları genellikle yüksek kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) içermektedir. Yüksek KOİ içeren atıksular ön arıtmadan geçirilmeden kanalizasyon alt yapısına verildiği zaman son deşarj noktasında bulunan arıtma tesisine aşırı bir kirlilik yükü oluşturmaktadır bu nedenle hem çevresel hem de mevzuatlar açısından önemli bir yere sahip bağlantı izin onayı alınamamaktadır. Araştırmacının danışmanlığını yapmış olduğu, Organize Sanayi Bölgesinde bulunan bir gıda firmasına ait bağlantı deşarj izin belgesi alımı esnasında karşılaştığı sorunların çözümü için yapmış olduğu araştırmalar ile yüksek lisans tezinin temel taşları atılmıştır. Atıksuyun arıtımının minimum maliyet, maksimum fayda mantığı ile tez konusunu belirlemiştir. Sonucunda bu çalışmada gıda endüstrisi atıksuyunun alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak galvonik akım cihazı ile 1, 1,5, 2, 2,5, 3 A akım yoğunlukları ve 5, 10, 20, 30, 40 mM dozajlarda Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) ve Sodyum Nitrat (NaNO_3) destek elektrolit ilavesi sonucunda elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtımı incelenmiştir.

Alüminyum elektrot ile 90 dakika süren arıtmada maksimum verim 2A ve 2,5A akım yoğunluğunda %51 oranda, 3A akım yoğunluğunda 20 mM Na_2SO_4 destek elektrolit ilavesi ile %79 oranda elde edilmiştir. Demir elektrot ile 90 dakika süren arıtmada maksimum verim 3A akım yoğunluğunda %72 oranda, 2,5A akım yoğunluğunda 20 mM NaNO_3 destek elektrolit ilavesi ile %73 oranda elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Alüminyum elektrot, Demir elektrot, Elektrokimyasal koagülasyon, Gıda endüstrisi atıksuyu, KOİ giderimi.

ABSTRACT

WASTEWATER TREATMENT IN THE FOOD INDUSTRY WITH ELECTROCHEMICAL COAGULATION

Tuğçe ÇELİK BAŞOL

Department of Environmental Engineering

Programme in Environmental Technology

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2022

Supervisor: Prof. Dr. Yusuf YAVUZ

In food industry, wastewater contains high COD (Chemical Oxygen Demand) level because of wastewater contaminated with raw material such as large amount of milk and dairy product, grease. As a result of wastewater which contains high COD level, discharge to sewerage system without primary treatment, overrated contamination observed at treatment plant which located at the end of discharge point. Due to that reason, receipt for connection permission which has highly important for environment and regulation can not be taken. Post graduate thesis based on researchers experienced problems while trying receipt for connection permission at food company which she has been working for. Topic of thesis is determined with minimum cost, maximum efficiency during wastewater treatment. Finally, wastewater of food industry treatment analyzed with electrocoagulation method by using galvanic current device with Al and Fe electrodes with the values of 1, 1,5, 2, 2,5, 3 A current densities and supportive electrolytes as Na_2SO_4 and NaNO_3 with the dosage of 5, 10, 20, 30, 40 mM.

As a result of this study, during 90 minutes treatment by using Aluminum electrode 51% maximum efficiency observed at 2A and 2,5A current density and 79% maximum efficiency observed at 3A current density with 20mM Na_2SO_4 supportive electrolyte additive.

During 90 minutes treatment by using Ferrum electrode 72% maximum efficiency observed at 3A current density and 73% maximum efficiency observed at 2,5A current density with 20mM NaNO_3 supportive electrolyte additive.

Keywords: Aluminum electrode, COD removal, Electrochemical coagulation, Food industry wastewater, Ferrum electrode.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimime başladığım dönemden itibaren yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve birikimleriyle her türlü konuda önderlik eden çok değerli tez danışmanım Prof. Dr. Yusuf YAVUZ'a,

Laboratuvar çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen Öğr. Gör. Dr. Fadime KARAER'e,

Çalışmalarımı yürüttüğüm esnada her aşamada yanımda destek olan çok değerli meslektaşım Çevre Müh. Derya DENİZ'e,

Yüksek lisans öğrenimim boyunca her türlü yardım ve desteğini gösteren sevgili eşim Engin BAŞOL'a ve oğlum Kıvanç BAŞOL'a,

Tez yazım aşamamda yanımda olup tüm manevi desteğini hissettiren BAŞOL aileme,

Öğrenim hayatım boyunca bugünlere gelmemi sağlayan her koşulda yardım ve desteklerini esirgemeyen anne ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tuğçe ÇELİK BAŞOL

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Tuğçe ÇELİK BAŞOL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
GÖRSELLER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	2
2. ELEKTROKİMYASAL ARITIM	3
2.1. Elektrokimyasal Arıtma Yöntemlerinde Arıtım Verimini Etkileyen Faktörler	4
2.1.1. Elektrot Tipi	4
2.1.2. Elektrot Dizilişi.....	5
2.1.3. Akım Yoğunluğu	5
2.1.4. pH	5
2.1.5. Destek Elektrolit.....	6
3. ELEKTROKOAGÜLASYON ARITIM.....	7
3.1. Elektrokoagülasyon Arıtım Uygulama Alanları	7
3.2. Elektrokoagülasyon Arıtım Avantajları	9
3.3. Elektrokoagülasyon Arıtım Dezavantajları.....	10

4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
4.1. Atıksu Karakterizasyonu	11
4.2. Numune Seyreltme Oranlarının Belirlenmesi ve Uygulanması.....	13
4.3. KOİ Deneyi	14
4.3.1. KOİ Deneyi Yapılışı	15
4.4. İletkenlik	17
4.5. pH	17
4.6. Sıcaklık.....	18
4.7. Destek Elektrolit Kullanılması.....	18
4.8. Deney Düzenegi	18
4.9. Deneysel Değişkenler	21
5. BULGULAR.....	22
5.1. Akım Yoğunluğuna Göre Deneysel Çalışma	22
5.1.1. Alüminyum Elektrot ile Akım Yoğunluğuna Göre Deneysel Çalışma	24
5.1.2. Demir Elektrot ile Akım Yoğunluğuna Göre Deneysel Çalışma	28
5.2. Destek Elektrolit İlavesine Göre Deneysel Çalışma	32
5.2.1. Alüminyum Elektrot ile Destek Elektrolit İlavesine Göre Deneysel Çalışma.....	32
5.2.2. Demir Elektrot ile Destek Elektrolit İlavesine Göre Deneysel Çalışma.....	51
6. TARTIŞMA.....	58
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKÇA.....	74
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Elektrokimyasal Redoks Reaksiyonları (Scott, 1995)	4
Tablo 4.1. Seyreltme Oranları Tablosu	14
Tablo 5.1. Alüminyum Elektrot 10 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	24
Tablo 5.2. Alüminyum Elektrot 15 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	25
Tablo 5.3. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	25
Tablo 5.4. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	26
Tablo 5.5. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	26
Tablo 5.6. Demir Elektrot 10 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	28
Tablo 5.7. Demir Elektrot 15 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	29
Tablo 5.8. Demir Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	29
Tablo 5.9. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	30
Tablo 5.10. Demir Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları	30
Tablo 5.11. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 5 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları	33
Tablo 5.12. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 10 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları.....	33
Tablo 5.13. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları.....	34
Tablo 5.14. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 5 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları	36
Tablo 5.15. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 10 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları.....	36
Tablo 5.16. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları.....	37
Tablo 5.17. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları.....	39
Tablo 5.18. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 30 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları.....	39
Tablo 5.19. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 40 mM Na ₂ SO ₄ İlavesi Deney Sonuçları.....	40

Tablo 5.20. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 5 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	42
Tablo 5.21. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 10 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	43
Tablo 5.22. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	43
Tablo 5.23. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 5 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	45
Tablo 5.24. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 10 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	46
Tablo 5.25. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	46
Tablo 5.26. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	48
Tablo 5.27. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 30 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	49
Tablo 5.28. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 40 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	49
Tablo 5.29. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 5 mM Na ₂ SO ₄	
İlavesi Deney Sonuçları	51
Tablo 5.30. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 10 mM Na ₂ SO ₄	
İlavesi Deney Sonuçları	52
Tablo 5.31. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na ₂ SO ₄	
İlavesi Deney Sonuçları	52
Tablo 5.32. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 5 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	54
Tablo 5.33. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 10 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	55
Tablo 5.34. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO ₃	
İlavesi Deney Sonuçları	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Bir Elektrokimyasal Hücrenin Şematik Görünümü	3
Şekil 4.1. Seyreltme Oranları Grafiği	14
Şekil 5.1. Alüminyum Elektrotta Akım Yoğunluğunun KOİ Gideriminde Etkisi	27
Şekil 5.2. Alüminyum Elektrotta Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi	27
Şekil 5.3. Demir Elektrotta Akım Yoğunluğunun KOİ Gideriminde Etkisi	31
Şekil 5.4. Demir Elektrotta Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi	31
Şekil 5.5. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi	34
Şekil 5.6. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	35
Şekil 5.7. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi	37
Şekil 5.8. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	38
Şekil 5.9. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi	40
Şekil 5.10. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	41
Şekil 5.11. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi	44
Şekil 5.12. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	44
Şekil 5.13. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi	47
Şekil 5.14. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	47
Şekil 5.15. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi	50
Şekil 5.16. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	50

Şekil 5.17. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi.....	53
Şekil 5.18. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile Na ₂ SO ₄ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	53
Şekil 5.19. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi.....	56
Şekil 5.20. Demir Elektrot 25 mA/cm ² Akım Yoğunluğu ile NaNO ₃ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi	56
Şekil 7.1. Akım Yoğunluğuna Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği	62
Şekil 7.2. Akım Yoğunluğuna Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği.....	62
Şekil 7.3. Akım Yoğunluğuna Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği.....	63
Şekil 7.4. Alüminyum Elektrot Na ₂ SO ₄ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği	64
Şekil 7.5. Alüminyum Elektrot Na ₂ SO ₄ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği	64
Şekil 7.6. Alüminyum Elektrot Na ₂ SO ₄ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği	65
Şekil 7.7. Alüminyum Elektrot NaNO ₃ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği	65
Şekil 7.8. Alüminyum Elektrot NaNO ₃ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği	66
Şekil 7.9. Alüminyum Elektrot NaNO ₃ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği	66
Şekil 7.10. Demir Elektrot Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği	67
Şekil 7.11. Demir Elektrot Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği	68
Şekil 7.12. Demir Elektrot Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği	68
Şekil 7.13. Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği	70

Şekil 7.14. Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği	70
Şekil 7.15. Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği	71



GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. Elektrokagülasyon Uygulanan Bir Endüstriyel Tesisten Görüntü	8
Görsel 4.1. OSB Akredite Laboratuvar Atıksu Analiz Raporları	11
Görsel 4.2. Numune Alımı	12
Görsel 4.3. Numune Saklanması ve Kontrol Parametrelerinin Ölçülmesi.....	12
Görsel 4.4. Nüve NF800/800R Santrifüj Cihazı	13
Görsel 4.5. KOİ Deneyi İçin Hazırlanan Reaktifler.....	15
Görsel 4.6. VELP ECO 25 Termoreaktör	17
Görsel 4.7. Titrasyon.....	17
Görsel 4.8. OHAUS Marka PA224C Model Analitik Terazide Destek Elektrolit Ölçülmesi	18
Görsel 4.9. Alüminyum Elektrot Kümesi	19
Görsel 4.10. Demir Elektrot Kümesi.....	19
Görsel 4.11. Başlangıç Deney Düzeneği-1	20
Görsel 4.12. Başlangıç Deney Düzeneği-2	20
Görsel 4.13. Deney Sonu Beher İçerisinde Bulunan Atıksular.....	21
Görsel 5.1. Kullanılan Elektrot Plakasının Etkin Alan Ölçüler	23
Görsel 5.2. Aşırı Isı ve Voltaj Yükselmesi Sebebiyle Deney Sonunda Kabaran Numune	42
Görsel 7.1. Deney Sonunda 3 Saat Süre ile Bekletilen Numuneler	69
Görsel 7.2. Çalışmalar Sonucu Yıpranan Elektrot Kümeleri ve Malzemeleri	71
Görsel 7.3. Deneysel Çalışmalardan Öncesi ve Sonrası Alüminyum Elektrot Kümesi	72
Görsel 7.4. Deneysel Çalışmalardan Öncesi ve Sonrası Demir Elektrot Kümesi.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KOİ	: Kimyasal Oksijen İhtiyacı
EC	: Elektrokoagülasyon
A	: Amper
NaNO ₃	: Sodyum Nitrat
Na ₂ SO ₄	: Sodyum Sülfat
mM	: Milimolar
mS	: Milisiemens
OSB	: Organize Sanayi Bölgesi
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
BOİ ₅	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
dk	: Dakika
SKKY	: Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
KÖP	: Kirleten Öder Payı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
L	: Litre
mL	: Mililitre
mg	: Miligram
cm	: Santimetre
mA	: Miliamper
V	: Volt

1. GİRİŞ

Gıda endüstrisi dünyada en çok talep gören dallardan biridir. Gıda işleme, pişirme, soğutma, temizlik gibi pek çok farklı işlev için fazla miktarda su kullanılmaktadır (Shah, 2020).

Artan dünya nüfusunun ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla paralel olarak üretim faaliyetlerinin artması endüstriyel çevre kirliliği problemini de beraberinde getirmektedir. Özellikle sanayi de mevcut su kaynaklarını kullanmaktadır ve endüstriyel su ihtiyacının sürekli artış göstermesi ile kullanılabilir nitelikteki su kaynakların giderek azalması, oluşan atıksuların arıtılarak yeniden kullanımını mecburi kılmıştır.

Gıda endüstrisi proseslerinin aşamalarında üretilen ürüne özgü bir atıksu meydana gelmektedir. Atıksuların niteliği, arıtılabilirliği ve bertarafı açısından ekonomik ve çevresel anlamda önemlidir. Aynı zamanda atıksu ile gelen kirleticiler yeterli bir şekilde arıtılmadığında, alıcı ortamda ciddi çevresel ve ekolojik sorunlara neden olmaktadır.

Gıda endüstrisinden gelen atıksu yüksek miktarda organik madde içeriğine sahiptir, ancak atıksudaki organik bileşikler genelde biyolojik olarak parçalanabilir ve geleneksel atıksu arıtma metotları ile arıtılabilir. Öte yandan, mikrobiyal konsorsiyum için zehirli olan bazı bileşikler, çeşitli tüketim sebebiyle atıksularda bulunabilir (Shah, 2020)

Organize sanayi bölgelerinde (OSB) bulunan tesislerin tümü kanalizasyon alt yapı sistemleri ile ortak bir atıksu arıtma tesisine atıksularını deşarj etmektedir. Deşarj etmeden önce yağmur suyu ve kanalizasyon hatlarının uygunluğu, atıksuların niteliğine göre numuneler analiz edilerek OSB arıtma tesisi sınır değerlerinin geçmediği tespit edilmesinden sonra bağlantı deşarj izinleri verilmektedir. Bağlantı deşarj izni olan tesisler belirlenen periyodik kontroller doğrultusunda alıcı ortama deşarj etmeden OSB arıtma tesisine atıksularını göndermektedir. Fakat yüksek kirlilik bulunan sınır değeri aşan durumlarda arıtma tesisine gelen aşırı kirlilik yükü sebebiyle orada bulunan deşarj kriterlerini de etkileyebilmektedir. Dolayısıyla çevre kirliliğine sebep vermektedir. Bu gibi durumlarda tesisin ön arıtım yapması gerekmektedir. Tesisler ön arıtım seçenekleri arayışları sırasında uygulanabilirliği kolay, maliyeti alternatiflere göre daha düşük, verimi daha yüksek teknolojilere yönelmektedir. Elektrokoagülasyon ile arıtımın bu aşamada işletme kolaylığı, daha yüksek verime sahip olması ve ilk yatırım maliyetinin düşük olması tercih edilme sebeplerinde ilk sıralarda yer almaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Çalışmada Çikolata, Kokolin, Dekorlu ve Dekorsuz Kek, Muffin Kek, Jel/Yumuşak Şeker, Kruvasan ve Bar üretimi konusunda faaliyet gösteren bir gıda endüstrisinin OSB arıtma tesisine giden çıkış noktasından alınan ham atıksuyu kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar neticesinde hacmi ve çalışmakta olan üretim hatlarına göre değişiklik gösteren organik kirlilik yükünün 6000 mg KOİ/L - 15000 mg KOİ/L olduğu tespit edilmiştir. OSB atıksu deşarj standartları (1200 mg KOİ/L) ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY) Tablo 19'a (200 mg KOİ/L) göre kirliliğin sınır değerlerinin oldukça üzerinde olduğunu göstermektedir. Bu nedenle bağlantı deşarj izin belgesi onaylanmayan tesisin minimum olarak OSB atıksu deşarj standartlarını sağlanması amacıyla elektrokoagülasyon ile ön arıtım yapılarak arıtılması planlanmıştır.

Alınan numune atıksu Alüminyum ve Demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmış ve bu yöntemde KOİ parametresindeki değişim gözlenerek değerlendirilmiştir. Akım yoğunluğu ve destek elektrolitlerin (Na_2SO_4 ve NaNO_3) ilavesinde giderim verimine etkisi incelenmiştir. Başlangıç ve deney sonlarında pH ve elektriksel iletkenlik değerlerine bakılarak deney sonlarında akım yoğunluklarına, gerilim (volt) miktarına bağlı olarak tüketilen enerji miktarı hesaplanmıştır.

Çalışmanın amacı gıda endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak elektrot cinsi, akım yoğunluğu ve destek elektrolit miktarı gibi parametrelerin arıtım verimine etkileri ile birlikte optimum koşulların belirlenmesidir.

2. ELEKTROKİMYASAL ARITIM

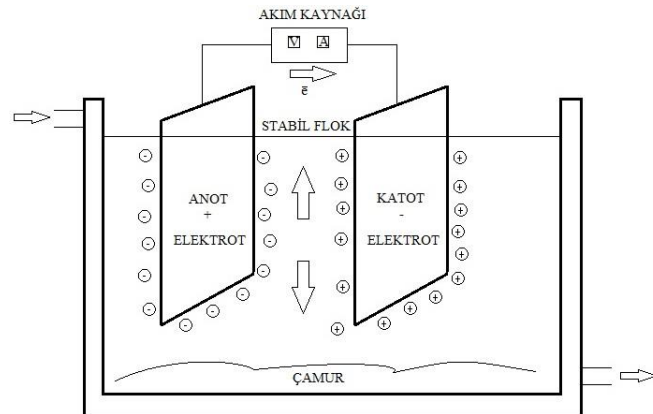
Elektrokimya, kimya biliminin alt dalı olarak elektronik bir iletken ile iyonik bir iletken arasında gerçekleşen reaksiyonları incelemektedir. Elektrokimyada amaç kimyasal enerji ve elektrik enerjisi arasındaki bağlantı ve dönüşümleri incelemektir.

Elektrokimyasal arıtım süreçleri çöktürme, koagülasyon, flotasyon, adsorpsiyon ve absorpsiyon süreçleri bulunmaktadır. Elektrokimyasal arıtım;

- ❖ Elektrokimyasal hücre içinde elektrotlara uygulanan doğru akım formuyla su ve atıksu arıtma teknolojisi olarak kullanılan **Elektrokoagülasyon**,
- ❖ Çözelti ortamına iki elektrot yerleştirilerek doğru akım kaynağı sayesinde elektrik akımı yaratarak geçen akım ile elektrokimyasal reaksiyonları başlatmak ve hızlandırmak temel prensibi olan **Elektrooksidasyon**,
- ❖ Elektrolitik şartlara göre oluşan gaz kabarcıkları tarafından kolloidal partiküllerin adsorblanarak su yüzeyine doğru hareket ederek toplanması prensibine dayanan **Elektroflotasyon**,
- ❖ Elektrolit çözeltilerdeki elektronlar ile doğru akım kullanılarak diyaliz hızını arttırmak amacıyla özel olarak geliştirilmiş iyon seçici membranların kullanıldığı bir ayırma prosesi olan **Elektrodiyaliz**,
- ❖ Yüklü moleküllerin, elektriksel bir alan içerisinde farklı taşınma yetenekleri kullanılarak ayrılmasını sağlayan **Elektroforez**

olmak üzere 5 gruba ayrılmaktadır.

Elektrokimyasal arıtımın gerçekleşebilmesi için; anot ve katot arasında bir bağlantı ve elektroliz çözeltisinde belli bir iletkenlik olması gerekmektedir.



Şekil 2.1. Bir Elektrokimyasal Hücrenin Şematik Görünümü

Tablo 2.1. Elektrokimyasal Redoks Reaksiyonları (Scott, 1995)

Anot Reaksiyonları	Katot Reaksiyonları
Anot Elektron Verir	Katot Elektron Alır
Anotta Yükseltgenme Olur	Katotta İndirgenme Olur
Anotta Çözünme Olur ($Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$)	Katotta Birikme Olur ($Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$)
Anyonlar Anotta Toplanır	Katyonlar Katotta Toplanır
Anolit Bölge Oluşur	Katolit Bölge Oluşur
Anotta Oksijen Çıkışı Gözlenir $2H_2O + 4e^- \rightarrow O_2 (g) \uparrow + 4H^+$	Katotta Hidrojen Çıkışı Gözlenir $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 (g) \uparrow + 2OH^-$
Ortamda Klorür İyonu Varsa Anottaki Klor Çıkışı $2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2 (g) \uparrow$	Ortamdaki Çözünen Gaz İndirgenir $O_2 \uparrow + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Elektrokimyasal arıtım proseslerinin kolay kontrol edilebilmesi, kısa sürede maksimum düzeyde kirliliği azaltabilmesi, işletimlerinin kolay olması, basit ve düşük maliyetli ekipmanlarla yapılması, kimyasal madde kullanımlarının sınırlı düzeyde olması, daha az çamur oluşması özelliklerinden dolayı atıksu arıtım sistemlerinde sık tercih edilmektedir.

Elektrokimyasal arıtımın verimi elektrot tipine, reaksiyon süresine, elektrot yüzey alanına, pH ve parçacık büyüklüğüne, suyun kimyası ve iletkenliğine, uygulanan akıma, elektriksel gerilime ve prosesin tipine bağlıdır.

İçme suyu ve evsel atıksu arıtımı, tekstil, gıda, maden, kâğıt endüstrisi gibi endüstriyel atıksu arıtımı, katı atık depolama sahası sızıntı suları arıtımı ve daha birçok alanda oluşan atıksuların arıtımında sıklıkla tercih edilen bir prosestir.

2.1. Elektrokimyasal Arıtma Yöntemlerinde Arıtım Verimini Etkileyen Faktörler

Elektrokimyasal arıtım verimi, su ortamın kimyasal yapısı ve içeriği, özellikle iletkenliğine bağlıdır. Ayrıca pH ve parçacık büyüklüğü de önemlidir. Bununla birlikte akım yoğunluğu, elektrot tipi, elektrot dizilişi, destek elektrolit miktarı, yüzey alanlarına, reaksiyon süresinde verimi oldukça etkilemektedir.

2.1.1. Elektrot Tipi

Elektrokimyasal arıtım türünü ve kirletici giderim verimini doğrudan etkilemektedir. Farklı prosesler için farklı materyalde elektrot kullanımı daha verimli sonuç elde edilebilmektedir. Örneğin; elektrokoagülasyon yöntemi için seçilen elektrot türü akım ile birlikte suda çözünürken, elektrooksidasyon prosesinde hidroksil radikali oluşturarak bir çözünme yaşanmamaktadır. Elektrokoagülasyon yöntemi için demir ve

alüminyum elektrotlar yaygın şekilde kullanılmaktadır fakat elektrooksidasyonda titan, platin, rutenyum vb. elektrotlar kullanılmaktadır.

Elektrokoagülasyon işleminde elektrot malzemesinin seçimi sistemin en önemli parçasını oluşturmaktadır. Bu sebeple uygun elektrot malzemesinin seçimi bu nedenle çok önemlidir. En yaygın elektrot malzemeleri ise demir ve alüminyum elektrotlardır. Her ikisi de genellikle diğer seçeneklere göre daha ucuz, kolay bulunabilen ve etkili malzemelerdir.

2.1.2. Elektrot Dizilişi

Elektrotların reaktör içerisinde yerleşimi oldukça önemlidir. Bipolar ve Monopolar elektrotlar kullanılarak Paralel veya Seri şekilde bağlanarak farklı giderim verimleri sağlanmaktadır. Bir Anot ve bir Katottan oluşmasına rağmen elektrotlar çok farklı şekilde yerleştirilebilmektedir. Örneğin; sentetik boya içeren atıksu renk giderimi için elektrotların yerleşimi üzerinde bir optimizasyon yapılmıştır. Deneyde seri ve paralel elektrotlar, klasik elektrokimyasal hücreye oranla daha iyi sonuçlar elde edildiği sonuçlarına varılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada monopolar elektrotların bipolar elektrotlara oranla daha iyi verim elde edildiği, seri bağlı elektrotların ise paralel bağlı elektrotlara oranla daha etkin verim sağladığı tespit edilmiştir (Daneshvar N., Sorkhabi H.A., Kasiri M.B, 2004).

2.1.3. Akım Yoğunluğu

Akım yoğunluğunun optimizasyonu arıtım için çok önemlidir. Gerekenden fazla akım yoğunluğu uygulandığında hem maliyet artışı oluşacaktır hem de eğer elektrokoagülasyon arıtım uygulanıyor ise paralel olarak çamur oluşumu da artacaktır. Aynı zamanda akım yoğunluğu ile arıtım süresi yakından ilişkilidir. Yüksek akım yoğunluğu uygulandığında çok daha kısa sürede bir arıtım gerçekleşebilmektedir. Örneğin; katı atık depolama sahası sızıntı suyu ile ilgili yapılan bir çalışmada 2V-15V arasında farklı elektriksel gerilimler uygulanarak KOİ giderim verimleri tespit edilmiştir. Sonuçlara göre artan elektriksel gerilim kuvvetiyle aynı sürede daha yüksek KOİ giderim verimleri elde edilmiştir (Tsai C.T., 1997).

2.1.4. pH

pH, ortamda oluşan elektrolitik reaksiyonları doğrudan olarak etkilemektedir. Gerek elektrooksidasyon için hidroksil radikallerinin oluşumu gerekse elektrokoagülasyon için metal hidroksitlerin oluşumunda pH birinci dereceden önem arz

etmektedir. Belli pH değeri aralıkları dışında koagülantlar oluşamayabilir ve hidroksil radikallerinin oluşum yüzdesi de büyük oranda azalabilmektedir. Arıtım sonucunda pH'nın değişimi gözlemlenmektedir. Elektrooksidasyonun baskın olduğu durumlarda pH giderek düşmekte, elektrokoagülasyon arıtmalarda ise pH'nın giderek arttığı görülebilmektedir. Giderim verimleri başlangıç pH'ına bağlı olduğu kadar son durumdaki pH değerlerine de bağlıdır (Casillas H.A.M., 2007). Zeytinyağı atıksuyunun elektrokoagülasyonla arıtımı ile arıtıldığı bir çalışmada demir ve alüminyum anotlar için farklı başlangıç pH değerlerinde çalışılarak optimum pH değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan deneylerde başlangıç pH'ları 4,6, 6, 7 ve 9 olan numunelerde demir anotlar için en yüksek verim pH 9 için sağlanırken bu değer alüminyum anotlar için pH 6 seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir (Inan H., Dimoglo A., Imek H., vd., 2004).

2.1.5. Destek Elektrolit

Destek elektrolit deneylerde elektroaktif olmayan maddedir. İyonların elektriksel çekim etkisiyle elektrotlara göç etmelerini en aza indirmek için destek elektrolit kullanılmaktadır. Elektrolitler suda çözünerek elektrik yükünün taşınmasını sağlar ve atıksu iletkenliğini istenilen seviyelere getirmek için proseslerde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda kullanılan NaNO_3 , Na_2SO_4 gibi inert tuzlar ve NaCl , KBr gibi halojenli tuzlar proses verimini de oldukça arttırmaktadır (Güney, 2013).

2.1.6. Reaksiyon Süresi

Yapılacak çalışmalarda, arıtım süresinin optimizasyonu oldukça önemlidir. Gerekinden az bir arıtım süresi uygulandığında ihtiyaç duyulan verim sağlanamayacağı gibi olması gerekinden uzun süren arıtmalar ise gerek maliyet açısından ve gerekse çamur ve köpük oluşumu bakımından uygun olmamaktadır. Bu nedenle her tip atıksuyun arıtım süresinde farklılıklar olabilmektedir. Yapılan bir çalışmada bir battaniye üretim fabrikası atıksuyundan KOİ ve renk giderimi için çeşitli işletme şartlarının etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. İletkenliği yeterli olmadığı için destek elektrolit olarak NaCl ilave edilmiştir, sonuç olarak 5 dakikalık bir arıtım süresinde $60\text{-}80 \text{ A/m}^2$ akım yoğunluğunda %75'lik bir KOİ giderimi ve %99'luk bir renk giderimi elde edilmiştir (Daneshvar N., Sorkhabi H.A., Kasiri M.B., 2004). Yapılan bu çalışmada 5 dakikada iyi bir verim elde edilebilirken zeytinyağı üretim endüstrisi atıksuyu ile ilgili yapılan başka bir çalışmada 240 dk. bir arıtım süresi sonunda bile %40'ın üstünde bir KOİ giderim verimi gözlenememiştir (Gotsi M., Kalogerakis N., Psillakis E., vd., 2005).

3. ELEKTROKOAGÜLASYON

Elektrokoagülasyon, elektroliz sonucu anot olarak çözünen elektrot atıksu içerisinde iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek metal hidroksit floklarının oluşturulmasıdır. Demir veya alüminyum elektrot kullanılması halinde çözünen elektrotlar çözeltiye yükseltgenen Al^{+3} ve Fe^{+2} , Fe^{+3} iyonları vermektedir. Bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek çok az çözünen $Al(OH)_3$ (Alüminyum Hidroksit), $Fe(OH)_2$ (Demir II Hidroksit) ve $Fe(OH)_3$ (Demir III Hidroksit) gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon art arda gerçekleşen 3 temel aşama ile oluştuğu kabul edilmektedir;

- ❖ Elektrolitik oksidasyonda çözünen elektrot ile koagülantların oluşumu.
- ❖ Kirleticilerin askıda maddelerinin destabilizasyonu, partikül süspansiyonu ve emülsiyonların kırılması.
- ❖ Destablize edilmiş fazlarda koagülasyon sonundaki flok oluşumu, kompleksleşmeyen kolloidal partikülleri yakalayan ve köprü kuran çamur tabakası oluşumu.

Elektrot malzemesi olarak demir kullanıldığında örnek elektrot reaksiyonları;

- ❖ **Katotta** $8H^+ + 8e^- \rightarrow 4H_2 (g)$
- ❖ **Anotta** $4Fe \rightarrow 4Fe^{+2} + 8e^-$
- ❖ **Çözeltideki çözülmüş oksijen ile** $4Fe^{+2} + 10H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H^+$
- ❖ **Nihai olarak toplam reaksiyon ise** $4Fe + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 4H_2$

şeklinde özetlenebilir.

Elektrot malzemesi olarak alüminyum kullanıldığında örnek elektrot reaksiyonları;

- ❖ **Katotta** $8H^+ + 8e^- \rightarrow 4H_2 (g)$
- ❖ **Anotta** $Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^-$
- ❖ **Çözeltide** $Al^{+3} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$

şeklinde özetlenebilir.

3.1. Elektrokoagülasyonun Uygulama Alanları

- ❖ Kompleks organiklerin giderimi,
- ❖ Suyun deşarj veya tekrar kullanımından önce klor ve bakteri gideriminde,
- ❖ Arıtma çamuru susuzlaştırma ve atıksudan ağır metal giderimi,
- ❖ Yağ ve gres içeren atıksuların arıtımında,
- ❖ Boya ve tekstil endüstrisi atıksularının arıtımında,
- ❖ Proses yıkama ve durulama suları arıtımında,

- ❖ Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Azot ve Fosfor giderimi,
 - ❖ Restoran atıksularının arıtımı,
 - ❖ Galvanize sanayi atıksuları ve petrokimya endüstrileri atıksularının arıtımında,
 - ❖ Kağıt ve kağıt hamuru endüstrisinde,
 - ❖ Flor gideriminde,
 - ❖ Su süspansiyonlarında kaolin, bentonit ve çok ince parçaların giderimi,
 - ❖ Silis, sertlik, askıda katı madde vb. kirlilik giderimi ile kazan besleme suyunun ön şartlandırması,
 - ❖ Ters osmoz gibi membran teknolojilerinin ön arıtımı,
 - ❖ Organik madde içeren katı atık depolama sahalarında bulunan sızıntı suları arıtımında,
 - ❖ İçme ve kullanma sularının arıtımında,
 - ❖ Bakteri ve virüslerin giderilmesinde,
 - ❖ Deterjan ve maden üretim işlemleri ve Gıda endüstrisi atıksularının arıtımında,
- Elektrokoagülasyonun sık kullanıldığı bazı uygulama alanlarıdır.



Görsel 3.1. *Elektrokoagülasyon Uygulanan Bir Endüstriyel Tesisten Görüntü*

3.2. Elektrokoagülasyonun Avantajları

Atıksu işlemlerine göre elektrokoagülasyonun avantajları aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir.

- ❖ Oluşan çamur, metal oksit ve metal hidroksitlerden oluştuğu için kolaylıkla stabil hale getirilmekte ve susuzlaştırılmaktadır. Oluşan çamur miktarı azdır.
- ❖ Elektrokoagülasyon içerisindeki elektrotlar sabit konumdadır bu nedenle elektriksel olarak kontrol edilmekte ve böylece daha az bakım gerektirmektedir.
- ❖ Basit işletme şartları ve ekipmanlar gerektirmektedir.
- ❖ Çıkış suyu renksiz, kokusuz ve berraktır.
- ❖ Asidik ortama dirençli ve stabildir, filtrasyonla daha hızlı ayrılabilirler.
- ❖ Oluşan floklar kimyasal floklara benzemekle birlikte; daha büyük floklar olma eğiliminde ve daha az bağıl su içermektedirler.
- ❖ Elektrokoagülasyon için harcanan elektriksel güç, güneş panellerinden de temin edilebilir ve alternatiflerine göre düşük enerji ihtiyacı bulunmaktadır (Delipınar, 2007).
- ❖ Sürekli pH kontrolü gerekmemektedir.
- ❖ İyi dizayn edilmiş sistemlerde %90 civarında yüksek verim elde edilebilmektedir.
- ❖ İlk yatırım maliyeti ve işletme maliyeti alternatiflerine göre daha düşüktür.
- ❖ İş gücü ve personel ihtiyacı azdır.
- ❖ Birçok kontaminantı bir arada giderir. Yani alternatif proseslerde belli kontaminantları gidermede birkaç proses ardarda kullanılır. Ancak elektrokoagülasyon bu kontaminantları tek bir prosesle giderebilmektedir (Arapoğlu, 2003).
- ❖ Uyguladığı elektrik alan onların daha hızlı hareket etmelerini sağlayarak koagülasyonu kolaylaştırdığı için en küçük kolloidal parçacıkları bile arıtmaktadır.
- ❖ Kimyasal arıtma ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon çıkış suyu daha az toplam çözünmüş katı madde içermektedir. Bu suların tekrar kullanılması durumunda düşük toplam katı madde seviyesi geri kazanım giderinin daha düşük olmasına katkıda bulunmaktadır.
- ❖ Kimyasal madde kullanımından kaçınıldığı için kimyasal koagülasyona göre ilave edilen yüksek oranda kimyasal maddelerin neden olabileceği ikincil kirlenme olasılığı ve aşırı kimyasalların nötralizasyonu problemi engellenmektedir.

- ❖ Elektroliz sırasında ortaya çıkan gaz kabarcıkları kirleticileri çözelti yüzeyine taşıyarak daha kolay ayrılmaları sağlamaktadırlar.
- ❖ Diğer proseslere göre daha az akım gerektirmektedir.

3.3. Elektrokoagülasyonun Dezavantajları

Atıksu işlemlerine göre elektrokoagülasyonun dezavantajları aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir.

- ❖ Kullanılan elektrot, atıksu içindeki çözünmüş maddelerin oksidasyonu sonucu oksitlenebilmektedir. Bu nedenle daha sık elektrot bakımı ve değişimi gerektirebilir.
- ❖ Elektrik maliyeti bazı proseslere göre yüksektir ancak kullanılması gereken enerji çok düşük olduğundan yüksek bir maliyet oluşturmamaktadır.
- ❖ Elektrokoagülasyon prosesi ile kirletici maddelerin kısmi oksidasyonu sağlanmaktadır.
- ❖ Arıtılan çıkış suyunda demir ve alüminyum iyonlarının konsantrasyonları nispeten yüksektir.
- ❖ Katot üzerinde zamanla geçirimsiz bir film tabakası oluşabilmektedir ve bakımları ve/veya elektrot değişimleri gerekli zamanlarda yapılmaz ise prosesin verimliliğini düşürebilir. Fakat bu durumu en aza indirmek için kablo bağlantı noktaları her çalışmada yer değiştirilebilir.
- ❖ Atıksu çözeltilerinin yüksek iletkenliğe sahip olması istenmektedir (Delipınar, 2007). Bu nedenle iletkenliği düşük atıksularda verim elde edilememektedir.

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1. Atıksu Karakterizasyonu

İşletme 40.000 m² yüzölçümlü alan üzerinde, 30.000 m² yüzölçümlü kapalı alanda Çikolata, Kokolin, Şokokrem, Dekorlu ve Dekorsuz Kek, Muffin Kek, Cup Kek, Jel/Yumuşak Şeker, Kruvasan ve Bar üretimi yapmaktadır. Tedarikçilerden gelen hammaddeler yarı mamul olarak işlendikten sonra kullanılır hale getirilmektedir. İşlenen hammaddeler fırınlama, soslama, kaplama olmak üzere üç bölümden iş akış şemalarına göre uygulaması yapılarak geçirildikten sonra paketlenerek sevkiyata hazır hale getirilmektedir. Tesiste oluşan atıksu evsel ve endüstriyel nitelikli olup, SKKY Tablo 19 kapsamında yer almaktadır. Atıksular OSB'ye ait kanalizasyon sistemiyle OSB Arıtma Tesisine bertaraf edilmek üzere gönderilmektedir. Deneysel çalışmalar neticesinde hacmi ve çalışmakta olan üretim hatlarına göre değişiklik gösteren organik kirlilik yükünün 6000 mg KOİ/L - 15000 mg KOİ/L olduğu tespit edilmiştir. Deşarj edilen atıksu, OSB atıksu arıtma sınır değerlerinin (1200 mg KOİ/L) üzerinde olduğu için Kirleten Öder Payı (KÖP) ile ödemeler gerçekleştirmektedir. Tesisin Bağlantı Kalite Kontrol İzin Belgesi yenilenmesi için başvurusu sonucunda OSB, atıksuyun ön arıtmadan geçirilmesinin ardından deşarj edilebileceğine dair yazı ile olumsuz geri dönüşte bulunmuştur. Bu konudan yola çıkarak tez çalışmalarına başlanmıştır.

Parametre	Birim	Analiz Metodu	Analiz Sonucu	EOSB Atıksu Giriş Parametreleri
Askıda Katı Madde (AKM) *	mg/L	TS EN 872	4120	800
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	SM 5210 D.	10864,16	-
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	Kit Metodu	15770	1200
pH *	-	TS EN ISO 10523	5,41	6-9
Sıcaklık	°C	TS EN ISO 10523	19,7	8-20
Yağ ve Gres *	mg/L	TS 7887 / SM 5520 D.	866	500
Parametre	Birim	Analiz Metodu	Analiz Sonucu	EOSB Atıksu Giriş Parametreleri
Askıda Katı Madde (AKM) *	mg/L	TS EN 872	1595	800
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	SM 5210 D.	11032,96	-
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	Kit Metodu	18149	1200
pH *	-	TS EN ISO 10523	8,37	6-9
Sıcaklık	°C	TS EN ISO 10523	13,2	8-20
Yağ ve Gres *	mg/L	TS 7887 / SM 5520 D.	518	500
Parametre	Birim	Analiz Metodu	Analiz Sonucu	EOSB Atıksu Giriş Parametreleri
Askıda Katı Madde (AKM) *	mg/L	TS EN 872	4720	800
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı	mg/L	SM 5210 D.	9372,8	-
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)	mg/L	Kit Metodu	18586	1200
pH *	-	TS EN ISO 10523	4,66	6-9
Sıcaklık	°C	TS EN ISO 10523	11,7	8-20
Yağ ve Gres *	mg/L	TS 7887 / SM 5520 D.	2022	500

Görsel 4.1. OSB Akredite Laboratuvar Atıksu Analiz Raporları

Atıksu numunesi 5 L'lik pet şişeler içerisinde anlık numune olarak endüstriyel atıksu çıkış noktasından alınmıştır ve vakit kaybetmeden korunaklı bir şekilde laboratuvara getirilmiştir.



Görsel 4.2. *Numune Alımı*

İletkenlik (1483 mS/cm), pH (6,35) ve Sıcaklık (40°C) ölçümü yapılmıştır. Daha önce OSB akredite laboratuvarı tarafından yapılan analizlerden tahmin edildiği üzere organik kirliliği yüksek olan atıksu karakterizasyonunun değişmemesi için her bir numune şişesi içerisine ~5 mL derişik H_2SO_4 ilave edilmiş olup 4°C sıcaklıkta buzdolabında muhafaza edilmiştir.



Görsel 4.3. *Numune Saklanması ve Kontrol Parametrelerinin Ölçülmesi*

4.2. Numune Seyreltme Oranlarının Belirlenmesi ve Uygulanması

Numune olarak laboratuvara getirilen ham atıksu daha önce OSB akredite laboratuvarı tarafından yapılan ölçümlerden KOİ değerlerinin yüksek olduğu bilinmesi sebebiyle Türk Standartları Enstitüsü'nün (TSE) TS 2789 kodlu Su Kalitesi – KOİ Tayini standardına göre yapılacak KOİ analizlerinin ölçülebilmesi için deney başlangıcında uygun seyreltme oranları uygulanmıştır. Deneysel çalışma için en uygun seyreltme oranının belirlenebilmesi için farklı seyreltme oranlarında deneyler uygulanmıştır. 10, 20, 25, 50 ve 100 kat seyreltme oranlarında ham su seyreltilerek santrifüj tüplerine aktarılmıştır böylece içerisinde bulunan kirleticilerin çökmesi sağlanmıştır. Santrifüjden çıkan numunelerden 2 adet şahit numuneleri de olacak şekilde TS 2789 standardına göre KOİ deneyleri yapılmıştır.

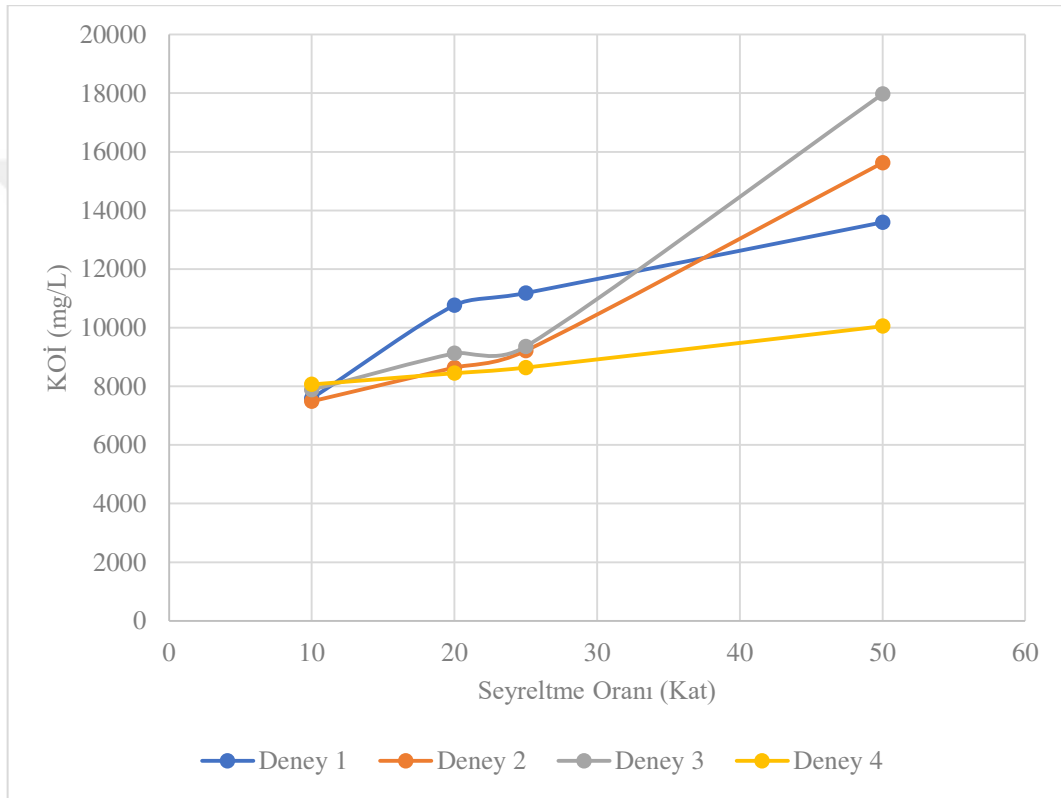


Görsel 4.4. Nüve NF800/800R Santrifüj Cihazı

10, 20, 25, 50 ve 100 kat seyreltme oranlarından hata payı en düşük ve KOİ analizleri gerçekleştirilebilir nitelikte olması sebebiyle 10 kat seyreltmenin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.1. Seyreltme Oranları Tablosu

Numune (mL)	Saf Su (mL)	Seyreltme Oranı
1	99	100 kat
2	98	50 kat
4	96	25 kat
5	95	20 kat
10	90	10 kat



Şekil 4.1. Seyreltme Oranları Grafiği

4.3. KOİ Deneyi

KOİ, atıksuların organik kirlilik derecesini belirlemede kullanılan oldukça önem arz eden ve çabuk sonuç veren bir parametredir. Doğada organik maddeler karbonlu maddeler oksitlenerek kararlı maddeler olan CO_2 (Karbondioksit) ve suya dönüşmektedir. Bu analiz yöntemi, sularda bulunan karbonlu maddelerin karbondioksit dönüşene kadar eklenmesi gereken oksijen miktarını belirlemektedir.

Sudaki birçok organik maddeler H_2SO_4 (Sülfürik Asit) ile asitlendirilmiş ortamda $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (Potasyum Dikromat) ile termoreaktörde 2 saat süre ile ısıtılırsa tamamen kimyasal yükseltgenmeye uğramaktadırlar. $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ fazlası ferroin indikatörü eşliğinde

ayarlı $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Amonyum Demir (II) Sülfat (DAS)) çözeltisi ile titre edilerek KOİ parametresi tayin edilmektedir.

Analizde bulunan sonuç, sudaki kirletici maddede bulunan karbonu gidermek için kullanılan oksidant miktarıdır. Harcanan oksidant miktarı, oksijen ihtiyacı olarak tanımlanmaktadır. Analiz sonucunda saptanan oksijen ihtiyacı atıksuda bulunan karbon konsantrasyonun dolaylı bir ölçüsüdür.

KOİ deneyinde kullanılan reaktifler TS 2789 standardına göre hazırlanmıştır ve her deney öncesi standardizasyon yapılmıştır.



Görsel 4.5. KOİ Deneyi İçin Hazırlanan Reaktifler

4.3.1. KOİ Deneyi Yapılışı

TS 2789 standardına göre yapılan KOİ deneyi aşamaları sırasıyla aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- ❖ Deney öncesi DAS standardizasyonu yapılır ve not edilir.
- ❖ VELP marka ECO 25 model Termoreaktör 150 °C ayarlanır ve ısınmaya bırakılır.
- ❖ Deney boyunca alınan numuneler santrifüjden geçirilir.
- ❖ Santrifüjden geçirilen numunelerden 1 mL mikropipet ile cam KOİ tüplerine aktarılır. Kontamineyi engellemek için mikropipetin her aşamada başlığı değiştirilerek deney sürdürülmüştür.
- ❖ $\text{KC}_8\text{H}_5\text{O}_4$ (Potasyum Hidrojen Ftalat) ve Saf Su da tanık deney olarak hesaplamalarda kullanılması için 1 mL mikropipet ile cam KOİ tüplerine aktarılır ve sonraki aşamalar numunelere uygulandığı gibi uygulanır.
- ❖ 0,5 mL $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ çözeltisi mikro pipet yardımıyla numunelere ilave edilir.
- ❖ 1,5 mL $\text{Ag}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ çözeltisi mikro pipet yardımıyla ilave edilir.

- ❖ Ardından tüplerinin kapakları kapatılarak çalkalanmadan ısınan termoreaktöre yerleştirilir.
- ❖ Termoreaktörde 2 saat 150°C sıcaklıkta bekletilir.
- ❖ Süre sonunda KOİ tüpleri çıkarılır ve oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenir.
- ❖ Soğuyan numuneler erlen mayere aktarılır.
- ❖ 4,5 ml su mikropipet yardımı ile eklenerek KOİ tüpü çalkalanır ve erlen mayere boşaltılır.
- ❖ Erlen mayer içerisine 1-2 damla ferroin indikatörü eklenir.
- ❖ Amonyum demir (II) sülfat (DAS) çözeltisi ile yeşil renkten mavi renge dönünceye kadar titre edilir.
- ❖ Harcanan titrant hacmi hazırlanan her bir KOİ tüpü için kaydedilir.
- ❖ Gerekli hesaplamalar yapılarak KOİ sonucu bulunur.
- ❖ Çıkan sonuç yanılma payı ile çarpılarak not edilir.

KOİ Hesaplama Formülü;

$$KOİ \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{8000 \times C \times (V_1 - V_2)}{V_0} \times Y.P.$$

- * C: Standart DAS Çözeltisi Derişimi (mol/L)
- * V₀: Deney Numunesinin Hacmi veya Seyreltme Yapılmışsa Deney Numunesinin Seyreltmeden Önceki Hacmi (mL)
- * V₁: Tanık Deneyde Titrasyonda Kullanılan DAS Çözeltisi Hacmi (mL)
- * V₂: Deney Çözeltisinin Titrasyonunda Kullanılan DAS Çözeltisinin Hacmi (mL)
- * 8000: Dönüştürme Faktörü
- * Y.P: Yanılma Payı

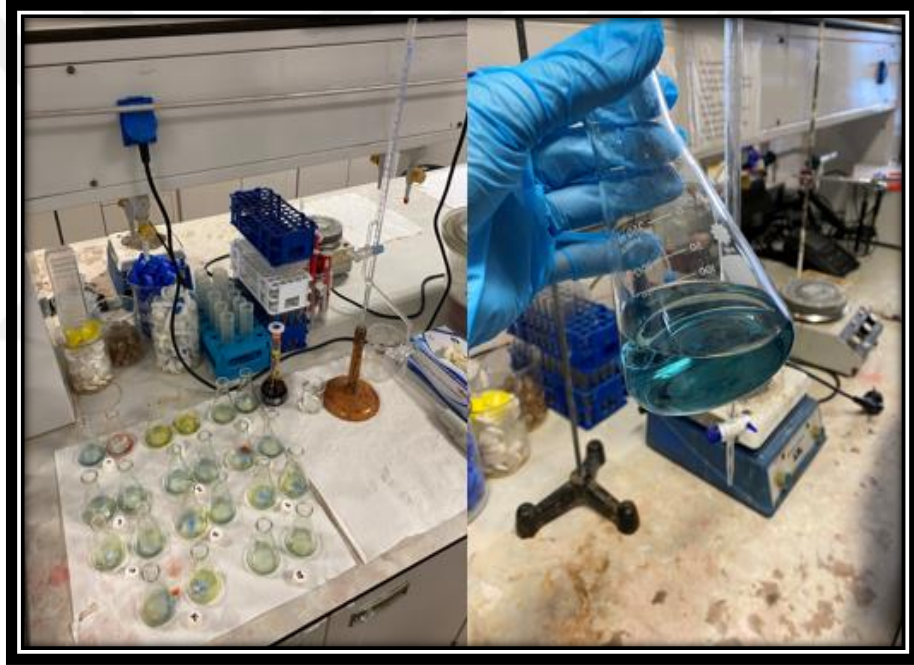
Yanılma Payı Hesabı;

Potasyum Hidrojen Ftalat KOİ standartta 500 mg/L'dir. Yapmış olduğumuz tanık deneylerde çıkan KOİ değeri ile bölünerek hesaplanmaktadır.

$$Y.P. = \frac{500}{Tanık Deney Ftlat mg KOİ/L}$$



Görsel 4.6. *VELP ECO 25 Termoreaktör*



Görsel 4.7. *Titrasyon*

4.4. İletkenlik

Buzdolabında bulunan numune ~800 mL miktarda behere alınarak deney başlamadan önce ve sonra Orion Star™ A 215 Masa Tipi pH/İletkenlik Ölçer kullanılarak ölçülmüştür.

4.5. pH

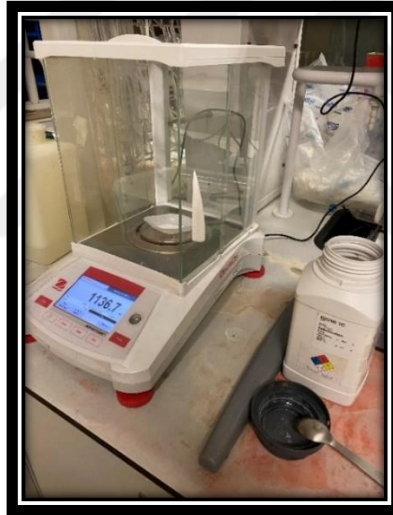
Buzdolabında bulunan numune ~800 mL miktarda behere alınarak TSE 3263 Suyun Analiz Metotları pH Değerinin Tayini standardına göre deney başlamadan önce ve sonra Orion Star™ A 215 Masa Tipi pH/İletkenlik Ölçer kullanılarak ölçülmüştür.

4.6. Sıcaklık

Buzdolabında bulunan numune ~800 mL miktarda behere alınarak deney başlamadan önce, anlık olarak deney sırasında ve deney sonunda ISOLAB Baget Tipi Termometre kullanılarak ölçülmüştür.

4.7. Destek Elektrolit Kullanılması

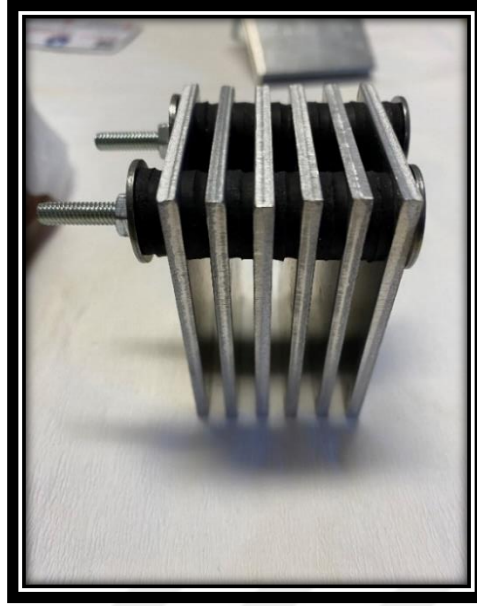
Alüminyum elektrota 20, 25 mA/cm² akım yoğunluklarında 5, 10, 20 mM, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20, 30, 40 mM Na₂SO₄ ve 20, 25 mA/cm² akım yoğunluklarında 5, 10, 20 mM, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20, 30, 40 mM NaNO₃ elektrolit ilaveleri ile çalışmalar yapılmıştır. Demir elektrota 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 5, 10, 20 mM Na₂SO₄ ve 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 5, 10, 20 mM NaNO₃ elektrolit ilaveleri ile çalışmalar yapılmıştır. Destek elektrolit OHAUS Marka PA224C Model Analitik Terazide tartılarak eklenmiştir.



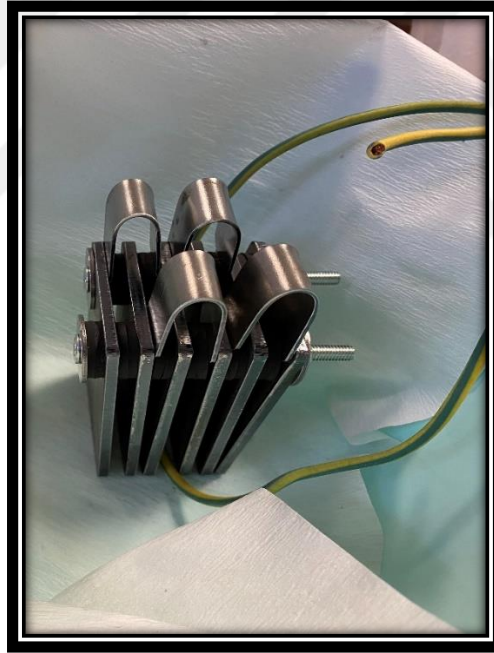
Görsel 4.8. OHAUS Marka PA224C Model Analitik Terazide Destek Elektrolit Ölçülmesi

4.8. Deney Düzenegi

Yapılan deneysel çalışmada Alüminyum ve Demir elektrot kullanılmıştır. Her iki elektrot kümesi 6 adet paralel plakalı elektrottan oluşmaktadır. Elektrotların boyutları 6 cm × 4 cm × 0,3 cm'dir.



Görsel 4.9. *Alüminyum Elektrot Kümesi*



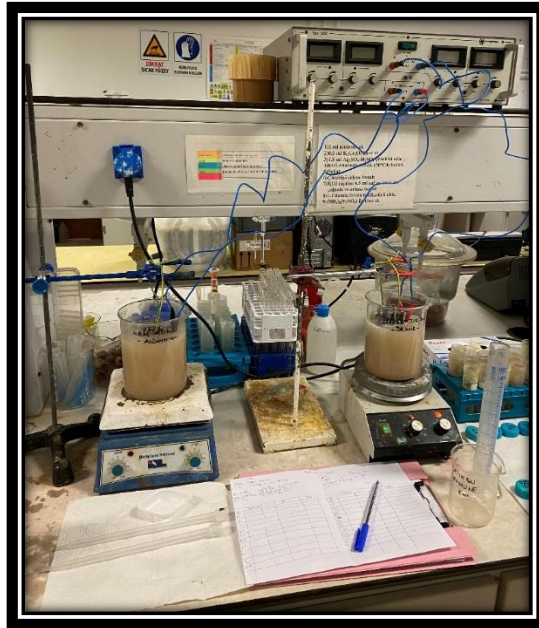
Görsel 4.10. *Demir Elektrot Kümesi*

Deney öncesinde buzdolabında bulunan ~800 mL numune 2 ayrı behere alınarak içerisine manyetik karıştırıcıda karışması için balık eklenmiştir. Deney oda sıcaklığında ve sabit hızda manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak yapılmıştır. Beher içerisine hazırlanan elektrotlar Statron 3262.1 Bench PSU galvanik akım cihazı ile belirlenen sabit akımda tüm deney boyunca bağlı kalmıştır. Başlangıçta deney süresi 60 dk. olarak belirlenerek deney başında numune alınmış ve sonrasında 5'er dk. aralıklarla numuneler alınmıştır. Daha sonra deneylerin süresi 90 dakikaya yükseltilmiş ve 60. dk. kadar her 10 dk. bir, 60.

dk. sonra ise 15 dk. aralıkla numuneler alınmıştır ve deney tamamlanmıştır. 2-3 saat sonunda beher içerisinde çökelen çamur ve arıtılan su gözlemlenmiştir. KOİ tayini yapılarak sonuçlar incelenmiştir. Numuneler her alındığında 10 kat seyreltme oranı uygulanarak KOİ öncesi santrifüjlenmiştir. Deney süresince belirlenen numune alım aralığında sıcaklık ve gerilim değerleri not edilmiştir. Deneyin başlangıcında, destek elektrolit ilavesi sonrasında ve deney sonunda olmak üzere her durumda pH ve elektriksel iletkenlik değerleri ölçülmüştür.



Görsel 4.11. *Başlangıç Deney Düzenegi-1*



Görsel 4.12. *Başlangıç Deney Düzenegi-2*



Görsel 4.13. Deney Sonu Beher İçerisinde Bulunan Atıksular

4.9. Deneysel Değişkenler

Gıda endüstrisi atıksuyu elektrokoagülasyon arıtım çalışmasında değişken parametreler sırasıyla reaksiyon süresi, akım yoğunluğu, elektrot cinsi ve destek elektrolit ilavesi olarak belirlenmiştir. Değişkenler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- ❖ Reaksiyon süresi başlangıçta 60 dk. olarak belirlenerek deney başlamadan numune alınmış ve sonrasında 5'er dk. aralıklarla numuneler alınmıştır. Daha sonra deneylerin süresi 90 dakikaya yükseltilmiş ve 60. dk. kadar her 10 dk. bir, 60. dk. sonra ise 15 dk. aralıkla numuneler alınmıştır.
- ❖ Akım yoğunluğu Alüminyum ve Demir elektrotlar için 10, 15, 20, 25, 30 mA/cm² değerlerinde çalışılmıştır.
- ❖ Demir ve Alüminyum elektrot ile çalışmalar yapılmıştır.
- ❖ Alüminyum elektrota 20, 25 mA/cm² akım yoğunluklarında 5, 10, 20 mM, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20, 30, 40 mM Na₂SO₄ ve 20, 25 mA/cm² akım yoğunluklarında 5, 10, 20 mM, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20, 30, 40 mM NaNO₃ elektrot ilaveleri ile çalışmalar yapılmıştır.
- ❖ Demir elektrota 25 mA/cm² akım yoğunluklarında 5, 10, 20 mM Na₂SO₄ ve 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 5, 10, 20 mM NaNO₃ elektrot ilaveleri ile çalışmalar yapılmıştır.

Deney süresince belirlenen numune alım aralığında sıcaklık ve gerilim değerleri not edilmiştir. KOİ tayinleri yapılarak grafiklerle değerlendirilmiştir.

5. BULGULAR

Çalışmada gıda endüstrisinin OSB arıtma tesisine giden çıkış noktasından alınan ham atıksuyu elektrokimyasal arıtım proseslerinden elektrokoagülasyon yöntemi ile giderim veriminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Alınan atıksu Alüminyum ve Demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmış ve bu yöntemde KOİ parametresindeki değişim gözlenerek değerlendirilmiştir. Akım yoğunluğu ve destek elektrolitlerin (Na_2SO_4 ve NaNO_3) ilavesinin giderim verimine etkisi incelenmiştir. Başlangıç ve deney sonlarında pH ve elektriksel iletkenlik değerlerine bakılarak deney sonlarında akım yoğunluklarına, gerilim (volt) miktarına bağlı olarak tüketilen enerji miktarı hesaplanmıştır.

5.1. Akım Yoğunluğuna Göre Deneysel Çalışma

Elektrokoagülasyon arıtımda elektrotlara uygulanan elektrik akımının elektrotun çözelti içinde kalan etkin yüzey alanına oranlanmasıyla “akım yoğunluğu” elde edilmektedir. Bu çalışmada 6 adet pürüzsüz yüzeye sahip paralel plaka kullanılarak hem alüminyum hem de demir elektrot kümesi oluşturulmuştur. Her iki elektrot kümesi 3 anot 3 katot olmak üzere 6 adet paralel plakalı elektrottan oluşmaktadır. Elektrotların boyutları $6 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0,3 \text{ cm}$ ’dir.

$$J = \frac{I}{A}$$

- * J: Akım Yoğunluğu (mA/cm^2)
- * I: Elektrik Akımı (mA)
- * A: Elektroaktif Alan (cm^2)

Elektrota elektroaktif alan sabit bir değerde tutularak uygulanan akımın artırılması ile akım yoğunluğunun artışı sağlanmıştır. Etkin alan 4,2 cm uzunlukta ve 4 cm genişlikte tutulmuştur. 3 anot bulunduğu ve plakanın 2 yüzü olduğu için aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

Etkin Alan Hesabı;

$$\text{Etkin Alan} = 4,2 \times 4 \times 3 \times 2$$

$$\text{Etkin Alan} = 100 \text{ cm}^2$$



Görsel 5.1. Kullanılan Elektrot Plakasının Etkin Alan Ölçüleri

Örnek Akım Yoğunluğu Hesabı;

$$J = \frac{1A}{100} = \frac{1000}{100} = 10 \text{ mA/cm}^2$$

- * 1 A göre örnek olarak hesaplanmıştır
- * 1 A $\rightarrow$ 1000 mA
- * 100 cm² Etki Alanı

KOİ Giderim Verimi Hesabı;

$$\text{KOİ Giderim Verimi} = \frac{KOİ_o - KOİ_t}{KOİ_o \times 100}$$

- * KOİ_o: Başlangıçtaki KOİ Derişimi (mg/L)
- * KOİ_t: t Anındaki KOİ Derişimi (mg/L)

Akım yoğunluğu, elektrokimyasal proseslerde en önemli parametrelerdendir. Anot çözünme hızını belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Yüksek miktarda akım yoğunluğu Faraday yasasına göre elektrotlarda üretilen iyon miktarını arttırmakta böylece H₂ kabarcıkları da artmaktadır. Bu durum kirleticileri çözeltiden uzaklaştırmaktadır. Yapılan deneylerin sonunda optimum akım yoğunluğu elde edilecektir. Akım yoğunluğunda çok fazla artış olduğu zaman reaktördeki atıksuyun ısınması gibi bazı

olumsuz etkiler ortaya çıkmaktadır, bu gibi problemleri önlemek için optimum akım yoğunluğunda çalışılması tavsiye edilmektedir (Adhoum, 2004).

Bu çalışmada KOİ giderim veriminde akım yoğunluğunun etkisini gözlemlemek amacıyla akım yoğunluğu Alüminyum ve Demir elektrotlar için 10, 15, 20, 25, 30 mA/cm² değerlerinde çalışılmıştır. 10, 15 mA/cm² akım yoğunluğunda reaksiyon süresi 60 dk. olarak belirlenerek başlangıçta numune alınmış ve sonrasında 5'er dk. aralıklarla numuneler alınmıştır. Daha sonra 20, 25, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda deneylerin süresi 90 dakikaya yükseltilmiş ve 60. dk. kadar her 10 dk. bir, 60. dk. sonra ise 15 dk. aralıkla numuneler alınmıştır. KOİ değerleri belirlendikten sonra KOİ giderim verimi hesaplanmıştır.

5.1.1. Alüminyum Elektrot ile Akım Yoğunluğuna Göre Deneysel Çalışma

Alüminyum Elektrot ile yapılan çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.1. Alüminyum Elektrot 10 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7309	0,00	4	7,4	0,00	0,00
5	6335	13	28	8,2	3,42	3,42
10	5447	26	27	8,8	7,29	10,71
15	5175	29	32	8,9	11,06	21,78
20	5261	28	33	8,8	14,67	36,44
25	5334	27	35	8,9	18,44	54,88
30	5061	31	36	9,2	23,00	77,88
35	4875	33	38	8,9	25,96	103,83
40	4602	37	38	9,2	30,50	134,34
45	4875	33	40	9,4	35,26	169,59
50	4788	35	40	7,0	28,96	198,55
55	4443	39	42	6,9	31,63	230,17
60	4343	41	47	7,1	35,50	265,67
pH ₀ : 5,35 - Eİ ₀ : 1,05 mS/cm						
pH ₆₀ : 6,01 - Eİ ₆₀ : 0,98 mS/cm						

Tablo 5.2. Alüminyum Elektrot 15 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	8008	0,00	4	8,0	0,00	0,00
5	6433	20	25	9,2	3,83	3,83
10	5884	26	28	9,3	7,71	11,54
15	5557	31	30	9,2	11,44	22,98
20	5334	33	33	8,7	14,50	37,48
25	5215	35	35	9,0	18,75	56,23
30	4992	38	36	7,9	19,63	75,85
35	4888	39	37	7,6	22,20	98,00
40	4784	40	38	7,6	25,20	123,19
45	4680	42	40	7,2	26,81	150,00
50	4561	43	41	7,0	29,17	179,17
55	4458	44	43	6,6	30,00	209,20
60	4339	46	47	6,5	32,50	241,69
pH₀: 4,94 - Eİ₀: 1,52 mS/cm pH₆₀: 6,42 - Eİ₆₀: 1,19 mS/cm						

Tablo 5.3. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları

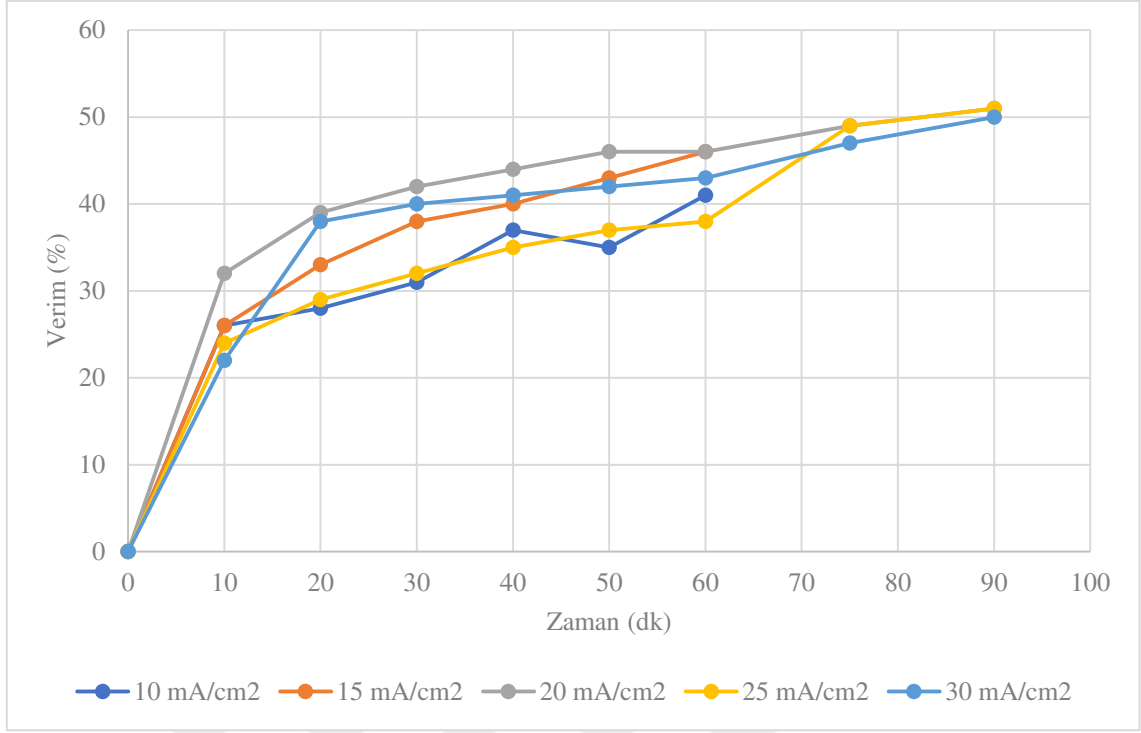
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	8005	0,00	4	42,0	0,00	0,00
10	5472	32	22	34,4	28,67	28,67
20	4900	39	36	31,2	52,00	80,67
30	4616	42	40	28,3	70,75	151,42
40	4523	44	49	28,3	94,33	245,75
50	4335	46	55	28,5	118,75	364,50
60	4335	46	61	28,4	141,80	506,30
75	4051	49	66	26,2	164,40	669,70
90	3955	51	67	27,0	202,50	872,19
pH₀: 4,98 - Eİ₀: 1,53 mS/cm pH₉₀: 5,76 - Eİ₉₀: 1,02 mS/cm						

Tablo 5.4. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları

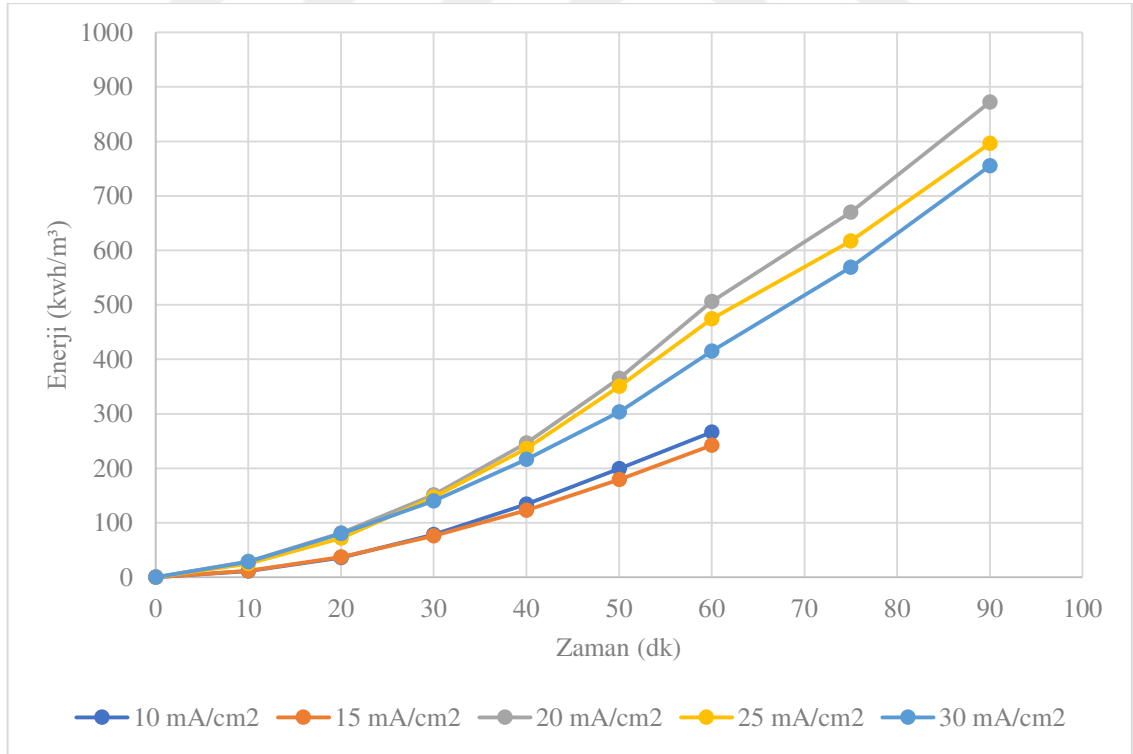
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7751	0,00	4	27,8	0,00	0,00
10	5895	24	24	29,5	24,63	24,63
20	5525	29	35	28,5	47,50	71,13
30	5251	32	46	30,0	75,00	147,13
40	5066	35	58	26,8	89,17	236,29
50	4882	37	65	27,2	113,34	349,63
60	4793	38	70	24,8	124,00	473,63
75	3957	49	75	23,0	143,40	617,06
90	3779	51	82	23,9	179,25	796,31
pH ₀ : 2,81 - Eİ ₀ : 6,60 mS/cm pH ₉₀ : 6,04 - Eİ ₉₀ : 1,37 mS/cm						

Tablo 5.5. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7821	0,00	4	27,7	0,00	0,00
10	6133	22	31	34,0	28,33	28,33
20	4888	38	45	30,8	51,25	79,58
30	4711	40	60	24,3	60,63	140,21
40	4622	41	67	22,8	75,83	216,04
50	4533	42	72	20,9	87,08	303,13
60	4444	43	76	22,3	111,50	414,63
75	4177	47	78	24,8	154,69	569,31
90	3911	50	86	24,7	185,30	754,56
pH ₀ : 2,44 - Eİ ₀ : 10,06 mS/cm pH ₉₀ : 5,77 - Eİ ₉₀ : 1,53 mS/cm						



Şekil 5.1. Alüminyum Elektrotta Akım Yoğunluğunun KOİ Gideriminde Etkisi



Şekil 5.2. Alüminyum Elektrotta Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresine bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.4., Şekil 5.1. ve Şekil 5.2.'de 25 mA/cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %51 artırım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğu uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Akım yoğunluğu arttırıldığında verimin çok fazla değişmediği gözlemlenebilmektedir. Ayrıca verim açısından fark oluşturmadığı halde işletme maliyetini belirgin bir şekilde arttırdığı gözlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğunda çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

5.1.2. Demir Elektrot ile Akım Yoğunluğuna Göre Deneysel Çalışma

Demir Elektrot ile yapılan çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.6. *Demir Elektrot 10 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları*

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7854	0,00	4	2,5	0,00	0,00
5	7023	11	13	2,6	1,08	1,08
10	6653	15	13	2,9	2,38	3,46
15	6006	23	13	3,6	4,44	7,90
20	6098	22	14	4,2	6,92	14,81
25	5544	29	15	4,8	10,00	24,81
30	5452	30	16	4,3	10,75	35,56
35	5452	30	16	4,8	13,85	49,42
40	5267	33	17	5,3	17,50	66,92
45	5174	34	18	6,0	22,50	89,42
50	4897	37	19	6,4	26,67	116,08
55	4897	37	19	6,4	29,33	145,42
60	4712	40	21	6,7	33,50	178,92
pH ₀ : 2,31 - Eİ ₀ : 9,79 mS/cm pH ₆₀ : 6,01 - Eİ ₆₀ : 3,29 mS/cm						

Tablo 5.7. *Demir Elektrot 15 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları*

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7809	0,00	4	7,4	0,00	0,00
5	6360	19	10	8,3	3,46	3,46
10	6167	21	11	10,3	8,54	12,00
15	5974	23	13	11,7	14,63	26,63
20	5689	27	14	12,1	20,08	46,71
25	5396	31	17	12,5	25,94	72,65
30	5011	36	20	11,2	27,88	100,52
35	4726	40	20	11,7	33,98	134,50
40	4533	42	22	11,6	38,50	173,00
45	4340	44	24	11,9	44,44	217,44
50	4078	48	25	11,1	46,25	263,69
55	4047	48	26	11,1	50,88	314,56
60	3947	49	26	11,8	59,00	379,56
pH ₀ : 3,14 - Eİ ₀ : 10,05 mS/cm pH ₆₀ : 3,90 - Eİ ₉₀ : 4,47 mS/cm						

Tablo 5.8. *Demir Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları*

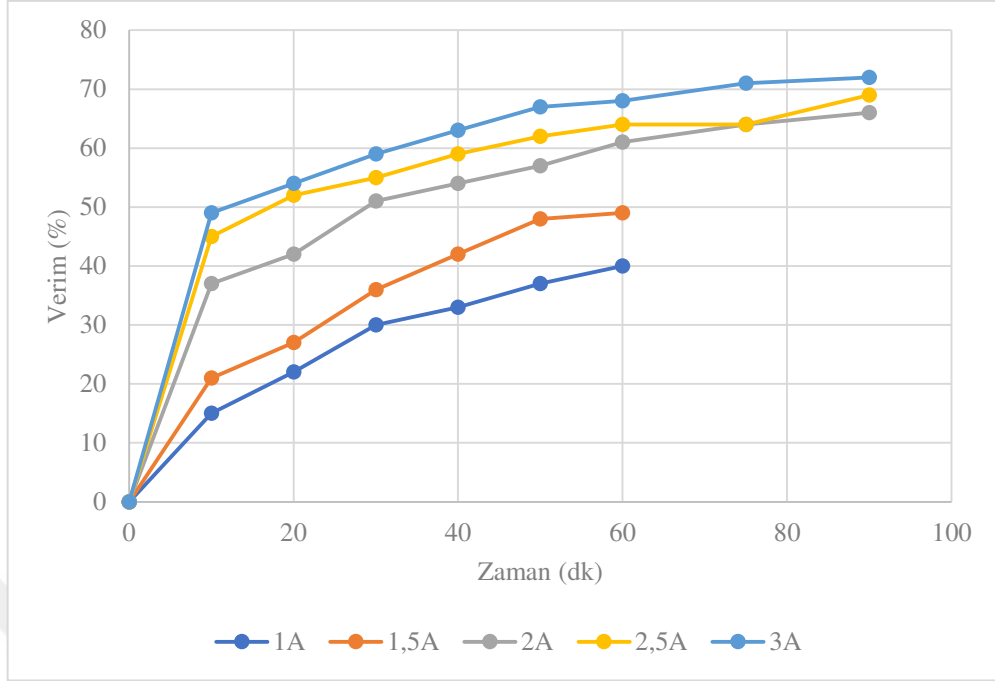
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7156	0,00	4	12,0	0,00	0,00
10	4520	37	22	12,3	10,21	10,21
20	4143	42	25	14,1	23,42	33,63
30	3482	51	29	14,1	35,25	68,88
40	3294	54	32	14,8	49,33	118,21
50	3106	57	35	13,9	57,71	175,92
60	2821	61	38	14,5	72,25	248,17
75	2541	64	42	13,7	85,31	333,48
90	2448	66	49	11,4	85,50	418,98
pH ₀ : 6,25 - Eİ ₀ : 0,96 mS/cm pH ₉₀ : 7,44 - Eİ ₉₀ : 0,75 mS/cm						

Tablo 5.9. Demir Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları

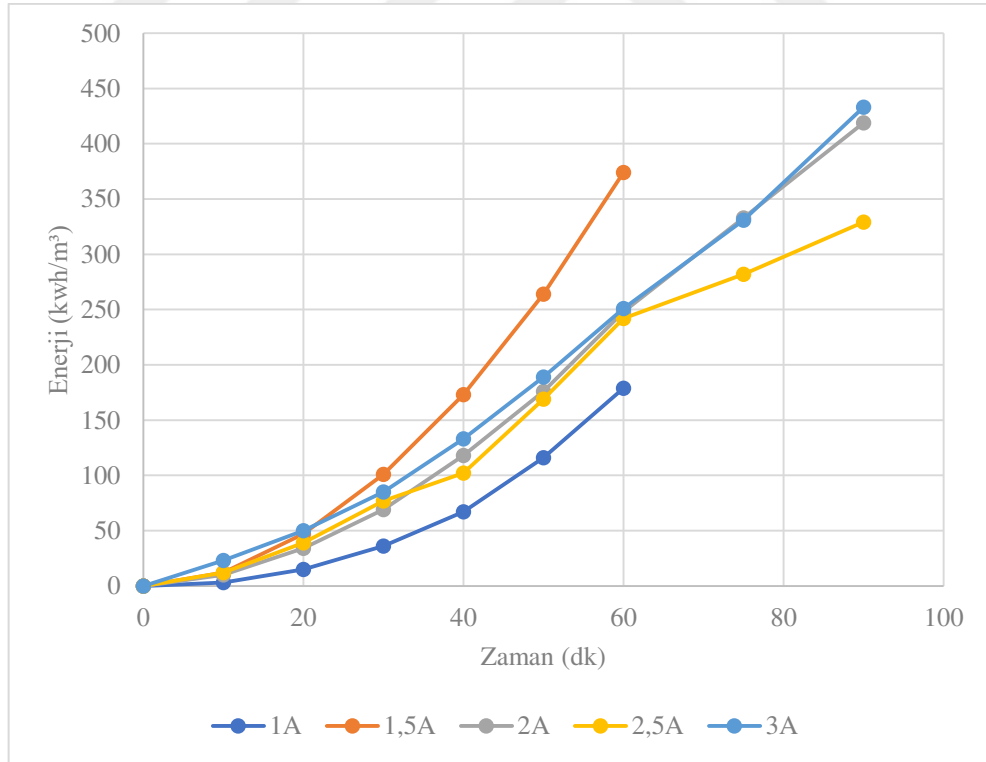
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7770	0,00	4	17,2	0,00	0,00
10	4220	45	23	14,7	12,21	12,21
20	3741	52	36	16,1	26,83	39,04
30	3453	55	41	15,0	37,50	76,54
40	3165	59	45	7,6	25,33	101,88
50	2974	62	49	16,0	66,67	168,54
60	2782	64	52	14,7	73,25	241,79
75	2782	64	53	6,5	40,31	282,10
90	2398	69	54	6,2	46,50	328,60
pH ₀ : 5,86 - Eİ ₀ : 0,95 mS/cm pH ₉₀ : 7,52 - Eİ ₉₀ : 0,90 mS/cm						

Tablo 5.10. Demir Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7022	0,00	4	32,6	0,00	0,00
10	3604	49	34	27,8	23,17	23,17
20	3234	54	43	16,3	27,08	50,25
30	2864	59	53	13,8	34,50	84,75
40	2587	63	54	14,5	48,17	132,92
50	2310	67	58	13,5	56,04	188,96
60	2218	68	57	12,5	62,50	251,46
75	2033	71	58	12,8	80,00	331,46
90	1940	72	58	13,6	101,63	433,08
pH ₀ : 6,00 - Eİ ₀ : 0,93 mS/cm pH ₉₀ : 6,62 - Eİ ₉₀ : 0,89 mS/cm						



Şekil 5.3. Demir Elektrotta Akım Yoğunluğunun KOİ Gideriminde Etkisi



Şekil 5.4. Demir Elektrotta Akım Yoğunluğunun Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, akım yoğunluğu ve reaksiyon süresine bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.9., Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'de 25 mA/cm² akım yoğunluğunda yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %69 artırım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğu uygulanarak en düşük enerji ile yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Tablo 5.10. incelendiğinde 30 mA/cm² akım yoğunluğu arttırıldığında verim %3 artış gösterdiği fakat işletme maliyetini 104,48 kWh/m³ arttırdığı gözlenmiştir. Bu durum ise güncel faturalandırma fiyat tarifeleri göz önüne alındığında 1 m³ atıksuyun KOİ'sinin %72'sinin giderilmesi için harcanan yaklaşık 130 TL gibi bir fark oluşturmaktadır. %72 verim ile 1940 mg KOİ/L sonucu OSB atıksu deşarj standartları (1200 mg KOİ/L) ulaşamaması sebebiyle KÖP oranında herhangi bir değişikliğe uğratmamaktadır. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğunda çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

5.2. Destek Elektrolit İlavesine Göre Deneysel Çalışma

Çalışmada destek elektrolit olarak Na₂SO₄ ve NaNO₃ kullanılmıştır. Alüminyum elektrota 20, 25 mA/cm² akım yoğunluklarında 5, 10, 20 mM, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20, 30, 40 mM Na₂SO₄ ve 20, 25 mA/cm² akım yoğunluklarında 5, 10, 20 mM, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20, 30, 40 mM NaNO₃ elektrolit ilaveleri ile çalışmalar yapılmıştır. Demir elektrota 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 5, 10, 20 mM Na₂SO₄ ve 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 5, 10, 20 mM NaNO₃ elektrolit ilaveleri ile çalışmalar yapılmıştır.

5.2.1. Alüminyum Elektrot ile Destek Elektrolit İlavesine Göre Deneysel Çalışma

Alüminyum Elektrot, 20 mA/cm² akım yoğunluğu ile 5, 10, 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.11. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 5 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

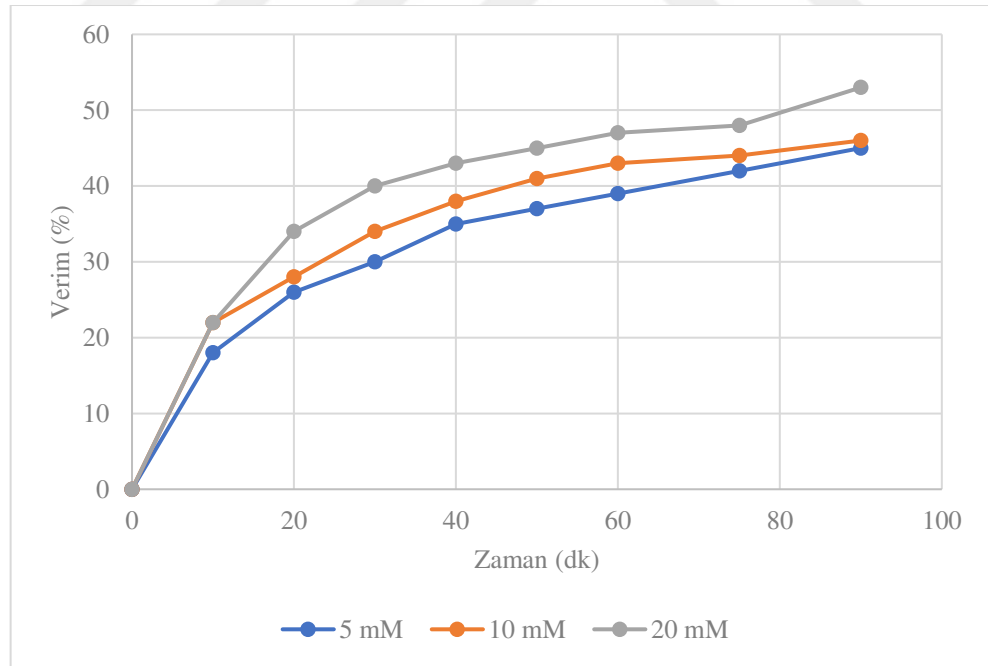
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	8220	0,00	7	18,6	0,00	0,00
10	6735	18	19	19,8	16,50	16,50
20	6098	26	25	18,1	30,20	46,67
30	5722	30	29	15,4	38,50	85,17
40	5352	35	34	15,3	50,80	136,00
50	5167	37	39	15,3	63,80	199,75
60	4983	39	44	29,1	145,50	345,25
75	4798	42	54	28,0	175,00	520,25
90	4517	45	62	27,1	202,88	726,13
pH₀: 2,36 - Eİ₀: 9,82 mS/cm pH_{Na2SO4}: 2,27 - Eİ_{Na2SO4}: 9,95 mS/cm pH₉₀: 4,94 - Eİ₉₀: 2,50 mS/cm						

Tablo 5.12. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 10 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

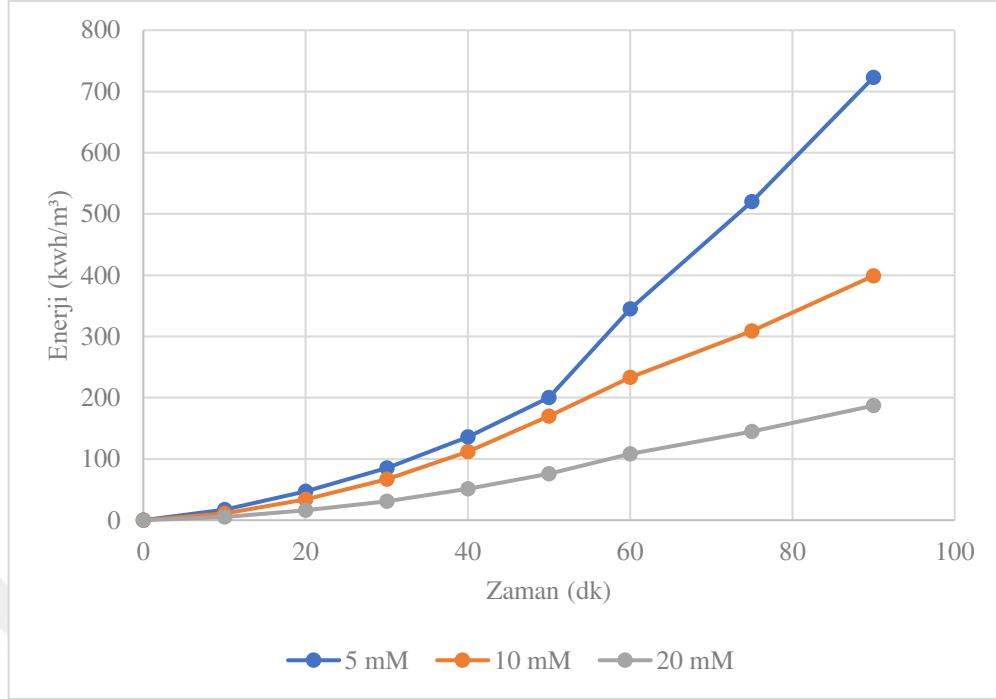
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7300	0,00	8	16,2	0,00	0,00
10	5729	22	17	12,8	10,67	10,67
20	5267	28	21	13,8	23,00	33,70
30	4805	34	24	13,3	33,13	66,80
40	4528	38	28	13,7	45,67	112,50
50	4343	41	32	13,8	57,30	169,80
60	4158	43	36	12,7	63,50	233,30
75	4066	44	38	12,1	75,63	308,90
90	3973	46	41	12,0	89,63	398,50
pH₀: 2,31 - Eİ₀: 9,71 mS/cm pH_{Na2SO4}: 2,29 - Eİ_{Na2SO4}: 10,60 mS/cm pH₉₀: 5,19 - Eİ₉₀: 3,96 mS/cm						

Tablo 5.13. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7887	0,00	7	8,0	0,00	0,00
10	6149	22	15	6,5	5,40	5,38
20	5165	34	18	6,5	10,80	16,13
30	4713	40	20	6,1	15,10	31,25
40	4532	43	22	6,1	20,20	51,42
50	4351	45	25	6,0	25,00	76,42
60	4169	47	27	6,3	31,30	107,67
75	4077	48	30	6,1	37,80	145,48
90	3718	53	32	5,6	42,00	187,48
pH₀: 2,25 - Eİ₀: 9,85 mS/cm pH_{Na2SO4}: 2,27 - Eİ_{Na2SO4}: 11,08 mS/cm pH₉₀: 5,51 - Eİ₉₀: 4,65 mS/cm						



Şekil 5.5. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile Na₂SO₄ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.6. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile Na₂SO₄ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.13., Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da 20 mM Na₂SO₄ destek elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %53 arıtım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında verimin düşük olduğu gibi işletme maliyetini belirgin bir şekilde arttırdığı gözlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

Alüminyum Elektrot, 25 mA/cm² akım yoğunluğu ile 5, 10, 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.14. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 5 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

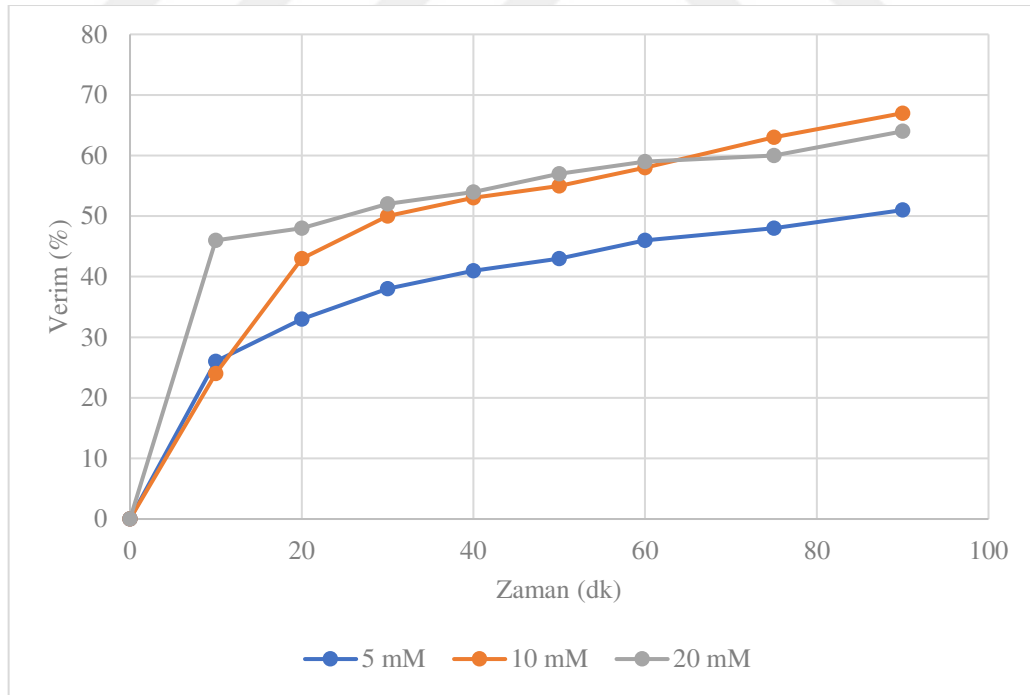
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7809	0,00	5	17,9	0,00	0,00
10	5782	26	21	15,3	12,71	12,71
20	5203	33	19	11,3	18,83	31,54
30	4818	38	23	8,7	21,75	53,29
40	4625	41	26	9,1	30,33	83,63
50	4433	43	29	9,3	38,75	122,38
60	4240	46	34	8,5	42,50	164,88
75	4047	48	34	8,6	53,75	218,63
90	3854	51	38	8,8	65,63	284,25
pH₀: 3,17 - Eİ₀: 9,75 mS/cm pH_{Na2SO4}: 3,19 - Eİ_{Na2SO4}: 10,65 mS/cm pH₉₀: 7,02 - Eİ₉₀: 2,35mS/cm						

Tablo 5.15. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 10 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

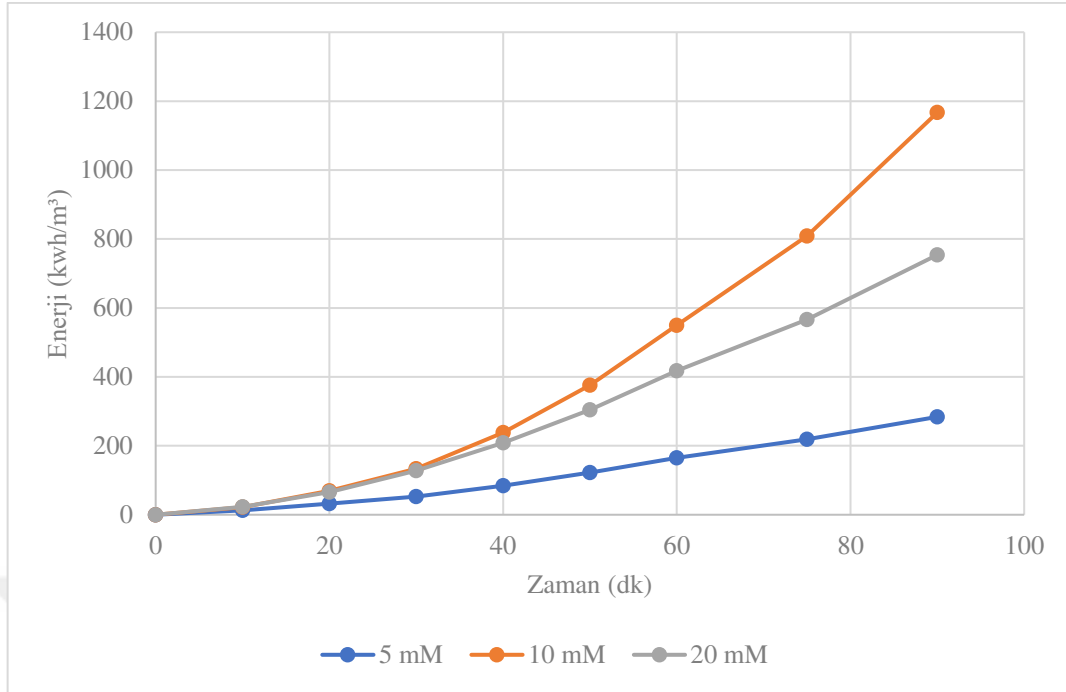
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7156	0,00	7	38,2	0,00	0,00
10	5465	24	36	26,2	21,80	21,80
20	4047	43	39	28,1	46,75	68,50
30	3578	50	52	25,6	64,00	132,50
40	3390	53	58	31,7	105,50	238,00
50	3201	55	72	33,2	138,13	376,20
60	3013	58	79	34,8	173,75	549,90
75	2636	63	88	41,4	258,75	808,70
90	2356	67	93	47,8	358,13	1166,80
pH₀: 6,20 - Eİ₀: 0,95 mS/cm pH_{Na2SO4}: 6,29 - Eİ_{Na2SO4}: 0,96 mS/cm pH₉₀: 9,47 - Eİ₉₀: 2,24 mS/cm						

Tablo 5.16. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOI	KOI Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7770	0,00	10	39,5	0,00	0,00
10	4506	46	31	27,7	23,04	23,04
20	3855	48	40	25,6	42,67	65,71
30	3482	52	50	24,9	62,13	127,83
40	3294	54	57	24,4	81,34	209,17
50	3106	57	67	22,8	94,79	303,96
60	2917	59	70	22,9	114,25	418,21
75	2732	60	75	23,7	147,81	566,02
90	2452	64	87	25,1	188,25	754,27
pH₀: 5,80 - Eİ₀: 0,94 mS/cm pH_{Na2SO4}: 5,94 - Eİ_{Na2SO4}: 2,72 mS/cm pH₉₀: 8,75 - Eİ₉₀: 4,31 mS/cm						



Şekil 5.7. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile Na₂SO₄ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.8. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile Na₂SO₄ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.16., Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'de 20 mM Na₂SO₄ destek elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %64 artırım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ilavesi uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında birinde verimin düşük diğerinde ise 20 mM Na₂SO₄ destek elektrolit veriminden yüksek olmasına rağmen işletme maliyetinin belirgin bir şekilde artış gözlenmiştir. Tablo 5.15. incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğu 10 mM Na₂SO₄ destek elektrolit ilavesinde verim %3 artış gösterdiği fakat işletme maliyetini 412,53 kWh/m³ arttırdığı gözlenmiştir. Bu durum ise güncel faturalandırma fiyat tarifeleri göz önüne alındığında 1 m³ atıksuyun KOİ'sinin %67'sinin giderilmesi için harcanan yaklaşık 516 TL gibi bir fark oluşturmaktadır. %67 verim ile 2356 mg KOİ/L sonucu OSB atıksu deşarj standartları (1200 mg KOİ/L) ulaşamaması sebebiyle KÖP oranında herhangi bir değişikliğe uğratmamaktadır. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

Alüminyum Elektrot, 30 mA/cm² akım yoğunluğu ile 20, 30, 40 mM Na₂SO₄ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.17. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

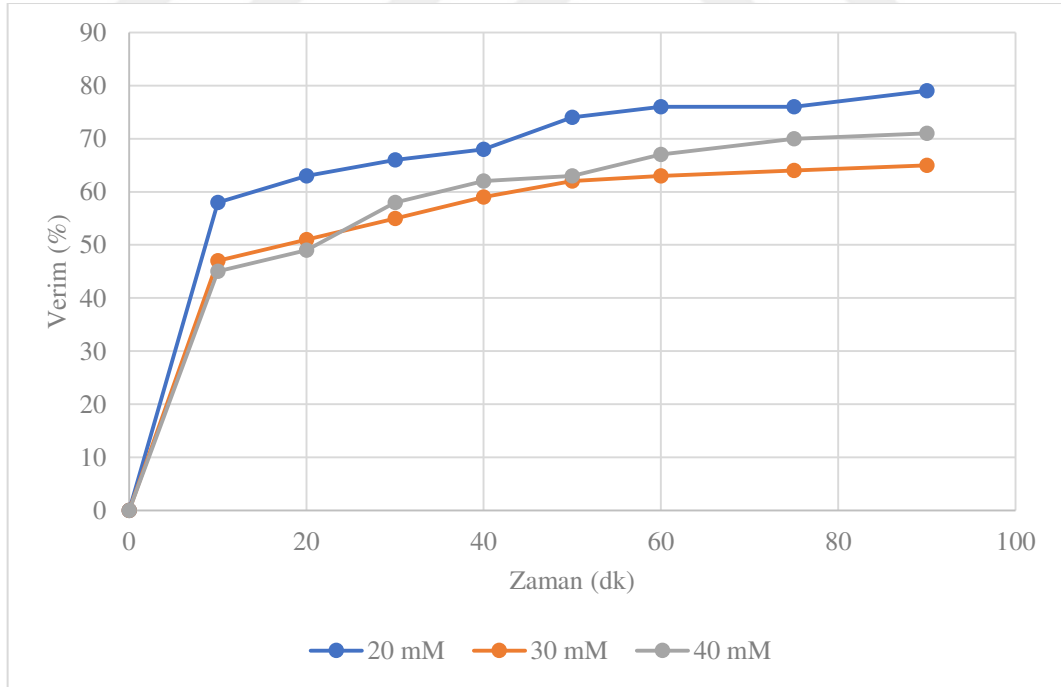
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7022	0,00	12	16,4	0,00	0,00
10	2957	58	28	13,9	11,54	11,54
20	2587	63	36	13,1	21,83	33,38
30	2402	66	41	13,0	35,50	65,88
40	2218	68	46	12,7	42,17	108,04
50	1848	74	49	12,4	51,67	159,71
60	1663	76	52	13,0	65,00	224,71
75	1663	76	58	12,1	75,63	300,33
90	1478	79	67	12,3	92,25	392,58
pH₀: 5,80 - Eİ₀: 0,94 mS/cm pH_{Na2SO4}: 5,94 - Eİ_{Na2SO4}: 2,72 mS/cm pH₉₀: 8,75 - Eİ₉₀: 4,31 mS/cm						

Tablo 5.18. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 30 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

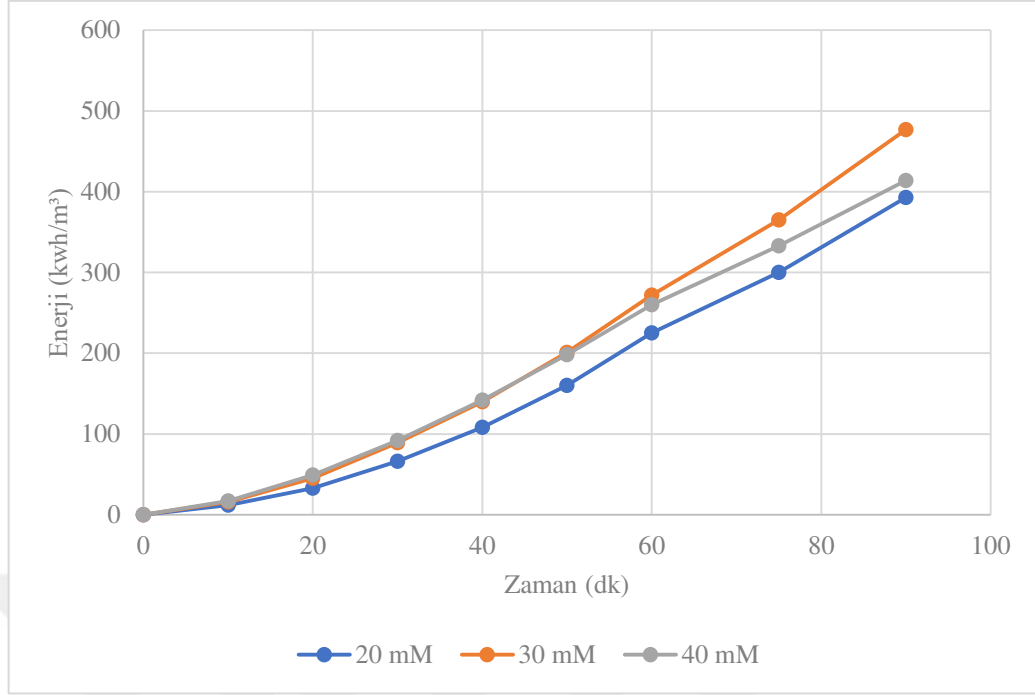
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7482	0,00	11	25,5	0,00	0,00
10	3933	47	26	18,8	15,67	15,67
20	3645	51	34	17,7	29,50	45,17
30	3357	55	40	17,5	43,63	88,79
40	3069	59	48	15,4	51,17	139,96
50	2878	62	56	14,6	60,63	200,58
60	2782	63	61	14,4	71,75	272,33
75	2686	64	64	14,8	92,50	364,83
90	2590	65	70	15,0	112,13	476,96
pH₀: 5,93 - Eİ₀: 0,90 mS/cm pH_{Na2SO4}: 5,85 - Eİ_{Na2SO4}: 3,17 mS/cm pH₉₀: 8,30 - Eİ₉₀: 6,17 mS/cm						

Tablo 5.19. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 40 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	5741	0,00	11	30,0	0,00	0,00
10	3120	45	28	20,5	17,08	17,08
20	2895	49	38	19,0	31,67	48,75
30	2421	58	46	17,2	42,88	91,63
40	2196	62	51	15,2	50,67	142,29
50	2097	63	60	13,5	56,04	198,33
60	1872	67	63	12,4	62,00	260,33
75	1747	70	67	11,6	72,19	332,52
90	1647	71	73	10,9	81,38	413,90
pH₀: 5,70 - Eİ₀: 0,90 mS/cm pH_{Na2SO4}: 5,67 - Eİ_{Na2SO4}: 4,96 mS/cm pH₉₀: 8,89 - Eİ₉₀: 7,92 mS/cm						



Şekil 5.9. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile Na₂SO₄ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.10. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile Na₂SO₄ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.17., Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da 20 mM Na₂SO₄ destek elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %79 arıtım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında hem verimin düşük hem de işletme maliyetinin belirgin bir şekilde artış olduğu gözlemlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

Alüminyum Elektrot, 20 mA/cm² akım yoğunluğu ile 5, 10, 20 mM NaNO₃ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir. Deneyler 90 dk. süre ile gerçekleştirilmek istenmiştir fakat çok fazla ısınma ve bu esnada su kaynamaya başlayarak buharlaşma gerçekleştiği, aynı zamanda 60. dakikadan sonra galvanik akım cihazında akım sabitlenemeyerek voltajda aşırı artış olmaya başladığı için deney durdurulmuştur.



Görsel 5.2. Aşırı Isı ve Voltaj Yükselmesi Sebebiyle Deney Sonunda Kabaran Numune

Tablo 5.20. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 5 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

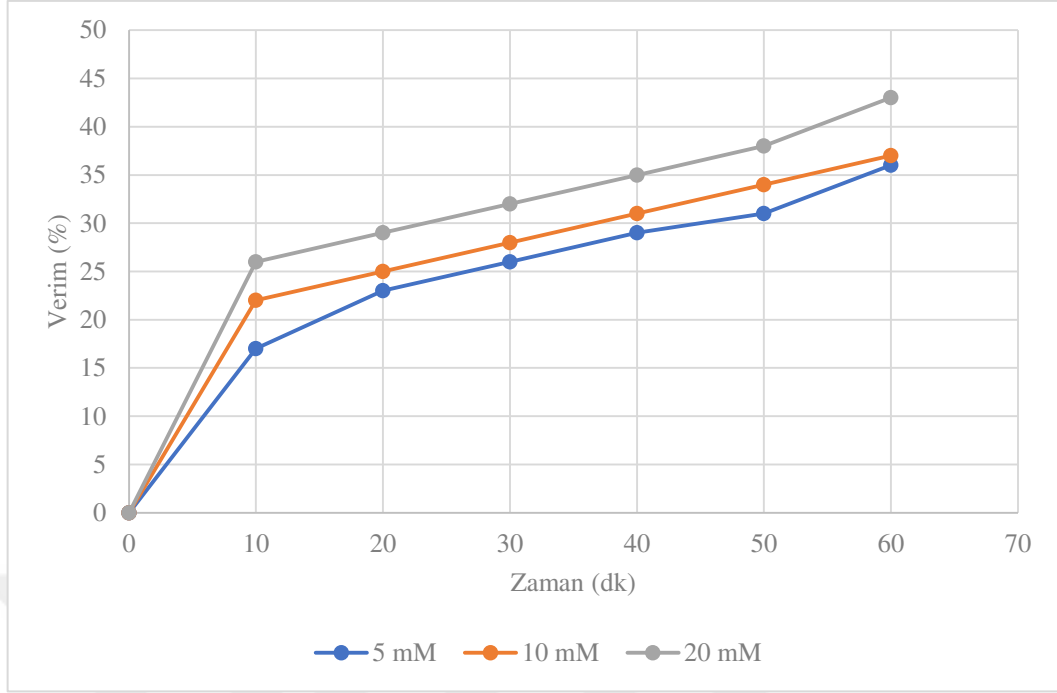
t (dk)	KOI	KOI Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7022	0,00	10	60,2	0,00	0,00
10	5819	17	44	54,8	45,67	45,67
20	5417	23	50	46,2	77,00	122,67
30	5217	26	56	38,3	95,75	218,42
40	5016	29	69	49,3	164,33	765,50
50	4815	31	83	54,5	227,08	609,83
60	4514	36	100	60,2	301,00	910,83
pH₀: 5,67 - Eİ₀: 0,97 mS/cm pH_{NaNO₃}: 4,69 - Eİ_{NaNO₃}: 2,75 mS/cm pH₆₀: 6,45 - Eİ₆₀: 1,61 mS/cm						

Tablo 5.21. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 10 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

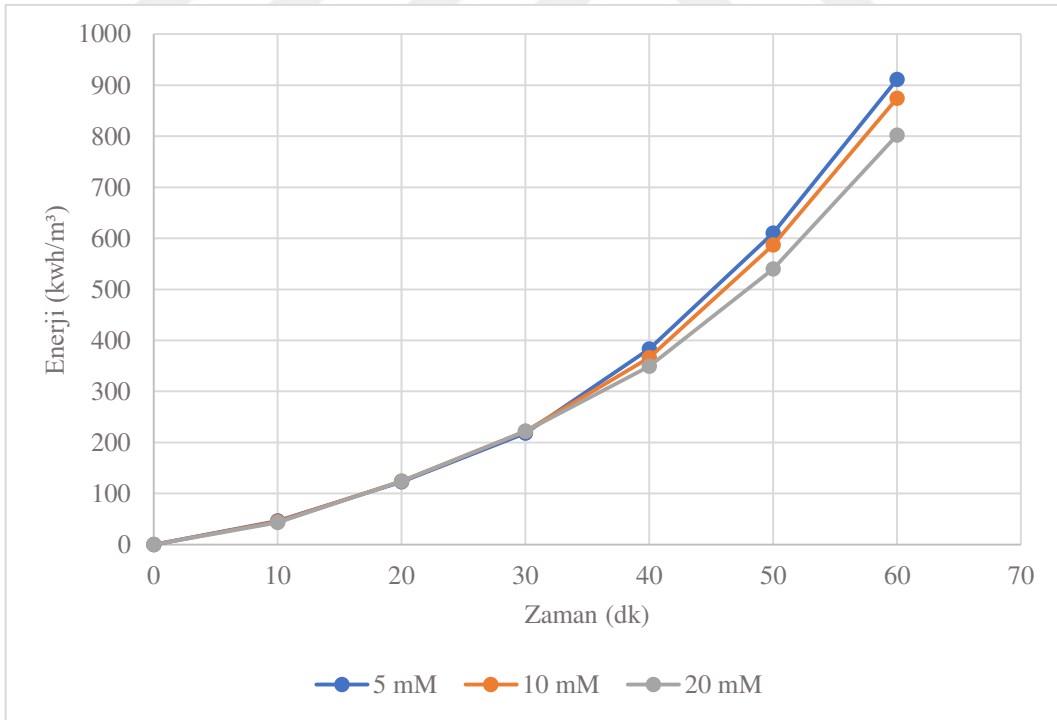
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	6521	0,00	11	57,1	0,00	0,00
10	5116	22	35	53,8	44,83	44,83
20	4916	25	48	47,8	79,58	124,42
30	4715	28	56	38,9	97,13	221,54
40	4514	31	64	43,5	144,83	366,38
50	4314	34	75	52,9	220,41	586,79
60	4113	37	100	57,5	287,50	876,29
pH₀: 5,68 - Eİ₀: 0,97 mS/cm pH_{NaNO3}: 4,76 - Eİ_{NaNO3}: 2,67 mS/cm pH₆₀: 6,44 - Eİ₆₀: 1,65 mS/cm						

Tablo 5.22. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	6784	0,00	11	52,2	0,00	0,00
10	4994	26	38	51,7	43,08	43,08
20	4794	29	47	48,3	80,50	123,58
30	4587	32	59	39,4	98,50	222,08
40	4387	35	65	38,0	126,67	348,75
50	4187	38	82	45,9	191,25	540,00
60	3891	43	98	52,4	262,00	802,00
pH₀: 5,78 - Eİ₀: 0,96 mS/cm pH_{NaNO3}: 4,80 - Eİ_{NaNO3}: 3,60 mS/cm pH₆₀: 6,85 - Eİ₆₀: 2,43 mS/cm						



Şekil 5.11. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile NaNO_3 İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.12. Alüminyum Elektrot 20 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile NaNO_3 İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.22, Şekil 5.11. ve Şekil 5.12.'de 20 mM NaNO₃ destek elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %43 artırım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 20 mM NaNO₃ destek elektroliti uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında hem verimin düşük hem de işletme maliyetinin belirgin bir şekilde artış olduğu gözlemlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM NaNO₃ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

Alüminyum Elektrot, 25 mA/cm² akım yoğunluğu ile 5, 10, 20 mM NaNO₃ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir. Deneyler 90 dk. süre ile gerçekleştirilmek istenmiştir fakat çok fazla ısınma ve bu esnada su kaynamaya başlayarak buharlaşma gerçekleştiği, aynı zamanda 60. dakikadan sonra galvonik akım cihazında akım sabitlenemeyerek voltajda aşırı artış olmaya başladığı için deney durdurulmuştur.

Tablo 5.23. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 5 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

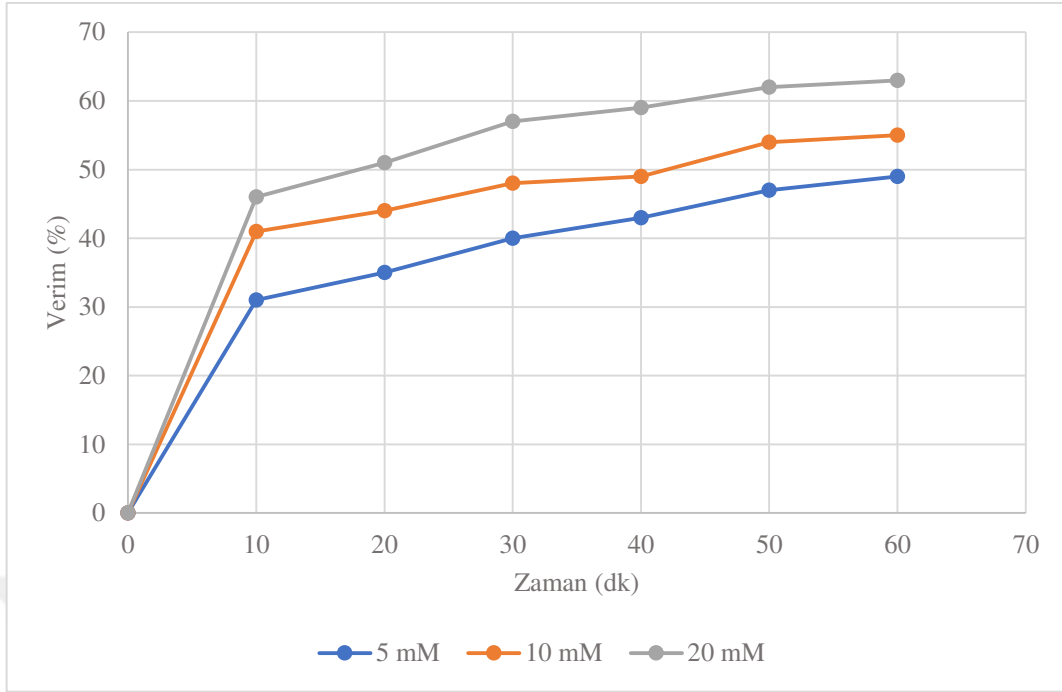
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7235	0,00	11	60,2	0,00	0,00
10	5007	31	35	58,9	49,08	49,08
20	4685	35	47	35,8	59,67	108,75
30	4363	40	52	32,5	81,25	190,00
40	4150	43	67	38,4	128,00	318,00
50	3828	47	83	39,3	163,75	481,75
60	3724	49	93	53,3	266,50	748,25
pH₀: 5,43 - Eİ₀: 0,87 mS/cm pH_{NaNO3}: 4,69 - Eİ_{NaNO3}: 1,91 mS/cm pH₆₀: 7,20 - Eİ₆₀: 1,13 mS/cm						

Tablo 5.24. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 10 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

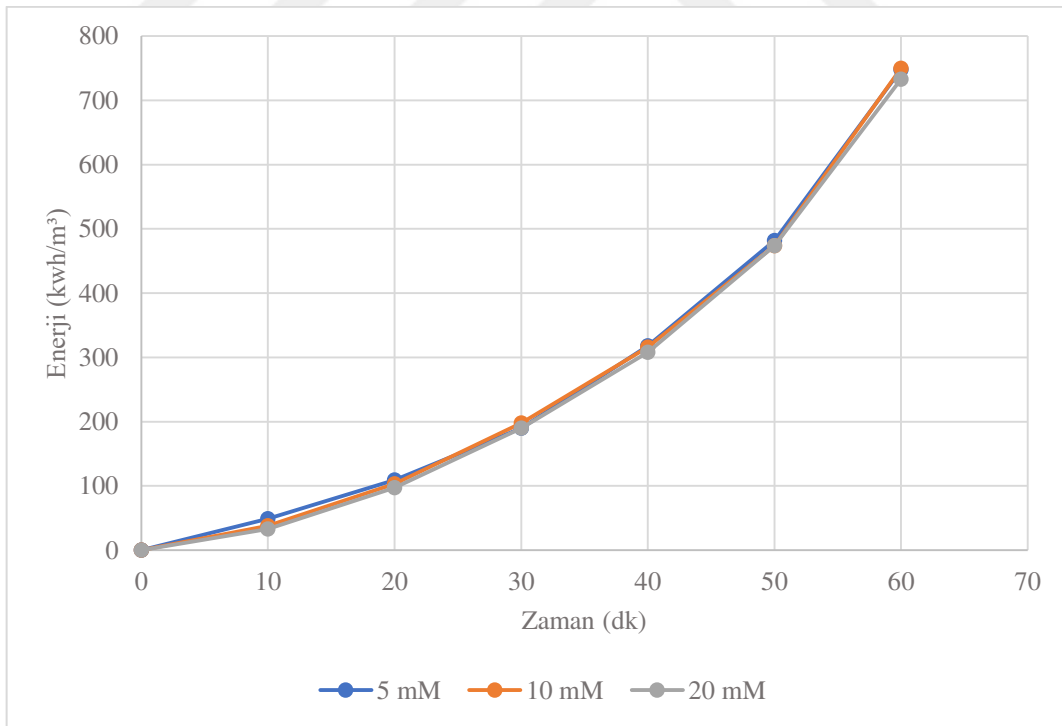
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7212	0,00	12	50,9	0,00	0,00
10	4230	41	35	46,1	38,42	38,42
20	4071	44	39	38,8	64,58	103,00
30	3761	48	49	37,9	94,63	197,63
40	3652	49	66	35,5	118,17	315,79
50	3333	54	78	37,9	157,92	473,71
60	3233	55	95	55,4	276,75	750,46
pH₀: 5,39 - Eİ₀: 0,85 mS/cm pH_{NaNO3}: 4,93 - Eİ_{NaNO3}: 2,72 mS/cm pH₆₀: 8,29 - Eİ₆₀: 1,86 mS/cm						

Tablo 5.25. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	8092	0,00	11	50,5	0,00	0,00
10	4352	46	32	39,9	33,25	33,25
20	3932	51	37	38,3	63,75	97,00
30	3506	57	59	37,3	93,25	190,25
40	3293	59	71	35,5	118,00	308,25
50	3080	62	82	39,8	165,83	474,08
60	2976	63	92	51,7	258,50	732,58
pH₀: 5,19 - Eİ₀: 0,82 mS/cm pH_{NaNO3}: 4,86 - Eİ_{NaNO3}: 3,31 mS/cm pH₆₀: 9,58 - Eİ₆₀: 2,44 mS/cm						



Şekil 5.13. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile NaNO_3 İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.14. Alüminyum Elektrot 25 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile NaNO_3 İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOI giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağılı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.25., Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.'de 20 mM NaNO₃ destek elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %63 artırım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 20 mM NaNO₃ destek elektroliti ilavesi uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında verimin düşük olmasına rağmen işletme maliyetinin belirgin bir şekilde artış gözlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM NaNO₃ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

Alüminyum Elektrot, 30 mA/cm² akım yoğunluğu ile 20, 30, 40 mM NaNO₃ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir. Deneyler 90 dk. süre ile gerçekleştirilmek istenmiştir fakat çok fazla ısınma ve bu esnada su kaynamaya başlayarak buharlaşma gerçekleştiği, aynı zamanda 60. dakikadan sonra galvonik akım cihazında akım sabitlenemeyerek voltajda aşırı artış olmaya başladığı için deney durdurulmuştur.

Tablo 5.26. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

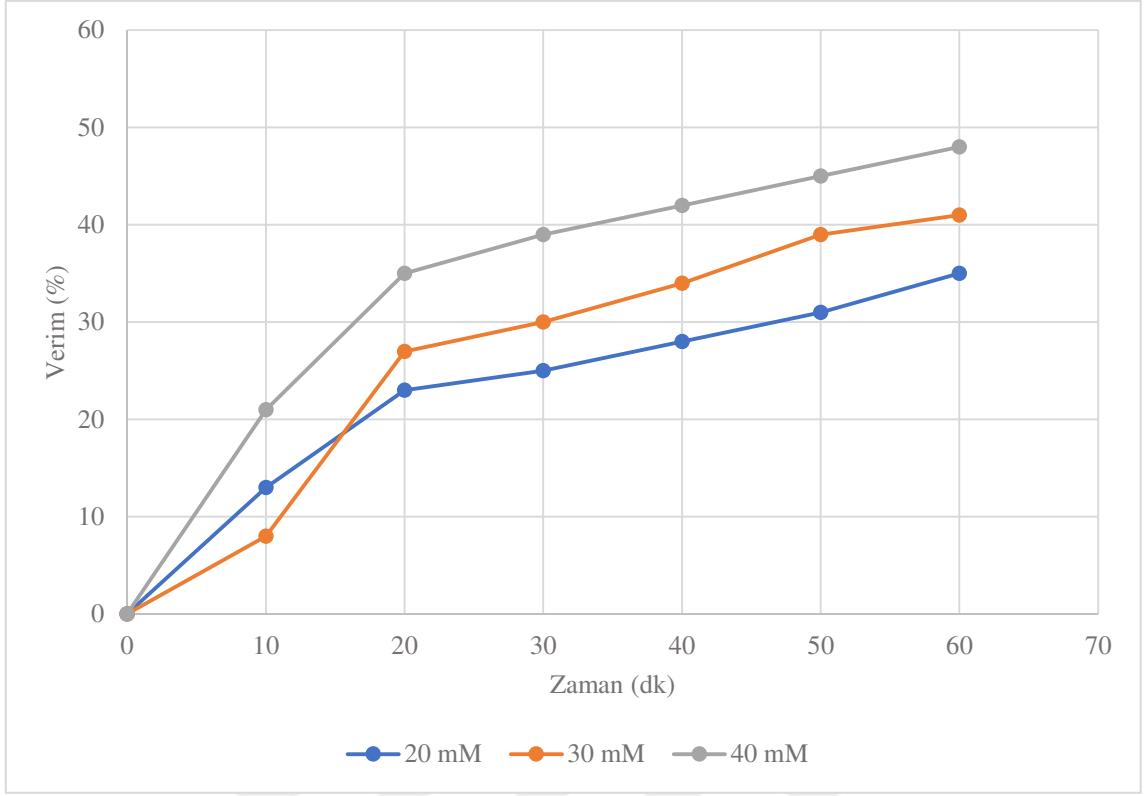
t (dk)	KOI	KOI Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	6945	0,00	11	40,3	0,00	0,00
10	6024	13	33	37,3	31,04	31,04
20	5305	23	40	27,3	45,42	76,46
30	5204	25	48	25,9	64,63	141,08
40	5000	28	58	29,6	98,67	239,75
50	4796	31	71	29,0	120,63	360,38
60	4492	35	98	40,4	201,75	562,13
pH₀: 5,42 - Eİ₀: 0,85 mS/cm pH_{NaNO3}: 5,30 - Eİ_{NaNO3}: 3,05 mS/cm pH₆₀: 8,54 - Eİ₆₀: 2,90 mS/cm						

Tablo 5.27. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 30 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

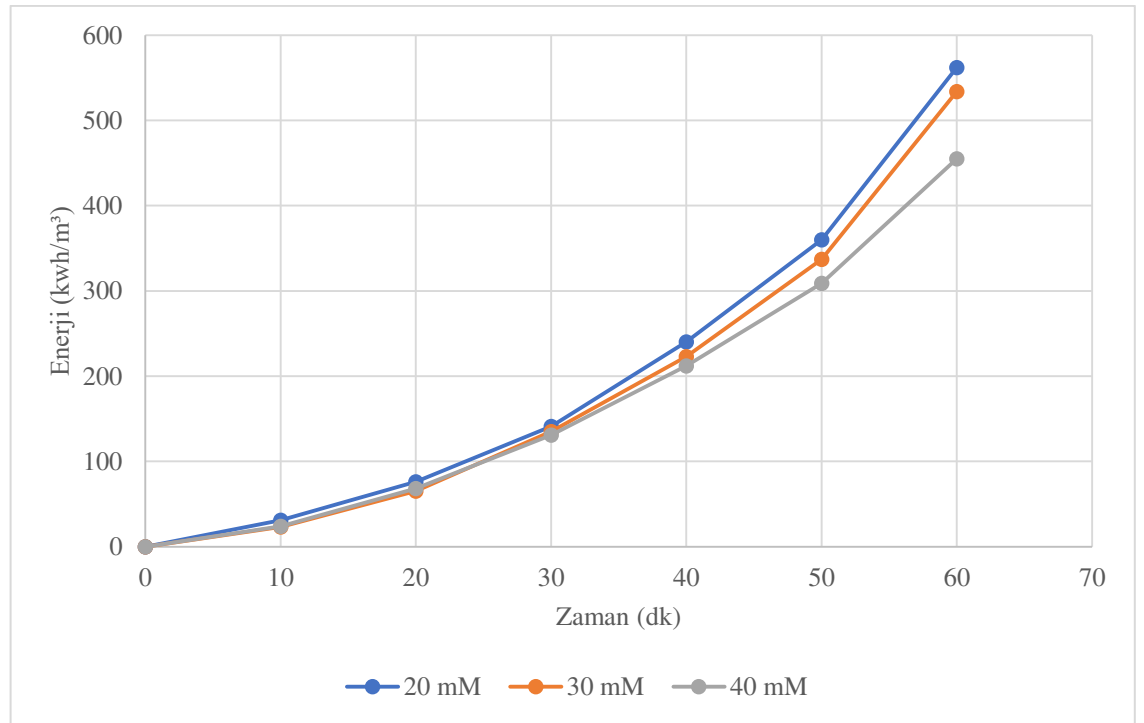
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	6420	0,00	11	36,8	0,00	0,00
10	5919	8	31	27,5	22,92	22,92
20	4715	27	42	25,3	42,08	65,00
30	4514	30	48	28,2	70,38	135,38
40	4213	34	62	26,4	88,00	223,38
50	3912	39	75	27,2	113,13	336,50
60	3812	41	86	30,4	197,00	533,50
pH₀: 5,23 - Eİ₀: 0,84 mS/cm pH_{NaNO3}: 5,07 - Eİ_{NaNO3}: 5,57 mS/cm pH₆₀: 10,04 - Eİ₆₀: 4,59 mS/cm						

Tablo 5.28. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 40 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7996	0,00	12	34,0	0,00	0,00
10	6334	21	31	29,2	24,29	24,29
20	5192	35	55	26,5	44,17	68,46
30	4880	39	59	25,2	63,00	131,46
40	4673	42	70	24,1	80,17	211,63
50	4361	45	81	23,5	97,71	309,33
60	4154	48	89	29,2	146,00	455,33
pH₀: 5,02 - Eİ₀: 0,82 mS/cm pH_{NaNO3}: 4,78 - Eİ_{NaNO3}: 4,87 mS/cm pH₉₀: 10,47 - Eİ₉₀: 4,44 mS/cm						



Şekil 5.15. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile NaNO₃ İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.16. Alüminyum Elektrot 30 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile NaNO₃ İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOI giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.28., Şekil 5.15. ve Şekil 5.16.'da 40 mM NaNO₃ destek elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere 60. dk. %48 arıtım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 40 mM NaNO₃ destek elektroliti ilavesi uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında ikisinde de 60. dk içerisinde hem verim düşük hem de işletme maliyetinin belirgin bir şekilde artış gözlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 40 mM NaNO₃ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

5.2.2. Demir Elektrot ile Destek Elektrolit İlavesine Göre Deneysel Çalışma

Demir Elektrot, 25 mA/cm² akım yoğunluğu ile 5, 10, 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.29. Demir Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 5 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

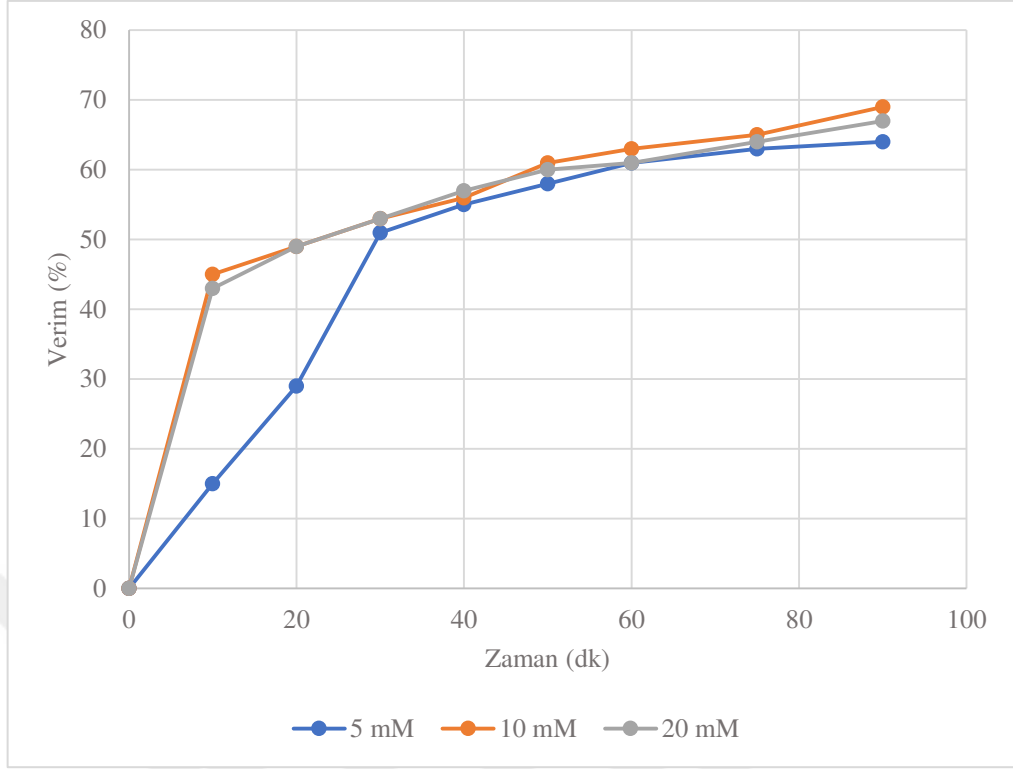
t (dk)	KOI	KOI Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7482	0,00	9	45,2	0,00	0,00
10	6331	15	24	20,4	16,96	16,96
20	5276	29	29	21,5	35,75	52,71
30	3645	51	40	46,6	58,25	110,96
40	3357	55	45	23,2	77,33	188,29
50	3165	58	55	22,5	93,54	281,83
60	2878	61	59	22,3	11,25	393,08
75	2782	63	63	21,4	133,44	526,52
90	2686	64	68	22,2	166,50	693,02
pH₀: 5,95 - Eİ₀: 0,90 mS/cm pH_{Na2SO4}: 5,80 - Eİ_{Na2SO4}: 1,47 mS/cm pH₉₀: 7,08 - Eİ₉₀: 1,69 mS/cm						

Tablo 5.30. Demir Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 10 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

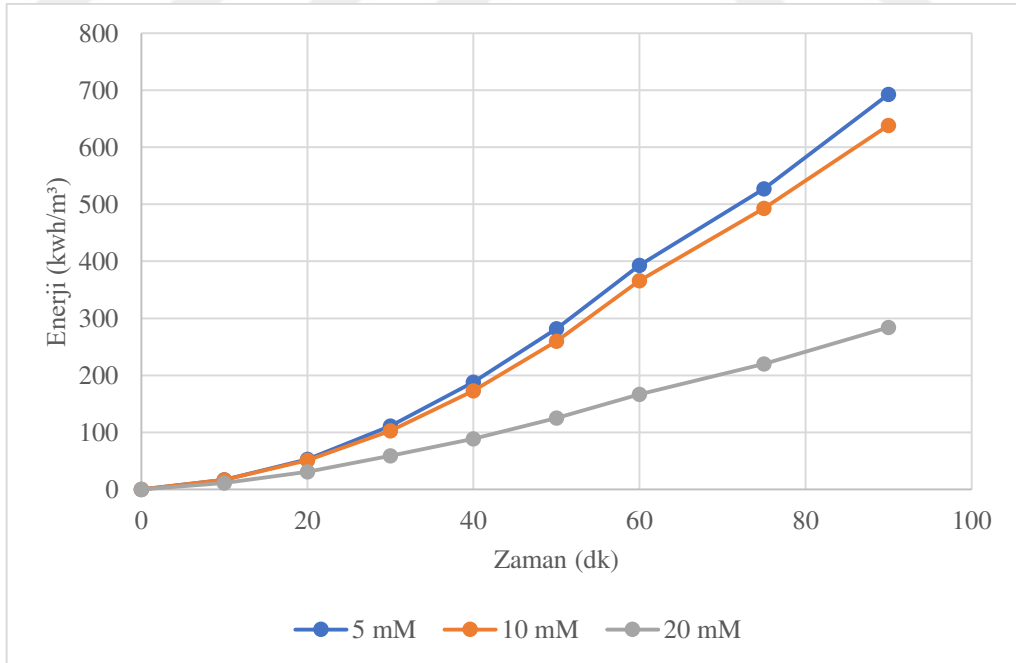
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	5741	0,00	9	26,4	0,00	0,00
10	3120	45	25	20,3	17,08	17,08
20	2895	49	34	20,5	33,75	50,83
30	2671	53	41	20,9	52,13	102,96
40	2546	56	49	21,0	70,00	172,96
50	2221	61	55	21,0	87,29	260,25
60	2122	63	59	21,2	105,75	366,00
75	1997	65	66	20,3	126,56	492,56
90	1772	69	69	19,4	145,13	637,69
pH₀: 5,75 - Eİ₀: 0,90 mS/cm pH_{Na2SO4}: 5,63 - Eİ_{Na2SO4}: 1,78 mS/cm pH₉₀: 6,87 - Eİ₉₀: 2,92 mS/cm						

Tablo 5.31. Demir Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM Na₂SO₄ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	6989	0,00	9	18,2	0,00	0,00
10	3994	43	23	13,0	10,83	10,83
20	3594	49	27	12,2	20,33	31,17
30	3295	53	32	11,0	27,38	58,54
40	2995	57	34	9,1	30,33	88,88
50	2796	60	36	8,6	35,63	124,50
60	2696	61	37	8,5	42,50	167,00
75	2496	64	42	8,4	52,50	219,50
90	2296	67	44	8,6	64,50	284,00
pH₀: 5,81 - Eİ₀: 0,90 mS/cm pH_{Na2SO4}: 5,72 - Eİ_{Na2SO4}: 4,01 mS/cm pH₉₀: 9,43 - Eİ₉₀: 4,34 mS/cm						



Şekil 5.17. Demir Elektrot 25 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile Na_2SO_4 İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.18. Demir Elektrot 25 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile Na_2SO_4 İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağlı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.31., Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.'de 20 mM Na_2SO_4 destek

elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %67 artırım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ilavesi uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında birinde verimin düşük diğerinde ise 20 mM Na₂SO₄ destek elektrolit veriminden yüksek olmasına rağmen işletme maliyetinin belirgin bir şekilde artış gözlenmiştir. Tablo 5.30. incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğu ile 10 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ilavesi ile verim %2 artış gösterdiği fakat işletme maliyetini 353,69 kWh/m³ arttırdığı gözlenmiştir. Bu durum ise güncel faturalandırma fiyat tarifeleri göz önüne alındığında 1 m³ atıksuyun KOİ'sinin %69'unun giderilmesi için harcanan yaklaşık 442 TL gibi bir fark oluşturmaktadır. %69 verim ile 1772 mg KOİ/L sonucu OSB atıksu deşarj standartları (1200 mg KOİ/L) ulaşamaması sebebiyle KÖP oranında ve ödemesinde herhangi bir değişikliğe uğratmamaktadır. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

Demir Elektrot, 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 5, 10, 20 mM NaNO₃ destek elektroliti eklenerek yapılmış çalışmalarda gözlemlenen deney sonuçları aşağıda bulunan tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.32. Demir Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 5 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

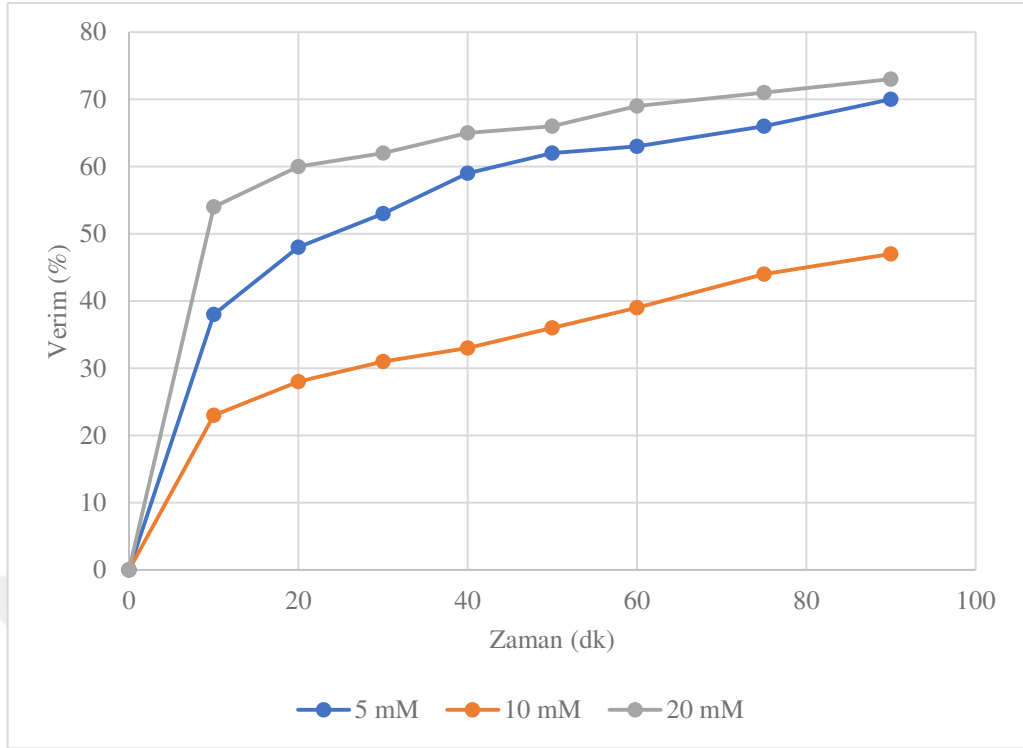
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7748	0,00	11	25,3	0,00	0,00
10	4801	38	26	21,3	17,75	17,75
20	4037	48	30	19,6	32,58	50,33
30	3601	53	35	20,5	51,13	101,46
40	3164	59	44	23,0	76,67	178,13
50	2946	62	46	22,0	91,67	269,79
60	2837	63	56	23,1	115,5	385,29
75	2619	66	69	22,7	141,56	526,85
90	2292	70	77	23,7	177,38	704,23
pH₀: 5,23 - Eİ₀: 0,84 mS/cm pH_{NaNO3}: 4,82 - Eİ_{NaNO3}: 1,47 mS/cm pH₉₀: 7,17 - Eİ₉₀: 1,95 mS/cm						

Tablo 5.33. Demir Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 10 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

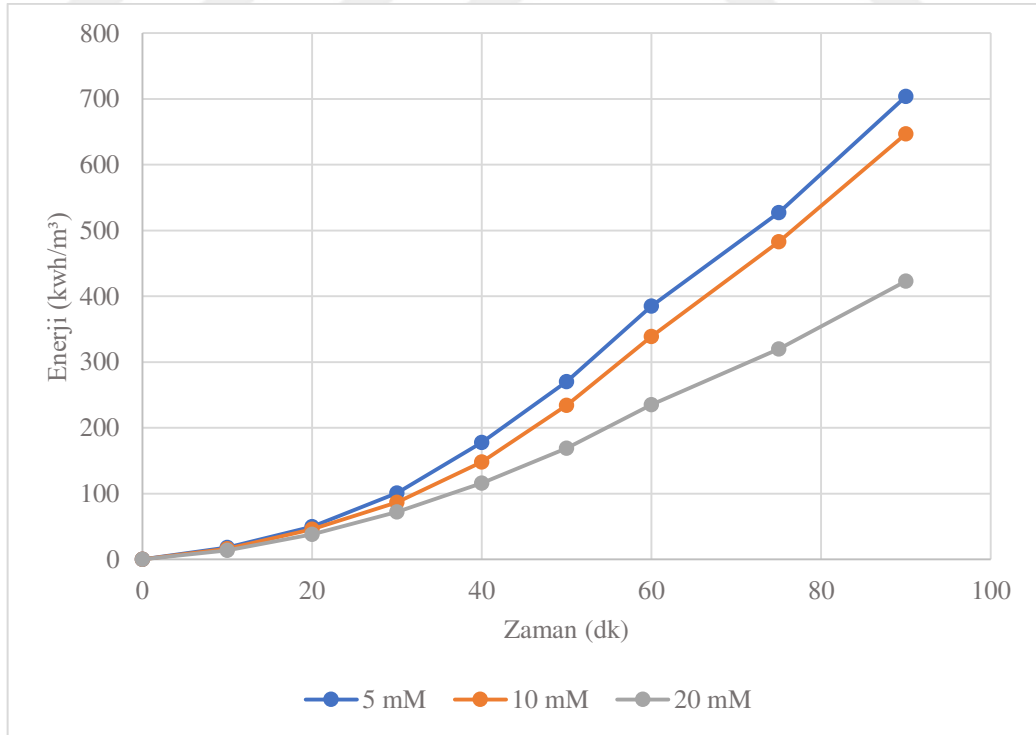
t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	6420	0,00	11	22,9	0,00	0,00
10	4916	23	21	19,3	16,08	16,08
20	4615	28	27	17,9	29,83	45,92
30	4414	31	33	16,6	41,50	87,42
40	4314	33	37	18,1	60,33	147,75
50	4113	36	41	20,8	86,67	234,42
60	3912	39	49	21,0	105,00	339,42
75	3612	44	54	23,0	143,75	483,17
90	3411	47	62	21,8	163,50	646,67
pH₀: 5,10 - Eİ₀: 0,83 mS/cm pH_{NaNO₃}: 4,93 - Eİ_{NaNO₃}: 1,90 mS/cm pH₉₀: 7,10 - Eİ₉₀: 2,66 mS/cm						

Tablo 5.34. Demir Elektrot 25 mA/cm² Akım Yoğunluğu ile 20 mM NaNO₃ İlavesi Deney Sonuçları

t (dk)	KOİ	KOİ Giderim (%)	T (°C)	Gerilim (V)	Enerji Tüketimi (kWh/m ³)	Kümülatif Enerji Tüketimi (kWh/m ³)
0	7996	0,00	13	19,1	0,00	0,00
10	3634	54	19	16,5	13,75	13,75
20	3219	60	26	14,3	23,75	37,50
30	3011	62	34	13,7	34,25	71,75
40	2804	65	36	13,3	44,33	116,08
50	2700	66	40	12,7	52,92	169,00
60	2492	69	41	13,2	66,00	235,00
75	2284	71	47	13,6	85,00	320,00
90	2181	73	52	13,7	102,75	422,75
pH₀: 4,84 - Eİ₀: 0,80 mS/cm pH_{NaNO₃}: 4,69 - Eİ_{NaNO₃}: 3,35 mS/cm pH₉₀: 7,13 - Eİ₉₀: 2,81 mS/cm						



Şekil 5.19. Demir Elektrot 25 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile NaNO_3 İlavesinin KOİ Giderimi Etkisi



Şekil 5.20. Demir Elektrot 25 mA/cm^2 Akım Yoğunluğu ile NaNO_3 İlavesinin Enerji Tüketimine Etkisi

KOİ giderim verimi, destek elektrolit miktarına bağı olarak farklı oranlarda arttığı gözlemlenmiştir. Tablo 5.34., Şekil 5.19. ve Şekil 5.20.'de 20 mM NaNO₃ destek elektrolit ilavesinde yapılan deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere %73 arıtım verimi elde edildiği, bu akım yoğunluğunda 20 mM NaNO₃ destek elektroliti ilavesi uygulanarak yüksek verim sağlanabileceği gözükmemektedir. Diğer destek elektrolit miktarlarına bakıldığında verimin düşük olduğu gibi işletme maliyetini belirgin bir şekilde arttırdığı gözlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM NaNO₃ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.

6. TARTIŞMA

Türkiye’de 1983 yılında 18132 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan 2872 sayılı Çevre Kanunu’nda endüstriyel atıksu kirliliği ile ilgili genel hususlar belirlenmiştir. 2000 yılında 24021 sayılı Resmi Gazete’de Organize Sanayi Bölgeleri Kanunu yayınlanmıştır ve orada da bahsi geçtiği üzere atıksular ortak arıtma tesisinin kabul edebileceği standartlarda olması ya da bu standartlara düşürülmesi amacıyla ön arıtma tesisi yapılması gerekliliği belirtilmiştir. 25687 sayılı Resmi Gazete’de 2004 yılında yayınlanan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği kapsamında deşarj standartları yayımlanmıştır. Endüstriyel atıksu kirliliklerinin önlenmesinde kılavuz niteliğinde olan bu yönetmelikler ve kanunlar bizlere izlememiz gereken yol haritasını çizmektedir.

Ülkemizde gıda sanayi atıksuları, kullanılabilir atıksu kaynakları içinde yer almaktadır ve arıtılmış atıksular, sanayide soğutma suyu veya proses suyu olarak yeniden kullanılabilir niteliktedir (Kaftan A., 2010). Literatürde son yapılan çalışmalarda elektrokoagülasyon üzerine birçok deneysel çalışma yapılmasına karşın çoğunlukla endüstriyel atıksu arıtımı üzerinde bir yoğunlaşma mevcuttur. Buda endüstriyel atıksu proseslerinde oldukça sık kullanılmaya başlayan bir sistem olmasının sebeplerinden biri niteliğinde olduğu değerlendirilmektedir.

Elektrokoagülasyon ile atıksu arıtımı ilk olarak 1889 yılında İngiltere’de araştırılmıştır (Matteson, 1995). Sonrasında Amerika Birleşik Devletleri’nde (ABD) 1909 yılında alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon ile atık suların arıtımı ile ilgili bir patent alınmıştır. Elektrokoagülasyon ile içme suyu arıtımı ilk olarak 1946 yılında ABD’de uygulamaya girmiştir. Bu çalışmada alüminyum anotlar kullanılarak elektrokimyasal hidroliz ile alüminyum hidroksit flokları oluşturulmuştur. Elektroliz ile oluşan flokların çökmesi ve sedimantasyonu hızlı olduğu gözlemlenmiş ve renk giderimi için kullanılmıştır. Uygulanan sistem aynı şekilde demir elektrotlar kullanılarak 1956 yılında İngiltere’de nehir sularının arıtımı için kullanılmıştır. 1946 ve 1956 yıllarında yapılan iki araştırmada renk ve bulanıklık gideriminde arıtılmış su yüksek kalitede elde edilmiştir. Kimyasal koagülasyon ile karşılaştırıldığında elektrokoagülasyon sisteminin kurulumu yüksek yatırım maliyeti olmasından ötürü o dönemlerde pek tercih edilmemekteydi. Günümüzde, atık su deşarj standartlarına getirilen sınırlamalardan dolayı elektrokoagülasyon yeniden uygulanmaya başlanmıştır. 1972 yılında elektrokoagülasyon ile gıda endüstrisi atıksuları arıtılmıştır. Bu çalışmada; elektrokoagülasyon çözünmüş hava flotasyonu ile yapılan kimyasal dozlama ile

karşılaştırılmıştır. Her iki proseste de flok oluşumu söz konusu olup, elektrokoagülasyonda daha hızlı yoğun bir floklaşma gözlenmiştir (Matteson, 1995).

Yapılan bir deneysel çalışmada yüksek yağ ve gres içerikli yemekhane atık sularını arıtılması için elektrokoagülasyon yöntemi kullanılmıştır. pH, iletkenlik, akım yoğunluğu, reaksiyon süresi, elektrot aralığı ve giriş konsantrasyon parametresi dahil olmak üzere farklı çalışma koşulları araştırılmıştır. Atıksu özelliklerine bağlı olarak optimum akım yoğunluğu 30 dk. içinde 10–14 A/m² olarak gözlemlenmiştir. İletkenliğin ise arıtma veriminin üzerinde çok az etkisi olduğu kanısına varılmıştır. Atıksuya destek elektrolit olarak ekstra tuzların ilavesi, arıtma verimliliğini artırmaya yardımcı olmamasına rağmen, güç tüketimini ve dolayısıyla işletme maliyetini önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. KOİ ve Yağ-Gres giderim verimliliğinin elektrotlar arası mesafenin arttırılmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma için optimum elektrotlar arası mesafe, işletme maliyeti ve arıtım verimi birlikte dikkate alındığında 10 mm olarak belirlenmiştir. Normal koşullar altında Yağ-Gres ve KOİ giderim verimliliği sırasıyla %95 ve %75'i aşmadığı gözlemlenmiştir (Xu, 2004).

Sirke endüstrisi atıksuyunun paralel plaka demir elektrot ile elektrokimyasal çöktürme yöntemiyle gerçekleştirilen arıtım çalışmasında farklı akım yoğunluklarına bağlı olarak KOİ yükleri, KOİ giderimleri ve enerji tüketimleri üzerine incelendiğinde optimum akım değerinin 2,25 A olduğu görülmüştür. Bu akım yoğunluğunda KOİ derişiminin yaklaşık 10000 mg/L'den 1818 mg/L'ye düştüğü belirlenmiştir. Optimum akım değeri olan 2,25 A ile farklı pH değerlerinde yapılan çalışmalar sonucunda en iyi arıtım performansının 46,09 kWh/m³ enerji tüketimi ve %93,7 KOİ gideriminin gerçekleştiği pH 9'da olduğu görülmüştür. Bu koşullarda, KOİ derişiminin yaklaşık 10000 mg/L'den 700 mg/L'ye düştüğü belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar, uygun akım ile birlikte uygun pH değeri olan pH 9 ile sürdürülmüştür. Destek elektrolit olarak Na₂SO₄ destek elektrolit kullanılında 5 mM destek elektrolitin optimum giderim verimine ulaştırdığını göstermiştir. Bu koşullarda, KOİ derişiminin 900 mg/L'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda paralel plaka demir elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen elektrokimyasal çöktürme yöntemiyle sirke endüstrisi atıksuyunun başarı ile giderilebileceği görülmüştür (Gerek, 2015).

Makarna ve kurabiye işleme tesislerinde endüstriyel atık sudan organik kirleticilerin uzaklaştırılması için yapılan bir çalışmada alüminyum elektrokoagülasyon ve kombine elektrokoagülasyon H₂O₂ prosesleri ile bir pilot kesikli reaktör kullanılarak

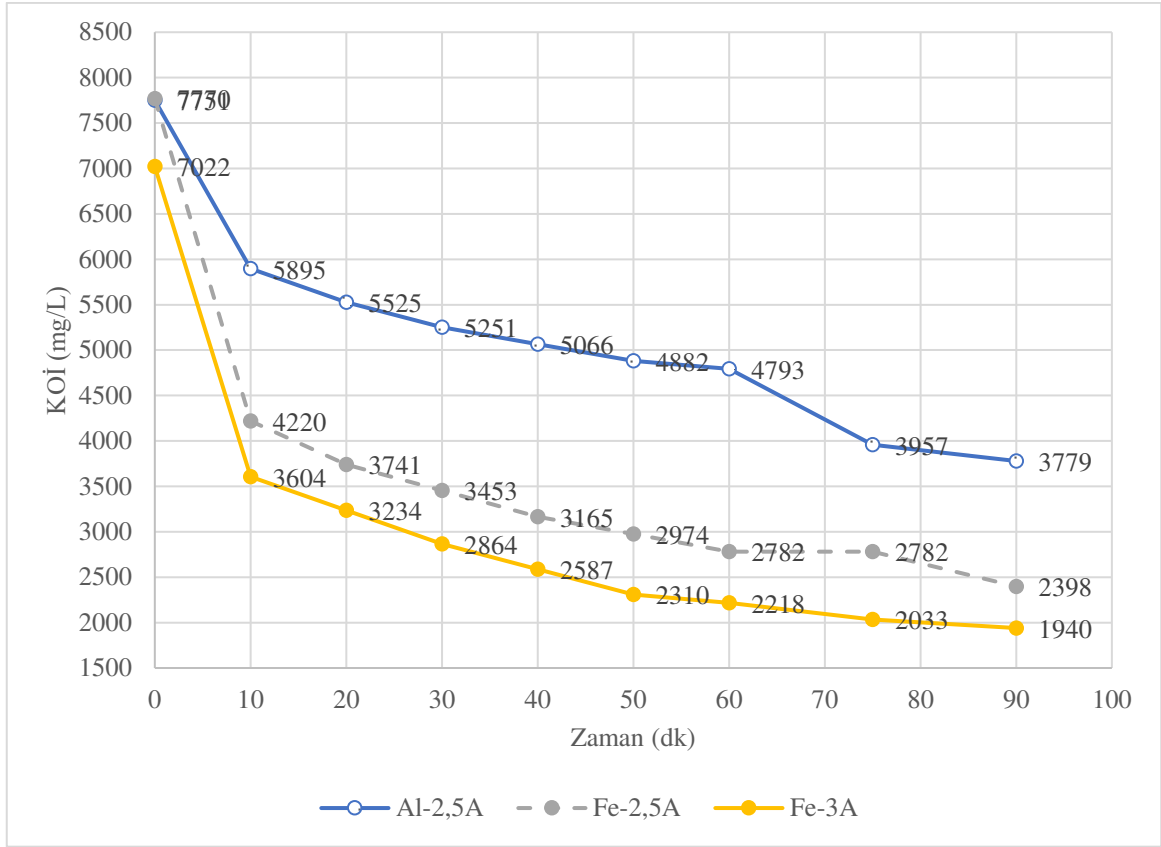
yapılmıştır. Reaktör, dikdörtgen bir kap, bir dizi alüminyum levhayı destekleyen iki adet saftan oluşmuştur. Reaktör 4 plaka katot olarak ve 4 plaka anot olarak bağlanarak tüm elektrotlar düz ve pürüzsüz yüzeylidir. Optimum çalışma koşulları olarak pH 4 ve 18,2 mA/m² akım yoğunluğu ile elektrokimyasal yöntem ile çalışarak organik kirliliğin giderilmesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, KOİ %90, biyokimyasal oksijen ihtiyacını (BOİ₅) %96 ve toplam katıları %95 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Çözeltinin pH'ını sülfürik asit ile düşürmenin oluşan çamur fazı oluşumuna ve kimyasal türlerine etkisi saptanmıştır. Atıksu kalitesini, ham ve arıtılmış atıksuyu karakterize etmek için UV-Vis spektrometresi ve döngüsel voltametri kullanılmıştır (Roa-Morales, 2006).

Bilecik İli, Söğüt İlçesi, Söğüt Belediyesi EC Elektroflokülasyon Prosesli Atıksu Arıtma Tesisi dengeleme rezervuarından temin edilen evsel nitelikli atıksu KOİ kirlilik parametresi üzerine analizler yapılarak optimum şartlar bulunmuş ve maliyet analizi yapılmıştır. Akım şiddeti, destek elektrolit miktarı ve türü, pH değişken parametre olarak belirlenmiş, bu parametrelerin KOİ giderim verimi ve enerji sarfiyatına olan etkileri araştırılmıştır. Alüminyum ve Demir elektrotlar ile yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında aralarında önemli bir fark olmamakla birlikte, Al anot ile yapılan EC uygulamalarında daha iyi KOİ giderimi sağlanmıştır. Evsel atıksuların EC yöntemi ile arıtımı üzerine yapılan bu çalışmada enerji ve elektrot sarfiyatı ile destek elektrolit miktarı baz alınmak üzere, arıtılmış suyun deşarj standartları göz önünde bulundurularak optimum fayda belirlenmiştir. Al elektrotun kullanıldığı sisteme 5 mM Na₂SO₄ ilave edilerek 15 mA/cm² akım yoğunluğu uygulanmıştır. 10 dakika sonunda %74 KOİ verimi ile atıksu deşarj standardına getirilmiştir. Bu şartlarda 5,66 kWh/m³ enerji gereksinimi ile 2,95 TL/m³ Enerji maliyeti, 0,2097 kg/m³ elektrot sarfiyatı ile 0,94 TL/m³ elektrot maliyeti, 0,71 kg/m³ Na₂SO₄ gereksinimi ile 3,12 TL/m³ destek elektrot maliyeti hesap edilmiştir. Çalışma sonucunda; Evsel nitelikli atıksuların arıtılmasında EC-EF sistemi başarı ile uygulanmış, sistemin işletme maliyetinin 7,00.-TL/m³ olduğu tespit edilmiştir (Erbilgin, 2021).

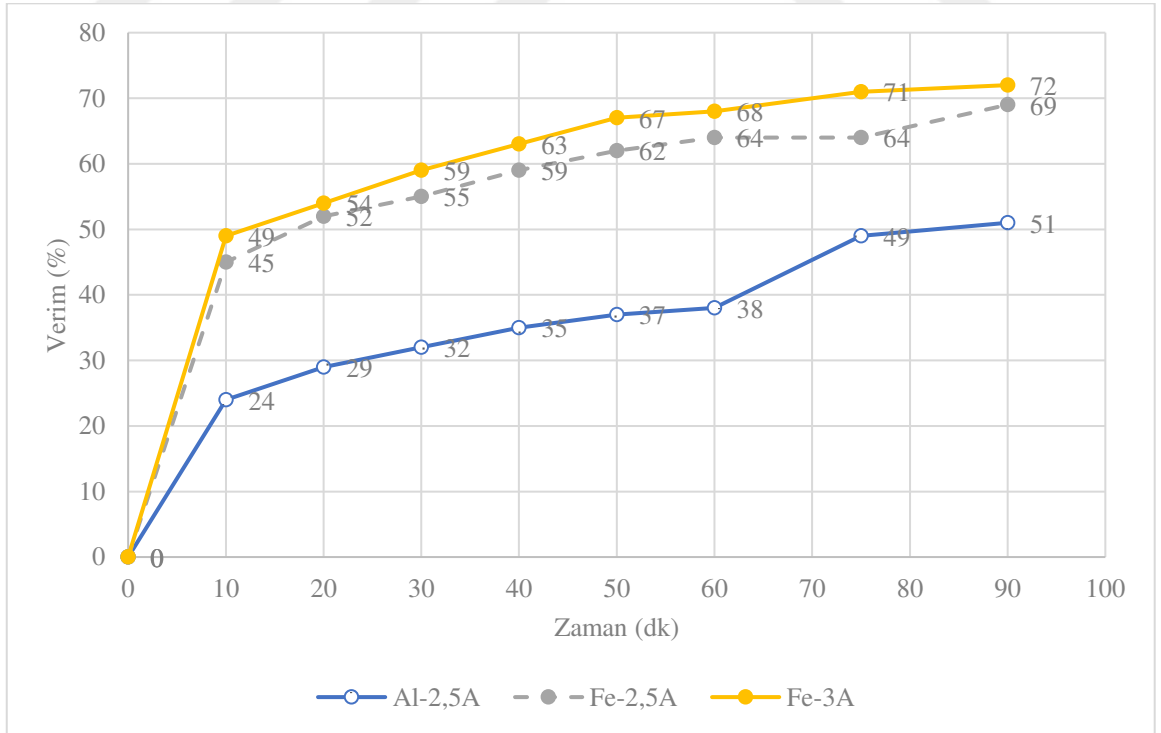
7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı gıda endüstrisi atıksuyunun elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak elektrot cinsi, akım yoğunluğu ve destek elektrolit miktarı gibi parametrelerin arıtım verimine etkileri ile birlikte optimum koşulların belirlenmesidir. Alınan numune atıksu Alüminyum ve Demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon yöntemi ile arıtılmış ve bu yöntemde KOİ parametresindeki değişim gözlenerek değerlendirilmiştir. Akım yoğunluğu ve destek elektrolitlerin (Na_2SO_4 ve NaNO_3) ilavesinde giderim verimine etkisi incelenmiştir. Akım yoğunluklarına, gerilim (volt) miktarına bağlı olarak tüketilen enerji miktarı hesaplanmıştır ve verim incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda yürütülen deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenerek yorumlanmıştır.

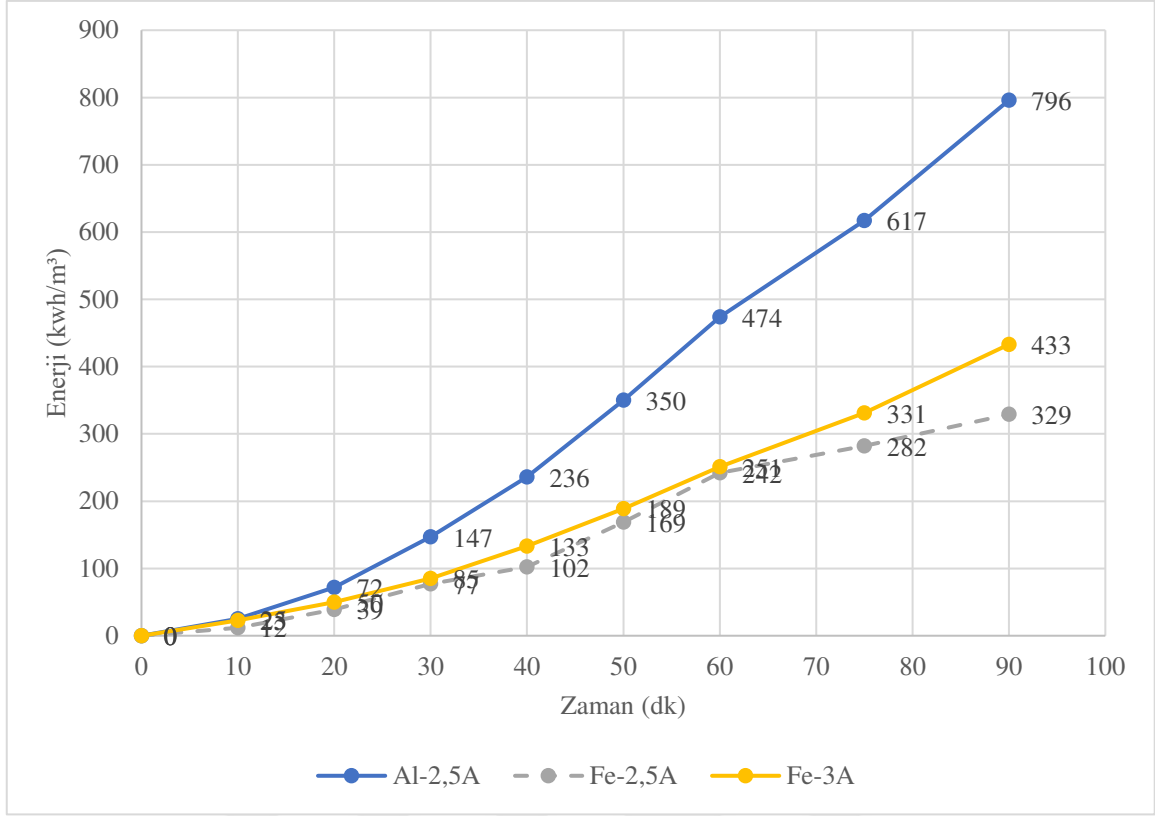
Alüminyum ve Demir elektrot ile akım yoğunluğuna göre yapılan bu deneysel çalışmaların sonucunda, Tablo 5.4. ve Tablo 5.9. karşılaştırılmıştır. 25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda Demir Elektrot ile %69 verim elde edilmiştir. Alüminyum elektrotta optimum koşullar dikkate alınıp değerlendirildiğinde 25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda Demir Elektrotla kıyasla hem verimin düşük olduğu hem de işletme maliyetini belirgin bir şekilde arttırdığı gözlenmiştir. Tablo 5.10. incelendiğinde 30 mA/cm^2 akım yoğunluğu arttırıldığında verim %3 artış gösterdiği fakat işletme maliyetini $104,48 \text{ kWh/m}^3$ arttırdığı gözlenmiştir. Bu durum ise güncel faturalandırma fiyat tarifeleri göz önüne alındığında 1 m^3 atıksuyun KOİ'sinin %72'sinin giderilmesi için harcanan yaklaşık 130 TL gibi bir fark oluşturmaktadır. %72 verim ile 1940 mg KOİ/L sonucu OSB atıksu deşarj standartları (1200 mg KOİ/L) ulaşamaması sebebiyle KÖP oranında ve ödemesinde herhangi bir değişikliğe uğratmamaktadır. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm^2 akım yoğunluğunda Demir Elektrot ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.



Şekil 7.1. Akım Yoğunluğuna Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği

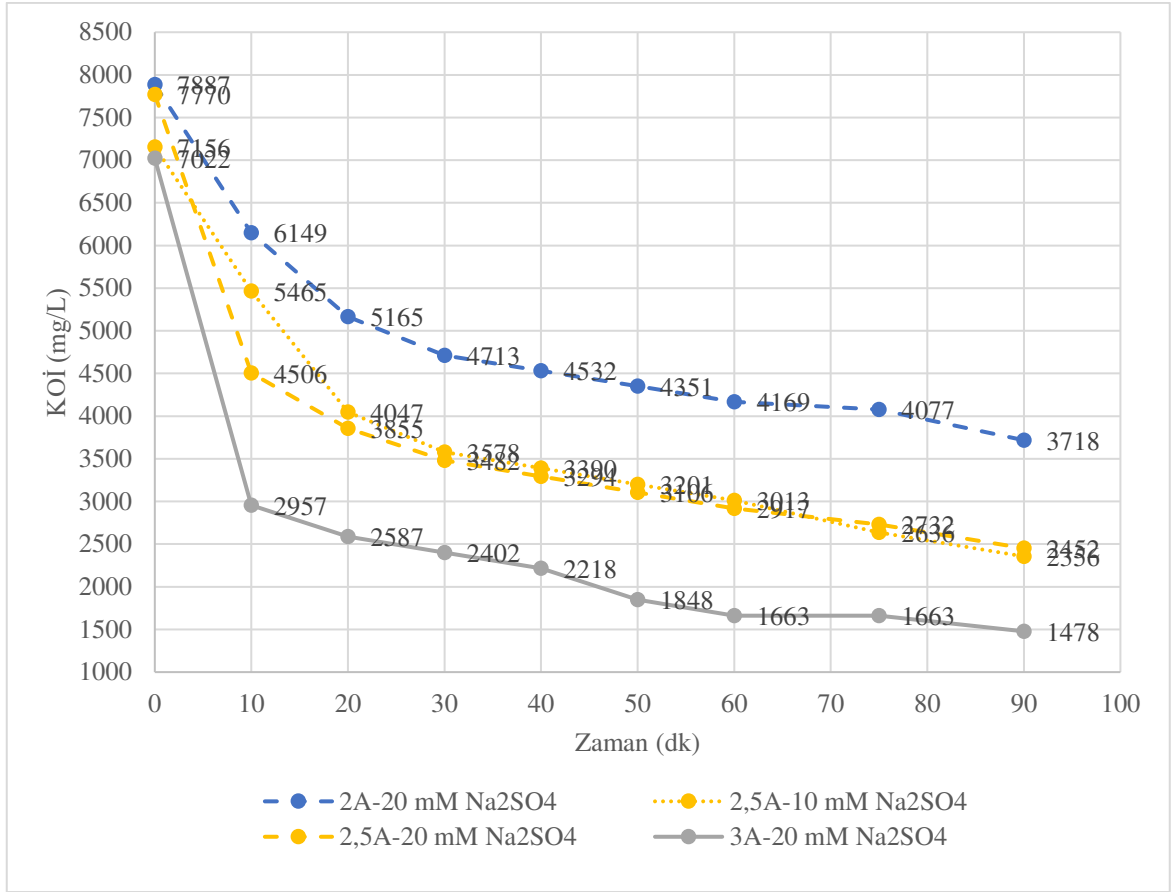


Şekil 7.2. Akım Yoğunluğuna Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği

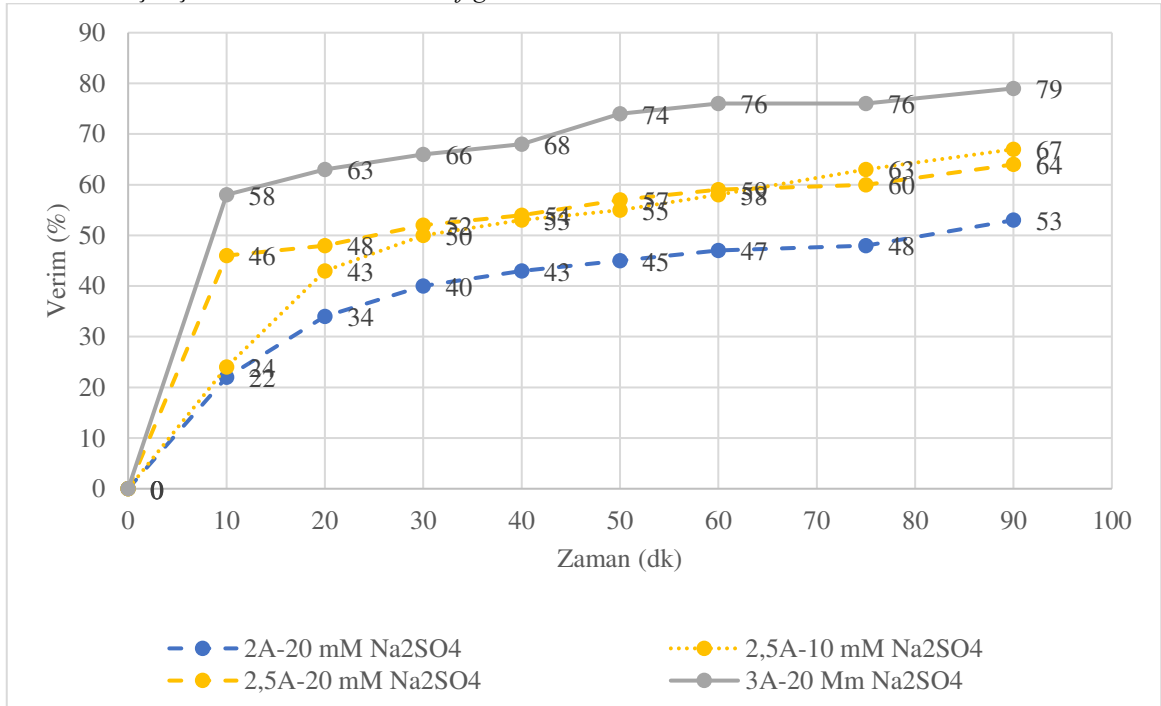


Şekil 7.3. Akım Yoğunluğuna Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği

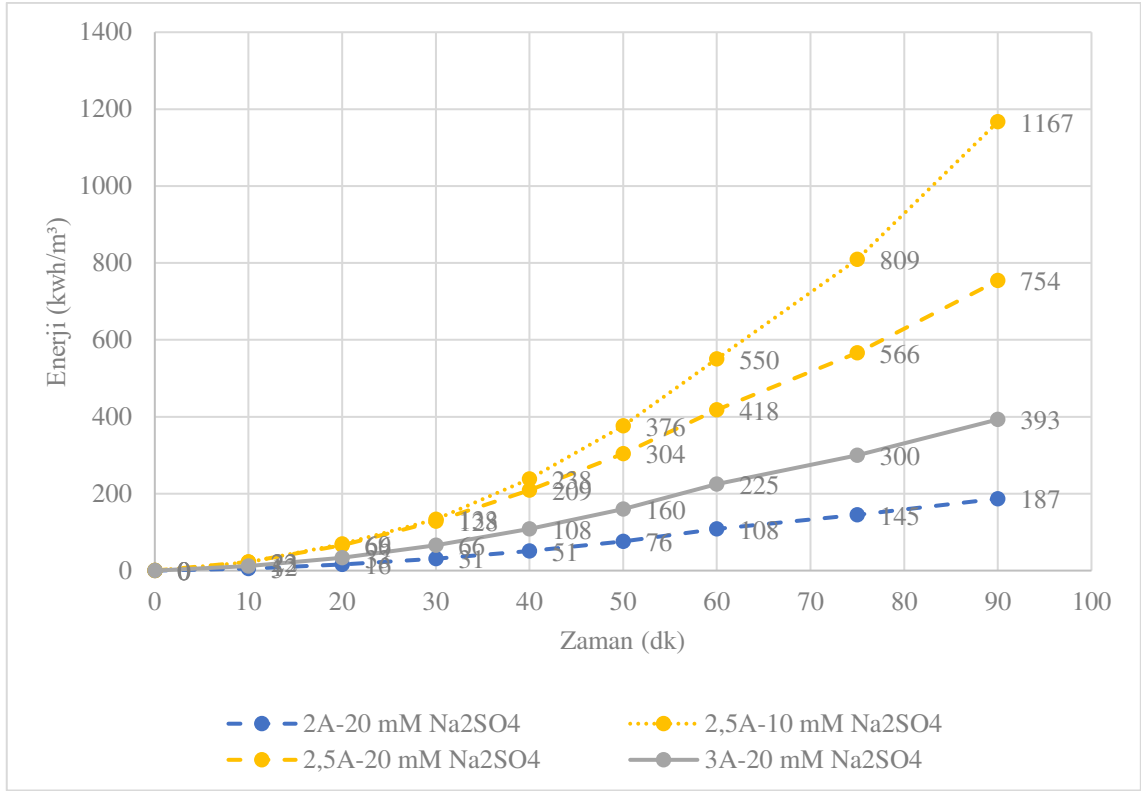
Alüminyum elektrot destek elektrolit ilavesine göre yapılan bu deneysel çalışmaların sonucunda, Tablo 5.11.-5.28. aralığında tüm tablolar karşılaştırılmıştır. Tablo 5.17.'de bulunan veri sonuçlarında da açıkça görüldüğü üzere, 30 mA/cm² akım yoğunluğunda, 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ile çalışarak %79 verim elde edilmiştir. Diğer tablolar değerlendirildiğinde hem verimin düşük olduğu hem de işletme maliyetini belirgin bir şekilde arttırdığı gözlenmiştir. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti eklenerek Alüminyum elektrot ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.



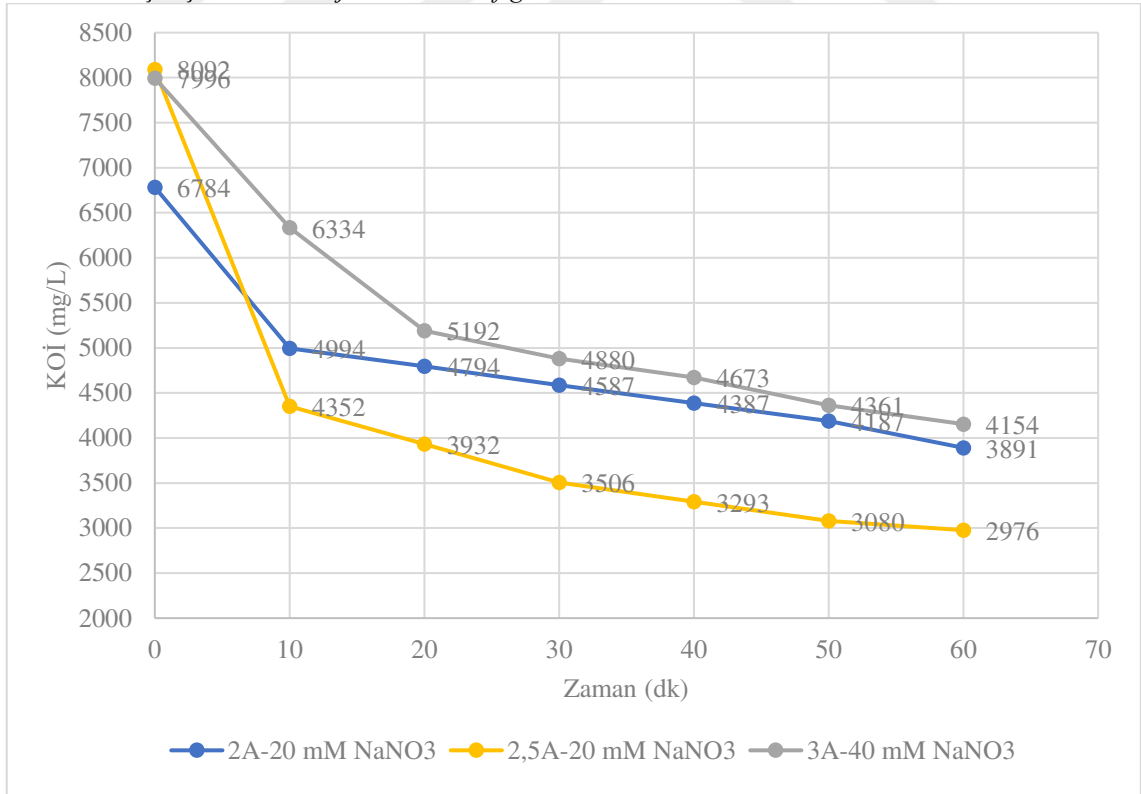
Şekil 7.4. Alüminyum Elektrot Na₂SO₄ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği



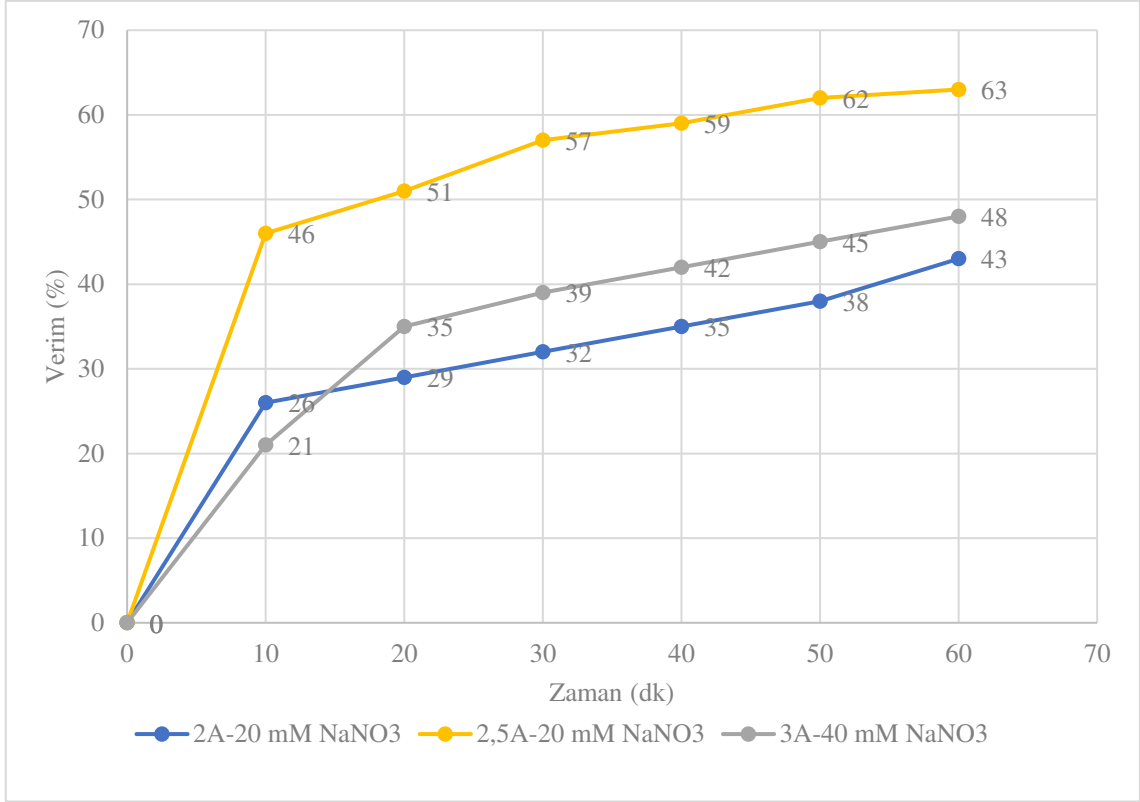
Şekil 7.5. Alüminyum Elektrot Na₂SO₄ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği



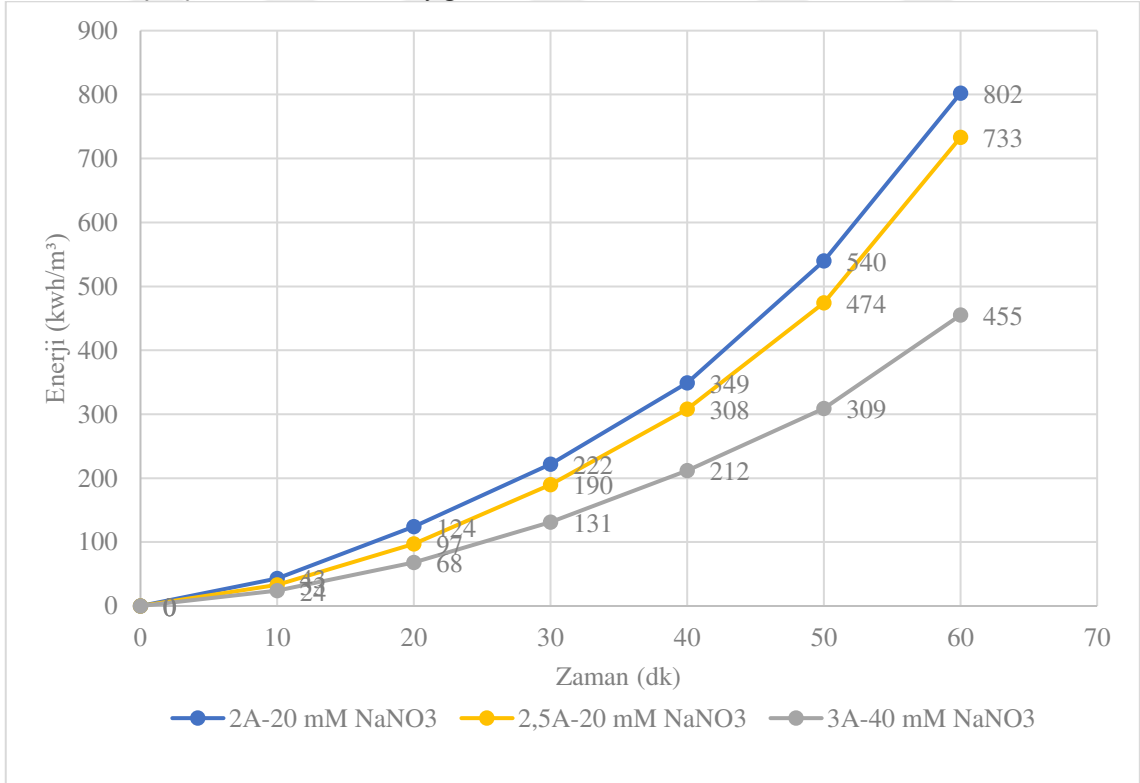
Şekil 7.6. Alüminyum Elektrot Na₂SO₄ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği



Şekil 7.7. Alüminyum Elektrot NaNO₃ Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği

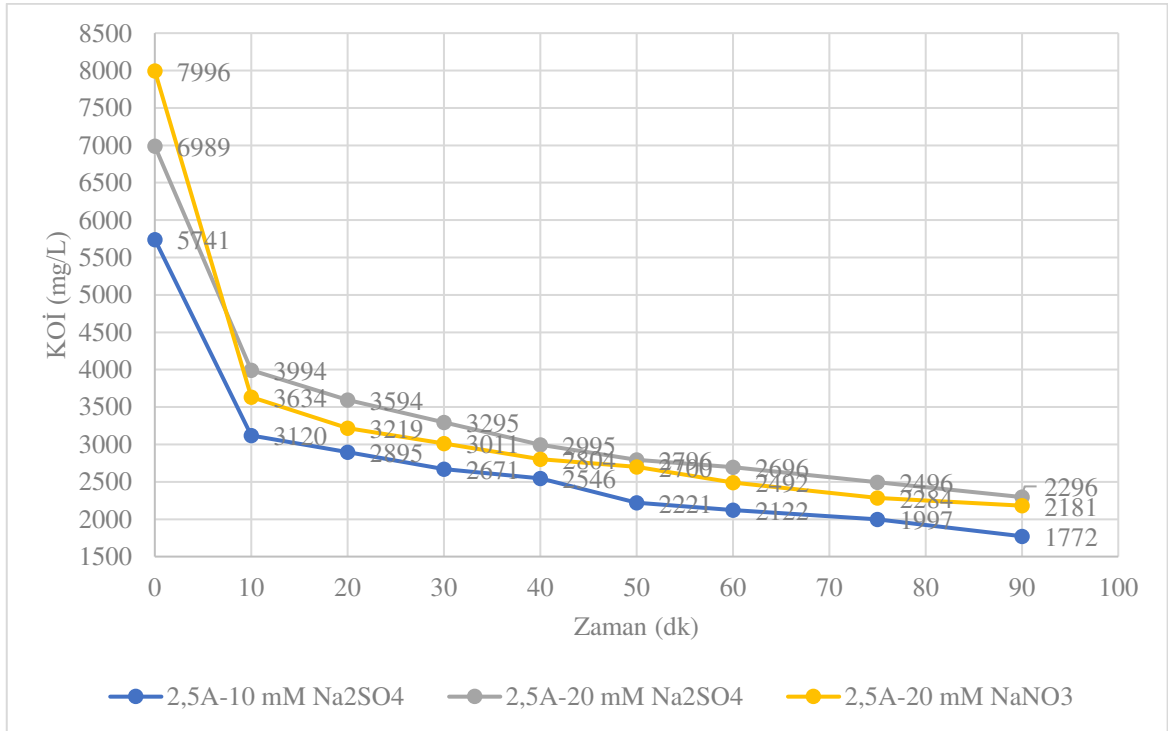


Şekil 7.8. Alüminyum Elektrot NaNO_3 Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği

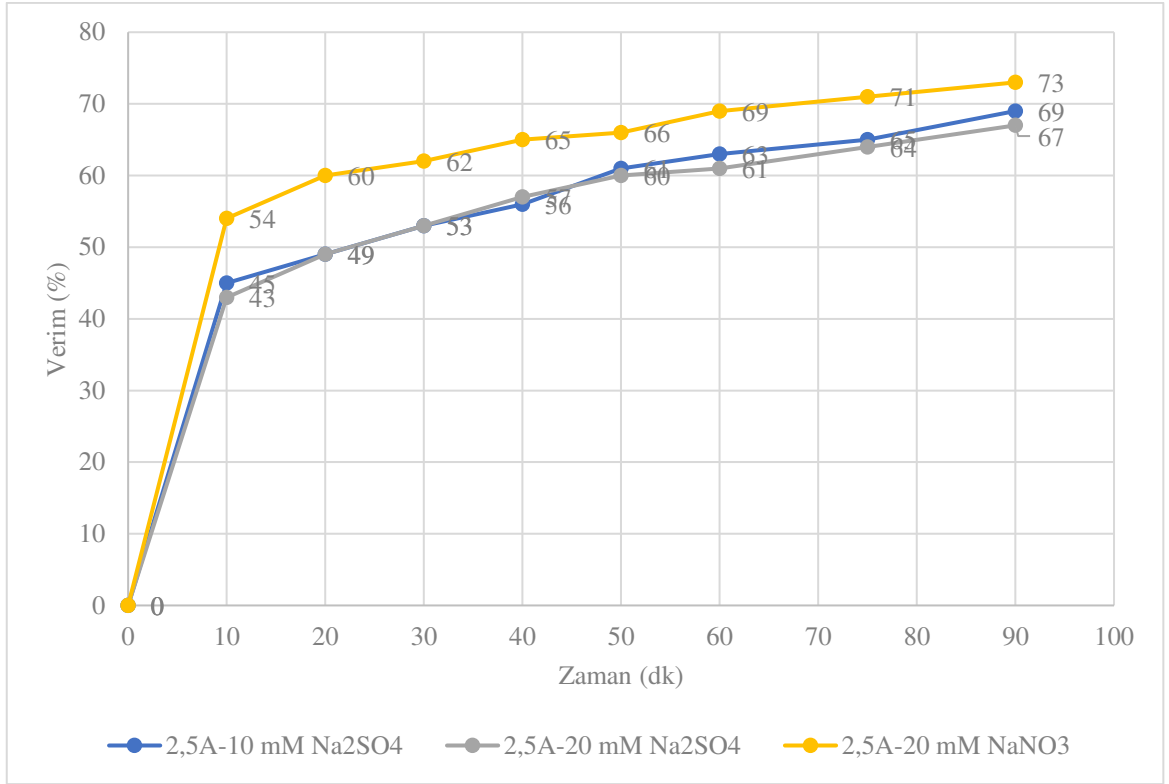


Şekil 7.9. Alüminyum Elektrot NaNO_3 Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği

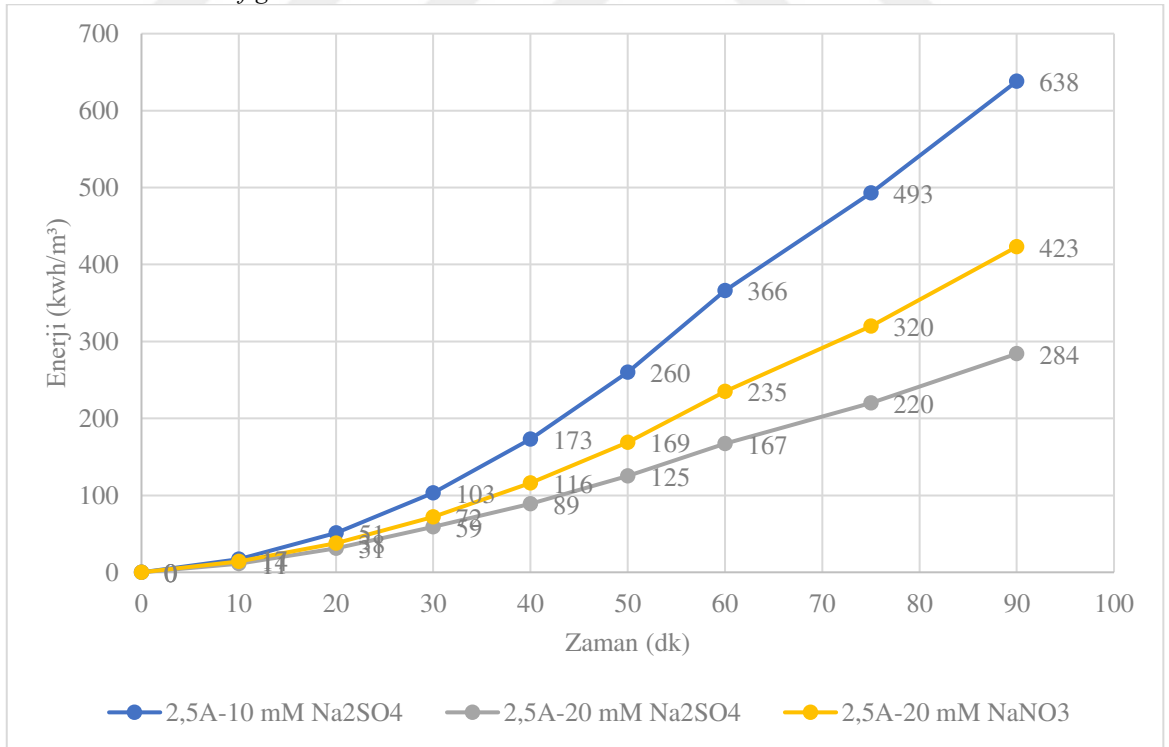
Demir elektrot destek elektrolit ilavesine göre yapılan bu deneysel çalışmaların sonucunda, Tablo 5.29.-5.34. aralığında tüm tablolar karşılaştırılmıştır. Tablo 5.31.'de bulunan veri sonuçlarında da açık görüldüğü üzere, 25 mA/cm² akım yoğunluğunda, 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ile çalışarak %67 verim elde edilmiştir. Diğer tablolar değerlendirildiğinde hem verimin düşük olduğu hem de işletme maliyetini belirgin bir şekilde arttırdığı gözlenmiştir. Tablo 5.30. ve Tablo 5.34 incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğu ile 10 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ilavesi ile verim %2 artış gösterdiği fakat işletme maliyetini 353,69 kWh/m³ arttırdığı gözlenmiştir. 25 mA/cm² akım yoğunluğu ile 20 mM NaNO₃ destek elektroliti ilavesinde verim %6 artış gösterdiği fakat işletme maliyetini 173,43 kWh/m³ arttırdığı gözlenmiştir. Bu durum ise güncel faturalandırma fiyat tarifeleri göz önüne alındığında 1 m³ atıksuyun KOİ'sinin %69'unun giderilmesi için harcanan yaklaşık 442 TL, %73'ünün giderilmesi için harcanan yaklaşık 217 TL gibi bir fark oluşturmaktadır. %69 verim ile 1772 mg KOİ/L, %73 verim ile 2181 mg KOİ/L sonuçları OSB atıksu deşarj standartları (1200 mg KOİ/L) ulaşamaması sebebiyle KÖP oranında ve ödemesinde herhangi bir değişikliğe uğratmamaktadır. Optimum işletme koşullarını tespit etmek için elde edilen sonuçlar incelendiğinde 25 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti ile çalışmanın daha iyi olacağı anlaşılmıştır.



Şekil 7.10. Demir Elektrot Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği



Şekil 7.11. Demir Elektrot Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği



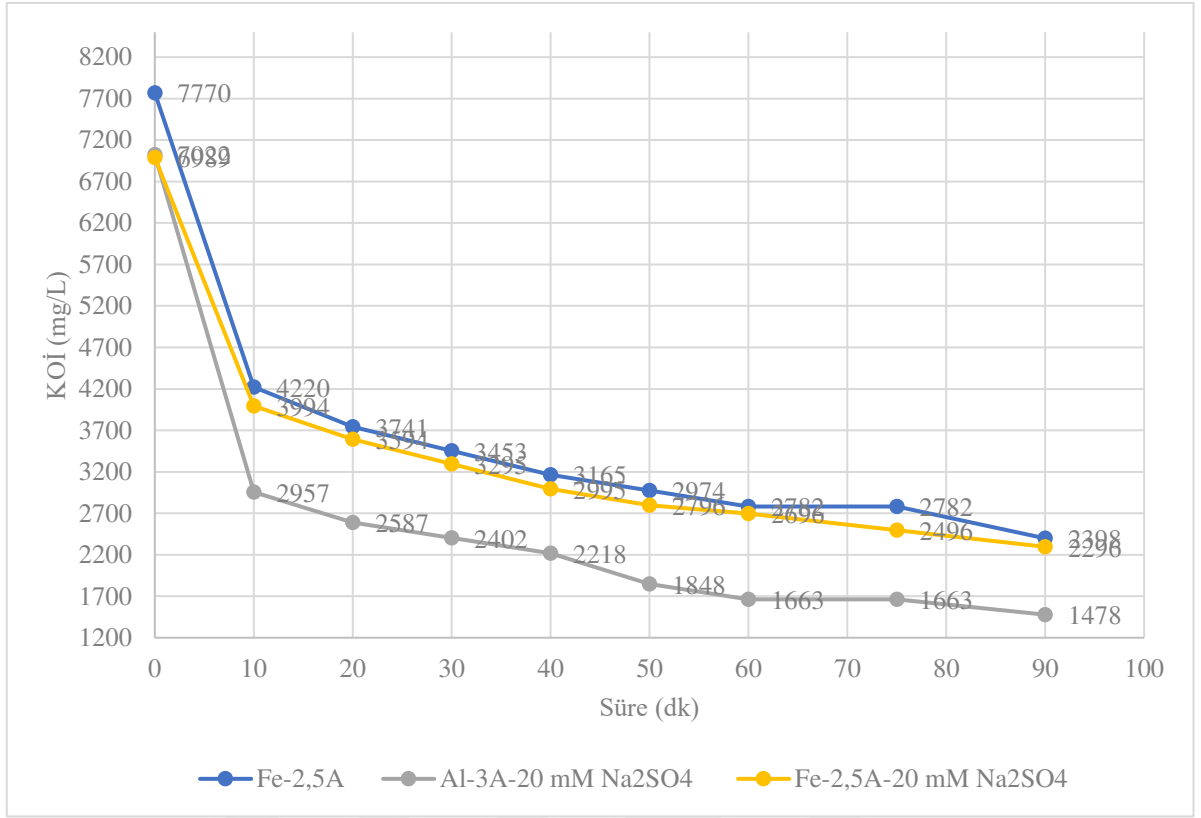
Şekil 7.12. Demir Elektrot Destek Elektrolit İlavesine Göre Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği

Elektrokoagülasyon prosesi için en iyi işletme koşulları belirlenirken işletme maliyeti de dikkate alınarak, en düşük maliyetle en iyi arıtımın sağlandığı çalışma değerleri belirlenmelidir.

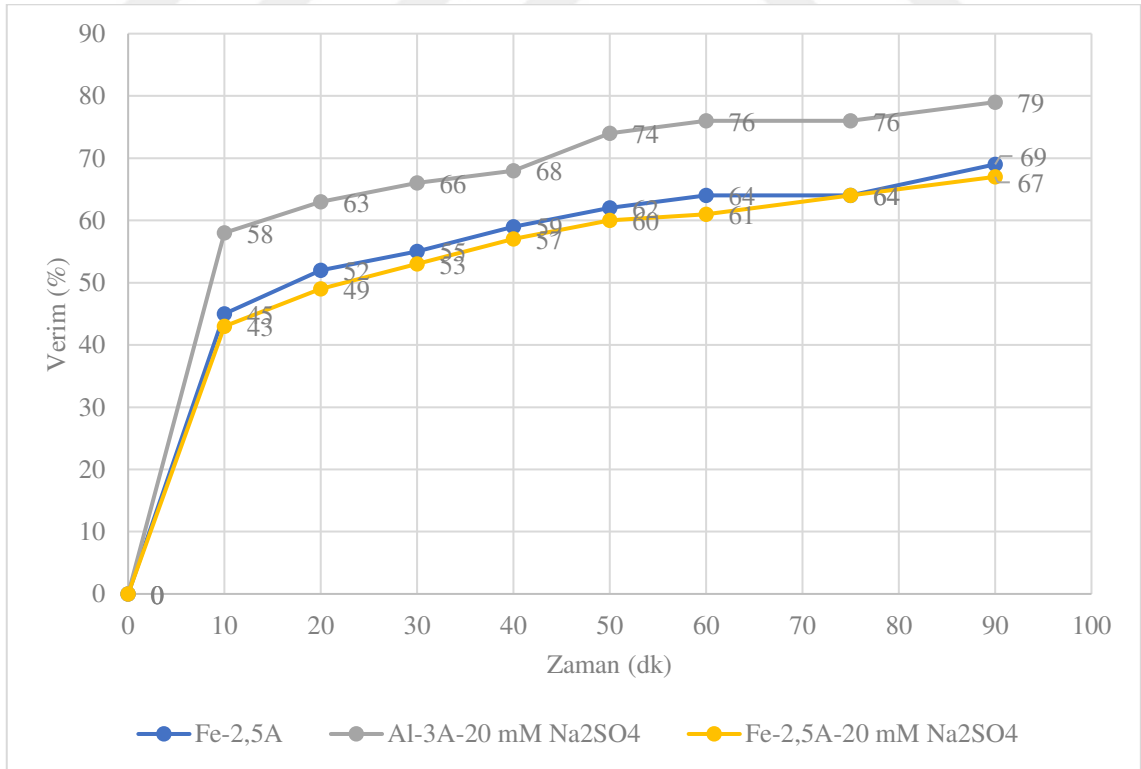


Görsel 7.1. Deney Sonunda 3 Saat Süre ile Bekletilen Numuneler

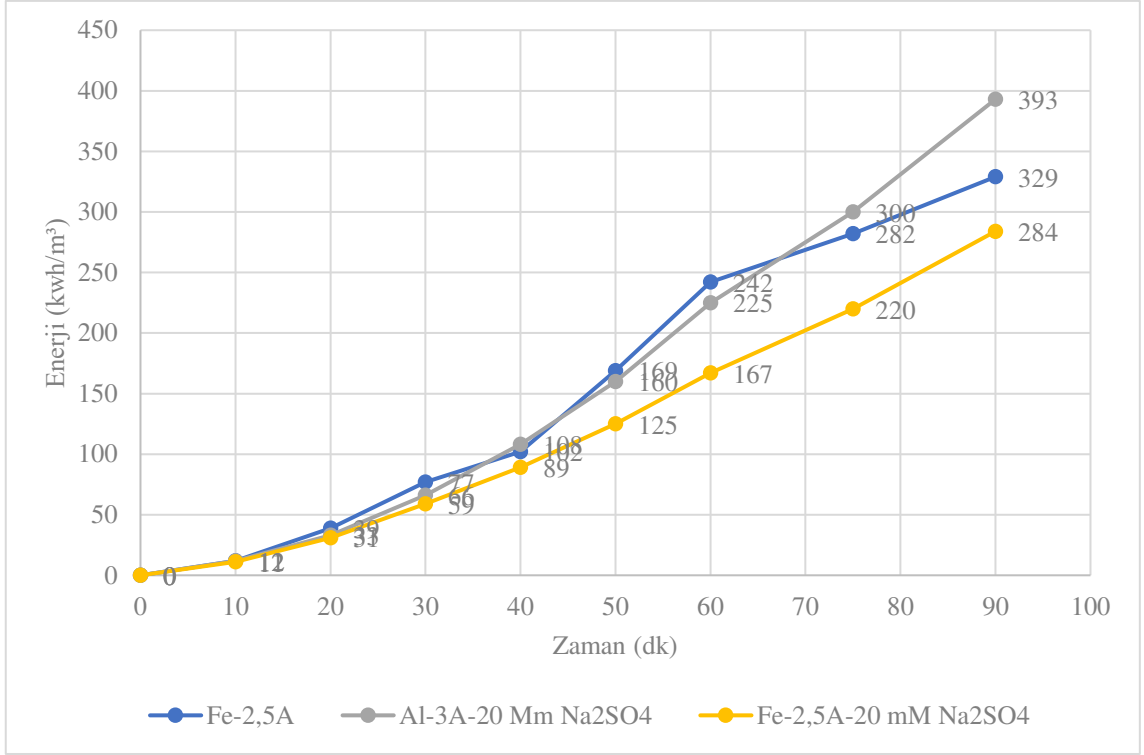
Bu deneysel çalışmada yapılan tüm deneyler sonucunda genel bir değerlendirme yapılır ise %79 verim elde edilen ve işletme maliyeti en az olan 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 20 mM Na₂SO₄ destek elektroliti eklenerek Alüminyum elektrot optimum çalışma koşuluna sahip olduğu görülmektedir. Fakat alüminyum elektrot ile çalışırken artan voltaj ve sıcaklık değerlerinde plaklar daha az dayanıklı olduğu ve Demir plakalara göre daha sık değiştirildiği, dipte oluşan çamur yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Demir elektrot ile çalışırken ise dayanıklı materyal, daha az dibe çöken çamur olmasına karşın suda oluşturduğu renklilik ile karşılaşılabilecek sınır değeri aşan renk parametresi ile tercih edilmeme sebebi olabilmektedir. Aynı zamanda demir elektrot ile çalışmada destek elektrolit ilavesi olmadan da oldukça fazla arıtım verimi elde edildiği ve enerji tüketimi alüminyum elektrota göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.13. Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların KOİ-Zaman Grafiği



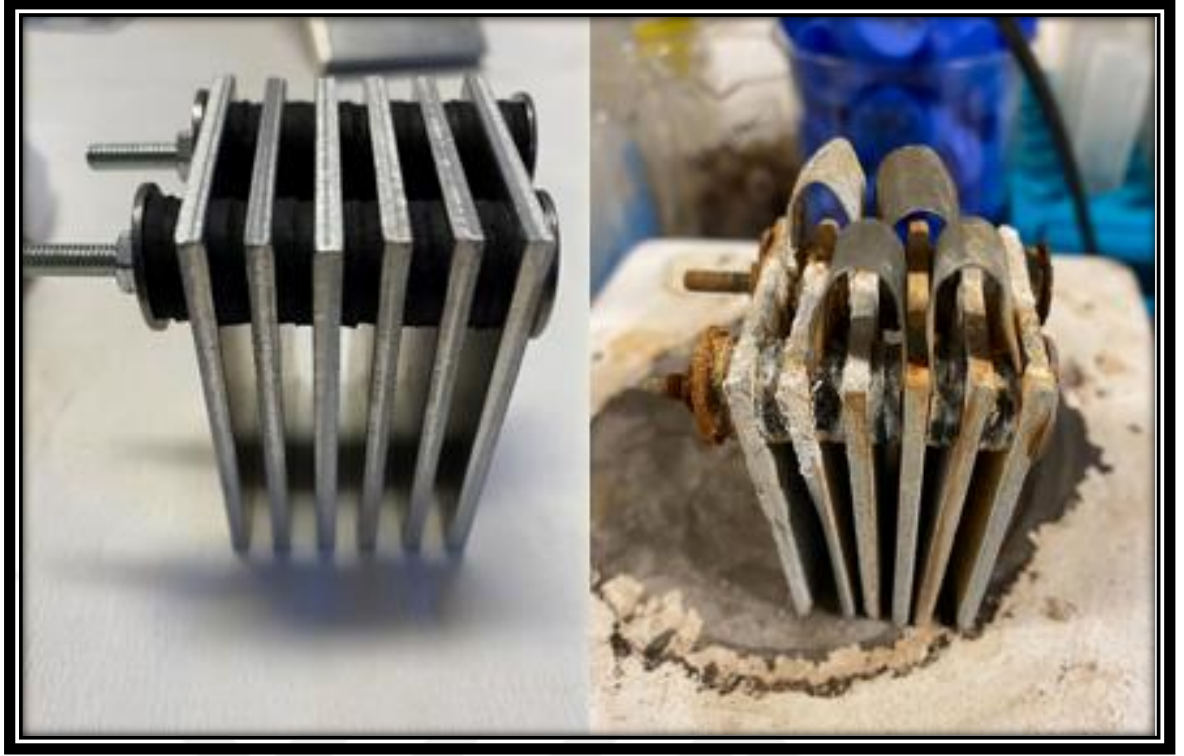
Şekil 7.14. Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların % Verim Grafiği



Şekil 7.15. Yapılan En Verimli Deneysel Çalışmaların Enerji Tüketim Grafiği



Görsel 7.2. Çalışmalar Sonucu Yıpranan Elektrot Kümeleri ve Malzemeleri



Görsel 7.3. *Deneysel Çalışmalardan Öncesi ve Sonrası Alüminyum Elektrot Kümesi*



Görsel 7.4. *Deneysel Çalışmalardan Öncesi ve Sonrası Demir Elektrot Kümesi*

Çalışmada bağlantı deşarj izin belgesi onaylanmayan bir gıda endüstrisinin minimum olarak OSB atıksu deşarj standartlarını sağlanması amacıyla elektrokoagülasyon ile ön arıtım yapılarak arıtılması planlanmıştır. Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, elektrokoagülasyon arıtımın gıda endüstrisi atıksuyunun arıtılmasında maliyet açısından uygun, etkin, kullanışlı ve kolay bir yöntem olduğunu göstermektedir. Tek başına oldukça yüksek bir verim elde edilmesine rağmen amaçlanan OSB sınır değerine ulaşılmadığından paket arıtım yapılarak ek arıtım prosesleri eklenebileceği kanısına varılmıştır.



KAYNAKÇA

- Arapoğlu, D. V. (2003). *Journal of Hazardous Materials Letters*, 98-191.
- Adhoum, N., Monser, L. (2004). Decolourization and removal of phenolic compounds from olivemill wastewater by electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing*, 43, 1281-1287.
- Baker, H. 1991, Genel Kimya KTÜ Yayınları.
- Balasubramanian, N., Madhavan, K., Arsenic Removal from Industrial Effluent Through Electrocoagulation., *Chem. Eng. Tech.*, 24, 5, 519-21, (2001).
- Başa, Ş., Kurt, S., Yasavul, E., Uçar, A. (2015). Tekirdağ İlinde İçme Suyu Kaynaklarının Sürdürülebilir Yönetimi. Uluslararası Sürdürülebilir Su Yönetimi Kongresi, 8-10 Ekim, 3-17, İzmir.
- Beck, E.C.,Giannini A.P. and Ramirez, E.R., Electrocoagulation clarifies food wastewater, *Food Technol.*, 28, 18-22. (1974).
- Byoud, F., Wakrim, A., Benhsinat, C., Zaroual, Z., EL Ghachtouli, S., Tazi, A., Chaair, H., Assabbane, A., Azzi, M. (2017). Electrocoagulation treatment of the food dye waste industry: Theoretical and experimental study. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(12), 4301-4312.
- Cames, M.C., Leclerc, J.P., Valentin, G., Rostan, A., Müller, P. and Lapicque F., Treatment of concentrated liquid wastes by electrocoagulation-electroflotation toward a closer understanding of the technique, *Chemie Ingenieur Tech.*, 73, 635-636, (2001).
- Can, O. T., Bayramoğlu, M., and Kobya, M., Decolorization of Reactive dye Solutions by Electrocoagulation Using Aluminium Electrodes, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 3391-3396, (2002).
- Casillas H.A.M., C. D. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation of Purification Technology*, 56, 204-211.
- Chen, G., Chen, X., Yue P.L. (1999) Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19, 65-76.
- Chen, G., Chen, X., and Yue, PL., Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater. *Journal of Environmental Engineering.*, Vol. 126, No. 9, (2000).
- Ciardelli, G. an Ranieri, N., The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and electroflocculation, *Water Res.*, 35, 567-572, (2001).

- Daneshvar N., Sorkhabi H.A., Kasiri M.B. (2004). Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials*, B112, 55-62.
- Delipınar, Ş. (2007). *Maya Endüstrisi Atıksularının Elektrokoagülasyon ve Kimyasal Koagülasyon ile Arıtımı*. Gebze: GYTE Müh. ve Fen Bil. Ens.
- Donini, J.C., Angle C.W., Kasperski, K.L., Preston, C.K., Kar, K.L., Hassan T.A. and Thind, S.S., (1992), The effect of different parameters on the optimisation of electrocoagulation, Waste Process. Recycl. Miner. Metall. Ind., Proc. Int. Symp.,1, 113-124.
- Droste, R. L., Gehr, R. L., (2018) 'Theory And Practice Of Water And Wastewater Treatment'. (Second Ed.). USA:Wilson.
- Eckenfelder, W. W. Jr., 1989. Industrial Water Pollution Control (Second Edition), McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, Printed in Singapore.
- Erbilgin, M. (2021). Elektroflokülasyonun Evsel Atıksu Arıtımında Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir: Eskişehir Teknik Üniversitesi. Çevre Müh. ABD. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Gerek, E. E. (2015). Sirke Üretim Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokimyasal Arıtımı ve Toksisitesi. Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Çevre Müh. ABD. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gotsi M., Kalogerakis N., Psillakis E., vd. (2005). Electrochemical oxidation of olive oil mill wastewaters. *Water Research* , 39, 4177-4187.
- Güney, S. (2013). *Elektrokoagülasyon prosesinin çevre mühendisliğindeki uygulamaların araştırılması*. Bursa: Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hakizimana, J.N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21.
- Holt, P.K., Barton, G.W. and Mitchell, C.A., Mathematical analysis of a batch electrocoagulation reactor, *Water Sci. Technol.*,2, 65-71, (2002).
- Ihara, I., Kanamura, K., Shimada, E., Watanabe, T. (2004). High gradient magnetic separation combined with electrocoagulation and electrochemical oxidation for the

- treatment of landfill leachate. Ieee Transactions On Applied Superconductivity, 14-2, 1558-1560.
- Inan H., Dimoglo A., Imek H., vd. (2004). Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation. *Separation and Purification Technology*, 36, 23-31.
- Janssen, L. J. J., Koene, L. (2002). The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection. *Chemical Engineering Journal*, 85, 137-146.
- Kabasolak, H. B., (1998). Atıksu arıtımı ve alıcı ortama etkileri, I. Atıksu Sempozyumu, 22-24 Haziran, 299-303, Kayseri.
- Kaftan A. (2010). Entegre Et Tesislerinde Atık Suyun Yeniden Kullanımı. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 81-88.
- Kobyas M., Hiz, H., Senturk, A., Aydinler C., Demirbas, E. (2005). Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 190, 201-211.
- Kobyas, M., and Delipinar, S. (2007). Treatment of the baker's yeast wastewater by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 154, 1133-1140.
- Liman, C. B., (1998). Atıksulardan kaynaklanan çevre sorunları, I. Atıksu Sempozyumu, 22-24 Haziran, 1-4, Kayseri.
- Lin S.H., Shyu C.T. and Sun M.C., Saline wastewater treatment by electrochemical method. *Water Res.* 32, 1059–1066. (1998).
- Matteson, M. D. (1995). Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles. *Colloids Surf.* , A 104, 101–109.
- Mills, D., A new process for electrocoagulation, *JAWWA*, 92, 34-43, (2000).
- Moussa, D.T., El-Naas, M.H., Nasser, M., Al-Marri M.J. (2017) A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *J. Environ.Manage* 186, 24-41.
- Öz, N., İleri, R., Şengörür, B., Başar, K. (1998). Evsel atıksu arıtma tesislerinde mikrobiyolojik giderim verimi, I. Atıksu Sempozyumu, 22-24 Haziran, 384-390, Kayseri.
- Öztürk, F. (2011). Katı atık sızıntı suyu miktarını azaltıcı yönetim stratejileri. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul. İstanbul Teknik Üniversitesi.

- Radjenovic, J., ve Sedlak, D.L. (2015). Challenges and opportunities for electrochemical processes as next-generation technologies for the treatment of contaminated water. *Environ. Sci. Technol.* 49, 11292-11302.
- Rajeshwar K., Ibanez JG., Swai GM., Electrochemistry and the environment. *Journal of Applied Electrochemistry*; 24:1077-91. (1994).
- Roa-Morales, G. C.-M.-C.-D. (2006). Aluminum electrocoagulation with peroxide applied to wastewater from pasta and cookie processing. . *Separation and Purification Technology*, 54, 124-129.
- Sanfan, W., Studies on economic property of pretreatment process of brackish water using EC method, *Desalination*, 82, 359-363, (1991).
- Sarıkaya, Y., (1993). ‘‘Fizikokimya’’ Ankara: Gazi Büro Kitabevi.
- Scialdone, O., Randozzo, S., Galia, A. ve Silvestri, G. (2009). Electrochemical oxidation of organics in water: Role of operative parameters in the absence and in the presence of NaCl. *Water Res*, 43, 2260-2272.
- Scott, K. (1995). *Electrochemical processes of clean technology*. UK-Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Shah, M. P. (2020). *Advanced Oxidation Processes for Effluent Treatment Plants*. Amsterdam: Elsevier.
- Sözbir M., Demir Elektrotlar kullanılarak tekstil atıksu ve boyalarının elektrokoagülasyon ile arıtımı, GYTE Müh. Ve Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Gebze 2002.
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY), Resmî Gazete 25687 (31.12.2004), md. 1-3.
- Tezcan Un, U., Koparal, S.A. ve Ogutveren U.K. (2009). Electrocoagulation of vegetable oil refinery wastewater using aluminum electrodes. *J. Environ. Manage* 90, 428-433.
- Tsai C.T., L. S. (1997). Electrolysis of soluble organic matter in leachate from landfills. *Water Research*, 31-12, 3073-3081.
- Tünay, O., (1996). ‘Endüstriyel Kirlenme Kontrolü’. İstanbul Teknik Üniversitesi, İTÜ Yayınları, Sayı: 1578, İstanbul.
- Ulu Kaç, F. (2016). Humic substances and NOM removal from aqueous solutions and lake waters (Terkos-Turkey and Saimaa-Finland) by electrocoagulation. Doktora Tezi. Gebze: Gebze İleri teknoloji Enstitüsü.

- Uygun R., Demir ve alüminyum elektrotlar kullanılarak tekstil boyalarının Elektrokoagülasyon ile arıtımı, GYTE Müh. Ve Fen Bil. Ens., Yüksek Lisans Tezi, Gebze 2002.
- Valero, D., Ortiz, J. M., Garcia, V., Exposito, E., Montiel, V., Aldaz, A. (2011). Electrocoagulation of wastewater from almond industry. *Chemosphere*, 84, 1290-1295.
- Vik, E.A., Carlson, D.A., Eikum, A.S., and Gjessing, E.T., Electrocoagulation of potable water, *Water Res.*, 18, 1355-1360, (1984).
- Woytowich, D.L., Dalymple, C.W. and Britton, M.G., Electrocoagulation (CURE) treatment of ship bilgewater for the U.S. coast Guard in Alaska, *J. Marine Technology Society.*, 2762-75, (1993).
- Xu, X. a. (2004). Treatment of refractory oily wastewater by electro-coagulation process. *Chemosphere*, 56, 889-894.
- Yürekli, A. (2019). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 1-12.
- Zhang, H., Ran, X., Wu, X. ve Zhang, D. (2011). Evaluation of Electro-oxidation of biologically treated landfill leachate using response surface methodology. *J. Hazard. Mater.* 188, 261-268.

Tuğçe ÇELİK BAŞOL

YÜKSEK ÇEVRE MÜHENDİSİ
C SINIFI İŞ GÜVENLİĞİ UZMANI
END. VE KENTSEL D SINIFI ATIKSU ARITIM TESİSİ
SORUMLUSU

Çalışacağım firmanın elde olan kaynaklarını en iyi şekilde kullanarak proje amaçlarına ulaşmayı hedefleyen biriyim. Öncelikle Kanunların ön planda olduğu, firma isteklerinin ve sorunlarının en kısa zamanda çözülmesi için işbirliği içinde, koordinasyonlu ve kontrollü projeler yönetmek temel amacımdır. İş yaşamında efektif ve hızlı olmak konusunda son derece özverili ve hevesli olduğumu, pozisyonun gerektirdiği sorumluluğu tecrübe edinmiş olarak merak ve istekle kariyerimi devam ettirmeyi hedeflediğimi belirtmek isterim.

İŞ DENEYİMİ

ÇEVRE MÜHENDİSİ

Armoni Çevre | Ekim 2021 - Halen | İstanbul

- Danışmanlık sektöründe; gıda, makina, seramik, kağıt, beyaz eşya, kimya, elektronik, maden, metal vb. birçok alanda çalışma imkanı bulmuş tüm süreçleri yönetmiş bulunmaktayım. Çevre Mevzuatı Süreçleri, ÇED Süreçleri, Atık Yönetimi, Atıksu Arıtma İşletimi, Sıfır Atık Danışmanlığı, ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemleri, Çevre Denetimleri, Çevre Eğitimleri, Dokümantasyon ve Raporlama alanlarının tümünde tecrübe sahibiyim.

ÇEVRE MÜHENDİSİ | ÇEVRE KOORDİNATÖRÜ | ÇEVRE MÜDÜRÜ

Eşçev Mühendislik | Mart 2016 - Eylül 2020 | Eskişehir

- Danışmanlık sektöründe; gıda, makina, seramik, kağıt, beyaz eşya, kimya, elektronik, maden, metal vb. birçok alanda çalışma imkanı bulmuş tüm süreçleri yönetmiş bulunmaktayım. Çevre Mevzuatı Süreçleri, ÇED Süreçleri, Atık Yönetimi, Atıksu Arıtma İşletimi, ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemleri, Çevre Denetimleri, Çevre Eğitimleri, Dokümantasyon ve Raporlama alanlarının tümünde tecrübe sahibiyim.
- Tehlikeli-Tehlikesiz Geri Dönüşüm, Tehlikesiz-Ambalaj Atığı Toplama Ayırma Tesisi tecrübem bulunmaktadır.
- 2016 yılından beri çalışmakta olduğum danışmanlık firmasında 2019 yılında 3. yılımı tamamlamamın ardından Koordinatörlük unvanı ile çalışmaya devam ettim. Yönetmelikte Koordinatör görevinin minimum 5 yıl deneyime sahip olarak güncellenmesinin ardından koordinatörlük görevimi devrettim.

İŞ GÜVENLİĞİ UZMANLIĞI STAJYERİ

Atalian Global Service Turkey | Eylül 2015 - Ekim 2015 | İstanbul

- İş Güvenliği Uzmanlığı C Sertifikası Eğitimi Zorunlu Stajı

EĞİTİM

TEZLİ YÜKSEK LİSANS | ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI-ÇEVRE TEKNOLOJİSİ

Eskişehir Teknik Üniversitesi | 2019 - 2022 | Eskişehir

Not Ortalaması: 3,41 | 4,00

TEZSİZ YÜKSEK LİSANS | İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ

Marmara Üniversitesi | 2021 - 2022 | İstanbul

Not Ortalaması: 3,90 | 4,00

LİSANS | ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

Pamukkale Üniversitesi | 2010 - 2015 | Denizli

Not Ortalaması: 2,76 | 4,00

BURSLAR/PROJELER

ESKİŞEHİR TEKNİK ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gıda Endüstrisi Atıksuyunun Elektrokimyasal Koagülasyonla Arıtımı | Eylül 2022

MARMARA ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS PROJESİ

Sokak Atık Toplayıcılarının Sağlık Güvenlik Riskleri | Şubat 2022

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ LİSANS TEZİ

TÜBİTAK 2209/A ÜNİVERSİTE YURT İÇİ ARAŞTIRMA PROJELERİ DESTEK PROGRAMI

Besi Çiftliği Atıksularının Aerobik-Anaerobik Arıtılabilirliği | Haziran 2014

PROFESYONEL DENEYİMLER/EĞİTİMLER

Çevre Mevzuatı ve Hukuku
İş Güvenliği Mevzuatı ve Hukuku
End. ve Kentsel Atıksu Arıtım Tesisi
Sorumluluğu

Microsoft Office Programları
NETCAD
ArcGIS

ISO Kalite ve Çevre Yönetimleri
GHP-GMP-Helal Gıda
6 (Six) Sigma
Kişisel Gelişim
Geleneksel ve İleri Girişimcilik

KİŞİSEL YETENEKLER

Güvenilir ve Sorumluluk Sahibi
Takım Çalışmasına Yatkın
Zaman Yönetimi
Hızlı Kavrama
İyi Derecede Sözlü İletişim
Sonuç Odaklı
Analitik
Araştırmacı